

การพัฒนาอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมโดยใช้โครงสร้าง
วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์

DEVELOPMENT OF DYNAMIC VOLTAGE RESTORER USING
THE TOPOLOGY OF DIODE-CLAMPED THREE-LEVEL
CONVERTER

วุฒิไกร จันทร์ขามเรียน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การพัฒนาอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมโดยใช้โครงสร้าง
วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์

วุฒิไกร จันทร์ขามเรียน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมโดยใช้โครงสร้าง
วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์

Development of Dynamic Voltage Restorer using The Topology of
Diode-Clamped Three-Level Converter

ชื่อ - นามสกุล

นายวุฒิไกร จันทร์ขามเรียน

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.

ปีการศึกษา

2555

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์รัชต์ เกิดชื่น, D.Eng.)

..... กรรมการ
(อาจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหมาย ผิวสอาด, Ph.D.)

วันที่ 7 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2555

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมโดยใช้ โครงสร้างวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดเคลมปี
ชื่อ – นามสกุล	นายวุฒิไกร จันทร์ขามเรียน
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนาอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมโดยใช้
โครงสร้างวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดเคลมปีเพื่อแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งปัญหาที่ทำให้
เกิดแรงดันตกชั่วคราวส่วนใหญ่จะเกิดจากความผิดปกติในระบบไฟฟ้า เมื่อมีแรงดันตกชั่วคราวเกิดขึ้นจะ
ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเป็นอย่างมาก จึง
จำเป็นอย่างยิ่งในการแก้ปัญหานี้

อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมในส่วนการชดเชยแรงดันโดยทั่วไปจะใช้วงจร
แปลงผันแบบ 2 ระดับซึ่งแรงดันด้านออกจะมีปริมาณฮาร์มอนิกส์มาก ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำ
วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดเคลมปีมาใช้ในอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมที่พิกัด
แรงดัน 3 เฟส 380 โวลต์ ขนาด 10 กิโลวัตต์แอมแปร์ เพื่อลดผลกระทบดังกล่าว โดยทำการจำลอง
การทำงานเปรียบเทียบระหว่างการใช้วงจรแปลงผันทั้งสอง พร้อมทั้งสร้างตัวต้นแบบโดยใช้วงจร
แปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดเคลมปี ควบคุมการทำงานด้วย dSPACE รุ่น DS1104 เพื่อยืนยัน
ประสิทธิภาพการทำงาน และใช้วิธีการควบคุมแบบสเปซเวกเตอร์

ผลการจำลองพบว่าในส่วนการชดเชยแรงดันด้วยวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอด-
เคลมปีมีสัญญาณความผิดเพี้ยนลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ โดยพิจารณา
จากรูปคลื่นแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผัน ในขณะที่ทำการชดเชยแรงดัน วิธีการควบคุมแบบ
สเปซเวกเตอร์สามารถตรวจจับและชดเชยแรงดันตกชั่วคราวได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้เวลาน้อยกว่าครึ่ง
วงรอบของแรงดัน อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้กับ dSPACE ในตัวต้นแบบได้ง่าย และจากผลการ
ทดลองสามารถยืนยันได้ว่าอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมที่นำเสนอมีประสิทธิภาพใน
การชดเชยแรงดันตกชั่วคราวได้ดียิ่งขึ้นและสามารถชดเชยได้ไม่ต่ำกว่า 0.1 วินาที

คำสำคัญ: อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม วงจรแปลงผัน 3 ระดับ ไดโอดเคลมปี
แรงดันตกชั่วคราว

Thesis Title	Development of Dynamic Voltage Restorer using The Topology of Diode-Clamped Three-Level Converter
Name - Surname	Mr. Wuthikrai Chankhamrian
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Krischonme Bhumkittipich, Ph.D.
Academic Year	2012

ABSTRACT

This thesis proposes the development of dynamic voltage restorer (DVR) using the topology of diode-clamped three-level converter. The DVR is the voltage sag compensator that cause by power quality problem. Voltage sag problem is mainly caused by fault in the power system. When the voltage sag occurs, it will damage the sensitive loads in industry. Therefore, it is necessary to solve this problem using the proposed DVR.

The conventional DVR has two-level converter in order to inject voltage into the power system during voltage sag. The output voltage of two-level converter has much signal distortion (harmonics) flow into the power system. Consequently, this thesis presents the new DVR using diode-clamped three-level converter at voltage 3 phase 380 V 10 kVA for mitigation as above. The diode-clamped three-level converter is comparing the conventional converter by simulation. Moreover, prototype of proposed DVR using diode-clamped three-level converter is created, it will controlled by dSPACE DS1104. And the proposed DVR use space vector control method.

The simulation result shows that the diode-clamped three-level converter can reduce signal distortion (harmonics) compared with the conventional converter. Space vector control method is able to rapidly detection and voltage sag compensation at period time less than $\frac{1}{2}$ cycles of voltage, which simply use to dSPACE in prototype. The experimental result shows that the proposed DVR has increased the efficiency and also it is able to compensation more than 0.1 second.

Keywords: dynamic voltage restorer, three-level converter, diode-clamped, voltage sag

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภคพิชญ์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัช เกิดชื่น ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทั้ง 4 ท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ประเมินรับรองต้นแบบชิ้นงานวิจัยและให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในการทำวิจัย ขอขอบคุณศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงานที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย และขอขอบใจเพื่อนนักศึกษาระดับปริญญาโททุกคนที่ทำให้กำลังใจในการดำเนินกิจกรรมการวิจัยจนได้ความสมบูรณ์ของงาน ขอขอบคุณบุคลากร บัณฑิตวิทยาลัยทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ นอกเหนือจากนี้ขอขอบคุณผู้บริหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่มอบทุนสนับสนุนพัฒนาบุคลากรตลอดระยะเวลาในการศึกษาของผู้วิจัย

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

วุฒิไกร จันทร์ขามเรียน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
สัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน.....	3
1.6 ข้อยกเว้นของวิทยานิพนธ์.....	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องศึกษาเพื่อออกแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม.....	5
2.2 ความเป็นมาของปัญหาที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน.....	8
2.3 แรงดันตกชั่วคราว.....	11
2.4 อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม.....	16
2.5 แบบจำลองของระบบ.....	36
2.6 แผนภาพของการทำงานวิจัย (Flow Chart).....	37
2.7 กรอบของการทำงานวิจัย (Frame Work).....	38
2.8 สรุปผลเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	38
3 การออกแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมและผลการจำลอง.....	39
3.1 แนวคิดในการออกแบบและการสร้างอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม.....	39

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.2 แรงดันและกระแสเชิงเวกเตอร์	41
3.3 การออกแบบส่วนการควบคุม.....	44
3.4 การออกแบบส่วนที่ใช้เก็บพลังงาน	50
3.5 การออกแบบส่วนการแปลงพลังงาน	52
3.6 การจำลองการทำงานบน MATLAB/SIMULINK.....	65
3.7 สรุปการออกแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมและผลการจำลอง	111
4 การทดสอบการทำงานและผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	112
4.1 โครงสร้างของระบบ.....	112
4.2 ผลการทดสอบการทำงาน	119
4.3 สรุปการทดสอบการทำงาน	128
5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	129
5.1 สรุปผลการวิจัย	129
5.2 ข้อเสนอแนะ	130
รายการอ้างอิง.....	131
ภาคผนวก.....	134
ภาคผนวก ก Datasheet.....	135
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	156
ประวัติผู้เขียน	234

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สาเหตุและผลกระทบของปรากฏการณ์ทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า.....	8
2.2 การเปรียบเทียบมาตรฐานของปรากฏการณ์แรงดันตกชั่วครู่.....	11



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แรงดันตกชั่วครู่ที่เกิดจากความผิดปกติของชนิดเฟสเดียวต่อกราวด์	11
2.2 กราฟเส้นโค้งที่แสดงความสามารถในการทนทานของคอมพิวเตอร์ต่อสัญญาณแรงดัน รบกวน	12
2.3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วครู่	14
2.4 วงจรอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วครู่แบบอนุกรม	17
2.5 อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วครู่แบบอนุกรมเปรียบเสมือนแหล่งจ่ายแรงดันที่ต่ออนุกรม	17
2.6 เฟสเซอร์ไคอะแกรมของวิธีการชดเชยแบบ Pre-Fault	18
2.7 เฟสเซอร์ไคอะแกรมของวิธีการชดเชยแบบ In-Phase	18
2.8 เฟสเซอร์ไคอะแกรมของวิธีการชดเชยแบบ Minimum Energy	18
2.9 ส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วครู่และตำแหน่งการติดตั้ง.....	19
2.10 วงจรอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วครู่แบบอนุกรมแบบสามเฟส	20
2.11 วงจรอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วครู่แบบอนุกรมแบบหนึ่งเฟส	20
2.12 วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์แบบ 1 เฟส	23
2.13 รูปคลื่นสัญญาณควบคุมแบบ PD และแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผัน 3 ระดับ แบบไดโอดแคลมป์	24
2.14 วงจรพื้นฐานของวงจรแปลงผัน 5 ระดับแบบฟลายอิงคาปาซิเตอร์ 1 กิ่ง.....	25
2.15 เทคนิคการสวิตชิงแบบ CPS-SPWM ของวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบฟลายอิง คาปาซิเตอร์.....	26
2.16 วงจรแปลงผันหลายระดับแบบคาสเคด	27
2.17 รูปคลื่นแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผัน 11 ระดับแบบคาสเคด.....	28
2.18 วิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบปรับความกว้างของพัลส์แบบ APOD	29
2.19 วิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบปรับความกว้างของพัลส์แบบ POD	30
2.20 วิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบปรับความกว้างของพัลส์แบบ PD.....	30
2.21 ลำดับของฮาร์โมนิกส์ของแรงดันที่เกิดขึ้น	31
2.22 วงจรสมมูลของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง	31
2.23 ค่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในช่วงเวลาต่าง ๆ.....	32
2.24 อุณหภูมิวิกฤตและอุณหภูมิการทำงานสูงสุด T_{jmax} ที่ปลอดภัยของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ	34

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.25 พิกัดกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและการประยุกต์ใช้งาน.....	34
2.26 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมพื้นฐาน.....	35
2.27 แบบจำลองการทำงานทั้งวงจรของระบบจำหน่ายไฟฟ้าเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้น ...	36
2.28 แผนภาพของการทำงานวิจัย.....	37
2.29 กรอบของการทำงานวิจัย.....	38
3.1 แบบจำลองการทำงานของระบบจำหน่ายไฟฟ้าเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้น.....	39
3.2 ขนาดของแรงดันตกชั่วครู่แบบสมดุลและไม่สมดุล.....	43
3.3 มุมเฟสของแรงดันตกชั่วครู่แบบสมดุลและไม่สมดุล.....	44
3.4 บล็อกไดอะแกรมการทำงานร่วมกันของ 2 อัลกอริทึม.....	44
3.5 ปัญหาในการตรวจจับขนาดของแรงดันสเปซเวกเตอร์.....	45
3.6 วงจรจำลองการทำงานของส่วนการตรวจจับแรงดันแรงดันตกชั่วครู่แบบเร็ว.....	45
3.7 บล็อกไดอะแกรมแสดงการคำนวณเคอร์ซี่ฟดีเอฟทีแบบเต็มคาบบนแกนหมุน.....	47
3.8 วิธีการรีเคอร์ซี่ฟดีเอฟทีที่ใช้ในส่วนตรวจจับแบบแม่นยำ.....	48
3.9 บล็อกไดอะแกรมการสร้างแรงดันอ้างอิงโดยใช้เฟสล็อกกลูป.....	49
3.10 บล็อกไดอะแกรมส่วนควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วครู่ แบบอนุกรม.....	50
3.11 วงจรเรียงกระแสแบบ 1 เฟส.....	50
3.12 ตัวเก็บประจุเชื่อมโยงไฟตรงในวงจรเรียงกระแสแบบ 1 เฟส.....	51
3.13 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของเซมิคอนดักเตอร์ SK30MLI066.....	53
3.14 วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดเคลมป์.....	53
3.15 วงจรภาคขับสวิตซ์ไอจีบีที.....	54
3.16 ไอซีเบอร์ 74LS04P (NOT Gate).....	55
3.17 วงจรสมมูลของวงจรรองที่ใช้ในการออกแบบ.....	55
3.18 ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรรอง.....	58
3.19 สัญญาณรูปคลื่นของวงจรแปลงผันเมื่อผ่านวงจรรอง.....	59
3.20 วงจรสับเบอร์.....	59
3.21 การแบ่งกระแส I_o เป็น I_s และ I_c	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.22 ช่วงเวลาที่สวิตช์ต่อวงจร	61
3.23 การวัดสัญญาณของ LV25-P.....	63
3.24 ย่านของการเปลี่ยนแปลงมุมเฟส	64
3.25 วงจรการจำลองอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมใน MATLAB/SIMULINK	65
3.26 ผลการจำลองแรงดันก่อนการชดเชยกรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 1 เฟสที่เฟส A ต่อกราวด์	67
3.27 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ กรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 1 เฟสที่เฟส A ต่อกราวด์.....	68
3.28 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ กรณีเกิด ความผิดปกติของแบบ 1 เฟสที่เฟส A ต่อกราวด์	69
3.29 ผลการจำลองแรงดันก่อนการชดเชยกรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 1 เฟสที่เฟส B ต่อกราวด์	71
3.30 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ กรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 1 เฟสที่เฟส B ต่อกราวด์.....	72
3.31 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ กรณีเกิด ความผิดปกติของแบบ 1 เฟสที่เฟส B ต่อกราวด์	73
3.32 ผลการจำลองแรงดันก่อนการชดเชยกรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 1 เฟสที่เฟส C ต่อกราวด์	75
3.33 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ กรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 1 เฟสที่เฟส C ต่อกราวด์.....	76
3.34 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ กรณีเกิด ความผิดปกติของแบบ 1 เฟสที่เฟส C ต่อกราวด์	77
3.35 ผลการจำลองแรงดันก่อนการชดเชยกรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 2 เฟสระหว่าง เฟส A และเฟส B	79
3.36 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ กรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส A และเฟส B.....	80

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.37 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ กรณีเกิด ความผิดปกติของแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส A และเฟส B.....	81
3.38 ผลการจำลองแรงดันก่อนการชดเชยกรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 2 เฟสระหว่าง เฟส A และเฟส B ต่อกราวด์.....	83
3.39 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ กรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส A และเฟส B ต่อกราวด์	84
3.40 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ กรณีเกิด ความผิดปกติของแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส A และเฟส B ต่อกราวด์.....	85
3.41 ผลการจำลองแรงดันก่อนการชดเชยกรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 2 เฟสระหว่าง เฟส B และเฟส C.....	87
3.42 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ กรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส B และเฟส C	88
3.43 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ กรณีเกิด ความผิดปกติของแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส B และเฟส C.....	89
3.44 ผลการจำลองแรงดันก่อนการชดเชยกรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 2 เฟสระหว่าง เฟส B และเฟส C ต่อกราวด์.....	91
3.45 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ กรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส B และเฟส C ต่อกราวด์.....	92
3.46 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ กรณีเกิด ความผิดปกติของแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส B และเฟส C ต่อกราวด์	93
3.47 ผลการจำลองแรงดันก่อนการชดเชยกรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 2 เฟสระหว่าง เฟส C และเฟส A	95
3.48 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ กรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส C และเฟส A.....	96
3.49 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ กรณีเกิด ความผิดปกติของแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส C และเฟส A.....	97

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.50 ผลการจำลองแรงดันก่อนการชดเชยกรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส C และเฟส A ต่อกราวด์.....	99
3.51 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช่วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์กรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส C และเฟส A ต่อกราวด์.....	100
3.52 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช่วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ กรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส C และเฟส A ต่อกราวด์.....	101
3.53 ผลการจำลองแรงดันก่อนการชดเชยกรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 3 เฟส.....	103
3.54 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช่วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์กรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 3 เฟส.....	104
3.55 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช่วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ กรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 3 เฟส.....	105
3.56 ผลการจำลองแรงดันก่อนการชดเชยกรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 3 เฟสต่อกราวด์.....	107
3.57 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช่วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์กรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 3 เฟสต่อกราวด์.....	108
3.58 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช่วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ กรณีเกิดความผิดปกติของแบบ 3 เฟสต่อกราวด์.....	109
3.59 กำลังไฟฟ้าด้านเข้าของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม.....	110
3.60 กำลังไฟฟ้าที่โหลดเมื่อใช่วงจรแปลงผันไฟฟ้า 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์.....	110
3.61 กำลังไฟฟ้าที่โหลดเมื่อใช่วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบ 2 ระดับ.....	111
4.1 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมที่ใช้ในการทดลอง	112
4.2 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มบริดจ์ 1 เฟส.....	113
4.3 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มบริดจ์ 1 เฟสต่อเข้ากับตัวเก็บประจุ.....	113
4.4 วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์แบบ 1 เฟส และวงจรสับเบอร์.....	114
4.5 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	114
4.6 การต่อใช้งาน dSPACE รุ่น DS1104.....	115
4.7 โมเดลของวงจรควบคุมในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK.....	115
4.8 หน้าต่างการควบคุมการทำงานของ dSPACE ผ่านโปรแกรม dSPACE ControlDesk.....	115

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.9 ตัววัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้า LEM LV25-P	116
4.10 วงจรจับสวิตช์ไอจีบีทีโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250	117
4.11 วงจรกลับสัญญาณโดยใช้ไอซีเบอร์ 74LS04P (NOT Gate).....	117
4.12 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (+15, \pm 15 และ +5 โวลต์) สำหรับอุปกรณ์ควบคุมต่าง ๆ	118
4.13 โครงสร้างของระบบโดยรวมของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม	118
4.14 แรงดันด้านเข้าและแรงดันที่โหลดก่อนที่จะมีแรงดันตกชั่วคราวเกิดขึ้น	119
4.15 แรงดันด้านเข้าและแรงดันที่โหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราว	119
4.16 ขนาดของแรงดันด้านเข้าและสัญญาณการตรวจจับแรงดันตกชั่วคราวในช่วงเริ่มเกิด แรงดันตกชั่วคราว	120
4.17 รูปคลื่นสัญญาณต่าง ๆ ในขณะเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว	121
4.18 สัญญาณควบคุมอุปกรณ์สวิตช์ไอจีบีทีที่ออกจากบอร์ด dSPACE.....	121
4.19 สัญญาณที่ออกจากวงจรจับสวิตช์ไอจีบีที	122
4.20 การชดเชยแรงดันตกชั่วคราวในช่วงเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว.....	122
4.21 ภาพขยายการชดเชยแรงดันตกชั่วคราวในช่วงเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว	123
4.22 การชดเชยแรงดันตกชั่วคราวในขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราว	123
4.23 ภาพขยายการชดเชยแรงดันตกชั่วคราวในขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราว.....	124
4.24 ขนาดของแรงดันด้านเข้าและสัญญาณการตรวจจับแรงดันตกชั่วคราวในช่วงก่อนสิ้นสุด การเกิดแรงดันตกชั่วคราว	124
4.25 รูปคลื่นสัญญาณต่าง ๆ ในช่วงก่อนสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราว.....	125
4.26 การชดเชยแรงดันตกชั่วคราวในช่วงก่อนสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราว	126
4.27 ภาพขยายการชดเชยแรงดันตกชั่วคราวในช่วงก่อนสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราว.....	126
4.28 กำลังไฟฟ้าด้านเข้าของวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์แบบ 1 เฟส	127
4.29 กำลังไฟฟ้าด้านออกของวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์แบบ 1 เฟส	127

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
C_{bus}	ขนาดของตัวเก็บประจุ
C_f	ตัวเก็บประจุวงจรกรอง
C_S	ตัวเก็บประจุสแน็บเบอร์
dv/dt	อัตราการเพิ่มของแรงดัน
f_h	ความถี่ของฮาร์โมนิกส์ต่ำสุดที่เกิดขึ้น
f_{sw}	ความถี่สวิตซิ่ง
$I_{com(max)}$	กระแสสูงสุดที่ต้องการชดเชย
I_{Line}	กระแสที่สาย
I_{Load}	กระแสที่โหลด
I_{on}	กระแสในขณะนำกระแส
i_a, i_b, i_c	กระแสบนระนาบ abc
i_d, i_q	กระแสบนแกนหมุนหรือบนระนาบ d-q
i_α, i_β	กระแสบนแกนนิ่งหรือบนระนาบ $\alpha - \beta$
$i_{inv(rate)}$	กระแสที่พิกัดของอินเวอร์เตอร์
Δi_{inv}	ค่ายอดของกระแสกระเพื่อมสูงสุดที่ผ่านวงจรกรอง
L_f	ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง
$M(t)$	สัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ใช้เปรียบเทียบกับสัญญาณ $T_{r1}(t), T_{r2}(t)$
m	จำนวนระดับของวงจรแปลงผัน
$No.sample$	จำนวนข้อมูลที่ทำกรสุ่ม (Sampling) ใน 1 ไซเคิล
n_c	จำนวนของตัวเก็บประจุ
$n_{d,clamp}$	จำนวนของไดโอด
P_{AV}	กำลังสูญเสียของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในขณะทำงานที่ความถี่สวิตซิ่ง
P_Q	ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ไอจีบีที
P_R	กำลังไฟฟ้าที่ตัวต้านทานในวงจรสแน็บเบอร์
R_f	ตัวต้านทานวงจรกรอง

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
R_M	ตัวต้านทานสำหรับอ่านค่าแรงดัน
R_{rate}	ตัวต้านทานที่พิกัด
R_S	ตัวต้านทานสแน็บเบอร์
R_{thja}	คามต้านทานความร้อนระหว่างจุดต่อของสารกึ่งตัวนำและสภาพแวดล้อม
s	จำนวนของจำนวนของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
T_a, T_b, T_c	ช่วงเวลาในการเกิดแรงดันตกชั่วคราวในแต่ละเฟส
T_a	อุณหภูมิแวดล้อม
T_{jmax}	อุณหภูมิการทำงานสูงสุด
$T_{r1(t)}, T_{r2(t)}$	รูปคลื่นสามเหลี่ยมทั้งสอง
$t_{conduct}$	ช่วงเวลานำกระแส (On)
$t_{com(max)}$	เวลาสูงสุดที่ต้องการชดเชย
t_{off}	ช่วงเวลาหยุดนำกระแส (Off)
$t_{s,on}$	ช่วงเวลาเริ่มนำกระแส (Turn On)
$t_{s,off}$	ช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส (Turn Off)
U_{dc}	แรงดันที่บัสไฟตรง
V_a, V_b, V_c	ขนาดของแรงดันตกชั่วคราวในแต่ละเฟส
$V_{bus(max)}$	แรงดันสูงสุดที่บัสไฟตรง
$V_{bus(min)}$	แรงดันต่ำสุดที่บัสไฟตรง
V_C	แรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สแน็บเบอร์
$V_{com(max)}$	แรงดันสูงสุดที่ต้องการชดเชย
$V_{control}$	สัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่ใช้เปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม
V_{DVR}	แรงดันที่ได้ทำการชดเชยให้กับระบบไฟฟ้า
$V_{dc,max}$	แรงดันบัสไฟตรงสูงสุด
V_{grid}	แรงดันที่วัดจากระบบไฟฟ้า
V_{inj}	แรงดันที่ฉีดเข้าไปในระบบไฟฟ้า

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

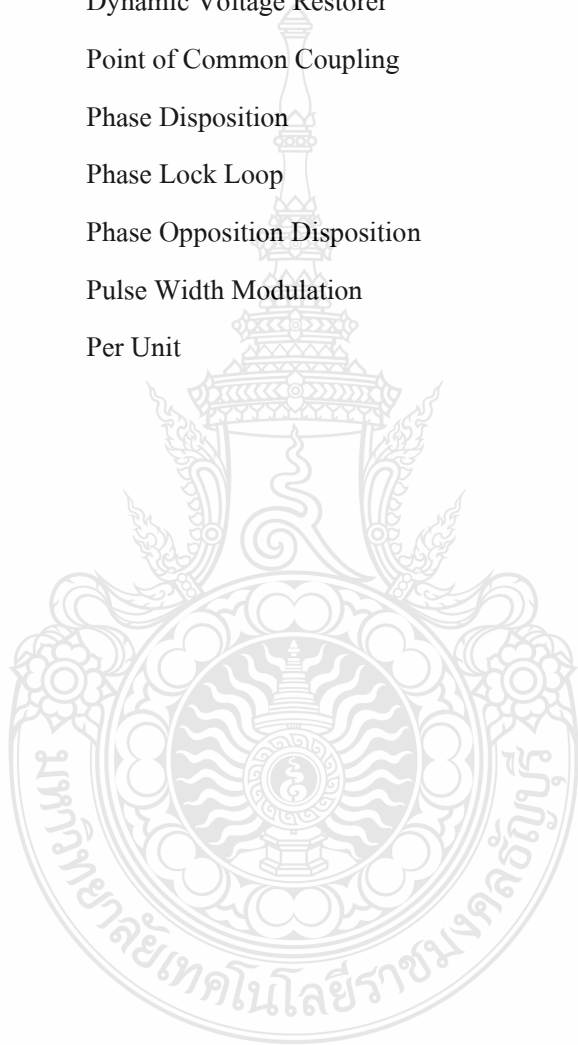
สัญลักษณ์	ความหมาย
V_{inv}	แรงดันที่อินเวอร์เตอร์สร้าง
V_{max}	ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด
V_{nom}	พิกัดแรงดันปกติ ณ ตำแหน่งที่เกิดแรงดันตกชั่วครู่
V_{normal}	แรงดันปกติ
V_O	แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์
V_{on}	แรงดันขณะนำกระแส
V_{PCC}	ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC ในสภาวะปกติ
\bar{V}_{PCC}	แรงดันเฟสที่จุด PCC ในสภาวะปกติ
$\bar{V}_{PCC(Fault)}$	แรงดันเฟสที่จุด PCC เมื่อเกิดความผิดปกติ
$V_{PCC(Fault)}$	ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่จุด PCC เมื่อเกิดความผิดปกติ
V_S	แรงดันตกคร่อมอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์
V_s	แรงดันแหล่งจ่าย
V_{sag}	แรงดันตกชั่วครู่
V_{tri}	สัญญาณรูปสามเหลี่ยม
V_1	ขนาดของแรงดันที่เฟส A
V_2	ขนาดของแรงดันที่เฟส B หรือ C คูณด้วย $\sin(2\pi/3 + \varphi)$
$ V $	ขนาดของแรงดันไฟฟ้า
$\angle V$	มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้า
v_a, v_b, v_c	แรงดันบนระนาบ abc
v_d, v_q	แรงดันบนแกนหมุนหรือบนระนาบ d-q
v_α, v_β	แรงดันบนแกนนิ่งหรือบนระนาบ $\alpha - \beta$
v_{dc}	แรงดันที่บัสไฟตรง
W	ครรชนีพลังงานสูญเสียในช่วงเวลาการเกิดแรงดันตกชั่วครู่
$W_{con,loss}$	การสูญเสียขณะนำกระแส
W_{on}	การสูญเสียขณะนำกระแส
W_{off}	การสูญเสียขณะหยุดนำกระแส

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
$W_{s,loss}$	การสูญเสียขณะสวิตช์ชิ่ง
$W_{s_on,loss}$	การสูญเสียช่วงเริ่มนำกระแส
$W_{s_off,loss}$	การสูญเสียช่วงเริ่มหยุดนำกระแส
$Z_F = R_F + jX_F$	ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างจุดต่อร่วมกับจุดที่เกิดความผิดปกติ
$Z_{Fault} = R_{Fault} + jX_{Fault}$	ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างจุด PCC และจุด Fault
Z_{Line}	ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายที่จุด PCC
$Z_S = R_S + jX_S$	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งระหว่างแหล่งจ่ายกับจุดต่อร่วม
$Z_1 = R_1 + jX_1$	ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างจุด PCC และ Load 1
$Z_2 = R_2 + jX_2$	ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างจุด PCC และ Load 2
ϕ_{PCC}	ค่ามุมของแรงดันที่จุด PCC ในสภาวะปกติ
$\phi_{PCC(Fault)}$	ค่ามุมของแรงดันที่จุด PCC เมื่อเกิดความผิดปกติ
$\Delta\phi$	มุมเลื่อนเฟส
θ	มุมเฟสของแรงดันสเปซเวกเตอร์
$\Delta\theta_{normal}$	การเปลี่ยนแปลงของมุมเฟสปกติ
ψ	Duty Cycle
ω	ค่าความถี่หลักมูลฐานในหน่วย rad/s
ξ_f	Damping Factor

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

คำย่อ	ความหมาย
APOD	Alternative Phase Opposition Disposition
CPS-SPWM	Carrier Phase Shifted - Sinusoidal Pulse Width Modulation
Duty Cycle	วัฏจักรงาน
DVR	Dynamic Voltage Restorer
PCC	Point of Common Coupling
PD	Phase Disposition
PLL	Phase Lock Loop
POD	Phase Opposition Disposition
PWM	Pulse Width Modulation
p.u.	Per Unit



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาแรงดันตกชั่วคราว (Voltage Sag) เป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทยอย่างต่อเนื่องและรุนแรงเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้แรงดันตกชั่วคราวเป็นปัญหาสำคัญในระบบไฟฟ้าที่กำลังได้รับความสนใจ นอกจากนี้จำนวนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ที่จะเกิดปัญหาในการทำงานเนื่องจากแรงดันตกชั่วคราวได้ง่ายกำลังเพิ่มจำนวนขึ้นเรื่อย ๆ ทั้งในโรงงานอุตสาหกรรม ย่านธุรกิจ และบ้านเรือน โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการควบคุมแบบลำดับอัตโนมัติที่ใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์สมัยใหม่ในการประมวลผล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างเร่งด่วน ถึงแม้ว่าในบ้านเรือนจะไม่เห็นผลกระทบอย่างชัดเจนแต่ในโรงงานอุตสาหกรรมและย่านธุรกิจผลกระทบของแรงดันตกชั่วคราวก่อให้เกิดมูลค่าความเสียหายอย่างมากมายมหาศาล ผลกระทบของแรงดันตกชั่วคราวต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการเกิดแรงดันตกชั่วคราวและขนาดของแรงดันที่ลดลง ซึ่งอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ มีลักษณะการทนต่อแรงดันตกชั่วคราวไม่เท่ากัน แนวโน้มที่อุปกรณ์ไฟฟ้าจะไม่ทำงานมีมากขึ้นเมื่อระยะเวลาที่เกิดแรงดันตกชั่วคราวยาวนานขึ้นและขนาดของแรงดันมีค่าน้อยลง นอกจากการลดลงของขนาดแรงดันแล้วแรงดันตกชั่วคราวอาจจะเกิดการกระโดดของมุมเฟสร่วมอยู่ด้วยได้ คำจำกัดความของแรงดันตกชั่วคราวในมาตรฐาน IEEE 1159-1995 [1] ได้กล่าวไว้อย่างชัดเจนว่าเป็นการลดลงของแรงดันแหล่งจ่ายในช่วงเวลาสั้น ๆ ไม่เกิน 1 นาที และค่าประสิทธิภาพ (RMS) ของแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วงค่าต่อหน่วยเป็น 0.9 (Per Unit หรือ p.u.) ถึง 0.1 เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าของระบบที่ค่าต่อหน่วยเป็น 1.0 โดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเมื่อเกิดการผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลัง

วิธีการแก้ปัญหาที่ได้รับความนิยมวิธีหนึ่ง คือ การติดตั้งอุปกรณ์เข้าไปอนุกรมในระบบไฟฟ้าเพื่อชดเชยแรงดันที่ขาดหายไปและจะทำงานในช่วงที่เกิดแรงดันตกชั่วคราวเท่านั้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะเรียกอุปกรณ์ตัวนี้ว่าอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม (Dynamic Voltage Restorer, DVR) ซึ่งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมในปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีต่าง ๆ เข้ามาใช้เพื่อให้ได้คุณสมบัติและประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีที่สุด สิ่งสำคัญที่ต้องการในระบบไฟฟ้าคือการทำงานที่รวดเร็วของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม เพื่อไม่ให้โหลดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (Sensitive Load) ได้รับความเสียหายหรือได้รับความเสียหายน้อยที่สุด แต่ยังมีสิ่งที่สำคัญอีกอย่างที่ไม่ค่อยมีใครคำนึงถึงคือฮาร์มอนิกส์ที่ถูกปล่อยออกมาจากอินเวอร์เตอร์

ภายในอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์แบบอนุกรม แม้ว่าจะเป็นแค่ช่วงเวลาสั้น ๆ แต่ก็ยังมีผลกระทบต่อโหลดที่มีความไวได้เช่นเดียวกัน

จากการศึกษาปัญหาเกี่ยวกับตัวเซมิคอนดักเตอร์แบบอนุกรม นั้น จึงมีแนวคิดในการนำอินเวอร์เตอร์สามระดับมาใช้ในอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์แบบอนุกรม จากการศึกษาอินเวอร์เตอร์สามระดับ จะแตกต่างจากอินเวอร์เตอร์สองระดับ คือ มีอุปกรณ์ในการสวิตช์เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนสองเท่าและมีการใช้แรงดันไฟตรงเป็นสามระดับ ซึ่งได้จากการนำตัวเก็บประจุสองตัวต่ออนุกรมกันเพื่อแบ่งแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟตรง วงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับมีข้อดีกว่าวงจรอินเวอร์เตอร์สองระดับคือ มีระดับแรงดันที่เพิ่มขึ้น ทำให้กระแสเอาต์พุตมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยลง และช่วยลดค่ากระแสพุ่งเข้า (Inrush Current) ที่มีต่ออุปกรณ์สวิตช์ เช่น มอสเฟต (Metal-Oxide-Semiconductor-Field Effect Transistor, MOSFET) และ ไอจีบีที (Insulated Gate Bipolar Transistors, IGBT) เป็นต้น [2] เมื่อเรานำมาเปรียบเทียบกับวงจรอินเวอร์เตอร์สองระดับที่มีการใช้แรงดันดีซีลิงก์ (DC-Link) เท่ากัน เพราะวงจรอินเวอร์เตอร์สามระดับมีการใช้อุปกรณ์สวิตช์มาต่ออนุกรมทำให้ได้รับแรงดันน้อยลง

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่สำคัญ และมีความจำเป็นต่อการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและความมั่นคงของประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรม ที่มีความต้องการทางด้านพลังงานไฟฟ้าในปริมาณมาก ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดต่าง ๆ ต้องมีความน่าเชื่อถือสูง ถ้ามีความผิดพร่องของระบบไฟฟ้าเกิดขึ้น และส่งผลให้เกิดแรงดันตกชั่วคราว แรงดันเกินชั่วคราว ไฟกระชาก ไฟดับ หรือสัญญาณรบกวนต่าง ๆ ที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว [3] จากเหตุการณ์ที่กล่าวมาทำให้แรงดันไฟฟ้าผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นปกติ สิ่งที่เกิดขึ้นส่งผลไปยังผู้ใช้ไฟฟ้าโดยตรง โหลดทางไฟฟ้าส่วนใหญ่ในปัจจุบันเป็นโหลดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเป็นอย่างมาก อาจทำให้เกิดความเสียหายต่อตัวอุปกรณ์และข้อมูลต่าง ๆ ในระบบอุตสาหกรรม รวมถึงการสูญเสียเวลา โอกาสทางธุรกิจ ผลกระทบที่เกิดจากปัญหาทางไฟฟ้านี้ อาจก่อให้เกิดความเสียหายอย่างมหาศาล การได้เข้าถึงสาเหตุและผลกระทบของการเกิดปัญหาทางไฟฟ้านี้ เพื่อเตรียมความพร้อมที่จะรับมือกับปัญหาทางไฟฟ้า และสร้างอุปกรณ์เพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาปัญหาที่ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วคราวโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์พร้อมบอกสาเหตุการเกิดและการแก้ไข

1.2.2 เพื่อศึกษาและออกแบบการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย 3 เฟส 380 โวลต์ ขนาด 10 กิโลโวลต์แอมแปร์

1.2.3 เพื่อศึกษาการชดเชยแรงดันตกชั่วคราวโดยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย 3 เฟส 380 โวลต์ ขนาด 10 กิโลโวลต์แอมแปร์

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

ศึกษาการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยศึกษาอินเวอร์เตอร์ในอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมและการชดเชยแรงดันตกชั่วคราว นำมาออกแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมโดยใช้อินเวอร์เตอร์สามระดับแบบไดโอดแคลมป์ สามารถใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับชดเชยแรงดันในส่วนที่ขาดหายไป โดยมีลักษณะการทำงานเหมือนกับอุปกรณ์ชดเชยแรงดันชั่วคราวแบบอนุกรมทั่วไป แต่สามารถรับแรงดันได้ในพิกัดที่สูงขึ้น และก่อให้เกิดฮาร์มอนิกส์ในปริมาณที่น้อยลงอีกด้วย

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ออกแบบและจำลองการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย 3 เฟส 380 โวลต์ ขนาด 10 กิโลโวลต์แอมแปร์

1.4.2 สร้างต้นแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมที่พิกัดแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย 3 เฟส 380 โวลต์ ขนาด 10 กิโลโวลต์แอมแปร์ ที่เวลาการชดเชยไม่น้อยกว่า 0.1 วินาที

1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการสร้างต้นแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยสร้างแบบจำลองการทำงานของระบบในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และนำมาสร้างต้นแบบจริง ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1.5.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของปัญหาที่ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วคราว

1.5.2 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลของผลกระทบของระบบไฟฟ้ากำลังเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วคราว

1.5.3 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ตามมาตรฐาน IEEE 1159 -1995

- 1.5.4 ศึกษาคุณสมบัติของตัวชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมและวิธีการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.5 ออกแบบและสร้าง โมเดลของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมในคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK
- 1.5.6 วิเคราะห์การชดเชยแรงดันตกชั่วคราวโดยใช้อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม
- 1.5.7 สร้างและทดสอบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมพร้อมปรับปรุง
- 1.5.8 สรุปวิเคราะห์ผลการทดลองและอภิปรายผลการวิจัย

1.6 ข้อจำกัดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาถึงการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดเคลมป์ และนำผลที่ได้จากการศึกษามาออกแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมโดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดเคลมป์ เพื่อใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับชดเชยแรงดันในส่วนที่ขาดหายไป

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1 การออกแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมอย่างเป็นระบบ
- 1.7.2 ต้นแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม
- 1.7.3 การเผยแพร่ผลการวิจัยในการประชุมวิชาการด้านวิศวกรรมไฟฟ้าและวารสารด้านพลังงาน
- 1.7.4 การส่งเสริมการสร้างความมั่นคงของระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยรวมของประเทศ
- 1.7.5 ผลการศึกษาวิจัยและพัฒนาสามารถนำไปใช้งานได้จริง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาเอกสารหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับชดเชยแรงดันตกชั่วคราว เพื่อไม่ให้โหลดที่มีความไวได้รับความเสียหาย ต้องมีการคำนึงถึงคุณสมบัติที่ดี คือ

1. ความน่าเชื่อถือ แบ่งเป็นข้อย่อยได้คือ
 - 1.1 ความไวใจได้
 - 1.2 ความปลอดภัย
2. ความรวดเร็ว
3. ความสามารถในการแยกแยะได้
4. ความสะดวกและง่ายในการใช้งาน

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องศึกษาเพื่อออกแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาจากบทความที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ ซึ่งพบว่างานวิจัยในประเทศที่เกี่ยวข้องกับเรื่องดังกล่าวยังมีไม่มากนักจึงยากต่อการค้นหาเอกสารอ้างอิงสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ และจาก

M. R. Banaei, A. Nahavandi และ S. H. Hosseini [4] บทความนี้เป็นการนำเสนออุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมแบบหลายฟังก์ชันเพื่อชดเชยแรงดันตกชั่วคราวและแรงดันเกินชั่วคราว อีกทั้งยังสามารถจำกัดกระแสลัดวงจรและรักษาระดับความถี่ที่มีการเปลี่ยนแปลงให้คงที่ได้ โดยมีการเปรียบเทียบวิธีการชดเชยทั้ง 3 วิธี คือวิธีการชดเชยแรงดันแบบ Pre-Fault วิธีการชดเชยแรงดันแบบ In-Phase และวิธีการชดเชยแรงดันแบบ Minimum Energy เมื่อเปรียบเทียบวิธีการชดเชยแรงดันทั้ง 3 แบบจะเห็นได้ชัดว่า ขนาดของแรงดันที่ฉีดเข้าไปในระบบของวิธีการชดเชยแรงดันแบบ Pre-Fault และวิธีการชดเชยแรงดันแบบ Minimum Energy มีขนาดใหญ่กว่าวิธีการชดเชยแรงดันแบบ In-Phase แต่วิธีการชดเชยแรงดันแบบ Minimum Energy อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมจะใช้กำลังแอกทีฟในปริมาณที่น้อยมาก ซึ่งจะช่วยประหยัดพลังงานที่เก็บสะสมในส่วนเก็บพลังงาน และการชดเชยแรงดันแบบ Pre-Fault จะมีความแม่นยำมากที่สุดเพราะสามารถชดเชยได้ทั้งขนาดและมุมเฟสของแรงดัน แต่จะมีข้อเสียคือจะมีการใช้พลังงานที่เก็บสะสมในส่วนเก็บพลังงานในปริมาณมาก ซึ่งก็คือจะใช้กำลังแอกทีฟในปริมาณที่มากนั่นเอง

กิตติวัฒน์ เชียงฉิน [5] งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนออัลกอริทึมการควบคุมสำหรับตัวชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมในระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ เพื่อลดความยุ่งยากซับซ้อนในการควบคุมหรือหาวิธีที่เหมาะสมซึ่งง่ายในทางปฏิบัติกว่าวิธีอื่นที่มีการนำเสนอในอดีต โดยพิจารณาหน้าที่การทำงานของแต่ละส่วนประกอบของตัวชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม อัลกอริทึมที่นำเสนอจะไม่เกิดผลของแรงดันลำดับศูนย์ที่มีสาเหตุจากแรงดันที่ไม่สมดุลขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราว เนื่องจากผลของหม้อแปลงที่มีการต่อแบบเดลต้า-สตาร์ที่ถูกต้องอยู่ในระบบไฟฟ้า และได้แบ่งแยกองค์ประกอบของส่วนการควบคุมได้เป็น 3 ส่วนหลักคือ ส่วนการตรวจจับแรงดันตกชั่วคราว ส่วนการสร้างแรงดันอ้างอิง และส่วนการสร้างแรงดันชดเชย โดยมีการพัฒนาและปรับปรุงแก้ไขใน 2 ส่วนคือ ส่วนการตรวจจับแรงดันตกชั่วคราวโดยใช้วิธีการตรวจจับแรงดันสเปกเตอร์ทั้งขนาดและมุมเฟสบนระนาบ $\alpha - \beta$ ร่วมกับวิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟที (Recursive DFT) และส่วนการสร้างแรงดันอ้างอิงโดยไม่ใช้เฟสล็อกลูป แต่ใช้วิธีซึ่งคล้ายกับเฟสล็อกลูปและมีซีโรครอสซิง (Zero Crossing) เป็นการตรวจจับความถี่ของระบบไฟฟ้า

Eng Kian Kenneth Sng, S. S. Choi และ D. Mahinda Vilathgamuwa [6] บทความนี้แนะนำเสนอ อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมที่ไม่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับฉีดแรงดันและสามารถชาร์จตัวเก็บประจุเชื่อมโยงกับสไฟตรง (DC-link) ด้วยตนเองเมื่ออยู่ในสภาวะปกติ กรณีที่ไม่มีหม้อแปลงจะช่วยลดขนาดของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมและค่าใช้จ่ายลงได้ อีกทั้งยังลดผลกระทบจากการทำงานของหม้อแปลงซึ่งจะมีผลกระทบในส่วนของการเล่นเฟสและเกิดแรงดันตกคร่อมในหม้อแปลงอีกด้วย

D. Mahinda Vilathgamuwa, H. M. Wijekoon, และ S. S. Choi [7] บทความนี้ได้แสดงวิธีการใช้อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมในวงจรที่ซับซ้อน กล่าวคือได้พยายามที่จะใช้อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม 2 ตัวใน 2 ระบบและใช้ส่วนเก็บพลังงานร่วมกัน อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมแต่ละตัวจะใช้วิธีการควบคุมที่ต่างกันเพื่อรักษาแรงดันในส่วนเก็บพลังงานให้เพียงพอสำหรับอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมทั้ง 2 ตัว เป็นต้น และพยายามแสดงให้เห็นถึงการวิเคราะห์การลงทุนของระบบที่ซับซ้อนให้เห็นชัดเจน แต่ยังคงขาดข้อมูลพื้นฐานเพื่อให้เข้าใจง่ายอีกมาก อีกทั้งเมื่อนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์จริงจะมีความยุ่งยากซับซ้อนในส่วนการควบคุมของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม

J. W. Liu, S. S. Choi, และ S. Chen [8] บทความนี้ได้ออกแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วครู่แบบอนุกรมโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบรอบเดียว สามารถควบคุมค่ายอดของแรงดันได้ แต่ความไวของการควบคุมไม่ดี และไม่ได้แสดงการควบคุมแบบละเอียดไว้ ทำให้การออกแบบยังไม่เป็นที่นิยม

มัจฉิ โต๊ะตาหยง [9] งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการปรับปรุงค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกส์รวมของวงจรมัลติเซลล์อินเวอร์เตอร์โดยการปรับระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของแหล่งจ่ายและมุมจุดชนวนของแต่ละเซลล์ย่อย โดยนำเสนอสมการเงื่อนไขในการวิเคราะห์หาระดับแรงดันไฟฟ้าและมุมจุดชนวนที่ใช้ในวงจรมัลติเซลล์อินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟสชนิด 5 เซลล์ ผลที่ได้ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าในแต่ละเซลล์ย่อยมีค่าเท่ากันแสดงให้เห็นถึงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านออกมีค่าใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์และมีค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกส์รวมอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย แต่ถ้าหากว่าระดับแรงดันในแต่ละเซลล์ย่อยมีค่าไม่เท่ากัน ก็จะทำให้ค่าความผิดเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกส์รวมมีค่าเพิ่มขึ้นได้

Olorunfemi Ojo และ Srikanth Konduru [10] บทความนี้นำเสนอวิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบปรับความกว้างของพัลส์ (Pulse Width Modulation, PWM) ที่ไม่ต่อเนื่องสำหรับควบคุมแรงดันที่จุดนิวทรัลของคอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับ 3 เฟสแบบไดโอดเคลมปี ซึ่งจะควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมแบบฮิสเทอเรซิส (Hysteresis Control) ที่เหมาะสำหรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าลำดับที่ศูนย์ (Zero Sequence) เพื่อขยายสัญญาณมอดูเลตที่ใช้ในการมอดูเลตแบบปรับความกว้างของพัลส์ที่ไม่ต่อเนื่องสำหรับควบคุมแรงดัน ข้อดีของวิธีที่นำเสนอคือความเรียบง่ายของการปฏิบัติพร้อมทั้งลดความสูญเสียของการสวิตซ์ถ้าใช้ค่าที่เหมาะสม เทคนิคนี้สามารถนำมาใช้กับคอนเวอร์เตอร์ระดับสูงกว่าได้

Bhabani Shankar Pattnaik, Debendra Kumar Dash และ Joydeep Mukherjee [11] งานวิจัยนี้นำเสนอรูปแบบการมอดูเลตแบบปรับความกว้างของพัลส์สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงการมอดูเลตแบบปรับความกว้างของพัลส์สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับและการนำไปใช้งานในไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยสามารถแบ่งตามความสัมพันธ์ของความต่างเฟสได้เป็น 3 ชนิดคือ APOD, POD และ PD จากผลการทดลองพบว่าเมื่อนำวิธีการทั้ง 3 ชนิดมาเปรียบเทียบกันจะเห็นว่ามอดูเลตปรับความกว้างของพัลส์แบบ PD จะมีปริมาณของฮาร์มอนิกส์ต่ำที่สุด

อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วครู่แบบอนุกรมเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ติดตั้งเพื่อกำเนิดแรงดันไฟฟ้าไปชดเชยทำให้โหลดได้รับแรงดันปกติ การควบคุมอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วครู่แบบอนุกรมจำเป็นต้องมีการตรวจจับแรงดันตกชั่วครู่ การคำนวณหาขนาดแรงดันและความถี่เพื่อไป

ชดเชยแรงดันในส่วนที่ขาดหายไปและชดเชยในเวลาที่ต้องรวดเร็ว จากงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษา ทำให้ทราบถึงเทคนิคและวิธีการทำให้อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น เช่น การเพิ่มฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมให้หลากหลายพยายามทำให้วิธีการควบคุมง่ายขึ้นและตรวจจับแรงดันตกชั่วคราวได้ไวยิ่งขึ้น หรือแม้แต่การไม่ใช้หม้อแปลงสำหรับฉีดแรงดันเพื่อลดขนาดและค่าใช้จ่ายในการสร้างอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม เป็นต้น ถึงกระนั้นเกือบทุกงานวิจัยจะยังคงใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับซึ่งจะก่อให้เกิดฮาร์มอนิกส์ไหลเข้าสู่ระบบในปริมาณที่มากขณะที่อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมกำลังทำงาน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงต้องการนำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้การสร้างแรงดันชดเชยด้วยวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ เพื่อลดสัญญาณความถี่อื่นที่ออกจากอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม และไม่ใช้หม้อแปลงฉีดแรงดันทำให้อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้หม้อแปลงฉีดแรงดัน อีกทั้งยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในส่วนของหม้อแปลงได้อีกด้วย

2.2 ความเป็นมาของปัญหาที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน

ปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้น อาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชิ้นเล็ก ๆ หรืออุปกรณ์ชิ้นอื่นที่ประกอบอยู่ในอุปกรณ์ไฟฟ้าทำให้อุปกรณ์เหล่านี้เสียหาย หรือไม่สามารถใช้งานได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับความรุนแรงหรือชนิดของปัญหาที่เกิดขึ้น ดังนั้นสามารถสรุปผลกระทบและสาเหตุของปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้ [1]

ตารางที่ 2.1 สาเหตุและผลกระทบของปรากฏการณ์ทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า

ชนิดของปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า	สาเหตุ	ผลกระทบ
1. Transients		
1.1 Impulsive Transients	ฟ้าผ่า Electro-Static Discharge สวิตช์ของภาระไฟฟ้า สวิตช์ของชุดเก็บประจุ	อุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหาย
1.2 Oscillatory Transients	สวิตช์ของสายเคเบิล สวิตช์ของชุดเก็บประจุ สวิตช์ของภาระไฟฟ้า	อุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหาย ฉนวนเสื่อมสภาพหรือสูญเสียความเป็นฉนวน ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ตัดวงจร

ตารางที่ 2.1 สาเหตุและผลกระทบของปรากฏการณ์ทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า (ต่อ)

ชนิดของปัญหาทางด้าน คุณภาพกำลังไฟฟ้า	สาเหตุ	ผลกระทบ
2. Short Duration Variations		
2.1 Voltage Dip (Sags)	ความผิดปกติของระบบไฟฟ้า การเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ขนาดใหญ่	อุปกรณ์ไม่สามารถทำงานได้ เกิดผลเสียทางอ้อม เช่น การผลิต หยุดชะงัก
2.2 Temporary Overvoltages (Swells)	ความผิดปกติชนิดเฟสเดียวต่อกราวด์ ปลดภาระไฟฟ้าขนาดใหญ่ สวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้และ คอมพิวเตอร์ ได้รับความเสียหาย อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง
2.3 Short Interruptions	ความผิดปกติของระบบไฟฟ้า ความล้มเหลวของอุปกรณ์ ระบบควบคุมทำงานผิดพลาด	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไม่ทำงาน สูญเสียข้อมูล หรือหว่านข้อมูลเสียหาย
3. Long Duration Variations		
3.1 Overvoltage	ปลดภาระไฟฟ้าขนาดใหญ่ สวิตช์ชุดตัวเก็บประจุ การปรับเทปของหม้อแปลงไฟฟ้า	อุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหาย และ มีอายุการใช้งานลดลง
3.2 Undervoltages	สวิตช์ภาระไฟฟ้าขนาดใหญ่ ปลดชุดตัวเก็บประจุ ภาระไฟฟ้าเกิน (Over Load)	อุปกรณ์ไฟฟ้าไม่สามารถทำงานได้ เกิดความร้อนสูงกับมอเตอร์ ตัวเก็บ ประจุจ่ายกำลังรีแอคทีฟได้น้อยลง อุปกรณ์ไฟฟ้าประเภทแสงสว่างมีความ สว่างลดลง
3.3 Long Interruptions	อุปกรณ์ป้องกันทำงานดับ ไฟฟ้าเพื่อการ บำรุงรักษาอุบัติเหตุ	อุปกรณ์ไฟฟ้าไม่ทำงาน เกิดผลทางอ้อม คือกระบวนการผลิตเสียหาย
4. Voltage Unbalance		
	ความไม่สมดุลของภาระไฟฟ้าในแต่ละเฟส ตัวเก็บประจุทำงานผิดพลาด เช่น เกิดฟิวส์ ขาดเฟสใดเฟสหนึ่งของชุดตัวเก็บประจุ 3 เฟส	อายุการใช้งานของมอเตอร์และหม้อ แปลงสั้นลงเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้น
5. Waveform Distortions		
5.1 DC Offset	การรบกวนของแม่เหล็กโลก (Geomagnetic) ผลจากวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น	เพิ่มการอิ่มตัวของหม้อแปลง เพิ่มความเครียดต่อฉนวน

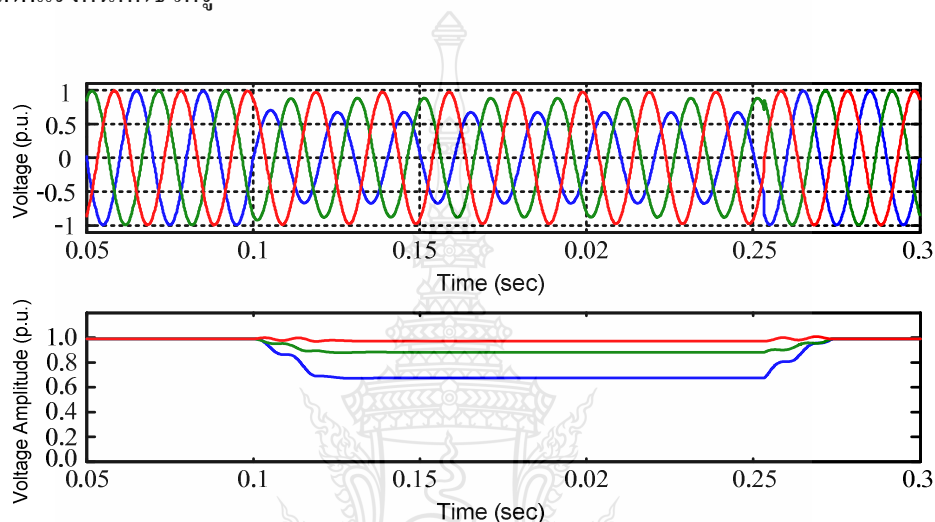
ตารางที่ 2.1 สาเหตุและผลกระทบของปรากฏการณ์ทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า (ต่อ)

ชนิดของปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า	สาเหตุ	ผลกระทบ
5.2 Harmonics	ภาระไฟฟ้าประเภทไม่เป็นเชิงเส้น เกิดเรโซแนนซ์ในระบบ	เกิดความร้อนเกินในสายศูนย์ หม้อแปลง และมอเตอร์ ตัวเก็บประจุเสียหาย เครื่องมือวัดอ่านค่าผิดพลาด, ก่อสัญญาณรบกวน
5.3 Interharmonics	ตัวแปลงผันความถี่แบบสถิต (Static Frequency Converter) ตัวแปลงผันแบบไซโคล (Cyclo-Converter) อุปกรณ์ไฟฟ้าจำพวกอาร์ค	เกิดสัญญาณรบกวน ตัวกรองรับภาระไฟฟ้าเกิน การอิมพัลส์ของขดลวดกระแส (CT) ทำให้เกิดการมองเห็นแสงกระเพื่อม
5.4 Notching	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังทำงานใน สภาวะเมื่อกระแสเปลี่ยนจากเฟสหนึ่งไปยัง เฟสอื่น ๆ	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีการทำงาน ร่วมกับสัญญาณนาฬิกาทำงานผิดพลาด
5.5 Noise	ฟ้าผ่า การทำงานของเครื่องเชื่อมแหล่งจ่ายกำลัง แบบสวิตช์ ชุดควบคุม SCR สัญญาณรบกวนจากสัญญาณวิทยุหรือ โทรทัศน์	ส่งสัญญาณรบกวนไปยัง อุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ไวต่อสัญญาณ รบกวน
6. Voltage Fluctuations (Voltage Flicker)	การเปลี่ยนแปลงของภาระไฟฟ้า เต้าหลอม แบบอาร์ค ภาระไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบของ รีแอกทีฟ	ความสว่างของหลอดไฟเปลี่ยนแปลง ส่งผลกระทบต่อภาระไฟฟ้าถ้าเกิดการ เปลี่ยนแปลงของแรงดันมาก
7. Power Frequency Variations	ความผิดพลาดของระบบไฟฟ้าขนาดใหญ่ ภาระไฟฟ้าขนาดใหญ่หลุดจากระบบเครื่อง กำเนิดไฟฟ้า หยุดเดินเครื่อง	กระทบต่อการทำงานของเครื่องจักรกล ไฟฟ้า กระบวนการใดก็ตามที่ใช้เวลาใน การควบคุมการผลิตจากความถี่ไฟฟ้า กำลัง

การแปรเปลี่ยนช่วงระยะเวลาสั้น (Short Duration Variation) คือปรากฏการณ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันหรือกระแสเพียงช่วงเวลาสั้น ๆ ส่วนมากเกิดจากสภาวะความผิดพลาด (Fault) ในระบบไฟฟ้า ซึ่งปรากฏการณ์ทางคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่อยู่ในกลุ่มนี้คือแรงดันตกชั่วคราว (Voltage Dip หรือ Voltage Sags) แรงดันเกินชั่วคราว (Voltage Swells) หรือไฟฟ้าดับชั่วคราว (Short Interruptions) สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะมุ่งเน้นไปที่แรงดันตกชั่วคราว

2.3 แรงดันตกชั่วครู่

แรงดันตกชั่วครู่ คือ การที่ค่าแรงดันมีขนาดลดลงต่ำกว่าค่าแรงดันปกติในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ และกลับสู่ค่าปกติในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งระยะเวลาดังกล่าวก็คือ ช่วงระยะเวลาของการเกิดแรงดันตกชั่วครู่ โดยส่วนใหญ่จะเกิดจากความผิดปกติที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 2.1 หรือการเริ่มเดินเครื่องของภาระไฟฟ้าขนาดใหญ่ มีตัวแปรที่สำคัญอยู่ 2 ตัวคือ ขนาดและระยะเวลาของการเกิดแรงดันตกชั่วครู่



ภาพที่ 2.1 แรงดันตกชั่วครู่ที่เกิดจากความผิดปกติชนิดเฟสเดียวต่อกราวด์

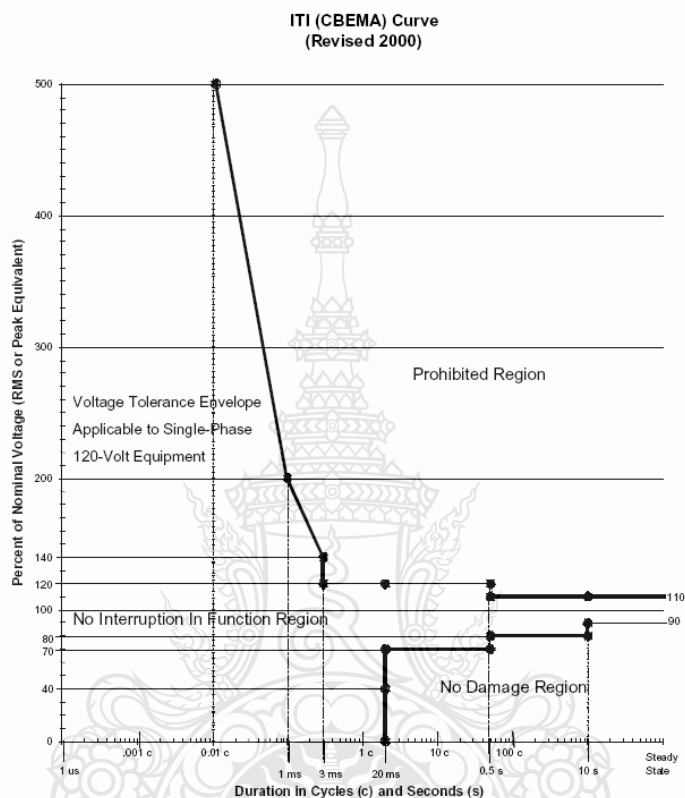
ซึ่งแต่ละมาตรฐานได้มีการกำหนด ชื่อ ขนาด และระยะเวลาที่เกิดขึ้นโดยทั่วไป แตกต่างกันดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบมาตรฐานของปรากฏการณ์แรงดันตกชั่วครู่

มาตรฐาน ตัวแปร	IEC 1000-2-1-1990 [12]	prEN50160-1993 [13]	IEEE Std 1159-1995 [1]
ชื่อ	แรงดันตกชั่วครู่	แรงดันตกชั่วครู่	แรงดันตกชั่วครู่
ขนาด (p.u.)	0.0-0.9	0.01-0.9	0.1-0.9
ช่วงระยะเวลา	$\frac{1}{2} c$ – few sec	10 ms – 1 min	$\frac{1}{2} c$ -1 min

จากภาพที่ 2.2 เป็นกราฟเส้นโค้งที่แสดงความสามารถในการทนทานของคอมพิวเตอร์ต่อสัญญาณแรงดันรบกวน โดยแสดงในรูปของขนาดและช่วงเวลาของการเกิดของแรงดัน เกิดจากการ

พัฒนาของ Computer Business Equipment Manufacturers Association (CBEMA หรือ ITI Curve) [14] และปัจจุบันได้นำมาใช้วัดคุณสมบัติของอุปกรณ์ไฟฟ้าทั่วไป อีกทั้งยังใช้ในการอ้างอิงเมื่อกล่าวถึงคุณภาพกำลังไฟฟ้า



ภาพที่ 2.2 กราฟเส้นโค้งที่แสดงความสามารถในการทนทานของคอมพิวเตอร์ต่อสัญญาณแรงดันรบกวน [14]

2.3.1 สาเหตุการเกิดแรงดันตกชั่วครู่

ระบบไฟฟ้าประกอบด้วยสายส่งซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ของสายค่าหนึ่ง ทุกครั้งที่มีการเพิ่มขึ้นของค่ากระแสโหลด ย่อมทำให้เกิดการลดลงของแรงดัน นั่นคือเกิดแรงดันตกชั่วครู่นั่นเอง ยิ่งค่ากระแสโหลดหรือค่าอิมพีแดนซ์ของระบบเพิ่มมากขึ้นเท่าใด แรงดันตกชั่วครู่ย่อมมีค่ามากขึ้นเท่านั้น นั่นคือโดยทฤษฎีแล้วแรงดันตกชั่วครู่จะเกิดขึ้นได้จาก 2 กรณีคือ การเพิ่มของกระแสอย่างมาก (โดยส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกิดขึ้นจากสาเหตุนี้) และค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสูงขึ้น

1) การเกิดแรงดันตกชั่วคราวในระบบไฟฟ้ามีสาเหตุเกิดขึ้นจากเหตุการณ์ต่าง ๆ ดังนี้คือ

- การเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วคราว ส่วนใหญ่จะเป็นความผิดปกติที่เกิดขึ้นจากความผิดปกติลงดินแบบหนึ่งเฟส (Single-Line-To-Ground Fault) ในระบบสายส่งและระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าหรือความผิดปกติที่เกิดขึ้นจากระบบอื่น ๆ ที่มีการเชื่อมต่อกับระบบการส่งจ่ายไฟฟ้าเข้ากับระบบของการไฟฟ้า เช่น ระบบของผู้ผลิตรายเล็ก (Small Power Producer, SPP) และผู้ผลิตไฟฟ้าอิสระ (Independent Power Producer, IPP) หรือของผู้ใช้ไฟฟ้าเอง โดยสาเหตุการเกิดความผิดปกติเนื่องจากระบบสายส่งในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านั้น ส่วนใหญ่จะทำการติดตั้งสายส่งเหนือศีรษะโดยบางส่วนจะเป็นสายเปลือย ซึ่งได้ทำการส่งจ่ายไฟฟ้าไปทั่วประเทศและมีระยะทางที่ยาวย่อมเป็นผลให้เกิดความผิดปกติได้

- เกิดจากการเหนี่ยวนำขึ้นของเหตุการณ์ฟ้าผ่าบริเวณใกล้ระบบสายส่งและระบบจำหน่าย ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดแรงดันตกชั่วคราวได้เช่นเดียวกัน

2) สาเหตุที่ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วคราวสามารถเกิดขึ้นได้ภายในโรงงานคือ

- การเริ่มเดินของโหลดขนาดใหญ่ เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งปกติจะใช้กระแสไฟฟ้าในการเริ่มเดินเครื่องประมาณร้อยละ 150-500 ของกระแสที่ใช้งานในสภาวะปกติ ส่วนระยะเวลาในการเกิดแรงดันตกชั่วคราวนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันของการไฟฟ้า

- ความบกพร่องของการเชื่อมต่อสาย เช่น เชื่อมต่อสายเคเบิลโดยขันสกรูที่จุดต่อไม่แน่น ซึ่งจะส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบสูงขึ้น ทำให้ค่ากระแสโหลดสูงมากกว่าความเป็นจริง

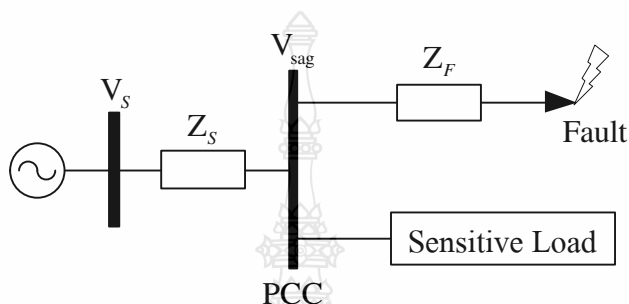
- ความผิดปกติหรือการลัดวงจรภายในโรงงาน แม้ว่าความผิดปกติที่เกิดขึ้นจะถูกตัดออกจากระบบด้วยฟิวส์หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์อย่างรวดเร็ว แต่ก็ยังทำให้เกิดแรงดันตกชั่วคราวจนอาจทำให้อุปกรณ์ป้องกันทำงานได้

2.3.2 องค์ประกอบของแรงดันตกชั่วคราว

การเกิดแรงดันตกชั่วคราวมีปัจจัยหลายอย่างที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในการบ่งชี้ระดับความรุนแรง ซึ่งจะสะท้อนถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกับผู้ใช้ไฟฟ้าด้วย มาตรฐานต่าง ๆ ที่กล่าวถึงปัญหาแรงดันตกชั่วคราวนั้น โดยทั่วไปมักจะกล่าวเพียงแต่ขนาดแรงดันที่เหลืออยู่ในระบบและระยะเวลาที่เกิดเหตุการณ์เท่านั้น ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว ผลกระทบจากปัญหาแรงดันตกชั่วคราวที่มีต่ออุปกรณ์ซึ่งมีความไวสูงและไม่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงนั้น ยังมีส่วนอื่นที่จำเป็นต้องนำมาพิจารณาด้วย อาทิ เช่น มุมเลื่อนเฟส การเกิดแรงดันลดลงหลังจากเกิดความผิดปกติ (Post Fault Dip) เป็นต้น

องค์ประกอบที่เป็นลักษณะเฉพาะของแรงดันตกชั่วคราวประกอบไปด้วย

1) ขนาด โดยทั่วไปสามารถคำนวณหาขนาดของแรงดันตกชั่วคราวได้จากหลักการของการแบ่งแรงดัน ดังภาพที่ 3 แสดงตัวอย่างในกรณีที่เกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้าแบบเรเดียล (Radial Systems) ขนาดของแรงดันตกชั่วคราวที่จุดต่อร่วม (Point of Common Coupling, PCC) สามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ 2.1 โดยจุดต่อร่วมเป็นจุดที่ทั้งความผิดปกติและโหลดต่อร่วมกัน



ภาพที่ 2.3 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วคราว

$$V_{sag} = V_s \cdot \frac{Z_F}{Z_S + Z_F} \quad (2.1)$$

เมื่อ Z_S คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งระหว่างแหล่งจ่ายกับจุดต่อร่วม

Z_F คือ ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างจุดต่อร่วมกับจุดที่เกิดความผิดปกติ

ในกรณีที่ค่า Z_S และ Z_F เป็นจำนวนเชิงซ้อน ($Z = R + jX$) และมีอัตราส่วนของ X/R ที่เท่ากัน การเกิดความผิดปกติลักษณะเช่นนี้จะไม่เกิดผลจากการเลื่อนเฟสเข้ามาเกี่ยวข้อง เนื่องจากค่า V_{sag} จะเป็นค่าที่เป็นจำนวนจริงแต่ในความเป็นจริงแล้วกรณีดังกล่าวเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นได้ยาก ดังนั้นปัญหาแรงดันตกชั่วคราวโดยส่วนใหญ่จึงต้องนำผลของการเลื่อนเฟสมาเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการพิจารณาด้วย

2) มุมเลื่อนเฟส ปัญหาการเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้าไม่ได้ทำให้ระดับแรงดันมีขนาดลดลงเท่านั้นแต่ยังเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปัญหามุมเลื่อนเฟสที่ตัวอุปกรณ์ไฟฟ้าตามมาด้วย [15] ดังสมการที่ 2.2

$$\Delta\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X_F}{R_F}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{X_S + X_F}{R_S + R_F}\right) \quad (2.2)$$

2.3.3 ผลกระทบเนื่องจากแรงดันตกชั่วคราว

แรงดันตกชั่วคราวที่เกิดจากความผิดปกติในระบบไฟฟ้าเป็นปัญหาที่สำคัญทางด้านคุณภาพไฟฟ้าในผู้ใช้ไฟฟ้าประเภทอุตสาหกรรม จากการสำรวจพบว่าแรงดันตกชั่วคราวคิดเป็นร้อยละ 92 [15] ของปัญหาในเรื่องคุณภาพไฟฟ้า ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวมีผลกระทบโดยตรงต่อผู้ใช้ไฟฟ้าที่มีลักษณะอ่อนไหวต่อแรงดัน เช่น โหลดที่เป็นวงจรแปลงผันในภาคอุตสาหกรรม คอมพิวเตอร์ในสำนักงาน และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวต่อแรงดัน โดยให้ความสนใจในโหลดที่มีความสำคัญ เช่น ศูนย์การแพทย์ โรงงานผลิตรถยนต์ อุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ อุปกรณ์ถ่ายถอดสัญญาณและอาคารสำนักงาน เป็นต้น ถึงแม้ว่าผลกระทบที่เกิดจากแรงดันตกชั่วคราวจะไม่สามารถคิดเป็นต้นทุนที่แน่นอนได้ แต่ประมาณได้ว่ามีค่ามากมายมหาศาลหลายล้านบาทในแต่ละปี

ความผิดปกติในระบบสายส่ง (Transmission System) เช่น 230 กิโลโวลต์ สามารถก่อให้เกิดแรงดันตกชั่วคราวและอาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ที่มีความไวต่อแรงดันที่อยู่ห่างไกลออกไปเป็นหลายร้อยกิโลเมตร ส่วนความผิดปกติในระบบจำหน่าย (Distribution System) จะแตกต่างกันออกไป เนื่องจากผลของค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงลดแรงดัน (Step Down Transformer) และเป็นระบบแบบเรเดียล ทำให้ความผิดปกติที่เกิดขึ้นส่วนมากจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าที่ใช้งานหม้อแปลงร่วมกันเท่านั้น โดยผู้ใช้ไฟฟ้าในสายป้อน (Feeder) ที่เกิดความผิดปกติจะมองเห็นแรงดันตกชั่วคราวและตามตามด้วยไฟฟ้าดับ ในขณะที่ผู้ใช้ในสายป้อนอื่น ๆ ในหม้อแปลงเดียวกันจะมองเห็นแรงดันตกชั่วคราวจนกว่าความผิดปกติที่เกิดขึ้นจะหายไป

เมื่อเกิดแรงดันตกชั่วคราวในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าจะส่งผลให้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่ทำงานผิดพลาดหรือล้มเหลวได้เนื่องจากสาเหตุหลักดังต่อไปนี้

- 1) ระดับแรงดันไม่เพียงพอสำหรับโหลดนั้น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโหลดที่มีความไวต่อแรงดัน ซึ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกเรียงกระแสและเปลี่ยนให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงสะสมพลังงานไว้ในตัวเก็บประจุและทำงานร่วมกับเรกกูเรเตอร์เพื่อรักษาระดับแรงดันสำหรับจ่ายโหลด ถ้าหากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากตัวเรียงกระแส (Rectifier) มีค่าต่ำกว่าค่าที่เรกกูเรเตอร์สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง ย่อมทำให้ไม่สามารถจ่ายแรงดันตามที่โหลดต้องการได้

- 2) เกิดการทริปของวงจรป้องกันในภาคแรงดันต่ำ ซึ่งโดยปกติแล้วจะมีการติดตั้งเพื่อคอยตรวจสอบระดับแรงดันว่าเพียงพอหรือไม่ แต่บางครั้งการกำหนดว่าแรงดันต่ำได้ถึงเพียงพอนั้นทำได้ยาก เช่น แรงดันที่ร้อยละ 70 อาจเพียงพอในกรณีที่จ่ายโหลดเพียงครั้ง ถึงแม้จะกำหนดไว้ว่าให้

ทำงานที่แรงดันร้อยละ 90-110 ก็ตาม ดังนั้นการเกิดแรงดันตกชั่วคราวร้อยละ 70 สำหรับกรณีนี้อุปกรณ์ยังสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง แต่วงจรป้องกันแรงดันต่ำยอมสั่งให้ปิดระบบ

3) เกิดการทริปของรีเลย์ป้องกันแรงดันไม่สมดุล (Unbalance Relay) เนื่องจากในระบบไฟฟ้าชนิดสามเฟสแรงดันตกชั่วคราวส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นแบบไม่สมดุล (Asymmetrical) จะเกิดเพียงหนึ่งหรือสองเฟส จึงทำให้เกิดแรงดันแบบไม่สมดุลขึ้นได้ ทำให้มอเตอร์หรือหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดสามเฟสเกิดความร้อนสูงและเสียหายได้ ดังนั้นจึงมีการติดตั้งรีเลย์ป้องกันแรงดันไม่สมดุลสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อสั่งให้ปิดระบบ เมื่อเกิดปัญหาดังกล่าว หากระดับของความไม่สมดุลเกินกว่าค่าที่ตั้งไว้ ซึ่งปกติจะตั้งไว้ที่ค่าประมาณร้อยละ 2-3 แต่แรงดันตกชั่วคราวขนาดร้อยละ 20-50 เพียงหนึ่งหรือสองวินาทีไม่สามารถก่อให้เกิดปัญหาความร้อนสูงต่อมอเตอร์หรือหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดสามเฟสได้ แต่รีเลย์ป้องกันแรงดันไม่สมดุลก็ต้องปิดระบบเนื่องจากผลของแรงดันตกชั่วคราวได้

2.3.4 ดรรชนีพลังงานสูญเสียของแรงดันตกชั่วคราว (Voltage Sag Lost Energy Index)

แรงดันตกชั่วคราวจะทำให้เกิดพลังงานสูญเสียในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าซึ่งสามารถหาค่าได้ในรูปแบบของดัชนีพลังงานสูญเสีย ดังสมการที่ 2.3 [16]

$$W = \left\{ 1 - \frac{V_a}{V_{nom}} \right\}^{3.14} \times T_a + \left\{ 1 - \frac{V_b}{V_{nom}} \right\}^{3.14} \times T_b + \left\{ 1 - \frac{V_c}{V_{nom}} \right\}^{3.14} \times T_c \quad (2.3)$$

เมื่อ W คือ ดรรชนีพลังงานสูญเสียในช่วงเวลาการเกิดแรงดันตกชั่วคราว

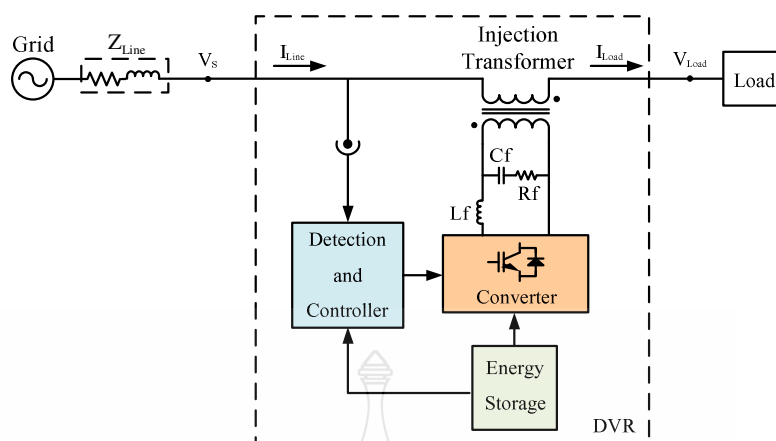
V_a, V_b, V_c คือ ขนาดของแรงดันตกชั่วคราวในแต่ละเฟส

V_{nom} คือ พิกัดแรงดันปกติ ณ ตำแหน่งที่เกิดแรงดันตกชั่วคราว

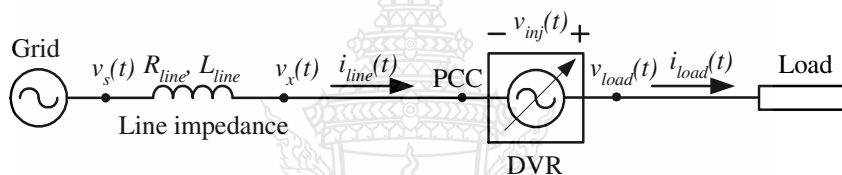
T_a, T_b, T_c คือ ช่วงเวลาในการเกิดแรงดันตกชั่วคราวในแต่ละเฟส

2.4 อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม

การทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมเบื้องต้นจะฉีดแรงดันเข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อควบคุมค่ายอดแรงดัน ความถี่ และเฟสที่จุดต่อกริด (Grid) เพื่อทำให้แรงดันที่โหลดได้รับแรงดันเท่ากับแรงดันมาตรฐาน โครงสร้างการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมแสดงได้ดังภาพที่ 2.4 ซึ่งโดยทั่วไปประกอบด้วย วงจรแปลงผัน วงจรกรองความถี่ หม้อแปลง แหล่งเก็บสะสมพลังงาน และระบบควบคุม เป็นต้น



ภาพที่ 2.4 วงจรอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม

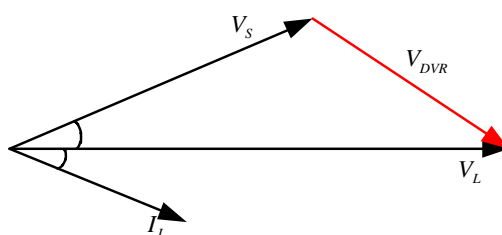


ภาพที่ 2.5 อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมเปรียบเสมือนแหล่งจ่ายแรงดันที่ต่ออนุกรม

ภาพที่ 2.5 แสดงวงจรอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม ซึ่งสามารถเปรียบเสมือนเป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่สามารถควบคุมค่ายอด ความถี่และเฟสได้ โดยปกติจะใช้ชดเชยแรงดันตกชั่วคราว เมื่อการพิจารณาถึงการควบคุมแรงดันตกชั่วคราวแล้ว การตรวจจับมีความจำเป็นมาก เพราะต้องมีการเฝ้าระวังอยู่ตลอดเวลา

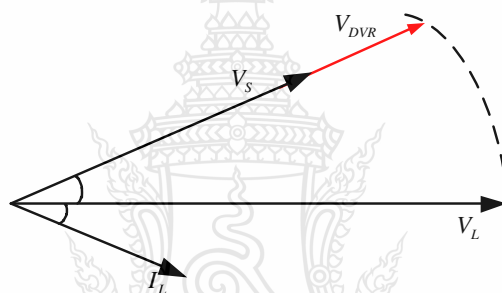
การฉีดแรงดันเข้าไปในระบบไฟฟ้าแบบอนุกรม แรงดันอ้างอิงที่อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมฉีดเข้าไปในระบบนั้นจะใช้วิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบปรับความกว้างของพัลส์ไปสั่งให้อินเวอร์เตอร์ทำงาน ความแตกต่างของแรงดันอ้างอิงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของวิธีการควบคุมแต่ละชนิด ซึ่งมีวิธีการชดเชยอยู่ 3 วิธี [4] คือ

1) การชดเชยแบบ Pre-Fault ขนาดและมุมเฟสของแรงดันโหลดหลังจากชดเชยด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมจะเหมือนกับสภาวะก่อนเกิดความผิดปกติ ดังภาพที่ 2.6



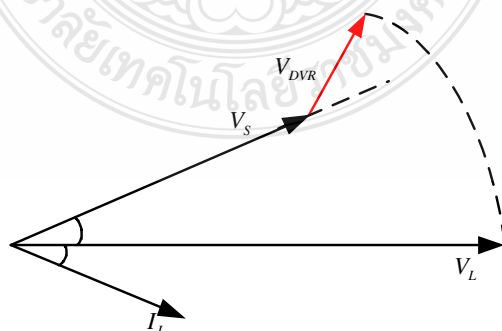
ภาพที่ 2.6 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของวิธีการชดเชยแบบ Pre-Fault

2) การชดเชยแบบ In-Phase แรงดันของโหลดที่ได้หลังจากการชดเชยจะมีเฟสเหมือนกับแรงดันของโหลดหลังจากเกิดความผิดปกติ ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของวิธีการชดเชยแบบ In-Phase

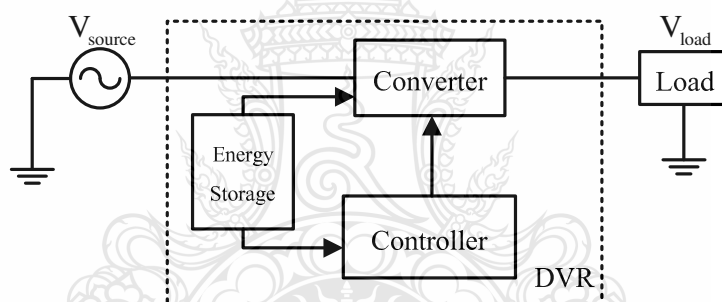
3) การชดเชยแบบ Minimum Energy เป็นวิธีการสำหรับลดกำลังแอกทีฟ มุมเฟสของแรงดันที่ฉีดเข้าไปในระบบจะต้องตั้งฉากกับกระแสไลน์ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของวิธีการชดเชยแบบ Minimum Energy

เมื่อเปรียบเทียบวิธีทั้ง 3 แบบจะเห็นได้ชัดว่า ขนาดของแรงดันที่ฉีดเข้าไปในระบบของวิธีการชดเชยแบบ Pre-Fault และแบบ Minimum Energy มีขนาดใหญ่กว่าแบบ In-Phase แต่วิธีการแบบ Minimum Energy อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมจะใช้กำลังแอกทีฟในปริมาณที่น้อยมาก ส่วนวิธีการแบบ Pre-Fault จะใช้กำลังแอกทีฟเป็นปริมาณมาก แต่ก็เป็นการชดเชยที่แม่นยำที่สุด

เพื่อให้ง่ายขึ้นเราสามารถแบ่งส่วนประกอบออกเป็น 3 ส่วนหลัก [5] คือ ส่วนแปลงพลังงาน ส่วนที่ใช้เก็บพลังงานและส่วนการควบคุม ดังภาพที่ 2.9 ขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราว การทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม เป็นการสร้างแรงดันบวกเพิ่มเข้าไปในระบบเพื่อชดเชยผลต่างแรงดันระหว่างแรงดันตกชั่วคราวและแรงดันปกติ เมื่อระหว่างสภาวะปกติการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมจะทำหน้าที่เสมือนตัวนำให้กระแสไหลผ่านได้ปกติ นั่นคือจะทำงานหรือทำการชดเชยแรงดันเพียงขณะการเกิดแรงดันตกชั่วคราวเท่านั้น

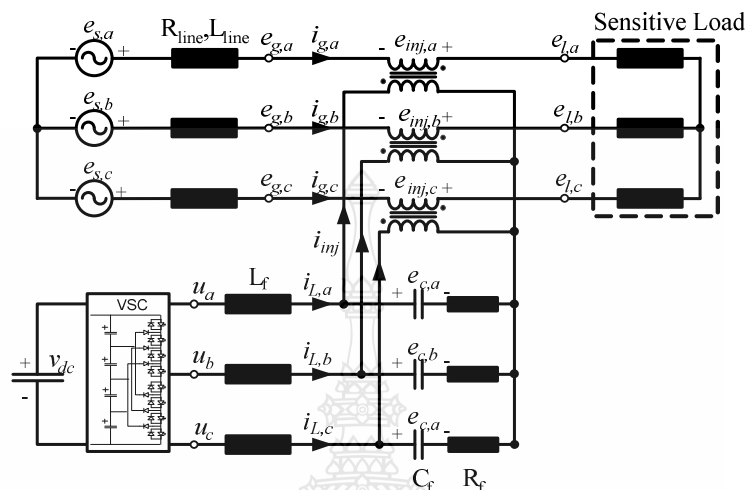


ภาพที่ 2.9 ส่วนประกอบหลักของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวและตำแหน่งการติดตั้ง

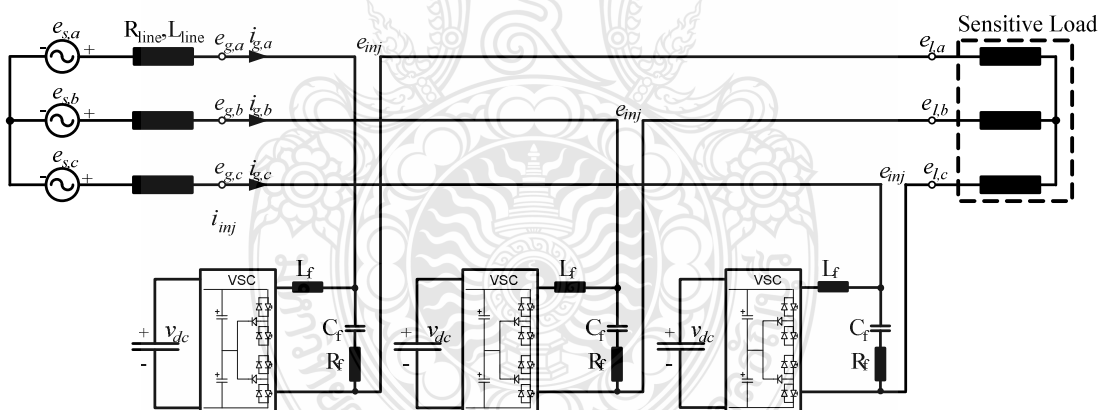
2.4.1 ส่วนการแปลงพลังงาน

เป็นส่วนใช้สร้างแรงดันชดเชยซึ่งส่วนประกอบหลักคือ วงจรแปลงผัน ในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคสแคดและวงจรกรองผ่านต่ำ นอกจากนั้นอาจมีหม้อแปลงไฟฟ้าร่วมอยู่ด้วยถ้านำไปติดตั้งในระบบไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันสูงและกลาง ภาพที่ 2.10 แสดงการต่ออุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมแบบ 3 เฟส แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมจะถูกติดตั้งที่ระบบไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันต่ำ ซึ่งโดยทั่วไปจะไม่นิยมใช้หม้อแปลงเชื่อมต่อระหว่างวงจรแปลงผันกับระบบไฟฟ้า แต่จะต่อวงจรแปลงผันเข้ากับระบบไฟฟ้าโดยตรง ดังภาพที่ 2.11 เนื่องจากข้อเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเลื่อนเฟส (Phase Shift) และแรงดันตกคร่อม (Voltage Drop) [17] นอกจากนั้นปัญหาสำคัญอีกอย่างคือ การเกิดการอิ่มตัวของหม้อแปลง

และกระแสพุ่งเข้า (Inrush Current) ซึ่งทำให้ต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดพิกัดเป็น 2 เท่าของพิกัดอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม [18] เป็นผลให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีขนาดใหญ่และราคาสูง



ภาพที่ 2.10 วงจรอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมแบบสามเฟส



ภาพที่ 2.11 วงจรอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมแบบหนึ่งเฟส

2.4.2 วงจรแปลงผันแบบหลายระดับ (Multilevel Converter)

ในกรณีที่ต้องใช้วงจรแปลงผันที่พิกัดกำลังไฟฟ้าสูง ๆ จะทำให้ไม่สามารถหาอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ทนพิกัดแรงดันสูง ๆ ได้ เช่นขนาดแรงดัน 2.2 กิโลโวลต์ หรือ 22 กิโลโวลต์ ที่จะต่อกับระบบไฟฟ้าหลักได้โดยตรง จึงจำเป็นที่จะต้องประยุกต์ใช้อินเวอร์เตอร์หลายระดับเพื่อให้ใช้งานที่พิกัดแรงดันสูง ๆ ได้

วงจรแปลงผันแบบหลายระดับจะอาศัยการต่ออนุกรมกันของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อใช้ในการแบ่งแรงดันและเพิ่มจำนวนระดับของสัญญาณด้านออกระหว่างสายให้มีลักษณะใกล้เคียงรูปคลื่นไซน์มากยิ่งขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ การอนุกรมกันของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังดังกล่าวทำให้วงจรแปลงผันแบบหลายระดับมีความสามารถในการทำงานที่ระดับกำลังไฟฟ้าที่สูงกว่าวงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ และเป็นการช่วยลดความร้อนอีกได้ด้วย แต่อย่างไรก็ตามการควบคุมก็ทำได้ยากขึ้นเช่นเดียวกันเนื่องจากอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้มีจำนวนมาก

วงจรแปลงผันแบบหลายระดับโดยทั่วไป มีอยู่ 3 ชนิด [19], [20] คือ

- 1) วงจรแปลงผันหลายระดับแบบไดโอดแคลมป์ (Diode Clamped Multilevel Inverter)
- 2) วงจรแปลงผันหลายระดับแบบฟลายอิงคาปาซิเตอร์ (Flying Capacitor Multilevel Inverter)
- 3) วงจรแปลงผันหลายระดับแบบคาสเคด (Cascaded Multilevel Inverter)

โดยวงจรแปลงผันแบบหลายระดับจะมีส่วนประกอบหลัก คือ อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจำนวนมากและมีตัวเก็บประจุหรือแหล่งจ่ายอิสระจำนวนมาก เพื่อที่จะสร้างระดับแรงดันเป็นรูปคลื่นขั้นบันได โดยค่าแรงดันที่ได้นั้นเกิดจากการจัดเรียงระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุหรือแหล่งจ่ายอิสระทำให้ได้แรงดันมีค่าใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์มากขึ้น ในการประยุกต์ใช้วงจรแปลงผันแบบหลายระดับมีหลากหลายรูปแบบทั้งใช้เป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับ แก๊ว ค่าฮาร์มอนิกส์ และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า หรือใช้เป็นตัวจ่ายค่ากำลังไฟฟ้าแอกทีฟและรีแอกทีฟให้กับภาระทางไฟฟ้าแทนระบบ เป็นต้น

ข้อดีของวงจรแปลงผันแบบหลายระดับได้แก่

- ในด้านของรูปคลื่นแรงดันด้านขาออกของวงจรแปลงผันจะให้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์
- แรงดันที่ถูกสร้างขึ้นมีความผิดเพี้ยนน้อยและ dv/dt ต่ำ
- กระแสด้านขาออกมีความผิดเพี้ยนน้อย
- อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละตัวทำงานที่ความถี่สวิตซ์ซึ่งต่ำ ทำให้ความสูญเสียเนื่องจากการสวิตซ์ลดลง

อย่างไรก็ดีเนื่องจากจำนวนสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและตัวเก็บประจุที่มีจำนวนมากทำให้ความน่าเชื่อถือของระบบลดลงและการสร้างสัญญาณการควบคุมสวิตซ์และการรักษาระดับแรงดันที่ตัวเก็บประจุทำได้ยากยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับวงจรแปลงผันแบบเดิม การควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์สามารถ

ทำได้เช่นเดียวกันกับในวงจรแปลงผันแบบเดิม กล่าวคืออาศัยหลักการมอดูเลตสัญญาณแบบปรับความกว้างของพัลส์หรือการควบคุมแบบสเปซเวกเตอร์ เป็นต้น

2.4.2.1 วงจรแปลงผันหลายระดับแบบไดโอดแคลมป์

ยกตัวอย่างเช่น วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์แบบหนึ่งเฟสดังแสดงในภาพที่ 2.12 จะแตกต่างกับวงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับคือวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์แบบหนึ่งเฟสจะมีอุปกรณ์ในการสวิตช์ซึ่งเพิ่มจากสี่ตัวเป็นแปดตัวและมีการใช้แรงดันไฟตรงเป็นสามระดับ ซึ่งได้จากการนำตัวเก็บประจุสองตัวต่ออนุกรมกันเพื่อแบ่งแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟตรง ดังแสดงในภาพที่ 2.13 จะเห็นได้ว่าแรงดันด้านออกจะมีลักษณะเป็น 3 ระดับ วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์มีข้อดีกว่าวงจรแปลงผัน 2 ระดับคือ มีระดับแรงดันที่เพิ่มขึ้น ทำให้กระแสด้านออกมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อย และช่วยลดค่ากระแสพุ่งเข้าที่มีต่ออุปกรณ์สวิตช์ซึ่ง เช่น มอสเฟต (Metal-Oxide-Semiconductor-Field Effect Transistor, MOSFET) และไอจีบีที (Insulated Gate Bipolar Transistors, IGBT) เป็นต้น เมื่อนำมาเปรียบกับวงจรแปลงผัน 2 ระดับที่มีการใช้แรงดันเชื่อมโยงบัสไฟตรงเท่ากัน เพราะวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์มีการใช้อุปกรณ์สวิตช์ซึ่งมาต่ออนุกรมทำให้ได้รับแรงดันน้อยลง จำนวนระดับของวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์หาได้จากสมการที่ 2.4 [21]

$$m = n_c + 1 \quad (2.4)$$

โดยที่ m คือจำนวนระดับของวงจรแปลงผัน

n_c คือจำนวนของตัวเก็บประจุ

จำนวนของอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังของแต่ละกิ่งหาได้จากสมการที่ 2.5

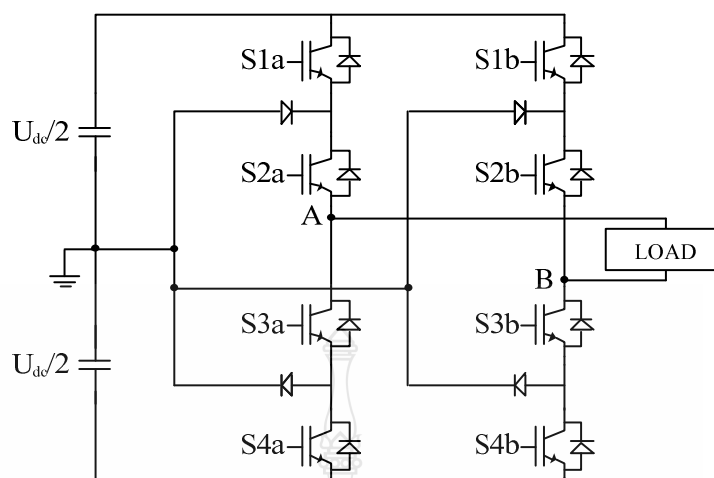
$$s = 2 \times n_c \quad (2.5)$$

โดยที่ s คือจำนวนของจำนวนของอุปกรณ์สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

และจำนวนไดโอดของแต่ละกิ่งหาได้จากสมการที่ 2.6

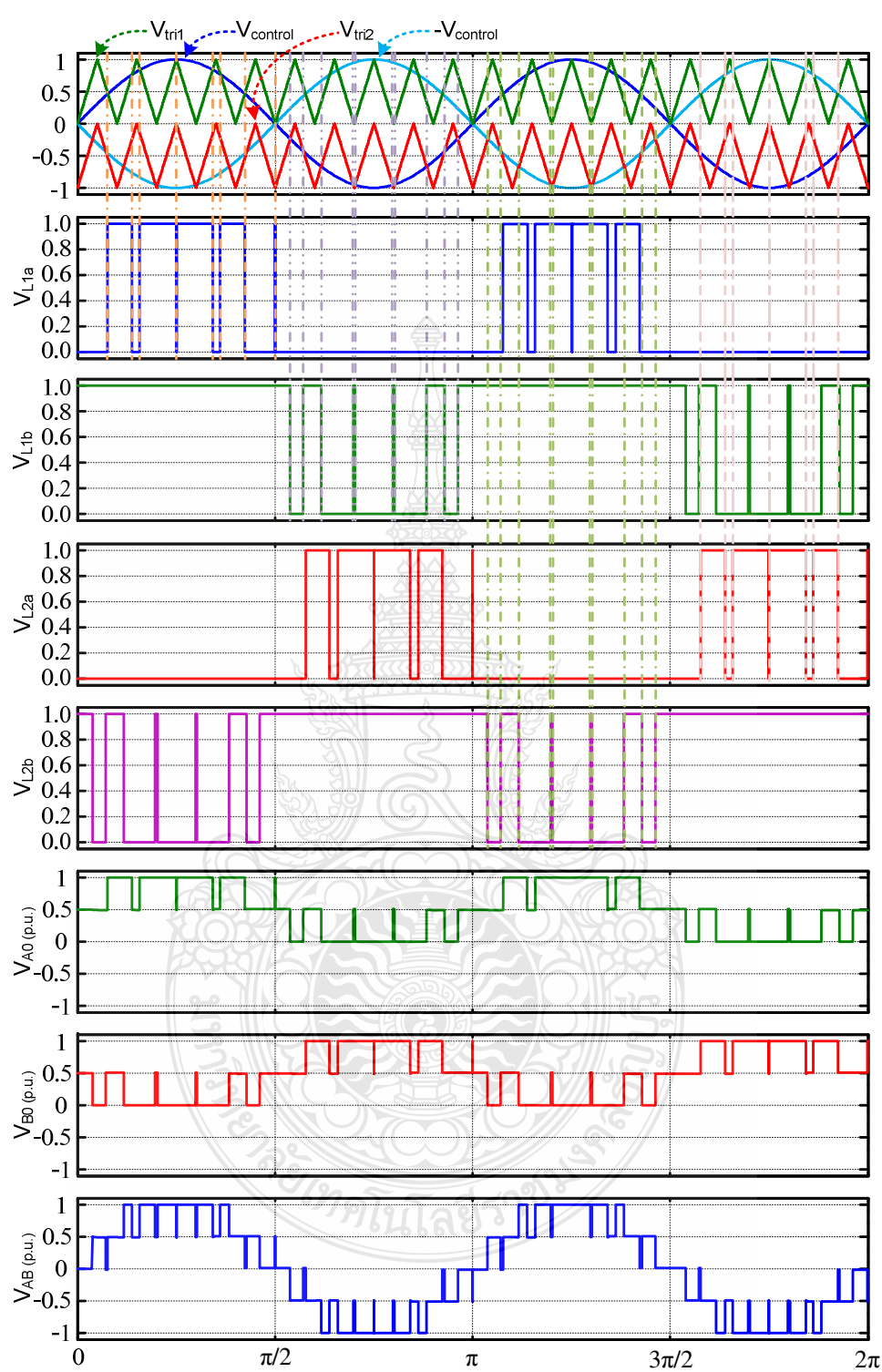
$$n_{d,clamp} = (n_c - 1)(n_c - 2) \quad (2.6)$$

โดยที่ $n_{d,clamp}$ คือจำนวนของไดโอด



ภาพที่ 2.12 วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์แบบ 1 เฟส

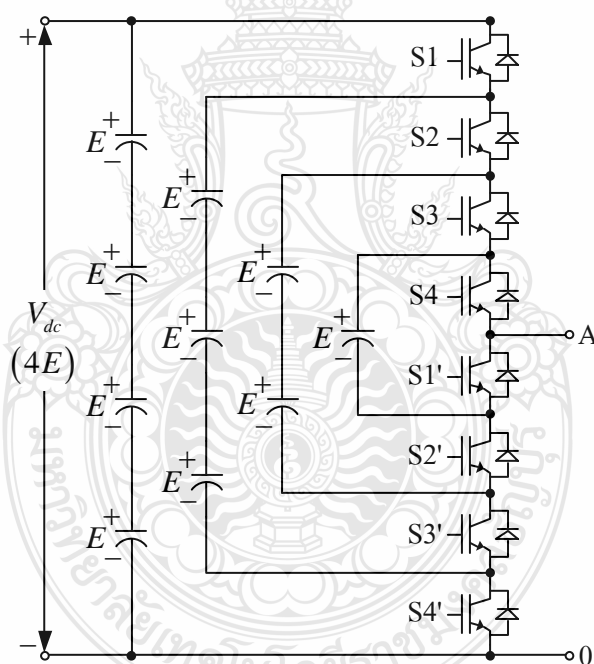




ภาพที่ 2.13 รูปคลื่นสัญญาณควบคุมแบบ PD และแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบ ไดโอดแคตมปี

2.4.2.2 วงจรแปลงผันหลายระดับแบบฟลายอิงคาปาซิเตอร์ [19], [20]

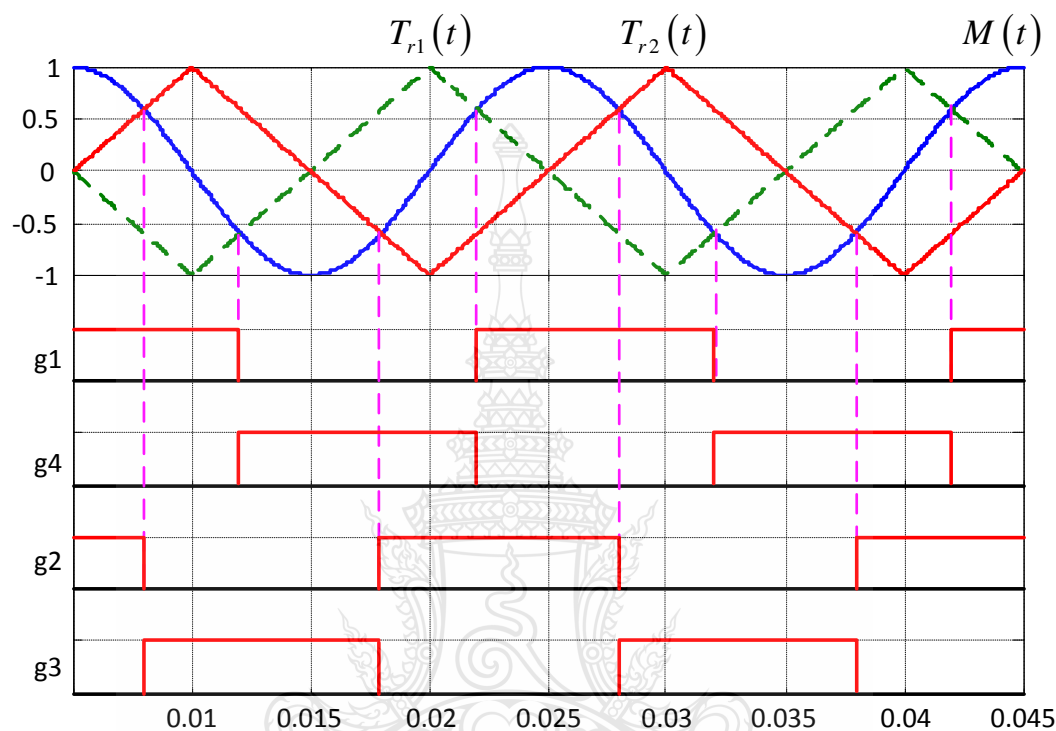
โครงสร้างของวงจรแปลงผันหลายระดับแบบฟลายอิงคาปาซิเตอร์ หรือเรียกว่า คาปาซิเตอร์แคลมป์ (Capacitor-Clamped) แสดงดังภาพที่ 2.14 ซึ่งจะมีส่วนประกอบหลักด้วยกัน 2 ส่วนคือ ตัวเก็บประจุและอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยตัวเก็บประจุนอกสุดเรียกว่า คอมมอนดีซีลิงก์ (Common DC Link) เป็นตัวสะสมพลังงาน ขณะที่ตัวเก็บประจุนั้น ๆ เรียกว่า ตัวเก็บประจุแบบฟลายอิง (Flying Capacitor) เป็นตัวสร้างแรงดันระดับต่าง ๆ โดยแรงดันที่ได้ในแต่ละระดับ เกิดจากผลรวมของแรงดันที่ตกคร่อมที่ตัวเก็บประจุแบบฟลายอิงแต่ละตัว ที่ต่ออนุกรมกันในวงนั้น ซึ่งแรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุแบบฟลายอิงในแต่ละตัวคือ $1E$ ซึ่งจำนวนระดับของแรงดันมีค่าเท่ากับ $m = \frac{s}{2} + 1$ เมื่อ m คือ จำนวนระดับของแรงดันเมื่อเทียบกับขั้วลบของดีซีลิงก์และ s คือ จำนวนอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง



ภาพที่ 2.14 วงจรพื้นฐานของวงจรแปลงผัน 5 ระดับแบบฟลายอิงคาปาซิเตอร์ 1 กิ่ง

จากภาพที่ 2.15 แสดงเทคนิคการสวิตซ์แบบ CPS-SPWM (Carrier Phase Shifted Sinusoidal Pulse Width Modulation) สำหรับวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบฟลายอิงคาปาซิเตอร์ [22] หลักการคือรูปคลื่นสามเหลี่ยมทั้งสอง $T_{r1}(t)$ และ $T_{r2}(t)$ ต้องมีขนาดเท่ากันและมีเฟสตรงข้ามกัน

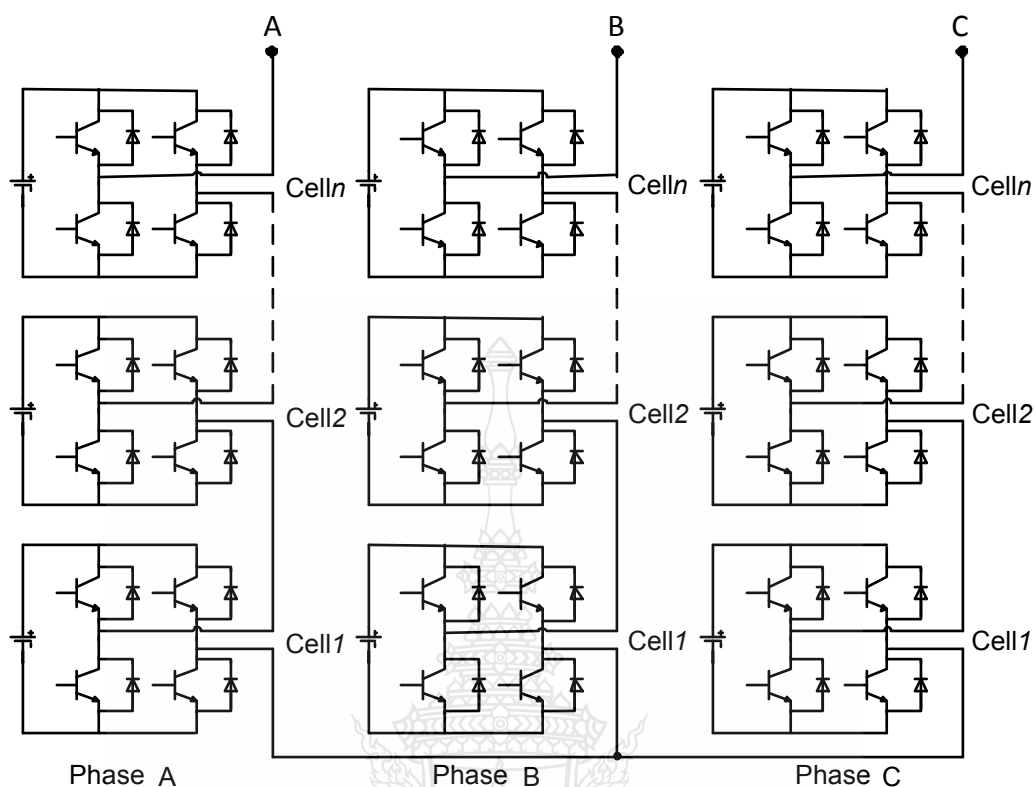
จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่น $M(t)$ สัญญาณ g_1 ได้จากการเปรียบเทียบระหว่าง $T_{r1}(t)$ และ $M(t)$ ส่วนสัญญาณ g_4 ได้จากการกลับสัญญาณ g_1 , สัญญาณ g_2 ได้จากการเปรียบเทียบระหว่าง $T_{r2}(t)$ และ $M(t)$ และสัญญาณ g_3 ได้จากการกลับสัญญาณ g_2 ตามลำดับ



ภาพที่ 2.15 เทคนิคการสวิตซ์แบบ CPS-SPWM ของวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบฟลายอิงคาปาซิเตอร์

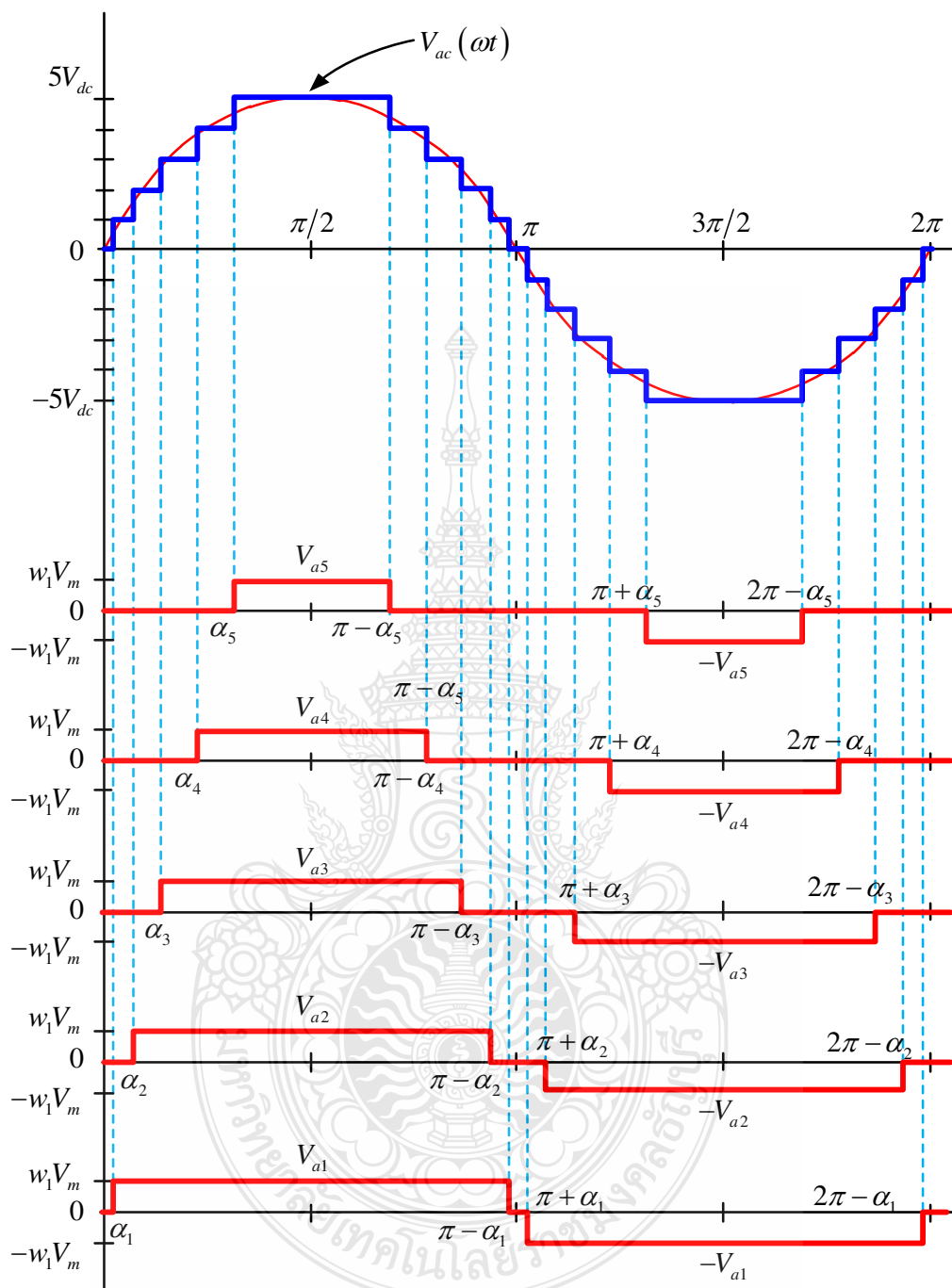
2.4.2.3 วงจรแปลงผันหลายระดับแบบคาสเคด [9]

วงจรแปลงผันหลายระดับแบบคาสเคดเป็นวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยการนำวงจรแปลงผันแบบเต็มบริดจ์ (H-Bridge) ต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจำนวนหลายชุดวงจรมาต่อรวมกันในลักษณะแบบอนุกรมดังภาพที่ 2.16 และควบคุมความกว้างของแรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรแปลงผันแต่ละชุดที่มุมจุดชนวนต่าง ๆ กัน เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ารวมด้านออกของวงจรทั้งหมดมีรูปร่างใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์มากที่สุดโดยข้อดีของโครงสร้างวงจรลักษณะนี้คือแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าของแต่ละเซลล์ไม่จำเป็นต้องสูงมาก และหากแรงดันไฟฟ้าด้านเข้าของเซลล์ใดเซลล์หนึ่งไม่สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้ามายังวงจรแปลงผันได้ วงจรรวมก็ยังคงสามารถทำงานได้อยู่ แต่ผลกระทบที่ตามมาคือความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกส์รวมจะเพิ่มขึ้น และค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (V_{max}) ของแรงดันไฟฟ้าด้านออกจะมีค่าลดลง



ภาพที่ 2.16 วงจรแปลงผันหลายระดับแบบคาสเคด

ภาพที่ 2.17 แสดงรูปคลื่นแรงดันขาออกของวงจรแปลงผันแบบ 11 ระดับซึ่งเป็นการคาสเคดของวงจรแปลงผันแบบเต็มบริดจ์จำนวน 5 วงจร โดยแรงดันไฟฟ้าด้านออกของวงจรแปลงผันหลายระดับแบบคาสเคดนี้จะเป็นลักษณะคล้ายขั้นบันได (Stair) ซึ่งจำนวนขั้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนของเซลล์ย่อยที่ต่ออยู่ โดยความสัมพันธ์ของจำนวนเซลล์กับขั้นของแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็น $m = (2s + 1)$ โดย m คือจำนวนขั้นของแรงดันไฟฟ้าด้านออก และ s คือจำนวนของเซลล์ย่อยที่ใช้ต่ออยู่ในวงจร ค่ายอดของแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันแบบคาสเคดนี้คือผลรวมของแรงดันไฟฟ้าด้านออกสูงสุดในแต่ละวงจรย่อย ดังนั้นจะได้แรงดันไฟฟ้าด้านออกสูงสุดเท่ากับ $V_{an} = V_{a1} + V_{a2} + V_{a3} + V_{a4} + V_{a5}$



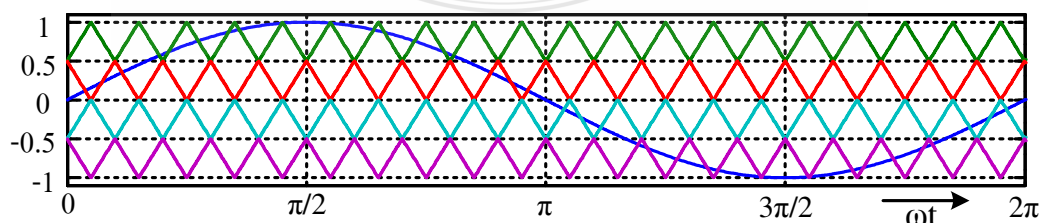
ภาพที่ 2.17 รูปคลื่นแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผัน 11 ระดับแบบคาสเคด

เมื่อพิจารณาวงจรแปลงผันแบบหลายระดับในแต่ละประเภทจากลักษณะการต่อวงจรทำให้สามารถเห็นข้อจำกัดและข้อเด่น-ข้อด้อยแตกต่างกัน [19] คือ

- 1) วงจรแปลงผันหลายระดับแบบไดโอดเคลมปี
 - ไม่สามารถเลือกรูปแบบการสวิตช์ได้
 - มีคอมมอนดีซีลิงค์
 - การสมดุลพลังงานที่ตัวเก็บประจุดีซีลิงค์ทำได้ยาก
- 2) วงจรแปลงผันหลายระดับแบบฟลายอิงคาปาซิเตอร์
 - สามารถเลือกรูปแบบการสวิตช์ได้
 - มีคอมมอนดีซีลิงค์
 - สิ้นเปลืองตัวเก็บประจุ และตัวเก็บประจุที่ใช้มีขนาดใหญ่
- 3) วงจรแปลงผันหลายระดับแบบคาสเคด
 - สามารถเลือกรูปแบบการสวิตช์ได้
 - ไม่มีคอมมอนดีซีลิงค์
 - มีตัวเก็บประจุแยกอิสระในแต่ละเซลล์ จึงสิ้นเปลืองแหล่งจ่ายอิสระหลายแหล่ง

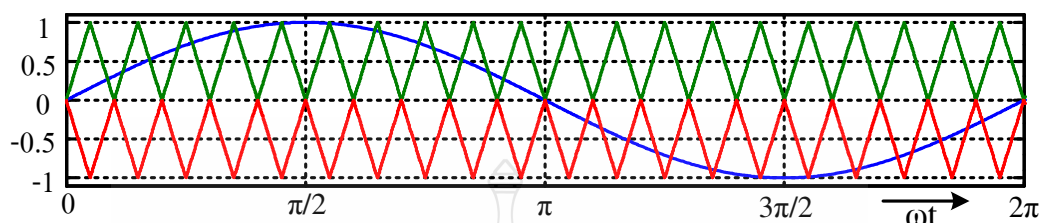
หากมองในแง่ของการนำไปใช้งานในอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม วงจรแปลงผันหลายระดับแบบไดโอดเคลมปีมีข้อได้เปรียบคือ ความไวในการทำงานมากกว่าและแรงดันด้านออกมีสัญญาณความถี่เกินหรือมีปริมาณฮาร์มอนิกที่น้อยกว่าเมื่อเทียบในระดับที่เท่ากัน ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้วงจรแปลงผันหลายระดับแบบไดโอดเคลมปีมาทำการศึกษาและวิจัย สำหรับวิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบปรับความกว้างของพัลส์สำหรับวงจรแปลงผันหลายระดับแบ่งออกเป็น 3 ชนิด [11] คือ

1) Alternative Phase Opposition Disposition (APOD) สัญญาณรูปสามเหลี่ยมของรูปคลื่นที่อยู่ติดกันจะมีเฟสต่างกัน 180° ซึ่งสัญญาณรูปสามเหลี่ยมสำหรับวงจรแปลงผัน 3 ระดับนั้นจะมีลักษณะเหมือนกับการสร้างสัญญาณด้วยวิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบปรับความกว้างของพัลส์ แบบ POD ในภาพที่ 2.18 เป็นวิธีการแบบ APOD สำหรับวงจรแปลงผัน 5 ระดับ



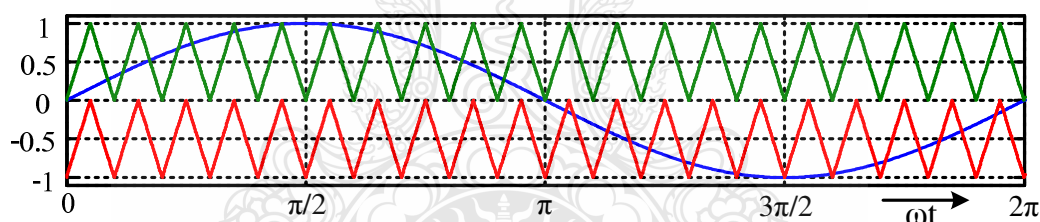
ภาพที่ 2.18 วิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบปรับความกว้างของพัลส์แบบ APOD

2) Phase Opposition Disposition (POD) สัญญาณรูปสามเหลี่ยมด้านบนกับด้านล่างเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงที่จุดศูนย์จะมีเฟสต่างกัน 180° ดังภาพที่ 2.19



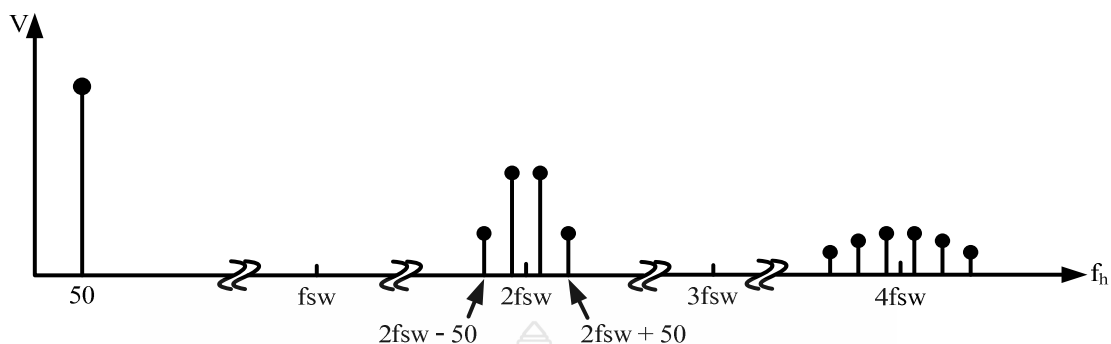
ภาพที่ 2.19 วิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบปรับความกว้างของพัลส์แบบ POD

3) Phase Disposition (PD) สัญญาณรูปสามเหลี่ยมทุกสัญญาณจะต้องมีเฟสตรงกันดังภาพที่ 2.20



ภาพที่ 2.20 วิธีการมอดูเลตสัญญาณแบบปรับความกว้างของพัลส์แบบ PD

จากเทคนิคทั้ง 3 ชนิดข้างต้นนี้ เทคนิคการมอดูเลตสัญญาณแบบปรับความกว้างของพัลส์แบบ PD จะก่อให้เกิดฮาร์มอนิกสัณน้อยที่สุด [11] ดังนั้นในบทความนี้จึงเลือกใช้เทคนิคแบบ PD ในการมอดูเลตสัญญาณแบบปรับความกว้างของพัลส์ให้กับวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคสแคดป์ ดังภาพที่ 2.20 ซึ่งข้อดีของเทคนิคนี้คือ ความถี่ต่ำสุดของฮาร์มอนิกสัณจะเกิดขึ้นที่ความถี่ 2 เท่าของความถี่การสวิตช์ นอกจากนั้นฮาร์มอนิกสัณที่ความถี่ 2 เท่าของความถี่การสวิตช์ยังเป็นศูนย์กลางเหลือแต่แถบข้าง (Sideband) ดังภาพที่ 2.21 ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ง่ายต่อการกรอง ซึ่งความถี่ของฮาร์มอนิกสัณที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเหมือนกับการมอดูเลตสัญญาณแบบปรับความกว้างของพัลส์แบบยูนิโพลาร์ของวงจรแปลงผัน 2 ระดับแต่จะมีปริมาณของฮาร์มอนิกสัณที่น้อยกว่าการมอดูเลตสัญญาณแบบปรับความกว้างของพัลส์แบบยูนิโพลาร์ของวงจรแปลงผัน 2 ระดับนั่นเอง



ภาพที่ 2.21 ลำดับของฮาร์มอนิกของแรงดันที่เกิดขึ้น

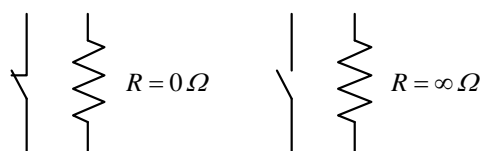
2.4.3 อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังทั่วไป ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวจะทำงานใน 2 สถานะคือ สถานะนำกระแส และสถานะหยุดนำกระแส ทั้งนี้ในเชิงทฤษฎี อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์จะถูกสมมติให้เป็นสวิตซ์อุดมคติ เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์วงจร อย่างไรก็ตามความเข้าใจคุณลักษณะแรงดันและกระแสของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละชนิดมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการนำไปประยุกต์ใช้งาน

อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังควรมีคุณลักษณะทางอุดมคติดังนี้

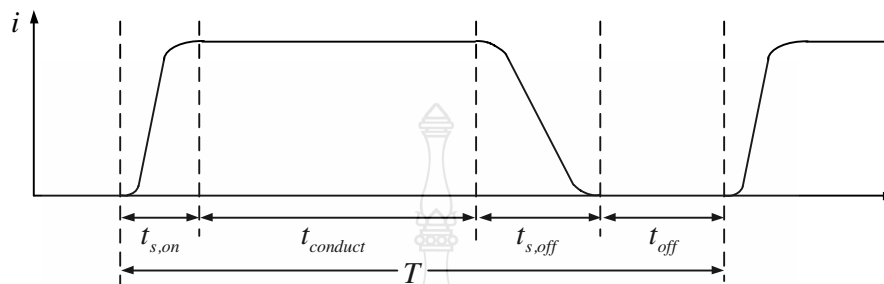
- สามารถทนแรงดันพังทลายได้สูง ซึ่งขึ้นอยู่กับพิกัดแรงดันใช้งาน
- มีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสต่ำทำให้มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียต่ำ
- มีความเร็วสูงในการเปลี่ยนสถานะการทำงาน
- ทนต่ออุณหภูมิสูงขณะใช้งาน
- ควบคุมได้ง่าย

โดยทั่วไปอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจะทำงานเป็นสวิตซ์ในวงจร ซึ่งขณะนำกระแส ค่าความต้านทานของอุปกรณ์จะต่ำมาก (ใกล้เคียงศูนย์) และขณะหยุดนำกระแส ค่าความต้านทานของอุปกรณ์จะสูงมาก (ใกล้เคียงค่าอนันต์) ดังวงจรสมมูลในภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 วงจรสมมูลของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ขณะอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเปลี่ยนสถานะทำงาน จะเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขึ้น ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าประสิทธิภาพของวงจรโดยรวม ทั้งนี้ช่วงเวลาในการทำงานของสวิตซ์ และ กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการทำงานทั้ง 2 สถานะ แสดงดังภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.23 ค่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในช่วงเวลาต่าง ๆ

- เมื่อ $t_{s,on}$ คือ ช่วงเวลาเริ่มนำกระแส (Turn On)
 $t_{conduct}$ คือ ช่วงเวลานำกระแส (On)
 $t_{s,off}$ คือ ช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส (Turn Off)
 t_{off} คือ ช่วงเวลาหยุดนำกระแส (Off)

การสูญเสียที่สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ สูญเสียขณะนำกระแส ($W_{con,loss}$) และขณะสวิตซ์ ($W_{s,loss}$) โดยการสูญเสียขณะสวิตซ์แบ่งได้อีกเป็น 2 ส่วนคือ ช่วงเริ่มนำกระแส (Turn-On Loss: $W_{s,on,loss}$) และช่วงเริ่มหยุดนำกระแส (Turn-Off Loss: $W_{s,off,loss}$) ค่าพลังงานสูญเสียต่าง ๆ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.7

$$\begin{aligned}
 W_{con,loss} &= V_d I_d t_{conduct} \\
 W_{s,on,loss} &= \frac{1}{2} V_d I_d t_{s,on} \\
 W_{s,off,loss} &= \frac{1}{2} V_d I_d t_{s,off}
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

วัตถุประสงค์ของการออกแบบอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังคือค่าที่น้อยที่สุดของการสูญเสียขณะนำกระแสและการสูญเสียขณะสวิตซ์ซึ่งรวมกัน (อยู่ในรูปของความร้อน) เพราะอุณหภูมิการทำงานสูงสุด T_{jmax} จะต้องถูกจำกัดเพื่อป้องกันอุณหภูมิเบรคควาน์ ดังนั้นกำลังสูญเสียสูงสุดหาได้จากสมการที่ 2.8

$$P_{AVmax} \leq \frac{T_{jmax} - T_a}{R_{thja}} \quad (2.8)$$

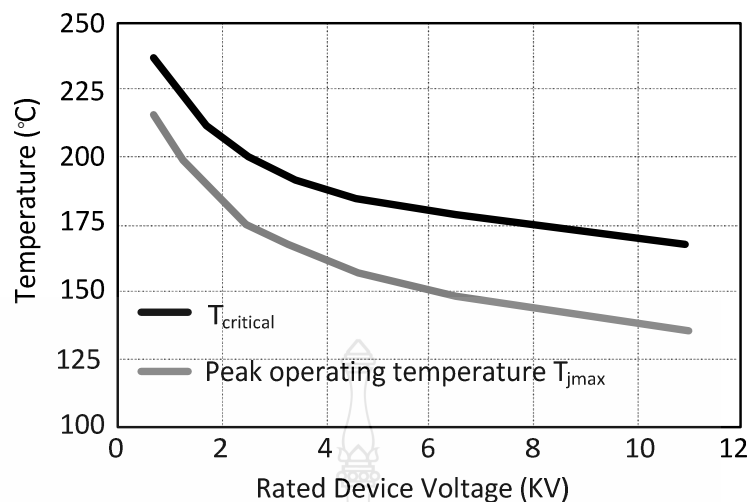
เมื่อ T_{jmax} คือ อุณหภูมิสูงสุดที่จุดต่อ
 T_a คือ อุณหภูมิแวดล้อม
 R_{thja} คือ ความต้านทานความร้อนระหว่างจุดต่อของสารกึ่งตัวนำและสภาพแวดล้อม

อุณหภูมิการทำงานสูงสุด T_{jmax} จะลดลงด้วยอุปกรณ์ป้องกันแรงดัน [23] ซึ่งอุณหภูมิวิกฤตและอุณหภูมิการทำงานสูงสุด T_{jmax} ที่ปลอดภัยของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.24 ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในขณะทำงานที่ความถี่ f สามารถหาได้จากสมการที่ 2.9

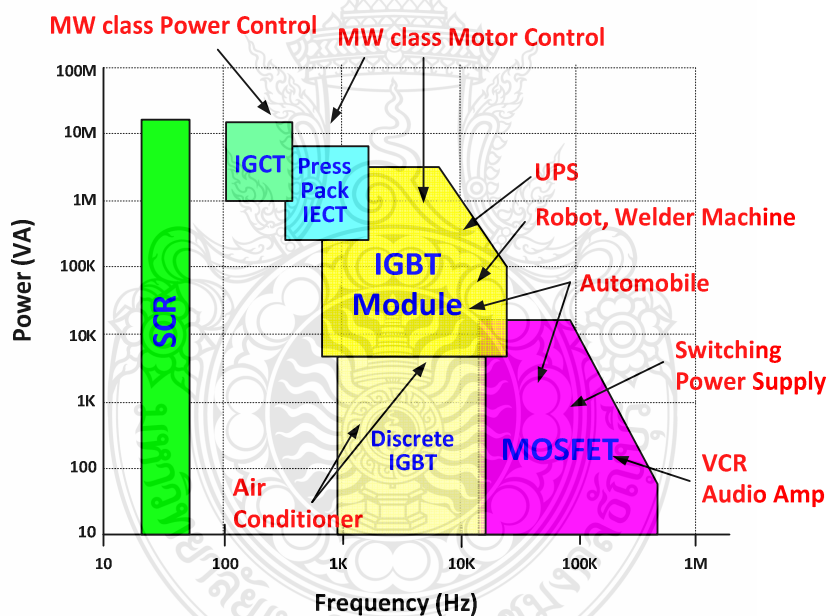
$$P_{AV} = \psi I_{on} V_{on} + f (W_{on} + W_{off}) \quad (2.9)$$

เมื่อ I_{on} คือ กระแสในขณะนำกระแส
 V_{on} คือ แรงดันขณะนำกระแส
 W_{on} คือ การสูญเสียขณะนำกระแส
 W_{off} คือ การสูญเสียขณะหยุดนำกระแส
 ψ คือ Duty Cycle

จากสมการที่ 2.8 และ 2.9 เป็นข้อจำกัดสำหรับการนำอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังไปประยุกต์ใช้งานตามที่แสดงในภาพที่ 2.24 และ 2.25



ภาพที่ 2.24 อุณหภูมิวิกฤตและอุณหภูมิการทำงานสูงสุด T_{jmax} ที่ปลอดภัยของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ [23]



ภาพที่ 2.25 พิกัดกำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังและการประยุกต์ใช้งาน [23]

การพัฒนาอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในปัจจุบันสามารถพัฒนาไปที่พิกัดที่สูงขึ้นมาก ดังแสดงในภาพที่ 2.25 สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ขนาดกำลังไฟฟ้าที่ใช้คือ 10 กิโลวัตต์แอมแปร์ ความถี่สวิตซ์ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่พิจารณาเลือกใช้คือ ไอจีบีที

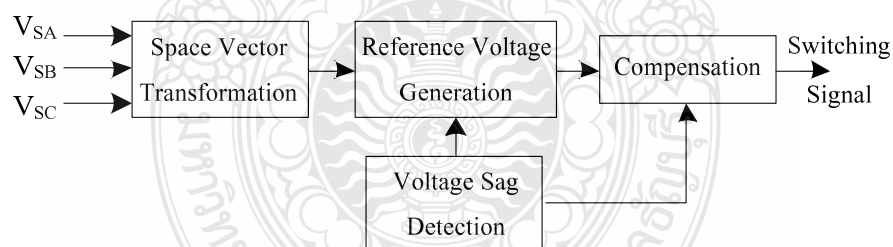
2.4.4 ส่วนที่ใช้เก็บพลังงาน

เป็นส่วนที่มีความสำคัญต่อความสามารถในการชดเชยแรงดันตกชั่วคราวในส่วนของโหลดที่สามารถรับได้และระยะเวลาในการชดเชย ซึ่งส่วนที่ใช้เก็บพลังงานนี้สามารถนำแบตเตอรี่หรือตัวเก็บประจุมาใช้ได้ แต่โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้ตัวเก็บประจุมากกว่าเนื่องจากหาซื้อได้ง่ายและราคาถูก นอกจากนี้ยังสามารถลดปัญหาจลนศาสตร์ได้อีกด้วย

2.4.5 ส่วนการควบคุม

เป็นส่วนที่มีความสำคัญที่สุดในระบบการชดเชยแรงดันตกชั่วคราว มีหน้าที่ในการควบคุมการเริ่มหรือหยุดทำงานของระบบ และการคำนวณหาแรงดันที่ต้องชดเชยแล้วส่งสัญญาณไปสั่งให้ส่วนการแปลงพลังงานทำงาน ระบบการควบคุมพื้นฐานที่ถูกใช้ในงานวิจัยที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่จะใช้การควบคุมแบบเวกเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 2.26 สามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วน [5] คือ

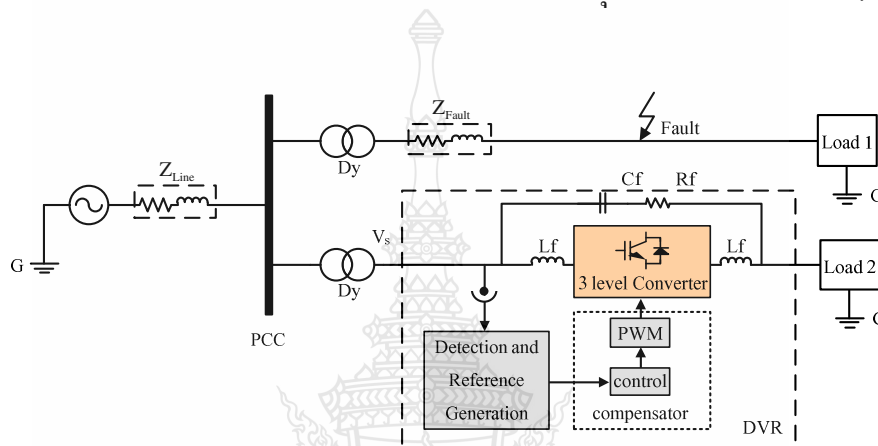
- 1) การตรวจจับแรงดันตกชั่วคราว มีหน้าที่หลักเป็นเพียงการตรวจจับการเกิดและการสิ้นสุดของแรงดันตกชั่วคราวเท่านั้น
- 2) การสร้างแรงดันอ้างอิง มีหน้าที่หลักในการสร้างแรงดันสมมุติของแรงดันในระบบไฟฟ้าที่เป็นปกติขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราว
- 3) การสร้างแรงดันชดเชย มีหน้าที่หลักในการคำนวณหาแรงดันที่ต้องชดเชย และสร้างสัญญาณการขับนำสวิทช์ไปสั่งให้วงจรแปลงผันสร้างแรงดันชดเชย



ภาพที่ 2.26 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมพื้นฐาน

2.5 แบบจำลองของระบบ

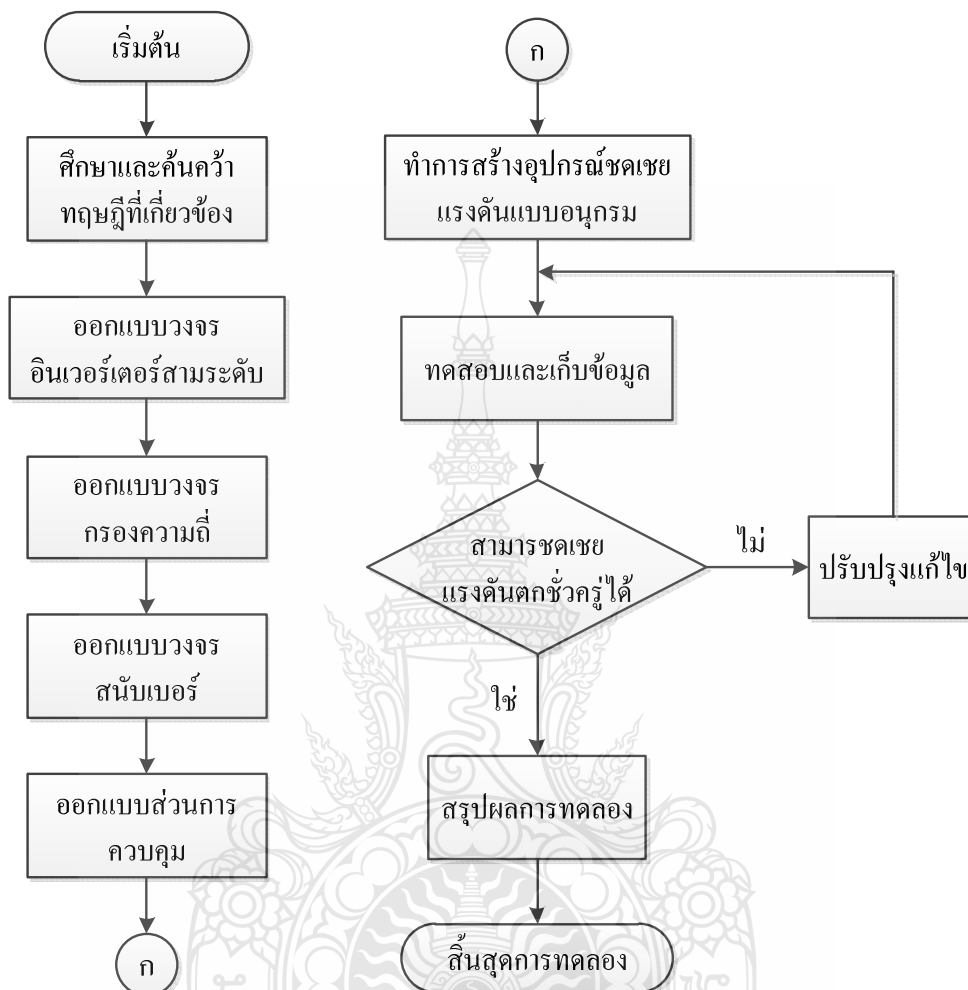
ในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมเพื่อชดเชยแรงดันตกชั่วคราว โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองและวิเคราะห์ผล จากนั้นก็จะทำการสร้างตัวต้นแบบของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมเพื่อทำการทดลองชดเชยแรงดันในระบบจริง และเปรียบเทียบกับผลการจำลองในคอมพิวเตอร์ ว่าเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร การจำลองการทำงานของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำในประเทศไทยปัจจุบันใช้วงจรดังภาพที่ 2.27



ภาพที่ 2.27 แบบจำลองการทำงานที่วงจรของระบบจำหน่ายไฟฟ้าเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้น

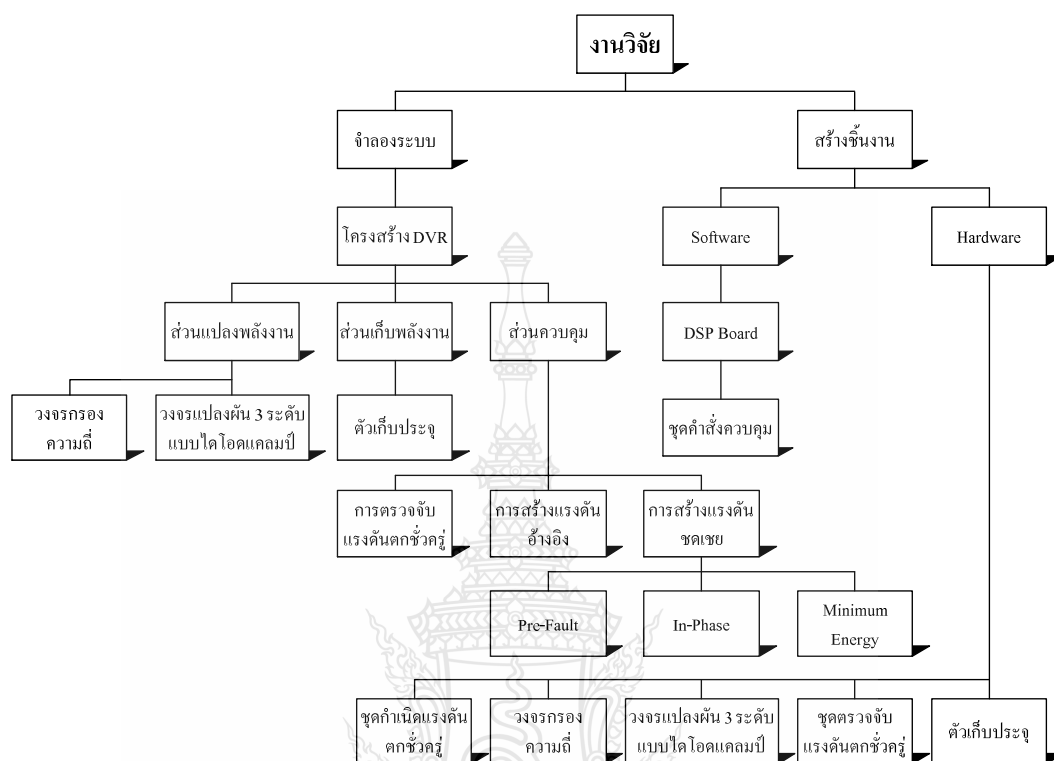
ในส่วนของการวิเคราะห์ปัญหาและการออกแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม ทำการทดสอบโดยใช้แบบจำลองดังกล่าว ที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมเข้าในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ แล้วดูค่าแรงดันว่าเมื่อมีแรงดันตกชั่วคราวเกิดขึ้น แรงดันจะยังคงรักษาระดับอยู่ที่ค่ามาตรฐานหรือไม่ ถ้าไม่ก็จะทำการวิเคราะห์ปัญหาและหาเทคนิค วิธีการต่าง ๆ เข้ามาใช้ในการแก้ปัญหา

2.6 แผนภาพของการทำงานวิจัย (Flow Chart)



ภาพที่ 2.28 แผนภาพของการทำงานวิจัย

2.7 กรอบของการทำงานวิจัย (Frame Work)



ภาพที่ 2.29 กรอบของการทำงานวิจัย

2.8 สรุปผลเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาวรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม พบว่าในโรงงานอุตสาหกรรมหรือบ้านเรือนต่าง ๆ ในส่วนที่มีการใช้ไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำ และมีการส่งจ่ายไฟฟ้าแบบหลายเฟส เมื่อเกิดความผิดปกติขึ้นที่เฟสใดเฟสหนึ่ง เฟสอื่น ๆ ที่อยู่ในระบบนั้นก็จะมีปัญหาแรงดันตกชั่วคราวเกิดขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือระบบควบคุมต่าง ๆ ได้รับความเสียหาย จึงจำเป็นต้องหาอุปกรณ์เพื่อแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวที่เกิดขึ้นนี้ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว และได้ปรับปรุงพัฒนาโดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ เพื่อลดผลกระทบของสัญญาณรบกวนที่ออกมาจากตัวอุปกรณ์เอง อีกทั้งยังสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมได้อีกด้วย

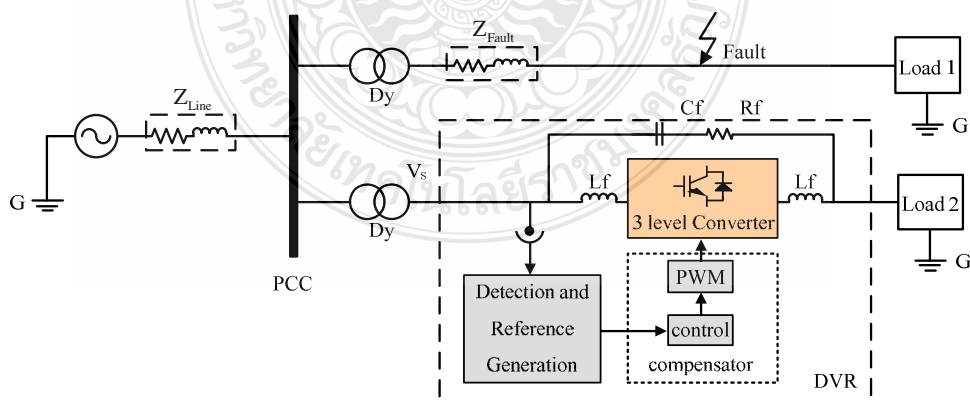
บทที่ 3

การออกแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมและผลการจำลอง

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในการสร้างแบบจำลองทางระบบไฟฟ้ากำลัง และจำลองเหตุการณ์การเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าซึ่งส่งผลให้เกิดแรงดันตกชั่วคราวในส่วนที่ทำการศึกษา และทำการวัดค่ากระแสและแรงดัน โดยปริมาณกระแสและแรงดันที่วัดได้จะเป็นสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เพื่อทำการออกแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมที่น่าเสนอ

3.1 แนวคิดในการออกแบบและการสร้างอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม

การจำลองการทำงานของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำในประเทศไทยปัจจุบันใช้วงจรดังภาพที่ 3.1 โดยกำหนดให้ความผิดปกติในระบบไฟฟ้าเกิดที่วินาทีที่ 0.04 เป็นเวลา 0.1 วินาที แรงดันแหล่งจ่าย 3 เฟสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงมีค่า 380 โวลต์ ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ใช้ความถี่การสวิตช์ 20 กิโลเฮิรตซ์ กระแสโหลดสูงสุด 15 แอมแปร์ และแรงดันบัสไฟตรง 300 โวลต์ จากภาพที่ 3.1 แสดงระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยที่ Z_{Line} คือค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายที่จุดต่อร่วม, Z_1 คือค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างจุดต่อร่วมและโหลด 1, Z_2 คือค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างจุดต่อร่วมและโหลด 2 เมื่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าเกิดความผิดปกติ จะเกิดค่าอิมพีแดนซ์ Z_{Fault} ซึ่งเรากำหนดให้เกิดความผิดปกติที่จุดต่อร่วมกับโหลด 1 สามารถกำหนดได้ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3.1 แบบจำลองการทำงานของระบบจำหน่ายไฟฟ้าเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้น

จากภาพที่ 3.1 เป็นการเกิดความผิดพลาดของสายส่งที่อยู่ข้างเคียง ส่งผลให้ในขณะเกิดความผิดพลาดในระบบไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าในระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมมีการเปลี่ยนแปลง โดยการเปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับชนิดของความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ดังสมการที่ 3.1 [3]

$$\bar{Z}_{Load} = Z_1 // Z_2 \quad (3.1)$$

แรงดันที่จุด PCC คือ

$$\bar{V}_{PCC} = \frac{\bar{Z}_{Load}}{\bar{Z}_{Line} + \bar{Z}_{Load}} \quad (3.2)$$

$$V_{PCC} = \left| \frac{\bar{Z}_{Load}}{\bar{Z}_{Line} + \bar{Z}_{Load}} \right| \quad (3.3)$$

$$\phi_{PCC} = \tan^{-1} \left(\frac{X_{Load}}{R_{Load}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{X_{Load} + X_{Line}}{R_{Load} + R_{Line}} \right) \quad (3.4)$$

เมื่อ $Z_1 = R_1 + jX_1$ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างจุดต่อร่วมและโหลด 1

$Z_2 = R_2 + jX_2$ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างจุดต่อร่วมและโหลด 2

\bar{V}_{PCC} คือ แรงดันเฟสที่จุดต่อร่วมในสภาวะปกติ

V_{PCC} คือ ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมในสภาวะปกติ

ϕ_{PCC} คือ ค่ามุมของแรงดันที่จุดต่อร่วมในสภาวะปกติ

เมื่อเกิดความผิดพลาดสมการแรงดันไฟฟ้าและมุมเฟสจะเปลี่ยนไปดังนี้

$$\bar{Z}_{(Fault)} = Z_2 // Z_{Fault}$$

$$\bar{V}_{PCC(Fault)} = \frac{\bar{Z}_{(Fault)}}{\bar{Z}_{Line} + \bar{Z}_{(Fault)}} \quad (3.5)$$

$$V_{PCC(Fault)} = \left| \frac{\bar{Z}_{(Fault)}}{\bar{Z}_{Line} + \bar{Z}_{(Fault)}} \right| \quad (3.6)$$

$$\phi_{PCC(Fault)} = \tan^{-1} \left(\frac{X_{(Fault)}}{R_{(Fault)}} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{X_{(Fault)} + X_{Line}}{R_{(Fault)} + R_{Line}} \right) \quad (3.7)$$

- เมื่อ $Z_{Fault} = R_{Fault} + jX_{Fault}$ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างจุดต่อร่วมและจุดที่เกิดความผิดปกติ
 $\bar{V}_{PCC(Fault)}$ คือ แรงดันเฟสที่จุดต่อร่วมเมื่อเกิดความผิดปกติ
 $V_{PCC(Fault)}$ คือ ค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมเมื่อเกิดความผิดปกติ
 $\phi_{PCC(Fault)}$ คือ ค่ามุมของแรงดันที่จุดต่อร่วมเมื่อเกิดความผิดปกติ

จากการศึกษาการเกิดกระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้น พบว่าการเกิดความผิดปกติแต่ละชนิดทำให้กระแสลัดวงจรที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดแรงดันตกชั่วคราวแตกต่างกันด้วย การทดสอบการเกิดแรงดันตกชั่วคราวเพื่อศึกษารูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบตัวตรวจจับแรงดันตกชั่วคราว ในเบื้องต้นจะอธิบายทฤษฎีเกี่ยวกับแรงดันสเปซเวกเตอร์ จากนั้นจะเป็นรายละเอียดของอัลกอริทึมการควบคุมและออกแบบส่วนต่าง ๆ ของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมที่นำเสนอ

3.2 แรงดันและกระแสสเปซเวกเตอร์

แรงดันตกชั่วคราวที่พิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้จะไม่มีความลำดับศูนย์ (Zero Sequence Voltage) เนื่องจากการต่อหม้อแปลงแบบ Dy ในระบบไฟฟ้างานที่กล่าวมาแล้ว การแปลงค่าตัวแปรเพื่อลดความซับซ้อนในสมการแรงดันและกระแส สามารถทำได้โดยแปลงกระแสและแรงดันสามเฟส (abc) ไปเป็นสเปซเวกเตอร์บนแกนนิ่งหรือบนระนาบ $\alpha - \beta$ ดังสมการที่ 3.8 และ 3.9 [24]

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

หลังจากแปลงกระแสและแรงดันไปเป็นสเปซเวกเตอร์บนระนาบ $\alpha-\beta$ จากนั้นจะแปลงสเปซเวกเตอร์ของกระแสและแรงดันบนระนาบ $\alpha-\beta$ ไปอยู่บนแกนหมุนหรือบนระนาบ $d-q$ ที่ความถี่มูลฐาน 50 เฮิรตซ์ โดยคูณเวกเตอร์แรงดันและกระแสด้วย $e^{-j\omega t}$ เมื่อ ω คือค่าความถี่หลักมูลฐานในหน่วยเรเดียลต่อวินาที สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

และการแปลงแรงดันและกระแสบนระนาบ $d-q$ กลับไปเป็นสเปซเวกเตอร์ของแรงดันและกระแสบนระนาบ $\alpha-\beta$ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

ขนาดของแรงดันสเปซเวกเตอร์สามารถหาได้จากสมการที่ 3.14 ขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วครู่แบบสมมูลขนาดของแรงดันจะมีค่าคงที่ดังภาพที่ 3.2 แต่ในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วครู่แบบไม่สมมูลขนาดของแรงดันจะมีการแกว่ง ซึ่งประกอบด้วย ขนาดของแรงดันลำดับบวก สามารถหาค่าได้โดยการหาค่าเฉลี่ยหรือสามารถหาได้จากสมการที่ 3.15 และขนาดของแรงดันลำดับลบซึ่งแกว่งบนแรงดันลำดับบวก สามารถหาค่าได้จากสมการที่ 3.16 [5]

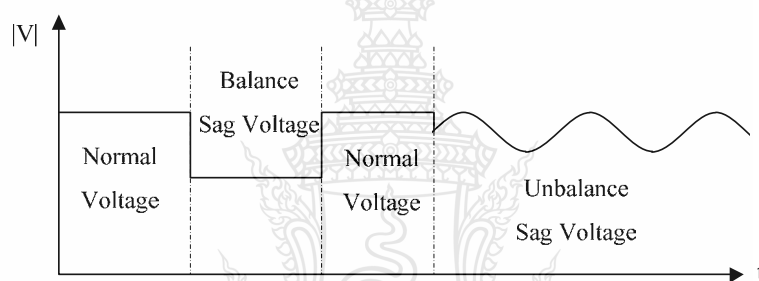
$$|V(t)| = \sqrt{V_\alpha^2(t) + V_\beta^2(t)} \quad (3.14)$$

$$|V_p| = \left| \frac{V_1 + V_2}{2} \right| \quad (3.15)$$

$$|V_n| = \left| \frac{V_1 - V_2}{2} \right| \quad (3.16)$$

โดยที่ V_1 คือขนาดของแรงดันที่เฟส A

V_2 คือขนาดของแรงดันที่เฟส B หรือ C คูณด้วย $\sin(2\pi/3 + \varphi)$

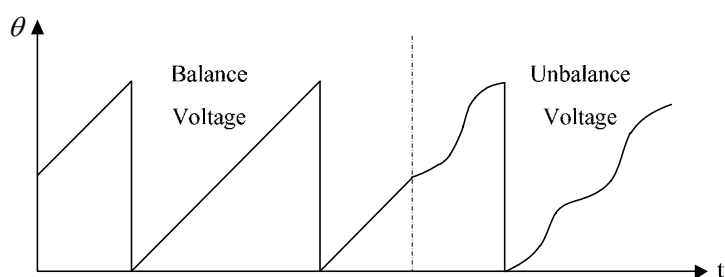


ภาพที่ 3.2 ขนาดของแรงดันตกชั่วครู่แบบสมดุลและไม่สมดุล

มุมเฟสของแรงดันสเปซเวกเตอร์สามารถหาได้ดังสมการที่ 3.17

$$\theta(t) = \tan^{-1} \left(\frac{V_\beta(t)}{V_\alpha(t)} \right) \quad (3.17)$$

ลักษณะของมุมเฟสของแรงดันทั้งแบบสมดุลและไม่สมดุลแสดงดังภาพที่ 3.3 มุมเฟสของแรงดันขณะเกิดแรงดันตกชั่วครู่แบบสมดุลจะเหมือนกับขณะปกติ แต่ขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วครู่แบบไม่สมดุลมุมเฟสก็มีการแกว่งบนมุมเฟสปกติเช่นเดียวกับขนาดของแรงดันตกชั่วครู่

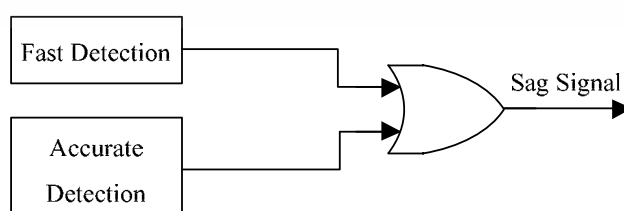


ภาพที่ 3.3 มุมเฟสของแรงดันตกชั่วคราวแบบสมดุลและไม่สมดุล

3.3 การออกแบบส่วนการควบคุม

3.3.1 การตรวจจับแรงดันตกชั่วคราว

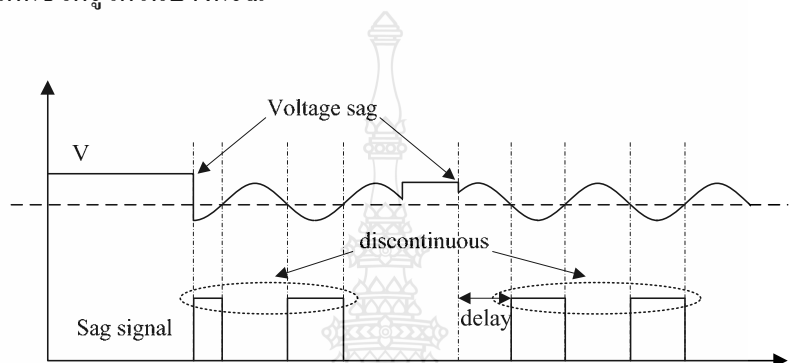
จากการศึกษาวิธีการตรวจจับแรงดันตกชั่วคราวด้วยวิธีการต่าง ๆ เพื่อสั่งการให้อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมทำงาน ในงานวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ 2 อัลกอริทึม [5] ทำงานร่วมกัน โดยแบ่งออกเป็น ส่วนตรวจจับแบบเร็วและส่วนตรวจจับแบบแม่นยำ โดยการตรวจจับแบบเร็วเป็นการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันสเปซเวกเตอร์ประกอบการตรวจจับขนาดและการเปลี่ยนแปลงมุมเฟสของแรงดันสเปซเวกเตอร์ ส่วนตรวจจับแบบแม่นยำเป็นการตรวจจับขนาดแรงดันสเปซเวกเตอร์อย่างเดียว โดยใช้วิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟที (Recursive DFT) ภาพที่ 3.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานร่วมกันของ 2 อัลกอริทึม เริ่มจากส่วนตรวจจับแบบเร็ว ซึ่งมีการตรวจจับแรงดันตกชั่วคราวที่มีความเร็วแต่มีความแม่นยำน้อย อาจจะมีการตรวจจับผิดพลาดแต่ก็ไม่ได้มีผลเสียอะไร นอกจากตัวเครื่องจะทำงานบ่อยครั้ง เมื่อส่วนตรวจจับแบบเร็วตรวจจับได้ว่าเกิดแรงดันตกชั่วคราวก็จะส่งสัญญาณสั่งให้อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมทำงาน เช่นเดียวกันถ้าส่วนตรวจจับแบบแม่นยำตรวจจับได้ว่าเกิดแรงดันตกชั่วคราวก็จะส่งสัญญาณให้อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมทำงาน สาเหตุที่ใช้ 2 อัลกอริทึมร่วมกันทำงานเนื่องจากส่วนตรวจจับแบบแม่นยำจะทำงานช้ากว่าส่วนตรวจจับแบบเร็ว จึงนำการตรวจจับแบบเร็วเข้ามาช่วยในการตรวจจับเพื่อจะได้ชดเชยได้รวดเร็วยิ่งขึ้น



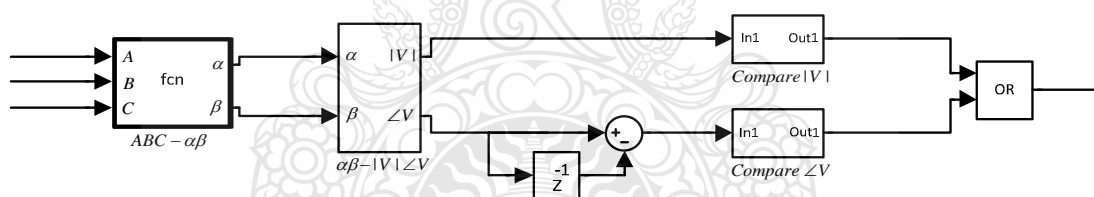
ภาพที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมการทำงานร่วมกันของ 2 อัลกอริทึม

3.3.1.1 ส่วนตรวจจับแบบเร็ว

การตรวจจับในส่วนนี้จะเป็นการตรวจจับทั้งขนาดและมุมเฟสคั้งที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยการตรวจจับขนาดจะใช้เกณฑ์ในการพิจารณาการเกิดแรงดันตกชั่วครู่มีค่าคงที่ เนื่องจากขนาดของแรงดันมาตรฐานที่จะทำให้อุปกรณ์มีปัญหา นั้นมีค่าแน่นอนที่ค่า ๆ หนึ่งและการใช้เกณฑ์จากขนาดของแรงดันในระบบไฟฟ้าจริงในสภาวะปกติจะมีค่าไม่แน่นอน อาจทำให้ไม่สามารถตรวจจับการเกิดแรงดันตกชั่วครู่ได้ในบางกรณี



ภาพที่ 3.5 ปัญหาในการตรวจจับขนาดของแรงดันสเปซเวกเตอร์ [5]



ภาพที่ 3.6 วงจรจำลองการทำงานของส่วนการตรวจจับแรงดันแรงดันตกชั่วครู่แบบเร็ว

การตรวจจับขนาดแรงดันสเปซเวกเตอร์สามารถตรวจจับแรงดันตกชั่วครู่แบบสมมูลได้ดีแต่ขณะที่แรงดันตกชั่วครู่แบบไม่สมมูลจะมีปัญหา 2 ประการคือ

- 1) ความล่าช้าในการตรวจจับแรงดันตกชั่วครู่แบบไม่สมมูล ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งการเกิดแรงดันตกชั่วครู่บนรูปคลื่นแรงดันดังภาพที่ 3.5 ในกรณีที่แรงดันตกชั่วครู่เกิดที่จุดต่ำสุดของขนาดแรงดันที่แกว่งจะสามารถตรวจจับแรงดันตกชั่วครู่ได้ทันที แต่ถ้าเกิดที่ตำแหน่งอื่นที่มีค่ามากกว่าค่าเกณฑ์ที่กำหนดก็จะต้องรอจนกว่าแรงดันจะแกว่งลงมาต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดจึงสามารถตรวจจับแรงดันตกชั่วครู่ได้ ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะทำให้เกิดความล่าช้าในการตรวจจับมากที่สุดถึง 10 มิลลิวินาที แต่อย่างไรก็ตามปัญหานี้สามารถลดลงได้โดยใช้การตรวจจับการเปลี่ยนแปลงมุมเฟสร่วม

ด้วย เนื่องจากในสภาวะปกติการเปลี่ยนแปลงของมุมเฟสจะมีค่าคงที่ แต่เมื่อเกิดแรงดันไม่สมดุลจะทำให้เกิดการแกว่งของมุมเฟสดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น ซึ่งส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของมุมเฟสปกติสามารถหาได้จากมุมเฟสใน 1 ไซเคิล (มีค่าเท่ากับ 360 องศาหรือ 2π เรเดียน) หากด้วยจำนวนข้อมูลที่ทำการสุ่ม (Sampling) ใน 1 ไซเคิล ดังสมการที่ 3.18 ซึ่งสามารถจำลองการทำงานได้ดังภาพที่ 3.6

$$\Delta\theta_{normal} = \frac{360}{No.sample} \text{ หรือ } \Delta\theta_{normal} = \frac{2\pi}{No.sample} \quad (3.18)$$

1.2 การไม่ต่อเนื่องของสัญญาณการตรวจจับแรงดันตกชั่วคราวเนื่องจากการแกว่งของขนาดแรงดันสเปซเวกเตอร์แบบไม่สมดุลดังภาพที่ 3.5 คือเมื่อขนาดแรงดันแกว่งไปสู่ค่าน้อยกว่าค่าเกณฑ์ที่กำหนดก็จะตรวจจับได้ว่าเกิดแรงดันตกชั่วคราว แต่ถ้าขนาดแรงดันแกว่งไปสู่ค่ามากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดก็จะทำให้ตรวจจับไม่ได้ว่าเกิดแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งจะส่งผลให้เกิดปัญหาการชดเชยแรงดันได้ นอกจากนั้นการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงมุมเฟสก็ไม่สามารถช่วยแก้ปัญหานี้ได้ เนื่องจากสัญญาณที่ได้ไม่มีความต่อเนื่อง ดังนั้นจึงต้องมีอัลกอริทึมซึ่งมีความแน่นอนในการตรวจจับแรงดันตกชั่วคราวทั้งในขณะสมดุลและไม่สมดุลมาช่วยแก้ปัญหา นั่นคือส่วนตรวจจับแบบแม่นยำ

3.3.1.2 ส่วนตรวจจับแบบแม่นยำ

ในส่วนนี้เป็นการตรวจจับขนาดแรงดันสเปซเวกเตอร์อย่างเฉียวและใช้การพิจารณาการเกิดแรงดันตกชั่วคราวมีค่าคงที่ โดยใช้วิธีรีเคอร์ซีฟดีเอฟที เนื่องจากมีความแม่นยำมากและง่ายในการปฏิบัติจริง ซึ่งการคำนวณรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีบนแกนหมุน [25] สามารถทำได้ดังนี้

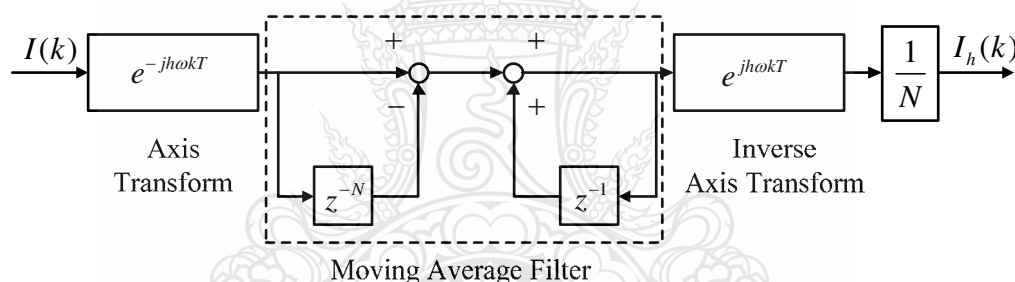
เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดขึ้นจากความคลาดเคลื่อนของสัมประสิทธิ์ในการคำนวณรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีบนแกนนิ่ง เราจะเปลี่ยนวิธีการคำนวณรีเคอร์ซีฟดีเอฟที จากการคำนวณบนแกนนิ่งไปทำบนแกนหมุนที่มีความถี่และทิศทางของการหมุน (เมื่อเทียบกับแกนนิ่ง) เท่ากับความถี่และทิศทางของการหมุนของสเปซเวกเตอร์ของแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ทำการตรวจจับ ดังแสดงในภาพที่ 3.7 โดยวิธีการนี้สัญญาณสเปซเวกเตอร์ของแรงดันจะถูกแปลงให้ไปอยู่บนแกนหมุน จากนั้นจึงนำไปทำการคำนวณตามฟังก์ชันโอนย้ายซึ่งได้จากการแปลงฟังก์ชันโอนย้ายบนแกนนิ่งของการทำรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีมาอยู่บนแกนหมุน ดังสมการที่ 3.19 โดยใช้หลักการแปลงดังนี้คือ ฟังก์ชันโอนย้ายใน z-Domain บนแกนนิ่ง $P(z)$ เมื่อแปลงมาอยู่บนแกนหมุนที่มีความถี่ (hw) จะกลายมาเป็นฟังก์ชัน $P(W^{-h}z)$ ดังนั้นเราจะได้ฟังก์ชันโอนย้ายของการทำรีเคอร์ซีฟดีเอฟทีบนแกนหมุน $D'_h(z)$ และ $D'_{6h}(z)$ ซึ่งแปลงมาจาก $D_h(z)$ และ $D_{6h}(z)$ มีค่าดังสมการที่ 3.20 และ 3.21 ตามลำดับ (ดูการพิสูจน์ได้ในรายการอ้างอิง [25])

$$D_h(z) = \frac{1}{N} \prod_{\substack{t=0 \\ t \neq h}}^{N-1} (1 - W^t z^{-1}) \quad (3.19)$$

$$D'_h(z) = \frac{1}{N} \frac{1 - z^{-N}}{1 - z^{-1}} \quad (3.20)$$

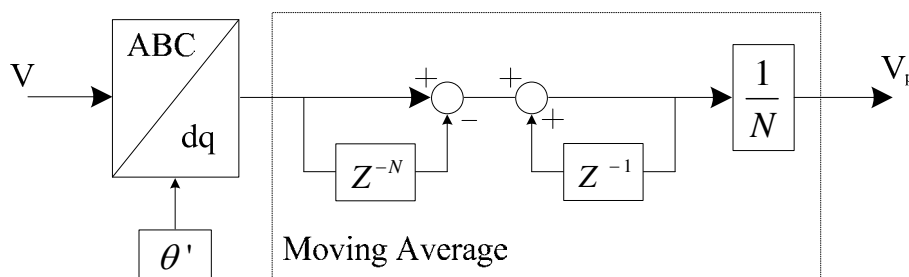
$$D'_{6h}(z) = \frac{6}{N} \frac{1 - z^{-\frac{N}{6}}}{1 - z^{-1}} \quad (3.21)$$

จากรูปสมการของ $D'_h(z)$ และ $D'_{6h}(z)$ เราอาจพิจารณาได้ว่าการคำนวณรีเคอร์ซีฟดีเอฟที่บนแกนหมุนก็คือการคำนวณแบบมูฟวิงเอฟเวอร์เรจ (Moving Average) แบบรีเคอร์ซีฟ (Recursive) นั่นเอง ด้วยวิธีการแปลงแกนหมุนนี้เราจะพบว่าข้อ $1 - W^h z^{-1}$ ได้ถูกแปลงให้กลายมาเป็น $1 - z^{-1}$ ซึ่งเราสามารถที่จะคำนวณได้อย่างถูกต้องแม่นยำโดยไม่มีปัญหาเรื่องความคลาดเคลื่อนของสัมประสิทธิ์



ภาพที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมแสดงการคำนวณรีเคอร์ซีฟดีเอฟที่แบบเต็มคาบบนแกนหมุน [25]

ภาพที่ 3.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการคำนวณรีเคอร์ซีฟดีเอฟที่แบบเต็มคาบ ($D'_h(z)$) บนแกนหมุน จากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าโครงสร้างของตัวตรวจจับแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ใช้รีเคอร์ซีฟดีเอฟที่ ในลักษณะนี้จะคล้ายคลึงกันกับการตรวจจับฮาร์มอนิกส์โดยใช้วงจรกรองผ่านต่ำบนแกนหมุน โดยจะมีความแตกต่างกันตรงที่การทำรีเคอร์ซีฟดีเอฟที่ จะใช้การคำนวณแบบมูฟวิงเอฟเวอร์เรจ ในขณะที่วิธีวงจรกรองบนแกนหมุนทั่วไปเราจะใช้วงจรกรองผ่านต่ำธรรมดา นั่นเอง ดังนั้นเมื่อนำมาใช้ในส่วนตรวจจับแบบแม่นยำแสดงได้ดังภาพที่ 3.8 โดยภาพที่ 3.8 แสดงการหาขนาดแรงดันลำดับบวก โดยเริ่มจากการแปลงแรงดัน 3 เฟสให้อยู่บนระนาบ d-q และใช้เฟสบล็อกในการหา θ' ซึ่งจะได้แรงดันที่ความถี่มูลฐานที่มีค่าคงที่ แต่เนื่องจากขณะเกิดแรงดันไม่สมดุลจะมีการแกว่งของแรงดันและในระบบไฟฟ้าไม่ได้มีเพียงแรงดันที่ความถี่มูลฐาน ดังนั้นจึงต้องนำแรงดันที่ได้มาผ่านตัวกรองแบบมูฟวิงเอฟเวอร์เรจความยาว 1 คาบก่อนแล้วจึงนำไปหาขนาดของแรงดันต่อไป



ภาพที่ 3.8 วิธีการรีเฟรชเฟสที่เฟสที่ใช้ในส่วนตรวจจับแบบแมนย่ำ [5]

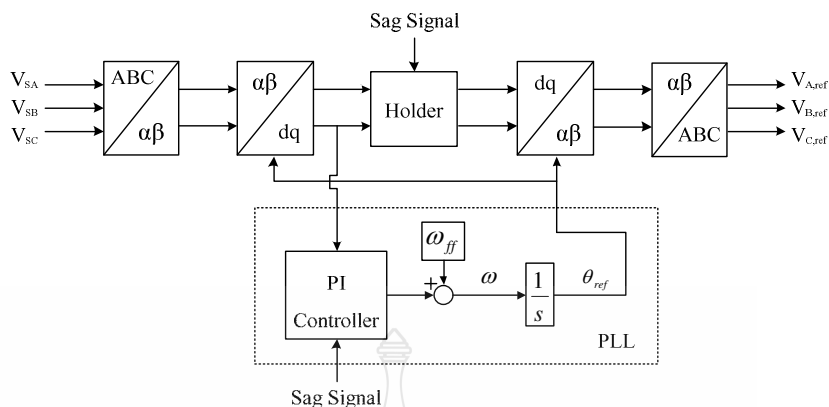
จากสมการที่ 3.15 แสดงให้เห็นว่าแรงดันลำดับบวกเพียงอย่างเดียวไม่สามารถบอกถึงแรงดันของเฟสที่ลดลงมากที่สุดได้และทำให้ตรวจจับแรงดันตกชั่วคราวไม่ได้ในบางกรณี แต่ถ้าคิดผลของแรงดันลำดับลบด้วย ก็จะทำให้ตรวจจับแรงดันตกชั่วคราวได้ทุกกรณี โดยการนำขนาดของแรงดันลำดับบวกด้วยขนาดของแรงดันลำดับลบ ซึ่งวิธีการหาค่าขนาดแรงดันลำดับลบจะเหมือนการหาขนาดแรงดันลำดับบวกเพียงแต่เปลี่ยน θ' เป็น $-\theta'$ เท่านั้น

3.3.2 การสร้างแรงดันอ้างอิง

ในส่วนนี้จะใช้เฟสล็อกกลุ่มช่วยในการสร้างแรงดันอ้างอิง ดังแสดงในภาพที่ 3.9 โดยหลักการทำงานของเฟสล็อกกลุ่มจะเริ่มจากการแปลงแรงดันให้อยู่ในรูปสเปซเวกเตอร์ตามสมการที่ 3.8 จากนั้น v_β และ v_α จะถูกแปลงให้อยู่ในรูปแกนหมุน $d-q$ โดยใช้ข้อมูลมุมเฟสจากเฟสล็อกกลุ่ม ซึ่งถ้ามุมเฟสที่ได้จากเฟสล็อกกลุ่มตรงกับมุมเฟสจริงในระบบไฟฟ้าจะทำให้แรงดันในแกน q มีค่าเป็นศูนย์ แต่ถ้ามุมเฟสที่ได้ไม่ตรงกับมุมเฟสจริงในระบบไฟฟ้าก็จะทำให้แรงดันในแกน q มีค่าเท่ากับสมการที่ 3.22 นั่นคือเฟสล็อกกลุ่มใช้การควบคุมแรงดันในแกน q ให้มีค่าเป็นศูนย์โดยใช้การควบคุมแบบ PI

$$v_q = |v| \sin(\theta - \theta') \quad (3.22)$$

การสร้างแรงดันอ้างอิงเริ่มเมื่อได้รับสัญญาณว่าเกิดแรงดันตกชั่วคราว จากนั้นก็จะสั่งให้เก็บข้อมูล v_d และ v_q ก่อนการเกิดแรงดันตกชั่วคราวไว้ และสั่งให้เฟสล็อกกลุ่มหยุดการติดตามข้อมูลของแรงดันในระบบไฟฟ้าและเก็บข้อมูลความถี่ก่อนการเกิดแรงดันตกชั่วคราวไว้และสร้างข้อมูลมุมเฟสที่ความถี่นี้ต่อไป ต่อจากนั้นข้อมูลมุมเฟสที่ได้จะถูกนำไปแปลงข้อมูลแรงดันบนระนาบ $d-q$ ที่ถูกเก็บไว้ให้กลับเป็นแรงดันอ้างอิง



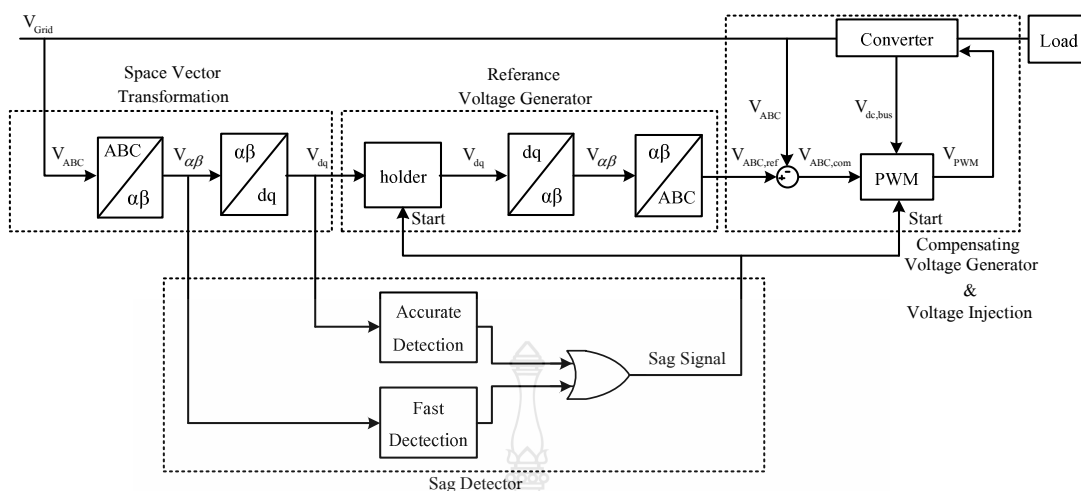
ภาพที่ 3.9 บล็อกไดอะแกรมการสร้างแรงดันอ้างอิงโดยใช้เฟสล็อกกลุ๊ป [5]

3.3.3 การสร้างแรงดันชดเชย

แรงดันที่ต้องการชดเชยสามารถหาได้จากแรงดันอ้างอิงลบด้วยแรงดันจริงในระบบไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้แรงดันโหลดไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและมุมเฟส แรงดันบัสไฟตรงซึ่งเป็นเพียงตัวเก็บประจุจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ขณะสร้างแรงดันชดเชยเป็นผลให้แรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันมีค่าลดลงตามค่าแรงดันบัสไฟตรงและทำให้การชดเชยแรงดันตกชั่วคราวไม่ได้ตามที่ต้องการ ดังนั้นจึงต้องวัดค่าแรงดันบัสไฟตรงเพื่อมาปรับค่าแรงดันให้แรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันมีค่าคงที่ดังสมการที่ 3.23 และขณะไม่เกิดแรงดันตกชั่วคราวจะต้องสั่งให้สวิตช์คู่หนึ่งของวงจรแปลงผันทำงาน เพื่อเป็นทางผ่านของกระแสไปยังโหลด ภาพที่ 3.10 เป็นการร่วมส่วนควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม

$$v_{com,bus} = \frac{v_{com} V_{dc,max}}{v_{dc}} \tag{3.23}$$

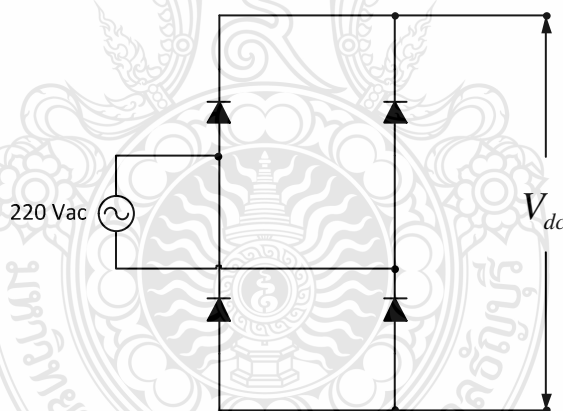
โดยที่ v_{dc} คือ แรงดันที่บัสไฟตรง
 $V_{dc,max}$ คือ แรงดันบัสไฟตรงสูงสุด



ภาพที่ 3.10 บล็อกไดอะแกรมส่วนควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วครู่แบบอนุกรม

3.4 การออกแบบส่วนที่ใช้เก็บพลังงาน

3.4.1 วงจรเรียงกระแส (Rectifier)



ภาพที่ 3.11 วงจรเรียงกระแสแบบ 1 เฟส

วงจรเรียงกระแส ดังภาพที่ 3.11 ทำหน้าที่แปลงผันหรือเปลี่ยนจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง วงจรประกอบด้วยไดโอดก้ำกึ่ง 4 ตัว สำหรับวงจรแปลงผัน 3 ระดับจะใช้ไดโอดก้ำกึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรเรียงกระแสซึ่งทำให้สามารถควบคุมระดับแรงดันในวงจรดีซีลิงค์ได้ โดยแรงดันที่ผ่านวงจรเรียงกระแสหาได้จากสมการที่ 3.24

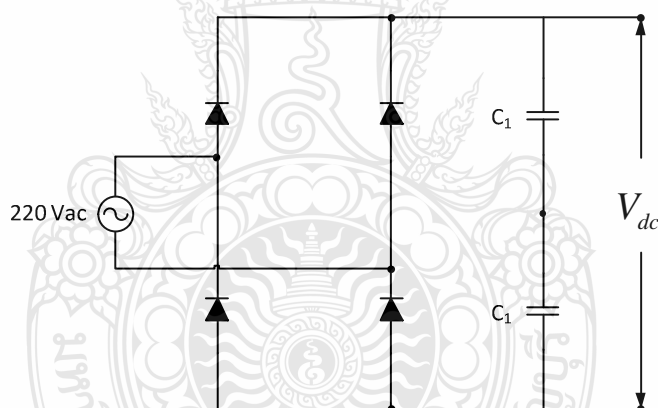
$$V_{dc} = \sqrt{2} \times V_{rms} \quad (3.24)$$

ดังนั้นจะได้แรงดันที่ผ่านวงจรเรียงกระแสเท่ากับ

$$V_{dc} = \sqrt{2} \times 220 = 311 \text{ โวลต์}$$

3.4.2 ตัวเก็บประจุเชื่อมโยงไฟตรง (DC Link)

ตัวเก็บประจุเชื่อมโยงไฟตรงหรือวงจรเชื่อมโยงทางไฟตรง ดังภาพที่ 3.12 คือวงจรเชื่อมโยงระหว่างวงจรเรียงกระแสและวงจรแปลงผัน ซึ่งจะประกอบด้วยตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่พิกัดแรงดันไฟฟ้า 450 โวลต์ ทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสให้เรียบยิ่งขึ้น และทำหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้า โดยแรงดันที่ออกจากดีซีลิงค์เพื่อจ่ายให้กับวงจรแปลงผันจะมี 3 ขั้ว คือ +Vdc, -Vdc และ Vdc/2



ภาพที่ 3.12 ตัวเก็บประจุเชื่อมโยงไฟตรงในวงจรเรียงกระแสแบบ 1 เฟส

เนื่องจากตัวเก็บประจุเป็นตัวเก็บพลังงานที่มีขีดจำกัด ดังนั้นจึงต้องกำหนดขอบเขตความสามารถในการชดเชยแรงดัน ดังได้กล่าวบางส่วนไว้ข้างต้นแล้ว แต่ก็ยังต้องมีข้อกำหนดอื่น ๆ ร่วมด้วย ซึ่งข้อกำหนดทั้งหมดในการออกแบบขนาดของตัวเก็บประจุมีดังนี้ [5]

1) สามารถชดเชยแรงดันตกชั่วคราวได้สูงสุดเท่ากับ 110 โวลต์ (ร้อยละ 50 ของแรงดันปกติ) ที่กระแส 15 แอมแปร์ ตัวประกอบกำลังเท่ากับ 1 และเป็นการชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบปกติกรณีชดเชยตรงเฟสกับแรงดันตกชั่วคราวซึ่งเป็นกรณีที่ใช้กำลังจริงมากที่สุดเป็นระยะเวลา 1 วินาที

- 2) แรงดันสูงสุดที่บัสไฟตรงมีค่าเท่ากับ 300 โวลต์
- 3) เนื่องจากขณะทำการชดเชยแรงดันตกชั่วคราว แรงดันที่บัสไฟตรงจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จึงต้องกำหนดค่าแรงดันต่ำสุดที่บัสไฟตรงที่สามารถสร้างแรงดันชดเชยได้อย่างสมบูรณ์ โดยพิจารณาแรงดันสูงสุดที่ต้องการชดเชยได้นั้นคือ 110 โวลต์ ซึ่งมีค่ายอดแรงดันเท่ากับ 156 โวลต์ และเพื่อค่าแรงดันที่ลดลงเนื่องจากความสูญเสียต่าง ๆ ในระบบ ดังนั้นจึงกำหนดให้แรงดันต่ำสุดที่บัสไฟตรงมีค่าเท่ากับ 200 โวลต์

จากข้อกำหนดข้างต้นสามารถหาขนาดตัวเก็บประจุได้จากสมการที่ 3.25

$$C_{bus} = \frac{2V_{com(max)} I_{com(max)} t_{com(max)}}{(V_{bus(max)}^2 - V_{bus(min)}^2)} \quad (3.25)$$

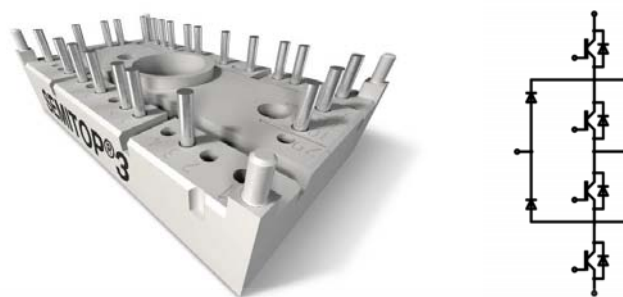
$$C_{bus} = \frac{2 \times 110 \times 15 \times 1}{(300^2 - 200^2)} = 66,000 \text{ ไมโครฟารัด}$$

3.5 การออกแบบส่วนการแปลงพลังงาน

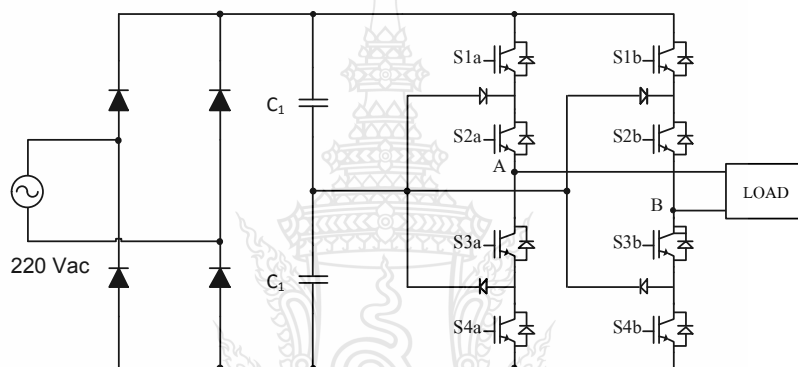
3.5.1 การออกแบบวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์

วงจรแปลงผัน คือส่วนที่ทำหน้าที่แปลงผันจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ผ่านการกรองจากวงจรเชื่อมโยงไฟตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับวงจรจะประกอบด้วยทรานซิสเตอร์กำลัง 8 ตัว ซึ่งในที่นี้จะใช้ไอจีบีทีทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อกระแสไฟฟ้าเพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยอาศัยเทคนิคที่นิยมใช้กันทั่วไปคือการมอดูเลตแบบปรับความกว้างของพัลส์เนื่องจากไอจีบีทีมีข้อดีในด้านความเร็วในการสวิตช์ที่สูงเกือบเท่ามอสเฟตและมีแรงดันตกคร่อมขณะนำกระแสที่ต่ำเหมือนกับทรานซิสเตอร์ ทำให้สามารถขับไอจีบีทีที่ความถี่สูงและเกิดความร้อนน้อยในการใช้งาน เนื่องมาจากกำลังการสูญเสียที่ตกคร่อมบนตัวไอจีบีทีมีค่าต่ำ

ในส่วนของวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับนั้นใช้ไอจีบีทีโมดูลของเซมิคอนรูน SK30MLI066 ขนาด 600 โวลต์, 30 แอมแปร์ เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ิ่ง ดังภาพที่ 3.13 โดยจะประกอบด้วยไอจีบีที 4 ตัวและไดโอดแคลมป์ 2 ตัวประกอบกันเป็นวงจรแปลงผัน 1 กิ่ง ดังนั้นจึงนำไอจีบีที 2 โมดูลมาต่อกันเพื่อให้ได้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ 1 เฟส ดังแสดงในภาพที่ 3.14



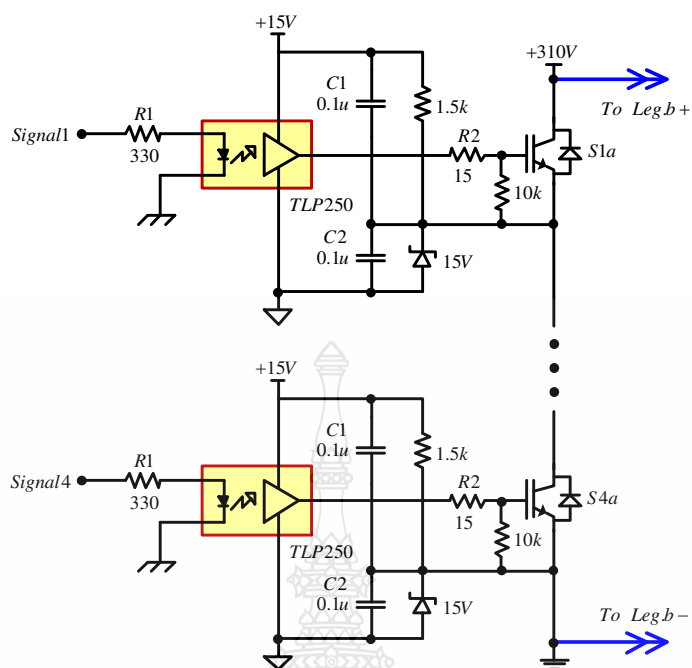
ภาพที่ 3.13 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของเซมิคอนดักเตอร์ SK30MLI066



ภาพที่ 3.14 วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคแลมบี

3.5.2 การออกแบบวงจรภาคขับสวิตซ์ไอจีบีที

การออกแบบวงจรขับสวิตซ์ไอจีบีทีจะใช้ Opto Isolate เบอร์ TLP250 เพื่อแยกแรงดันไฟต่ำกับแรงดันไฟสูงออกจากกัน โดย $R2$ ในภาพที่ 3.15 จะใช้ค่าอยู่ระหว่าง 10 โอห์ม ถึง 100 โอห์ม เพื่อป้องกันการเกิดการแกว่งของสัญญาณที่ขาเกตของไอจีบีที ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ค่า $R2$ เท่ากับ 39 โอห์ม เนื่องจากสัญญาณที่ด้านออกของ Opto Isolate เป็นสัญญาณพัลส์ PWM ที่ประกอบด้วย ฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณไซน์หลายความถี่ซึ่งอาจทำให้เกิดการออสซิลเลตได้จึงจำเป็นต้องใส่ตัวต้านทาน $R2$ เพื่อควบคุมไม่ให้เกิดการแกว่งของสัญญาณ



ภาพที่ 3.15 วงจรภาคขับสวิตซ์ไอจีบีที

การออกแบบ R_1 กำหนดให้กระแส (I_F) ที่ไหลผ่าน TLP250 มีค่าเท่ากับ 10 มิลลิแอมแปร์ และแรงดัน V_F เท่ากับ 1.6 โวลต์ โดยที่ V_{CC} มีค่าเท่ากับ 5 โวลต์ จะได้ว่า

$$R_1 = \frac{V_{CC} - V_F}{I_F} \quad (3.26)$$

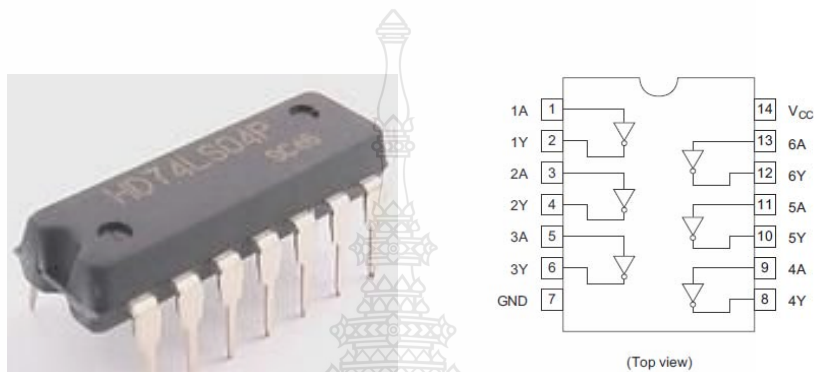
$$= \frac{5V - 1.6V}{10mA}$$

$$= 340\Omega$$

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ค่า 330 โอห์ม โดยจะได้กระแสประมาณ 10.3 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งวงจรยังสามารถทำงานได้

3.5.3 การออกแบบวงจรกลับสัญญาณ

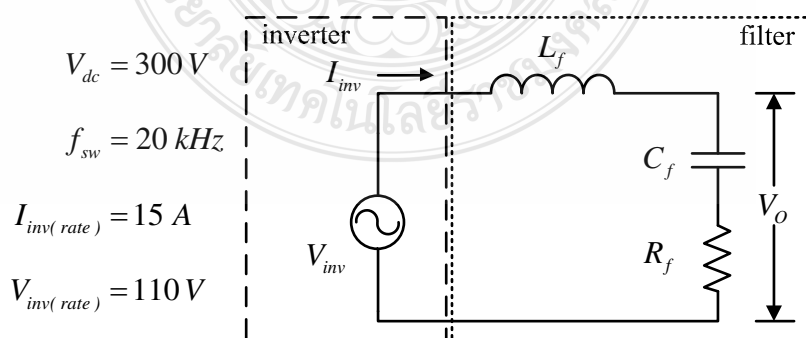
เนื่องจากสัญญาณที่ออกจาก dSPACE มีจำนวนจำกัด ดังนั้นจึงต้องนำสัญญาณที่ได้จาก dSPACE ไปทำการกลับสัญญาณ เพราะในวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมปีนั้น สัญญาณควบคุมของสวิตช์ไอจีบีทีที่อยู่ในกิ่งเดียวกันจะมีสัญญาณที่มีเฟสตรงข้ามอยู่ 2 สัญญาณ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ไอซีเบอร์ 74LS04P ดังภาพที่ 3.16 เพื่อใช้ในการกลับสัญญาณควบคุมก่อนที่จะนำไปเข้าวงจรขับสวิตช์ไอจีบีทีต่อไป



ภาพที่ 3.16 ไอซีเบอร์ 74LS04P (NOT Gate)

3.5.2 การออกแบบวงจรกรอง

เนื่องจากแรงดันด้านออกของวงจรแปลงผันสร้างไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องต่อวงจรกรองที่ด้านออกของวงจรแปลงผันเพื่อกรองความถี่ที่ไม่ต้องการไม่ให้เข้าไปในระบบไฟฟ้ามากเกินไป โดยในการออกแบบจะละเลยผลกระทบของโหลดและแรงดันในระบบไฟฟ้าเพื่อให้ง่ายในการออกแบบและสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังภาพที่ 3.17 ซึ่งการออกแบบมีขั้นตอนดังนี้



ภาพที่ 3.17 วงจรสมมูลของวงจรกรองที่ใช้ในการออกแบบ

1) กำหนดให้แรงดันความถี่หลักมูลที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของวงจรอ้อมมีค่าไม่เกินร้อยละ 5 ของแรงดันในระบบไฟฟ้าปกติ ซึ่งเป็นข้อกำหนดในการเลือกตัวเหนี่ยวนำค่ามากที่สุดที่สามารถใช้งานได้ สามารถหาได้จากสมการที่ 3.27

$$L_f \leq \frac{0.05V_{normal}}{2\pi f_{inv(rate)}} \quad (3.27)$$

$$L_f \leq \frac{0.05 \times 220}{2\pi \times 50 \times 15} = 2.33 \text{ มิลลิเฮนรี}$$

2) กำหนดให้ค่ายอดของกระแสกระเพื่อมสูงสุดที่ผ่านวงจรอ้อมมีค่าไม่เกินร้อยละ 15 ของกระแสพิคคของวงจรแปลงผัน ซึ่งเป็นข้อกำหนดในการเลือกตัวเหนี่ยวนำค่าน้อยที่สุดที่สามารถใช้งานได้ สามารถหาได้จากสมการที่ 3.28 โดยพิจารณาจากแรงดันขณะที่วัฏจักรงาน (Duty Cycle) ร้อยละ 50 ซึ่งจะมีค่ายอดของกระแสกระเพื่อมสูงสุด

$$L_f \geq \frac{V_{L_f}}{2\Delta i_{inv} f_h} \quad (3.28)$$

$$L_f \geq \frac{300}{2 \times 0.15 \times 15 \sqrt{2} \times 40 \times 10^3} = 1.17 \text{ มิลลิเฮนรี}$$

3) กำหนดค่ากระแสกระเพื่อมที่โหลดไม่ให้เกิดเกินร้อยละ 5 ของกระแสกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุวงจรอ้อม ซึ่งเป็นข้อกำหนดในการเลือกตัวเก็บประจุค่าน้อยที่สุดที่สามารถใช้งานได้ โดยพิจารณาการแบ่งไหลของกระแสกระเพื่อมจากอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุกับโหลด โดยโหลดจะคิดที่กรณีที่ย่ำที่สุดคือมีเพียงตัวต้านทานที่พิกัดเพียงอย่างเดียว สามารถหาได้จากสมการที่ 3.29

$$C_f \geq \frac{20}{2\pi f_h R_{rate}} \quad (3.29)$$

$$C_f \geq \frac{20}{2\pi \times 40 \times 10^3 \times 14.67} = 5.42 \text{ ไมโครฟารัด}$$

4) กำหนดค่า Damping Factor เท่ากับ 1 จากภาพที่ 3.19 สามารถเขียนอัตราส่วนระหว่างแรงดันด้านออกกับแรงดันที่วงจรแปลงผันสร้างได้ดังสมการที่ 3.30

$$\frac{V_o}{V_{inv}} = \frac{C_f R_f s + 1}{C_f L_f s^2 + C_f R_f s + 1} \quad (3.30)$$

จากสมการที่ 3.30 สามารถหาค่า Damping Factor ได้ดังสมการ 3.31

$$\xi_f = \frac{R_f}{2} \sqrt{\frac{C_f}{L_f}} \quad (3.31)$$

และที่ค่า Damping Factor เท่ากับ 1 จะได้ว่า

$$R_f = 2 \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \quad (3.32)$$

เมื่อแทนค่า R_f สมการที่ 3.32 ลงในสมการที่ 3.30 จะได้สมการที่ 3.33

$$\frac{V_o}{V_{inv}} = \frac{2\sqrt{C_f L_f} s + 1}{C_f L_f s^2 + 2\sqrt{C_f L_f} s + 1} \quad (3.33)$$

จากสมการที่ 3.33 สามารถหาค่าผลคูณระหว่างตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองได้เท่ากับ

$$C_f L_f = 14.22 \times 10^{-9}$$

แต่เพื่อให้ง่ายในการออกแบบจะประมาณค่าเป็น

$$C_f L_f = 16 \times 10^{-9}$$

จากข้อกำหนดที่ 1 และ 2 สามารถเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองเท่ากับ

$$L_f = 2 \text{ มิลลิเฮนรี่}$$

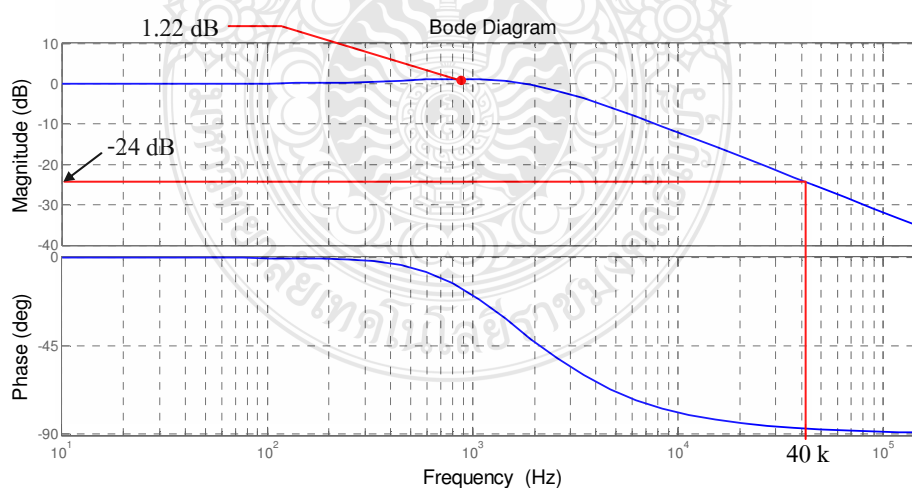
ดังนั้นจะได้ค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรองเท่ากับ

$$C_f = 8 \text{ ไมโครฟารัด}$$

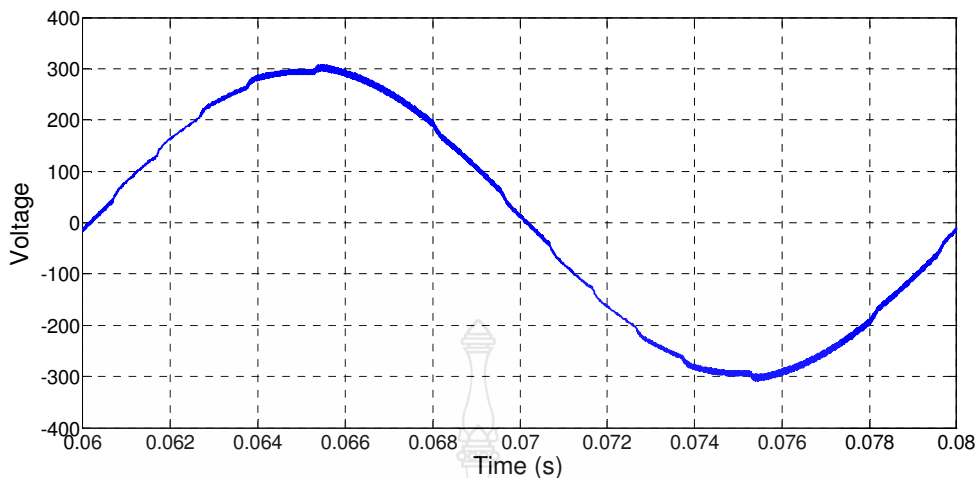
และจากสมการที่ 3.32 แทนค่าตัวเหนี่ยวนำ L_f และตัวเก็บประจุ C_f จะได้ค่าตัวต้านทานของวงจรกรองเท่ากับ

$$R_f = 32 \text{ โอห์ม}$$

จากภาพที่ 3.18 แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองที่ได้ออกแบบที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ และความถี่เรโซแนนซ์มีอัตราขยายเพียง 1.22 เดซิเบล ภาพที่ 3.19 เป็นสัญญาณรูปคลื่นด้านออกของวงจรแปลงฟันเมื่อผ่านวงจรกรองความถี่



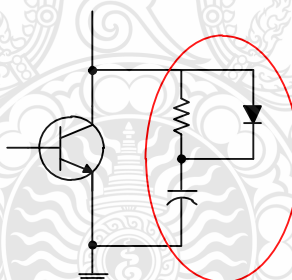
ภาพที่ 3.18 ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรอง



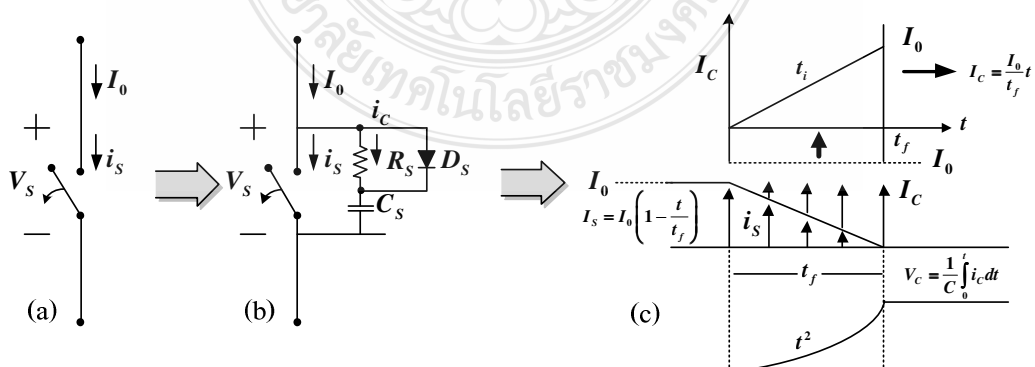
ภาพที่ 3.19 สัญญาณรูปคลื่นของวงจรแปลงผันเมื่อผ่านวงจรกรอง

3.5.3 การออกแบบวงจรสแน็บเบอร์

วงจรสแน็บเบอร์ (Snubber Circuit) เป็นวงจรที่ช่วยลดการเกิดแรงดันเกิน (Over Voltage) เครื่องสวิตซ์ขณะเริ่มนำและเริ่มหยุดนำกระแสในวงจรโหลด R-L ดังภาพที่ 3.21 แสดงการต่อวงจรสแน็บเบอร์ [26]



ภาพที่ 3.20 วงจรสแน็บเบอร์



ภาพที่ 3.21 การแบ่งกระแส I_0 เป็น I_s และ I_c

1) การคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุของสแน็บเบอร์ [27]

จากภาพที่ 3.21(a) จะเห็นได้ว่ากระแสมีทิศทางการไหลทางเดียวตลอด เมื่อสวิตช์ทำงานในลักษณะตัด/ต่อวงจรจะทำให้กระแสเกิดการหยุดไหลในทันทีทันใดจึงทำให้เกิดแรงดันสไปค์จากการที่กระแสเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด อันเป็นผลมาจากค่า L ในแหล่งจ่าย ดังนั้นจึงต้องสร้างเส้นทางกรไหลใหม่ให้กับกระแส ดังในภาพที่ 3.21(b) เมื่อสวิตช์จากออกแล้วกระแส (I_o) ก็ยังไหลไปในทิศทางเดิมแล้วค่อย ๆ ลดลง ดังในภาพที่ 3.21(c) จะเห็นได้ว่ามีทางให้กระแสไหลได้สองทางโดยการใส่วงจร $R_s C_s$ สแน็บเบอร์เพิ่มเข้าไปในวงจร จากนั้นจึงต้องหาค่าของ $R_s C_s$ สแน็บเบอร์ที่ใส่เข้าไป โดยเริ่มจากการคำนวณหาที่มาของสมการหาค่า C_s ของสแน็บเบอร์ จากลักษณะการแบ่งกระแส I_o เป็น I_s และ I_C จากภาพที่ 3.21(c) เมื่อแรงดันที่ตกคร่อม C_s มีค่าเท่ากับแรงดันแหล่งจ่าย กระแสที่ไหลผ่าน C_s จะหยุดไหลดังนั้น V_C เท่ากับ $V_S (V_d)$ จะได้ดังในสมการที่ 3.34

$$V_s = \frac{1}{C_s} \int_0^{t_f} i_C dt \quad (3.34)$$

$$V_s = \frac{1}{C_s} \int_0^{t_f} I_o \frac{t}{t_f} dt \quad (3.35)$$

ดังนั้นจะได้สมการ C_s ดังนี้

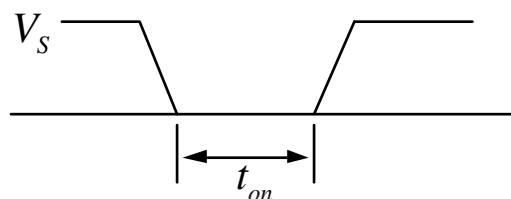
$$C_s = \frac{I_o t_f}{2V_s} \quad (3.36)$$

เมื่อ t_f คือ เวลาเริ่มหยุดนำกระแสของสวิตช์

แทนค่ากระแสแรงดันเข้าและเวลาในการหยุดนำกระแสของสวิตช์ลงในสมการที่ 3.36 จะได้

$$C_s = \frac{15 \times 440 \times 10^{-9}}{2 \times 300} = 11 \text{ นาโนฟารัด}$$

2) การคำนวณหาค่าความต้านทานของสับเบอร์ [26]



ภาพที่ 3.22 ช่วงเวลาที่สวิตช์ต่อวงจร

ในภาพที่ 3.22 ช่วงเวลาที่สวิตช์นำกระแส (t_{on}) จะต้องมีมากพอที่จะให้ตัวเก็บประจุ (C) สับเบอร์คายประจุได้หมดก่อนที่สวิตช์จะหยุดนำกระแสในครั้งต่อไป ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเวลาที่ใช้ในการคายประจุจะมีค่าประมาณ 5τ ดังสมการที่ 3.37

$$t_{on} > 5R_s C_s \quad (3.37)$$

จากสมการที่ 3.37 จะได้ว่า

$$R_s < \frac{t_{on}}{5C_s} \quad (3.38)$$

t_{on} คือ ช่วงเวลาการนำกระแสของสวิตช์ที่วัฏจักรงานร้อยละ 50 แทนค่าตัวแปรลงในสมการที่ 3.38 จะได้

$$R_s < \frac{2.5 \times 10^{-5}}{5 \times 7.33 \times 10^{-9}} < 682.13 \text{ โอห์ม}$$

ดังนั้นสามารถหาค่า R_s ได้จากสมการ 3.39

$$R_s = \frac{5V_s}{I_o} \quad (3.39)$$

แทนค่าตัวแปรลงในสมการที่ 3.39 จะได้

$$R_s = \frac{5 \times 300}{15} = 100 \text{ โอห์ม}$$

ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ไอจีบีที่ขณะเริ่มหยุดนำกระแสหาได้จากสมการที่ 3.40

$$P_Q = \frac{1}{2} I_0 V_s (t_s + t_f) f_s \quad (3.40)$$

$$P_Q = \frac{1}{2} \times 15 \times 300 \times ((100 + 440) \times 10^{-9}) \times 20 \times 10^3 = 24.3 \text{ วัตต์}$$

เมื่อใส่วงจรสับเบอรัแล้ว ที่ช่วงเวลาเริ่มหยุดนำกระแส ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ไอจีบีที่จะหาได้จากสมการที่ 3.41 ซึ่งเท่ากับ

$$P_Q = \frac{I_0^2 t_f f_s}{24C} \quad (3.41)$$

$$P_Q = \frac{15^2 \times (440 \times 10^{-9})^2 \times 20 \times 10^3}{24 \times 11 \times 10^{-9}} = 3.3 \text{ วัตต์}$$

ทั้งนี้ตัวเก็บประจุจะคายประจุผ่านทางตัวต้านทานในวงจรสับเบอรัขณะไอจีบีที่เริ่มนำกระแส ซึ่งพลังงานสะสมที่ตัวเก็บประจุสามารถหาได้จากสมการที่ 3.42

$$W = \frac{1}{2} C V_s^2 \quad (3.42)$$

$$W = \frac{1}{2} \times 11 \times 10^{-9} \times 300^2 = 4.95 \times 10^{-4} \text{ วัตต์}$$

พลังงานนี้ส่วนใหญ่จะถูกถ่ายเทไปยังตัวต้านทานของวงจรสับเบอรัขณะไอจีบีที่นำกระแส ซึ่งกำลังไฟฟ้าที่ตัวต้านทานในวงจรสับเบอรันี้หาได้จากสมการที่ 3.43

$$P_R = \frac{CV_s^2}{2T_s} = \frac{1}{2}CV_s^2 f_s \quad (3.43)$$

$$P_R = \frac{1}{2} \times 11 \times 10^{-9} \times 300^2 \times 20 \times 10^3 = 9.9 \text{ วัตต์}$$

จะเห็นว่าค่าตัวเก็บประจุสามารถใช้ลดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ทรานซิสเตอร์ได้แต่ก็เป็นการสูญเสียกำลังไฟฟ้าที่ตัวต้านทานได้เช่นกัน

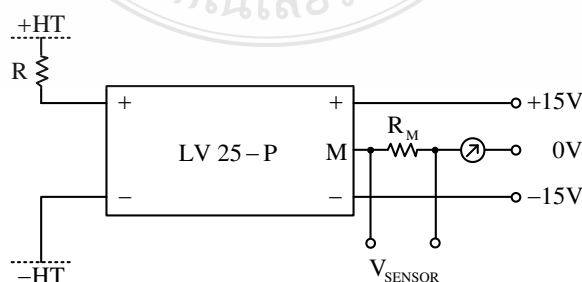
3.5.4 การออกแบบส่วนการตรวจวัดสัญญาณ

ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ LEM LV25-P เป็นอุปกรณ์วัดสัญญาณแรงดันโดยใช้หลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (Hall Effect) การวัดแรงดันจะวัดจากกระแสที่มีสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันผ่านความต้านทานภายนอก (R) ที่ต่ออนุกรมกับวงจรทางด้านปฐมภูมิของ LV25-P ดังภาพที่ 3.23 โดยกระแสที่ไหลผ่านวงจรปฐมภูมิควรมีค่าเท่ากับ 10 มิลลิแอมแปร์ เพื่อความแม่นยำในการวัดของ LV25-P อัตราส่วนของกระแสทางด้านทุติยภูมิต่อกระแสทางด้านปฐมภูมิต้องมีค่าเท่ากับ 2.5

ในวิทยานิพนธ์นี้จะนำ LV25-P มาวัดแรงดันกริด 220 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ แต่เนื่องจากแรงดันที่กริดมีการกระเพื่อม ดังนั้นจึงออกแบบให้ LV25-P สามารถอ่านแรงดันได้ 250 โวลต์ ซึ่งความต้านทาน R สามารถหาได้จากสมการ 3.44

$$R = \frac{V_{grid}}{10mA} \quad (3.44)$$

จะได้ค่าความต้านทาน R เป็น 25 กิโลโอห์ม และสามารถทนกำลังสูญเสียได้ 2.5 วัตต์ จากอัตราส่วนของกระแสทางด้านทุติยภูมิต่อกระแสทางด้านปฐมภูมิจะใช้ตัวต้านทานสำหรับอ่านค่าแรงดัน (R_M) เท่ากับ 200 โอห์ม ซึ่งจะให้ค่าแรงดันด้านออกเท่ากับ ± 5 โวลต์ โดยสัญญาณแรงดันที่ได้นี้จะนำไปใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงรูปคลื่นไซน์เพื่อใช้ในการควบคุมต่อไป



ภาพที่ 3.23 การวัดสัญญาณของ LV25-P

เช่นเดียวกันการวัดแรงดันที่บัสไฟตรงนั้นสามารถใช้ตัววัดสัญญาณ LV25-P ได้เหมือนกัน ดังนั้นสามารถหาความต้านทาน R ที่แรงดันบัสไฟตรง 300 โวลต์ ได้ดังนี้

$$R_3 = \frac{V_{dc}}{10mA} = \frac{300}{10mA} = 30 \text{ กิโลโอห์ม}$$

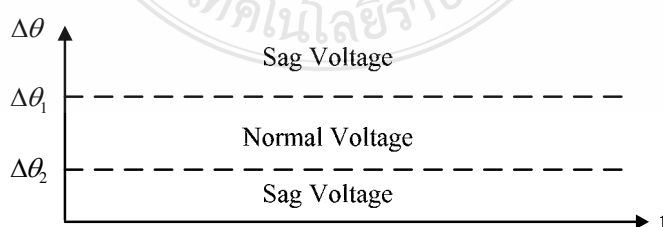
ดังนั้นจะได้ค่าความต้านทาน R เป็น 30 กิโลโอห์ม และสามารถทนกำลังสูญเสียได้ 2.5 วัตต์ จากอัตราส่วนของกระแสทางด้านทุติยภูมิต่อกระแสทางด้านปฐมภูมิจะใช้ตัวต้านทานสำหรับอ่านค่าแรงดัน (R_M) เท่ากับ 200 โอห์ม ซึ่งจะให้ค่าแรงดันด้านออกเท่ากับ ± 5 โวลต์เช่นกัน โดยสัญญาณแรงดันที่ได้นี้จะนำไปใช้เป็นสัญญาณรูปคลื่นของบัสไฟตรงเพื่อใช้ในการควบคุมต่อไป

3.5.5 การกำหนดเกณฑ์ในการพิจารณาแรงดันตกชั่วครู่

ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกให้แรงดันสเปซเวกเตอร์ต่ำกว่า 198 โวลต์ (ค่าต่อหน่วย 0.9) เป็นเงื่อนไขของการเกิดแรงดันตกชั่วครู่ในการตรวจจับขนาดแรงดันสเปซเวกเตอร์ทั้งแบบเร็วและแบบแม่นยำ เนื่องจากเป็นค่าแรงดันต่ำสุดที่อุปกรณ์ไฟฟ้ายังทำงานได้อยู่ ส่วนเงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงมุมเฟสในทางทฤษฎีนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 3.18 โดยในงานวิจัยนี้ใช้จำนวนข้อมูลการสุ่มเท่ากับ 200 ค่า ดังนั้นจะหาค่าการเปลี่ยนแปลงมุมเฟสปกติได้เป็น

$$\Delta\theta_{normal} = \frac{360(2\pi)}{400} = 0.9^\circ (0.0157 \text{ radian})$$

ในทางปฏิบัติระบบไฟฟ้าไม่ได้มีเพียงความถี่มูลฐานแต่ยังมีความถี่ฮาร์มอนิกสแปนอยู่ด้วย จึงทำให้การเปลี่ยนแปลงมุมเฟสไม่ได้มีค่าคงที่ แต่มีการแกว่งรอบ ๆ ค่าคงที่ที่หาได้จากสมการที่ 3.18 เป็นผลให้เงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงมุมเฟสจะต้องตั้งค่าเป็นย่านของการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงมุมเฟสซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าในระบบดังภาพที่ 3.24



ภาพที่ 3.24 ย่านของการเปลี่ยนแปลงมุมเฟส

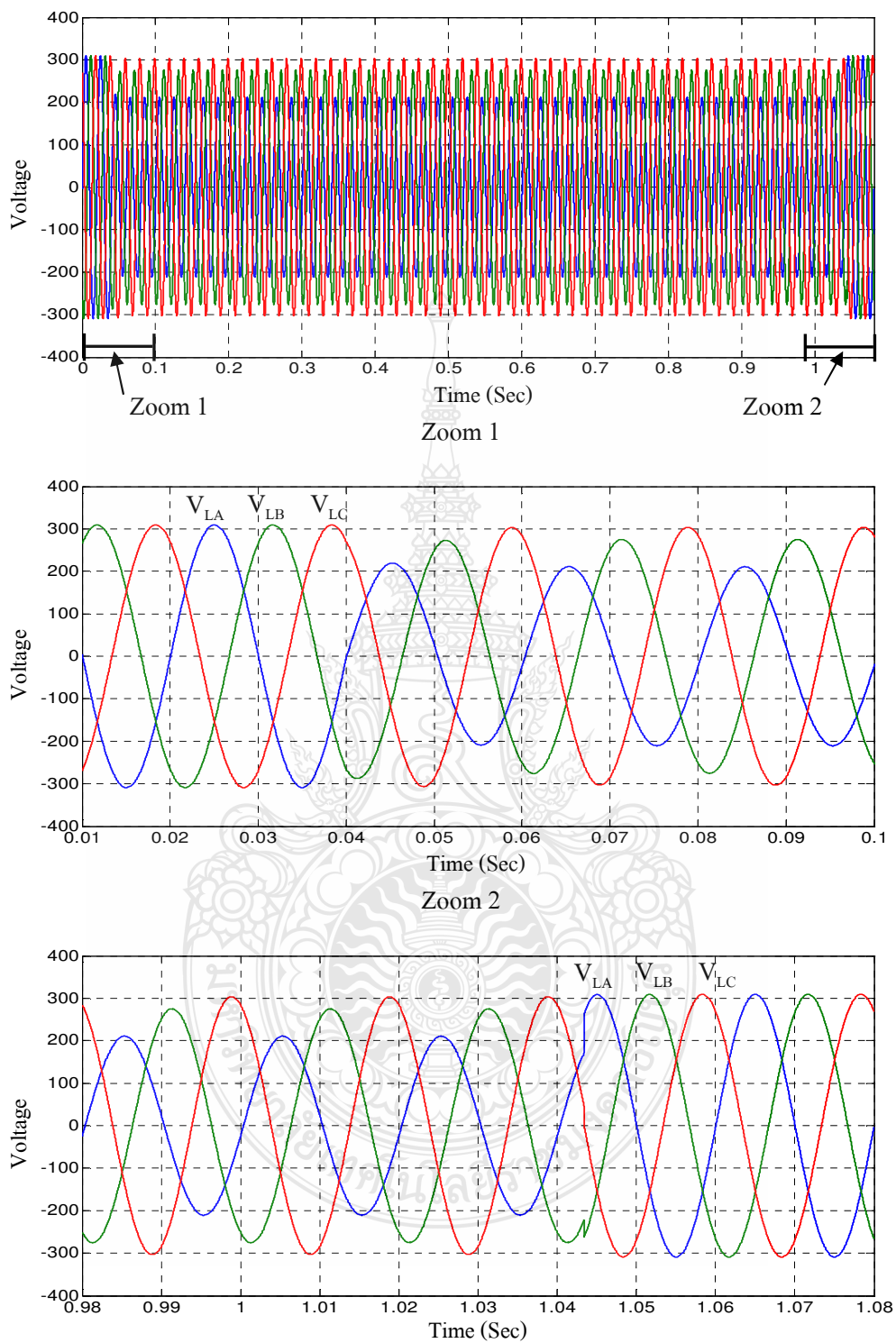
3.6.1 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันกรณีเกิดความผิดปกติแบบ 1 เฟส

1) เกิดความผิดปกติที่เฟส A ต่อกราวด์

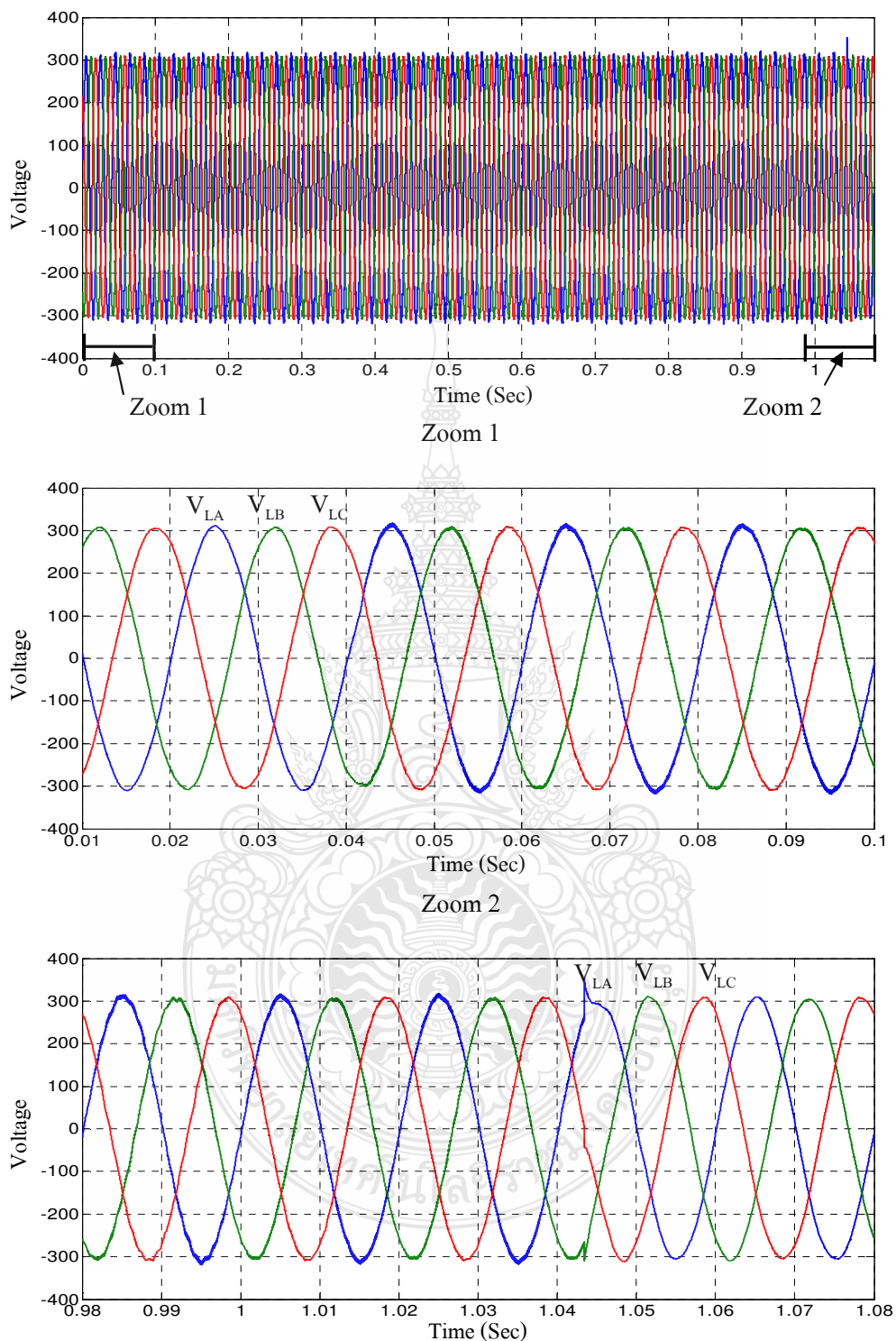
ภาพที่ 3.26 แสดงแรงดันที่โหลดได้รับเมื่อไม่ได้มีการชดเชยซึ่งเกิดจากความผิดปกติแบบ 1 เฟสที่เฟส A ต่อกราวด์ จะเห็นได้ว่ามีแรงดัน 2 เฟสที่มีการเปลี่ยนแปลงคือเฟส A และเฟส B ส่วนเฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ภาพที่ 3.27 แสดงการชดเชยแรงดันที่โหลดได้รับด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ จะเห็นได้ว่าสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้ดี ซึ่งในช่วงเวลาเริ่มและสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราวนั้น รูปคลื่นจะมีการกระเพื่อมเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้รูปคลื่นที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงเล็กน้อย โดยรูปกลางแสดงภาพขยายขณะเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว ส่วนรูปล่างแสดงภาพขยายขณะสิ้นสุดแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันโหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวยังคงใกล้เคียงกับทั้งก่อนและหลังการเกิดแรงดันตกชั่วคราว

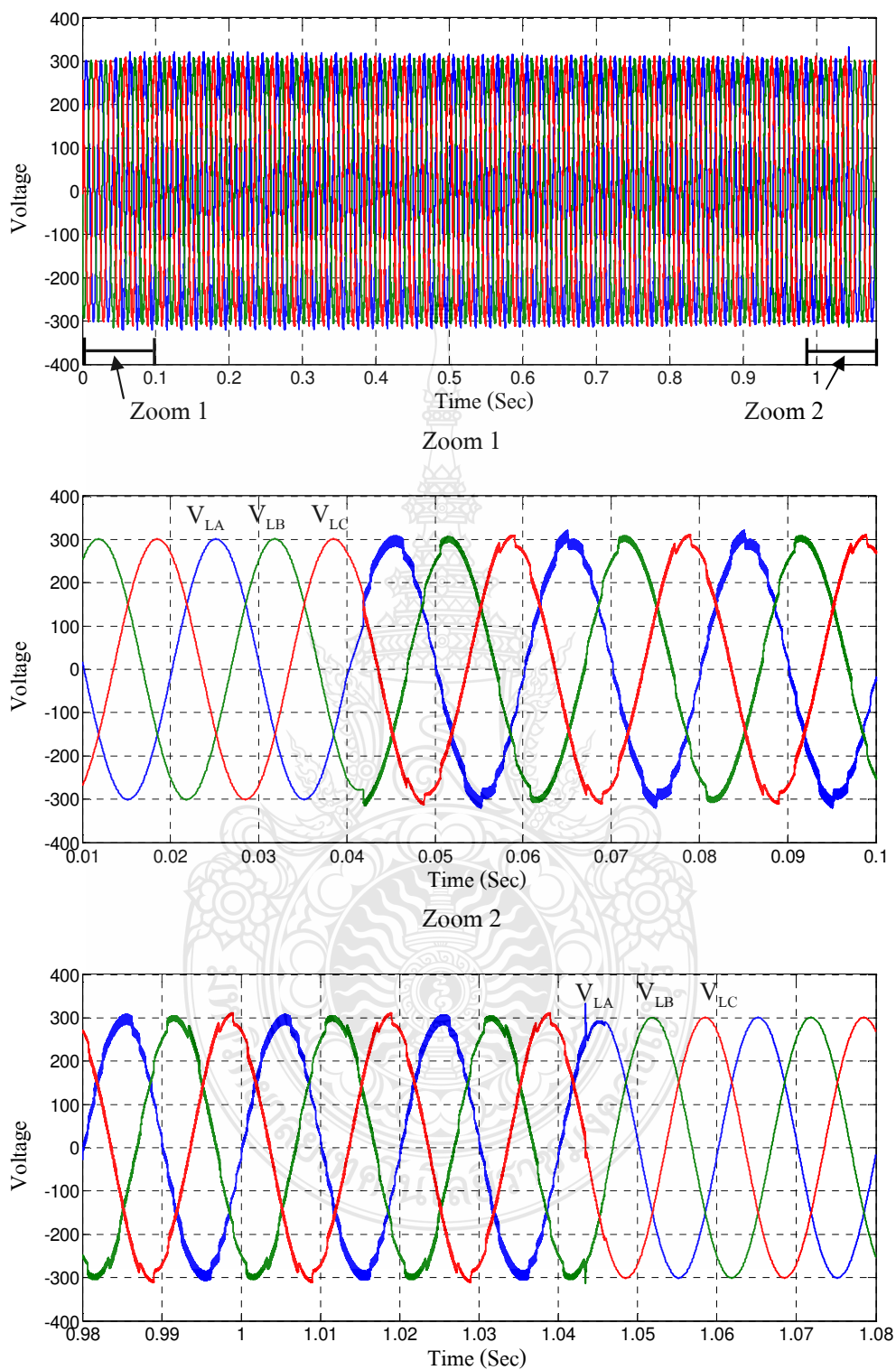
ภาพที่ 3.28 แสดงการชดเชยแรงดันที่โหลดได้รับด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ จะเห็นได้ว่าสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้เช่นเดียวกัน แต่รูปคลื่นที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงมากกว่าการใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์มาก โดยรูปกลางแสดงภาพขยายขณะเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว ส่วนรูปล่างแสดงภาพขยายขณะสิ้นสุดแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันโหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวยังคงใกล้เคียงกับทั้งก่อนและหลังการเกิดแรงดันตกชั่วคราวเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 3.26 ผลการจำลองแรงดันก่อนการชดเชยกรณีเกิดความผิดปกติแบบ 1 เฟสที่เฟส A ต่อกราวด์



ภาพที่ 3.27 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคทมป์ กรณี
 เกิดความผิดพ้องแบบ 1 เฟสที่เฟส A ต่อกราวด์



ภาพที่ 3.28 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ กรณีเกิดความผิดปกติ
พร้อมแบบ 1 เฟสที่เฟส A ต่อกราวด์

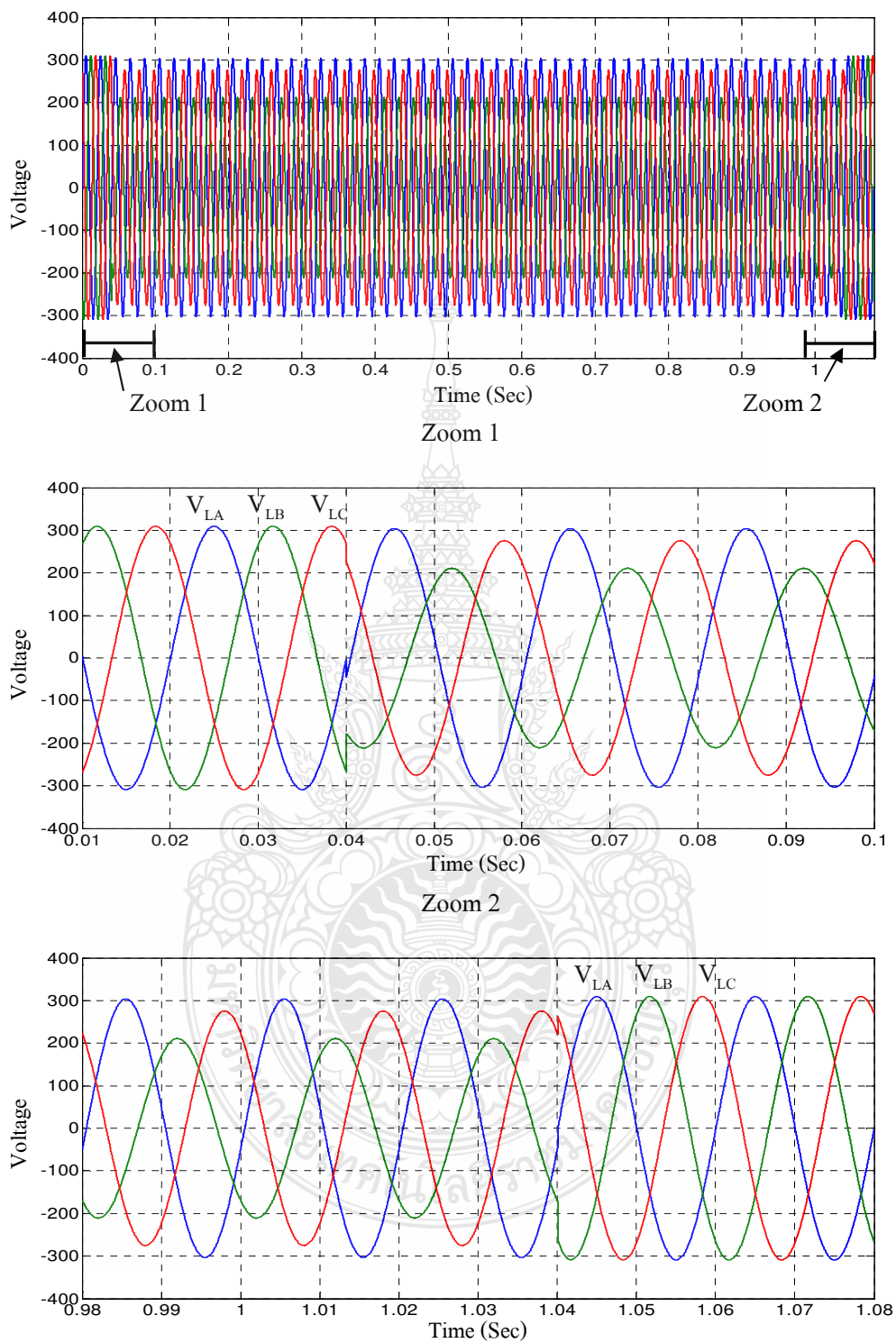
2) เกิดความผิดพลาดที่เฟส B ต่อกราวด์

ภาพที่ 3.29 แสดงแรงดันที่โหลดได้รับเมื่อไม่ได้มีการชดเชยซึ่งเกิดจากความผิดพลาดแบบ 1 เฟสที่เฟส B ต่อกราวด์ จะเห็นได้ว่ามีแรงดัน 2 เฟสที่มีการเปลี่ยนแปลงคือเฟส B และเฟส C ส่วนเฟส A ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

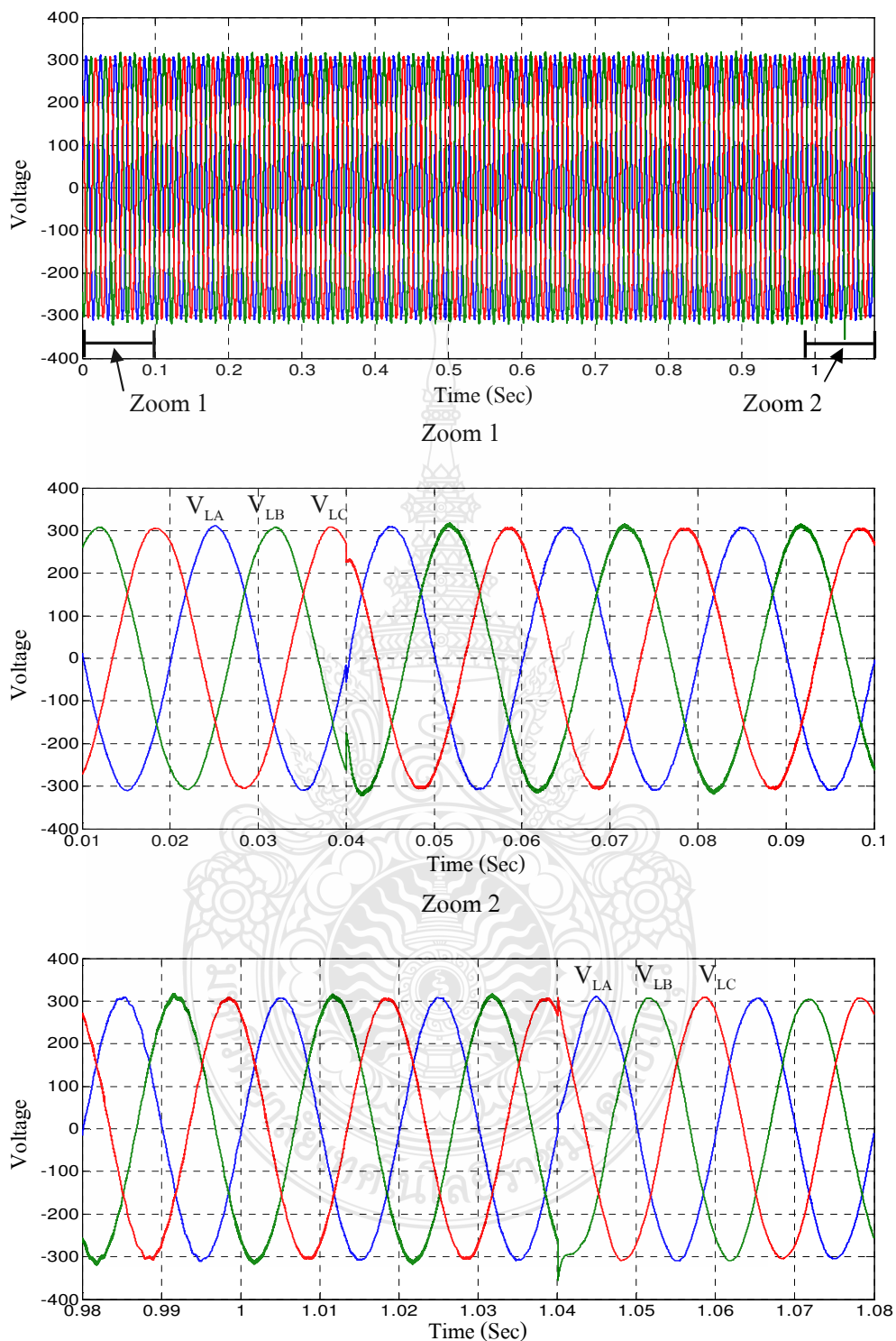
ภาพที่ 3.30 แสดงการชดเชยแรงดันที่โหลดได้รับด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ จะเห็นได้ว่าสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้ดี ซึ่งในช่วงเวลาเริ่มและสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราวนั้น รูปคลื่นจะมีการกระเพื่อมเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้รูปคลื่นที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงเล็กน้อย โดยรูปกลางแสดงภาพขยายขณะเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว ส่วนรูปล่างแสดงภาพขยายขณะสิ้นสุดแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันโหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวยังคงใกล้เคียงกับทั้งก่อนและหลังการเกิดแรงดันตกชั่วคราว

ภาพที่ 3.31 แสดงการชดเชยแรงดันที่โหลดได้รับด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ จะเห็นได้ว่าสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้เช่นเดียวกัน แต่รูปคลื่นที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงมากกว่าการใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์มาก โดยรูปกลางแสดงภาพขยายขณะเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว ส่วนรูปล่างแสดงภาพขยายขณะสิ้นสุดแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันโหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวยังคงใกล้เคียงกับทั้งก่อนและหลังการเกิดแรงดันตกชั่วคราวเช่นเดียวกัน

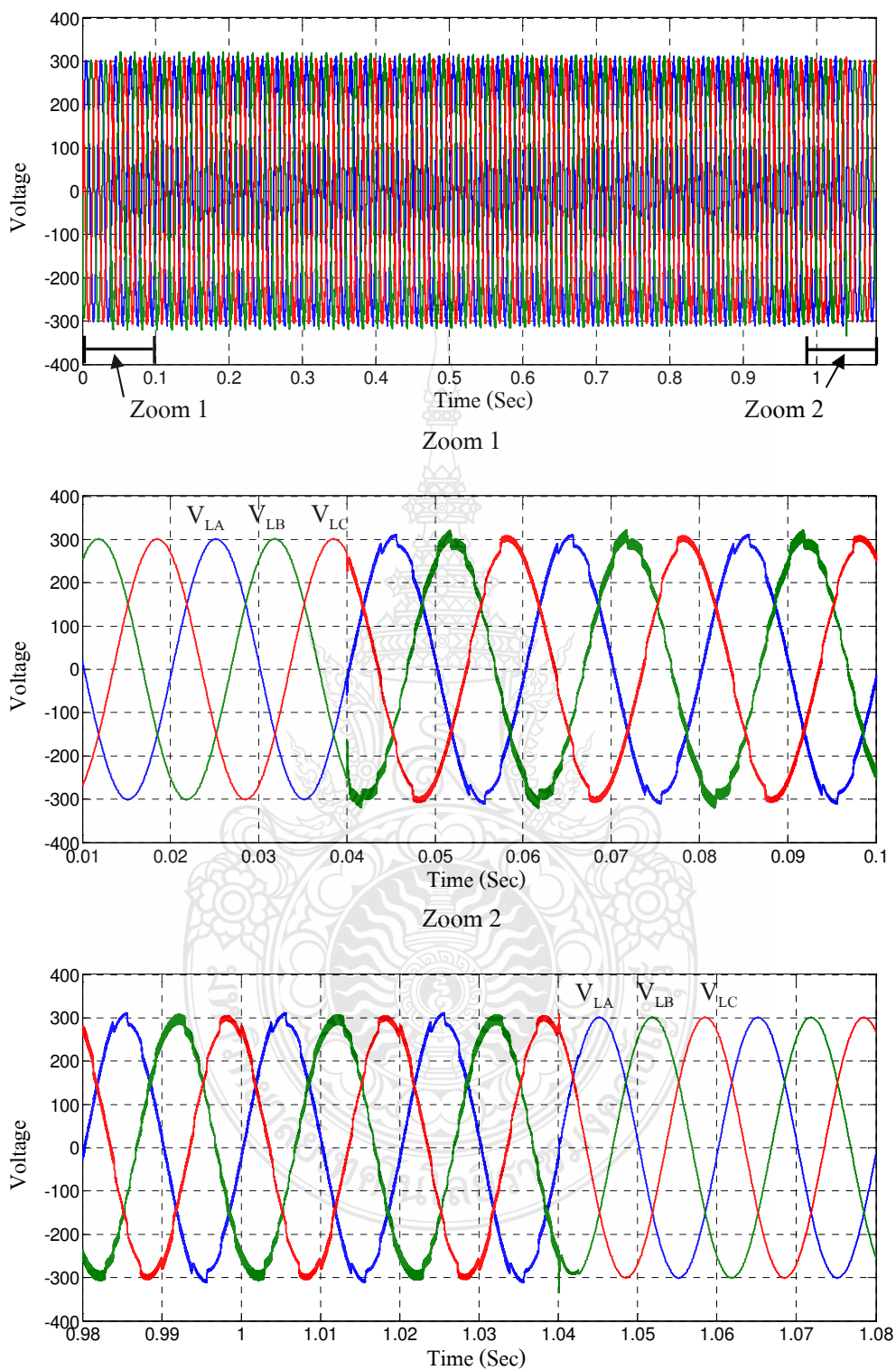




ภาพที่ 3.29 ผลการจำลองแรงดันก่อนการชดเชยกรณีเกิดความผิดปกติแบบ 1 เฟสที่เฟส B ต่อกราวด์



ภาพที่ 3.30 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดเคลมป์ กรณีเกิดความผิดปกติแบบ 1 เฟสที่เฟส B ต่อกราวด์



ภาพที่ 3.31 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ กรณีเกิดความผิดปกติ
พร้อมแบบ 1 เฟสที่เฟส B ต่อกราวด์

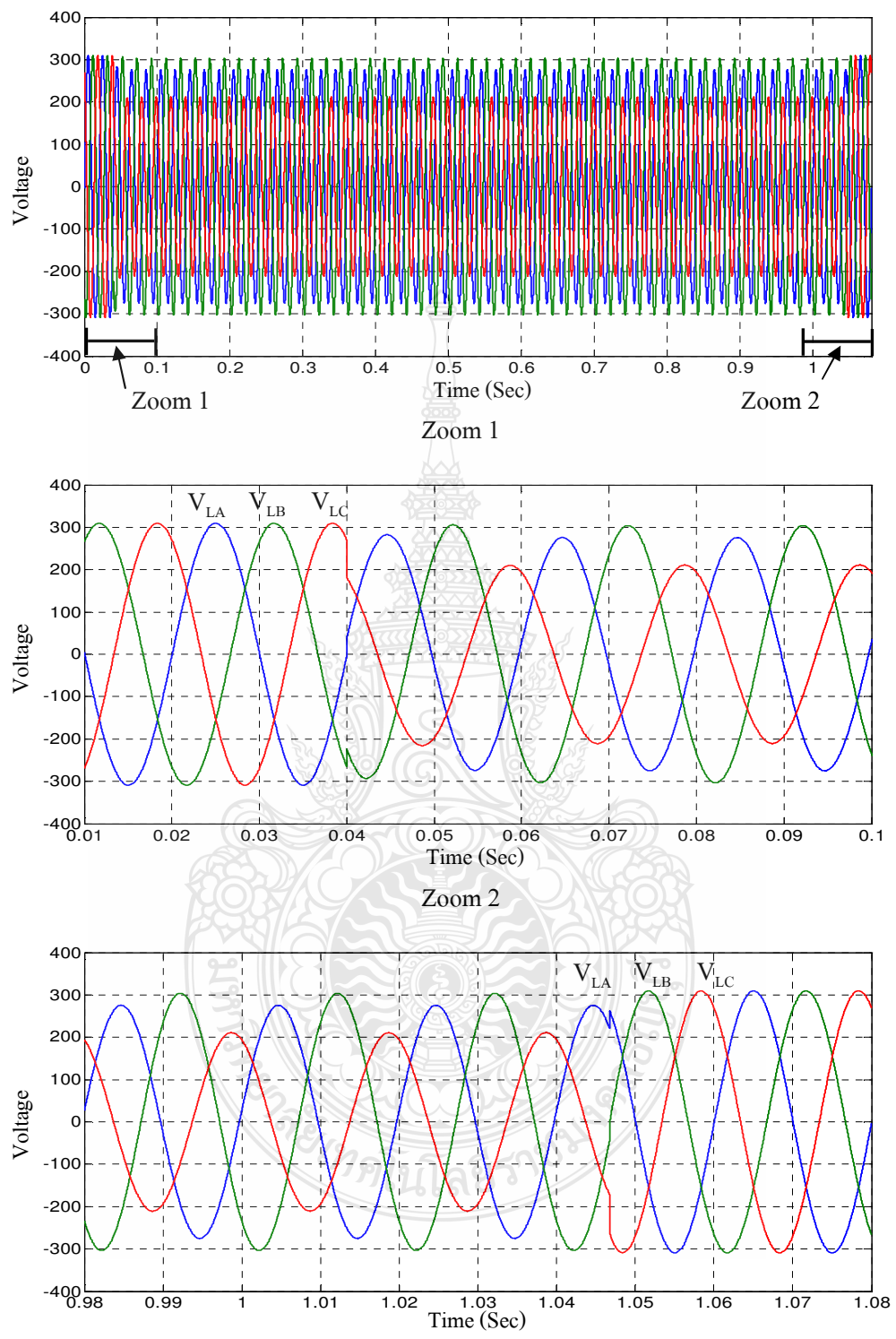
3) เกิดความผิดพลาดที่เฟส C ต่อกราวด์

ภาพที่ 3.32 แสดงแรงดันที่โหลดได้รับเมื่อไม่ได้มีการชดเชยซึ่งเกิดจากความผิดพลาดแบบ 1 เฟสที่เฟส C ต่อกราวด์ จะเห็นได้ว่ามีแรงดัน 2 เฟสที่มีการเปลี่ยนแปลงคือเฟส A และเฟส C ส่วนเฟส B ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

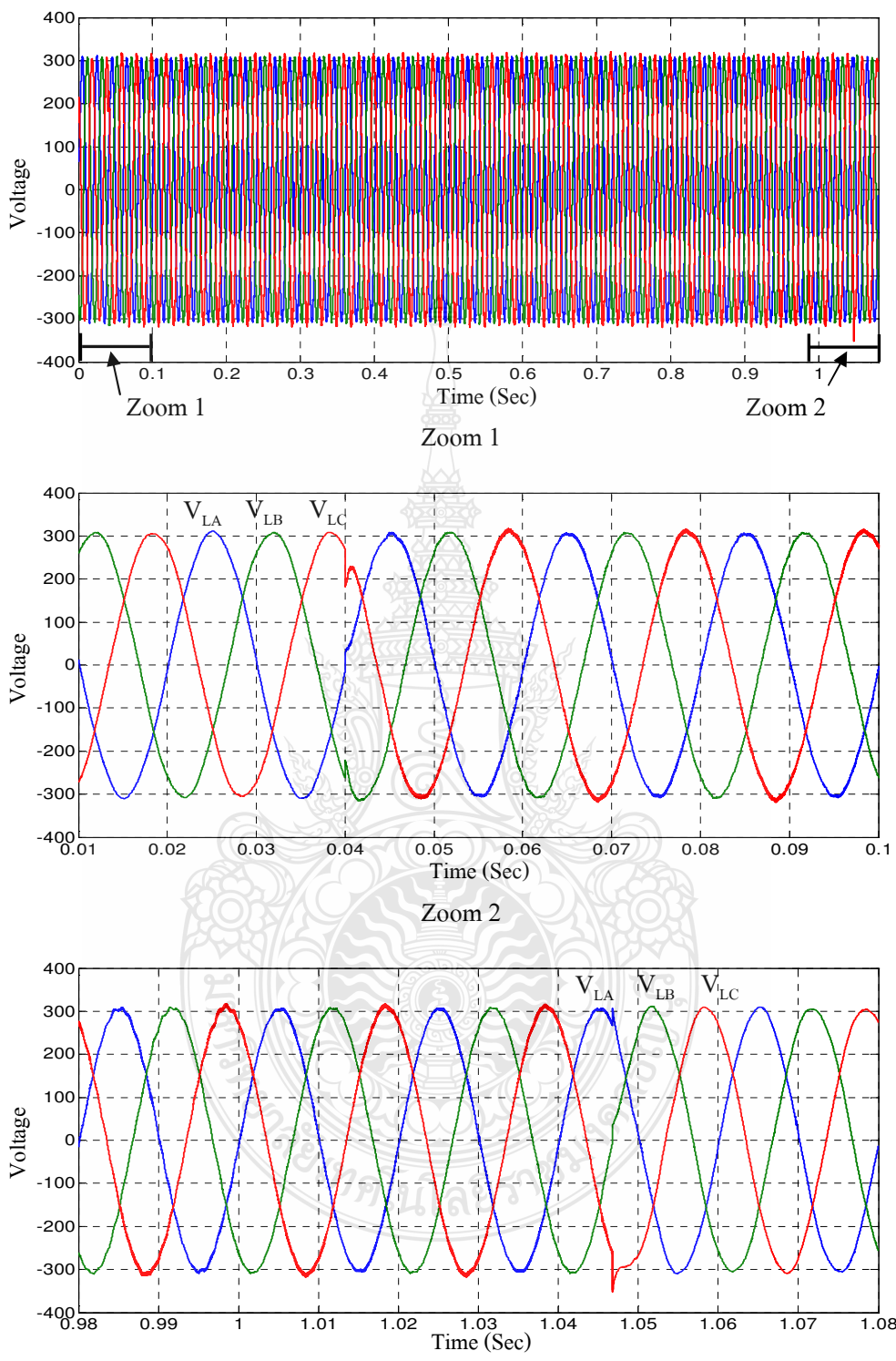
ภาพที่ 3.33 แสดงการชดเชยแรงดันที่โหลดได้รับด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ จะเห็นได้ว่าสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้ดี ซึ่งในช่วงเวลาเริ่มและสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราวนั้น รูปคลื่นจะมีการกระเพื่อมเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้รูปคลื่นที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงเล็กน้อย โดยรูปกลางแสดงภาพขยายขณะเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว ส่วนรูปล่างแสดงภาพขยายขณะสิ้นสุดแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันโหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวยังคงใกล้เคียงกับทั้งก่อนและหลังการเกิดแรงดันตกชั่วคราว

ภาพที่ 3.34 แสดงการชดเชยแรงดันที่โหลดได้รับด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ จะเห็นได้ว่าสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้เช่นเดียวกัน แต่รูปคลื่นที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงมากกว่าการใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์มาก โดยรูปกลางแสดงภาพขยายขณะเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว ส่วนรูปล่างแสดงภาพขยายขณะสิ้นสุดแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันโหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวยังคงใกล้เคียงกับทั้งก่อนและหลังการเกิดแรงดันตกชั่วคราวเช่นเดียวกัน

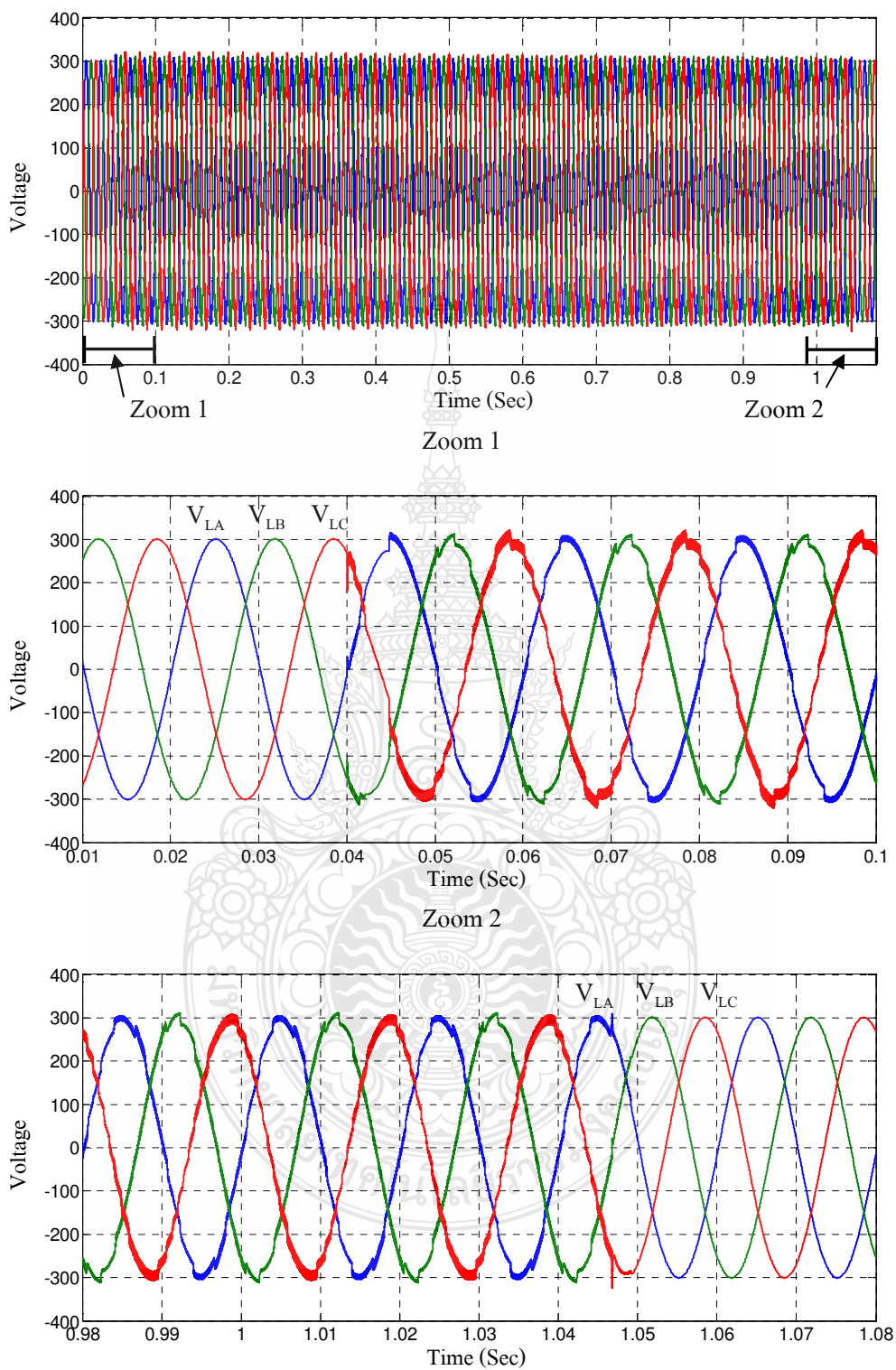




ภาพที่ 3.32 ผลการจำลองแรงดันก่อนการชดเชยกรณีเกิดความผิดปกติแบบ 1 เฟสที่เฟส C ต่กราวด์



ภาพที่ 3.33 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแหล่งผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคทมปี กรณี
เกิดความผิดปกติแบบ 1 เฟสที่เฟส C ต่อกวาวด์



ภาพที่ 3.34 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ กรณีเกิดความผิด
 พ้องแบบ 1 เฟสที่เฟส C ต่อกราวด์

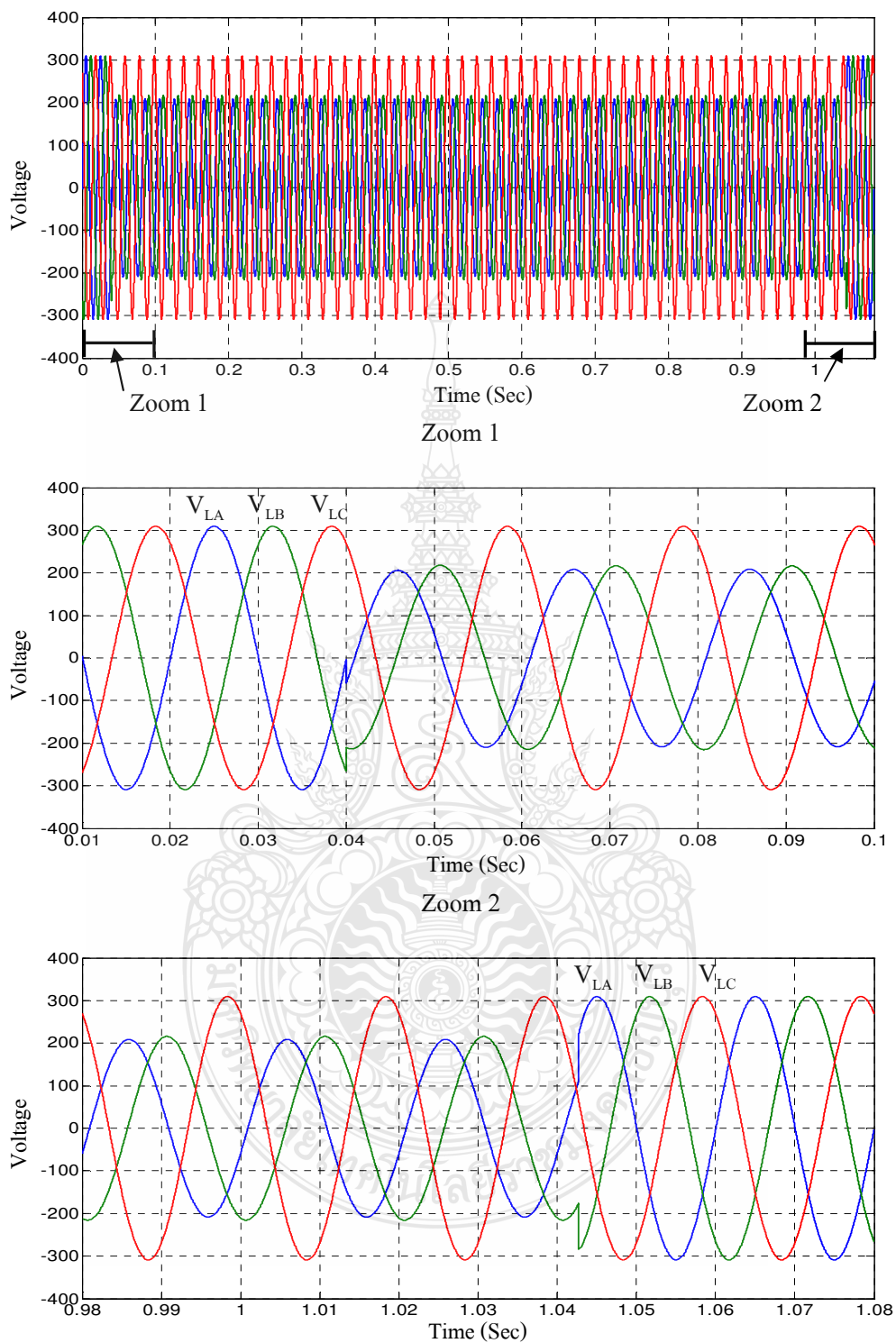
3.6.2 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันกรณีเกิดความผิดปกติแบบ 2 เฟส

1) เกิดความผิดปกติระหว่างเฟส A และ B

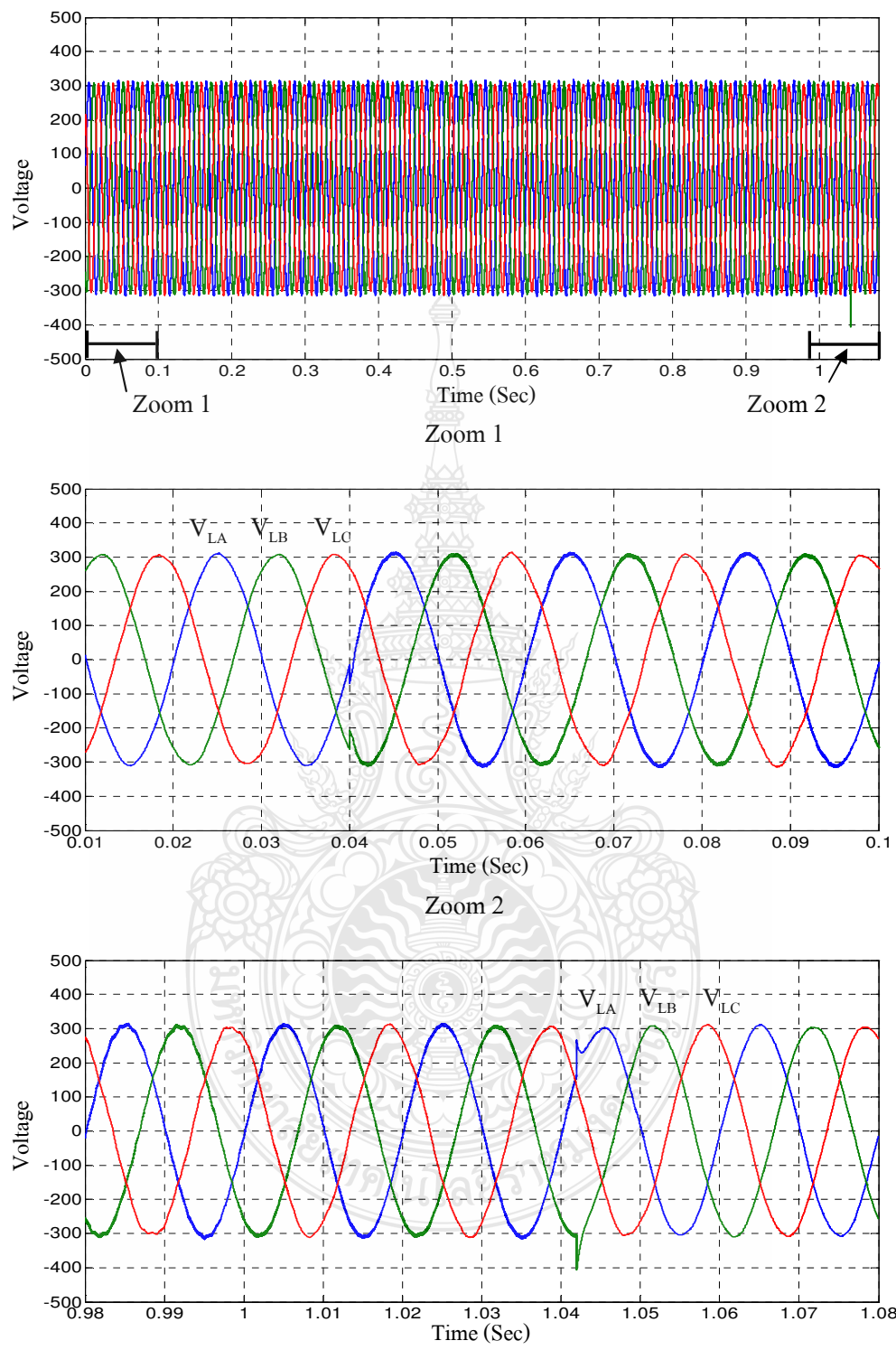
ภาพที่ 3.35 แสดงแรงดันที่โหลดได้รับเมื่อไม่ได้มีการชดเชยซึ่งเกิดจากความผิดปกติแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส A และ B จะเห็นได้ว่ามีแรงดัน 2 เฟสที่มีการเปลี่ยนแปลงคือเฟส A และเฟส B ซึ่งมีการกระโดดของมุมเฟสด้วยเล็กน้อย ส่วนเฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ภาพที่ 3.36 แสดงการชดเชยแรงดันที่โหลดได้รับด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ จะเห็นได้ว่าสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้ดี ซึ่งในช่วงเวลาเริ่มและสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราวนั้น รูปคลื่นจะมีการกระเพื่อมเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้รูปคลื่นที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงเล็กน้อย โดยรูปกลางแสดงภาพขยายขณะเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว ส่วนรูปล่างแสดงภาพขยายขณะสิ้นสุดแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันโหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวยังคงใกล้เคียงกับทั้งก่อนและหลังการเกิดแรงดันตกชั่วคราว

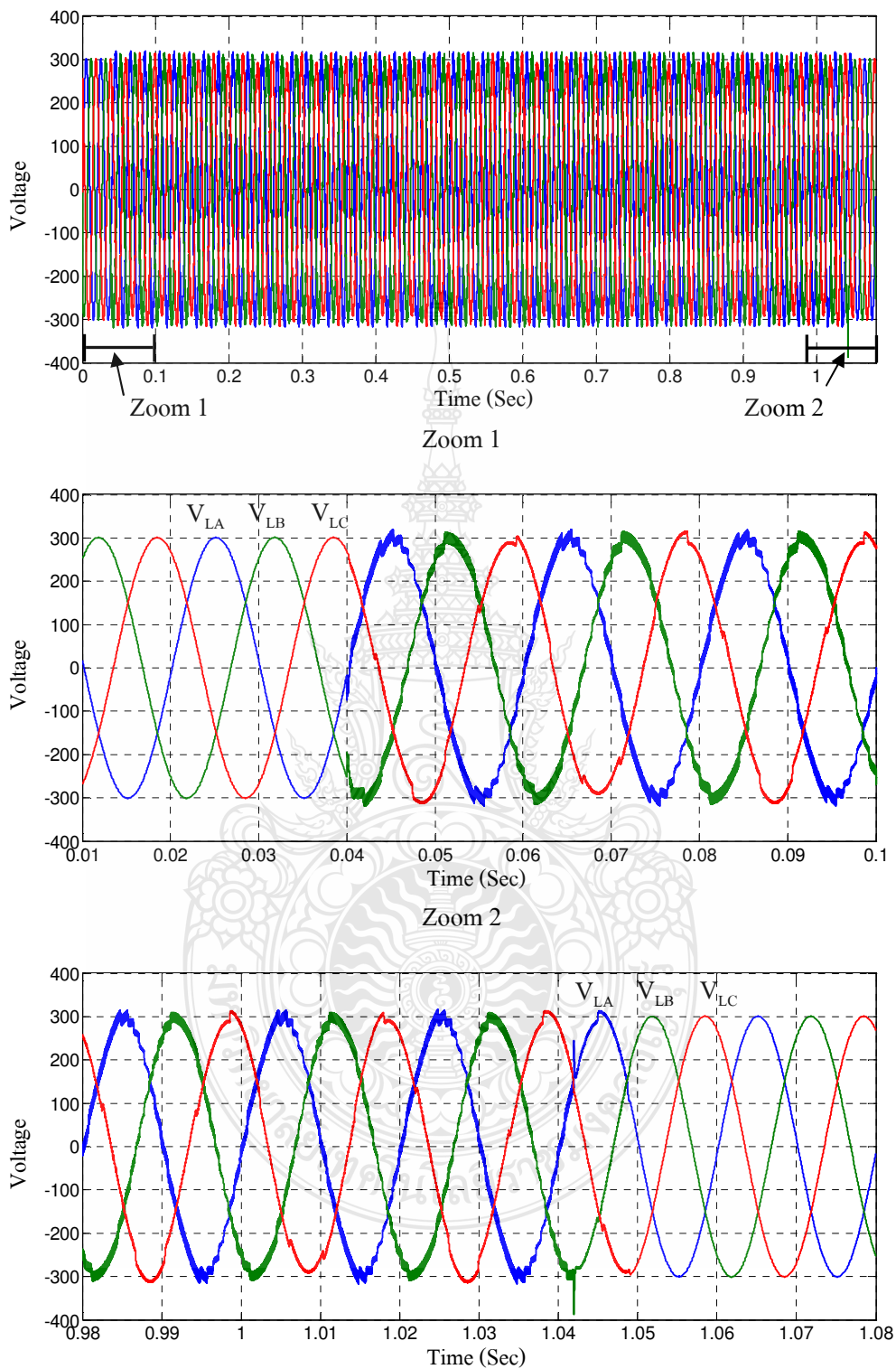
ภาพที่ 3.37 แสดงการชดเชยแรงดันที่โหลดได้รับด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ จะเห็นได้ว่าสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้เช่นเดียวกัน แต่รูปคลื่นที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงมากกว่าการใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์มาก โดยรูปกลางแสดงภาพขยายขณะเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว ส่วนรูปล่างแสดงภาพขยายขณะสิ้นสุดแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันโหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวยังคงใกล้เคียงกับทั้งก่อนและหลังการเกิดแรงดันตกชั่วคราวเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 3.35 ผลการจำลองแรงดันก่อนการชดเชยกรณีเกิดความผิดปกติแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส A และเฟส B



ภาพที่ 3.36 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดเคลมป์ กรณี
เกิดความผิดปกติแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส A และเฟส B



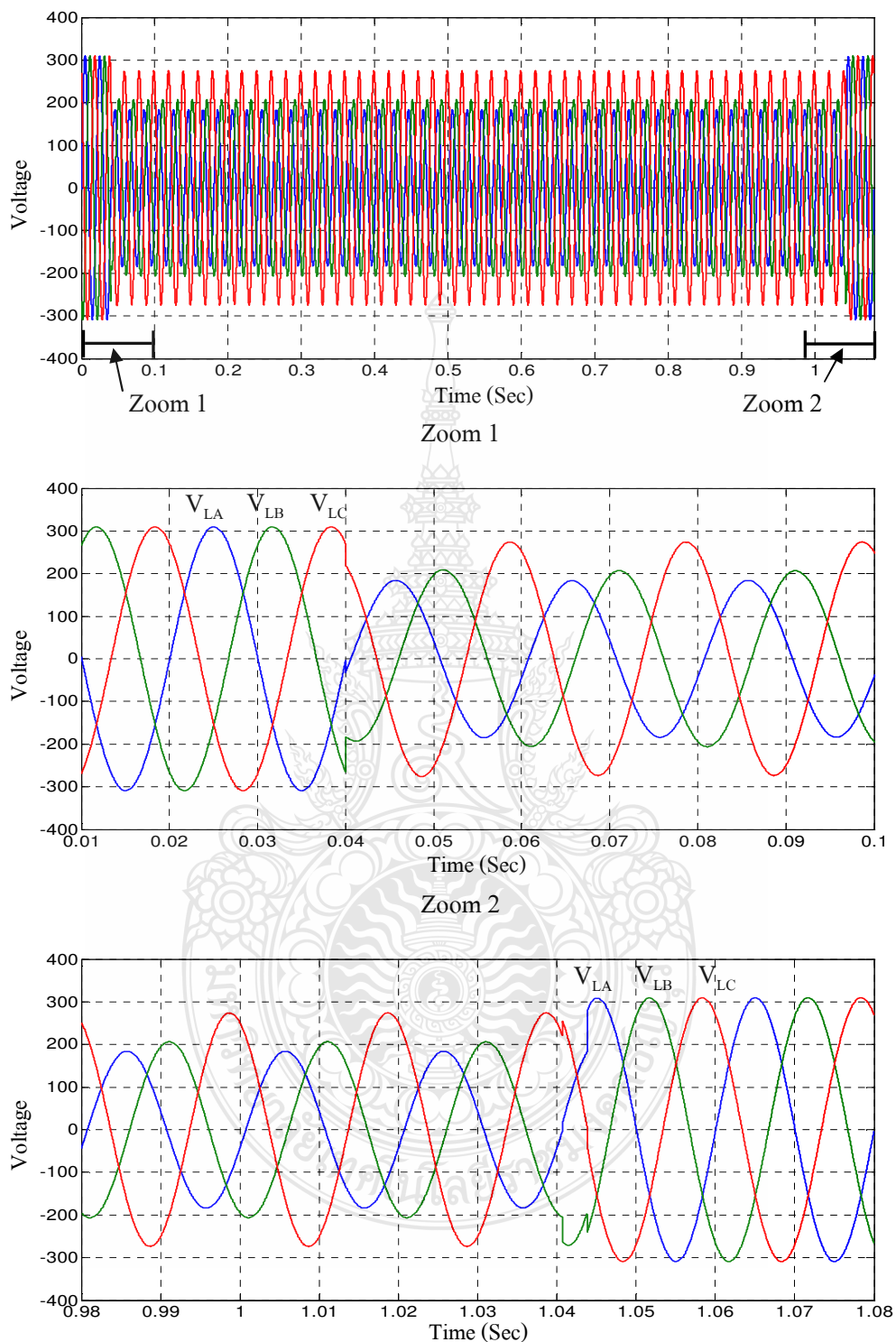
ภาพที่ 3.37 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ กรณีเกิดความผิดปกติ
พร้อมแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส A และเฟส B

2) เกิดความผิดพ้องระหว่างเฟส A และ B ต่อกราวด์

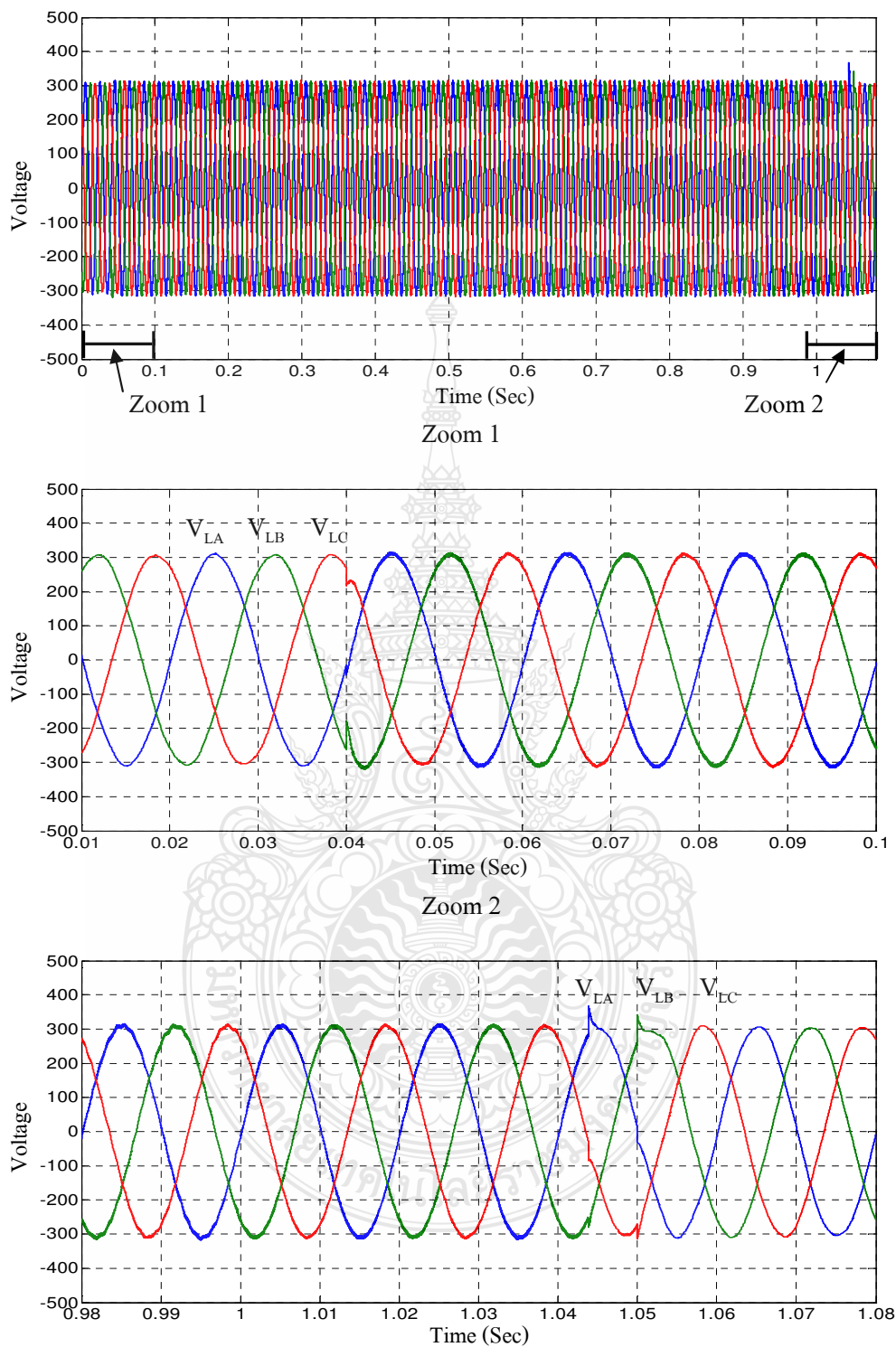
ภาพที่ 3.38 แสดงแรงดันที่โหลดได้รับเมื่อไม่ได้มีการชดเชยซึ่งเกิดจากความผิดพ้องแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส A และ B ต่อกราวด์ จะเห็นได้ว่าแรงดันทั้ง 3 เฟสมีการเปลี่ยนแปลงคือเฟส A และเฟส B มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดและมีการกระโดดของมุมเฟสร่วมอยู่ด้วย ส่วนเฟส C มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

ภาพที่ 3.39 แสดงการชดเชยแรงดันที่โหลดได้รับด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ จะเห็นได้ว่าสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้ดี ซึ่งในช่วงเวลาเริ่มและสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราวนั้น รูปคลื่นจะมีการกระเพื่อมเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้รูปคลื่นที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงเล็กน้อย โดยรูปกลางแสดงภาพขยายขณะเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว ส่วนรูปล่างแสดงภาพขยายขณะสิ้นสุดแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันโหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวยังคงใกล้เคียงกับทั้งก่อนและหลังการเกิดแรงดันตกชั่วคราว

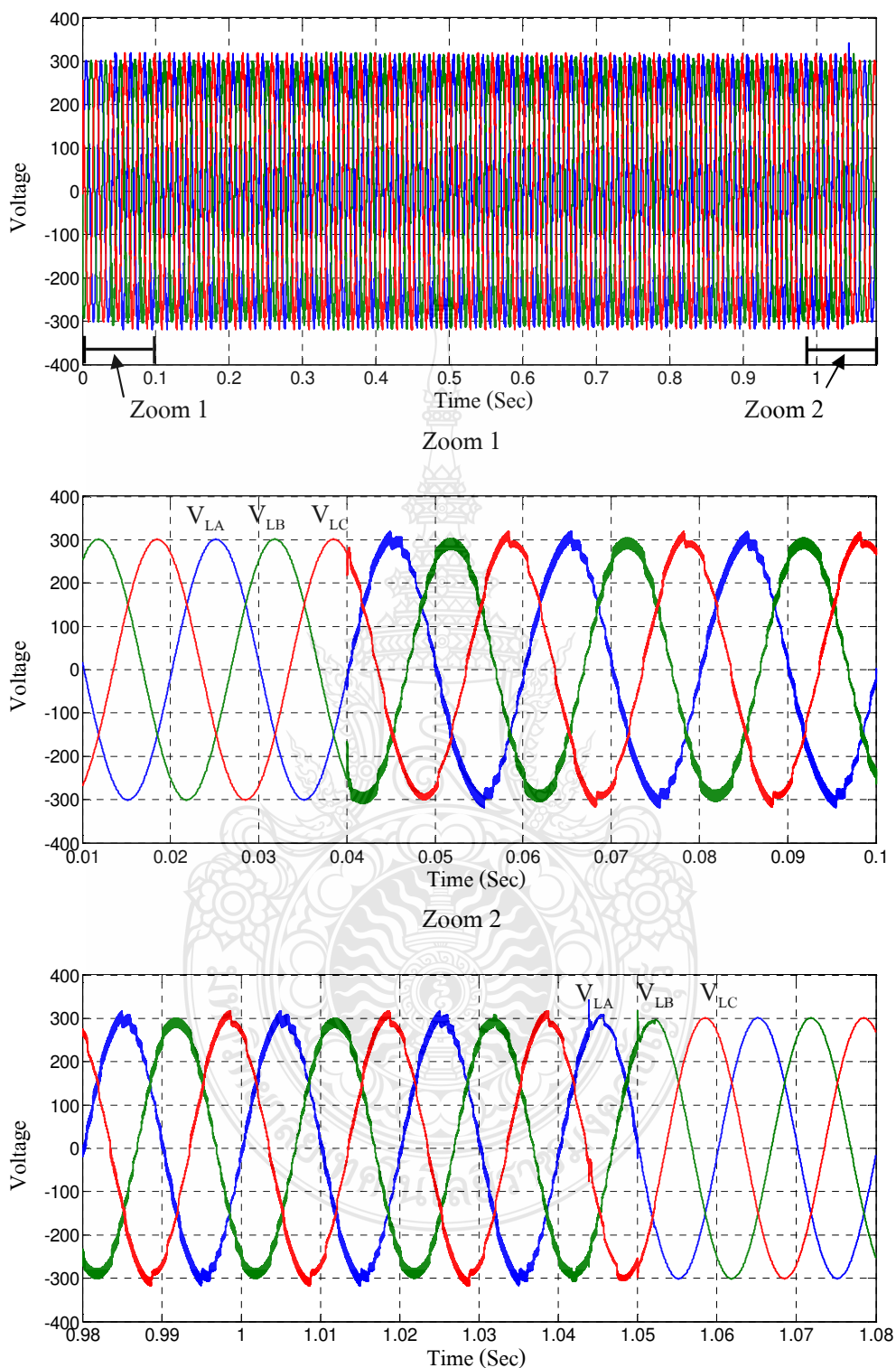
ภาพที่ 3.40 แสดงการชดเชยแรงดันที่โหลดได้รับด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ จะเห็นได้ว่าสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้เช่นเดียวกัน แต่รูปคลื่นที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงมากกว่าการใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์มาก โดยรูปกลางแสดงภาพขยายขณะเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว ส่วนรูปล่างแสดงภาพขยายขณะสิ้นสุดแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันโหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวยังคงใกล้เคียงกับทั้งก่อนและหลังการเกิดแรงดันตกชั่วคราวเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 3.38 ผลการจำลองแรงดันก่อนการชดเชยกรณีเกิดความผิดปกติแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส A และเฟส B ต่อกราวด์



ภาพที่ 3.39 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดเคลมป์ 3 เฟส
เกิดความผิดเพี้ยนแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส A และเฟส B ต่อกราวด์



ภาพที่ 3.40 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ กรณีเกิดความผิด
 พร่องแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส A และเฟส B ต่อกราวด์

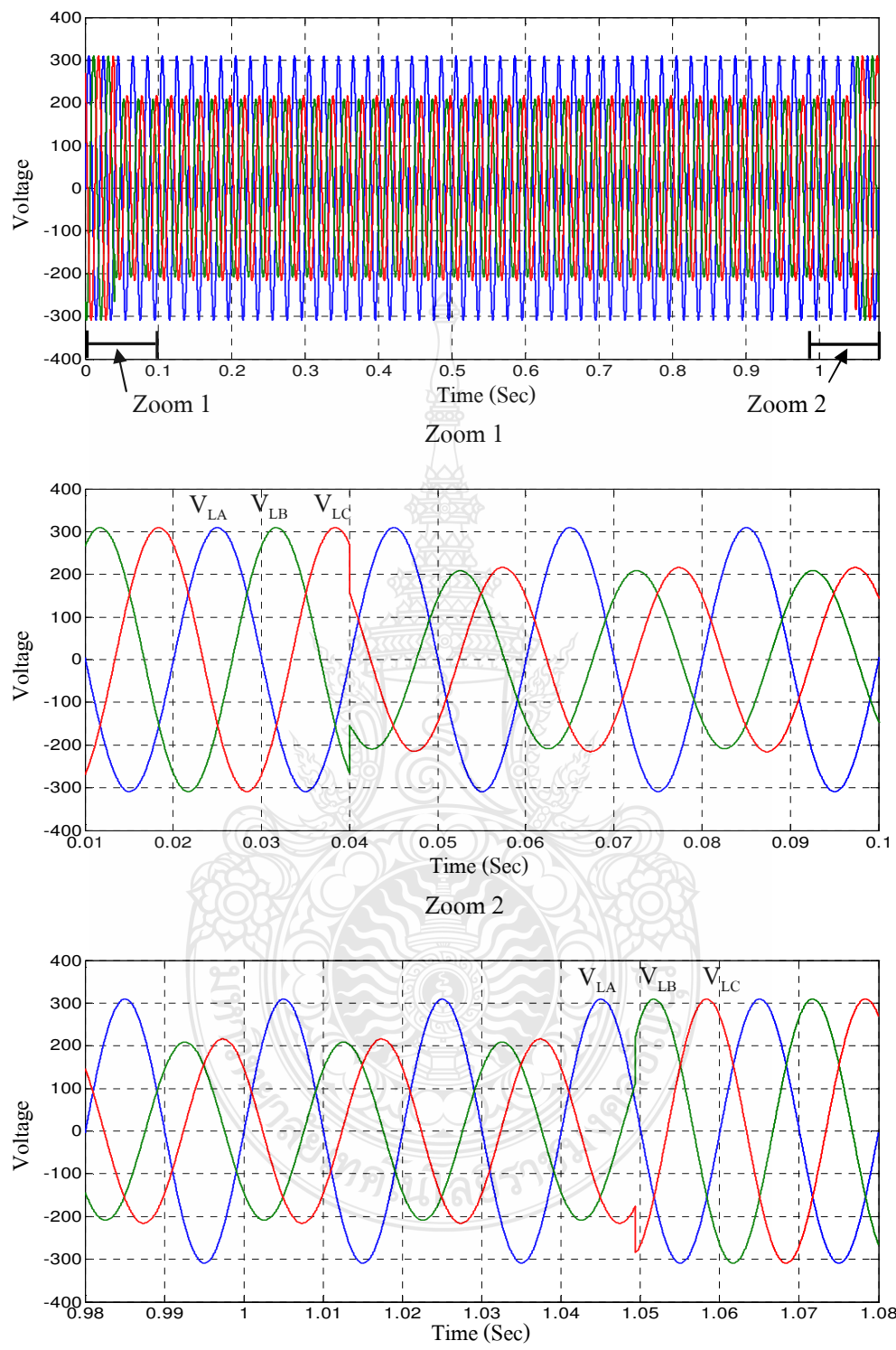
3) เกิดความผิดพ้องระหว่างเฟส B และ C

ภาพที่ 3.41 แสดงแรงดันที่โหลดได้รับเมื่อไม่ได้มีการชดเชยซึ่งเกิดจากความผิดพ้องแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส B และ C จะเห็นได้ว่ามีแรงดัน 2 เฟสที่มีการเปลี่ยนแปลงคือเฟส B และเฟส C ซึ่งมีการกระโดดของมุมเฟสด้วยเล็กน้อย ส่วนเฟส A ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

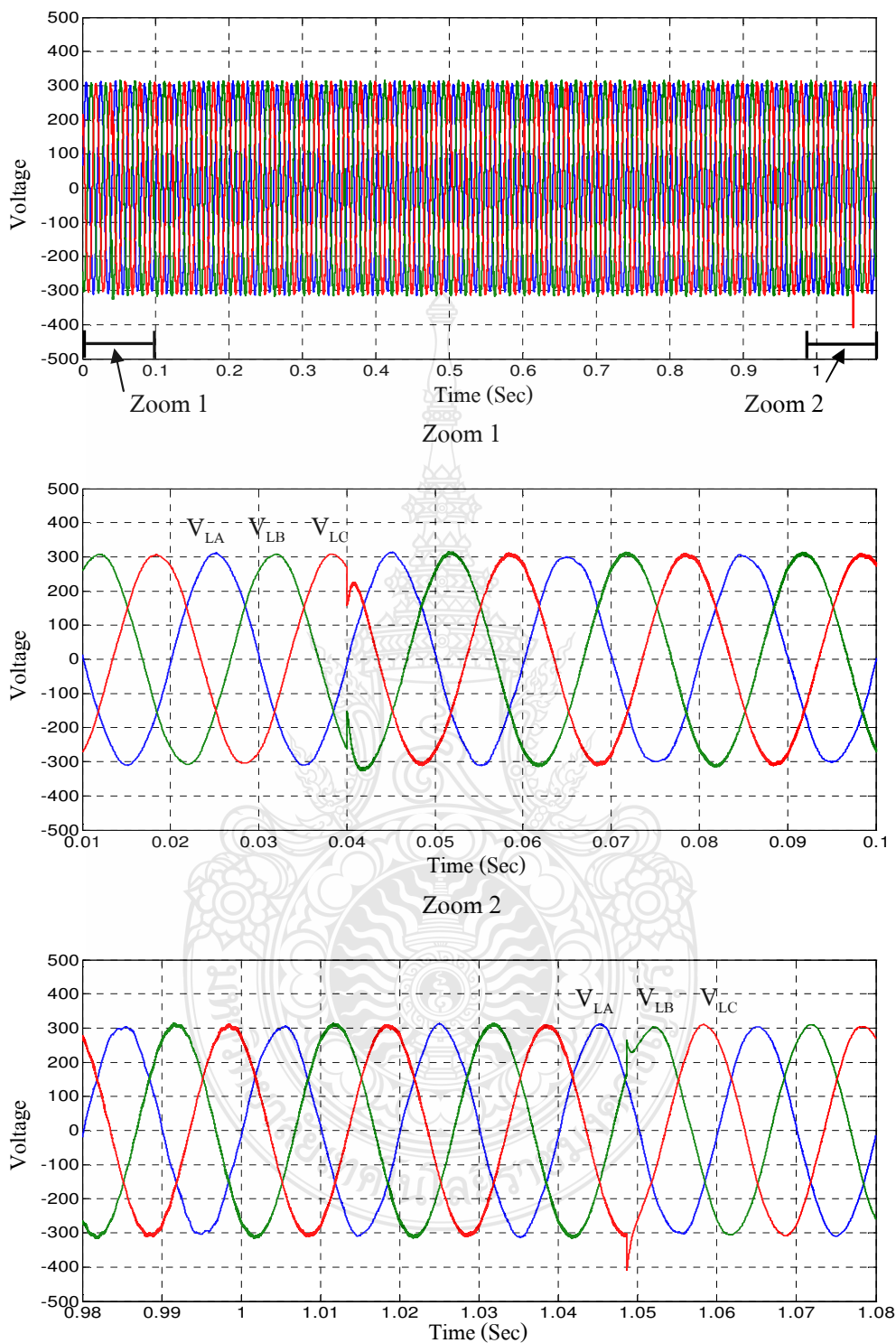
ภาพที่ 3.42 แสดงการชดเชยแรงดันที่โหลดได้รับด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดเคลมปี จะเห็นได้ว่าสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้ดี ซึ่งในช่วงเวลาเริ่มและสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราวนั้น รูปคลื่นจะมีการกระเพื่อมเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้รูปคลื่นที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงเล็กน้อย โดยรูปกลางแสดงภาพขยายขณะเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว ส่วนรูปล่างแสดงภาพขยายขณะสิ้นสุดแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันโหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวยังคงใกล้เคียงกับทั้งก่อนและหลังการเกิดแรงดันตกชั่วคราว

ภาพที่ 3.43 แสดงการชดเชยแรงดันที่โหลดได้รับด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ จะเห็นได้ว่าสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้เช่นเดียวกัน แต่รูปคลื่นที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงมากกว่าการใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดเคลมปีมาก โดยรูปกลางแสดงภาพขยายขณะเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว ส่วนรูปล่างแสดงภาพขยายขณะสิ้นสุดแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันโหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวยังคงใกล้เคียงกับทั้งก่อนและหลังการเกิดแรงดันตกชั่วคราวเช่นเดียวกัน

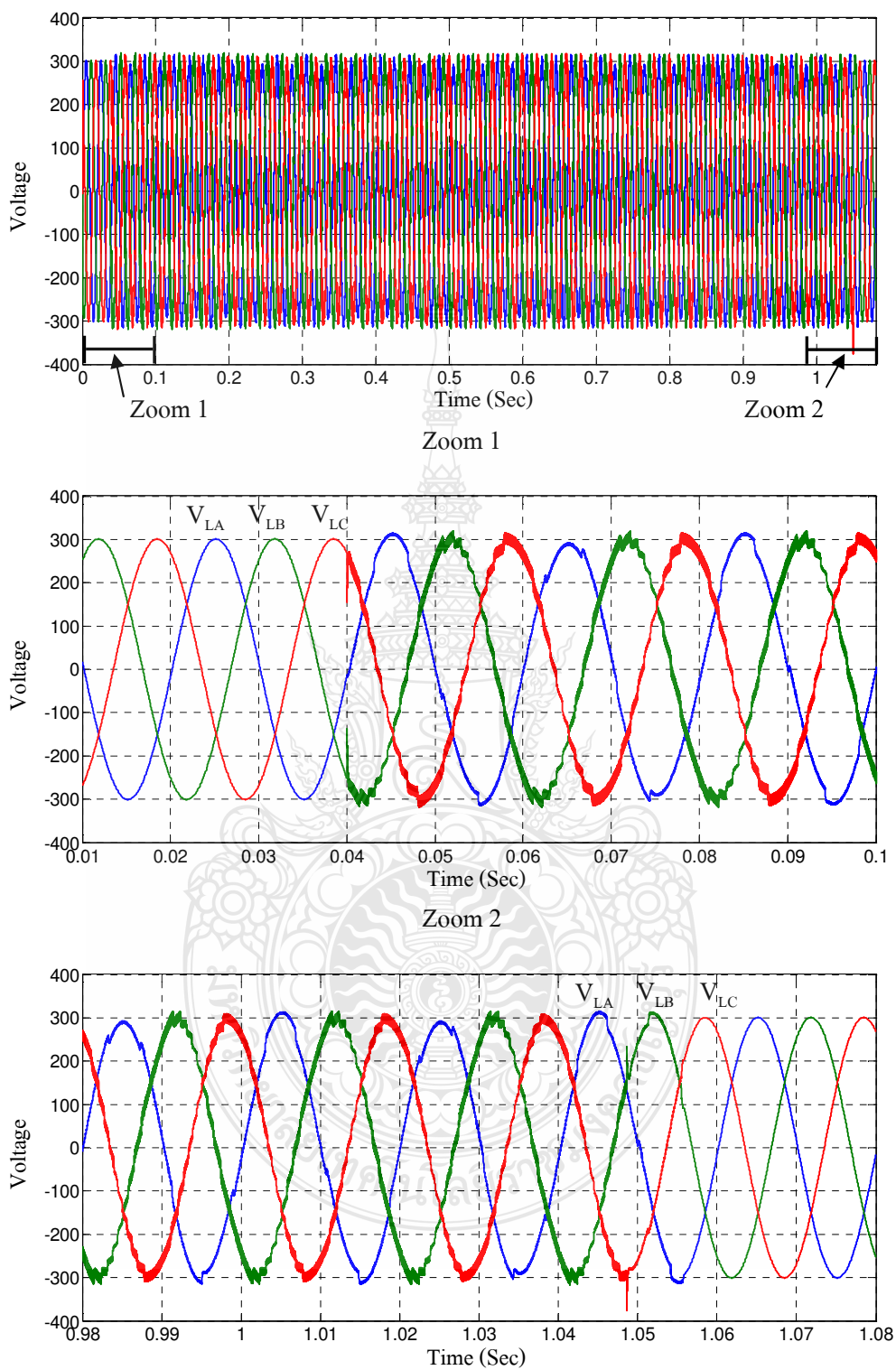




ภาพที่ 3.41 ผลการจำลองแรงดันก่อนการชดเชยกรณีเกิดความผิดปกติแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส B และเฟส C



ภาพที่ 3.42 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดเคลมป์ กรณี
 เกิดความผิดปกติแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส B และเฟส C



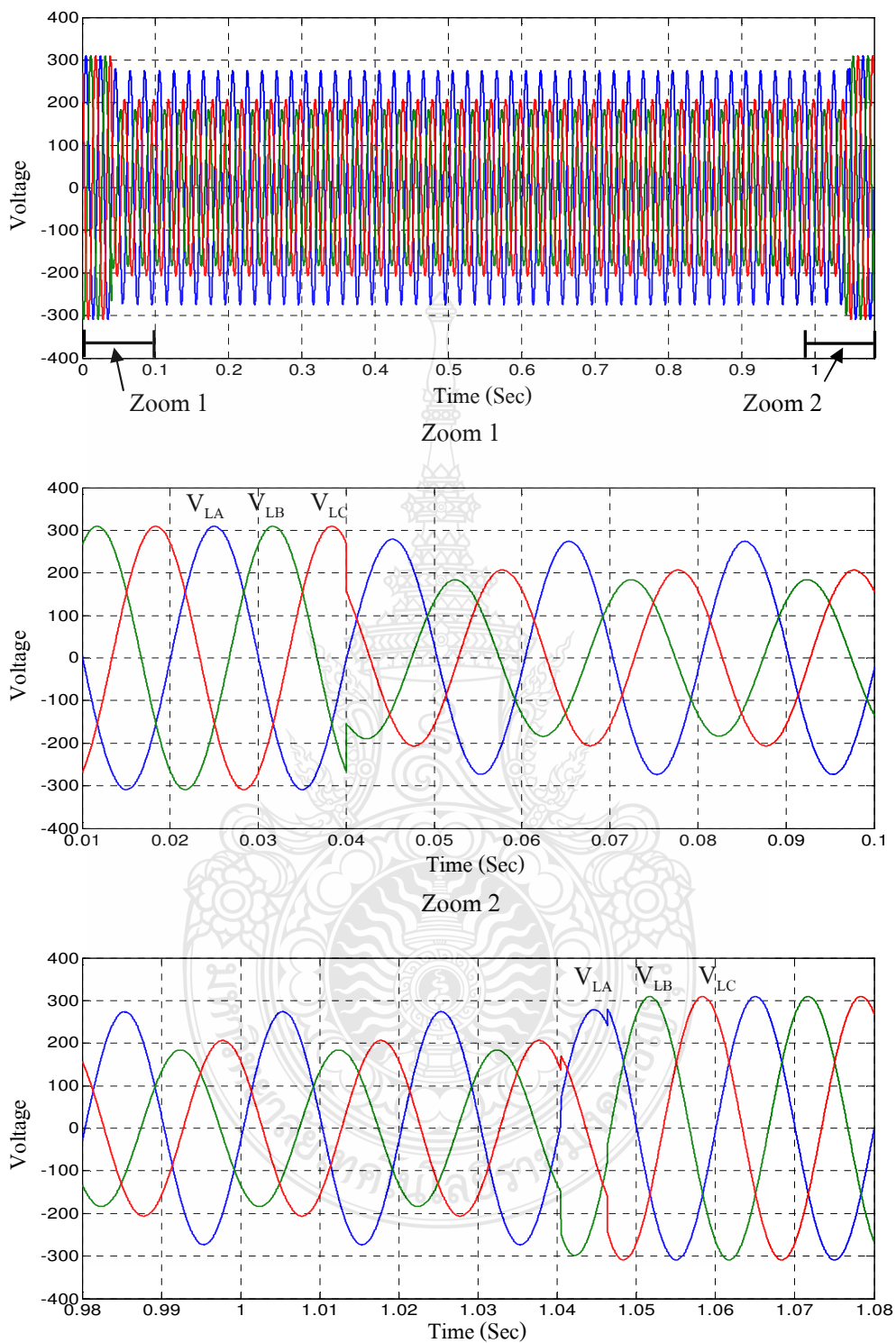
ภาพที่ 3.43 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ กรณีเกิดความผิดปกติระหว่างเฟส B และเฟส C

4) เกิดความผิดพ้องระหว่างเฟส B และ C ต่อกราวด์

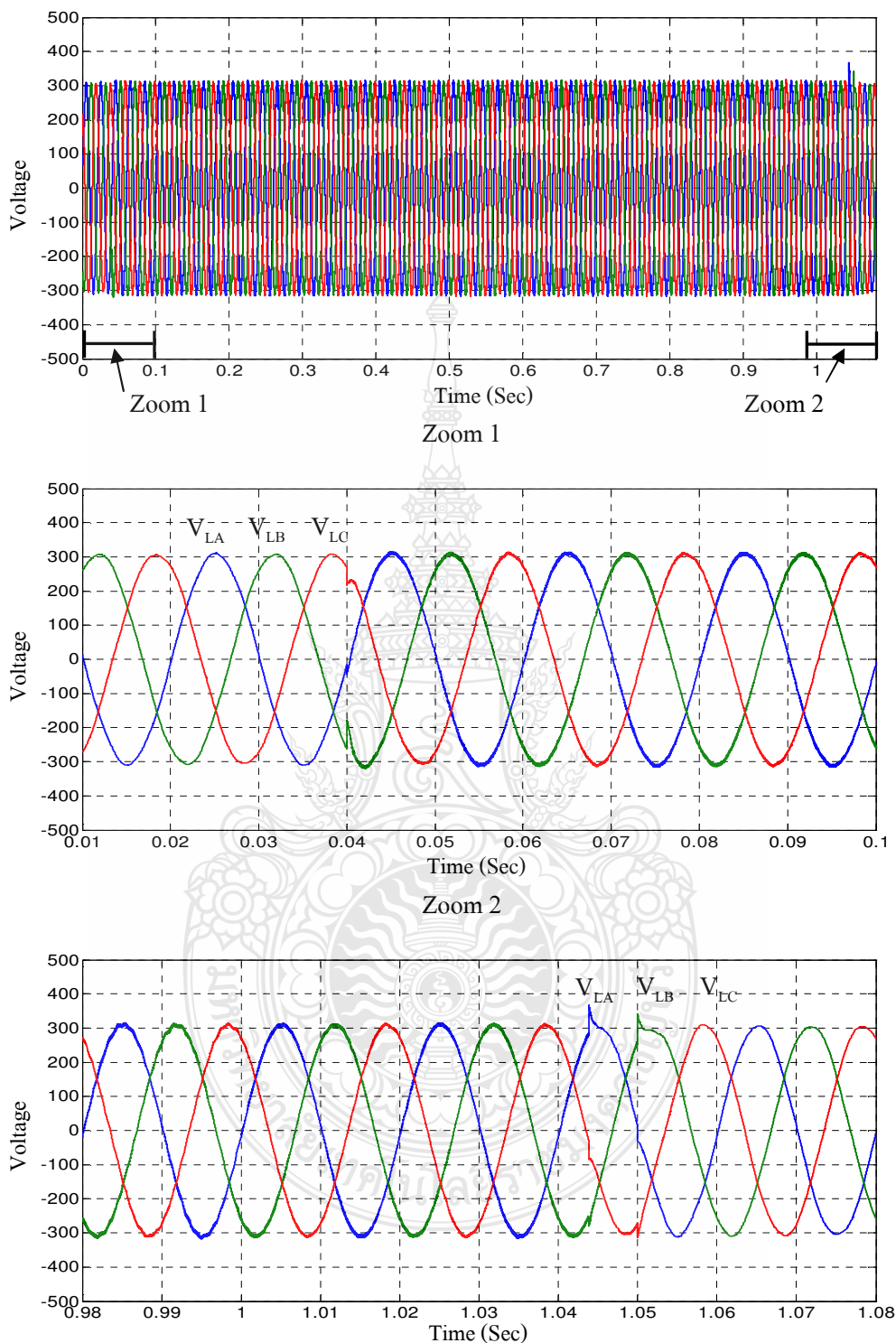
ภาพที่ 3.44 แสดงแรงดันที่โหลดได้รับเมื่อไม่ได้มีการชดเชยซึ่งเกิดจากความผิดพ้องแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส B และ C ต่อกราวด์ จะเห็นได้ว่าแรงดันทั้ง 3 เฟสมีการเปลี่ยนแปลงคือเฟส B และเฟส C มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดและมีการกระโดดของมุมเฟสร่วมอยู่ด้วย ส่วนเฟส A มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

ภาพที่ 3.45 แสดงการชดเชยแรงดันที่โหลดได้รับด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ จะเห็นได้ว่าสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้ดี ซึ่งในช่วงเวลาเริ่มและสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราวนั้น รูปคลื่นจะมีการกระเพื่อมเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้รูปคลื่นที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงเล็กน้อย โดยรูปกลางแสดงภาพขยายขณะเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว ส่วนรูปล่างแสดงภาพขยายขณะสิ้นสุดแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันโหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวยังคงใกล้เคียงกับทั้งก่อนและหลังการเกิดแรงดันตกชั่วคราว

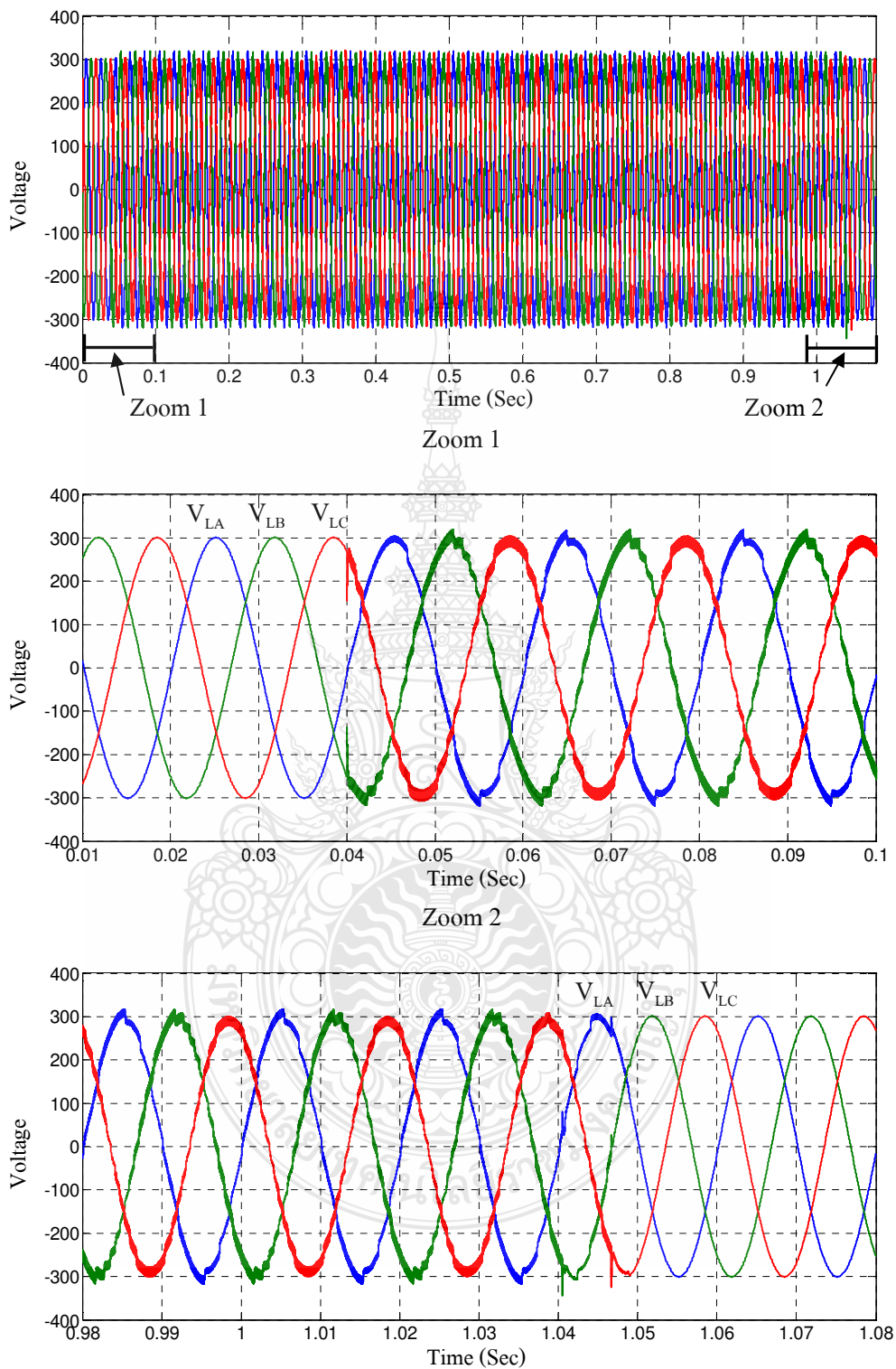
ภาพที่ 3.46 แสดงการชดเชยแรงดันที่โหลดได้รับด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ จะเห็นได้ว่าสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้เช่นเดียวกัน แต่รูปคลื่นที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงมากกว่าการใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์มาก โดยรูปกลางแสดงภาพขยายขณะเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว ส่วนรูปล่างแสดงภาพขยายขณะสิ้นสุดแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันโหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวยังคงใกล้เคียงกับทั้งก่อนและหลังการเกิดแรงดันตกชั่วคราวเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 3.44 ผลการจำลองแรงดันก่อนการชดเชยกรณีเกิดความผิดปกติแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส B และเฟส C ต่อกราวด์



ภาพที่ 3.45 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดเคลมป์ 3 เฟส
เกิดความผิดเพี้ยนแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส B และเฟส C ต่อกราวด์



ภาพที่ 3.46 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ กรณีเกิดความผิดปกติระหว่างเฟส B และเฟส C ต่อกราวด์

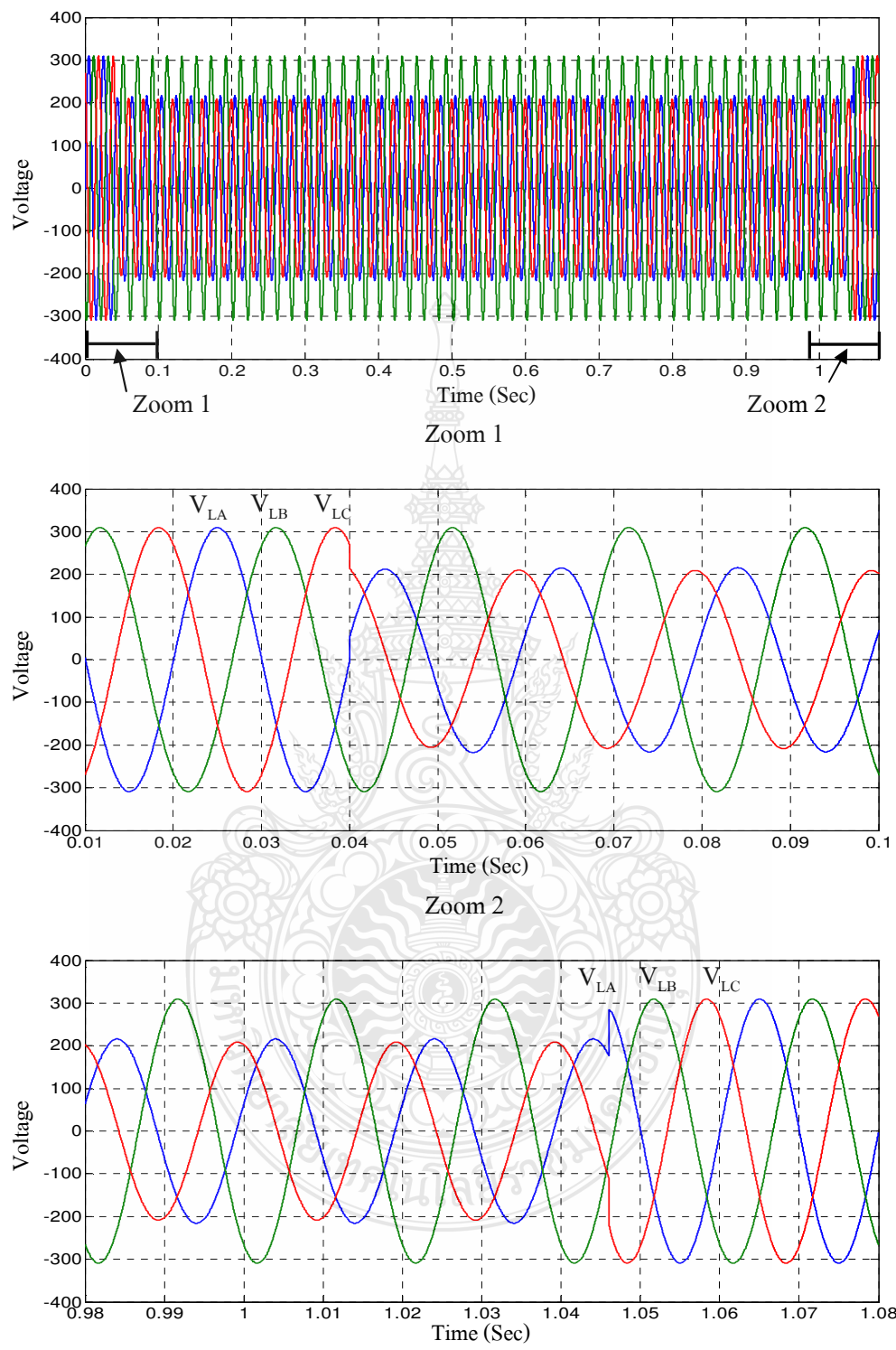
5) เกิดความผิดพลาดระหว่างเฟส C และ A

ภาพที่ 3.47 แสดงแรงดันที่โหลดได้รับเมื่อไม่ได้มีการชดเชยซึ่งเกิดจากความผิดพลาดแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส C และ A จะเห็นได้ว่ามีแรงดัน 2 เฟสที่มีการเปลี่ยนแปลงคือเฟส A และเฟส C ซึ่งมีการกระโดดของมุมเฟสด้วยเล็กน้อย ส่วนเฟส B ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

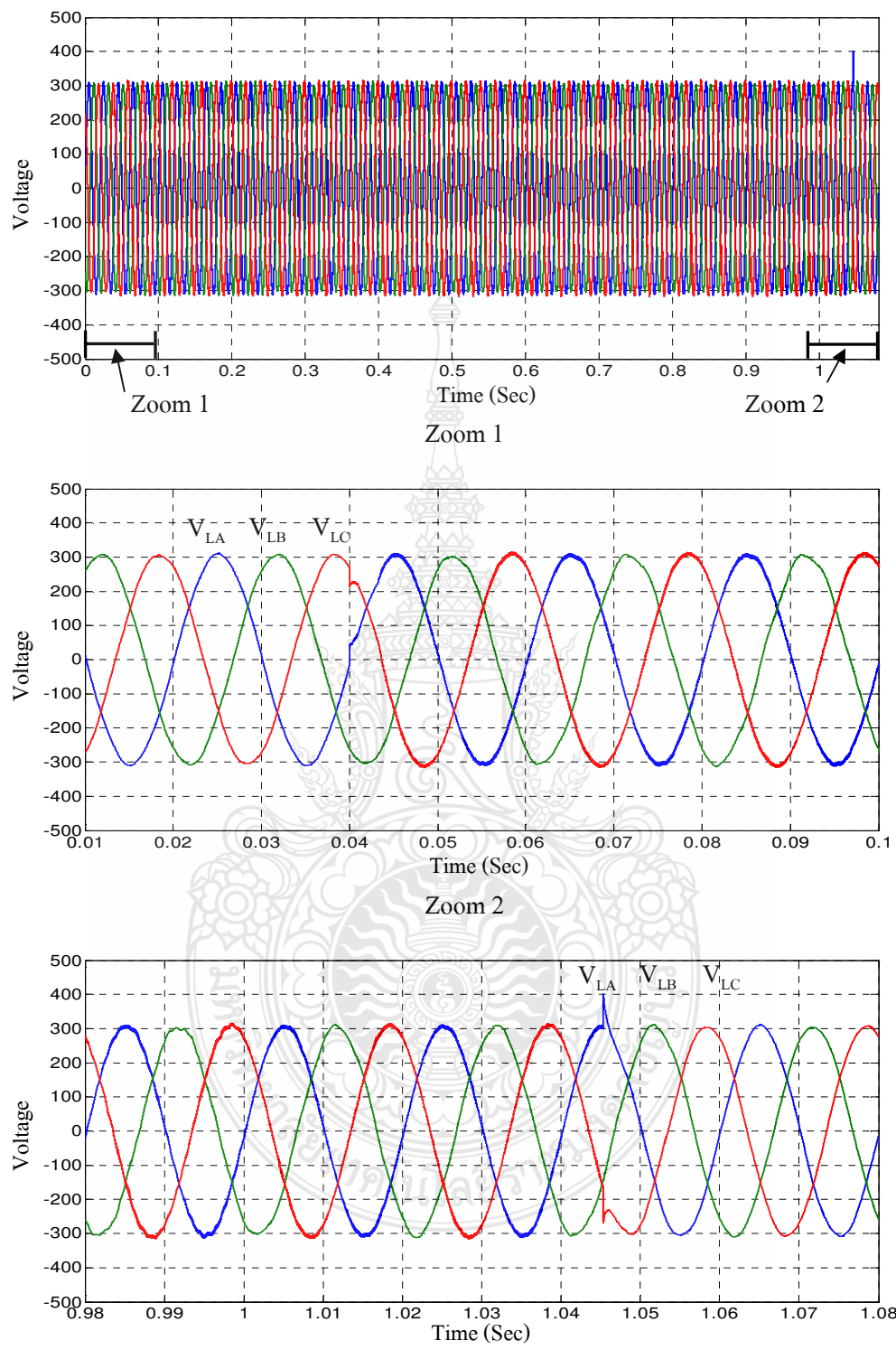
ภาพที่ 3.48 แสดงการชดเชยแรงดันที่โหลดได้รับด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ จะเห็นได้ว่าสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้ดี ซึ่งในช่วงเวลาเริ่มและสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราวนั้น รูปคลื่นจะมีการกระเพื่อมเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้รูปคลื่นที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงเล็กน้อย โดยรูปกลางแสดงภาพขยายขณะเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว ส่วนรูปล่างแสดงภาพขยายขณะสิ้นสุดแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันโหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวยังคงใกล้เคียงกับทั้งก่อนและหลังการเกิดแรงดันตกชั่วคราว

ภาพที่ 3.49 แสดงการชดเชยแรงดันที่โหลดได้รับด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ จะเห็นได้ว่าสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้เช่นเดียวกัน แต่รูปคลื่นที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงมากกว่าการใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์มาก โดยรูปกลางแสดงภาพขยายขณะเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว ส่วนรูปล่างแสดงภาพขยายขณะสิ้นสุดแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันโหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวยังคงใกล้เคียงกับทั้งก่อนและหลังการเกิดแรงดันตกชั่วคราวเช่นเดียวกัน

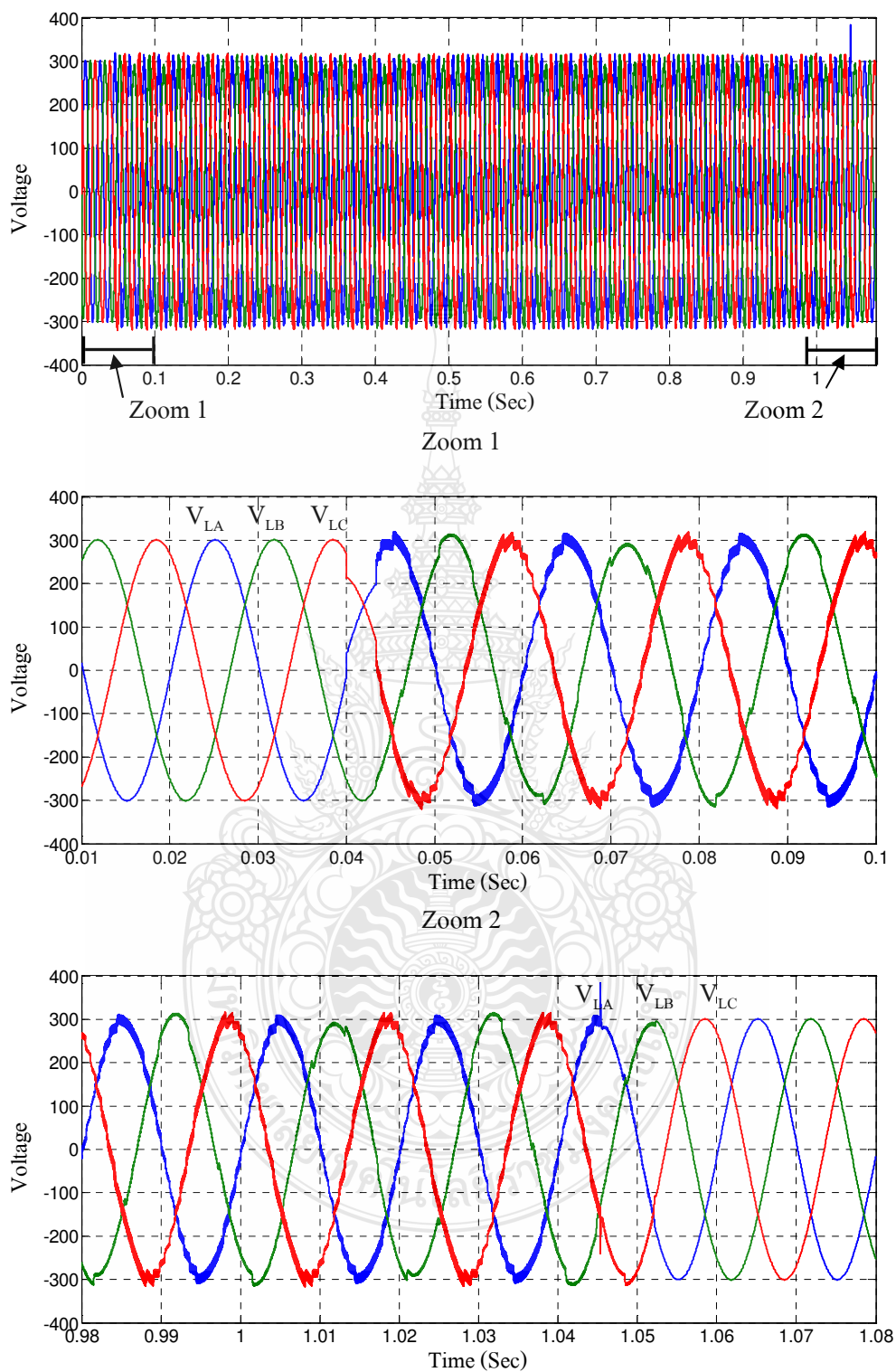




ภาพที่ 3.47 ผลการจำลองแรงดันก่อนการชดเชยกรณีเกิดความผิดปกติแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส C และเฟส A



ภาพที่ 3.48 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดเคลมป์ กรณี
เกิดความผิดปกติแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส C และเฟส A



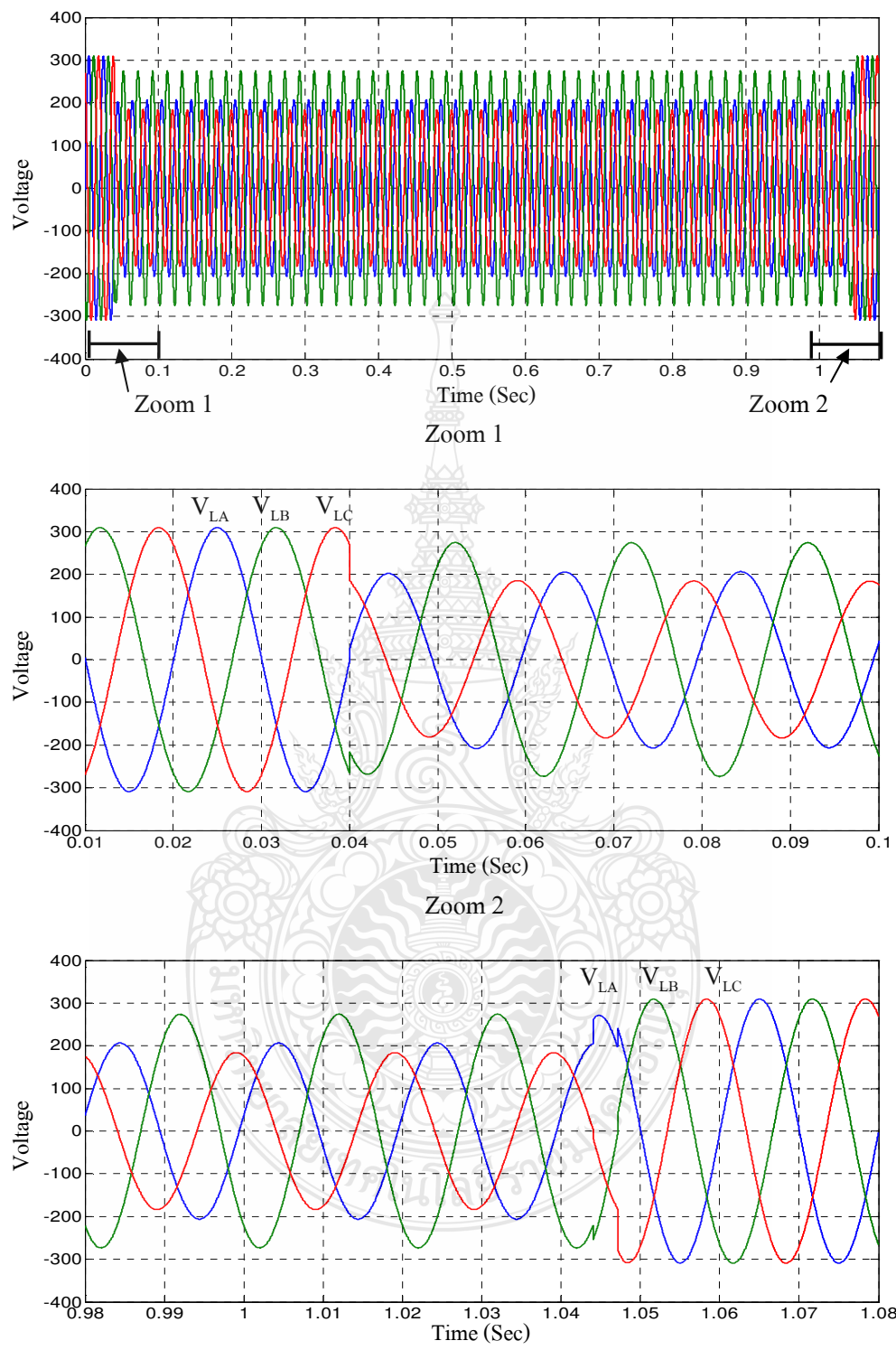
ภาพที่ 3.49 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ กรณีเกิดความผิดปกติระหว่างเฟส C และเฟส A

6) เกิดความผิดพ้องระหว่างเฟส C และ A ต่อกราวด์

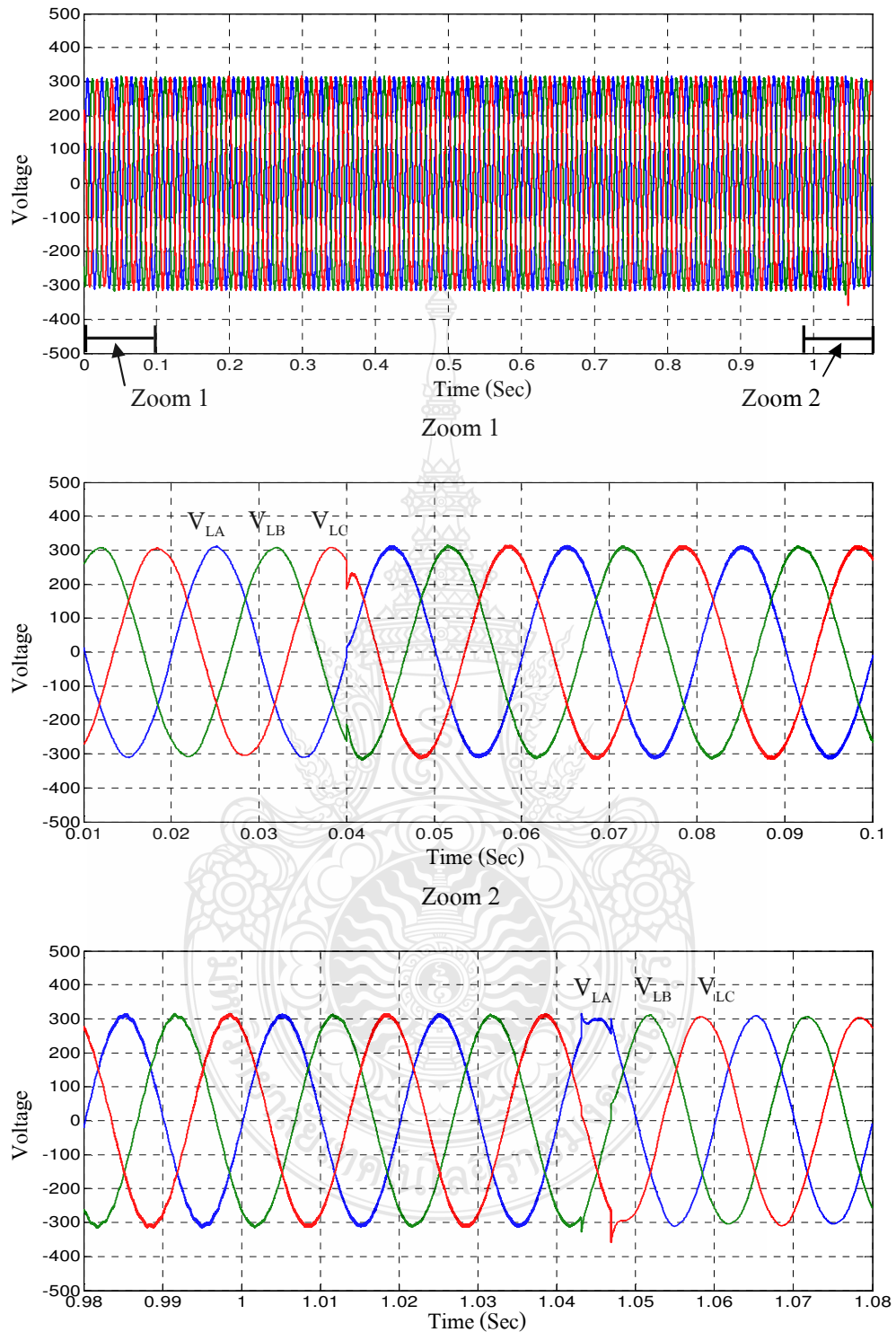
ภาพที่ 3.50 แสดงแรงดันที่โหลดได้รับเมื่อไม่ได้มีการชดเชยซึ่งเกิดจากความผิดพ้องแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส C และ A ต่อกราวด์ จะเห็นได้ว่าแรงดันทั้ง 3 เฟสมีการเปลี่ยนแปลงคือเฟส A และเฟส C มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดและมีการกระโดดของมุมเฟสร่วมอยู่ด้วย ส่วนเฟส B มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

ภาพที่ 3.51 แสดงการชดเชยแรงดันที่โหลดได้รับด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ จะเห็นได้ว่าสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้ดี ซึ่งในช่วงเวลาเริ่มและสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราวนั้น รูปคลื่นจะมีการกระเพื่อมเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้รูปคลื่นที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงเล็กน้อย โดยรูปกลางแสดงภาพขยายขณะเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว ส่วนรูปล่างแสดงภาพขยายขณะสิ้นสุดแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันโหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวยังคงใกล้เคียงกับทั้งก่อนและหลังการเกิดแรงดันตกชั่วคราว

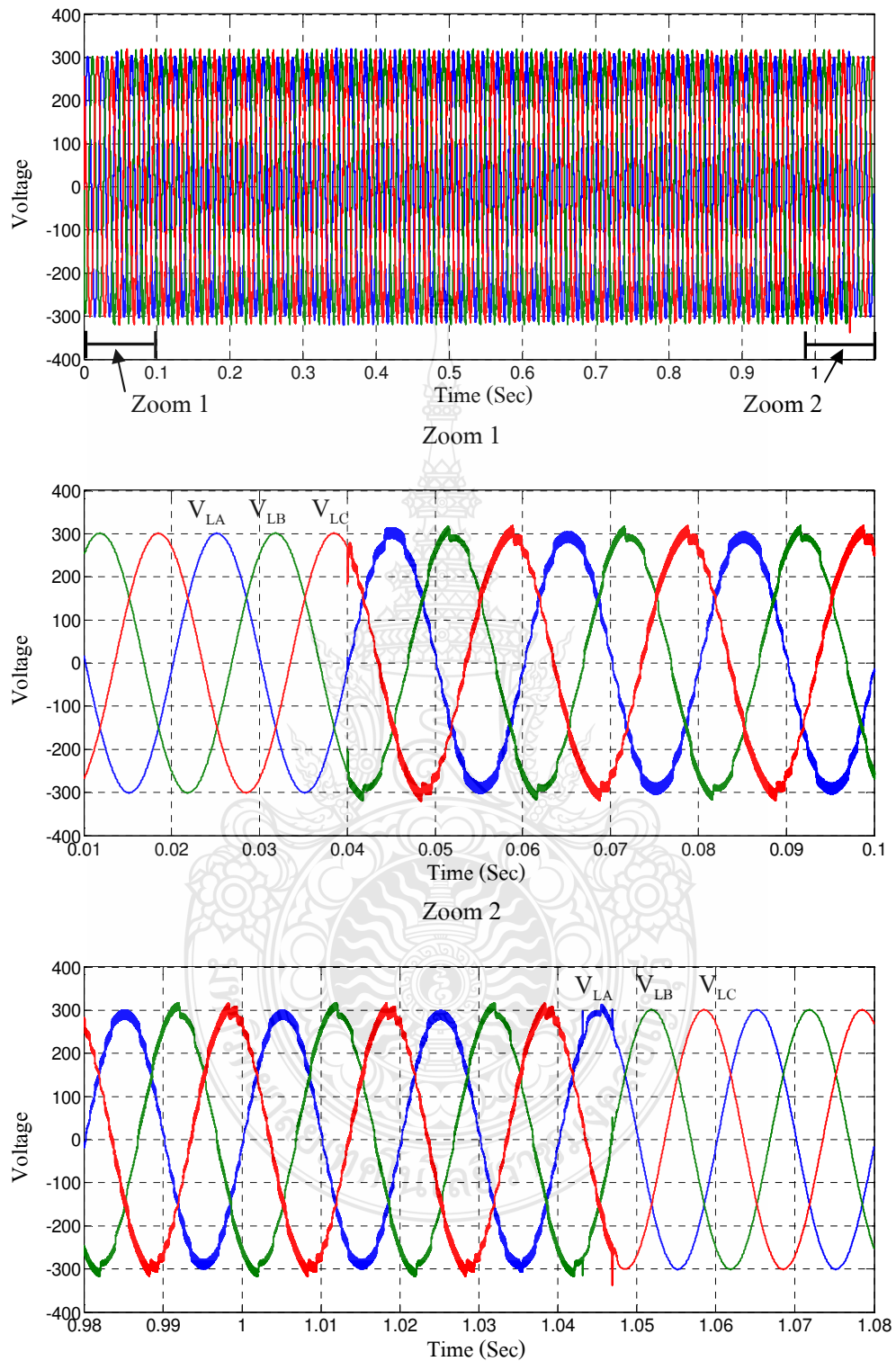
ภาพที่ 3.52 แสดงการชดเชยแรงดันที่โหลดได้รับด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ จะเห็นได้ว่าสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้เช่นเดียวกัน แต่รูปคลื่นที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงมากกว่าการใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์มาก โดยรูปกลางแสดงภาพขยายขณะเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว ส่วนรูปล่างแสดงภาพขยายขณะสิ้นสุดแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันโหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวยังคงใกล้เคียงกับทั้งก่อนและหลังการเกิดแรงดันตกชั่วคราวเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 3.50 ผลการจำลองแรงดันก่อนการชดเชยกรณีเกิดความผิดปกติแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส C และเฟส A ต่อกราวด์



ภาพที่ 3.51 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดเคลมป์ กรณี
 เกิดความผิดพ้องแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส C และเฟส A ต่อกราวด์



ภาพที่ 3.52 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ กรณีเกิดความผิดปกติระหว่างเฟส C และเฟส A ต่อกราวด์

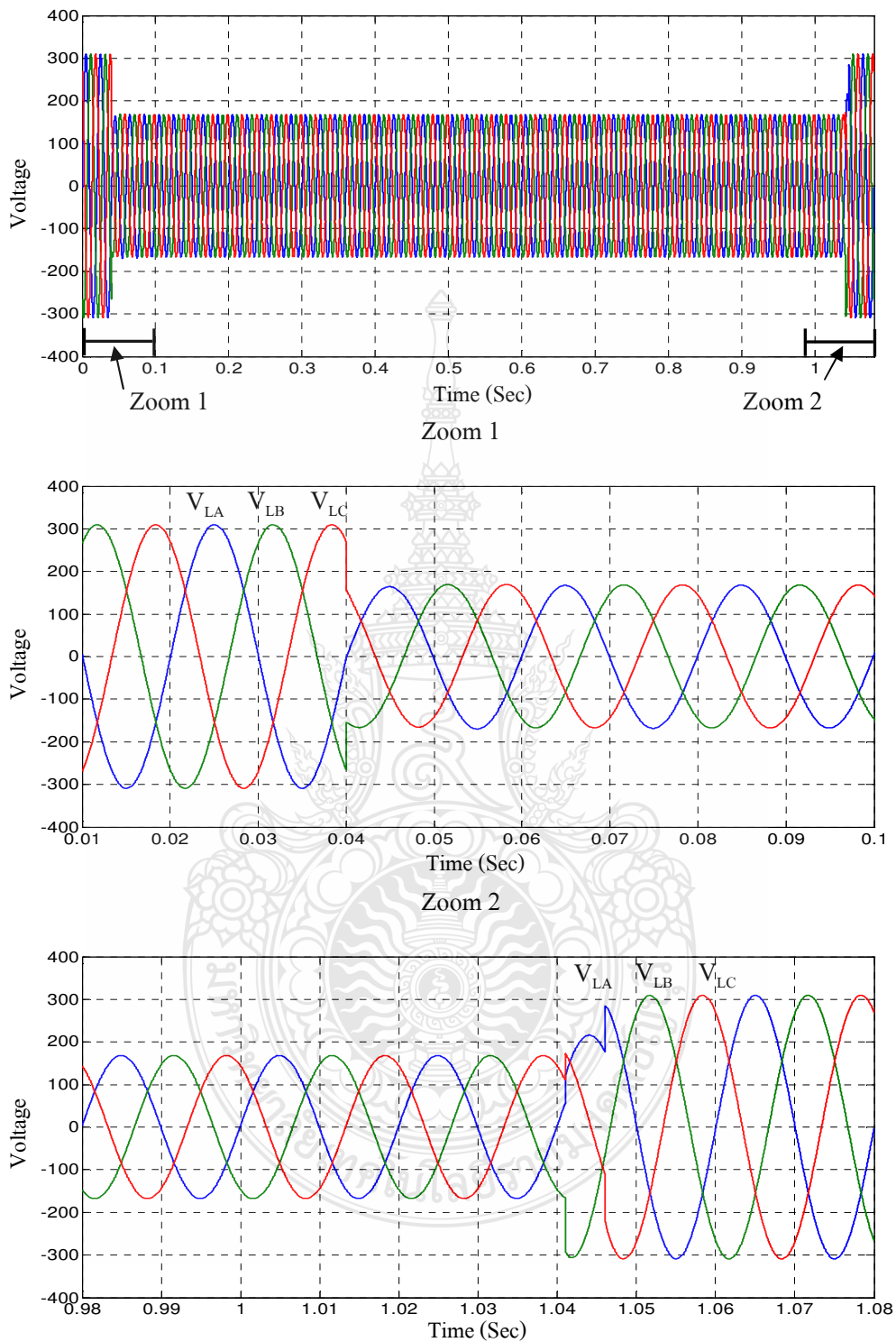
3.6.3 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันกรณีเกิดความผิดปกติแบบ 3 เฟส

1) เกิดความผิดปกติแบบ 3 เฟส

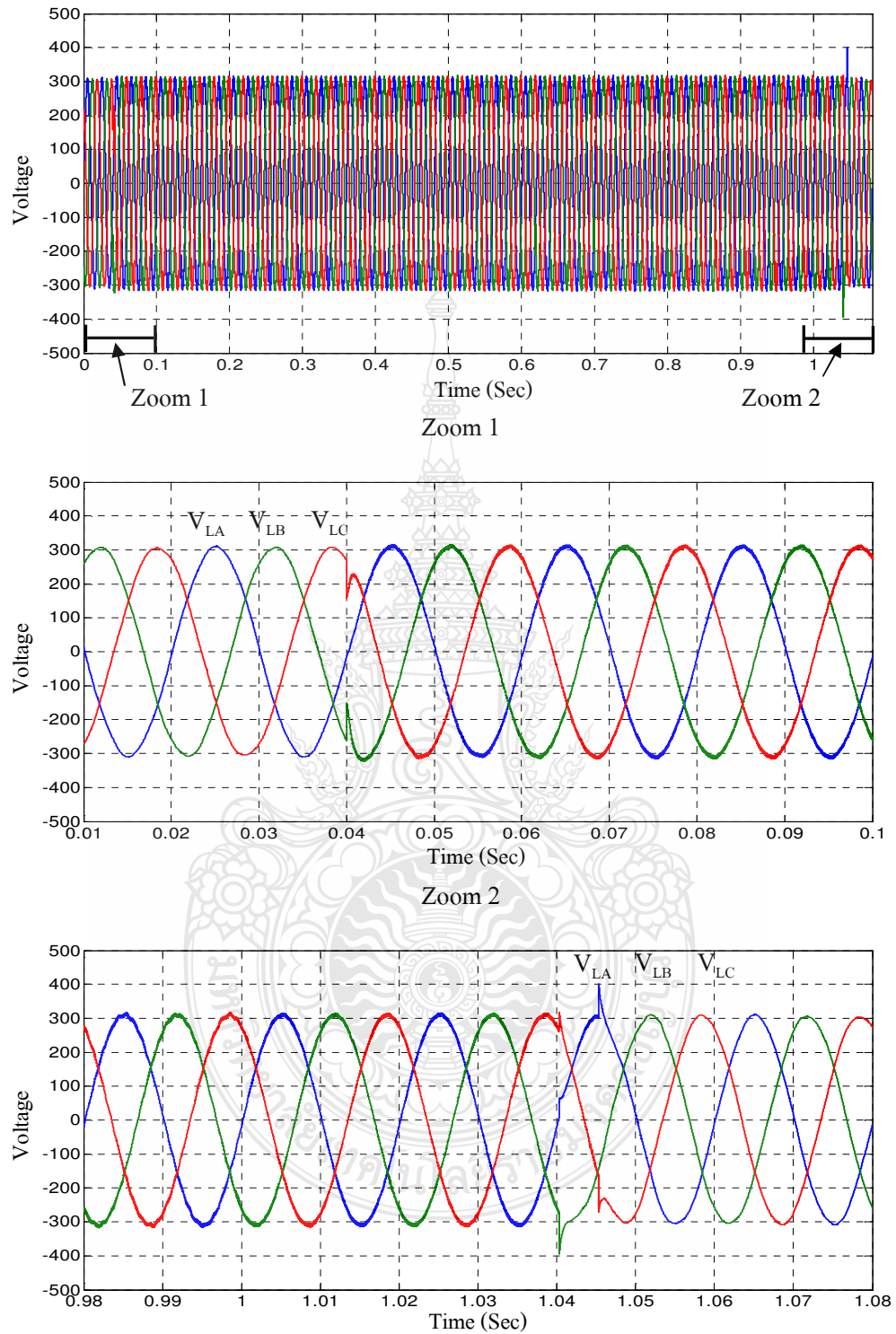
ภาพที่ 3.53 แสดงแรงดันที่โหลดได้รับเมื่อไม่ได้มีการชดเชยซึ่งเกิดจากความผิดปกติแบบ 3 เฟส จะเห็นได้ว่าแรงดันทั้ง 3 เฟสมีการเปลี่ยนแปลงลดลงเท่ากันทั้ง 3 เฟสและไม่มีการกระโดดของมุมเฟส

ภาพที่ 3.54 แสดงการชดเชยแรงดันที่โหลดได้รับด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ จะเห็นได้ว่าสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้ดี ซึ่งในช่วงเวลาเริ่มและสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราวนั้น รูปคลื่นจะมีการกระเพื่อมเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้รูปคลื่นที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงเล็กน้อย โดยรูปกลางแสดงภาพขยายขณะเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว ส่วนรูปล่างแสดงภาพขยายขณะสิ้นสุดแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันโหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวยังคงใกล้เคียงกับทั้งก่อนและหลังการเกิดแรงดันตกชั่วคราว

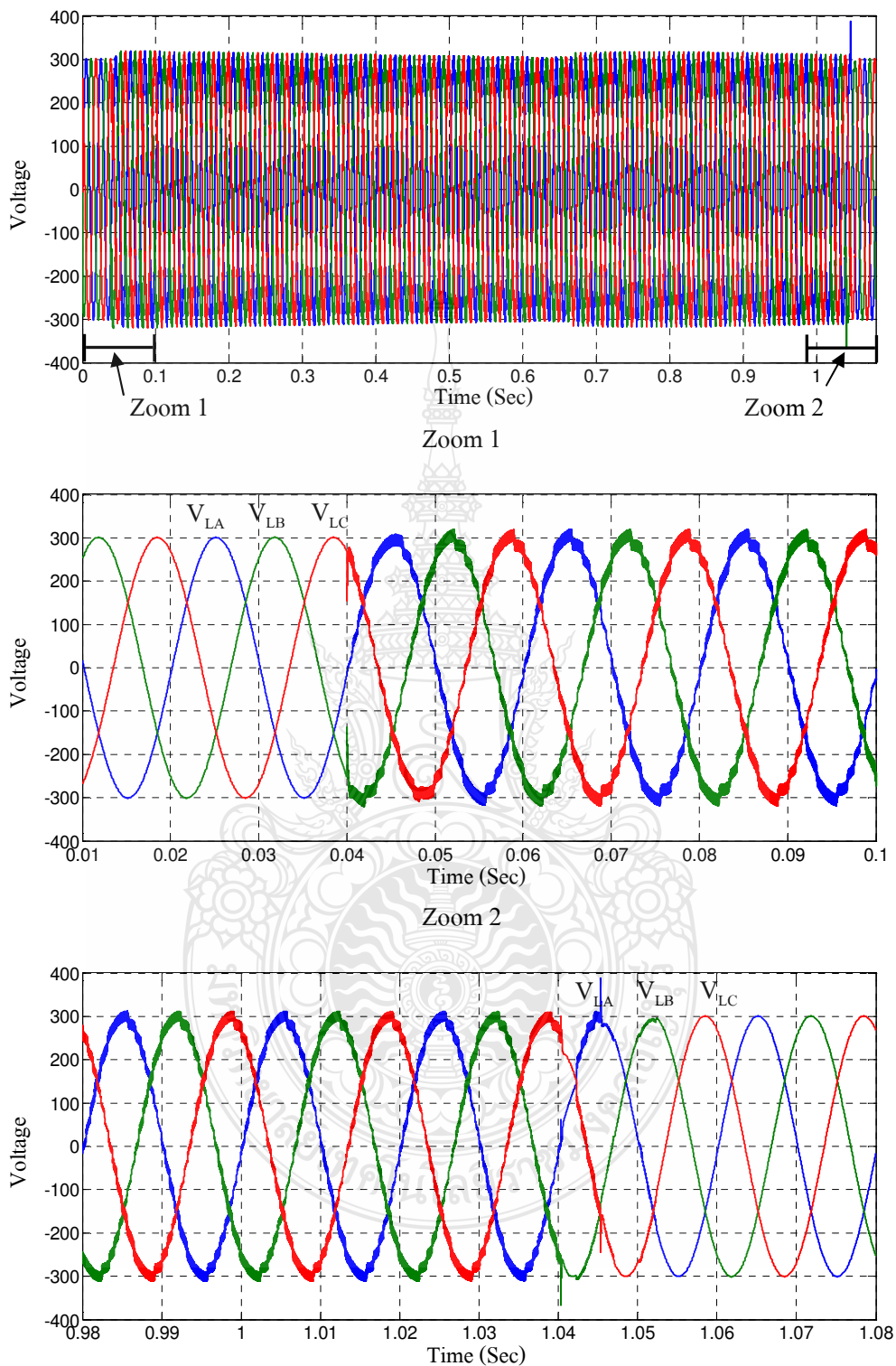
ภาพที่ 3.55 แสดงการชดเชยแรงดันที่โหลดได้รับด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ จะเห็นได้ว่าสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้เช่นเดียวกัน แต่รูปคลื่นที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงมากกว่าการใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์มาก โดยรูปกลางแสดงภาพขยายขณะเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว ส่วนรูปล่างแสดงภาพขยายขณะสิ้นสุดแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันโหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวยังคงใกล้เคียงกับทั้งก่อนและหลังการเกิดแรงดันตกชั่วคราวเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 3.53 ผลการจำลองแรงดันก่อนการชดเชยกรณีเกิดความผิดปกติแบบ 3 เฟส



ภาพที่ 3.54 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดเคลมป์ 3 เฟส
เกิดความผิดเพี้ยนแบบ 3 เฟส



ภาพที่ 3.55 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ กรณีเกิดความผิดปกติ
พร้อมแบบ 3 เฟส

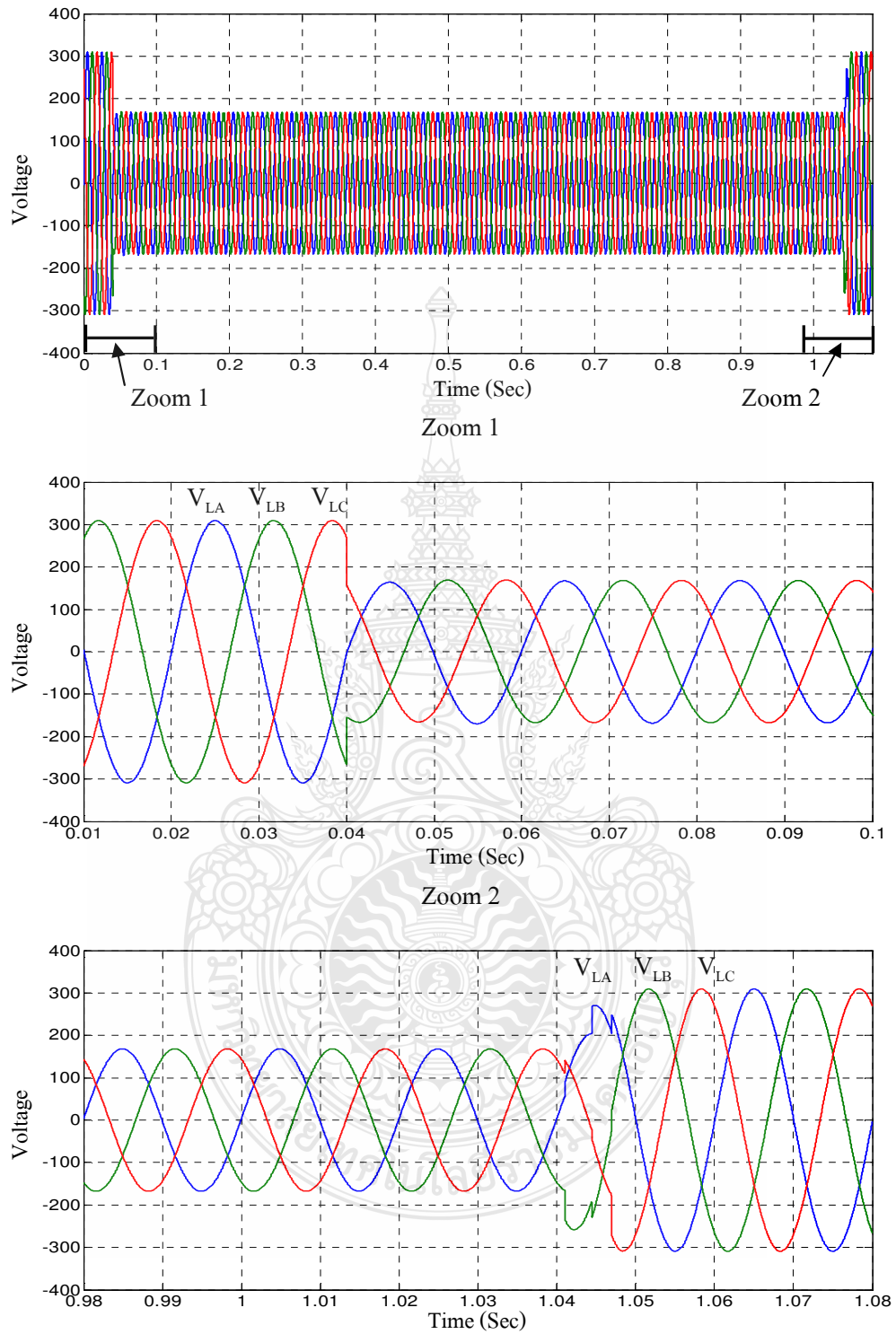
2) เกิดความผิดพลาดแบบ 3 เฟสต่อกราวด์

ภาพที่ 3.56 แสดงแรงดันที่โหลดได้รับเมื่อไม่ได้มีการชดเชยซึ่งเกิดจากความผิดพลาดแบบ 3 เฟสต่อกราวด์ จะเห็นได้ว่าแรงดันทั้ง 3 เฟสมีการเปลี่ยนแปลงลดลงเท่ากันทั้ง 3 เฟสและไม่มีกระแสโคคของมุมเฟส

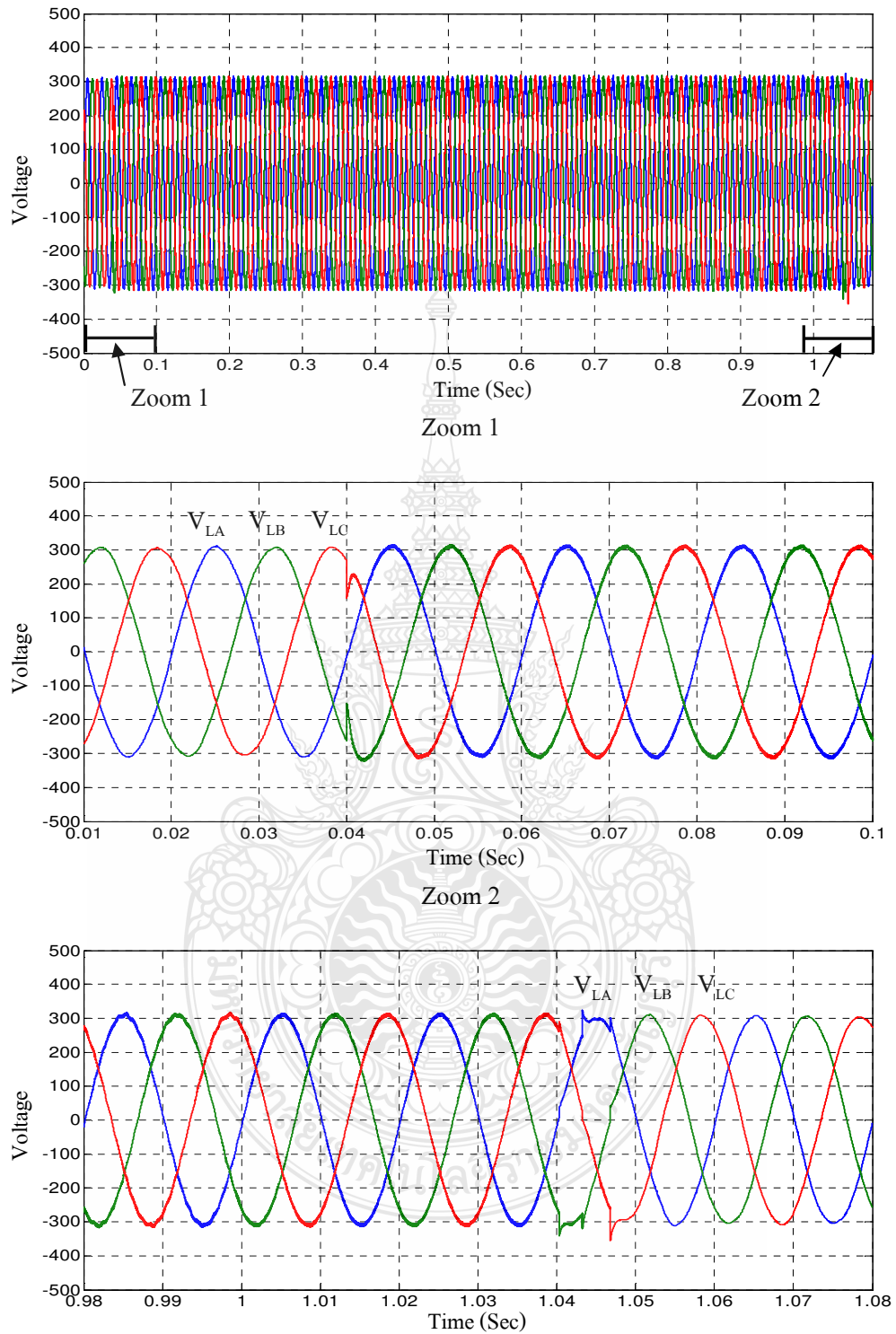
ภาพที่ 3.54 แสดงการชดเชยแรงดันที่โหลดได้รับด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ จะเห็นได้ว่าสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้ดี ซึ่งในช่วงเวลาเริ่มและสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราวนั้น รูปคลื่นจะมีการกระเพื่อมเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้รูปคลื่นที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงเล็กน้อย โดยรูปกลางแสดงภาพขยายขณะเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว ส่วนรูปล่างแสดงภาพขยายขณะสิ้นสุดแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันโหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวยังคงใกล้เคียงกับทั้งก่อนและหลังการเกิดแรงดันตกชั่วคราว

ภาพที่ 3.55 แสดงการชดเชยแรงดันที่โหลดได้รับด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ จะเห็นได้ว่าสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้เช่นเดียวกัน แต่รูปคลื่นที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณเพียงมากกว่าการใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์มาก โดยรูปกลางแสดงภาพขยายขณะเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว ส่วนรูปล่างแสดงภาพขยายขณะสิ้นสุดแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งจะเห็นได้ว่าแรงดันโหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวยังคงใกล้เคียงกับทั้งก่อนและหลังการเกิดแรงดันตกชั่วคราวเช่นเดียวกัน

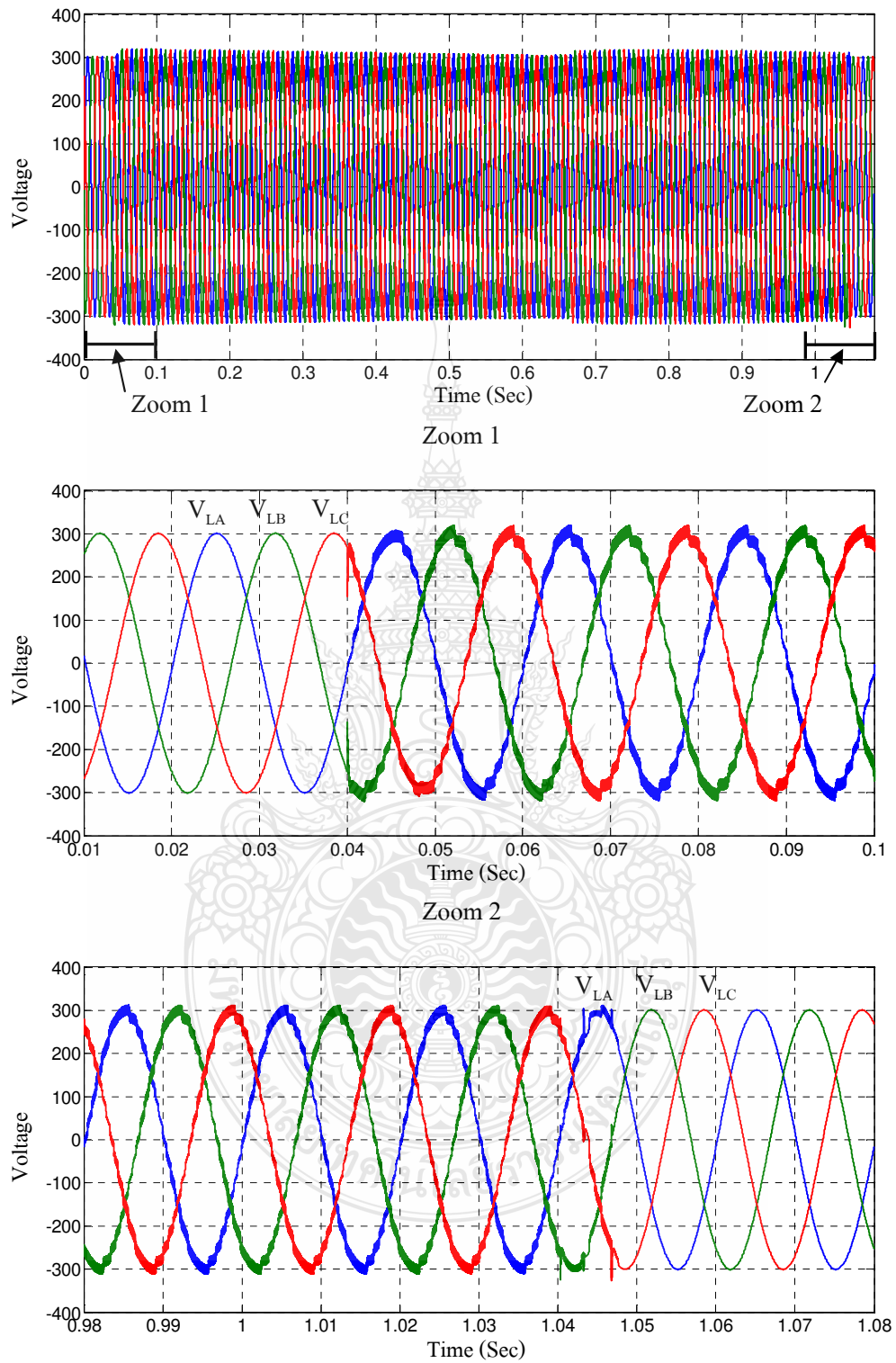




ภาพที่ 3.56 ผลการจำลองแรงดันก่อนการชดเชยกรณีเกิดความผิดปกติแบบ 3 เฟสต่อกราวด์



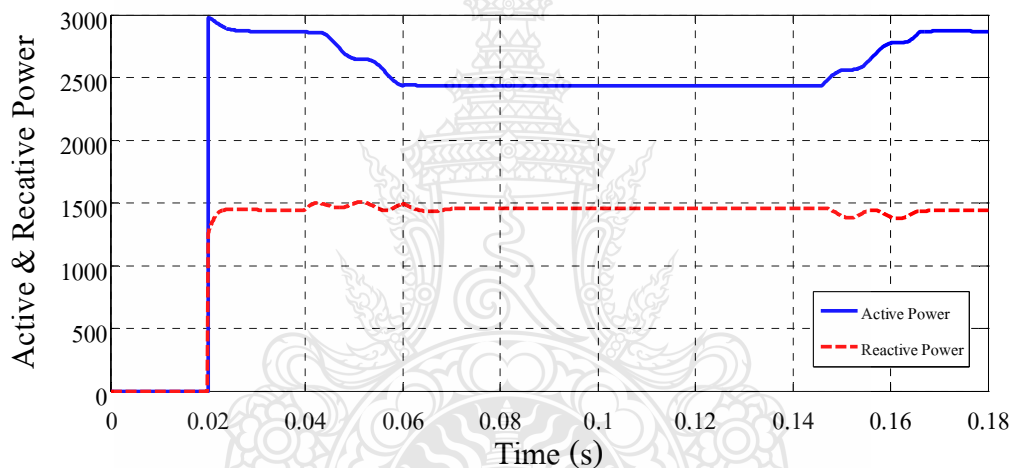
ภาพที่ 3.57 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดเคลมป์กรณี
เกิดความผิดพ้องแบบ 3 เฟสต่อกราวด์



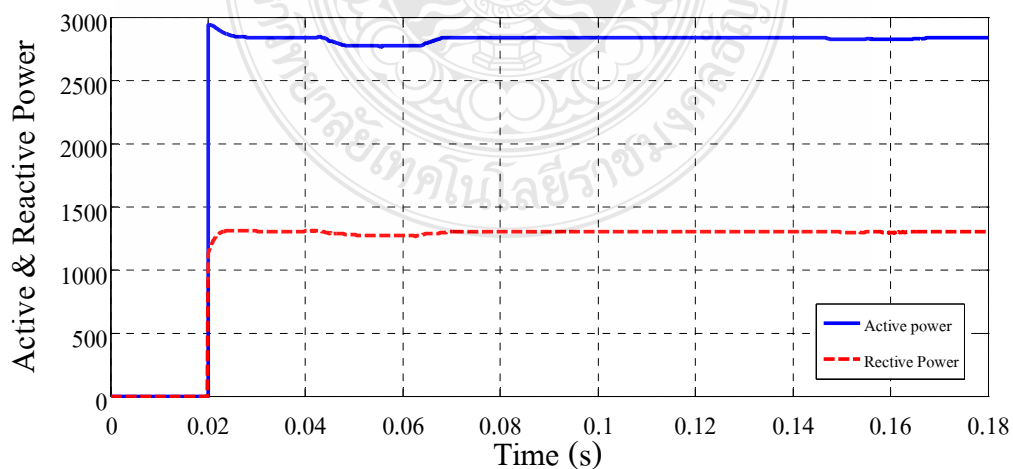
ภาพที่ 3.58 ผลการจำลองการชดเชยแรงดันโดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ กรณีเกิดความผิด
พ้องแบบ 3 เฟสต่อกราวด์

3.6.4 กำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม

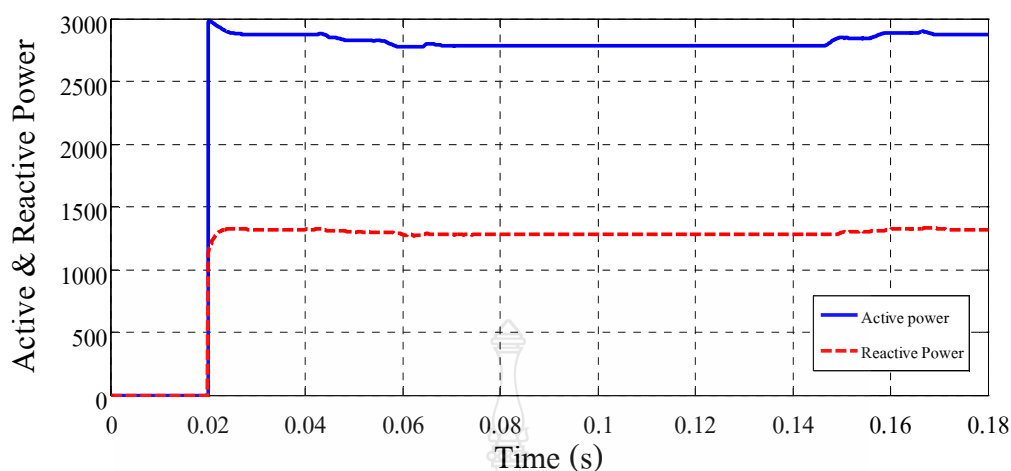
ในการชดเชยแรงดันตกชั่วคราวนั้น ขณะที่วงจรแปลงผันไฟฟ้ากำลังทำงานแรงดันและกระแสด้านออกจะมีค่าแรงดันใกล้เคียงกับแรงดันปกติ (ค่าต่อหน่วย 1.0) นั้นหมายความว่า กำลังไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับก่อนเกิดแรงดันตกชั่วคราว จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า กำลังไฟฟ้าของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมที่ใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอด-แคลมป์ ดังภาพที่ 3.60 มีกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าในระบบก่อนเกิดแรงดันตกชั่วคราว ดังภาพที่ 3.59 มากกว่าการใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ ดังภาพที่ 3.61 แสดงว่าการใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์กำลังไฟฟ้ามักมีค่าเพิ่มมากขึ้น และส่งผลให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมเพิ่มขึ้นนั่นเอง



ภาพที่ 3.59 กำลังไฟฟ้าด้านเข้าของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม



ภาพที่ 3.60 กำลังไฟฟ้าที่ไหลคเมื่อใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้า 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์



ภาพที่ 3.61 กำลังไฟฟ้าที่ไหลลงเมื่อใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้าแบบ 2 ระดับ

3.7 สรุปการออกแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมและผลการจำลอง

จากการออกแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมและผลการจำลองนั้น สรุปได้ว่า อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมหรืออุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมหลัก ๆ ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนการแปลงพลังงานและส่วนการควบคุม ซึ่งส่วนการแปลงพลังงานจะมีวงจรเรกติไฟเออร์หรือวงจรเรียงกระแส ตัวเก็บประจุซีลิ่งค์ วงจรแปลงผัน วงจรสแน็บเบอร์ วงจรกรอง และวงจรขับสวิตช์ไอจีบีที เป็นต้น ส่วนการควบคุมก็จะประกอบด้วย การตรวจจับแรงดันตกชั่วคราว โดยจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนการตรวจจับแบบเร็วและส่วนการตรวจจับแบบแม่นยำ การสร้างแรงดันอ้างอิง และการสร้างแรงดันอ้างอิง เป็นต้น

ส่วนผลการจำลองนั้นจะทำการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK โดยการจำลองจะทำการจำลองการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์เปรียบเทียบกับการทำงานของการจำลองการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ ซึ่งผลที่ได้จะเห็นว่าวงจรแปลงผันทั้งสองสามารถชดเชยปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้เป็นอย่างดี และในช่วงเวลาเริ่มและสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราวรูปคลื่นจะมีการกระเพื่อมเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตามแรงดันชดเชยที่ได้จากการใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์นั้นจะมีสัญญาณความผิดเพี้ยนที่น้อยกว่าแรงดันชดเชยที่ได้จากการใช้วงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ เป็นผลให้แรงดันของระบบไฟฟ้าขณะที่ทำการชดเชยจะมีปริมาณฮาร์มอนิกสัณน้อยลง อีกทั้งยังสามารถทำให้อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมมีประสิทธิภาพดีขึ้นอีกด้วย

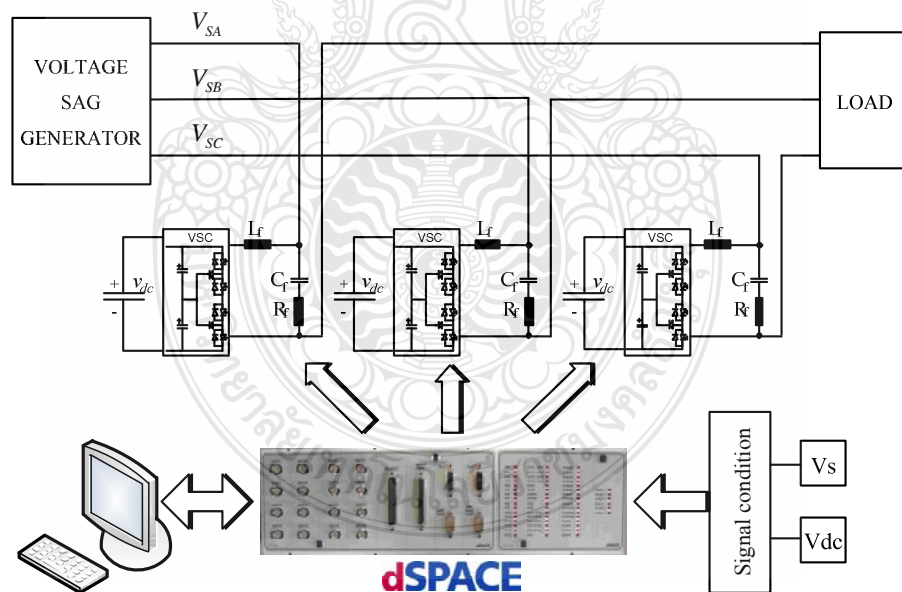
บทที่ 4

การทดสอบการทำงานและผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในบทนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างทางด้านฮาร์ดแวร์ทั้งระบบและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ถูกใช้ในการทดสอบการทำงานจริง รวมทั้งผลการทดสอบการทำงานของระบบ ซึ่งจะทำให้การทดสอบการชดเชยแรงดันตกชั่วคราว โดยการปรับค่าแรงดันให้มีค่าลดลงต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ นั่นก็คือค่าต่อหน่วยเท่ากับ 0.9 และทำการปรับแรงดันกลับสู่ค่าปกติเพื่อพิจารณาแรงดันในช่วงเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว ขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวและช่วงสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราว

4.1 โครงสร้างระบบ

โครงสร้างโดยรวมของฮาร์ดแวร์ของระบบแสดงได้ดังภาพที่ 4.1 ประกอบด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมต่ออนุกรมอยู่ระหว่างอุปกรณ์สร้างแรงดันตกชั่วคราว (Voltage Sag Generator) และโหลด ขนาดพิกัดไม่เกิน 10 กิโลวัตต์



ภาพที่ 4.1 โครงสร้างฮาร์ดแวร์ของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมที่ใช้ในการทดลอง

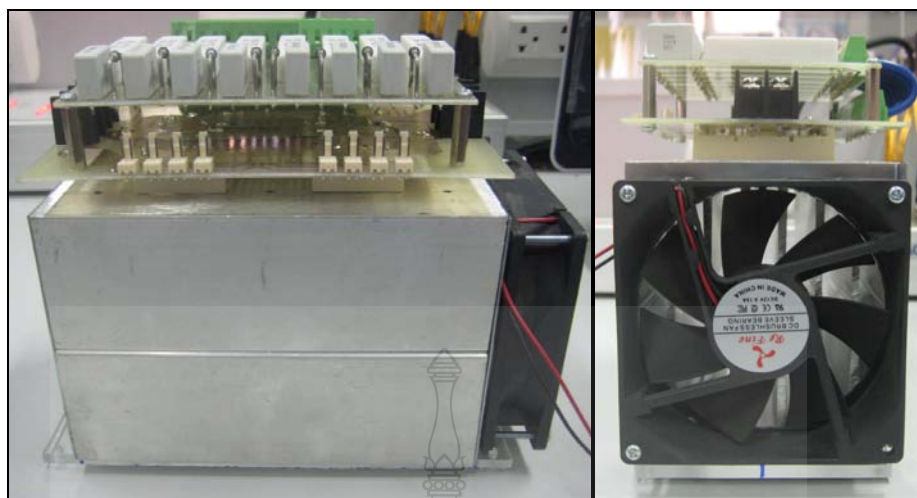
อุปกรณ์ชุดเซยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนของวงจรภาคกำลังและส่วนของวงจรภาคควบคุม ส่วนของวงจรภาคกำลังประกอบด้วยวงจรเรียงกระแสแบบเต็มบริดจ์ 1 เฟส จำนวน 3 ตัว ดังภาพที่ 4.2 โดยแต่ละตัวต่อเข้ากับตัวเก็บประจุที่ใช้เก็บพลังงานขนาด 66,000 ไมโครฟารัด 450 โวลต์ 2 ตัวต่ออนุกรมกัน ดังภาพที่ 4.3 และวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์แบบ 1 เฟส พร้อมด้วยวงจรสับเบอร์ ดังแสดงในภาพที่ 4.4 ก่อนจ่ายแรงดันเข้าสู่ระบบไฟฟ้าจะต้องต่อเข้ากับวงจรรองความถี่ต่ำผ่านก่อนโดยมีตัวเก็บประจุ (C_f) เท่ากับ 45 ไมโครฟารัด, ตัวเหนี่ยวนำ (L_f) เท่ากับ 8 มิลลิเฮนรี่ และตัวต้านทาน (R_f) เท่ากับ 2.2 โอห์ม 100 วัตต์



ภาพที่ 4.2 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มบริดจ์ 1 เฟส



ภาพที่ 4.3 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มบริดจ์ 1 เฟสต่อเข้ากับตัวเก็บประจุ



ภาพที่ 4.4 วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดเคลมปีแบบ 1 เฟส และวงจรสับเบอร์

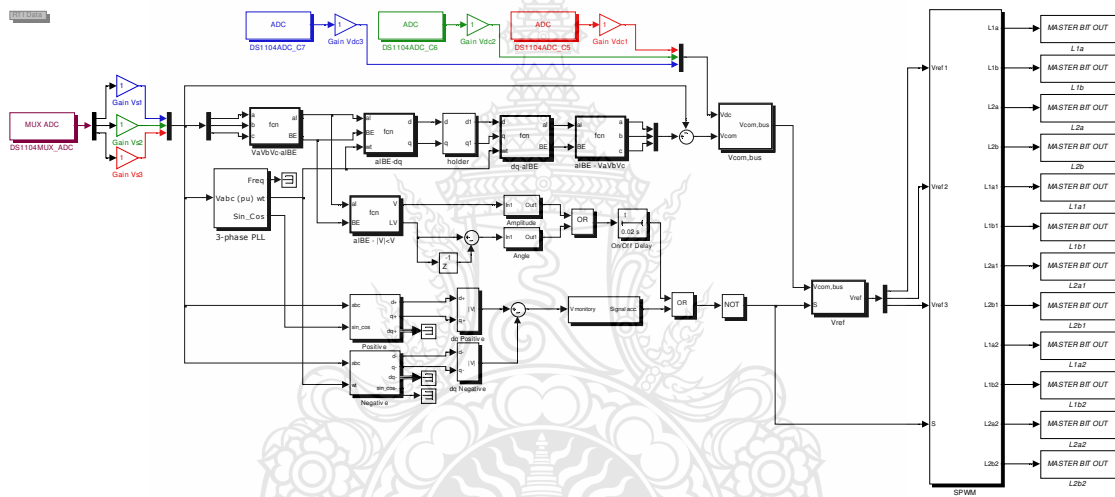


ภาพที่ 4.5 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

ภาคควบคุมของอุปกรณ์ชุดเซชแรงดันตกชั่วครู่แบบอนุกรมจะใช้บอร์ดตัวประมวลผลเชิงดิจิทัล dSPACE รุ่น DS1104 ดังภาพที่ 4.6 เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบซึ่งจะทำงานในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ดังแสดงในภาพที่ 4.7 และควบคุมการทำงานผ่าน โปรแกรม dSPACE ControlDesk ดังภาพที่ 4.8 โดยการตรวจจับแรงดันไฟฟ้าจากระบบมาทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐานการเกิดแรงดันตกชั่วครู่ โดยใช้เงื่อนไขในการเกิดแรงดันตกชั่วครู่คือขนาดแรงดันต้องมีค่าต่อหน่วยน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.9 และทำการสร้างสัญญาณขั้วนำสวิตซ์ที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์



ภาพที่ 4.6 การต่อใช้งาน dSPACE รุ่น DS1104

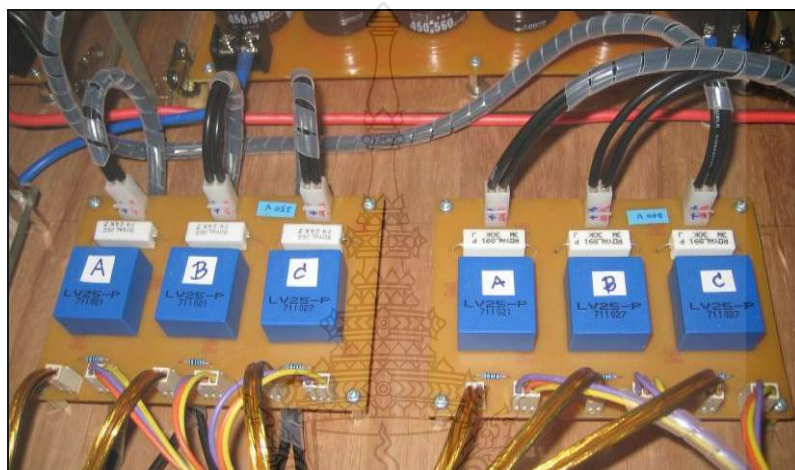


ภาพที่ 4.7 โมเดลของวงจรควบคุมในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK



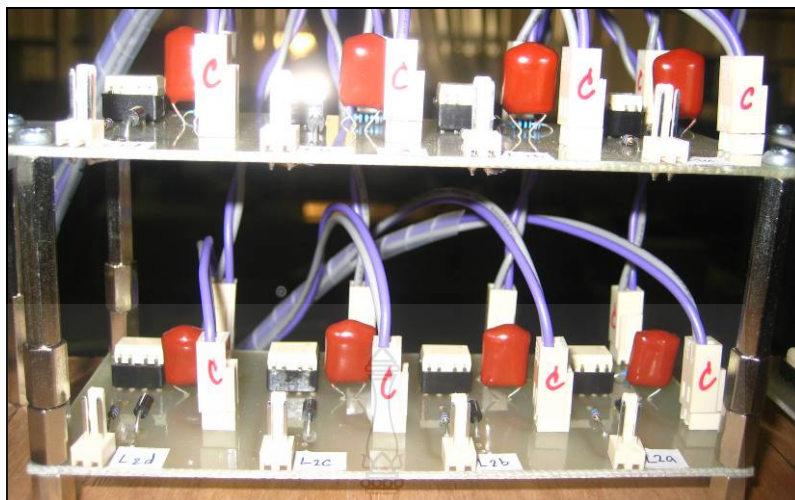
ภาพที่ 4.8 หน้าต่างการควบคุมการทำงานของ dSPACE ผ่านโปรแกรม dSPACE ControlDesk

การตรวจวัดสัญญาณต่าง ๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมประกอบด้วย การตรวจวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของระบบและสัญญาณแรงดันบัสไฟตรง โดยสัญญาณทั้งหมดจะส่งให้กับตัวแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลภายในตัวประมวลผลเชิงดิจิทัล dSPACE การตรวจวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของระบบและสัญญาณแรงดันบัสไฟตรงจะใช้ตัววัดสัญญาณแรงดัน LEM LV25-P เป็นตัววัดแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 4.9

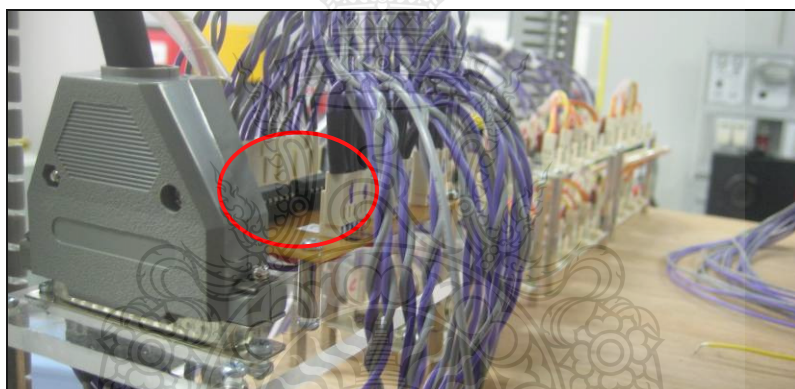


ภาพที่ 4.9 ตัววัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้า LEM LV25-P

เมื่อประมวลผลเสร็จแล้วสัญญาณที่ได้จาก dSPACE จะถูกส่งไปยังวงจรจับสวิตช์ไอจีบีที ดังภาพที่ 4.10 แต่เนื่องจาก dSPACE มีดิจิทัลเอาต์พุตแค่ 20 เอาต์พุตเท่านั้นซึ่งไม่เพียงพอต่อความต้องการของวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคสแคดแบบ 1 เฟสทั้ง 3 ตัวในอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมที่มีความต้องการสัญญาณทั้งหมด 24 สัญญาณ (เฟสละ 8 สัญญาณ) แต่ทว่าในวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคสแคดแบบ 1 เฟสนั้น จะมีรูปแบบสัญญาณที่ตรงข้ามกันอยู่เฟสละ 4 สัญญาณ ดังนั้นเราสามารถสร้างสัญญาณเพียงเฟสละ 4 สัญญาณเท่านั้น ส่วนอีก 4 สัญญาณที่เหลือเราจะทำการนำไปกลับเฟสโดยใช้ไอซีเบอร์ 74LS04P (NOT Gate) ดังแสดงในภาพที่ 4.11

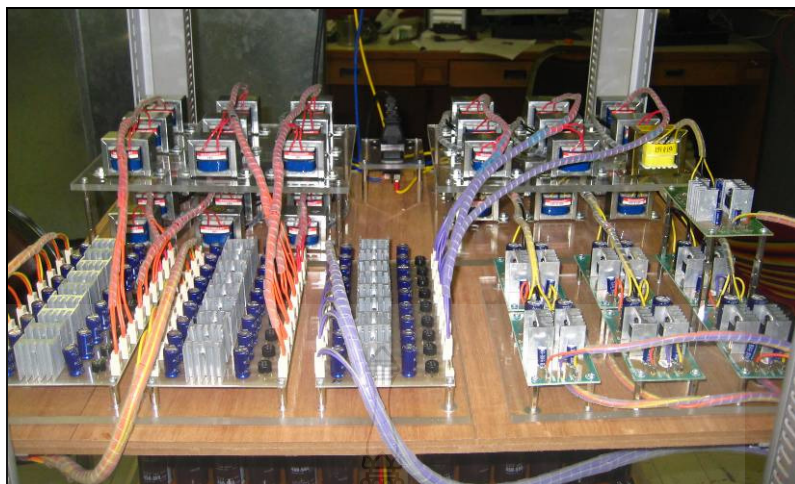


ภาพที่ 4.10 วงจรขับสวิตช์ไอจีบีทีโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250

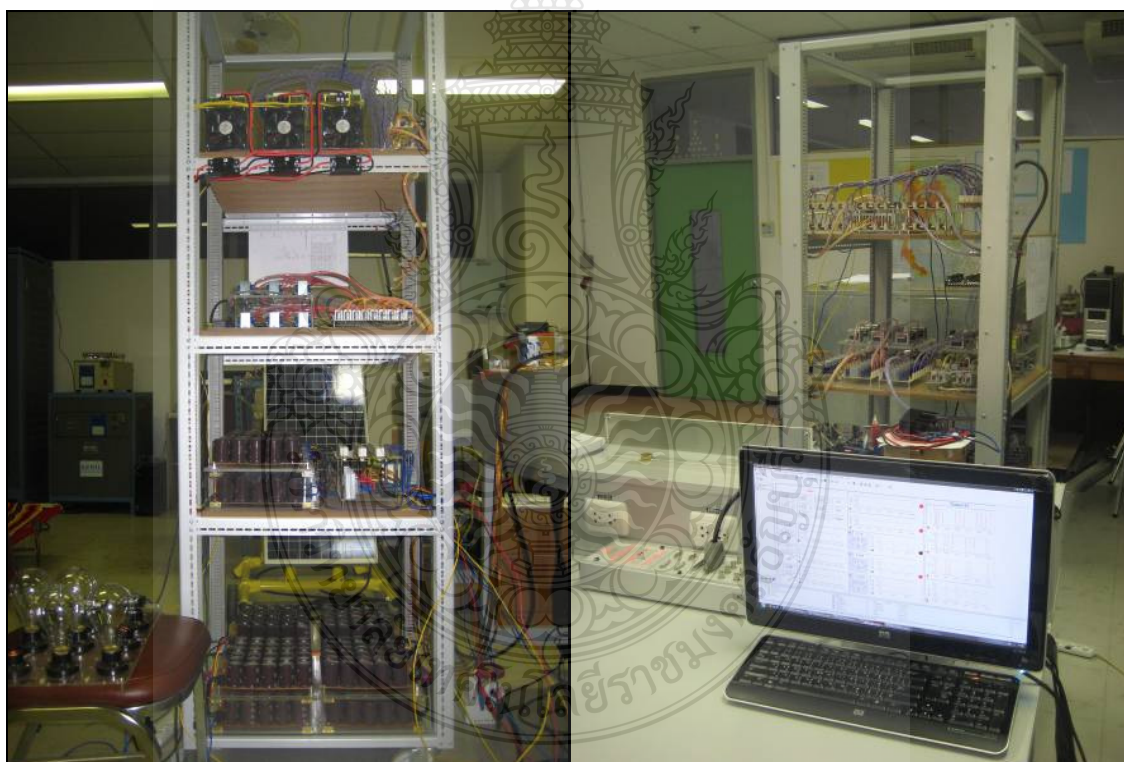


ภาพที่ 4.11 วงจรกลับสัญญาณโดยใช้ไอซีเบอร์ 74LS04P (NOT Gate)

นอกจากนั้นยังมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (+15, ± 15 และ +5 โวลต์) เพื่อเป็นไฟเลี้ยงให้กับอุปกรณ์ควบคุมต่าง ๆ เช่น วงจรขับสวิตช์ไอจีบีที ตัววัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้า และวงจรกลับสัญญาณ เป็นต้น ซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ดังแสดงในภาพที่ 4.12 ดังนั้น โครงสร้างของระบบโดยรวมของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมแสดงได้ดังภาพที่ 4.13



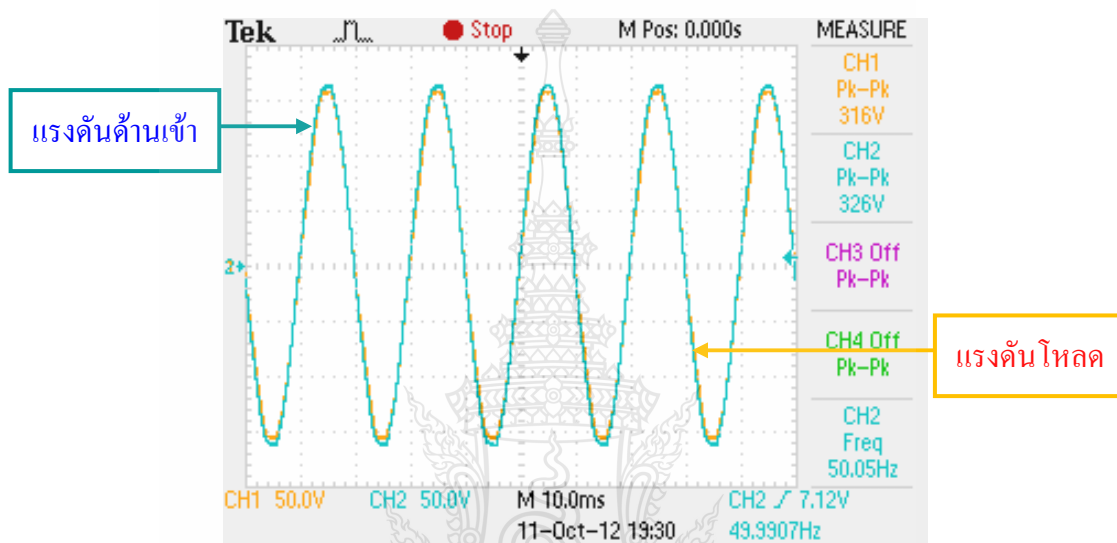
ภาพที่ 4.12 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (+15, ± 15 และ +5 โวลต์) สำหรับอุปกรณ์ควบคุมต่าง ๆ



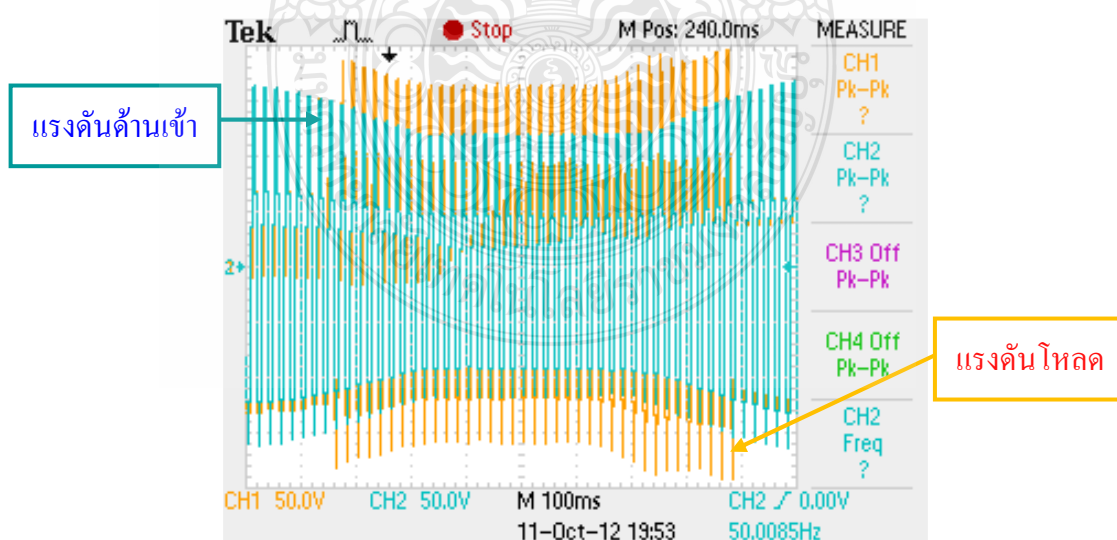
ภาพที่ 4.13 โครงสร้างของระบบโดยรวมของอุปกรณ์ชุดเซยแรงดันตกชั่วครู่แบบอนุกรม

4.2 ผลการทดสอบการทำงาน

ในการทดสอบจะทำการติดตั้งอุปกรณ์ชุดเซชแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมเข้าในระบบไฟฟ้า จากนั้นทำการจำลองให้มีแรงดันตกชั่วคราวเกิดขึ้น จากภาพที่ 4.14 เป็นแรงดันด้านเข้าและแรงดันที่โหลดก่อนที่จะเกิดแรงดันตกชั่วคราว โดยสีฟ้าเป็นแรงดันด้านเข้าและสีส้มเป็นแรงดันที่โหลด เมื่อมีแรงดันตกชั่วคราวเกิดขึ้นแรงดันด้านเข้าและแรงดันที่โหลดสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.15

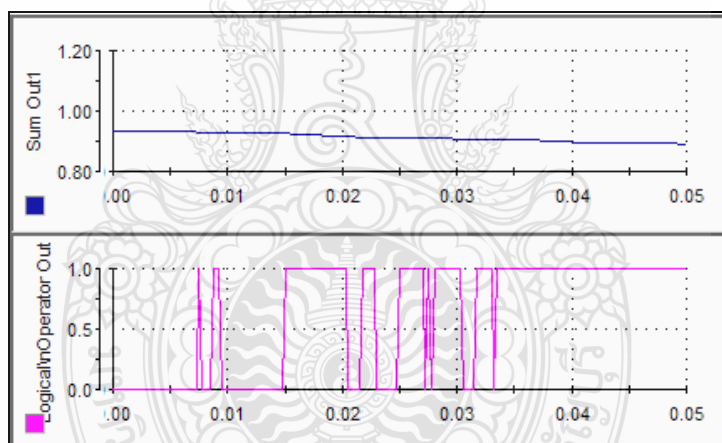


ภาพที่ 4.14 แรงดันด้านเข้าและแรงดันที่โหลดก่อนที่จะมีแรงดันตกชั่วคราวเกิดขึ้น

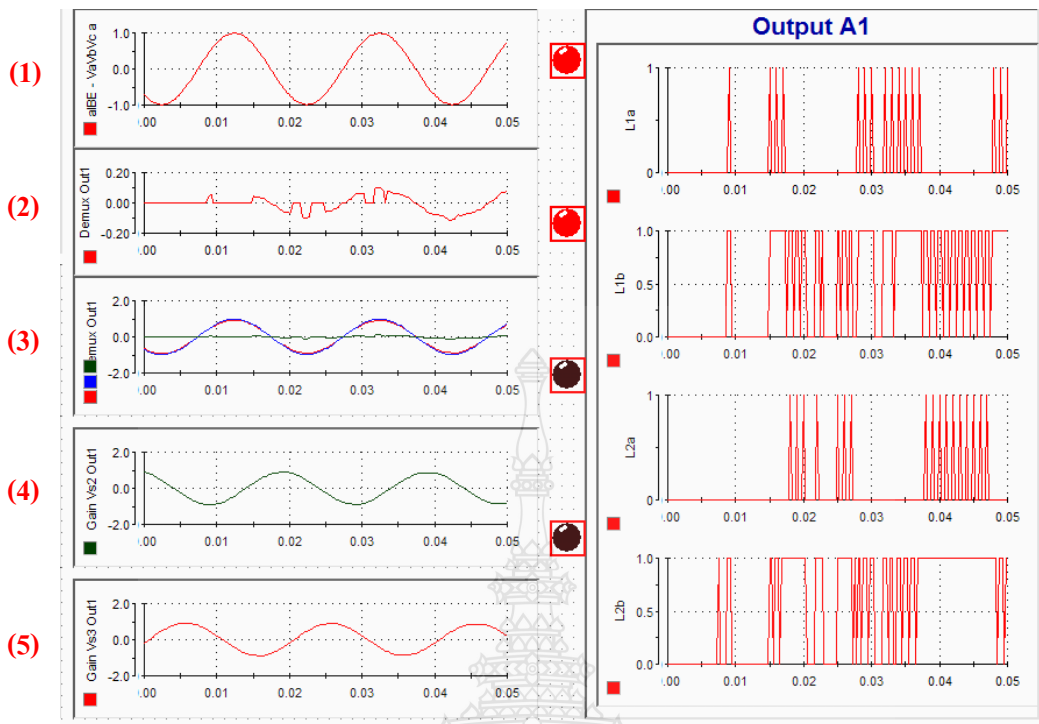


ภาพที่ 4.15 แรงดันด้านเข้าและแรงดันที่โหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราว

จากภาพที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันด้านเข้าลดลงต่ำกว่าค่าที่กำหนด (ค่าต่อหน่วย 0.9) อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมจะสร้างแรงดันชดเชยเพื่อรักษาระดับแรงดันให้เป็นปกติ (ค่าต่อหน่วย 1.0) แต่ในช่วงที่เริ่มเกิดและก่อนสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราว แรงดันที่ชดเชยจะมีการแกว่งเล็กน้อยก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะปกติ ซึ่งขนาดของแรงดันด้านเข้าและสัญญาณการตรวจจับแรงดันตกชั่วคราวสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าเมื่อขนาดของแรงดันเริ่มลดลงต่ำกว่าค่าที่กำหนด สัญญาณตรวจจับจะส่งสัญญาณไปสั่งให้วงจรแปลงผันทำการชดเชยแรงดันเข้าในระบบทันทีดังภาพที่ 4.17 โดยรูปคลื่นในซันด้านบน (1) เป็นรูปคลื่นสัญญาณแรงดันอ้างอิง รูปคลื่นถัดลงมา (2) เป็นสัญญาณแรงดันชดเชยเพื่อนำไปสั่งให้วงจรแปลงผันทำงาน รูปคลื่นที่ (3) เป็นสัญญาณแรงดันด้านเข้า (สีเขียว) รูปคลื่นสัญญาณแรงดันอ้างอิง (สีน้ำเงิน) และรูปคลื่นสัญญาณแรงดันชดเชย (สีเขียว) ของเฟส A และรูปคลื่นที่ (4) และ (5) เป็นสัญญาณแรงดันด้านเข้าของเฟส B และ C ตามลำดับ จากนั้นเมื่อมีสัญญาณว่ามีแรงดันตกชั่วคราวเกิดขึ้น dSPACE ก็ส่งสัญญาณไปให้วงจรแปลงผันทำงาน ดังแสดงในภาพที่ 4.17 สัญญาณ Output A1 ด้านขวามือนั่นเอง

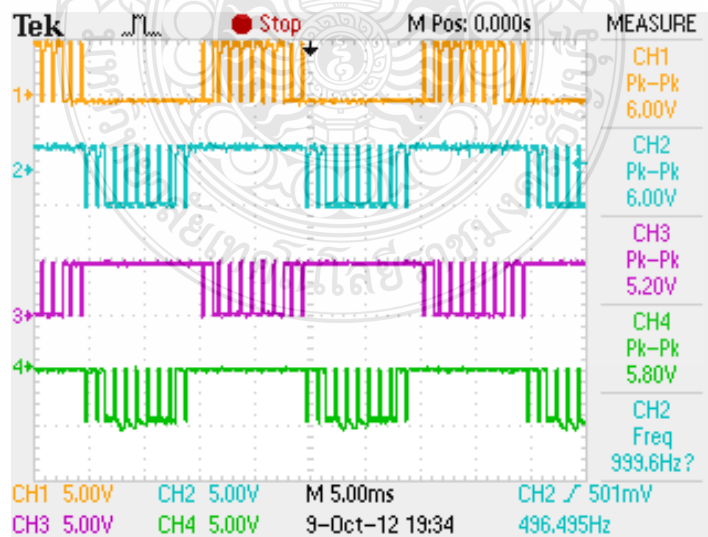


ภาพที่ 4.16 ขนาดของแรงดันด้านเข้าและสัญญาณการตรวจจับแรงดันตกชั่วคราวในช่วงเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว



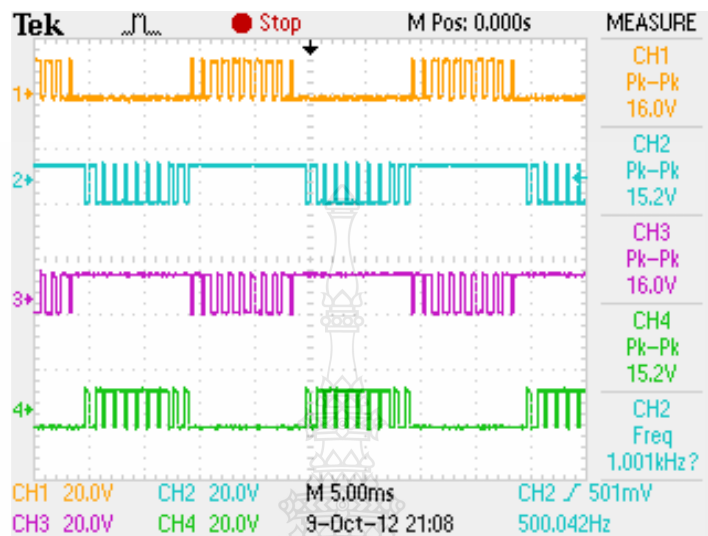
ภาพที่ 4.17 รูปคลื่นสัญญาณต่าง ๆ ในขณะเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว

เมื่อมีแรงดันตกชั่วคราวเกิดขึ้น dSPACE จะสร้างสัญญาณขึ้นมาเพื่อไปควบคุมอุปกรณ์ สวิตซ์ไอจีบีทีดังภาพที่ 4.18



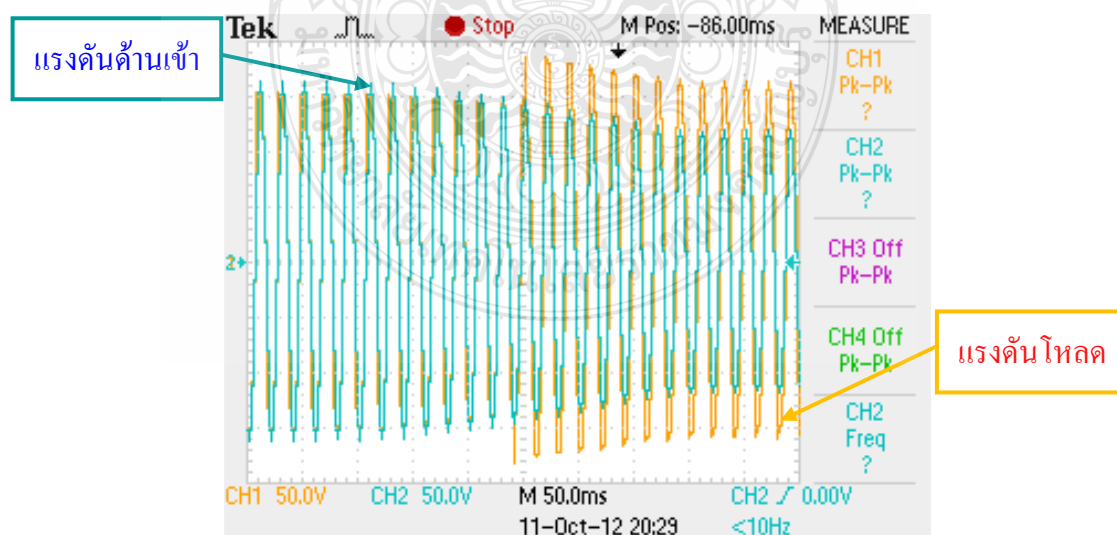
ภาพที่ 4.18 สัญญาณควบคุมอุปกรณ์สวิตซ์ไอจีบีทีที่ออกจากบอร์ด dSPACE

สัญญาณที่ออกจาก dSPACE จะยังไม่สามารถนำไปขับสวิตช์ไอจีบีทีได้โดยตรงซึ่งต้องผ่านวงจรขับสวิตช์ไอจีบีทีก่อน ซึ่งสัญญาณที่ออกจากวงจรขับสวิตช์ไอจีบีทีแสดงได้ดังภาพที่ 4.19

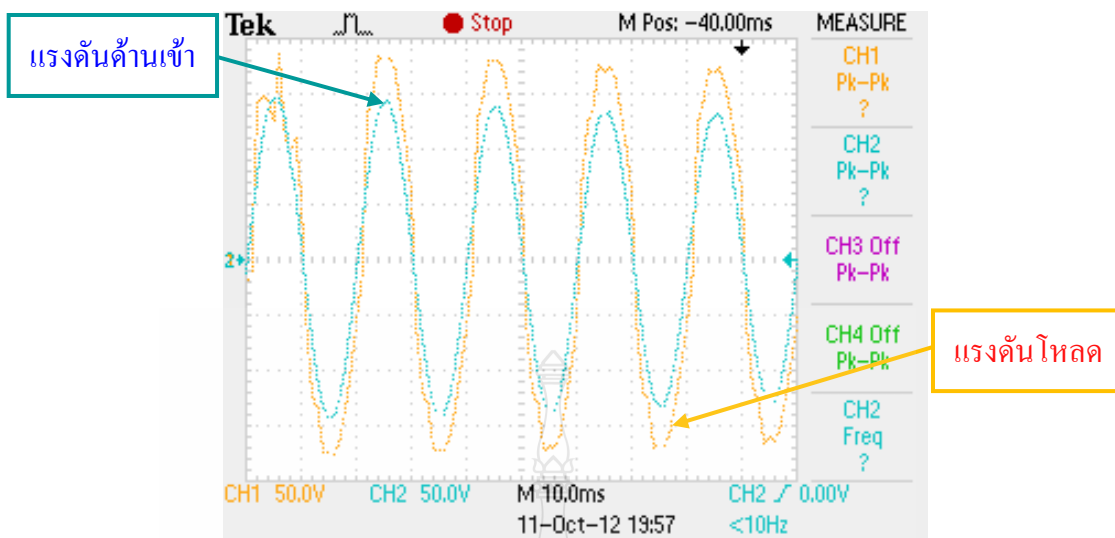


ภาพที่ 4.19 สัญญาณที่ออกจากวงจรขับสวิตช์ไอจีบีที

ดังนั้นในช่วงเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วครู่อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วครู่สามารถชดเชยแรงดันให้เป็นปกติ (ค่าต่อหน่วย 1.0) ได้ตามที่ต้องการแต่การชดเชยในช่วงแรกจะมีการกระเพื่อมของแรงดันเล็กน้อยแสดงได้ดังภาพที่ 4.20 และ 4.21

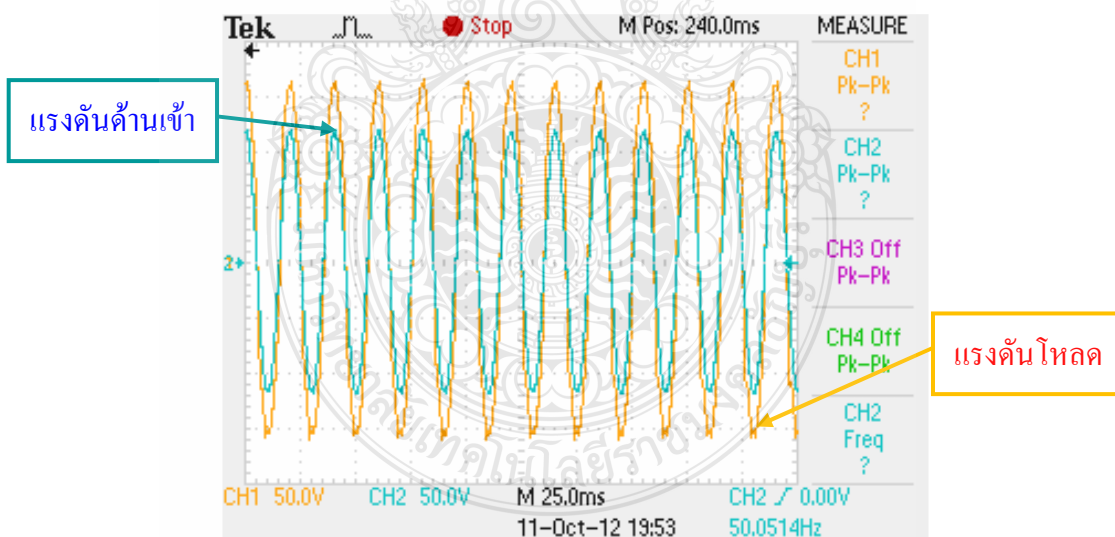


ภาพที่ 4.20 การชดเชยแรงดันตกชั่วครู่ในช่วงเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วครู่

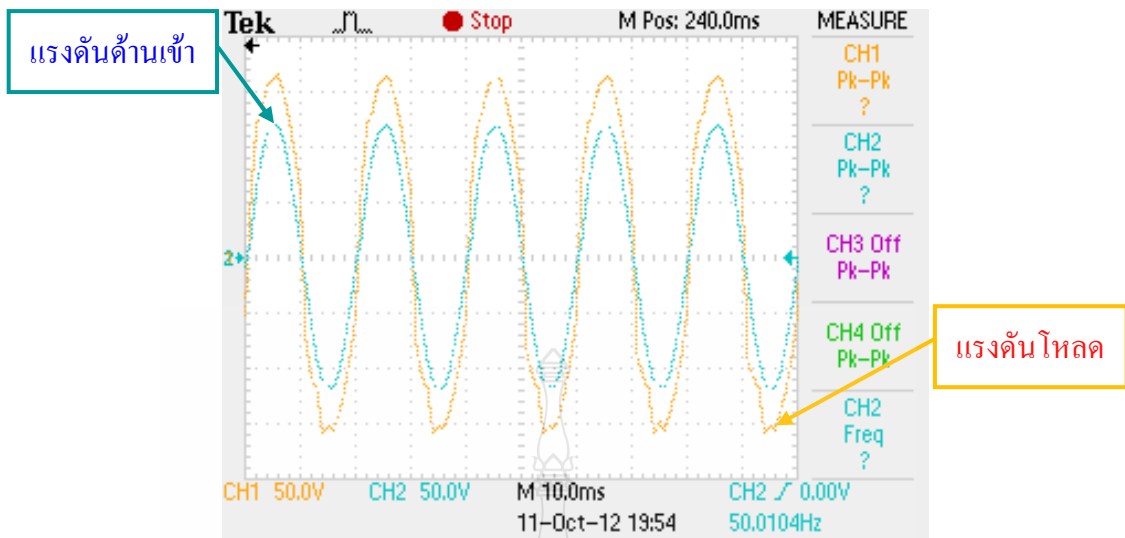


ภาพที่ 4.21 ภาพขยายการชดเชยแรงดันตกชั่วคราวในช่วงเริ่มเกิดแรงดันตกชั่วคราว

ในช่วงขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวนั้นอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวสามารถชดเชยแรงดันให้โหลดได้รับแรงดันปกติ (ค่าต่อหน่วย 1.0) ได้ตามที่ต้องการ ดังแสดงในภาพที่ 4.22 และ 4.23

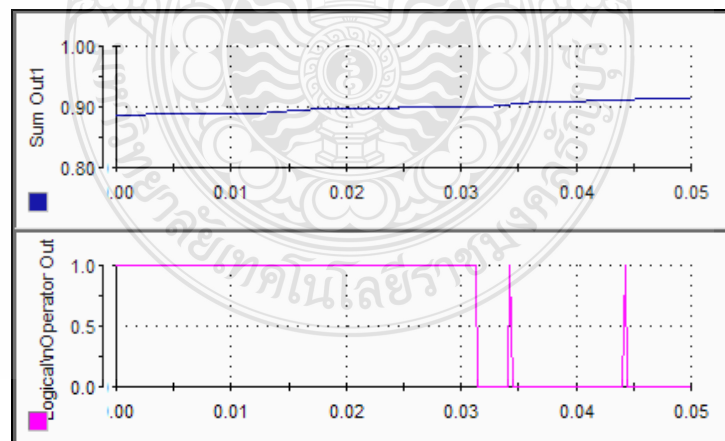


ภาพที่ 4.22 การชดเชยแรงดันตกชั่วคราวในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วคราว



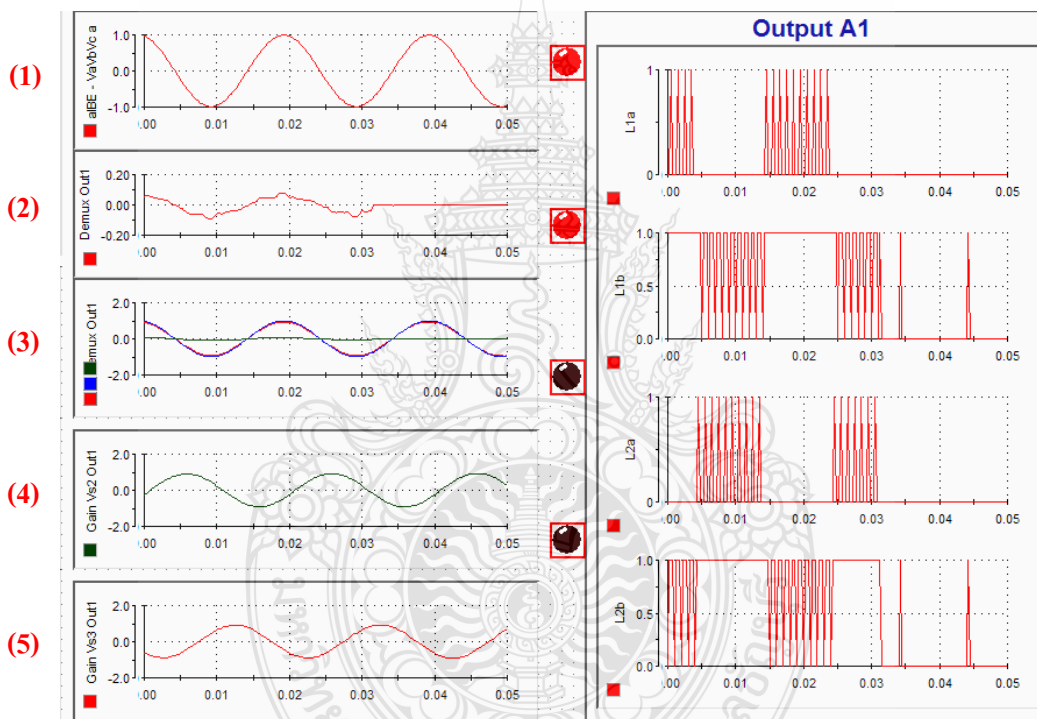
ภาพที่ 4.23 ภาพขยายการชดเชยแรงดันตกชั่วคราวในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วคราว

ในช่วงก่อนสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราว จะเห็นว่าแรงดันที่โหลดจะการกระเพื่อมเล็กน้อยก่อนที่จะเข้าสู่ภาวะปกติ ในภาพที่ 4.24 แสดงขนาดของแรงดันด้านเข้าและสัญญาณการตรวจจับแรงดันตกชั่วคราว จะเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันด้านเข้ามีค่ามากกว่าค่าต่อหน่วยเท่ากับ 0.9 สัญญาณตรวจจับแรงดันตกชั่วคราวก็จะหายไป นั่นก็คือแรงดันด้านเข้ามีค่าเป็นปกติและอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมก็หยุดทำการชดเชย



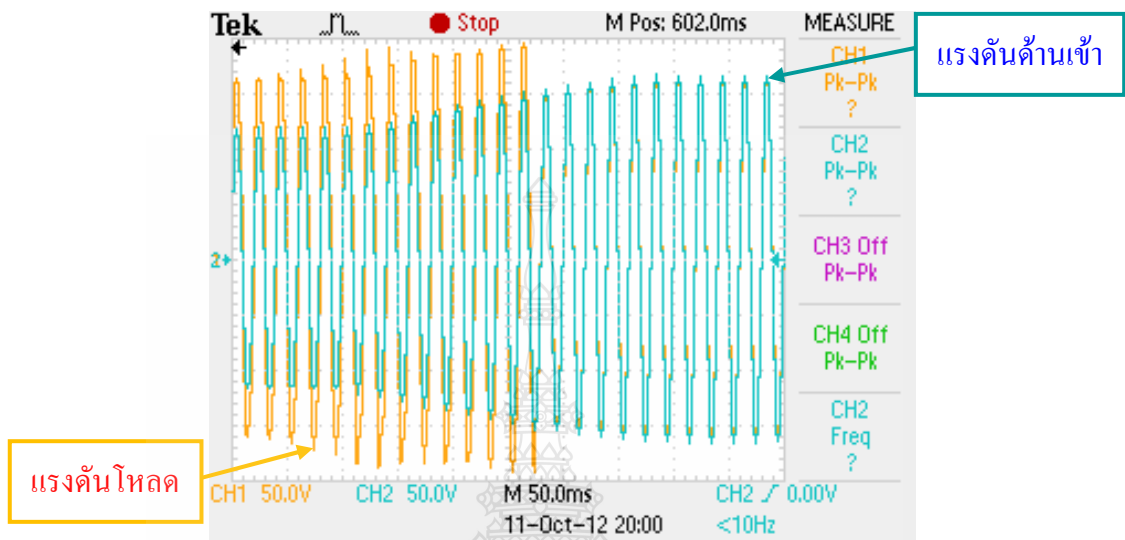
ภาพที่ 4.24 ขนาดของแรงดันด้านเข้าและสัญญาณการตรวจจับแรงดันตกชั่วคราวในช่วงก่อนสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราว

ในภาพที่ 4.25 เป็นรูปคลื่นสัญญาณต่าง ๆ ในช่วงก่อนสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราว โดยรูปคลื่นไซน์ด้านบน (1) เป็นรูปคลื่นสัญญาณแรงดันอ้างอิง รูปคลื่นถัดลงมา (2) เป็นสัญญาณแรงดันชดเชยเพื่อนำไปสั่งให้วงจรแปลงผันทำงาน รูปคลื่นที่ (3) เป็นสัญญาณแรงดันด้านเข้า (สีแดง) รูปคลื่นสัญญาณแรงดันอ้างอิง (สีน้ำเงิน) และรูปคลื่นสัญญาณแรงดันชดเชย (สีเขียว) ของเฟส A และรูปคลื่นที่ (4) และ (5) เป็นสัญญาณแรงดันด้านเข้าของเฟส B และ C ตามลำดับ จากนั้นเมื่อมีสัญญาณว่าสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราว dSPACE ก็จะหยุดส่งสัญญาณไปยังวงจรแปลงผัน แต่จะส่งสัญญาณให้วงจรแปลงผันเป็นทางผ่านของกระแสแทน ดังแสดงในภาพที่ 4.25 ซึ่งก็คือสัญญาณ Output A1 ด้านขวามือนั่นเอง

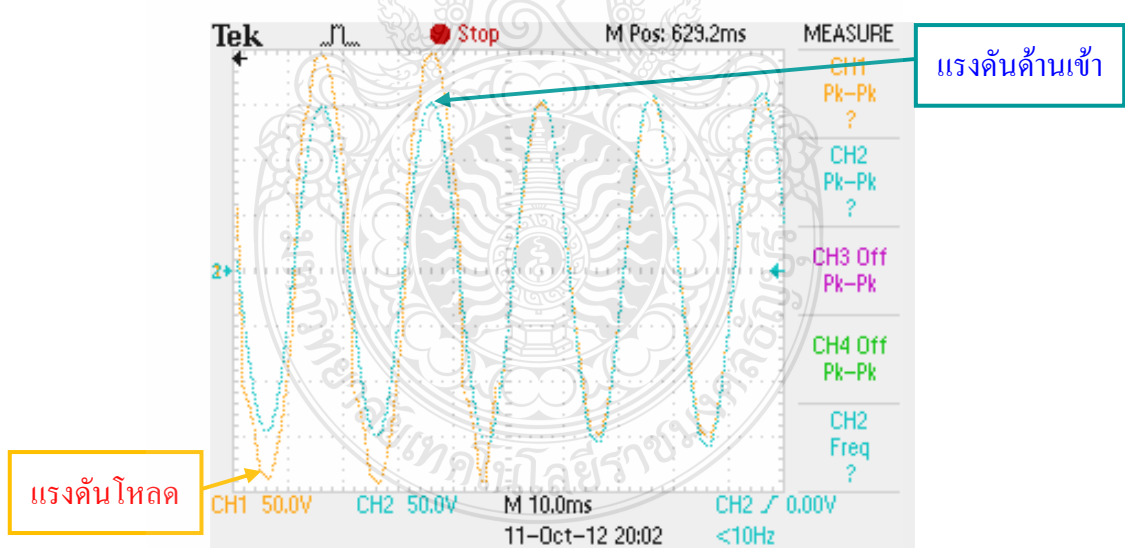


ภาพที่ 4.25 รูปคลื่นสัญญาณต่าง ๆ ในช่วงก่อนสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราว

ในช่วงก่อนสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราว แรงดันที่โหลดจะมีการกระเพื่อมเล็กน้อยก่อนเข้าสู่สภาวะปกติ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.26 และ 4.27

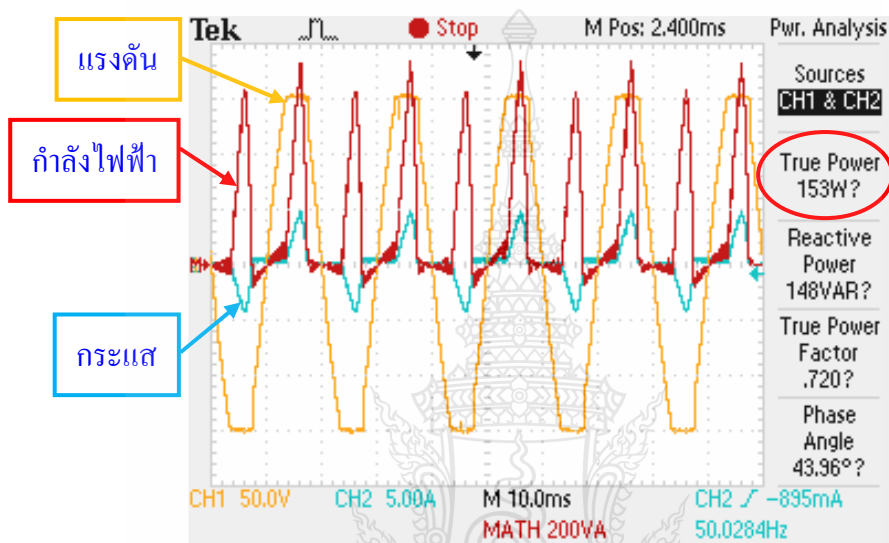


ภาพที่ 4.26 การชดเชยแรงดันตกชั่วคราวในช่วงก่อนสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราว

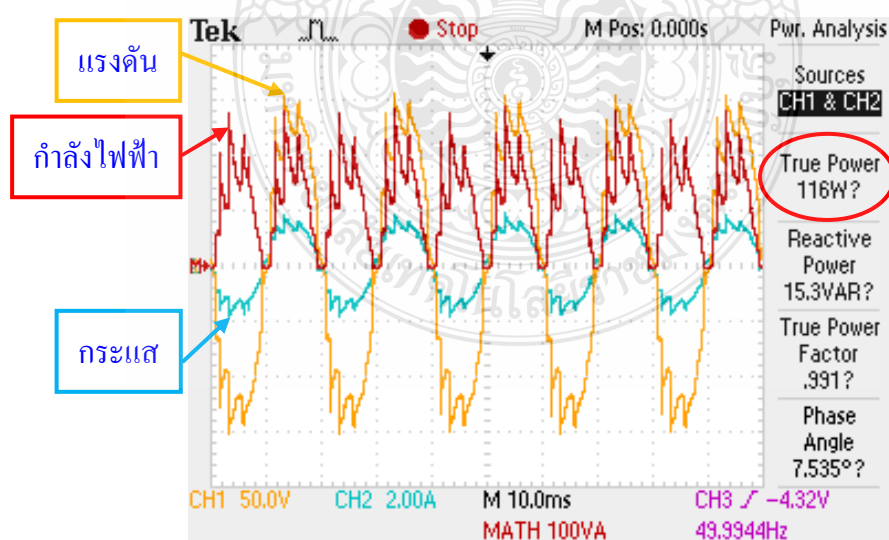


ภาพที่ 4.27 ภาพขยายการชดเชยแรงดันตกชั่วคราวในช่วงก่อนสิ้นสุดการเกิดแรงดันตกชั่วคราว

สำหรับกำลังไฟฟ้าด้านเข้าและกำลังไฟฟ้าด้านออกของวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดเคลมบีแบบ 1 เฟสสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ โดยกำลังไฟฟ้าด้านเข้ามีค่าเท่ากับ 153 วัตต์ และกำลังไฟฟ้าด้านออกมีค่าเท่ากับ 116 วัตต์ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 75.82 ของกำลังไฟฟ้าด้านเข้า ดังนั้นแสดงว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ตัววงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดเคลมบีแบบ 1 เฟสมีค่าเท่ากับ 37 วัตต์ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 24.18 ของกำลังไฟฟ้าด้านเข้า



ภาพที่ 4.28 กำลังไฟฟ้าด้านเข้าของวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดเคลมบีแบบ 1 เฟส



ภาพที่ 4.29 กำลังไฟฟ้าด้านออกของวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดเคลมบีแบบ 1 เฟส

จากสมการที่ 2.9 สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ในขณะที่ทำงานที่ความถี่ f ได้ดังนี้

$$P_{AV} = \psi I_{on} V_{on} + f (W_{on} + W_{off})$$

จากสมการที่ 2.9 สามารถสรุปได้ว่า กำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะนำกระแสจะมีค่าใกล้เคียงศูนย์ เนื่องจากค่าความต้านทานที่ตัวอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังขณะนำกระแสมีค่าต่ำมาก ดังนั้น กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นจะเกิดเฉพาะในช่วงเริ่มนำและเริ่มหยุดนำกระแส โดยในช่วงเริ่มนำกระแสแรงดันจะค่อย ๆ ลดลงและกระแสจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น ส่วนในช่วงเริ่มหยุดนำกระแสแรงดันจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นและกระแสจะค่อย ๆ ลดลง ในช่วงนี้เองที่ทำให้เกิดกำลังสูญเสียที่ตัวอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังขึ้น ซึ่งในวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์แบบ 1 เฟสที่นำเสนอมีค่าน้อยกว่าวงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับ เนื่องจากอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละตัวมีระดับแรงดันที่น้อยลง เพราะเป็นการนำอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมาต่อกันแบบอนุกรม นอกจากนี้ยังใช้ความถี่ในการสวิตซ์ที่ต่ำลง จึงทำให้กำลังสูญเสียที่ตัวอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังมีค่าลดลง นอกจากนั้นกำลังสูญเสียที่เกิดขึ้นอาจมาจากวงจรกรองความถี่ได้อีกด้วย

4.3 สรุปการทดสอบการทำงาน

จากการทดสอบการทำงาน จะได้ว่าตัวต้นแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วครู่แบบอนุกรมสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วครู่ได้ มีความถูกต้องและแม่นยำในการชดเชย รวมทั้งมีความไวในการตรวจจับการเกิดแรงดันตกชั่วครู่ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากใช้บอร์ด dSPACE รุ่น DS1104 ซึ่งมีความถี่ในการประมวลผลที่รวดเร็ว แรงดันที่เข้าสู่ระบบก็มีปริมาณฮาร์มอนิกที่น้อย อีกทั้งยังได้ใส่วงจรกรองที่ช่วยกรองความถี่ที่ไม่ต้องการออกไป ทำให้แรงดันที่เข้าสู่ระบบแทบจะไม่มีฮาร์มอนิกอยู่เลย ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นว่าตัวต้นแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วครู่แบบอนุกรมสามารถแก้ไขปัญหาแรงดันตกชั่วครู่ได้เป็นอย่างดี และกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ตัววงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์แบบ 1 เฟสมีค่าน้อยอีกด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้การสร้างแรงดันชดเชยด้วยวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ เพื่อลดสัญญาณความผิดเพี้ยนที่ออกจากอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม ซึ่งทำการจำลองระบบการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์และออกแบบระบบ และอาศัยข้อมูลของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้จากการจำลองระบบมาสร้างเป็นตัวต้นแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม

การจำลองในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK จะทำการเปรียบเทียบระหว่างการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม โดยใช้การสร้างแรงดันชดเชยด้วยวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์กับวงจรแปลงผัน 2 ระดับ ส่วนการทดสอบการทำงานของตัวต้นแบบของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม นั้นจะใช้การสร้างแรงดันชดเชยด้วยวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์และทำการวิเคราะห์การทำงานในส่วนต่าง ๆ ของตัวต้นแบบนี้ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การจำลองการทำงานในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

ในการจำลองการทำงานนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การจำลองโดยใช้วงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์กับวงจรแปลงผัน 2 ระดับ โดยการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมจะเริ่มจากการตรวจวัดแรงดันแรงดัน 3 เฟส (abc) จากระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่ออยู่ จากนั้นจะทำการแปลงแรงดันสเปซเวกเตอร์บนระนาบ $\alpha - \beta$ และบนระนาบ $d - q$ เพื่อใช้ในการประมวลผล เมื่อมีแรงดันตกชั่วคราวเกิดขึ้นอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมจะสร้างสัญญาณเพื่อไปขับนำสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ในวงจรแปลงผัน และฉีดแรงดันชดเชยเข้าสู่ระบบไฟฟ้า จากการจำลองการทำงานจะเห็นว่าชดเชยแรงดันตกชั่วคราวด้วยวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์และวงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับสามารถชดเชยแรงดันได้เช่นเดียวกัน ซึ่งสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้เป็นอย่างดี แรงดันที่ไหลขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวมีค่าใกล้เคียงกับแรงดันที่ไหลขณะปกติ (ค่าต่อหน่วย 1.0) แต่ในวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากการชดเชย

จะมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยกว่าวงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับมาก ซึ่งส่งผลให้ฮาร์มอนิกส์ที่เข้าสู่ระบบไฟฟ้ามีค่าน้อยตามไปด้วย

5.1.2 การทดสอบการทำงานของตัวต้นแบบของ DVR

การทดสอบตัวต้นแบบของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม นั้นจะใช้บอร์ด dSPACE รุ่น DS1104 เป็นตัวควบคุมการทำงาน โดยจะทำการวัดสัญญาณที่แรงดันของระบบและแรงดันที่บัสไฟตรงเพื่อใช้เป็นอินพุตให้กับส่วนควบคุมการทำงาน เมื่อมีแรงดันตกชั่วคราวเกิดขึ้นส่วนควบคุมจะทำการตรวจจับแรงดันตกชั่วคราวนั้นและทำการมอดูเลตแบบปรับความกว้างของพัลส์ขึ้นมาเพื่อที่จะนำไปควบคุมวงจรแปลงผันให้สามารถฉีดแรงดันชดเชยตามค่าแรงดันที่ลดลงไป โดยผ่านวงจรกรองก่อนเข้าสู่ระบบเพื่อให้รูปคลื่นแรงดันเรียบมากยิ่งขึ้น จากการทดสอบจะได้ว่า ตัวต้นแบบของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องแม่นยำและรวดเร็วทันต่อการเกิดขึ้นของแรงดันตกชั่วคราว อีกทั้งยังสามารถสร้างแรงดันชดเชยที่มีปริมาณของฮาร์มอนิกส์ที่น้อยอีกด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในส่วนของการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK นั้นควรจะใช้เวอร์ชันเดียวตลอด เพราะบางโมเดลจะไม่สามารถรันได้หากเกิดการรันคนละเวอร์ชันกับที่เขียน

5.2.2 ในส่วนของฮาร์ดแวร์ควรวางแผนและพิจารณาให้รอบคอบก่อนที่จะทำการทดสอบไม่เช่นนั้นแล้วอาจเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ที่ทำการทดสอบได้

5.2.3 ในวงจรขับสวิตซ์ไอจีบีทีควรออกแบบให้มีระบบป้องกันที่รัดกุม เนื่องจากวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดเคลมป็นั้นมีจำนวนอุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์มากกว่าวงจรแปลงผันแบบ 2 ระดับเป็นจำนวน 2 เท่า ซึ่งอาจทำให้อุปกรณ์สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ทำงานในช่วงเวลาที่ไม่เหมาะสมอาจส่งผลให้วงจรขับสวิตซ์ไอจีบีทีได้รับความเสียหายได้ง่าย

5.2.4 การออกแบบฮาร์ดแวร์ของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมควรมีการพัฒนาให้มีขนาดเล็กลงเพื่อความสะดวกและกะทัดรัดในการนำไปใช้งานจริง

5.2.5 ชุดเก็บพลังงานสามารถออกแบบโดยใช้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์หรือสามารถนำแบตเตอรี่มาใช้แทนตัวเก็บประจุได้เช่นเดียวกัน

รายการอ้างอิง

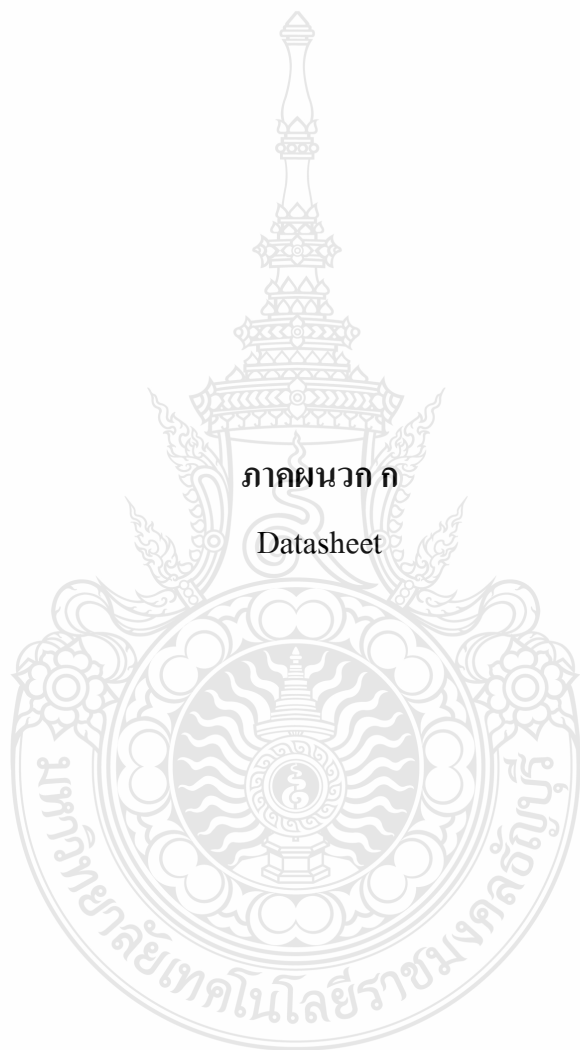
- [1] **IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**. IEEE Standards on Power Quality, pp.12, June 14, 1995.
- [2] นิรุต มีจิตต์, อมร เจริญศรี. การออกแบบและสร้างอินเวอร์เตอร์สามระดับแบบไดโอดแคลมป์ขนาด 1 กิโลวัตต์. วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2553.
- [3] วนิตา ภู่อสร. แบบจำลองเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบโซลิตสเตรทสำหรับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2553.
- [4] M.R.Banaei, A. Nahavandi, S. H. Hosseini. "Investigation of Multi-Functional DVR to Improve Power Quality Characteristic". **ECTICON 6th**, Pattaya Chonburi, 2009, pp. 144–149.
- [5] กิตติวัฒน์ เชื้อขนิณ. การลดความยุ่งยากของอัลกอริทึมการควบคุมสำหรับตัวชดเชยแรงดันตกชั่วขณะจากมุมมองเชิงปฏิบัติ. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [6] Eng Kian Kenneth Sng, S. S. Choi, D. Mahinda Vilathgamuwa. "Analysis of Series Compensation and DC-Link Voltage Controls of a Transformerless Self-Charging Dynamic Voltage Restorer". **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2004, pp. 1511–1518
- [7] Vilathgamuwa D.M., Wijekoon H.M., Choi S.S. "Interline Dynamic Voltage Restorer: A Novel and Economical Approach for Multi-Line Power Quality Compensation". **Industry Applications Conference 38th**, 2003, pp. 833-840.
- [8] Liu, J. W., Choi, S. S. and Chen, S. "Design of step dynamic voltage regulator for power quality enhancement". **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2003, pp. 1403 – 1409.
- [9] มัจฉิ โต๊ะตาหยง. การปรับปรุงค่าความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิกรวมของวงจรมัลติเซลล์อินเวอร์เตอร์โดยวิธีการปรับระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของแหล่งจ่าย. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2551.

- [10] Olorunfemi Ojo and Srikanth Konduru. “A Discontinuous Carrier-Based PWM Modulation Method for the Control of Neutral Point Voltage of Three-Phase Three-Level Diode Clamped Converters”. **Power Electronics Specialists Conference**, 2005, pp. 1652-1658.
- [11] Bhabani Shankar Pattnaik, Debendra Kumar Dash and Joydeep Mukherjee. **Implementation of PWM based Firing Scheme for multilevel Inverter using microcontroller**. Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, 2008-2009.
- [12] **Description of the environment-Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems**, IEC 1000-2-1-1990-Part 2: Environment-Section 1.
- [13] Union of the electricity industry. **Application guide to the European Standard EN 50160 on “Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems”**. July 1995.
- [14] Information Technology Industry Council (ITI). **ITI (CBEMA) CURVE APPLICATION NOTE (online)**. 2000. available: <http://www.itic.org/technical/iticurv.pdf>. (10 May 2010).
- [15] พิเชษฐ์ ทานิล. การตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะชนิดสามเฟสโดยใช้วิธีซอฟต์แวร์เฟสล็อกกลูป. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2550.
- [16] R.S. Thallam and G.T. Heydt. “Power acceptability and voltage sag indices in the three phase sense”. **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**, 2000, pp. 905–910.
- [17] ไชยชาญ หินเกิด. “เครื่องกลไฟฟ้า 1”. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. 2544.
- [18] Power-One Technical Information. “**Principles of SMPS**”. 2000.
- [19] สติชัยพร เกตุสกุล. การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างเทคนิคพีดับบลิวเอ็มแบบหลายพาหะชนิดเลื่อนเฟสและเลื่อนระดับสำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดฟลายอิงคาปาซิเตอร์. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.
- [20] ศิวะพัทธ์ คุ่มมะณี. การพัฒนาอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณเกิดด้วย FPGA สำหรับอินเวอร์เตอร์หลายระดับแบบฟลายอิงคาปาซิเตอร์. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550.

- [21] Boonchiam, P. and Mithulananthan, Nadarajah. Five level diode-clamped voltage source converter for custom power device applications. **GMSARN International Journal; Proceedings of the 1st GMSARN International Conference**, December 6-7, 2006, AIT, Thailand, 2007, pp. 21-28.
- [22] Jianlin LI, Ying ZHU, Hongyan XU, Honghua XU. "CPS-SPWM Flying Capacitor Three-Level Back-To-Back Converter Applicative Direct-Drive Wind Power Generator System". **Sustainable Power Generation and Supply**, 2009, pp. 1-6.
- [23] Vitezslav Benda. "Power semiconductors - state of the art and future trends". **Global Journal of Technology & Optimization V.2**, 2011, pp.29-36.
- [24] จีระพงศ์ ศรีวิชัย. "การใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK จำลองวงจรอินเวอร์เตอร์แบบจ่ายแรงดัน". วารสารปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า ปีที่ 2 ฉบับที่ 1, 2553
- [25] สันต์ ศรีธรรม์ธารง. วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบขนานที่ใช้การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกส์ด้วยรีเออร์ซีฟดีเอฟที. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- [26] รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน, ดร. วุฒิพล ชาราธิรเศรษฐ์. "อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (POWER ELECTRONICS)". คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547
- [27] ณัฐวุฒิ พลชะดิน, วิริยะ พิเชฐจำเริญ. การวิเคราะห์วงจรเอชซีชอปเปอร์โดยมีวงจรสับเบอร์ทำงานในระหว่างการเปลี่ยนโหมด. **ประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 46**, 2551, หน้า 233-240.

ภาคผนวก





ก.1 Datasheet dSPACE DS1104

Data Sheets

DS1104 Data Sheet

The following table shows the data sheet of the DS1104 R&D Controller Board.

Parameter	Characteristics
Processor	<ul style="list-style-type: none"> MPC8240 processor with PPC603e core and on-chip peripherals 64-bit floating-point processor 250 MHz CPU 2 x 16 KB cache; on-chip On-chip PCI bridge (33 MHz)
Memory	<ul style="list-style-type: none"> Global memory: 32 MB SDRAM Flash memory: 8 MB
Timer	<ul style="list-style-type: none"> 1 sample rate timer (decrementer): 32-bit down counter, reload by software, 40 ns resolution 4 general purpose timer: 32-bit down counter, reload by hardware, 80 ns resolution 1 time base counter: 64-bit up counter, 40 ns resolution, range 23400 years
Interrupt controller	<ul style="list-style-type: none"> 5 timer interrupts 2 incremental encoder index line interrupts 1 UART interrupt 1 slave DSP interrupt 1 slave DSP PWM interrupt 5 ADC end of conversion interrupts 1 host interrupt 4 user interrupts from the I/O connector
ADC 1 x 16-bit ADC with mux	<ul style="list-style-type: none"> 4 muxed channels equipped with one 16-bit sample & hold ADC Note: 5 ADC channels (1 x 16-bit + 4 x 12-bit) can be sampled simultaneous 16-bit resolution ± 10 V input voltage range 2 μs conversion time ± 5 mV offset error ± 0.25 % gain error 4 ppm/K offset drift 25 ppm/K gain drift >80 dB signal-to-noise ratio (SNR)

Parameter	Characteristics
ADC 4 x 12-bit ADC	<ul style="list-style-type: none"> • 4 channels each equipped with one 12-bit sample & hold ADC • Note: 5 ADC channels (1 x 16-bit + 4 x 12-bit) can be sampled simultaneous • 12-bit resolution • ± 10 V input voltage range • 800 ns conversion time • ± 5 mV offset error • ± 0.5 % gain error • 4 ppm/K offset drift • 25 ppm/K gain drift • >65 dB signal-to-noise ratio (SNR)
DACs 8 x 16-bit DAC	<ul style="list-style-type: none"> • 16-bit resolution • ± 10 V output voltage range • ± 5 mA maximum output current • Max. 10 μs settling time (full scale, accuracy 1/2 LSB) • ± 1 mV offset error • ± 0.1 % gain error • 13 ppm/K offset drift • 25 ppm/K gain drift • >80 dB signal-to-noise ratio (SNR)
Digital I/O	<ul style="list-style-type: none"> • 20-bit parallel I/O • Single bit selectable for input or output • ± 5 mA maximum output current • TTL output/input levels
Digital Incremental Encoder Interface (2 x 24 bit)	<ul style="list-style-type: none"> • 2 channels • Selectable single-ended (TTL) or differential (RS422) input • Fourfold line subdivision • Max. 1.65 MHz input frequency, i.e. fourfold pulse counts up to 6.6 MHz • 24-bit loadable position counter • Reset on index • 5 V/0.5 A sensor supply voltage
Serial interface	<ul style="list-style-type: none"> • 1 serial UART (universal asynchronous receiver and transmitter) • Selectable transceiver mode: RS232/RS422/RS485 • Max. baudrate RS232: 115.2 kBaud • Max. baudrate RS422/RS485: 1 MBaud

Data Sheets

Parameter	Characteristics
Slave DSP subsystem	<ul style="list-style-type: none"> • Texas Instruments TMS320F240 DSP • 16-bit fixed-point processor • 20 MHz clock frequency • 64 K x 16 external program memory • 28 K x 16 external data memory • 4 K x 16 dual-port memory for communication • 16 K x 16 flash memory • 1 x 3-phase PWM output • 4 x 1-phase PWM output • 4 capture inputs • SPI (serial peripheral interface) • Max. 14-bit digital I/O • TTL output/input levels for all digital I/O pins • ± 13 mA maximum output current
Host interface	<ul style="list-style-type: none"> • 32-bit PCI host interface • 5 V PCI slot • 33 MHz ± 5 %
Physical size	PCI 185 x 106.68 mm (7.28 x 4.2 in)
Ambient temperature	0 ... 55 °C (32 ... 131 °F)
Cooling	Active cooling by fan
Power supply	<ul style="list-style-type: none"> • +5 V ± 5 %, 2.5 A • +12 V ± 5 %, 0.3 A • -12 V ± 5 %, 0.2 A
Power consumption	18.5 W

CP1104 Data Sheet

The following table shows the data sheet of the CP1104 Connector Panel.

Parameter	Characteristics
Grounding	The enclosure and the front panel are not grounded.
Cable length	2 m (6.6 ft) standard
Physical size (with desktop enclosure) (length x depth x height)	281 x 142.5 x 70 mm (11.06 x 5.61 x 2.75 in)
Space needed for 19" rack mount	Height 3 U; width 10.8"
Weight	Approx. 2.2 kg (4.8 lbs); incl. enclosure and shielded ribbon cables

CLP1104 Data Sheet

The following table shows the data sheet of the CLP1104 Connector/LED Combi Panel.

Parameter	Characteristics
Power consumption	5 V; max. 100 mA (via DS1104 board)
Grounding	The enclosure and the front panel are not grounded.
Cable length	2 m (6.6 ft) standard
Physical size (with desktop enclosure) (length x depth x height)	433.5 x 142.5 x 70 mm (17.07 x 5.61 x 2.75 in)
Space needed for 19" rack mount	Height 3 U; width 16.8"
Weight	Approx. 2.5 kg (5.5 lbs); incl. enclosure and shielded ribbon cables

0.2 Datasheet LEM LV25-P



Voltage Transducer LV 25-P

For the electronic measurement of voltages : DC, AC, pulsed..., with a galvanic isolation between the primary circuit (high voltage) and the secondary circuit (electronic circuit).



Electrical data

I_{PN}	Primary nominal current rms	10	mA			
I_{FM}	Primary current, measuring range	0 .. ± 14	mA			
R_M	Measuring resistance	$R_{M\ mini}$	$R_{M\ maxi}$			
				with ± 12 V	@ ± 10 mA _{maxi}	30
			@ ± 14 mA _{maxi}	30	100	Ω
		with ± 15 V	@ ± 10 mA _{maxi}	100	350	Ω
	@ ± 14 mA _{maxi}	100	190	Ω		
I_{SN}	Secondary nominal current rms	25	mA			
K_N	Conversion ratio	2500 : 1000				
V_C	Supply voltage (± 5 %)	± 12 .. 15	V			
I_C	Current consumption	10 (@ ± 15 V) + I_S	mA			

Accuracy - Dynamic performance data

X_G	Overall Accuracy @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	@ ± 12 .. 15 V	± 0.9	%	
		@ ± 15 V (± 5 %)	± 0.8	%	
ϵ_L	Linearity error		< 0.2	%	
I_O	Offset current @ $I_p = 0$, $T_A = 25^\circ\text{C}$		Typ	Maxi	
I_{OT}	Temperature variation of I_O	0°C .. + 25°C	± 0.06	± 0.25	mA
		+ 25°C .. + 70°C	± 0.10	± 0.35	mA
			40		μs
t_r	Response time ¹⁾ to 90 % of I_{PN} step				

General data

T_A	Ambient operating temperature	0 .. + 70	°C
T_S	Ambient storage temperature	- 25 .. + 85	°C
R_P	Primary coil resistance @ $T_A = 70^\circ\text{C}$	250	Ω
R_S	Secondary coil resistance @ $T_A = 70^\circ\text{C}$	110	Ω
m	Mass	22	g
	Standards	EN 50178: 1997	

Note: ¹⁾ $R_1 = 25\ \text{k}\Omega$ (L/R constant, produced by the resistance and inductance of the primary circuit).

$$I_{PN} = 10\ \text{mA}$$

$$V_{PN} = 10..500\ \text{V}$$



Features

- Closed loop (compensated) voltage transducer using the Hall effect
- Insulated plastic case recognized according to UL 94-V0.

Principle of use

- For voltage measurements, a current proportional to the measured voltage must be passed through an external resistor R_1 which is selected by the user and installed in series with the primary circuit of the transducer.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low thermal drift
- Low response time
- High bandwidth
- High immunity to external interference
- Low disturbance in common mode.

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Power supplies for welding applications.

Application domain

- Industrial.



Voltage Transducer LV 25-P

Isolation characteristics

V_{di}	Rms voltage for AC isolation test, 50 Hz, 1 min	2.5 ²⁾	kV
\hat{V}_w	Impulse withstand voltage 1.2/50 μ s	16	kV
		Mini	
dCp	Creepage distance	19.5	mm
dCl	Clearance distance	19.5	mm
CTI	Comparative Tracking Index (Group IIIa)	175	

Note: ²⁾ Between primary and secondary.

Application examples

According to EN 50178 and IEC 61010-1 standards and following conditions:

- Over voltage category OV 3
- Pollution degree PD2
- Non-uniform field

	EN 50178	IEC 61010-1
dCp, dCl, \hat{V}_w	Rated isolation voltage	Nominal voltage
Single isolation	1600 V	1600 V
Reinforced isolation	800 V	800 V

Safety



This transducer must be used in electric/electronic equipment with respect to applicable standards and safety requirements in accordance with the manufacturer's operating instructions.



Caution, risk of electrical shock

When operating the transducer, certain parts of the module can carry hazardous voltage (eg. primary busbar, power supply).

Ignoring this warning can lead to injury and/or cause serious damage.

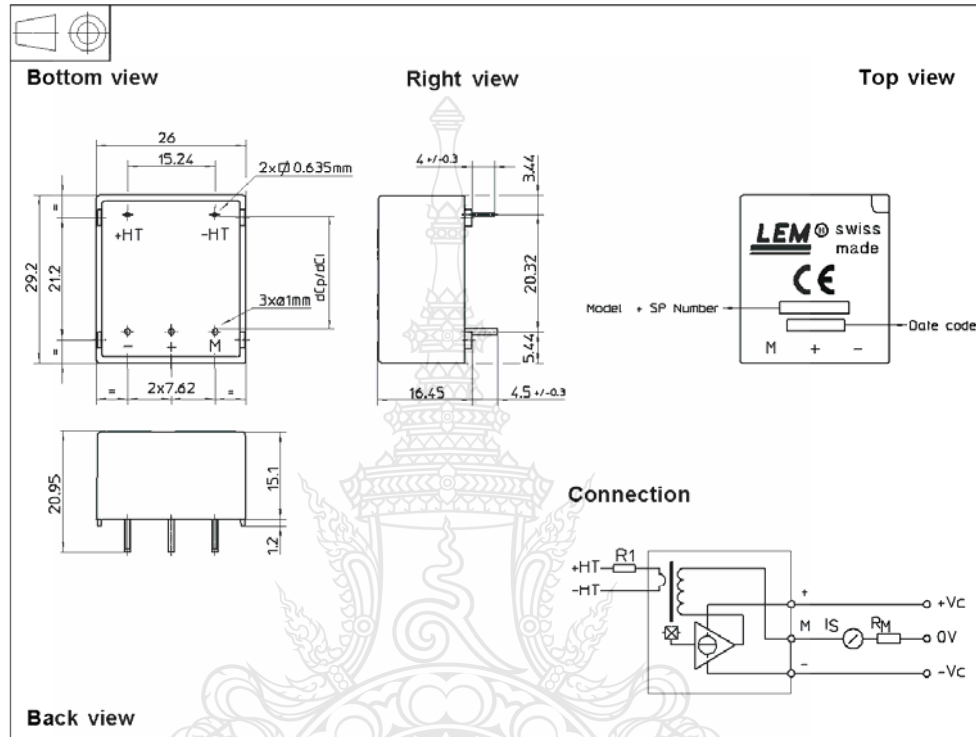
This transducer is a built-in device, whose conducting parts must be inaccessible after installation.

A protective housing or additional shield could be used.

Main supply must be able to be disconnected.



Dimensions LV 25-P (in mm. 1 mm = 0.0394 inch)



Mechanical characteristics

- General tolerance
- Fastening & connection of primary
- Fastening & connection of secondary
- Recommended PCB hole

± 0.2 mm
 2 pins
 0.635 x 0.635 mm
 3 pins ∅ 1 mm
 1.2 mm

Remarks

- I_p is positive when V_p is applied on terminal +HT.
- This is a standard model. For different versions (supply voltages, turns ratios, unidirectional measurements...), please contact us.

Instructions for use of the voltage transducer model LV 25-P

Primary resistor R_1 : the transducer's optimum accuracy is obtained at the nominal primary current. As far as possible, R_1 should be calculated so that the nominal voltage to be measured corresponds to a primary current of 10 mA.

Example: Voltage to be measured $V_{PN} = 250 V$

a) $R_1 = 25 k\Omega / 2.5 W, I_p = 10 mA$	Accuracy = ± 0.8 % of V_{PN} (@ $T_A = +25^\circ C$)
b) $R_1 = 50 k\Omega / 1.25 W, I_p = 5 mA$	Accuracy = ± 1.6 % of V_{PN} (@ $T_A = +25^\circ C$)

Operating range (recommended): taking into account the resistance of the primary windings (which must remain low compared to R_1 , in order to keep thermal deviation as low as possible) and the isolation, this transducer is suitable for measuring nominal voltages from 10 to 500 V.

๓.3 Datasheet TLP250

TOSHIBA

TLP250

TOSHIBA Photocoupler GaAlAs Ired & Photo-IC

TLP250

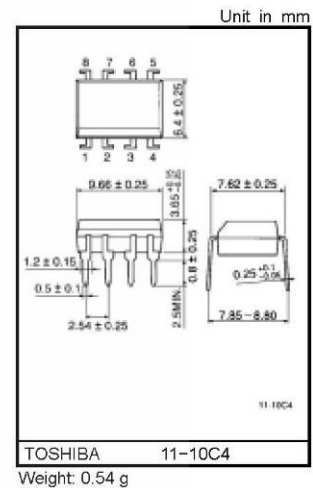
- Transistor Inverter
- Inverter For Air Conditionor
- IGBT Gate Drive
- Power MOS FET Gate Drive

The TOSHIBA TLP250 consists of a GaAlAs light emitting diode and a integrated photodetector.
This unit is 8-lead DIP package.
TLP250 is suitable for gate driving circuit of IGBT or power MOS FET.

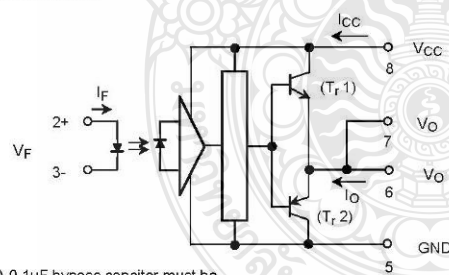
- Input threshold current: $I_F=5\text{mA}(\text{max.})$
- Supply current (I_{CC}): $11\text{mA}(\text{max.})$
- Supply voltage (V_{CC}): 10-35V
- Output current (I_O): $\pm 1.5\text{A}(\text{max.})$
- Switching time (t_{pLH}/t_{pHL}): $1.5\mu\text{s}(\text{max.})$
- Isolation voltage: $2500V_{\text{rms}}(\text{min.})$
- UL recognized: UL1577, file No.E67349
- Option (D4) type
 - VDE approved: DIN VDE0884/06.92,certificate No.76823
 - Maximum operating insulation voltage: 630VPK
 - Highest permissible over voltage: 4000VPK

(Note) When a VDE0884 approved type is needed, please designate the "option (D4)"

- Creepage distance: 6.4mm(min.)
- Clearance: 6.4mm(min.)

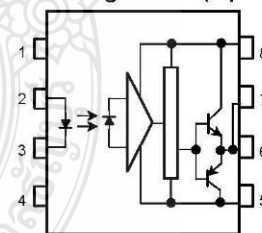


Schematic



A 0.1μF bypass capacitor must be connected between pin 8 and 5 (See Note 5).

Pin Configuration (top view)



- 1 : N.C.
- 2 : Anode
- 3 : Cathode
- 4 : N.C.
- 5 : GND
- 6 : V_O (Output)
- 7 : V_O
- 8 : V_{CC}

Truth Table

Input LED		Tr1	Tr2
On	On	On	Off
	Off	Off	On

Absolute Maximum Ratings (Ta = 25°C)

Characteristic		Symbol	Rating	Unit	
LED	Forward current	I_F	20	mA	
	Forward current derating (Ta ≥ 70°C)	$\Delta I_F / \Delta T_a$	-0.36	mA / °C	
	Peak transient forward current (Note 1)	I_{FPT}	1	A	
	Reverse voltage	V_R	5	V	
	Junction temperature	T_J	125	°C	
Detector	"H" peak output current ($P_W \leq 2.5\mu s, f \leq 15kHz$) (Note 2)	I_{OPH}	-1.5	A	
	"L" peak output current ($P_W \leq 2.5\mu s, f \leq 15kHz$) (Note 2)	I_{OPL}	+1.5	A	
	Output voltage	V_O	(Ta ≤ 70°C)	35	V
			(Ta = 85°C)	24	
	Supply voltage	V_{CC}	(Ta ≤ 70°C)	35	V
			(Ta = 85°C)	24	
	Output voltage derating (Ta ≥ 70°C)		$\Delta V_O / \Delta T_a$	-0.73	V / °C
	Supply voltage derating (Ta ≥ 70°C)		$\Delta V_{CC} / \Delta T_a$	-0.73	V / °C
Junction temperature		T_J	125	°C	
Operating frequency (Note 3)		f	25	kHz	
Operating temperature range		T_{opr}	-20~85	°C	
Storage temperature range		T_{stg}	-55~125	°C	
Lead soldering temperature (10 s) (Note 4)		T_{sol}	260	°C	
Isolation voltage (AC, 1 min., R.H. ≤ 60%) (Note 5)		BV_S	2500	Vrms	

Note 1: Pulse width $P_W \leq 1\mu s$, 300pps

Note 2: Exponential waveform

Note 3: Exponential waveform, $I_{OPH} \leq -1.0A$ ($\leq 2.5\mu s$), $I_{OPL} \leq +1.0A$ ($\leq 2.5\mu s$)

Note 4: It is 2 mm or more from a lead root.

Note 5: Device considered a two terminal device: Pins 1, 2, 3 and 4 shorted together, and pins 5, 6, 7 and 8 shorted together.

Note 6: A ceramic capacitor (0.1μF) should be connected from pin 3 to pin 5 to stabilize the operation of the high gain linear amplifier. Failure to provide the bypassing may impair the switching property. The total lead length between capacitor and coupler should not exceed 1cm.

Recommended Operating Conditions

Characteristic	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	
Input current, on (Note 7)	$I_{F(ON)}$	7	8	10	mA	
Input voltage, off	$V_{F(OFF)}$	0	—	0.8	V	
Supply voltage	V_{CC}	15	—	30	20	V
Peak output current	I_{OPH}/I_{OPL}	—	—	±0.5	A	
Operating temperature	T_{opr}	-20	25	70	85	°C

Note 7: Input signal rise time (fall time) < 0.5 μs.

TOSHIBA

TLP250

Electrical Characteristics (Ta = -20~70°C, unless otherwise specified)

Characteristic		Symbol	Test Circuit	Test Condition	Min.	Typ.*	Max.	Unit
Input forward voltage		V _F	—	I _F = 10 mA, Ta = 25°C		1.6	1.8	V
Temperature coefficient of forward voltage		ΔV _F / ΔTa	—	I _F = 10 mA	—	-2.0	—	mV / °C
Input reverse current		I _R	—	V _R = 5V, Ta = 25°C		—	10	μA
Input capacitance		C _T	—	V = 0, f = 1MHz, Ta = 25°C	—	45	250	pF
Output current	"H" level	I _{OPH}	3	V _{CC} = 30V (*1) I _F = 10 mA V _{B-6} = 4V	-0.5	-1.5	—	A
	"L" level	I _{OPL}	2		I _F = 0 V _{B-6} = 2.5V	0.5	2	
Output voltage	"H" level	V _{OH}	4	V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, I _F = 5mA	11	12.8	—	V
	"L" level	V _{OL}	5		V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, V _F = 0.8V	—	-14.2	
Supply current	"H" level	I _{CCH}	—	V _{CC} = 30V, I _F = 10mA Ta = 25°C	—	7	—	mA
				V _{CC} = 30V, I _F = 10mA	—	—	11	
	"L" level	I _{CCL}	—	V _{CC} = 30V, I _F = 0mA Ta = 25°C	—	7.5	—	
V _{CC} = 30V, I _F = 0mA				—	—	11		
Threshold input current	"Output L→H"	I _{FLH}	—	V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, V _O > 0V	—	1.2	5	mA
Threshold input voltage	"Output H→L"	I _{FHL}	—	V _{CC1} = +15V, V _{EE1} = -15V R _L = 200Ω, V _O < 0V	0.8	—	—	V
Supply voltage		V _{CC}	—		10	—	35	V
Capacitance (input-output)		C _S	—	V _S = 0, f = 1MHz Ta = 25°C	—	1.0	2.0	pF
Resistance(input-output)		R _S	—	V _S = 500V, Ta = 25°C R.H. ≤ 60%	1×10 ¹²	10 ¹⁴	—	Ω

* All typical values are at Ta = 25°C (*1): Duration of I_O time ≤ 50μs

TOSHIBA

TLP250

Switching Characteristics (Ta = -20~70°C , unless otherwise specified)

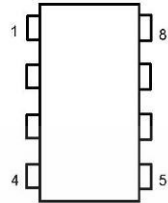
Characteristic	Symbol	Test Circuit	Test Condition	Min.	Typ.*	Max.	Unit
Propagation delay time	L→H	t_{pLH}	$I_F = 8\text{mA}$ (Note 7) $V_{CC1} = +15\text{V}$, $V_{EE1} = -15\text{V}$ $R_L = 200\Omega$	—	0.15	0.5	μs
	H→L	t_{pHL}		—	0.15	0.5	
Output rise time	t_r	6		—	—	—	
Output fall time	t_f			—	—	—	
Common mode transient immunity at high level output	C_{MH}	7	$V_{CM} = 600\text{V}$, $I_F = 8\text{mA}$ $V_{CC} = 30\text{V}$, $T_a = 25^\circ\text{C}$	-5000	—	—	$\text{V} / \mu\text{s}$
Common mode transient immunity at low level output	C_{ML}	7	$V_{CM} = 600\text{V}$, $I_F = 0\text{mA}$ $V_{CC} = 30\text{V}$, $T_a = 25^\circ\text{C}$	5000	—	—	$\text{V} / \mu\text{s}$

* All typical values are at $T_a = 25^\circ\text{C}$ Note 7: Input signal rise time (fall time) < 0.5 μs .

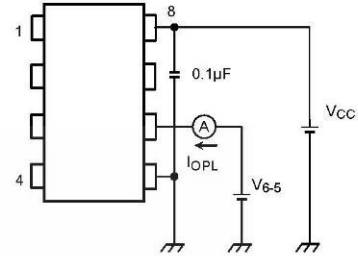
TOSHIBA

TLP250

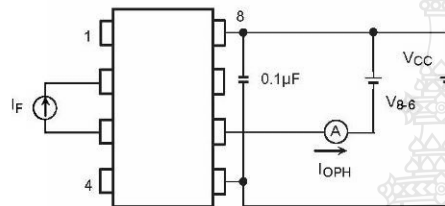
Test Circuit 1 :



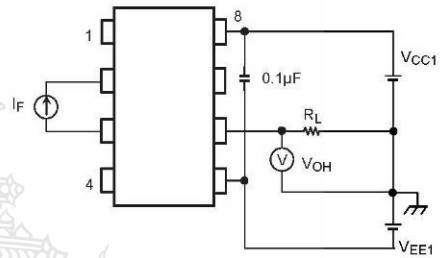
Test Circuit 2 : IOPL



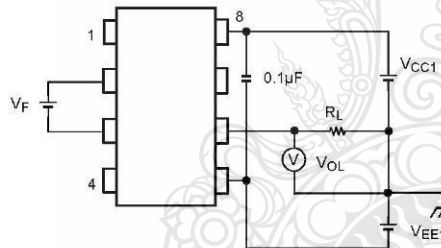
Test Circuit 3 : IOPH



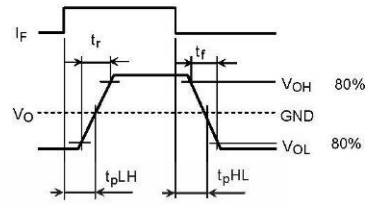
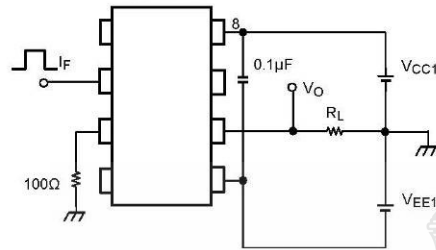
Test Circuit 4 : VOH



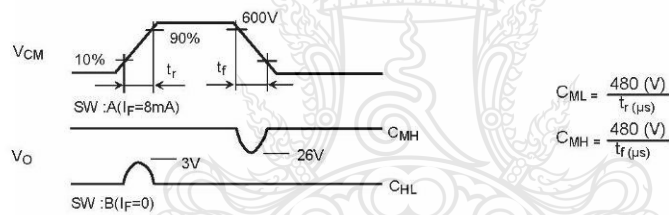
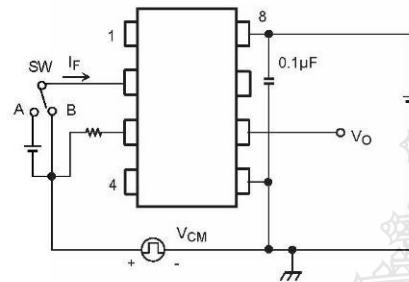
Test Circuit 5 : VOL



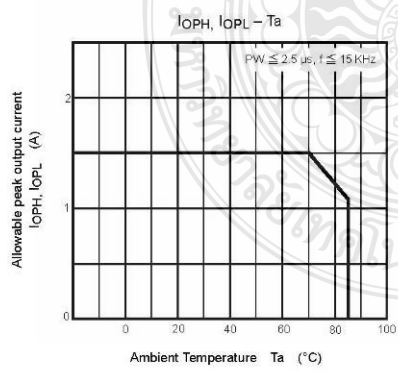
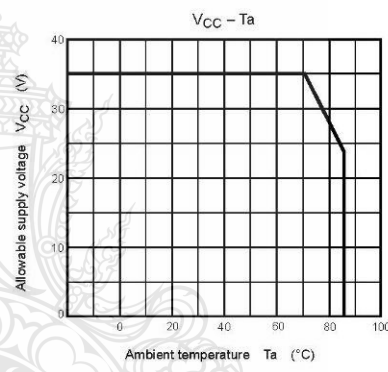
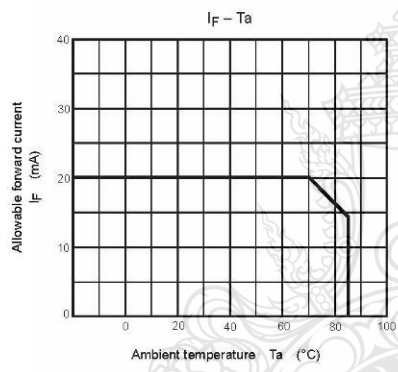
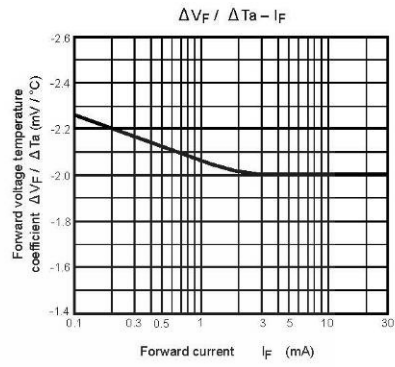
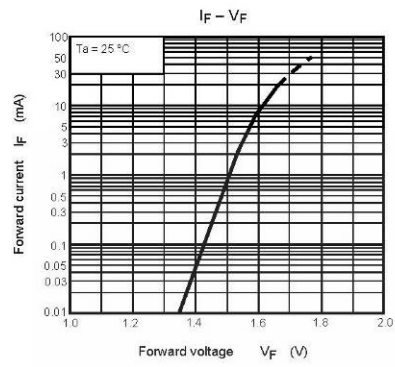
Test Circuit 6: t_{pLH} , t_{pHL} , t_r , t_f



Test Circuit 7: C_{MH} , C_{ML}



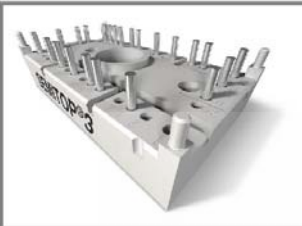

$C_{ML}(C_{MH})$ is the maximum rate of rise (fall) of the common mode voltage that can be sustained with the output voltage in the low (high) state.



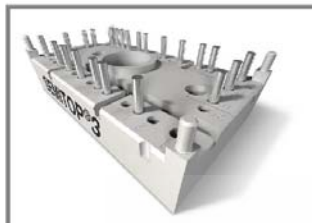
RESTRICTIONS ON PRODUCT USE

- The information contained herein is subject to change without notice.
- The information contained herein is presented only as a guide for the applications of our products. No responsibility is assumed by TOSHIBA for any infringements of patents or other rights of the third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of TOSHIBA or others.
- TOSHIBA is continually working to improve the quality and reliability of its products. Nevertheless, semiconductor devices in general can malfunction or fail due to their inherent electrical sensitivity and vulnerability to physical stress. It is the responsibility of the buyer, when utilizing TOSHIBA products, to comply with the standards of safety in making a safe design for the entire system, and to avoid situations in which a malfunction or failure of such TOSHIBA products could cause loss of human life, bodily injury or damage to property.
In developing your designs, please ensure that TOSHIBA products are used within specified operating ranges as set forth in the most recent TOSHIBA products specifications. Also, please keep in mind the precautions and conditions set forth in the "Handling Guide for Semiconductor Devices," or "TOSHIBA Semiconductor Reliability Handbook" etc..
- The TOSHIBA products listed in this document are intended for usage in general electronics applications (computer, personal equipment, office equipment, measuring equipment, industrial robotics, domestic appliances, etc.). These TOSHIBA products are neither intended nor warranted for usage in equipment that requires extraordinarily high quality and/or reliability or a malfunction or failure of which may cause loss of human life or bodily injury ("Unintended Usage"). Unintended Usage include atomic energy control instruments, airplane or spaceship instruments, transportation instruments, traffic signal instruments, combustion control instruments, medical instruments, all types of safety devices, etc.. Unintended Usage of TOSHIBA products listed in this document shall be made at the customer's own risk.
- The products described in this document are subject to the foreign exchange and foreign trade laws.
- TOSHIBA products should not be embedded to the downstream products which are prohibited to be produced and sold, under any law and regulations.
- GaAs(Gallium Arsenide) is used in this product. The dust or vapor is harmful to the human body. Do not break, cut, crush or dissolve chemically.

n.4 Datasheet IGBT Module SK30MLI066

SK30MLI066					
					
SEMITOR® 3					
IGBT Module					
SK30MLI066					
Target Data					
Features <ul style="list-style-type: none"> • Compact design • One screw mounting • Heat transfer and isolation through direct copper bonded aluminium oxide ceramic (DCB) • Trench IGBT technology • CAL technology FWD 					
Typical Applications* <ul style="list-style-type: none"> • 3 Level Inverter • UPS 					
Remarks <ul style="list-style-type: none"> • Visol = 3000V AC, 1s, 50Hz • Dynamic measure: DUT= IGBT (Gate pin 1) and Neutral Clamp Diode (Kathode pin 16) as free-wheeling diode 					
					
MLI					
Absolute Maximum Ratings $T_s = 25\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise specified					
Symbol	Conditions	Values	Units		
IGBT					
V_{CES}	$T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$	600	V		
I_C	$T_J = 175\text{ }^\circ\text{C}$	40	A		
	$T_s = 70\text{ }^\circ\text{C}$	31	A		
I_{CRM}	$I_{CRM} = 2 \times I_{Cnom}$	60	A		
V_{GES}		± 20	V		
t_{psc}	$V_{CC} = 360\text{ V}; V_{GE} \leq 20\text{ V}; T_J = 150\text{ }^\circ\text{C}$ $V_{CES} < 600\text{ V}$	6	μs		
Inverse Diode					
I_F	$T_J = 175\text{ }^\circ\text{C}$	37	A		
	$T_s = 70\text{ }^\circ\text{C}$	30	A		
I_{FRM}	$I_{FRM} = 2 \times I_{Fnom}$	60	A		
I_{FSM}	$t_p = 10\text{ ms}; \text{half sine wave } T_J = 150\text{ }^\circ\text{C}$	160	A		
Freewheeling Diode					
I_F	$T_J = 175\text{ }^\circ\text{C}$	36	A		
	$T_s = 70\text{ }^\circ\text{C}$	28	A		
I_{FRM}	$I_{FRM} = 2 \times I_{Fnom}$	60	A		
I_{FSM}	$t_p = 10\text{ ms}; \text{half sine wave } T_J = 150\text{ }^\circ\text{C}$	160	A		
Module					
$I_{L(RMS)}$			A		
T_{vj}		-40 ... +175	$^\circ\text{C}$		
T_{stg}		-40 ... +125	$^\circ\text{C}$		
V_{isol}	AC, 1 min.	2500	V		
Characteristics $T_s = 25\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise specified					
Symbol	Conditions	min.	typ.	max.	Units
IGBT					
$V_{GE(th)}$	$V_{GE} = V_{CE}; I_C = 0,43\text{ mA}$	5	5,8	6,5	V
I_{CES}	$V_{GE} = 0\text{ V}; V_{CE} = V_{CES}; T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$			0,0016	mA
I_{GES}	$V_{CE} = 0\text{ V}; V_{GE} = 20\text{ V}; T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$			300	nA
V_{CE0}	$T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$		0,9	1,1	V
	$T_J = 150\text{ }^\circ\text{C}$		0,8	1	V
r_{CE}	$V_{GE} = 15\text{ V}; T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$		18	28	m Ω
	$T_J = 150\text{ }^\circ\text{C}$		27	38	m Ω
$V_{CE(sat)}$	$I_{Cnom} = 30\text{ A}; V_{GE} = 15\text{ V}; T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}_{chiplev.}$		1,45		V
	$T_J = 150\text{ }^\circ\text{C}_{chiplev.}$		1,65		V
C_{ics}			1,63		nF
C_{ces}	$V_{CE} = 25\text{ V}; V_{GE} = 0\text{ V}; f = 1\text{ MHz}$		0,18		nF
C_{res}			0,05		nF
Q_G	$V_{GE} = -7\text{ V} \dots +15\text{ V}$		275		nC
$t_{d(on)}$	$R_{Con} = 25\text{ }^\circ\Omega$ $di/dt = 2335\text{ A}/\mu\text{s}$	$V_{CC} = 300\text{ V}$	24		ns
		$I_C = 30\text{ A}$	27		ns
$t_{d(off)}$	$R_{Coff} = 25\text{ }^\circ\Omega$ $di/dt = 2335\text{ A}/\mu\text{s}$	$T_J = 150\text{ }^\circ\text{C}$	0,97		mJ
		$V_{GE} = -7/+15\text{ V}$	328		ns
t_t			54		ns
E_{off}			1,77		mJ
$R_{th(j-s)}$	per IGBT		1,65		K/W

SK30MLI066



SEMITEP® 3

IGBT Module

SK30MLI066

Target Data

Features

- Compact design
- One screw mounting
- Heat transfer and isolation through direct copper bonded aluminium oxide ceramic (DCB)
- Trench IGBT technology
- CAL technology FWD

Typical Applications*

- 3 Level Inverter
- UPS

Remarks

- Visol = 3000V AC, 1s, 50Hz
- Dynamic measure: DUT= IGBT (Gate pin 1) and Neutral Clamp Diode (Kathode pin 16) as free-wheeling diode



MLI

Characteristics					
Symbol	Conditions	min.	typ.	max.	Units
Inverse Diode (Antiparallel Diode)					
$V_F = V_{EC}$	$I_{Fnom} = 30 \text{ A}; V_{GE} = 0 \text{ V}$	$T_J = 25 \text{ }^\circ\text{C}_{chiplev.}$	1,5		V
		$T_J = 150 \text{ }^\circ\text{C}_{chiplev.}$	1,5		V
V_{F0}		$T_J = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	1		V
		$T_J = 150 \text{ }^\circ\text{C}$	0,9		V
r_F		$T_J = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	16,7	20	mΩ
		$T_J = 150 \text{ }^\circ\text{C}$	20	23,3	mΩ
I_{RRM}	$I_F = 30 \text{ A}$	$T_J = 150 \text{ }^\circ\text{C}$	30		A
Q_{rr}	$di/dt = 2335 \text{ A}/\mu\text{s}$		1,6		μC
E_{rr}	$V_{Rc} = 300\text{V}$		0,26		mJ
$R_{th(j-s)D}$	per diode		2,3		K/W
Freewheeling Diode (Neutral Clamp diode)					
$V_F = V_{EC}$	$I_{Fnom} = 30 \text{ A}; V_{GE} = 0 \text{ V}$	$T_J = 25 \text{ }^\circ\text{C}_{chiplev.}$	1,5		V
		$T_J = 150 \text{ }^\circ\text{C}_{chiplev.}$	1,5		V
V_{F0}		$T_J = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	1		V
		$T_J = 150 \text{ }^\circ\text{C}$	0,9		V
r_F		$T_J = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	16,7	20	V
		$T_J = 150 \text{ }^\circ\text{C}$	20	23,3	V
I_{RRM}	$I_F = 30 \text{ A}$	$T_J = 150 \text{ }^\circ\text{C}$			A
Q_{rr}	$di/dt = -950 \text{ A}/\mu\text{s}$				μC
E_{rr}	$V_{Rc} = 300\text{V}$		0,26		mJ
$R_{th(j-s)FD}$	per diode		2,3		K/W
M_s	to heat sink		2,25	2,5	Nm
w			30		g

This is an electrostatic discharge sensitive device (ESDS), international standard IEC 60747-1, Chapter IX.

* The specifications of our components may not be considered as an assurance of component characteristics. Components have to be tested for the respective application. Adjustments may be necessary. The use of SEMIKRON products in life support appliances and systems is subject to prior specification and written approval by SEMIKRON. We therefore strongly recommend prior consultation of our personal.

SK30MLI066

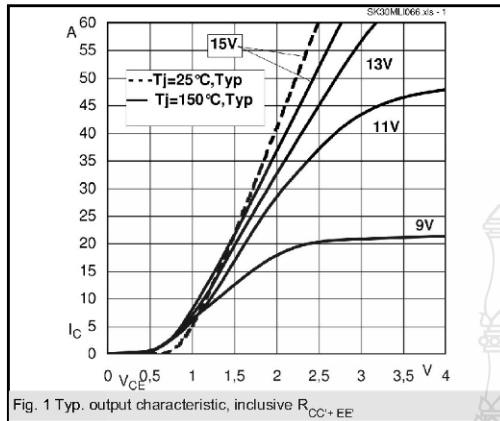


Fig. 1 Typ. output characteristic, inclusive R_{CC+EE}

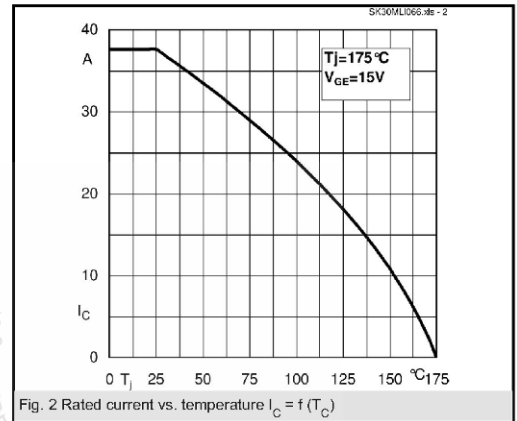


Fig. 2 Rated current vs. temperature $I_C = f(T_C)$

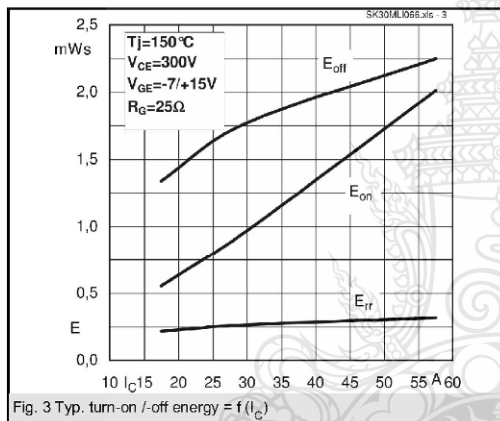


Fig. 3 Typ. turn-on /-off energy = $f(I_C)$

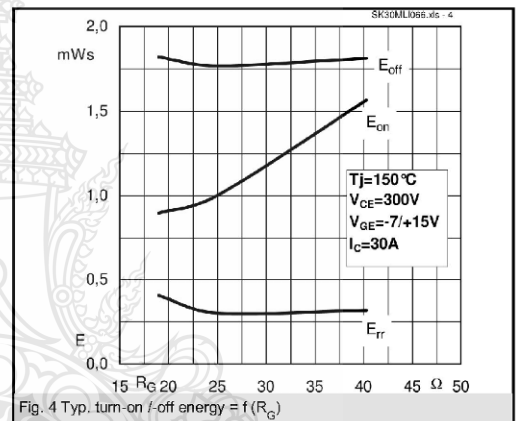


Fig. 4 Typ. turn-on /-off energy = $f(R_G)$

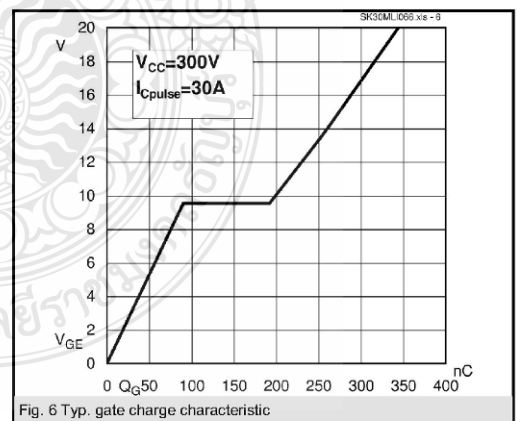
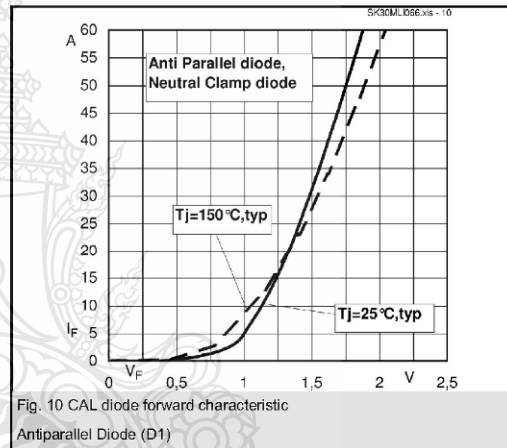
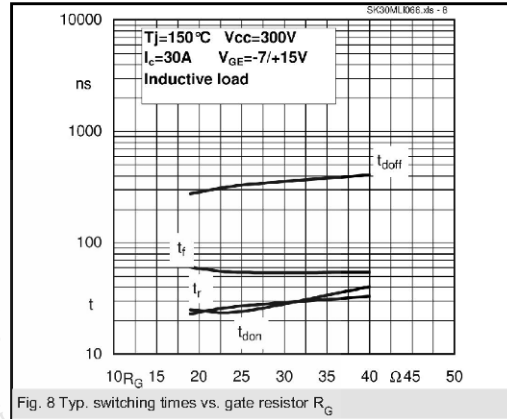
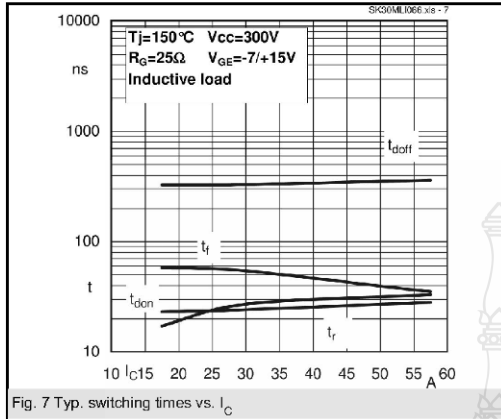


Fig. 6 Typ. gate charge characteristic

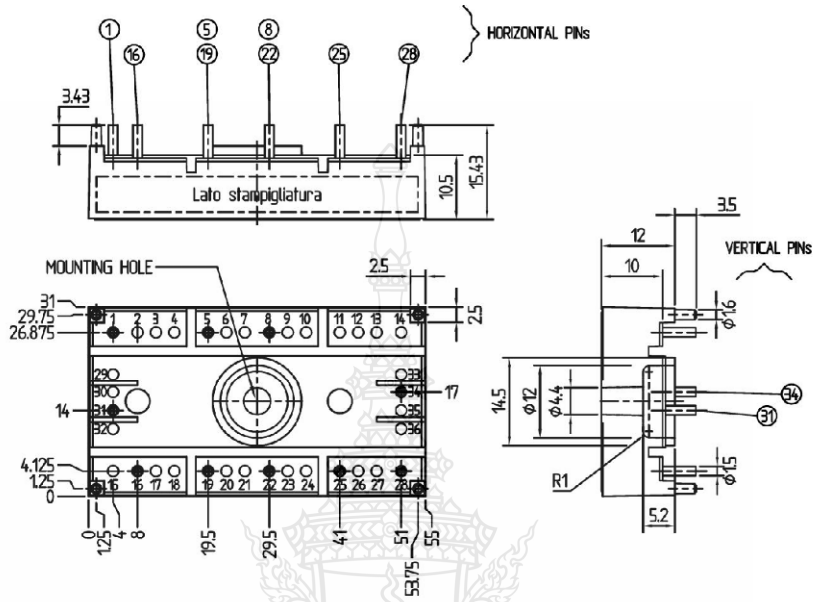
SK30MLI066



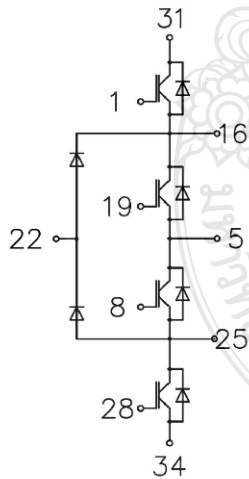
SK30MLI066

UL recognized

file no. E 63 532

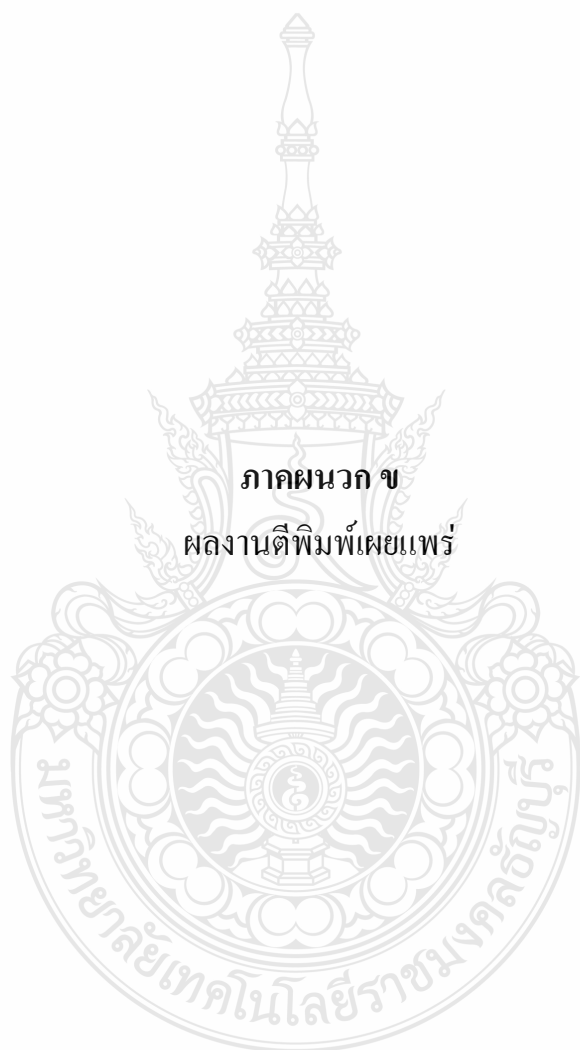


Case T 76 (Suggested hole diameter, in the PCB, for solder pins and plastic mounting pins: 2mm)



Case T 76

MLI



ภาคผนวก ข
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



การประชุมวิชาการ ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๓

33rd Electrical Engineering Conference (EECON-33)

คำนำ

Keynote Speakers

บทความรับเชิญ

บทความดีเด่น

ดัชนีผู้เขียนบทความ Vol.1 (Author Index Vol.1)

ดัชนีผู้เขียนบทความ Vol.2 (Author Index Vol.2)

ดัชนีคำสำคัญ Vol.1 (Keyword Index Vol.1)

ดัชนีคำสำคัญ Vol.2 (Keyword Index Vol.2)

กำหนดการ

Sponsor

หน้าปก Proceedings

Proceeding Vol.1

Proceeding Vol.2

Abstract Program

บทความทางวิศวกรรมไฟฟ้า

ไฟฟ้ากำลัง (PW)

อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)

ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)

อิเล็กทรอนิกส์ (EL)

การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)

ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

ไฟโตนิคส์ (PH)

คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)

วิศวกรรมชีวการแพทย์ (BE)

ร่วมจัดโดย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร



ABB **CSG**
SOLUTION



111 Years Engineering
Innovation



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
ครั้งที่ 33

Reviewer	Affiliation
Adisorn Leclasantitham	University of the Thai Chamber of Commerce
Akaraphunt Vongkunghac	Naresuan University
Annart Sukstri	Khen Kaen University
Amorn Jirasree-amornkun	Mahanakorn University of Technology
Amporn Poyai	Thai Microelectronics Center
Anuchit Charcan	Kasem Bundit University
Anurce Lorsawatsiri	Mahanakorn University of Technology
Anuwat Jangwanitert	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Aphibal Pruksanubal	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Apichai Bhatranand	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Apichan Kanjanavapastit	Mahanakorn University of Technology
Apinunt Thanachayanont	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Apirada Namsang	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Apiwat Lek-uthai	Chulalongkorn University
Arporn Teeramongkonrasmee	Chulalongkorn University
Arthit Sode-Yome	Siam University
Athikom Rocksabutr	Mahanakorn University of Technology
Atthapol Ngaopitakkul	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Boonchuay Supmonchai	Chulalongkorn university
Boonlert Suechoy	South-East Asia University
Boonruk Chipipop	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Boonsri Kaewkham-ai	Chiang Mai University
Boonyang Plangklang	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Budhapon Sawetsakulanond	Mahanakorn University
Bunlung Neammance	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Cattarecyia Suwanasri	Naresuan University
Chai Chompoo-inwai	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chainarong Klimance	Srinakharinwirot University
Chaiwat Nuthong	King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang
Chaiwat Sakul	Rajamangala University of Technology Srivijaya, Trang Campus.
Chaiwit Chat-uthai	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chaiyachet Saivichit	Chulalongkorn University





รายชื่อผู้พิจารณาบทความ
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
ครั้งที่ 33

Reviewer

Chaiyaporn Lothongkam
Chaiyut Sumpavakup
Chakkaphong Suthaputachakun
Chanatip Tumrongwittayapak
Chanchai Thajjiam
Chanchana Tangwongsan
Chanin Bunlaksananusorn
Chanin Wissawinthanon
Channarong Banmongkol
Chaodit Aswakul
Chaovalit Thamviriyakul
Charnchai Pluempitwiriyaewj
Chatchai Suppitaksakul
Chatree Mahatthanajaturphat
Chedsada Chinrungrueng
Chiranut Sa-ngiamsak
Chirasak Sinsukudomchai
Chivalai Temiyasathit
Chokchai Sangdao
Chow Chompoo-inwai
Chuttchaval Jeraputra
Chuwong Phongcharoenpanich
Danai Laksamecthanasan
David Banjerdpongchai
Deacha Puangdownreong
Decha Wilairat
Diew Koolpiruck
Duang-arthit Srimoon
Dulpichet Rerkpreedapong
Ekachai Leelarasmee
Ekachai Phaisangittisagul

Affiliation

Mahanakom University of Technology
Mahanakom University of Technology
Bangkok University
Kasem Bundit University
Srinakharinwirot University
Chulalongkorn University
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Chulalongkorn university
Chulalongkorn University
Chulalongkorn University
Mahanakom University of Technology
Chulalongkorn University
Rajamangala University of Technology Thanyaburi
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Chulalongkorn University
Khon Kaen University
South-East Asia University
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Mahanakom University of Technology
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Mahidol University
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Mahidol University
Chulalongkorn University
South-East Asia University
Mahidol University
King Mongkut's University of Technology Thonburi
Rangsit University
Kasetsart University
Chulalongkorn University
Kasetsart University





รายชื่อผู้พิจารณาบทความ
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
ครั้งที่ 33

Reviewer

Ekapon Siwapornsathain
Issarachai Ngamroo
Jakkree Srinonchat
Jirasuk Vilasdechanon
Jukkrit Tagapanij
Kamol Kaemarungsi
Kamon Jirasereamornkul
Kampol Woradit
Kanadit Chetpattanondh
Kanokvate Tungpimolrut
Kasin Vichienchom
Keerati Chayakulkheeree
Khatathap Swatdipisal
Kittiphong Meeasawat
Kittisak Tripitapornchai
Komsan Hongesombut
Krischonme Bhunkittipich
Kunthphong Srisathit
La-or Kovavisaruch
Lunchakorn Wuttisuttikulkiy
Mana Sriyudthsak
Manop Aorpimai
Manop Wongsaisuwan
Miti Ruchanurucks
Mongkol Konghirun
Mongkorn Klingajay
Monthon Leelajindakraierk
Montri Kamjanadecha
Montri Pannarut
Montri Suwanapingkarl
Nacboon Hooncharcon
Nalin Sidahao

Affiliation

King Mongkut's University of Technology Thonburi
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Chiang Mai University
Mahanakorn University of Technology
National Electronics and Computer Technology Center
King Mongkut's University of Technology Thonburi
Srinakharinwirot University
Prince of Songkla University
National Electronics and Computer Technology Center
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Sripatum University
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Khon Kaen University
Rangsit University
Kasetsart University
Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Mahanakorn University of Technology
National Electronics and Computer Technology Center
Chulalongkorn University
Chulalongkorn University
Mahanakorn University of Technology
Chulalongkorn University
Kasetsart University
King Mongkut's University of Technology Thonburi
Rajamangala University of Technology Thanyaburi
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Prince of Songkla University
National Electronics and Computer Technology Center
King Mongkut's University of Technology Thonburi
Chulalongkorn University
Mahanakorn University of Technology



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 33 (EECON-33) 1-3 ธันวาคม 2553 จังหวัดเชียงใหม่ จัดโดย สจล. มท. มทม.
The 33rd Electrical Engineering Conference, 1-3 December 2010, Organized by KMITL, CMU, MUT



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
ครั้งที่ 33

Reviewer	Affiliation
Nararat Ruangchajjatupon	Khon Kaen University
Narisara Sophayont	TOT Public Company Limited
Narong Buabthong	Thammasat university
Narong Yoothanom	Sripatum University
Narongrit Sanajit	Mahanakorn University of Technology
Natham Koedsam-ang	Kasem Bundit University
Nattavut Chayavanich	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Natth Junkrob	South-East Asia University
Nattha Jindapetch	Prince of Songkla University
Natthaphob Nimpitiwan	Bangkok University
Natthawuth Somakettarin	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Nimit Boonpirom	Sripatum University
Nipapon Siripon	Chiang Mai University
Niphat Jantharamin	Naresuan University
Nopadol Uchaipichat	Thammasat University
Noppadol Wanichworanant	Mahidol University
Nuntiya Chaiyabut	Bangkok University
Opas Chutatapc	Rangsit University
Ouen Pinnern	Ramkhamhaeng University
Pakom Kaewtrakulpong	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Panrasee Ritthipravat	Mahidol University
Pasawee Srimord	Sripatum university
Patamapom Sripadungtham	Kasetsart University
Pathomthat Chiradeja	Srinakharinwirot University
Pecrapol Yuvapoositanon	Mahanakorn University of Technology
Pecrayot Sanposh	Kasetsart University
Petch Nantivatana	Sripatum University
Phai boon Booppha	Kasem Bundit University
Phakkawat Jantree	Rajamangala University of Technology Suvamabhum
Phichet Moungnoul	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Phomphun Oothongsap	King Mongkut's University Technology North Bangkok





รายชื่อผู้พิจารณาบทความ
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
ครั้งที่ 33

Reviewer	Affiliation
Phomphop Naiyanctr	Mahidol University
Pichai Arce	Thammasat University
Pichaya Tandayya	Prince of Songkla University
Pinit Jitjing	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Pinit Kumhom	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Pinit Thepsatorn	Srinakharinwirot University
Pisit Liutanakul	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Pisit Phokharatkul	Mahidol University
Pisit Wisutmetheekorn	Mahanakorn University of Technology
Piya Warabuntaweekorn	Bangkok University
Pongsack Promwong	Mahanakorn University of Technology
Ponpranod Didsayabutra	California Independent System Operator
Pornchai Chanyagom	Mahidol University
Pornchai Supnithi	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Prajuab Pawarangkoon	Mahanakorn University of Technology
Pramin Artrit	Khon Kaen University
Pranchalee Rattanasakornchai	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Prayoot Akkarackthalin	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Preecha Kocharoen	Sripatum University
Puangtip Phadungrot	Mahanakorn University of Technology
Punyaphat Phumiphak	Mahanakorn University of Technology
Rachu Puchalard	Mahanakorn University of Technology
Rangsipan Marukatat	Mahidol University
Ravee Phromloungsri	Udon Thani Rajabhat University
Rungsimant Sitdhikom	Mahanakorn university of technology
Sakchai Thipchaksurat	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Salitip Sinthusonthishat	Mahanakorn University of Technology
Samphan Phrompichai	Mahanakorn University of Technology
Samroeng Hinthamai	Sripatum University
Sanchai Dechanupaprittha	Kasetsart University
Sangsuree Vasupongayya	Prince of Songkla University
Sansanee Auephanwiryakul	Chiang Mai University





รายชื่อผู้พิจารณาบทความ
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
ครั้งที่ 33

Reviewer	Affiliation
Sanya Khunkhao	Sripatum University
Sanya Mitaim	Thammasat University
Saowapak Thongvigitmance	National Electronics and Computer Technology Center
Sarawan Wongsa	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Sarawuth Chaimool	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Sarun Sumriddetchkajorn	National Electronics and Computer Technology Center
Sermak Uatrongjit	Chiang Mai University
Sirichai Dangeam	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Siriluck Iorepunmance	Suan Dusit Rajabhat University
Siripong Chaysin	Srinakharinwirot University
Siriroj Sirisukprasert	Kasetsart University
Sirivat Poonvasin	Kasetsart University
Sirivit Tacchajedcadarungsri	Khon Kean University
Siriwich Tadsuan	South-East Asia University
Somboon Nuchprayoon	Chiang Mai University
Somboon Sangwongwanich	Chulalongkorn University
Somchai Biansoongnern	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Somchai Niranvarodom	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Somchat Jiriwibhakorn	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Sommart Sang-Ngern	Mahanakorn University of Technology
Somnida Ratanapanachote	Mahidol University
Sompongse Toomsawasdi	Siam University
Somporn Sirisumrannukul	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Somsak Walairacht	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Somying Thainimit	Kasetsart University
Somyot Kaitwanidvilai	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Songkran Kantawong	Bangkok University
Songphol Kanjanachuchai	Chulalongkorn University
Suchada Sitjongsataporn	Mahanakorn University of Technology
Suchada Tantisatrapong	Srinakharinwirot University
Suchart Yammen	Naresuan University
Sumate Nactiladdanon	King Mongkut's University of Technology Thonburi





รายชื่อผู้พิจารณาบทความ
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
ครั้งที่ 33

Reviewer	Affiliation
Sumrit Hongsasutra	Khon Kaen University
Suncat Pranonsatit	Kasetsart University
Suntorn Witosurapot	Prince of Songkla University
Supakit Chotigo	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Supakorn Siddhichai	National Electronics and Computer Technology Center
Supaporn Kiattisrin	University of the Thai Chamber of Commerce
Supatana Auethavekiat	Chulalongkorn University
Supavadee Aramvith	Chulalongkorn University
Supawan Phonhitakchai	Naresuan University
Suphattra Phetnil	Mahanakorn University of Technology
Surachai Chaitusancy	Chulalongkorn University
Surachai Limyingcharoen	Khon Kaen University
Surakam Duangphasuk	Mahanakorn University of Technology
Surapan Airphaiboon	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Suratose Tritilanunt	Mahidol University
Suree Pumrin	Chulalongkorn University
Surin Khomfot	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Suthee Rukkaphan	Kasem Bundit University
Suwat Pattaramalai	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Tanin Duangjan	Srinakharinwirot University
Tanit Malakorn	Naresuan University
Tasanee Chayavanich	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Teeravisit Laohapensacng	Mahanakorn University of Technology
Thanadol Pritranan	Mahidol University
Thanapat Promwattanapakdec	Sripatum University
Thanaphat Sittithumwat	Siam University
Thanapong Suwanasri	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Thavatchai Tayjasanant	Chulalongkorn University
Thawatchai Thangrattanasuwan	Prince of Songkla University
Theekapun Charoenpong	Srinakharinwirot University
Thecrapol Muankhaw	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Thecrayod Wiangtong	Mahanakorn University of Technology





รายชื่อผู้พิจารณาบทความ
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
ครั้งที่ 33

Reviewer

Thecrayut Janjaem
Toempong Phetchakul
Ukrit Watcheruectai
Varakorn Kasemsuwan
Varathana Arjrit
Vech Vivek
Veerachai Malyavej
Viboon Chunkag
Vichai Saecle
Vijit Kinnares
Virasit Intawil
Virote Pirajnanchai
Vladimir Buntilov
Vorapong Silaphan
Wanchai Chankaipol
Wanchai Chimchavec
Wanchai Pijitrojana
Wanchak Lenwari
Wannarat Suntiamorntut
Warawat Tangsrianugul
Warayut Kampeerawat
Watcharachai Wiryasuttiwong
Weerapun Rungseevijitprapa
Wekin Piyarat
Werapon Chiracharit
Wichian Premchaiswadi
Wichit Krueasuk
Wijitra Petchakit
Wiklom Teerapabkajomdet
Wilaiporn Lee
Wipavan Narksarp
Wisut Titiroongruang

Affiliation

Kasem Bundit University
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Srinakharinwirot University
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Mahanakorn University of Technology
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
South-East Asia University
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Khon Kaen University
Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Mahidol University
Mahanakorn University of Technology
Sripatum University
University of the Thai Chamber of Commerce
Thammasat University, Rangsit Campus
King Mongkut's University of Technology Thonburi
Prince of Songkla University
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Mahanakorn University of Technology
Srinakharinwirot University
Chulalongkorn University
Srinakharinwirot University
King Mongkut's University of Technology Thonburi
Siam University
Sripatum University
Walailak University
Prince of Songkla University
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Siam University
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang





รายชื่อผู้พิจารณาบทความ
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
ครั้งที่ 33

Reviewer

Wongwit Senavongse
Worakam Wongsachua
Wuthiporn Loetwassana
Yatongchai Auychai
Yodchanan Wongsawat
Yongyuth Naras
Youthana Kulvitit
Yuttapong Jiraksopakun

Affiliation

Srinakharinwirot University
Ubon Ratchathani University
Mahanakorn University of Technology
Rajamangala University of Technology Isan Sakhon Nakhon Campus
Mahidol University
Siam University
Chulalongkorn University
King Mongkut's University of Technology Thonburi



PW 09

วันพฤหัสบดีที่ 2 ธันวาคม 2553 เวลา 15.00 - 17.00 น.

ห้อง : Chiang Dao 2

ประธานกลุ่มย่อย : รศ.ดร.กิริติ ชยะกุลศิริ

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

PW

PW-044 เวลา 15.00 - 15.20 น.

การออกแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมขนาด 10 kVA โดยใช้คอนเวอร์เตอร์สามระดับแบบโพลีโคมเพลย์

วุฒิชัย จันทน์จางพันธ์ และ ภูษิตวิเศษชัย

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบวงจรที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม (Dynamic Voltage Restorer, DVR) ขนาด 10 kVA แรงดัน 380 V 3 เฟส ความถี่ 50 Hz กระแสไหลสูงสุด 15 A ความถี่การสวิตช์ 20 kHz และสามารถชดเชยแรงดันตกชั่วครู่ได้ทันทีเป็นเวลามากกว่า 0.1 วินาที โดยใช้การชดเชยแรงดันชดเชยด้วยคอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับแบบโพลีโคมเพลย์ เพื่อลดสัญญาณความถี่สูงที่ออกจากรูปแปลงชดเชยแรงดันแบบอนุกรม ผลการจำลองพบว่าอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมสามารถชดเชยแรงดันตกชั่วครู่ได้จริง นอกจากนี้ยังมีการศึกษาถึงข้อดีที่เหนือกว่าคอนเวอร์เตอร์ 2 ระดับแบบดั้งเดิม นอกจากนี้คอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับยังสามารถรับแรงดันที่ผิดปกติได้ดีอีกด้วย

PW-045 เวลา 15.20 - 15.40 น.

การรวมข้อมูลของวีลดีป้องกันเพลิงไหม้ SEL กับฐานข้อมูลคุณภาพกำลังไฟฟ้าของกาฬสินธุ์

วิรัตน์ วัฒนวิชัย และ ศุภณ แสงสุวรรณ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการรวมข้อมูลของวีลดีป้องกันเพลิงไหม้ SEL กับฐานข้อมูลคุณภาพกำลังไฟฟ้าของกาฬสินธุ์ การทำฐานข้อมูลคุณภาพกำลังไฟฟ้าของประเทศไทย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคจะต้องซื้อเครื่องมือวัดคุณภาพกำลังไฟฟ้าอีกจำนวนมาก แต่สามารถใช้ประโยชน์จากข้อมูลวีลดีป้องกันเพลิงไหม้เพื่อลดต้นทุนได้ ประสิทธิภาพในการจัดซื้อเครื่องมือวัดข้อมูลของวีลดีป้องกันเพลิงไหม้สามารถนำมาใช้ฐานข้อมูลคุณภาพกำลังไฟฟ้าของกาฬสินธุ์ได้ โดยไม่ต้องซื้อเครื่องมือวัดคุณภาพกำลังไฟฟ้าและแบ่งประเภทของข้อมูลก่อนจึงจะนำมาใช้ผลการวิจัยสามารถนำมาใช้ข้อมูลแรงดันตกเกิน และสูงเกิน ของข้อมูลวีลดีป้องกันเพลิงไหม้กับฐานข้อมูลคุณภาพกำลังไฟฟ้าของกาฬสินธุ์ได้ และถ้าพัฒนาผลการวิจัยนี้ไปใช้ในอนาคตจะสามารถทำฐานข้อมูลแรงดันตกเกินและสูงเกินของประเทศไทยได้

PW-046 เวลา 15.40 - 16.00 น.

การควบคุมร่วมกับของอิเล็กทรอนิกส์และตัวเก็บประจุไฟฟ้าเพื่อทำเสถียรภาพระบบไมโครกริด

ธีรวิทย์ ธีระธรรม, อธิระชัย เขมพร, นฤมล บงกช และ กิทธิเดช ธีระวิเศษชัย

ในระบบไมโครกริด ความไม่มั่นคงของการผลิตกำลังไฟฟ้าของแหล่งจ่ายพลังงานหมุนเวียน เช่นลม และแสงอาทิตย์ ส่งผลให้เกิดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า เพื่อที่จะลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบ บทความนี้เสนอแนวทางการประยุกต์ใช้อิเล็กทรอนิกส์ (Active Electrolyzer: AE) ที่ติดตั้งอยู่ในระบบ ซึ่งทำหน้าที่รับกำลังไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอจากกระบวนการผลิตไฮโดรเจนเป็นอินพุตให้กับเซลล์เชื้อเพลิง ทำการควบคุมเพื่อลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้า แต่เนื่องจากที่ติดตั้งของ AE มีขนาดที่ติดตั้งที่เล็ก จึงไม่สามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในกรณีที่เกิดสิ่งรบกวนรุนแรงได้ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้นำเสนอการควบคุมร่วมกันของ AE กับตัวทำเสถียรภาพระบบไฟฟ้ากำลัง (Power System Stabilizer: PSS) ซึ่งติดตั้งอยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้ง ซึ่งการควบคุมการรับกำลังไฟฟ้าของ AE และการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ติดตั้งของ PSS อย่างเหมาะสม จะทำให้ลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบได้ เพื่อให้ PSS และ AE สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยวิธีของ AE และ PSS ได้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมโดยวิธีลองผิดลองถูก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การควบคุมร่วมกันของ AE และ PSS ที่นำเสนอสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้ดีกว่าการควบคุมของ AE หรือ PSS อย่างใดอย่างหนึ่ง

PW-047 เวลา 16.00 - 16.20 น.

การศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอาคารเรียน

พัชรวิทย์ โทษะ วิจิต ตรีสุข ธนภัทร พรมวิวัฒน์ภักดี และ กิทธิ ชยะกุลศิริ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอาคารเรียน ค่าเกณฑ์การใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารเป็นค่าที่แสดงการใช้ปริมาณพลังงานไฟฟ้าต่อการใช้ประ โยชน์ภายในอาคาร ดังนั้นจึงเป็นค่าที่แสดงถึงต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของอาคาร ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์วิธีการใช้พลังงานของอาคารเรียนโดยใช้อาคารเรียนภายในมหาวิทยาลัยศรีปทุมเป็นกรณีศึกษา โดยดำเนินการศึกษาในอาคารเรียนจำนวน 3 อาคาร คือ อาคาร คร.สุข พุทธาภรณ์ (อาคาร 1) อาคาร 30 ปีศรีปทุม (อาคาร ๒) และอาคารสยามบรมราชกุมารี (อาคาร ๖) และจัดทำข้อมูลเกณฑ์การใช้พลังงานไฟฟ้าของอาคารได้ 2 รูปแบบ คือ 1. เกณฑ์การใช้พลังงานไฟฟ้าต่อจำนวนผู้ใช้อาคารและ 2. เกณฑ์การใช้พลังงานไฟฟ้าต่อพื้นที่ปรับอากาศที่ใช้จริง จากการศึกษาพบว่าเกณฑ์การใช้พลังงานของอาคาร 5 มีค่าเฉลี่ยที่สูงกว่า อาคาร 1 และ อาคาร ๑ ทั้ง 2 แบบ ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าอาคาร 5 มีพื้นที่หลังคาพลังงานไฟฟ้าสูงกว่าอาคารเรียนอื่นๆ ซึ่งจากข้อมูลเกณฑ์การใช้พลังงานที่ได้จะเป็นประโยชน์ในการบริหารจัดการต้นทุนการใช้พลังงานและการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอาคารเรียนของมหาวิทยาลัยในอนาคตต่อไป

PW-048 เวลา 16.20 - 16.40 น.

เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าชนิด 3 เฟส

สุวิทย์ ภูษิตกลาง อัจฉรา นະไมคำ ณรงค์ นันทกุล

ศุภกัญญา ศรีตรา และ เรวัต วัฒนวิชัย

บทความนี้ได้นำเสนอการสร้างเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าชนิด 3 เฟสแบบดิจิทัล โดยเป็นการนำไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ MSPC30F401 มาประยุกต์ใช้เป็นตัวประมวลผลสัญญาณที่อยู่ในรูปของอนุพัทธ์ของหน่วยวัดกระแสแรงดัน แล้วจะนำค่าที่ได้ส่งไปประมวลผลจากสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ ผลที่ได้จะถูกส่งไปแสดงที่หน้าจอแอลซีดี ขนาด 16 คิวอิงค์ 2 บรรทัด อุปกรณ์ดังกล่าวสามารถใช้งานได้ตั้งแต่กระแสไฟฟ้าสูงสุดถึง 40 แอมแปร์ ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 3 เฟส 4 สาย พิกัดแรงดัน 380/220 โวลต์ สามารถเลือกโหมดการแสดงผลได้ 4 โหมดด้วยกัน ตามลักษณะการใช้งานไปใช้งาน และค่าความผิดพลาดในการอ่านค่าอยู่ที่ ±.5%

PW-049 เวลา 16.40 - 17.00 น.

Capacitor Location and Size Determination for Reduce Energy Losses in a Distribution Feeder of Lao PDR

Khamphoungem Thakul, Pansathai Buarri and Nitigath Triyongkharui

Capacitor location and size in distribution systems is very important for obtaining their maximum potential benefits. This paper presents a method to obtain the approximate size and location of capacitor at any bus in the distribution feeder. The proposed method is based on minimizing power losses in the distribution system. The power loss optimization can also be used to determine the approximate location and size of the capacitor bank embedded in the distribution feeder, including power losses, total annual cost, energy losses and the available rating of capacitor bank. Results indicated that, the distribution systems are improved using the proposed method with a case study: Viengkay province in Lao PDR. Comparison of distribution feeder at peak-load before and after installing the capacitor show improvement of 25.26 % on total annual cost, 33.28 % on power and energy losses. The proposed method can be a benefit in the distribution system analysis for planning and operation.



การออกแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมขนาด 10 kVA โดยใช้คอนเวอร์เตอร์สามระดับแบบไดโอดแคลมป์

Design of 10 kVA Dynamic Voltage Restorer by Three-Level Diode-Clamped Converter

วุฒิไกร จันทร์ขามเรียน และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิเกิดพิชญ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ธัญบุรี

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี ปทุมธานี 12110

โทรศัพท์ : 0-2549-3571 โทรสาร : 0-2549-3422 E-mail: krischonmcb@en.mutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบวงจรที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม (Dynamic Voltage Restorer, DVR) ขนาด 10 kVA แรงดัน 380 V 3 เฟส ความถี่ 50 Hz กระแสไหลสูงสุด 15 A ความถี่การสวิตช์ 20 kHz และสามารถชดเชยแรงดันตกชั่วคราวได้ยาวนานที่สุดเป็นเวลา 0.1 วินาที โดยใช้การสร้างแรงดันชดเชยด้วยคอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ เพื่อลดสัญญาณความถี่ที่เกินจากอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม ผลการจำลองพบว่าอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมสามารถชดเชยแรงดันตกชั่วคราวได้จริง นอกจากนี้แรงดันเอาต์พุตก็ยังมีค่าที่เกินของสัญญาณน้อยกว่าคอนเวอร์เตอร์ 2 ระดับแบบคั้งเดิม นอกจากนี้คอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับยังสามารถรับแรงดันที่เกินได้อีกด้วย

คำสำคัญ: อุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม, คอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์

Abstract

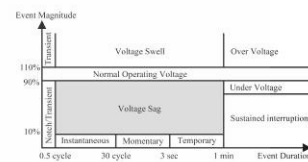
This paper presents design of dynamic voltage restorer (DVR) by three-level diode-clamped converter. The rating of DVR is 10 kVA, 380 V with 3 phase system, 15 Amax, and 10 kHz of switching frequency. DVR can compensate the voltage sag within 0.1 second of sag duration. This compensator converter selected the three-level diode-clamped topology for the harmonic reduction. The simulation result shows that DVR can compensate the voltage sag effectively. In addition, voltage output of three-level diode-clamped converter can also reduce harmonic of voltage compared with two-level converter.

Keywords: Dynamic Voltage Restorer, Three-Level Diode-Clamped Converter

1. คำนำ

แรงดันตกชั่วคราว (Voltage Sag) เป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่ทำให้โรงงานอุตสาหกรรมเกิดปัญหาในขั้นตอนการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังควบคุม โดยส่วนใหญ่

จะเกิดขึ้นเมื่อเกิดการผิดปกติ (fault) ในระบบไฟฟ้า และเมื่อเกิดปัญหานี้ทำให้ผู้ประกอบการจำเป็นต้องป้องกัน โดยเฉพาะโหลดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันสูง รูปที่ 1 แสดงนิยามของแรงดันตกชั่วคราวในระบบไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1159-1995 [1]



รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงแรงดันตามมาตรฐาน IEEE 1159-1995

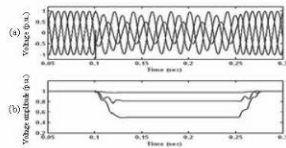
อุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม (Dynamic Voltage Restorer, DVR) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ติดตั้งเพื่อชดเชยแรงดันไฟฟ้าส่วนที่ขาดหายไปในช่วงที่เกิดแรงดันตกชั่วคราวเพื่อให้โหลดได้รับแรงดันปกติ (1.0 p.u.) ในอดีตที่ผ่านมามีงานวิจัยเกี่ยวกับอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมอย่างมากมาย เช่น การออกแบบโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบรอนเดียว ซึ่งสามารถควบคุมค่าออกของแรงดันได้ แต่ความไวของการควบคุมไม่ดี และไม่ได้นำเสนอการควบคุมแบบละเอียด [2] จากนั้นจึงได้มีการนำเสนอวิธีการใหม่เข้าไปในระบบที่ไม่มีกรเปรียบเทียบกับระบบที่ผ่านอย่างชัดเจน [3] ล้อมาได้มีการพยายามแสดงให้เห็นถึงการวิเคราะห์การลู่ของระบบซับซ้อนให้เห็นชัดเจน แต่ยังขาดข้อมูลพื้นฐาน เพื่อให้เข้าใจง่ายอีกมาก [4] ถึงแม้ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยต่างๆสามารถชดเชยแรงดันตกชั่วคราวได้ก็ตาม ก็ยังมีความไม่ชัดเจนในส่วนตัวควบคุมของตัวชดเชยแรงดันแบบอนุกรม จึงได้มีการพยายามที่จะลดความยุ่งยากของอัลกอริทึมในส่วนของการควบคุม แต่พบว่าขณะที่คอนเวอร์เตอร์ทำการสร้างแรงดันจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนขึ้นและไปรบกวนการตรวจวัดสัญญาณ [5]

ดังนั้นบทความนี้จึงต้องการนำเสนอการวิเคราะห์และออกแบบวงจรที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน พร้อมทั้งนำเสนอวิธีการลดสัญญาณความถี่ที่เกินที่แรงดันด้านออกของคอนเวอร์เตอร์ ด้วยการใช้อุปกรณ์คอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับแบบไดโอดแคลมป์ในการผลิตแรงดันเข้าสู่ระบบไฟฟ้า โดยมีการนำเสนอเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

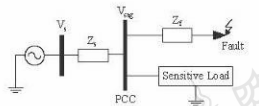


2. แรงดันตกชั่วคราว (Voltage Dip or Sag)

แรงดันตกชั่วคราว คือ การลดลงของแรงดันแหล่งจ่ายในช่วงเวลาสั้นๆ ตั้งแต่ครั้งรูปคลื่นแรงดันจนถึง 1 นาทีและกลับสู่ค่าปกติ ซึ่งก็คือช่วงระยะเวลาของการเกิดแรงดันตกชั่วคราว ค่าประสิทธิภาพ (rms) ของแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.9 p.u. เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าของระบบที่ 1 p.u. [1] โดยส่วนใหญ่เกิดจากความผิดปกติในระบบไฟฟ้าดังรูปที่ 2 หรือการเริ่มเดินเครื่องของภาระไฟฟ้าขนาดใหญ่ มีตัวแปรที่สำคัญอยู่ 2 ตัวคือขนาดและระยะเวลาที่เกิดแรงดันตกชั่วคราว



รูปที่ 2 ระบบไฟฟ้าที่เกิดแรงดันตกชั่วคราวเนื่องจากความผิดปกติ



รูปที่ 3 ความผิดปกติในระบบไฟฟ้าที่ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วคราว

แรงดันตกชั่วคราวที่ตกคร่อมสายจ่ายโหลดสามารถหาได้จากสมการ (1)

$$V_{sag} = V_s \frac{Z_f}{Z_1 + Z_f} \tag{1}$$

3. การชดเชยแรงดันตกชั่วคราว

3.1 อุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม

อุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมหรือ DVR โดยทั่วไปประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ ส่วนแปลงพลังงาน ส่วนที่ใช้เก็บพลังงานและส่วนการควบคุม [5] วิธีการชดเชยแรงดันของ DVR มี 3 วิธี [6] คือ

1. Pre-Sag Compensation
2. in-Phase Compensation
3. Energy Optimization Technique

สำหรับบทความนี้จะเลือกใช้วิธีการชดเชยแบบที่ 1 ซึ่งสามารถชดเชยได้ทั้งขนาดและมุมเฟสของแรงดัน

3.2 การควบคุมอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม

การทำงานของระบบควบคุมเริ่มจาก เมื่อเกิดแรงดันตกชั่วคราวในระบบ ส่วนควบคุมก็จะตรวจสอบว่าเกิดแรงดันตกชั่วคราวจริงหรือไม่เมื่อมีสัญญาณว่าเกิดแรงดันตกชั่วคราวแล้วส่วนสร้างแรงดันอ้างอิงก็จะทำการสร้างแรงดันอ้างอิงเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับแรงดันจริงในระบบ จากนั้นก็จะนำแรงดันที่ได้จากการเปรียบเทียบนี้ไปมอดูเลตความกว้าง

พัลส์ (PWM) เพื่อขับนำคอนเวอร์เตอร์ให้ฉีดแรงดันเข้าสู่ระบบ บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 4

3.3 คอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับแบบไดโอดแคแลมป์

คอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับ 1 เฟสแบบไดโอดแคแลมป์ แสดงดังรูปที่ 5 จะมีการใช้แรงดันไฟตรงเป็น 3 ระดับ ซึ่งไดจากตัวเก็บประจุสองตัวต่ออนุกรมกันเพื่อแบ่งแรงดันจากแหล่งจ่ายไฟตรง คอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับมีชื่ออีกว่าคอนเวอร์เตอร์ 2 ระดับคือ มีระดับแรงดันที่เพิ่มขึ้น ทำให้กระแสเอาต์พุตมีความคิดที่ค่อนข้างน้อยลง และช่วยลดค่ากระแสพุ่งเข้า (Inrush current) ที่มีต่ออุปกรณ์สวิตซ์เมื่อเปรียบเทียบกับคอนเวอร์เตอร์ 2 ระดับที่มีการใช้แรงดันดีซีลิ้งเท่ากัน ซึ่งวิธีการสร้างสัญญาณ PWM สำหรับ Multi-Level Converter แบ่งออกเป็น 3 ชนิด [7] คือ

1. APOD: Alternative Phase Opposition Disposition
2. POD: Phase Opposition Disposition
3. PD: Phase Disposition

จากเทคนิคทั้ง 3 ชนิดข้างต้นนี้ เทคนิคการสร้างสัญญาณ PWM แบบ PD จะก่อให้เกิดฮาร์มอนิกส์น้อยที่สุด [8] ดังนั้นบทความนี้จะเลือกใช้เทคนิคแบบ PD ในการสร้างสัญญาณ ดังรูปที่ 6 ซึ่งข้อดีของเทคนิคนี้คือ ความถี่ต่ำสุดของฮาร์มอนิกส์เกิดขึ้นที่ความถี่ 2 เท่าของความถี่การสวิตซ์ นอกจากรวมฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่ 2 เท่าของความถี่การสวิตซ์ยังเป็นศูนย์ คงเหลือแต่แถบข้าง (Sideband) ดังรูปที่ 7 ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ง่ายต่อการกรอง

เนื่องจากบทความนี้ DVR จะถูกติดตั้งที่ระบบไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำ นิยมใช้คอนเวอร์เตอร์แบบ 1 เฟสจำนวน 3 ตัวและต่ออนุกรมเข้ากับระบบไฟฟ้าโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 8

3.4 การออกแบบค่าพารามิเตอร์ในวงจร

3.4.1 การคำนวณพารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับพลังงาน

เนื่องจากตัวเก็บประจุเป็นที่ยึดพลังงานที่มีความจุกัก ดังนั้นจึงสามารถหาค่าตัวเก็บประจุได้จากสมการ (2)

$$C_{bus} = \frac{2V_{com(max)} I_{com(max)} t_{com(max)}}{(V_{sag(max)} - V_{bus(min)})} \tag{2}$$

3.4.2 การออกแบบวงจรถูกกรอง

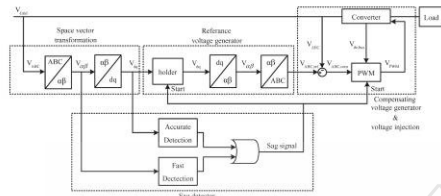
จากรูปที่ 9 เป็นวงจรมวลของวงจรถูกกรอง กำหนดให้แรงดันตกคร่อม L มีค่าไม่เกิน 5% ของแรงดันปกติ จะได้

$$I_f \leq \frac{0.05V_{normal}}{2\pi f_{min} L} \tag{3}$$

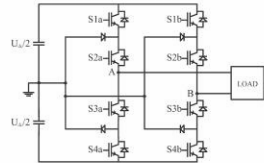
กำหนดให้ค่าของกระแสกระแสที่ผ่านวงจรถูกกรองมีค่าไม่เกิน 15% ของกระแสที่กิดอินเวอร์เตอร์ จะได้

$$L_f \geq \frac{V_{Lf}}{2\Delta I_{ov} f_s} \tag{4}$$

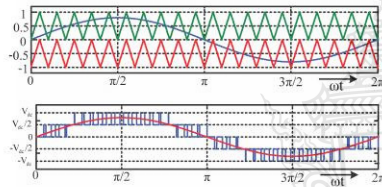




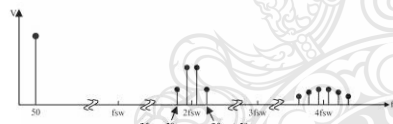
รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม



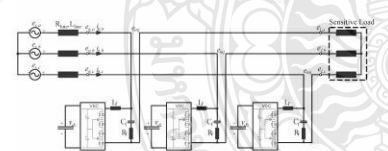
รูปที่ 5 โครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับแบบ 1 เฟส



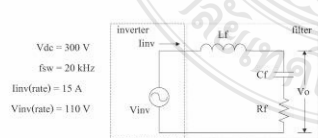
รูปที่ 6 สัญญาณของคอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับ โดยใช้ PWM แบบ PD



รูปที่ 7 สเปคตรัมของแรงดันที่ใช้การสร้างสัญญาณ PWM แบบ PD



รูปที่ 8 วงจรการต่อคอนเวอร์เตอร์กับระบบไฟฟ้าระดับแรงดันต่ำ



รูปที่ 9 วงจรสมมูลของวงจรกรองที่ใช้ในการออกแบบ



กำหนดค่ากระแสเพิ่มเติมที่ไหลไม่ให้เป็น 5% ของกระแสเพิ่มเติมที่ไหลผ่าน C_f สามารถหาค่า C_f, R_f ได้จากสมการ (5) และ (6) ตามลำดับ

$$C_f \geq \frac{20}{2\pi f_s R_{f,rate}} \quad (5)$$

$$R_f = 2 \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \quad (6)$$

จากรูปที่ 9 สามารถเขียนอัตราส่วนระหว่างแรงดันด้านออกกับแรงดันที่อินเวอร์เตอร์สร้างได้ดังสมการที่ (7)

$$\frac{V_{inv}}{V_{inv}} = \frac{C_f R_f s + 1}{C_f L_f s^2 + C_f R_f s + 1} \quad (7)$$

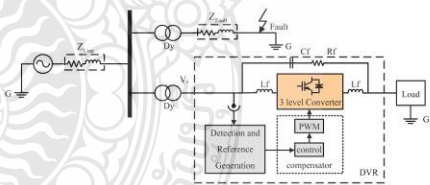
3.4.3 การกำหนดเกณฑ์ในการพิจารณาแรงดันตกชั่วครู่

ในบทความนี้เลือกให้แรงดันสเปคเตอร์ต่ำกว่า 198 V เป็นเงื่อนไขการเกิดแรงดันตกชั่วครู่ ส่วนเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงมุมเฟสหาได้จากสมการที่ (8) ซึ่งจะใช้จำนวนข้อมูลการสุ่มเท่ากับ 200 ค่า

$$\Delta\theta_{normal} = \frac{360}{No.sample} \quad (8)$$

4. การจำลองการทำงาน

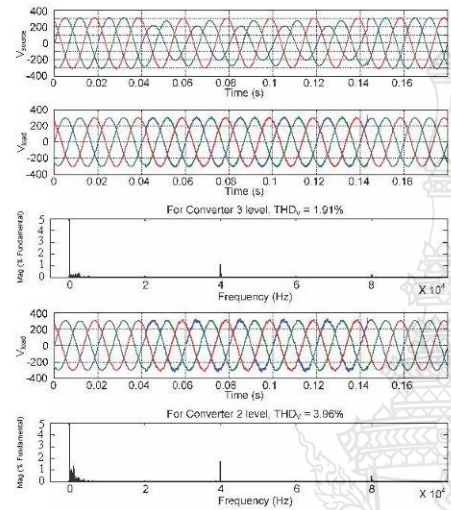
การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink จะนำอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมต่อเข้าไปทางด้านขั้วของหม้อแปลง ดังรูปที่ 10 โดยกำหนดให้การคิดพียงในระบบไฟฟ้าเกิดขึ้นวันที่ 0.04 เป็นเวลา 0.1 วินาที แรงดันแหล่งจ่าย 3 เฟสเสถียรตามคุณสมบัติของหม้อแปลงมีค่า 380 V ที่ความถี่ 50 Hz ใช้ความถี่การสวิตช์ 20 kHz $C_f = 8\mu F$, $L_f = 2mH$, $R_f = 32\Omega$, $C_{inv} = 66,000\mu F$ เงื่อนไขการเกิดแรงดันตกชั่วครู่ขนาดแรงดัน $|V| \leq 198V$ ในการเปลี่ยนแปลงมุมเฟส $\Delta\theta > 1.85^\circ$ หรือ $\Delta\theta < -1.75^\circ$ และใช้โหลด RL ซึ่งมีค่า 13 Ω และ 19mH ต่ออนุกรมกัน



รูปที่ 10 วงจรการจำลองการทำงาน

จากการจำลองการชดเชยแรงดันตกชั่วครู่ ได้ผลดังรูปที่ 11 และรูปที่ 12 จะเห็นว่าทั้งการชดเชยแบบใช้คอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับและ 2 ระดับสามารถชดเชยแรงดันตกชั่วครู่ได้เหมือนกัน แต่ในวงจรที่ใช้คอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับจะเห็นได้ชัดว่าความถี่สวิตชิ่ง (f_s) เท่ากับ 40 kHz และ 80 kHz มีค่าน้อยกว่าวงจรที่ใช้คอนเวอร์เตอร์ 2 ระดับมาก ซึ่งค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกสรวมของแรงดัน (THD_v) มีค่าเท่ากับ 1.91%

สำหรับผลจากการเกิดความคิดพร้อมแบบ 1 เฟสซึ่งมีค่าน้อยกว่าในวงจรที่ใช้คอนเวอร์เตอร์ 2 ระดับถึง 2.05% และในวงจรที่ใช้คอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับมีค่า THD_v เท่ากับ 1.83% ซึ่งมีค่าน้อยกว่าวงจรที่ใช้คอนเวอร์เตอร์ 2 ระดับถึง 1.90% สำหรับผลจากการเกิดความคิดพร้อมแบบ 2 เฟส



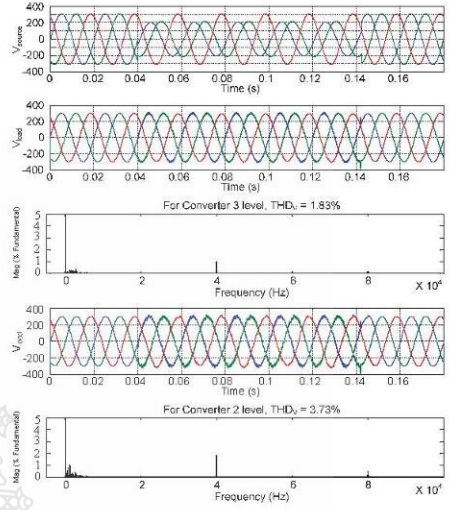
รูปที่ 11 การชดเชยแรงดันด้วยคอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับและ 2 ระดับตามลำดับ กรณีเกิดความคิดพร้อมแบบ 1 เฟสที่เฟส A ต่อกราวด์

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์หอคอมบวมวงจรที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนและลดสติปัญญาความคิดเพื่อนที่ออกจาก DVR โดยใช้คอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับแบบไดโอดแคปมปิ้งจากผลการจำลองสรุปได้ว่าการชดเชยแรงดันด้วยคอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับที่นำเสนอ สามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้ดี แรงดันที่ไหลลงขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวมีความใกล้เคียงกับขณะปกติตามที่ต้องการ เมื่อนำมาเทียบกับคอนเวอร์เตอร์ 2 ระดับจะเห็นได้ว่าถึงแม้จะสามารถชดเชยแรงดันตกชั่วคราวได้เหมือนกันแต่รูปคลื่นแรงดันที่ได้จากคอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับมีความผิดเพี้ยนของสติปัญญาน้อยกว่ามาก เป็นผลให้อารมณ์นักที่เข้าสู่ระบบไฟฟ้ามีค่าน้อยตามไปด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน มทร.ธัญบุรี ที่ช่วยในการสนับสนุนข้อมูลและสถานที่ และขอขอบพระคุณกองทุนวิจัยและพัฒนายุทธศาสตร์เทคโนโลยีของ กฟผ. ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยการสร้างต้นแบบ DVR เพื่อลดผลกระทบของแรงดันตกชั่วคราว



รูปที่ 12 การชดเชยแรงดันด้วยคอนเวอร์เตอร์ 3 ระดับและ 2 ระดับตามลำดับ กรณีเกิดความคิดพร้อมแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส A กับ B

เอกสารอ้างอิง

- [1] "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", IEEE Standards on Power Quality, pp.12, June 14, 1995.
- [2] Liu, J. W., Chui, S. S., & Chen, S., "Design of step dynamic voltage regulator for power quality enhancement", IEEE Transactions on Power Delivery, 18(4), 1403 – 1409, 2003.
- [3] Awad, H., Svensson, J., & Bullen, M. H., "Static series compensator for voltage dips mitigation", IEEE Bologna Power Tech Conf, Bologna, 2003.
- [4] Ghosh, A., Jindal, A. K., & Joshi, A., "Inverter control using output feedback for power compensating devices", TENCON 2003, Conference on Convergent Technologies for Asia-Pacific Region (pp.48 – 52), 2003.
- [5] Kittawat Chiangchin., "Simplification of control algorithms for voltage sag compensators from practical viewpoints", Thesis, Electrical Engineering, chulalongkorn university, 2006.
- [6] Ahmed A. Hela, & Mohamed H. Saied, "Dynamic Voltage Restorer Adopting 150° Conduction Angle VSI", IEEE Electrical Power & Energy Conference, 2008.
- [7] Bhabani Shankar Pattnaik, Debendra Kumar Dash & Joydeep Mukherjee., "Implementation of PWM based Firing Scheme for multilevel Inverter using microcontroller", Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, 2008-09.



ARITSB

- Group 1** Power Electronics, Electric Machines, Motor Control and Drive, Measurement, Control and Robotics.
- Group 2** Power System, Transmission and Distribution, High Voltage and Electrical Energy Generating Systems.
- Group 3** Renewable Energy, Energy Saving Technologies, Industry Specific Energy Conversion and Conditioning Technologies.
- Group 4** Telecommunication, Electronics, Information and Communication Technologies, Antennas, Microwave Theory and Techniques.
- Group 5** Computer Technologies and Network, Computer Graphics, Machine Learning and Human-Computer Interaction.
- Group 6** Education in Electrical Engineering, Simulation Software and Design tools, Related Topics in Electrical Engineering.

Between 9–11 March 2011
 At ARIT Nonthaburi Campus
 (North Zone) Rajamangala University
 of Technology Suvarnabhumi

enet3+
 ELECTRICAL ENGINEERING NETWORK 2011



เกรียงไกร เหลืองอำพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดิพิชัญญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
กิจจา ลักษณ์อำนาจพร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
กิตติวงศ์ สุธรรมโน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ศูนย์กลาง
กิตติวุฒิ จีนะบุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ศูนย์กลาง
เกษม เนื้อแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
โกศล นิธิโสภาค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
โกศล โอฬารไพโรจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
จงเจริญ คุ้มบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
จตุรงค์ จตุรเชษฐ์สกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
จรินทร์ จุลวานิช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
จัตตุฤทธิ์ ทองปรอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
เจนศักดิ์ เอกบูรณะวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตศาลายา
เจนฉา พรหมเกษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
ฉัตรชัย สุขพิทักษ์สกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เฉลิมชาติ มานพ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง
เฉลิมพล เรื่องพัฒนาวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
เฉลิมชัย เกตุแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ชลากร สุวรรณสิทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ชัยณรงค์ วิเศษศักดิ์วิชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ชาญชัย เดชธรรมรงค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ชาญวิทย์ ตั้งศิริวรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ชูศักดิ์ กมลขันติธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ไชยยันต์ บุญมี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ณัฐภัทร พันธุ์คง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ณรงค์ นันทกุศล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ณรงค์ฤทธิ์ พิมพ์คำวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ดาก
ณัฐพงศ์ สนองคุณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ



ณัฐพงษ์ พันธุณะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
ณัฐพล หาอุปละ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
คนุพล คำปี่ญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
คุณย์พิเชษฐ์ ฤกษ์ปรีดาพงศ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
คุณิต อุทิศสุนทร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ตะวัน ชุนอาสา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
เด็มศักดิ์ แสนเพียง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
เดือนใจ อาชีวะพานิช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ทง ลานธารถอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
ทักษะ ถมทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ลาก
ธงชัย กล้ายคลัง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
ธนวัฒน์ ฉลาคสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
ธวัช เกิดชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
ธานี สมวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ธีรพล เหมือนขาว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นคร ทองเล็ก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นครินทร์ ศรีปี่ญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นพพร พันธ์ระกิติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
นภัทร วัฒนเทพินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
นราวิทย์ กิจเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นรินทร์ หลีกทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นาคยา กล้ายเรือง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ศรีราชา
นิติพงษ์ ป่านกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นิติพงษ์ สมไชยวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
นิพนธ์ วงศ์ทา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
นิพนธ์ สุนทรหุด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
นิพนธ์ เกตุจ้อย	มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
นิลมิต นิลาส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ



นิวัตร จารุวาระกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
บุญช่วย เจริญผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
บุญยัง ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปฎิวัติ บุญมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ประกาศิต ศรีทะแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
ประดิษฐ์ เตือนหมื่นไวย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
ประดิษฐ์ แสงยศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ประทีป แสงสว่าง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ประมุข อุณหเลขกะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ประวิช เปรียบเหมือน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ปราโมทย์ อนันต์วราพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ปรีชา สาครรังษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ศ.ณัฐวุฒิ โสมะเกษครินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พร้อมศักดิ์ อภิรติกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พันธ์ พิริยววรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
พิชัย เพ่งพันธุ์พันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
พิชัย อยู่ปล้ำ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
พินิจ ศรีธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
พินิจ จิตจริง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พิเลทธิ วิสุทธิเมธีกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
พิสิษฐ์ ลีวธนกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
พิรพล จิราพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
พูนศรี วรรณการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
ภัควัฒน์ จันทร์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ภาณุมาศ แสนพวง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
มงคล คำนบัวรุ่งตระกูล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
มังกร ศิริจันทร์ชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
มานพ ธนะคำดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
มาลียา ตั้งจิตเจษฎา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ



มีชัย แจ่มใส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
ยุทธนา กันทะพะยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ยุทธนา ชำสุวรรณ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รัก สกุลพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
เรวัต ธรรมสนธิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
วณพันธ์ วิทยุฉวี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
วรรณรีย์ วงศ์ไครรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ศูนย์กลาง
วิชัย สิมมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
วันชัย ทรัพย์สิงห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
วารุณี กรุดพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
วารุณี ศรีสงคราม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
วิจิตร กิณเรศ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิชัย ผดุงศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
วิชา จันทิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
วิชิต สุทธิพร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
วิเชียร ทรัพย์รัตนศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
วิฑูรย์ พรหมมี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
วินัย เมธาวิติต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
วิบูลย์ ชื่นแขก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
วิรัตน์ นักรรองดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
วิโรจน์ เพชรพันธุ์ศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
วิวัฒน์ ทิพจร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
วิวัฒน์ เจริญสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
วีระ ชันยากิรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
วีระชัย จรบุรมย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
วีระยุทธ รัตนคุณศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
วุฒิชัย สร้างงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ศูนย์กลาง
วุฒิพล ชาราธิร์เศรษฐ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ศรีศักดิ์ น้อยไรรุภูมิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ



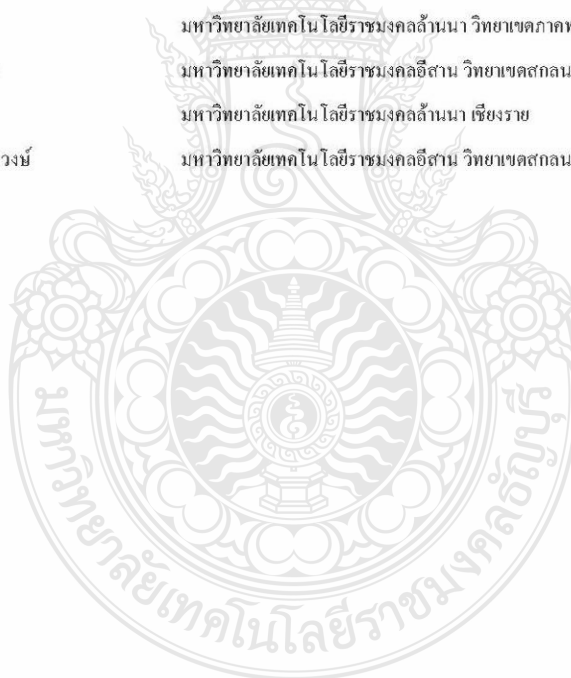
ศักดิ์ชัย ระวีกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
ศิริชัย แดงแอม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศิริชัย ลาภาสระน้อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
สุภลักษณ์ ศรีตา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
สุภาวดี เนตรโพธิ์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
สมเกียรติ อุดมพรมากุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
สมเกียรติ ทองแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
สมชัย หิรัญวโรดม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
สมชาย เขียนสูงเนิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
สมนึก เกื้อสอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ดาก
สมพร ศรีวิวัฒน์พล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
สยาม ประจุกตะศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
สรรรพผล คุ้มทรัพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
สรายุทธ ทองกุลภัทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
สันติ อัครศรีพงษ์ศรี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
สันติภาพ โคลตะเล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ดาก
สาคร ปันดา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
สาธิต รุ่งสว่าง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
สายชล ชูดเชื้อจิ้น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
สำเริง สันทำไม้	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
สุชุม จุฬางกูรศิริวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
สุชาติ จันทร์จรมานิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
สุทธินันท์ ตันโพธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ศูนย์กลาง
สุพจน์ จันทร์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
สุรเชษฐ เฉลยพุ่ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ศูนย์พระนครเหนือ
สุรพันธ์ โล่ห์เพชร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
สุรศักดิ์ อยู่สวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
สุรสิทธิ์ แสนทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ดาก



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 3



สุรินทร์ แหงมงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
สุริยา แก้วอาษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
สุวัลยา ศิริศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
องอาจ แสกลใหม่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อนนท์ นำอิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
อนันต์ โสภิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อโนชา รุ่งโรจน์วัฒนศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อัศวิน แก้วสิงห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
อาจารย์ชอບคุณ ไชยวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
อากาศพล มหาวิทยาลัยระ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
อินฉา บุญญาอรุณเนตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
อุคม เกื้อเทพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ดาก
อุเทน คำน่าน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตภาคพายัพ
อุรา คันมีแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
เอกชัย ชัยดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
เอกวิทย์ หายังวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร





สารบัญ



การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 3

PEI_19	การพัฒนาเครื่องช่วยผู้ป่วยหัดเดินด้วยวงจรสวิตช์ซึ่งประสิทธิภาพสูง	77
PEI_20	บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ สวิตช์ที่แรงดันศูนย์และ dv/dt มีค่าต่ำที่มีตัวประกอบกำลังไฟฟ้าสูงบนฐานวงจรแปลงพันคลาสสิก	81
PEI_21	การออกแบบระบบควบคุมแบบ Smith Predictor ด้วยวิธีแผนผังสัมประสิทธิ์สำหรับระบบควบคุมอุณหภูมิ	85
PEI_22	การควบคุมวงจรแปลงผันไฟตรง-ไฟตรงด้วยตัวควบคุมพีไอดีที่มีการปรับอัตราขยายเทอมสัดส่วน	89
PEI_23	การสำรวจ ออกแบบ และสร้างระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบกระจาย เพื่ออุปกรณสำหรับสื่อการเรียนการสอนของโรงเรียน ศษช บ้านพลังแห อ.อมก๋อย จ.เชียงใหม่ ตอนที่ 2	93
PEI_24	การจำลองระบบควบคุมแรงดันคู่แบบควบคุมเดียว สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรขนาด 1 kW ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink	97
PEI_25	ชุดตรวจวัดอุณหภูมิ และตรวจวัดปริมาณแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ชีวมวล (เกลบ) แบบอับอากาศ	101
PEI_26	การควบคุมกำลังไฟฟ้า โดยเชื่อมต่อเข้ากริดระบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิดกระตุ้นสองทาง	107
PEI_27	เทคนิคการป้องกันระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าในขณะเกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ	111
PW2_1	ผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของขั้วลิตซ์อาร์จต่อการเกิดโคโรนาลิตซ์อาร์จของเครื่องลดทอนเชิงไฟฟ้าสถิตแบบท่อทรงกระบอกซ้อนกัน	114
PW2_2	การทดสอบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าภายใต้สภาวะแปรอะเปื่อนมาตรฐาน ICE 507	119
PW2_3	Network Reconfiguration for Loss Reduction and Improved Voltage Profile in Distribution System with Distributed Generation using Genetic Algorithm	123
PW2_4	การศึกษากาเรว่งของกำลังไฟฟ้าในระบบ Inter area mode ในระบบสายส่ง 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเมื่อต่อร่วมกับผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนรายย่อย	127
PW2_5	การศึกษาวีธีผลิตก๊าซออกซิเจนในอากาศด้วยเทคนิคสนามไฟฟ้าร่วมกับริงส์อัลตราไวโอเลต	131
PW2_6	การพัฒนาฐานข้อมูลอย่างเป็นระบบสำหรับระบบจำหน่ายแรงดันสูงปานกลางของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เพื่อการทบทวนการจัดลำดับเวลาการทำงานของระบบป้องกันให้สัมพันธ์กัน	135
PW2_7	ผลกระทบของการใช้เบดเคอร์รี่ตะกั่วกรดในอุปกรณ์ชดเชยแรงดันคักซ์วักู้แบบอนุกรม	139
PW2_8	การปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันของระบบไฟฟ้ากำลังโดยตัวเก็บประจุอนุกรม	143



สถาบัน

การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 3



PW2_9	การเปรียบเทียบผลของการใช้งานหม้อแปลงสำหรับอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์แรงดันแบบอนุกรม	147
PW2_10	การวิเคราะห์ตำแหน่งการติดตั้ง FACTS ที่เหมาะสมในระบบจำหน่าย	151
PW2_11	การกำหนดขนาดและตำแหน่งติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กโดยวิธีการเคลื่อนที่ของกลุ่มอนุภาค	155
PW2_12	การประเมินค่าความเสียหายเนื่องจากไฟลัดของผู้ใช้ไฟประเภทอุตสาหกรรมในระบบจำหน่าย	159
PW2_13	โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับออกแบบระบบไฟฟ้าอาคารชุด	163
PW2_14	การหาคะแนนความเหมาะสมเพื่อสร้างแผนที่การใช้พื้นที่สำหรับการพยากรณ์ความต้องการไฟฟ้าเชิงพื้นที่: กรณีศึกษาพื้นที่การไฟฟ้านครหลวงเขตบางใหญ่	167
PW2_15	The effect of Electric Field System for Heat Transfer	171
PW2_16	Power Line Surge Protector	176
EN3_1	ระบบแจ้งเตือนเหตุขัดข้องอัตโนมัติสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์	179
EN3_2	การวิเคราะห์ การประหยัดพลังงานในเครื่องปรับอากาศสำหรับบ้านพักอาศัย	183
EN3_3	ระบบควบคุมการประจุและจ่ายไฟแบตเตอรี่แบบพกพาด้วยเซลล์สุริยะ	187
EN3_4	การวิเคราะห์พลังงานและเอ็กเซอร์ยีในกระบวนการผลิตวันเส้น	191
EN3_5	การผลิตน้ำมันไบโอดีเซลขนาดเล็กแบบอัตโนมัติ ควบคุมด้วย LabVIEW	195
EN3_6	การประมาณค่าแรงดันกระพริบด้วยวิธีการ Energy Operator	199
EN3_7	ระบบการติดตามดวงอาทิตย์แกนเดี่ยวด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์	203
EN3_8	การออกแบบและสร้างชุดติดตามจุดให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดบนพื้นฐานการควบคุมอัลกอริทึมสำหรับการ ประยุกต์ใช้กับแผงเซลล์แสงอาทิตย์สมรรถนะสูง	207
EN3_9	ระบบควบคุมเซลล์แสงอาทิตย์ติดตามดวงอาทิตย์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์	211
EN3_10	ระบบผ่านองพลูติกรรรม ในขบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบอัตโนมัติ ด้วย SCADA	215
EN3_11	การศึกษาและพัฒนาเครื่องทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์	219
EN3_12	การพัฒนาแนวทางการจัดการพลังงานไฟฟ้าของพลังงานลมในบ่อเลี้ยงกุ้ง	223

ผลกระทบของการใช้แบตเตอรี่ตะกั่วกรดในอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม Effect of the Lead-Acid Battery used in Dynamic Voltage Restorer

วุฒิไกร จันทร์ขามเรียน¹ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดิพิชญ์ วาภูมิ ศรีสงคราม² และ ประมุข อุณหเลขกะ²
¹ศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ถนนรังสิต-นครนายก ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ : 02-549-3571 E-mail: krischonme.b@en.rmutt.ac.th
²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000 E-mail: pramook@rmutsb.ac.th

PW2_7

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาผลกระทบของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดที่ใช้ในอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม (DVR) ขนาด 10 kVA ที่เกิดแรงดัน 380 V 3 เฟส ความถี่ 50 Hz เนื่องจากปัญหาของอุปกรณ์สะสมพลังงานมีอายุการใช้งานสั้นแต่ยังเป็นที่นิยมใช้อยู่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแบตเตอรี่ตะกั่วกรด การศึกษาได้ทำการเปรียบเทียบผลระหว่างการทำงานแบบที่ใช้อุปกรณ์สะสมพลังงานแบบอุดมคติ กับแบตเตอรี่จริงอย่างละเอียด ผลการจำลองเพื่อผลกระทบของแบตเตอรี่พบว่าค่าของแรงดันที่ได้จากการทำงานของ DVR แบบใช้แบตเตอรี่แบบตะกั่วกรดเปรียบเทียบกับอุปกรณ์สะสมพลังงานนั้น จะมีอิทธิพลทำให้การชดเชยแรงดันของ DVR ไม่ได้ตามที่ต้องการ เนื่องจากพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบตเตอรี่ไม่เป็นเชิงเส้น สถานะการประจุของแบตเตอรี่มีการเปลี่ยนแปลง และการควบคุมแรงดันด้านออกของแบตเตอรี่

คำสำคัญ: อุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม, แบตเตอรี่ตะกั่วกรด, แรงดันตกชั่วคราว

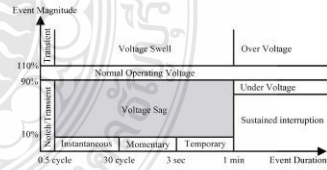
Abstract

This paper presents the effect of the lead-acid battery in 10 kVA 380V 50 Hz Three-phase Dynamic Voltage Restorer. According to the life cycle of energy storage device, the lead-acid battery is considered in this paper. The study focuses on the performance between ideal energy storage device and battery. The battery can effect to the voltage production that the DVR cannot produce the correction voltage at the desired time. The simulation results show that the load voltage waveforms, that used the battery as energy storage devices in DVR, will change when voltage sag occurred and DVR cannot produce the corrected voltage waveform. These effects depend on the nonlinear parameter, state of charge and output voltage control strategy.

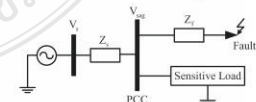
Keywords: Dynamic Voltage Restorer, Lead-acid Battery, and Voltage Sag

1. คำนำ

ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าในปัจจุบันเป็นปัญหาที่ทำให้วิศวกรไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมจำเป็นต้องให้พนักงานในการพิจารณาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากเป็นต้นเหตุทำให้สิ่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตโดยตรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้อุปกรณ์หรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ควบคุม สาเหตุของการเกิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมากในปัจจุบันไม่ว่าจะเป็นแรงดันหรือกระแส เกิดจากการใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้นในกระบวนการผลิต การเกิดการผิดพลาด (fault) ในระบบไฟฟ้าพื้นที่ใกล้เคียง ซึ่งทำให้ผู้ประกอบการจำเป็นต้องป้องกัน โดยเฉพาะโหลดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (Sensitive Load) ซึ่งในบทความนี้จะพิจารณาในส่วนนี้ รูปที่ 1 แสดงนิยามของแรงดันตกชั่วคราวในระบบไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 1159-1995 [1] โดยให้คำนิยามไว้ว่า แรงดันตกชั่วคราว คือ การลดลงของขนาดแรงดันแหล่งจ่ายในช่วงเวลาสั้นๆ ตั้งแต่ครึ่งรูปคลื่นแรงดัน (0.5 cycle) จนถึง 1 นาทีและกลับสู่ค่าปกติ ซึ่งก็คือช่วงระยะเวลาของการเกิดแรงดันตกชั่วคราว ถ้าประสิทธิภาพ (rms) ของแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.9 p.u. เมื่อเทียบกับพิกัดแรงดันไฟฟ้าของระบบที่ 1 p.u. สาเหตุหลักๆ เกิดจากการเกิดการผิดพลาดในระบบไฟฟ้าดังรูปที่ 2 หรือเกิดจากการเริ่มต้นเครื่องของภาระไฟฟ้าขนาดใหญ่ มีตัวแปรที่สำคัญอยู่ 2 ตัวคือขนาดและระยะเวลาที่เกิดแรงดันตกชั่วคราว

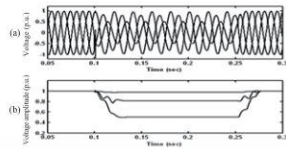


รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงแรงดันตามมาตรฐาน IEEE 1159-1995

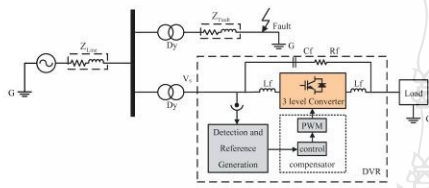


รูปที่ 2 ความผิดพลาดในระบบไฟฟ้าที่ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วคราว

การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 3 วันที่ 9 - 11 มีนาคม 2554 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ



รูปที่ 3 ระบบไฟฟ้าที่เกิดแรงดันตกชั่วคราวเนื่องจากความผิดปกติของ SLG



รูปที่ 4 โลหะแกรนการต่อ DVR เพื่อป้องกันแรงดันตกชั่วคราว

อุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม (Dynamic Voltage Restorer, DVR) ดังแสดงในรูปที่ 4 เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ติดตั้งเพื่อชดเชยแรงดันไฟฟ้าส่วนที่ขาดหายไปในช่วงที่เกิดแรงดันตกชั่วคราวเพื่อให้โหลดได้รับแรงดันปกติ ในอดีตที่ผ่านมางานวิจัยเกี่ยวกับอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมได้มีการกล่าวถึงอย่างกว้างขวาง ตัวอย่างเช่น การออกแบบโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบรอบเดียว ซึ่งสามารถควบคุมค่าของแรงดันได้ [2] การเปลี่ยนแปลงวิธีการควบคุมแรงดันตกชั่วคราว การศึกษาวิธีการตรวจจับแรงดันตกชั่วคราว การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ DVR เป็นต้น ถึงแม้ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยต่างๆ สามารถชดเชยแรงดันตกชั่วคราวได้ก็ตาม ก็ยังมีความไม่ชัดเจนในส่วนของอุปกรณ์สะสมพลังงานใน DVR เมื่อใช้ตัวเก็บประจุหรือแบตเตอรี่ เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้จำเป็นต้องอยู่ในโหมดพร้อมทำงานตลอดเวลา (Standby Mode) ดังนั้นในบทความนี้จึงนำเสนอการศึกษาถึงผลกระทบของการใช้แบตเตอรี่ที่ตัวกรดเป็นตัวสะสมพลังงานเปรียบเทียบกับตัวเก็บประจุเพื่อให้เกิดความชัดเจนยิ่งขึ้น

ขั้นตอนการนำเสนอบทความประกอบด้วย ในส่วนที่ (2) กล่าวถึงคุณสมบัติของแบตเตอรี่เมื่อนำมาใช้เป็นอุปกรณ์สะสมพลังงาน ส่วนที่ (3) แสดงวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่เมื่อต่อร่วมกับ DVR ส่วนที่ (4) นำเสนอผลการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink เพื่อดูผลกระทบของการชดเชยแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์สะสมพลังงานดังกล่าว สุดท้ายเป็นการสรุปผลการจำลองและข้อเสนอแนะที่ได้ออกแบบและจำลองไว้ในส่วนที่ (5)

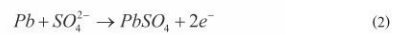
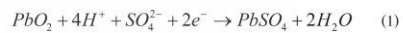
2. แบตเตอรี่ตะกั่วกรด [3]

หลักการทำปฏิกิริยาพื้นฐานของการประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดได้สามารถอธิบายโดยใช้ทฤษฎี "double-sulphate

theory" [3] สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงคือช่วงการคายประจุและอัดประจุ ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยละเอียดดังนี้

2.1 ปฏิกิริยาช่วงคายประจุ

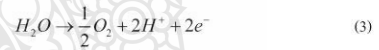
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วงนี้จะเกิดขึ้นที่ขั้วอิเล็กโทรด คือ ปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดบวกจะมีการเปลี่ยนแปลงของ PbO₂ ไปสู่ PbSO₄ ดังสมการที่ (1) และปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดลบจะมีการเปลี่ยนแปลงของ Pb ไปสู่ PbSO₄ ดังสมการที่ (2)



ผลของปฏิกิริยาเหล่านี้เมื่อพิจารณาเป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าสามารถอธิบายได้โดยการแทนด้วยตัวเก็บประจุ (C) ขนานกับตัวต้านทาน (R_d) ซึ่งตัวเก็บประจุนี้แสดงถึงค่าของตัวเก็บประจุภายใน double layer ที่จัดเรียงอย่างเป็นระเบียบระหว่างวัสดุ (active material) และ อิเล็กโทรด มีค่าอยู่ระหว่าง 1F ถึงค่าหลายฟารัด ขึ้นอยู่กับขนาดของแบตเตอรี่ ตัวต้านทาน R_d แสดงถึงการสูญเสียของพลังงานในแบตเตอรี่ ในระหว่างการแลกเปลี่ยนพลังงาน จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1-20 mΩ และตัวต้านทาน R_e คือตัวต้านทานภายในเซลล์ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้แรงดันตกคร่อมภายในเซลล์ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.1-10 mΩ

2.2 ปฏิกิริยาช่วงอัดประจุ

กระบวนการหรือขั้นตอนการอัดประจุสามารถอธิบายได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน โดยใช้สมการที่ (1) และ (2) ในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้เกิดอิเล็กโทรไลต์น้ำและการสร้างออกซิเจนขึ้นที่ขั้วอิเล็กโทรดบวก



และไฮโดรเจนที่ขั้วอิเล็กโทรดลบ

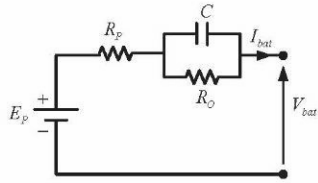


วงจรเทียบเคียงทางไฟฟ้าสามารถอธิบายได้เหมือนกันช่วงการคายประจุ แต่ค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ในวงจรมีการเปลี่ยนแปลงและมีความไม่เที่ยงตรง [3]

3. วงจรสมมูลทางไฟฟ้าของแบตเตอรี่กรณีใช้งานกับ DVR

โดยทั่วไปแรงดันตกชั่วคราวจะมีเวลาน้อยกว่า 1 นาที ตามนิยามของมาตรฐาน IEEE1159-1995 แต่ถ้าออกแบบให้ DVR สามารถจ่ายพลังงานได้ 1 นาที วิศวกรไฟฟ้าจำเป็นต้องออกแบบแหล่งสะสมพลังงานที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นในบทความนี้จะทำการออกแบบอุปกรณ์สะสม

พลังงานไฟฟ้าที่สามารถจ่ายพลังงานได้นาน 1 วินาที ในช่วงการเกิดแรงดันตกชั่วคราว แบตเตอรี่จะมีอัตราการคายประจุสูงเพราะ DVR จะรับพลังงานจากแบตเตอรี่โดยตรง ดังนั้นวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ในรูปที่ 5 สามารถแทนให้เป็นวงจรสมมูลของแบตเตอรี่ได้ โดยที่ R_p คือ ความต้านทาน Ohmic Polarization, R_o คือความต้านทานสูญเสียในการแลกเปลี่ยนพลังงาน, C คือ ค่าตัวเก็บประจุ และ E_p คือค่าแรงดันวงจรถัดของแบตเตอรี่



รูปที่ 5 วงจรสมมูลของแบตเตอรี่แบบพหุวินิน

จากรูปที่ 5 พารามิเตอร์ทุกตัวมีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น และขึ้นอยู่กับอิทธิพลของอัตราการคายประจุ, การอัดประจุ และอุณหภูมิ ก่อนการเกิดแรงดันตกชั่วคราว จะสมมติให้สถานะการประจุ (State of Charge) มีค่าเท่ากับ 100% และลดลงตามอายุการใช้งาน เพราะแบตเตอรี่ถูกต่ออยู่ตลอดเวลา เมื่อเกิดแรงดันตกชั่วคราวอุณหภูมิในแบตเตอรี่สมมติให้มีค่าคงที่ ดังนั้นจึงสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (5)

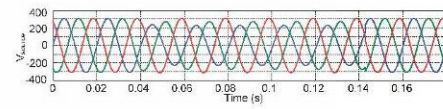
$$V_{bat} = E_p - I_{bat} \cdot (R_p + R_o) + I_{bat} \cdot R_o \cdot e^{-t/R_o C} \quad (5)$$

สำหรับวงจรสมมูลในรูปที่ 5 เป็นวงจรสมมูลที่ใช้พิจารณาในการทำงานระยะเวลาด้าน (short-term period) เท่านั้น และเหมาะสมกับการทำงานกับ DVR แต่ถ้าประยุกต์ใช้กับงานอื่นเช่น พลังงานทดแทนรถยนต์ไฟฟ้า หรือแหล่งจ่ายอื่น ๆ จะไม่สามารถใช้วงจรสมมูลนี้ได้ เนื่องจากผลของการทำงานระยะเวลาด้าน (long-term period) ผลของความร้อนจากภายนอกมารบกวน ผลของค่าพารามิเตอร์ในสถานะการทำงานแบบคงที่ ซึ่งวงจรสมมูลที่ควรจะได้ต้องมีองค์ประกอบมากกว่านี้

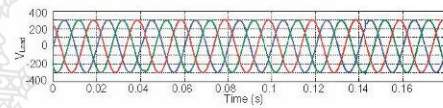
4. การจำลองการทำงาน

การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink จะนำอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมต่อเข้าไปในระบบจำหน่าย ดังรูปที่ 4 โดยกำหนดให้การคิดพ่วงในระบบไฟฟ้าเกิดที่วินาทีที่ 0.04 เป็นเวลา 0.1 วินาที แรงดันแหล่งจ่าย 3 เฟสมีค่า 380 V ที่ความถี่ 50 Hz ใช้ความถี่การสวิตซ์ 20 kHz $C_f = 8\mu F$, $L_f = 2mH$, $R_f = 32\Omega$, $C_{dc} = 6,600 \mu F$ และ Battery ขนาด 100 Ah ซึ่งจะทำการจำลองในสถานะการประจุที่ 100% และ 5% เนื่องจากแบตเตอรี่เมื่อใช้งานไปนานๆ สถานะการประจุจะลดลง

เวื่อยา ส่วนเงื่อนไขการเกิดแรงดันตกชั่วคราวนั้นขนาดของแรงดันจะต้องน้อยกว่า 0.9 p.u. ดังนั้นจะได้ $|M| \le 198 V$ ในการเปลี่ยนแปลงมุมเฟส $\Delta\theta > 1.85^\circ$ หรือ $\Delta\theta < 1.75^\circ$ [8] และใช้โหลด RL ซึ่งมีค่า 13 Ω และ 19 mH ต่ออนุกรมกัน รูปที่ 6 แสดงการชดเชยแรงดันด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมกรณีเกิดความผิดปกติพ่วงแบบ 1 เฟสที่เฟส A ต่อกราวด์ที่ใช้แหล่งจ่ายแบบอุดมคติ โดยรูป (ก) เป็นรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าก่อนการชดเชย และรูป (ข) เป็นรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่โหลดบัส ซึ่งจะเห็นได้ว่า DVR สามารถชดเชยแรงดันได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว

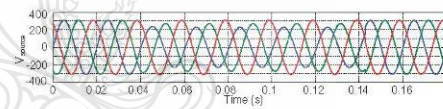


(ก) แรงดันแหล่งจ่ายที่เกิดแรงดันตกชั่วคราว

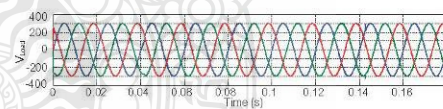


(ข) แรงดันที่โหลดเมื่อชดเชยด้วย DVR

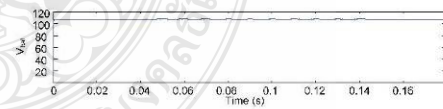
รูปที่ 6 การชดเชยแรงดันด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมกรณีเกิดความผิดปกติพ่วงแบบ 1 เฟสที่เฟส A ต่อกราวด์ที่ใช้แหล่งจ่ายอุดมคติ



(ค) แรงดันแหล่งจ่ายที่เกิดแรงดันตกชั่วคราว



(ง) แรงดันที่โหลดเมื่อชดเชยด้วย DVR



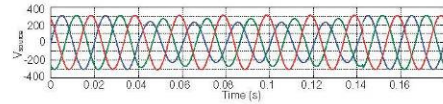
(จ) แรงดันที่แบตเตอรี่ของ DVR

รูปที่ 7 การชดเชยแรงดันด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมกรณีเกิดความผิดปกติพ่วงแบบ 1 เฟสที่เฟส A ต่อกราวด์ที่ใช้แบตเตอรี่ สถานะการประจุ 100%

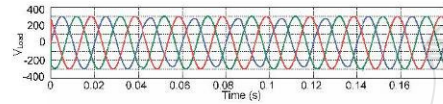
PW2_7

การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 3 วันที่ 9 - 11 มีนาคม 2554 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

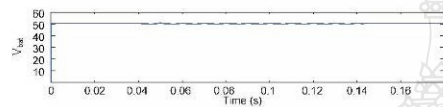
PW2_7



(ก) แรงดันแหล่งจ่ายที่เกิดแรงดันตกชั่วครู่



(ข) แรงดันที่โหลดเมื่อชดเชยด้วย DVR



(ค) แรงดันที่เบตเตอร์ของ DVR

รูปที่ 8 การชดเชยแรงดันด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม กรณีเกิดความคิดพร้อมแบบ 1 เฟสที่เฟส A ต่อกราวน์ ที่ใช้เบตเตอร์ สถานะการประจุ 5%

รูปที่ 7(ก) เป็นรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าก่อนการชดเชย รูปที่ 7(ข) เป็นรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่โหลดเมื่อชดเชยด้วย DVR กรณีเกิดความคิดพร้อมแบบ 1 เฟสที่เฟส A ต่อกราวน์ ที่ใช้เบตเตอร์ สถานะการประจุ 100% จะเห็นได้ว่าสามารถชดเชยแรงดันตกชั่วครู่ได้ดี ส่วนรูปที่ 7(ค) แสดงให้เห็นว่ารูปคลื่นของแรงดันที่เบตเตอร์ในช่วงระหว่างการชดเชยจะเกิดการแกว่งขึ้น

รูปที่ 8(ก) เป็นรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าก่อนการชดเชย รูปที่ 8(ข) เป็นรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าที่โหลดเมื่อชดเชยด้วย DVR กรณีเกิดความคิดพร้อมแบบ 1 เฟสที่เฟส A ต่อกราวน์ ที่ใช้เบตเตอร์ สถานะการประจุ 5% ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าเมื่อเราใช้เบตเตอร์ไปนานๆ สถานะการประจุจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ ดังนั้นจะเห็นได้ว่า DVR สามารถชดเชยแรงดันตกชั่วครู่ได้ดี และรูปที่ 8(ค) แสดงให้เห็นว่าแรงดันที่เบตเตอร์ในช่วงระหว่างการชดเชยจะมีการแกว่งเกิดขึ้นเช่นเดียวกัน

เมื่อนำการชดเชยแรงดันด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมที่ใช้เบตเตอร์มาเปรียบเทียบกับ การชดเชยแรงดันด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมที่ใช้แหล่งจ่ายแบบอุดมคติแล้ว จะเห็นได้ว่า การชดเชยเมื่อใช้แหล่งจ่ายแบบอุดมคติสามารถชดเชยแรงดันตกชั่วครู่ได้ดีกว่าเมื่อใช้เบตเตอร์ เนื่องจากเบตเตอร์เมื่อใช้งานไปนานๆ สถานะการประจุลดลงเรื่อยๆ ทำให้ไม่สามารถชดเชยแรงดันตกชั่วครู่ได้ดีเท่ากับตอนที่สถานะการประจุเป็น 100%

5.สรุป

การศึกษามลกระทบของเบตเตอร์ที่ตัวกรวดที่ใช้ในอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมเนื่องจากปัญหาของอุปกรณ์สะสมพลังงานมีอายุการใช้งานสั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเบตเตอร์ที่ตัวกรวด การศึกษาได้ทำการเปรียบเทียบผลระหว่างการทำงานแบบที่ใช้อุปกรณ์สะสมพลังงานแบบอุดมคติ กับเบตเตอร์อย่างละเอียด ผลการจำลองเพื่อดูผลกระทบของเบตเตอร์พบว่าค่าของแรงดันที่ได้จากการทำงานของ DVR แบบใช้เบตเตอร์แบบตัวกรวดเป็นอุปกรณ์สะสมพลังงานนั้น จะมีอิทธิพลทำให้การชดเชยแรงดันของ DVR ไม่ได้ตามที่ต้องการ เนื่องจากพารามิเตอร์ต่างๆ ของเบตเตอร์ไม่เป็นเชิงเส้น สถานะการประจุของเบตเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง และการควบคุมแรงดันด้านออกของเบตเตอร์

เอกสารอ้างอิง

- [1] "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", IEEE Standards on Power Quality, pp.12, June 14, 1995.
- [2] Liu, J. W., Choi, S. S., & Chen, S., "Design of step dynamic voltage regulator for power quality enhancement", IEEE Transactions on Power Delivery. 18(4), 1403 – 1409, 2003.
- [3] Eng Kian Kenneth Sng, S. S. Choi, D. Mahinda Vilathgamuwa, "Analysis of Series Compensation and DC-Link Voltage Controls of a Transformerless Self-Charging Dynamic Voltage Restorer", IEEE Transactions on Power Delivery, 1511 – 1518, 2004.
- [4] MR.Banaei, A. Nahavandi, S. H. Hosseini, "Investigation of Multi-Functional DVR to Improve Power Quality Characteristic", ECTICON 6th, Pattaya Chonburi, 144 – 149, 2009.
- [5] Kittiwat Chiangchin., "Simplification of control algorithms for voltage sag compensators from practical viewpoints", Thesis, Electrical Engineering, chulalongkorn university, 2006.
- [6] Ahmed A. Helal, & Mohamed H. Saied, "Dynamic Voltage Restorer Adopting 150° Conduction Angle VSI", IEEE Electrical Power & Energy Conference, 2008.
- [7] Syed Saad Ahmed Quadri, Shoab Ahmed Syed Rameez Khaja "Dynamic Voltage Restorer", Thesis, Electrical and Electronics Engineering, Osmania University, 2009-10
- [8] วุฒิ ไกร จันทวีขามเรียน และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์, "การออกแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมขนาด 10 kVA โดยใช้คอนเวอร์เตอร์สามระดับแบบไดโอด แคลมป์", ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33 (EECON-33) จังหวัดเชียงใหม่, 173-176, 1-3 ธันวาคม 2553

การเปรียบเทียบผลของการใช้งานหม้อแปลงสำหรับอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม
Comparison on the effect of Transformer applications connection in DVR

วุฒิไกร จันทร์ขามเรียน และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีชัญญ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ : 0-2549-3571 โทรสาร : 0-2549-3422 E-mail: krischonme.b@cn.mutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์การทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม (Dynamic Voltage Restorer, DVR) ขนาด 10 kVA พิกัดแรงดัน 380 V 3 เฟส ความถี่ 50 Hz โดยเปรียบเทียบระหว่างการทำงานเมื่อใช้หม้อแปลงและเมื่อไม่ใช้หม้อแปลงต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า เพื่อแสดงว่าการทำงานเมื่อไม่ใช้หม้อแปลงสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อใช้หม้อแปลง ซึ่งการทำงานเมื่อใช้หม้อแปลงจะมีผลกระทบในเรื่องของการเลื่อนเฟส และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าค่าของแรงดันที่ได้จากการทำงานของ DVR แบบไม่ใช้หม้อแปลงมีขนาดใกล้เคียง 1.0 p.u. มากกว่าแบบใช้หม้อแปลง และก็ไม่มีผลของการเลื่อนเฟสมาเกี่ยวข้องด้วย นอกจากนี้ถ้าหากนำมาสร้างเป็นตัวอุปกรณ์จริงยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนของหม้อแปลงได้อีกด้วย

คำสำคัญ: อุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม, หม้อแปลงไฟฟ้า, แรงดันตกชั่วคราว

Abstract

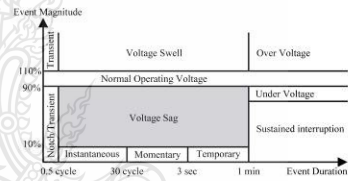
This paper presents the analysis of DVR in 10 kVA 380 V 50 Hz Three-phase Dynamic Voltage Restorer. The comparison between with and without transformers is considered in this paper. The DVR operation with transformer has effect to output voltage waveform, according to the phase shift and voltage drop. The simulation results show that the magnitude of load voltage without the transformer about 1.0 p.u. more than with transformer. Moreover, it has not effect of phase shift and no voltage drop. This study can be ensured that the effect of transformer, that occurred on results, has to consider for DVR application.

Keywords: Dynamic Voltage Restorer, Transformer, and Voltage Sag

1. คำนำ

แรงดันตกชั่วคราว (Voltage Sag) เป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่ทำให้โรงงานอุตสาหกรรมเกิดปัญหาในขั้นตอนการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังควบคุม โดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเมื่อเกิดการผิดปกติ (fault) ในระบบไฟฟ้าและเมื่อเกิดปัญหานี้

ทำให้ผู้ประกอบการจำเป็นต้องป้องกัน โดยเฉพาะโหลดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันสูง (sensitive load) รูปที่ 1 แสดงนิยามของแรงดันตกชั่วคราวในระบบไฟฟ้าที่ตามมาตรฐาน IEEE 1159-1995 [1] โดยให้คำนิยามไว้ว่า แรงดันตกชั่วคราว คือ การลดลงของขนาดแรงดันแหล่งจ่ายในช่วงเวลาสั้นๆ ตั้งแต่ครึ่งรูปคลื่น (0.5 วงรอบ) จนถึง 1 นาที และกลับสู่ค่าปกติ ซึ่งก็คือช่วงระยะเวลาของการเกิดแรงดันตกชั่วคราว ค่าประสิทธิภาพ (rms) ของแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.9 p.u. เมื่อเทียบกับพิกัดแรงดันไฟฟ้าของระบบที่ 1 p.u. สาเหตุหลักๆ เกิดจากการเกิดการผิดปกติในระบบไฟฟ้าดังรูปที่ 2 หรือเกิดจากการเริ่มเดินเครื่องของภาระไฟฟ้าขนาดใหญ่ มีตัวแปรที่สำคัญอยู่ 2 ตัวคือขนาดและระยะเวลาที่เกิดแรงดันตกชั่วคราว



รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงแรงดันตามมาตรฐาน IEEE 1159-1995

อุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม (Dynamic Voltage Restorer, DVR) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ติดตั้งเพื่อชดเชยแรงดันไฟฟ้าส่วนที่ขาดหายไปในช่วงที่แรงดันตกชั่วคราวเพื่อให้โหลดได้รับแรงดันปกติ (1.0 p.u.) ในอดีตที่ผ่านมามีงานวิจัยเกี่ยวกับอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมอย่างมากมายน เช่น การออกแบบโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบรอบเดียว ซึ่งสามารถควบคุมค่าของแรงดันได้ แต่ความไวของการควบคุมไม่ดี และไม่ได้อาศัยการควบคุมแบบละเอียดไว้ [2] ต่อมาได้มีการนำเสนอ DVR ที่ไม่ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับจัดแรงดันและสามารถชาร์จตัวประจุ DC-link ด้วยตนเองเมื่ออยู่ในสภาวะปกติ กรณีที่ไม่มีหม้อแปลงจะช่วยลดขนาดของ DVR และค่าใช้จ่ายลงได้ [3] จากนั้นได้มีการนำเสนอ DVR แบบหลายฟังก์ชัน โดยใช้ทฤษฎี minimum energy [4] เพื่อลดกำลังแอกทีฟที่ใช้ในการชดเชย มีการเปรียบเทียบวิธีการชดเชยแต่ละวิธี แต่ผลการทดลองแสดงให้เห็นผลของการชดเชยยังไม่ชัดเจน ถึงแม้ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยต่างๆสามารถชดเชยแรงดันตกชั่วคราวได้ แต่ก็ยังมีความไม่ชัดเจนในส่วนตัวควบคุมของ

PW2_9

DVR จึงได้มีการพยายามที่จะลดความยุ่งยากของอัลกอริทึมในส่วนของการควบคุม DVR ที่ไม่ใช่หม้อแปลงไฟฟ้าสำหรับติดตั้ง [5]

จากการศึกษาอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม จะเห็นได้ว่าส่วนใหญ่แล้วจะไม่ค่อยพูดถึงผลของหม้อแปลงและถึงแม้จะมีการพูดถึงแต่ก็ยังไม่มีการนำมาเปรียบเทียบกับแบบที่ไม่ใช่หม้อแปลงเป็นที่ทราบกันดีแล้วว่าข้อเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าคือทำให้เกิดการเลื่อนเฟส (phase shift) และแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม (voltage drop) นอกจากนี้ยังเกิดการอิ่มตัวของหม้อแปลงและกระแสอินรัช (inrush current) ซึ่งทำให้ต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิคเป็น 2 เท่าของพิคตัวชดเชยแรงดันคักซ์วูร์ [5] ดังนั้นบทความนี้จึงต้องการนำเสนอการวิเคราะห์และเปรียบเทียบการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมที่มีการใช้หม้อแปลงกับวิธีการต่อคอนเวอร์เตอร์เข้ากับระบบไฟฟ้าโดยตรง พร้อมแสดงให้เห็นว่าวิธีการต่อคอนเวอร์เตอร์เข้ากับระบบไฟฟ้าโดยตรงนั้นสามารถที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมได้ โดยมีการนำเสนอเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

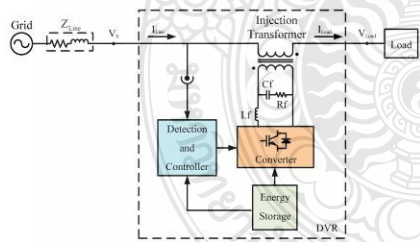
2. การชดเชยแรงดันคักซ์วูร์

2.1 อุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม (DVR)

อุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมหรือ DVR โดยทั่วไปประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ ส่วนแปลงพลังงาน ส่วนที่ใช้เก็บพลังงาน และส่วนการควบคุมดังรูปที่ 2 สำหรับวิธีการชดเชยแรงดันของ DVR มี 3 วิธี [6] คือ

1. Pre-Sag Compensation
2. in-Phase Compensation
3. Energy Optimization Technique

สำหรับบทความนี้จะเลือกใช้วิธีการชดเชยแบบที่ 1 ซึ่งสามารถชดเชยได้ทั้งขนาดและมุมเฟสของแรงดัน



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม

2.2 การควบคุมอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม

การทำงานของระบบควบคุมเริ่มจาก เมื่อเกิดแรงดันคักซ์วูร์ ในระบบ ส่วนควบคุมก็จะตรวจสอบว่าเกิดแรงดันคักซ์วูร์จริงหรือไม่ เมื่อมีสัญญาณว่าเกิดแรงดันคักซ์วูร์แล้วส่วนสร้างแรงดันอ้างอิงก็จะทำ

การสร้างแรงดันอ้างอิงเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับแรงดันจริงในระบบ จากนั้นก็จะนำแรงดันที่ได้จากการเปรียบเทียบนี้ไปมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) เพื่อขับนำคอนเวอร์เตอร์ให้ฉีดแรงดันเข้าสู่ระบบบล็อกอะแกรมการควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 3

2.3 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าจาก DVR ไปยังระบบไฟฟ้าที่ยังโหลด หม้อแปลงไฟฟ้าประกอบด้วยขดลวด 2 ชุดพันอยู่บนแกนเหล็กซึ่งสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 4 [7] จากวงจรสมมูลดังกล่าวจะได้

$$X_0 = E_1 / I_\mu \tag{1}$$

$$R_0 = E_1 / I_m \tag{2}$$

$$Z_m = R_0 // X_0 \tag{3}$$

$$Z_1 = R_1 + X_1 \tag{4}$$

จาก $E_2 / E_1 = N_2 / N_1 = a$ นั้น สามารถย้ายค่าต่างๆจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งได้ จากวงจรสมมูลในรูปที่ 4 เมื่อย้ายขดลวดทุติยภูมิไปทางด้านขดปฐมภูมิ สามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลที่สมมูลของหม้อแปลงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ย้ายจากขดทุติยภูมิไปทางด้านขดปฐมภูมิสามารถหาได้จากสมการที่ (5)-(8)

$$I_1' = aI_2 \tag{5}$$

$$V_1' = V_2' / a \tag{6}$$

$$R_1' = R_2' / a^2 \tag{7}$$

$$X_1' = X_2' / a^2 \tag{8}$$

จากวงจรสมมูลที่สมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า สามารถหา V_1' จากอัตราส่วนของแรงดันได้ดังนี้คือ

$$V_1' = \left(\frac{I_2 Z_2'}{I_1 Z_1' + I_2 Z_m'} \right) V_1 \tag{9}$$

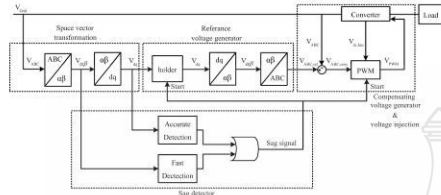
การใช้หม้อแปลงเชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์กับระบบไฟฟ้า จะทำให้เกิดการเลื่อนเฟส (phase shift) และแรงดันตกคร่อม (voltage drop) ซึ่งเป็นข้อเสียของหม้อแปลง นอกจากนี้ยังเกิดการอิ่มตัวของหม้อแปลงและกระแสอินรัช (inrush current) ซึ่งทำให้ต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีพิคเป็น 2 เท่าของพิคตัวชดเชยแรงดันแบบอนุกรม เป็นผลให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีขนาดใหญ่และราคาสูง

2.4 กระแสอินรัช (inrush current) [9]

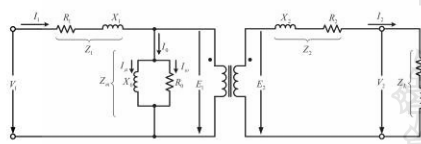
เมื่อมีการเชื่อมต่อหม้อแปลงกับแหล่งจ่ายกระแสสลับในช่วงแรกจะมีเสิร์จของกระแสไหลเข้าทางด้านขดลวดปฐมภูมิที่เรียกว่ากระแสอินรัช (inrush current) ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับการเริ่มเดินเครื่องของมอเตอร์ที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายโดยฉับพลัน

การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 3 วันที่ 9 - 11 มีนาคม 2554 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

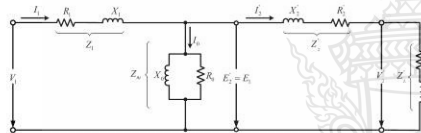
เมื่อเริ่มจ่ายแรงดันไฟฟ้าไปยังหม้อแปลงทั้งฟลักซ์แม่เหล็ก และกระแสในขดลวดจะเริ่มต้นที่ศูนย์และค่อยๆเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 6



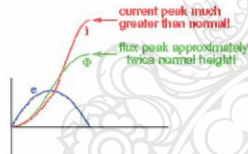
รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมอุปกรณ์ขดลวดแรงดันแบบอนุกรม



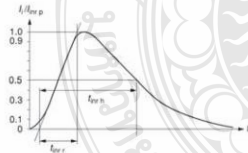
รูปที่ 4 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้า



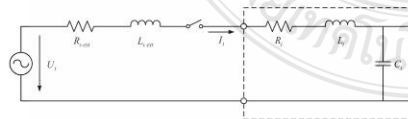
รูปที่ 5 วงจรสมมูลที่สมบูรณ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 6 รูปคลื่นกระแส ฟลักซ์และแรงดันไฟฟ้าของหม้อแปลง



รูปที่ 7 รูปคลื่นของกระแสรีซ



รูปที่ 8 วงจรของการเกิดกระแสรีซ

ดังนั้นในหม้อแปลงไฟฟ้าคอนเริ่มดันฟลักซ์จะมีขนาดประมาณสองเท่าของค่าสูงสุดของขนาดปกติ เนื่องจากผลรวมของพื้นที่ภายใต้รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าในครึ่งไซเคิลแรก (first half-cycle) ในหม้อแปลงไฟฟ้าอุดมคติกระแสในแม่เหล็กจะเพิ่มขึ้นประมาณสองเท่าของค่าสูงสุดของกระแสตามปกติเช่นกัน เนื่องจากการสร้าง magnetomotive force (mmf) ซึ่งทำให้ฟลักซ์สูงกว่าปกติ กระแสขดลวดที่สร้าง mmf จะทำให้ฟลักซ์ในขดลวดเพิ่มมากขึ้นมากกว่าสองเท่าของค่าสูงสุดของฟลักซ์ปกติ

นี่จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดกระแสรีซในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำให้ต้องใช้หม้อแปลงที่มีพิคเป็น 2 เท่าของพิคตัวขดลวดแรงดันแบบอนุกรมนั่นเอง ถ้าหม้อแปลงไฟฟ้ามีสนามแม่เหล็กตกค้างในแกนเหล็กในช่วงเวลาของการเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายจะทำให้กระแสรีซมีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้นได้ จากรูปที่ 7 และ 8 สามารถหาค่าสูงสุดของกระแสรีซ ($I_{irr p}$) ได้จากสมการที่ (10) [10]

$$I_{irr p} < \frac{U_i}{R_{s ext} + R_i} \tag{10}$$

เวลาที่เพิ่มขึ้นของ $I_{irr p}$ หาได้จากสมการที่ (11)

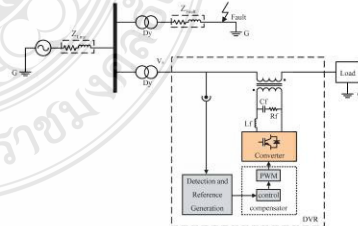
$$t_{irr p} \approx \frac{L_{s ext} + L_i}{R_{s ext} + R_i} \tag{11}$$

เวลาที่ค่าครึ่งหนึ่งของ $I_{irr h}$ หาได้จากสมการที่ (12)

$$t_{irr h} \approx 0.7 \times (R_{s ext} + R_i) \times C_i + t_{irr} \tag{12}$$

3. การจำลองการทำงาน

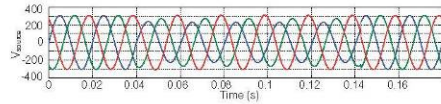
การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink จะนำอุปกรณ์ขดลวดแรงดันแบบอนุกรมต่อเข้าไปทางด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงในระบบจำหน่าย ดังรูปที่ 9 โดยกำหนดให้การผิดร่งในระบบไฟฟ้าเกิดที่วินาทีที่ 0.04 เป็นเวลา 0.1 วินาที แรงดันแหล่งจ่าย 3 เฟสมีค่า 380 V ที่ความถี่ 50 Hz ใช้ความถี่การสวิตซ์ 20 kHz $C_i = 8\mu F$, $L_i = 2mH$, $R_i = 32\Omega$, $C_{ext} = 6,600 \mu F$ เงื่อนไขการเกิดแรงดันตกชั่วคราวขนาดแรงดัน $|V| \leq 198 V$ ในการเปลี่ยนแปลงมุมเฟส $\Delta\theta > 1.85^\circ$ หรือ $\Delta\theta < -1.75^\circ$ และใช้โหลด RL ซึ่งมีค่า 13 Ω และ 19 mH ต่ออนุกรมกัน



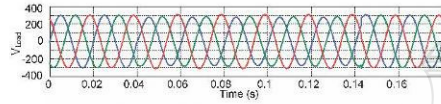
รูปที่ 9 วงจรการจำลองการทำงานแบบใช้หม้อแปลงลดแรงดัน

PW2_9

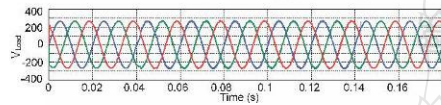
การประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 3 วันที่ 9 - 11 มีนาคม 2554 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ



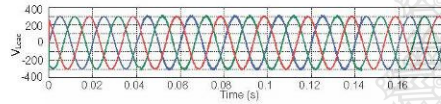
(ก) แรงดันแหล่งจ่ายที่เกิดแรงดันตกชั่วคราว



(ข) การชดเชยด้วย DVR ที่ใช้หม้อแปลง (R_0, X_0 และ Z_{01} มีค่าน้อย)

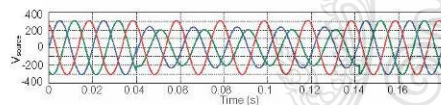


(ค) การชดเชยด้วย DVR ที่ใช้หม้อแปลง (R_0, X_0 และ Z_{01} มีค่ามาก)

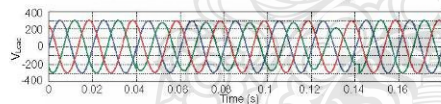


(ง) การชดเชยด้วย DVR ที่ไม่ใช้หม้อแปลง

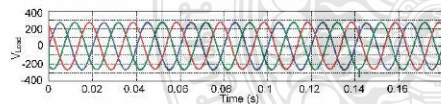
รูปที่ 10 การชดเชยแรงดันด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมกรณีเกิดความคิดพร้อมแบบ 1 เฟสที่เฟส A ต่อกราวด์



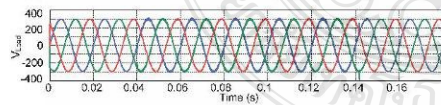
(ก) แรงดันแหล่งจ่ายที่เกิดแรงดันตกชั่วคราว



(ข) การชดเชยด้วย DVR ที่ใช้หม้อแปลง (R_0, X_0 และ Z_{01} มีค่าน้อย)



(ค) การชดเชยด้วย DVR ที่ใช้หม้อแปลง (R_0, X_0 และ Z_{01} มีค่ามาก)



(ง) การชดเชยด้วย DVR ที่ไม่ใช้หม้อแปลง

รูปที่ 11 การชดเชยแรงดันด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมกรณีเกิดความคิดพร้อมแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส A กับ B

4. สรุป

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์การทำงานของ DVR โดยเปรียบเทียบระหว่างการทำงานเมื่อใช้หม้อแปลงและไม่ใช้หม้อแปลงต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า จากผลการจำลองพบว่าการทำงานเมื่อไม่ใช้หม้อแปลงมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีกว่าเมื่อใช้หม้อแปลง เนื่องจากแรงดันที่ได้อัตราการฟื้นคืน DVR มีค่าเข้าใกล้ 1.0 p.u. เมื่อเทียบกับแรงดันที่ระบบ 1.0 p.u. สำหรับการชดเชยเมื่อใช้หม้อแปลงนั้นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของ DVR คืออิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง ซึ่งถ้าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงมีค่ามากกระแสที่ตกค้างในหม้อแปลงก็จะมีค่ามากส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่หม้อแปลงมีค่ามากขึ้นเอง ดังนั้นการเลือกขนาดของหม้อแปลงควรเลือกอิมพีแดนซ์ที่มีค่าน้อยๆ จะช่วยลดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่หม้อแปลงได้นอกจากนั้นหากนำไปสร้างเป็นตัวอุปกรณ์จริง การใช้ DVR ที่ไม่ใช้หม้อแปลงนั้นยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนของหม้อแปลงได้อีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน มทร.ธัญบุรี ที่ช่วยในการสนับสนุนข้อมูลและสถานที่ และขอขอบพระคุณกองทุนวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีของ กฟภ. ที่ให้การสนับสนุนทุนการวิจัยการสร้างต้นแบบ DVR เพื่อลดผลกระทบของแรงดันตกชั่วคราว

เอกสารอ้างอิง

- [1] "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", IEEE Standards on Power Quality, pp.12, June 14, 1995.
- [2] Liu, J. W., Choi, S. S., & Chen, S., "Design of step dynamic voltage regulator for power quality enhancement", IEEE Transactions on Power Delivery, 18(4), 1403 - 1409, 2003.
- [3] Eng Kian Kenneth Sng, S. S. Choi, D. Mahinda Vilathgamuwa, "Analysis of Series Compensation and DC-Link Voltage Controls of a Transformerless Self-Charging Dynamic Voltage Restorer", IEEE Transactions on Power Delivery, 1511 - 1518, 2004.
- [4] M.R.Banaei, A. Nahavandi, S. H. Hosseini, "Investigation of Multi-Functional DVR to Improve Power Quality Characteristic", ECTICON 6, Pattaya Chonburi, 144 - 149, 2009.
- [5] Kit-wat Chiangchin, "Simplification of control algorithms for voltage sag compensators from practical viewpoints", Thesis, Electrical Engineering, chulalongkorn university, 2006.
- [6] วุฒิกร จันทร์จวนเวียน และ กฤษณ์ภรณ์ วุฒิกิตติชัย, "การออกแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมขนาด 10 kVA โดยใช้คอนเวอร์เตอร์สามระดับแบบไดโอด แลตามป์", ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33 (EECON-33) จังหวัดเชียงใหม่, หน้า 173-176, 1-3 ธันวาคม 2553
- [7] ไข่มขวัญ ทิมเกิด "เครื่องกลไฟฟ้า 1" พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. , 2544
- [8] Tony R. Kuphaldt "AC Theory-Table Of Contents" (http://www.opamp-electronics.com/tutorials/inrush_current_2_09_12.htm)
- [9] Power-One "Power Supplies : Technical Information"

Electrical Engineering Network 2012

of Rajamangala University of Technology (EENET 2012)



CONFERENCE TOPICS

GROUP 1 (PE)

Power Electronics, Electric Machines, Motor Control and Drive, Measurement, Control and Robotics.

GROUP 2 (PW)

Power System, Transmission and Distribution, High Voltage and Electrical Energy, Generating Systems.

GROUP 3 (RE)

Renewable Energy, Energy Saving Technologies, Industry Specific Energy Conversion and Conditioning Technologies, Materials for Energy and Environment.

GROUP 4 (TE)

Telecommunication, Electronics, Information and Communication Technologies, Antennas, Microwave Theory and Techniques.

GROUP 5 (CP)

Computer Technologies and Network, Computer Graphics, Machine Learning and Human-Computer Interaction.

GROUP 6 (GN)

Education in Electrical Engineering, Simulation Software and Design tools, Related Topics in Electrical Engineering.



GRAND PARADISE HOTEL

Nong Khai, THAILAND

April 3-5, 2012

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

รายชื่อผู้พิจารณาบทความการประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4

รศ. ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน

รศ. ดร. วิจิตร กิณเรศ

รศ. ดร. มนตรี ศิริปรัชญานันท์

รศ. ดร. เวทิน ปิยะรัตน์

รศ. ดร. เศชา พวงดาวเรือง

รศ. ดร. วิบูลย์ ชื่นแจก

รศ. ดร. เตติยร ธัญญศรีรัตน์

ผศ. ดร. แนบบุญ หุนเจริญ

ผศ. ดร. อภินันท์ อูร์ โสภณ

ผศ. ดร. วรวัฒน์ เสริมวิบูล

ผศ. ดร. อาทิตย์ โสทรโยม

ผศ. ดร. เสด็จ เผ่าละออ

ผศ. ดร. กองพล อารีรักษ์

ดร. ยุทธนา ขำสุวรรณ

ดร. นวัตกรรม อังควิเศษพันธ์

รศ. ดร. โกศล โอหารไพโรจน์

ดร. อุเทน กำน่าน

นายณรงค์ นันทกุล

ผศ. กฤษดา ยิ่งชัย

นายเอกทัศน์ พฤษวรรณ

ดร. จิตตฤทธิ ทองปรอน

ผศ. ชาญชัย เศรษฐมรรักษ์

ดร. จักรกฤษณ์ เคลือบวัง

นายสมนึก เครือสอน

นายทัศนะ ถมทอง

นายณรงค์ฤทธิ์ พิมพ์คำวงศ์

ผศ. อภิศักดิ์ ชันแก้วหล้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ดร. นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายนิติพันธ์ คุณประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายชนารัตน์ ตันมณีประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายสุภาวดี เนตรโพธิ์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายทอง ลานธารทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายสมเกียรติ ทองแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ศส.พิชญ์ คาราวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายมนัส บุญเกียรติทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายพนา คูสิดากร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ศส.กิจจา ลักษณ์อำนวยพร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ศส.โกศล นิธิโสภา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ศส.จรินทร์ จุลวานิช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายนิลमित นิลาศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายเกรียงไกร เหลืองอำพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายฉวนพันธ์ วัชวุฒิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายฉวีรัฐวรินทร์ ทองรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ศส.ศรีศักดิ์ น้อยไร่ภูมิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ศส.ดร.ประมุข อุณหเลขกะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
นางสาวพัชรนันท์ ศรีธนาอุทัยกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ศส.สรายุทธ ทองกุลภัทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ศส.วารุณี ศรีสงคราม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ดร.ยุทธนา กันทะพะเยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ศส.เฉลิมพล เรื่องพัฒนาวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ศส.กระจำจ่าง พิทักษ์วงษ์ศิวิทยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ดร.ศรีสุดา ไชยทองสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
รศ.นภัทร วัฒนเทพินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
รศ.สมพันธ์ อำพวัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา
ดร.ชูวงศ์ วัฒนศักดิ์ภูบาล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา
ศส.วิสุทธิ์ พงศ์พฤกษ์ชาติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา
ดร.สุริยา แก้วอาษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ดร.นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
ดร.เมธา ทัศนกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
ดร.นำพน พิพัฒน์ไพบุลย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
ผศ.วิชัย ครอบงิมศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
นายเอกวิทย์ หายักวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
นายวีระ ชันยาภิรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
นายรัก สกฤตพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
นายนครินทร์ ศรีปัญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
นายกฤตยา สมสัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
นายจงเจริญ คุ้มบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
นายกฤษณา บุญมีวิเศษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
นายจีระพงศ์ ศรีวิชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
นายวีระชัย จรบูรมย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
นายปฏิวัติ บุญมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
นายเฉลียว เกตุแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
ผศ.ดร.ปรีชา สากะรังค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
ดร.ภักดิ์วัฒน์ จันทร์ตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
นายไพบุลย์ เกียรติสุขคุณธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.สุพรรณบุรี
รศ.พันธ์ พิริยะวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ประวิช เปรียบเหมือน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ดร.ศักดิ์ระวี ระวังกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ประยงค์ เสาร์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.จักรวัฒน์ บุตรบุญชู	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.สุระ ตันดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.ณรงค์ สีหาจ่อง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ดร.สมชัย หิรัญวโรดม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.วิชัย ผดุงศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ศิริชัย แดงเอม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ณัฐวุฒิ โสมะเกษศรีรินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ดร.ฉัตรชัย	ศุภพิทักษ์สกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.บุญยัง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สุรินทร์	แหงมงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.กฤษณ์ชนม์	ภูมิภคิตพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ณัฐภัทร	พันธ์คง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายพินิจ	จิตจริง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายสมชาย	เขียนสูงเนิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายพร้อมศักดิ์	อภิรติกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายนิติพงศ์	ปานกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายธีระพล	เหมือนขาว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายณัฐพล	หาญปละ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศส.จินตนา	นาคะสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศส.ปราชญ์	คาบมิ่ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.จักรี	ศรีนนท์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.อำนาจ	เรืองอำนาจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ไพฑูรย์	รักเหลือ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายวิโรจน์	ไพราจเนนชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายพงษ์ศักดิ์	อำภา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายบุญยัง	นบขอบ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายอภิรดา	นามแสง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สุทินัน	พรอนุรักษย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.วินัย	วิชัยพาณิชย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ภคิตวิวัฒน์	นันทเกิดผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศส.อิฐอรัญญา	ปิติมล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายณัฏฐพงศ์	อุทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

PE34	การสร้างทดสอบวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์เฟสเดียวกับพาสซีฟโหลด	139
PE35	แบบจำลองรถเก็บขยะใบควมคุมด้วยสัญญาณวิทยุ	143
PE36	ระบบการผลิตไฟฟ้ากระแสสลับขับเคลื่อนด้วยลูกหมุนระบายความร้อนบนหลังคา	147
PW01	การรวมโหลดในระบบจำหน่ายไฟฟ้าปทุมธานี	152
PW02	Measurement Scheme Selection for Power System State Estimation by Improved Stochastic Tabu Search	156
PW03	การออกแบบสร้างชุดทดลองแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง	160
PW04	โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณแรงดันตกในระบบไฟฟ้า	164
PW05	การศึกษาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากระบบไฟฟ้าใกล้เคียงในขณะที่ปฏิบัติงานแบบดับไฟ	168
PW06	คุณลักษณะและสมรรถนะของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าในระบบจำหน่าย 22 kV การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	172
PW07	ผลกระทบของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่เชื่อมต่อในระบบจำหน่ายไฟฟ้า	176
PW08	Application of Particle Swarm Optimization Intelligence to Solving Economic Load Dispatch with Considering the Daily Load Patterns and Generator Constraints	180
PW09	ศึกษาปรากฏการณ์หลังจากฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน	184
PW10	การชดเชยแรงดันตกชั่วคราวด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม	188
PW11	การหาตำแหน่งและขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบจำหน่ายเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย	192
PW12	การออกแบบระบบจำหน่ายสายอากาศ 22 kV ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม	169
PW13	การประเมินความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว	200
PW14	การจัดเรียงสายป้อนอย่างเหมาะสมสำหรับค่าดัชนีโหลดสมดุลในระบบจำหน่ายที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุ	204
PW15	การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ FACTS สำหรับการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย	208

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

การชดเชยแรงดันตกชั่วคราวด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม Voltage sag compensation by using the Dynamic Voltage Restorer

วุฒิไกร จันทร์ขามเรียน กฤษณ์ชนม์ ภูมิภคพิชญ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ต.คลองหก อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ : 0-2549-3571 โทรสาร: 0-2549-3422 E-mail: krischome.b@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้นำเสนอการชดเชยแรงดันตกชั่วคราวโดยใช้ อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม (Dynamic Voltage Restorer, DVR) โดยที่อุปกรณ์นี้จะทำงานในช่วงที่มีแรงดันตกชั่วคราวเกิดขึ้นเท่านั้น ผลการจำลองพบว่าอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมสามารถชดเชยแรงดันตกชั่วคราวได้จริง เนื่องจากแรงดันที่โหลดในช่วงที่เกิดแรงดันตกชั่วคราวมีค่าใกล้เคียงกับแรงดันก่อนการเกิดแรงดันตกชั่วคราว (1.0 p.u.) นอกจากนี้ อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมนี้ยังสามารถทำให้ระบบไฟฟ้ามีคุณภาพที่ดีขึ้นอีกด้วย

คำสำคัญ: อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม, แรงดันตกชั่วคราว, คุณภาพกำลังไฟฟ้า

Abstract

This review presents voltage sag compensation by using the Dynamic Voltage Restorer (DVR). It will operate at a voltage sag occurs. The simulation results show that the DVR can compensate for voltage sag as well. The voltage load during voltage sag is close to normal voltage (1.0 p.u.). In addition, DVR can also make the power system better power quality as well.

Keywords: Dynamic Voltage Restorer (DVR), Voltage sag, Power Quality

1. บทนำ

ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่สำคัญ และมีความจำเป็นต่อการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจและความมั่นคงของประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรม ที่มีความต้องการทางด้านพลังงานไฟฟ้าในปริมาณมาก ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดต่าง ๆ ต้องมีความน่าเชื่อถือสูง ถ้ามีความผิดปกติของระบบไฟฟ้าเกิดขึ้น และส่งผลให้เกิด แรงดันตกชั่วคราว แรงดันเกินชั่วคราว ไฟกระชาก ไฟดับ หรือสัญญาณรบกวนต่างๆที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว [1] จากเหตุการณ์ที่กล่าวมาทำให้แรงดันไฟฟ้าผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นปกติ ซึ่งเกิดขึ้นส่งผลไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า โหลดทางไฟฟ้าส่วนใหญ่ในปัจจุบันมีความไวต่อการเกิด

ความผิดปกติของแรงดันไฟฟ้า ทำให้เกิดความเสียหายต่อตัวอุปกรณ์และข้อมูลต่างๆในระบบอุตสาหกรรม รวมถึงการสูญเสียเวลา โอกาสทางธุรกิจ ผลกระทบที่เกิดจากปัญหาทางไฟฟ้านี้ ก่อให้เกิดความเสียหายอย่างมหาศาล การได้ข้อเท็จจริงสาเหตุและผลกระทบของการเกิดปัญหาทางไฟฟ้านี้ เพื่อเตรียมความพร้อมที่จะรับมือกับปัญหาทางไฟฟ้า และสร้างอุปกรณ์เพิ่มประสิทธิภาพเพื่อที่จะทำให้ระบบไฟฟ้ามีประสิทธิภาพดีขึ้น

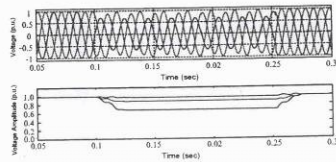
ปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้น อาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชิ้นเล็ก ๆ หรืออุปกรณ์ชิ้นอื่นที่ประกอบอยู่ในอุปกรณ์ไฟฟ้า ทำให้อุปกรณ์เหล่านี้เสียหายหรือไม่สามารถใช้งานได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับความรุนแรงหรือชนิดของปัญหาที่เกิดขึ้น การแปรเปลี่ยนช่วงระยะเวลาสั้น คือปรากฏการณ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันหรือกระแสเพียงช่วงเวลาสั้น ๆ ส่วนมากเกิดจากสภาวะความคิดหรือแรงในระบบไฟฟ้า ซึ่งปรากฏการณ์ทางคุณภาพกำลังไฟฟ้าที่อยู่ในกลุ่มนี้คือ แรงดันตกชั่วคราว แรงดันเกินชั่วคราว หรือ ไฟฟ้าดับชั่วคราว เป็นต้น [2]

ดังนั้นอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้แก้ปัญหาดังกล่าวนี้ก็คือ อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมซึ่งเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ติดตั้งเพื่อกำเนิดแรงดันไฟฟ้าไปชดเชยทำให้โหลดได้รับแรงดันปกติ การควบคุมอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมจำเป็นต้องมีการตรวจจับแรงดันตกชั่วคราว การคำนวณหาขนาดแรงดันและความถี่เพื่อไปชดเชยในเวลาที่ต้องการรวดเร็ว ในปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีต่าง ๆ เข้ามาใช้เพื่อให้ได้คุณสมบัติและประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีที่สุด สิ่งสำคัญที่ต้องมีการในระบบไฟฟ้าคือ การทำงานที่รวดเร็วของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม เพื่อให้ไม่ให้เกิดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (sensitive load) ได้รับความเสียหายหรือได้รับความเสียหายน้อยที่สุด

2. แรงดันตกชั่วคราว

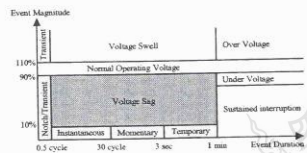
แรงดันตกชั่วคราว (Voltage Dip or Sag) คือ การที่ค่าแรงดันมีขนาดลดลงต่ำกว่าค่าแรงดันปกติในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ และกลับสู่ค่าปกติในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งระยะเวลาดังกล่าวก็คือช่วงระยะเวลาของการเกิดแรงดันตกชั่วคราว โดยส่วนใหญ่เกิดจากความผิดปกติที่มีอยู่ในระบบดังแสดงในรูปที่ 1 หรือการเริ่มต้นเครื่องของภาระไฟฟ้าขนาดใหญ่นี้ มีตัวแปรที่สำคัญอยู่ 2 ตัวคือ ขนาดและระยะเวลาของการเกิดแรงดันตกชั่วคราว

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

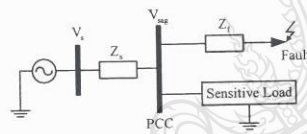


รูปที่ 1 แรงดันตกชั่วครู่ที่เกิดจากความผิดปกติเพียงชนิดเดียวคือกราวด์

คำจำกัดความของแรงดันตกชั่วครู่ในมาตรฐาน IEEE 1159-1995 [3] ดังรูปที่ 2 ได้กล่าวไว้อย่างชัดเจนแล้วว่าเป็นการลดลงของแรงดันแหล่งจ่ายในช่วงเวลาสั้นๆ ไม่เกิน 1 นาที และค่าประสิทธิผล (ms) ของแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.9 per unit (p.u.) ถึง 1 p.u. เมื่อเทียบกับแรงดันไฟฟ้าของระบบที่ 1 p.u. โดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเมื่อเกิดการผิดปกติในระบบไฟฟ้ากำลังดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงแรงดันตามมาตรฐาน IEEE 1159-1995



รูปที่ 3 ความผิดปกติในระบบไฟฟ้าที่ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วครู่

แรงดันตกชั่วครู่ที่ตกพร้อมสายจ่ายโหลดสามารถหาได้จากสมการ (1)

$$V_{sag} = V_s \frac{Z_f}{Z_s + Z_f} \quad (1)$$

- เมื่อ V_{sag} คือ ค่ายอดของแรงดันที่จุด PCC เมื่อเกิด Fault
- V_s คือ แรงดันของแหล่งจ่าย
- Z_f คือ ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างจุด PCC และจุด Fault
- Z_s คือ ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างแหล่งจ่ายและจุด PCC

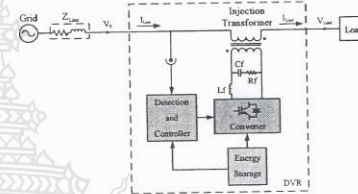
ปัญหาการเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้าไม่ได้ทำให้ระดับแรงดันมีขนาดลดลงเท่านั้นแต่ยังเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปัญหามุมเลื่อนเฟสที่ตัวอุปกรณ์ไฟฟ้าตามมาด้วย [4] ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (2)

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{X_F}{R_F} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{X_S + X_F}{R_S + R_F} \right) \quad (2)$$

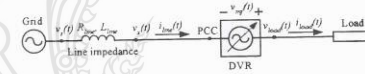
- เมื่อ $Z_F = R_F + jX_F$ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างจุด PCC และจุด Fault
- $Z_S = R_S + jX_S$ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างแหล่งจ่ายและจุด PCC
- ϕ คือ ค่ามุมของแรงดันที่จุด PCC เมื่อเกิด Fault

3. อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วครู่

การทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วครู่แบบอนุกรมเบื้องต้นจะฉีดแรงดันเข้าไปในระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อควบคุมค่ายอดแรงดัน ความถี่ และเฟสที่จุดต่อกริด (Grid) เพื่อให้แรงดันที่โหลดได้รับแรงดันเท่ากับแรงดันมาตรฐาน โครงการการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วครู่แบบอนุกรมแสดงได้ดังรูปที่ 4 ซึ่งโดยทั่วไปประกอบด้วย วงจรแปลงผัน วงจรกรองแรงดัน หม้อแปลง แหล่งเก็บสะสมพลังงาน และระบบควบคุม



รูปที่ 4 วงจรอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วครู่แบบอนุกรม



รูปที่ 5 อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วครู่แบบอนุกรมเปรียบเสมือนแหล่งจ่ายแรงดันที่ต่ออนุกรม

การฉีดแรงดันเข้าไปในระบบไฟฟ้าแบบอนุกรม แรงดันอ้างอิงที่อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วครู่แบบอนุกรมฉีดเข้าไปในระบบนั้นจะแปลงเป็นสัญญาณ PWM ไปสั่งให้อินเวอร์เตอร์ทำงาน ความแตกต่างของแรงดันอ้างอิงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของวิธีการควบคุมแต่ละชนิด ซึ่งมีวิธีการชดเชยอยู่ 3 วิธี [5] คือ

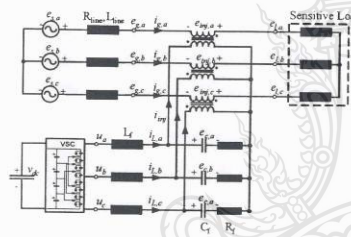
1. การชดเชยแบบ pre-fault ขนาดและมุมเฟสของแรงดันโหลดหลังจากชดเชยด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วครู่แบบอนุกรมจะเหมือนกับสภาวะก่อนเกิดความผิดปกติ
2. การชดเชยแบบ in-phase แรงดันของโหลดที่ได้หลังจากการชดเชยด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วครู่แบบอนุกรมจะมีเฟสเหมือนกับแรงดันของโหลดหลังจากเกิดความผิดปกติ
3. การชดเชยแบบ minimum energy เป็นวิธีการสำหรับลดกำลังแอกทีฟ มุมเฟสของแรงดันที่ฉีดเข้าไปในระบบจะต้องตั้งฉากกับกระแสไลน์

เพื่อให้ง่ายขึ้นเราสามารถแบ่งส่วนประกอบออกเป็น 3 ส่วนหลัก [6] คือ ส่วนแปลงพลังงาน ส่วนที่ใช้เก็บพลังงานและส่วนการควบคุม

$V_{bus(max)}$ คือ แรงดันสูงสุดที่บัสไฟตรง
 $V_{bus(min)}$ คือ แรงดันต่ำสุดที่บัสไฟตรง

3.1 ส่วนการแปลงพลังงาน

เป็นส่วนที่ใช้สร้างแรงดันชดเชยซึ่งส่วนประกอบหลักคือ วงจรแปลงผัน นอกจากนี้ยังมีหม้อแปลงไฟฟ้าที่ร่วมอยู่ด้วยถ้าจำเป็นต้องใช้ในระบบไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันสูงและกลาง รูปที่ 6 แสดงการต่ออุปกรณ์ชดเชยแรงดันคัปชัวร์แบบอนุกรมแบบ 3 เฟส แต่สำหรับระบบไฟฟ้าที่มีระดับแรงดันต่ำ จะไม่นิยมใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเชื่อมต่อกับระบบแปลงผันกับระบบไฟฟ้า แต่จะต้องวงจรแปลงผันเข้าโดยตรงกับระบบไฟฟ้า เนื่องจากข้อเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าทำให้เกิดการเลื่อนเฟส (Phase shift) และแรงดันตกคร่อม (Voltage drop) [7] นอกจากนี้ปัญหาสำคัญอีกอย่างคือ การเกิดการล้นตัวของหม้อแปลงและกระแสอินริช (Inrush current) ซึ่งทำให้ต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดที่คิดเป็น 2 เท่าของปกติตัวชดเชยแรงดันคัปชัวร์ [8] เป็นผลให้หม้อแปลงไฟฟ้ามีขนาดใหญ่และราคาสูง ส่วนในระบบไฟฟ้าที่ระดับแรงดันสูงและกลางนั้น เมื่อใช้หม้อแปลงก็จะมีผลกระทบในส่วนของหม้อแปลงด้วยเช่นกัน



รูปที่ 6 วงจรอุปกรณ์ชดเชยแรงดันคัปชัวร์แบบอนุกรมแบบสามเฟส

3.2 ส่วนที่ใช้เก็บพลังงาน

เป็นส่วนที่มีความสำคัญต่อความสามารถในการชดเชยแรงดันคัปชัวร์ในแง่ของ โหลดที่สามารถรับได้และเวลาในการชดเชย โดยทั่วไปนิยมใช้ตัวเก็บประจุเนื่องจากหาซื้อได้ง่ายและราคาถูก

จากข้อกำหนดข้างต้นสามารถหาขนาดตัวเก็บประจุได้จากสมการที่ (3)

$$C_{bus} = \frac{2V_{com(max)} I_{com(max)} I_{com(max)}}{(V_{bus(max)} - V_{bus(min)})} \quad (3)$$

เมื่อ C_{bus} คือ ขนาดของตัวเก็บประจุ

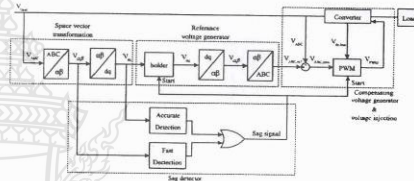
$V_{com(max)}$ คือ แรงดันที่สามารถชดเชยได้สูงสุด

$I_{com(max)}$ คือ กระแสที่สามารถชดเชยได้สูงสุด

$I_{com(max)}$ คือ ระยะเวลาในการชดเชยสูงสุด

3.3 ส่วนการควบคุม

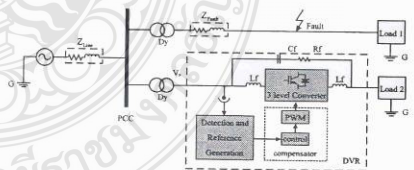
เป็นส่วนที่มีความสำคัญที่สุดในระบบการชดเชยแรงดันคัปชัวร์ มีหน้าที่ในการควบคุมการเริ่มหรือหยุดทำงานของระบบ และการคำนวณหาแรงดันที่ต้องชดเชยแล้วส่งสัญญาณไปยังให้ส่วนการแปลงพลังงานทำงาน การทำงานของระบบควบคุมเริ่มจาก เมื่อเกิดแรงดันคัปชัวร์ในระบบ ส่วนตรวจจับก็จะตรวจสอบว่าเกิดแรงดันคัปชัวร์จริงหรือไม่ เมื่อมีสัญญาณว่าเกิดแรงดันคัปชัวร์แล้วส่วนสร้างแรงดันอ้างอิงก็จะทำการสร้างแรงดันอ้างอิงเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับแรงดันจริงในระบบ จากนั้นก็จะนำแรงดันที่ได้จากการเปรียบเทียบนี้ไปมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) เพื่อขับนำคอนเวอร์เตอร์ให้ฉีดแรงดันเข้าสู่ระบบ บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 บล็อกไดอะแกรมส่วนควบคุมตัวชดเชยแรงดันคัปชัวร์

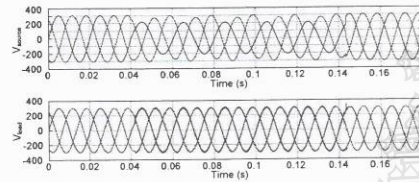
4. การจำลองการทำงาน

ในบทความวิชาการนี้จะทำการจำลองการทำงานในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK โดยจะทำการจำลองการทำงานที่ระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำในประเทศไทยปัจจุบันซึ่งใช้วงจรดังรูปที่ 8 จากรูปที่ 8 แสดงระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยที่ Z_{load} คือค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายที่จุด Point of Common Coupling (PCC), Z_1 คือค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างจุด PCC และ Load 1, Z_2 คือค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างจุด PCC และ Load 2 เมื่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าเกิดความผิดปกติ จะเกิดค่าอิมพีแดนซ์ Z_{fault} ซึ่งกำหนดให้เกิดการผิดปกติที่จุด PCC กับ Load 1 ดังนั้นในระหว่างจุด PCC กับ Load 2 จะมีแรงดันคัปชัวร์เกิดขึ้น

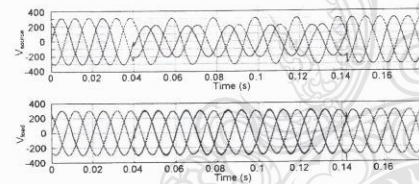


รูปที่ 8 แบบจำลองการทำงานที่วงจรของระบบจำหน่ายไฟฟ้าเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้น

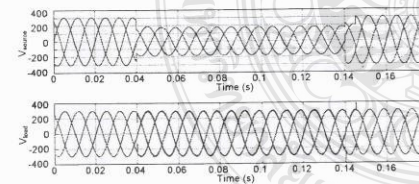
จากการจำลองการชดเชยแรงดันตกชั่วคราวได้ผลดังรูปที่ 9 เป็นการชดเชยแรงดันตกชั่วคราวด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมในกรณีที่เกิดความผิดปกติพร้อมแบบ 1 เฟสที่เฟส A ต่อกราวด์จะเห็นได้ว่าในรูปที่ 9 ด้านบนเป็นรูปคลื่นของแรงดันตกชั่วคราวที่เกิดขึ้น และรูปที่ 9 ด้านล่างเป็นรูปคลื่นที่ได้จากการชดเชยด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม ซึ่งรูปคลื่นที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับก่อนการเกิดแรงดันตกชั่วคราว ในรูปที่ 10 และรูปที่ 11 เป็นการชดเชยแรงดันตกชั่วคราวในกรณีที่เกิดความผิดปกติพร้อมแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส A กับ B และในกรณีที่เกิดความผิดปกติพร้อมแบบ 3 เฟส จะเห็นว่าอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมสามารถชดเชยแรงดันตกชั่วคราวได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 9 การชดเชยแรงดันด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม กรณีเกิดความผิดปกติพร้อมแบบ 1 เฟสที่เฟส A ต่อกราวด์



รูปที่ 10 การชดเชยแรงดันด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม กรณีเกิดความผิดปกติพร้อมแบบ 2 เฟสระหว่างเฟส A กับ B



รูปที่ 11 การชดเชยแรงดันด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม กรณีเกิดความผิดปกติพร้อมแบบ 3 เฟส

5. สรุป

บทความวิชาการนี้นำเสนอการชดเชยแรงดันตกชั่วคราวโดยใช้ อุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมหรือเรียกว่า Dynamic Voltage Restorer (DVR) เพื่อใช้สำหรับชดเชยแรงดันในส่วนที่หายไปในช่วงที่เกิดแรงดันตกชั่วคราว จากผลการจำลองสรุปได้ว่าอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมสามารถแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วคราวได้ดี แรงดันที่เหลือขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราวมีความใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้าขณะปกติ (1.0 p.u.) นอกจากนี้ความไวในการชดเชยเป็นสิ่งที่สำคัญมากสำหรับอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม ยิ่งถ้าอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวมีความไวในการตรวจจับมากเท่าไรก็จะสามารถชดเชยแรงดันได้มากเท่านั้น ซึ่งจะส่งผลให้โหลดที่มีความไวได้รับความเสียหายน้อยลงอีกด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน มทร. รัตนบุรี ที่ช่วยในการสนับสนุนข้อมูลและสถานที่ และขอขอบพระคุณ กองทุนวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีของ กฟภ. ที่ให้การสนับสนุนทุนการวิจัยการสร้างต้นแบบ DVR เพื่อลดผลกระทบของแรงดันตกชั่วคราว

เอกสารอ้างอิง

- [1] วรณัฐ กูร์, "แบบจำลองเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบโซลิตสแตทสำหรับระบบจำหน่ายแรงดันต่ำ", วิทยานิพนธ์ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนบุรี, 2553
- [2] Liu, J. W., Choi, S. S., & Chen, S., "Design of step dynamic voltage regulator for power quality enhancement", IEEE Transactions on Power Delivery, 18(4), 1403 – 1409, 2003.
- [3] "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", IEEE Standards on Power Quality, pp.12, June 14, 1995.
- [4] พิเชษฐ์ ธานีล, "การตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะชนิดสามเฟสโดยใช้วิธีซอฟต์แวร์เพื่อสก็อป", วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2550
- [5] Ahmed A. Hejal, & Mohamed H. Sated, "Dynamic Voltage Restorer Adopting 150° Conduction Angle VSI", IEEE Electrical Power & Energy Conference, 2008.
- [6] Kittawat Chiangchin, "Simplification of control algorithms for voltage sag compensators from practical viewpoints", Thesis, Electrical Engineering, chulalongkorn university, 2006.
- [7] โชชซาซึ ฮินเก็ค "เครื่องกลไฟฟ้า 1" พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., 2544
- [8] Power-One "Power Supplies : Technical Information"

Main MENU

Abstract Book

9th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium

**Energy technology, Environmental
and Social Impact, Nanotechnology
and Material Technology, Energy
Economic and Management, Nuclear
Technology, New Technology and
Other topics related to energy field.**

**On May 25-28, 2011
Wiang Inn, Chiang Rai
Thailand**

Organized by



Sponsored by



Main MENU

International scientific advisory committee:**Chairperson:**

Assoc.Prof.Dr.Namyoot Songthanapitak	Thailand
--------------------------------------	----------

Co-chairperson

Prof.Dr.Kiyoshi Yoshikawa	Japan
---------------------------	-------

Member:

Prof.Dr.Susumu Yoshikawa	Japan
Prof. Dr.Phadungsak Rattanadecho	Thailand
Prof.Dr.Shiro Saka	Japan
Prof. Dr.-Ing. habil. Ingo Stadler	Germany
Prof. Dr.Nipon TangTham	Thailand
Prof. Dr. Takeshi Yao	Japan
Prof. Dr. Masayoshi Okubo	Japan
Prof.Dr.Somchai Wongwises	Thailand
Prof. Dr.Young S. Chai.	Korea
Prof.Dr.Hideaki Ohgaki	Japan
Prof.Dr. Nadarajah Mithulanathan	Australia
Prof. Dr. Masayoshi Okubo	Japan
Prof. Dr. Yukio Ogata	Japan
Prof. Dr. Hitomi Ohara	Japan
Prof. Dr. Yuichi Anada	Japan
Dr. Sei-ichi Aiba	Japan
Assoc.Prof.Dr.Preecha P. Yupapin	Thailand
Assoc.Prof.Dr.Supakij Nontananandh	Thailand
Assoc.Prof.Dr. K. Srinivas Reddy	India
Assoc.Prof.Dr.Somsak Mitatha	Thailand
Assoc.Prof Kosin Chamnongthai	Thailand
Assoc. Professor Dr. David Jan Cowan	USA
Assoc. Prof. Dr. Per B Zetterlund	Australia
Assoc.Prof.Serm JanJai	Thailand
Assoc. Prof. Dr. Takashi Sagawa	Japan

Main MENU

International scientific advisory committee:

Assoc. Prof. Dr. Anchaleeporn Waritswat Lothongkum	Thailand
Assoc. Prof. Dr. Tawatchai Charinpanitkul	Thailand
Assoc. Prof. Dr. Pramoch Rangsunvijit	Thailand
Assist. Prof. Dr. Sonobe Taro	Japan
Asst. Prof. Dr. Sutham Niyomwas	Thailand
Asst. Prof. Dr. Boonyarach Kitiyanan	Thailand
Asst. Prof. Dr. Thammanoon Sreethawong	Thailand
Asst. Prof. Dr. Chanchai Thongpin	Thailand
Asst.Prof.Dr.Kesine Pratumswan	Thailand
Asst.Prof.Dr.Yoshikazu Suzuki	Japan
Asst.Prof.Dr. Kulachate Pianthong	Thailand
Asst Professor. Dr. Sanya Sirivithayapakorn	Thailand
Asst Professor. Dr. Pongsak Noophan	Thailand
Asst.Prof.Dr.-Ing. Thanapong Suwanasri	Thailand
Asst.Prof.Dr. Phayung Meesad	Thailand
Asst.Prof.Dr.Somchai Prakancharoen	Thailand
Dr. Nguyen Minh Tan	Vietnam
Dr. Arthit Sode-yome	Thailand
Dr.Napaporn Phuangpornpitak	Thailand
Dr.Nirun Kongritti	Thailand
Dr. Surawut Chuangchote	Thailand
Dr. -Ing. Supakij Suttiruengwong	Thailand
Dr.Chanyud Kritsunankul	Thailand
Dr.Kullaya Saricheewin	Thailand
Dr.Thaneeya Perbangkhem	Thailand
Dr. Supachai Ngamsinlapasathian	Thailand

Main MENU

Organizing Committee:

Organizing Committee

Chairperson :

Asst.Prof.Dr.Somma Pivsa-Art RMUTT

Member :

Dr.Boonyang Plangklang RMUTT

Dr.Narongchai O-Chareon RMUTT

Dr.Nathabhat Phankong RMUTT

Dr.Wirachai Roynarin RMUTT

Dr.Surin Ngaemngam RMUTT

Dr.Jakkree Srinonchat RMUTT

Dr.Amnoiy Reungwaree RMUTT

Dr.Krischonme Bhumkittipitch RMUTT

Dr.Sorapong Pavasupree RMUTT

Asst. Prof.Dr.Uraiwan Inyaem RMUTT

Dr. Mongkorn Klingajay RMUTT

Mr.Phongsak Ampa RMUTT

Mr.Winai Chanpeng RMUTT

Dr.Montip Lawsuriyonta RMUTT

Asst.Dr.Warunee Klinklai RMUTT

Mr.Prachom Kamput RMUTT

Mr.Somchai Biansoongnern RMUTT

Dr.Natee Srisawat RMUTT

Mrs.Nathacha Petyim RMUTT

Miss Piyamat Sirisangsawat RMUTT

Mrs.Weeraporn Pivsa-Art RMUTT

Dr.Sumonman Niamlang (Secretary) RMUTT



Main MENU

CONTENT

ET26	Improving Light Olefins and Light Oil Production Using Ru/MCM-48 in Catalytic Pyrolysis of Waste Tire C. Witpathomwong, R. Longloilert, S. Wongkasemjit and S. Jitkamka	25
ET28	Potential of Jatropha Curcas Derived Biodiesel for Rice Farmers in Thailand <i>N. Ladawan Na Ayudhaya and S. Garivait</i>	26
ET29	The Experimental Study on Pyrolysis of Cassava Rhizome Utilizing Flue Gas <i>K. Homchat and T. Sucharitakul</i>	27
ET30	Screening of Oleaginous Yeasts and Optimization for Lipid Production Using Crude Glycerol as a Carbon Source <i>S. Kittha and B. Cheirsilp</i>	28
ET31	Self-Assembly Monolayer Molecules for the Improvement of the Anodic Interface in Bulk Heterojunction Solar Cells <i>L. Macaraig, T. Sagawa, H. Sakaguchi, and S. Yoshikawa</i>	29
ET32	Preparation of Encapsulated Magnetite Microparticles with Hydroxyapatite <i>T. Yabutsuka and T. Yao</i>	30
ET34	Soot Treatment by Using High Voltage Pulse Energized Electrostatic Precipitator <i>N. Thonglek, C. Dechthamarong and T. Kiatsiroat</i>	31
ET35	State of The Art of Biomass Gasification Power Plants in Thailand <i>N. Assanee, C. Boonwan</i>	32
ET36	The Effect of Series-Connected Transformer in DVR Applications <i>W. Chankhamrian and K. Bhumkittipich</i>	33
ET37	The Effect of The Input Load Current Changed to a 1.2 kW PEMFC Performance <i>W. Chanpeng and Y. Khunatorn</i>	34
ET38	Thermal Behaviors in Square Channel with 45° U-Shaped Ribs <i>M. Pimsarn and P. Promvongse</i>	35
ET39	Effects of difference flow channel designs on Proton Exchange Membrane Fuel Cell using 3-D Model <i>N. Jaruwatupant and Y. Khunatorn</i>	36
ET40	Torrefaction and Pelletization for biomass upgrading <i>W. Wattananoi, O. Khumsak, N. Worasuwanarak</i>	37

[Back to Session](#)[Main MENU](#)

9th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium, Chiang Rai, Thailand
May 25-28, 2011

[Full Paper](#)[ET36](#)

THE EFFECT OF SERIES-CONNECTED TRANSFORMER IN DVR APPLICATIONS

W. Chankhamrian and K. Bhumkittipich
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand

Abstract

This paper presents the effect of Series-Connected Transformer in DVR Applications. According to the DVR operation, the comparison of with and without series-connected transformer is studied. The simulation results show that the magnitude of load voltage without the transformer about 1.0 p.u. (per unit) more than with transformer. Moreover, it has not effect of phase shift and no voltage drop. Therefore, it can be ensured that the effect of transformer, that occurred on results, has to consider for DVR applications.

Keywords — Dynamic Voltage Restorer; Transformer; Voltage Sag.



The Effect of Series-Connected Transformer in DVR Applications

W. Chankhamrian and K. Bhumkittipich

ET36

Abstract— This paper presents the effect of Series-Connected Transformer in DVR Applications. According to the DVR operation, the comparison of with and without series-connected transformer is studied. The simulation results show that the magnitude of load voltage without the transformer about 1.0 p.u. (per unit) more than with transformer. Moreover, it has no effect of phase shift and no voltage drop. Therefore, it can be ensured that the effect of transformer, that occurred on results, has to consider for DVR applications.

Keywords— Dynamic Voltage Restorer; Transformer; Voltage Sag.

1. INTRODUCTION

Voltage sag is the one of power quality problems that will damage production process, especially; the industry is controlled by power electronics equipments. The voltage sags in power system under IEEE 1159-1995 standard [1] is the reduction of the magnitude of voltage supply in a short time, since 0.5 cycles until a minute and return to normal conditions as shown in Fig. 1. The rms value of voltage between 0.1 p.u. and 0.9 p.u. compared with the voltage of the system is 1.0 p.u. There are two important variables, the magnitude and duration of voltage sag.

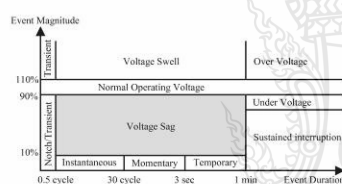


Fig.1. IEEE 1159-1995 standard.

Dynamic Voltage Restorer (DVR) is the electrical equipment, installed to compensate for the lost voltage when voltage sag occurred. There are many researchers studied and developed the DVR technique. Single control loop technique is one of DVR technique which can control the peak of voltage but it has problem in control sensitivity and the presentation of control information [2]. Thus, DVR is not used injection voltage transformers and capacitors DC-link can be self-recharged in normal condition are developed. So if there is not transformer, then the DVR has been reducing the size and costs [3]. After that a multi-functional DVR presented that in addition to compensating voltage sag and voltage swell can limit fault current and keep constant large variation of the system frequency. But results showed that the efficiency of compensation is not clear [4]. Although the

results of research are able to compensate for the voltage sag but the control of the DVR is still unclear. Therefore, an attempt to reduce the complexity of the algorithm in the control DVR and don't use transformers for Voltage injection [5].

The study of the DVR, mainly will not mentioned about the effect of the transformer. Knowledge, Transformers has flaw is incur phase shift and voltage drop. Moreover, the saturation of the transformer and inrush current is cause need to use is the transformer with rated 2 times the rated DVR [5]. Then this paper presents the analysis of DVR and comparison between with and without transformers. In addition, show that compensation method is not using transformers. It has effective more than with transformer. The presentation is the following steps.

This paper is organized as follows. The analysis of main performance of the DVR is described in Section II. Simulation and results using the Matlab/Simulink program is presented in Section III. And finally, conclusion of the DVR is presented in Section IV.

2. ANALYSIS OF MAIN PERFORMANCE OF DVR

DVR generally consists of 3 main parts: energy conversion, energy storage and controller as shown in Fig. 2. Compensate method for the voltage of the DVR can be classified into 3 methods [6];

- 1) Pre-Sag Compensation
- 2) in-Phase Compensation
- 3) Energy Optimization Technique

In this present work, Pre-Sag Compensation method is selected because can compensate both the size and voltage phase angle.

Control of DVR

Operation of control systems starting in occurred voltage sag. Detector will verify it. When there are signs it, the reference voltage generator part is created reference voltage for comparison with the actual voltage in the system. After, the voltage in this comparison will sent to PWM in the compensating voltage generator & voltage injection part for drive the converter, so it will inject voltage into the system. Block diagram of the control as show in Fig. 3.

W. Chankhamrian is with the Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani 12110, Thailand, E-mail: Wuth_psrc@yahoo.com

K. Bhumkittipich is with the Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani 12110, Thailand, E-mail: krischonme.b@en.rmutt.ac.th

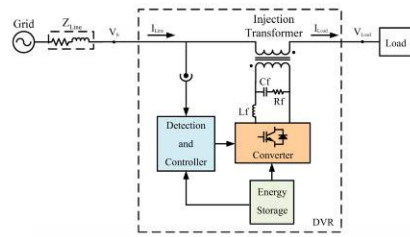


Fig.2. Components of the DVR

Series-connected transformer

Transformer acts as a power transfer from the DVR to the load. Transformer consists of 2 sets of windings around the core, which can be written in the equivalent circuit as shown in Fig. 4 [7]. For the equivalent circuit will be

$$X_0 = E_1 / I_\mu \tag{1}$$

$$R_0 = E_1 / I_\omega \tag{2}$$

$$Z_m = R_0 // X_0 \tag{3}$$

$$Z_1 = R_1 + X_1 \tag{4}$$

From $E_2 / E_1 = N_2 / N_1 = a$ we can move values from one side to the other side. In Fig. 4 when the secondary winding moved toward primary winding. We can write the complete equivalent circuit of a transformer as shown in Fig. 5. Parameters move from the secondary winding toward the primary winding can be obtained from the following equation.

$$I'_2 = aI_2 \tag{5}$$

$$V'_2 = V_2 / a \tag{6}$$

$$R'_2 = R_2 / a^2 \tag{7}$$

$$X'_2 = X_2 / a^2 \tag{8}$$

The complete equivalent circuit of transformer can be evaluated V'_2 from the ratio of the voltage;

$$V'_2 = \left(\frac{I'_2 Z'_2}{I_1 Z_1 + I_0 Z_m} \right) V_1 \tag{9}$$

The transformer is connected between converter and power system will caused a phase shift and voltage drop due to the drawback of the transformer. Moreover, the transformer rate is 2 time of DVR rate because the saturation of transformer and inrush current. Thus, the transformer is large and expensive.

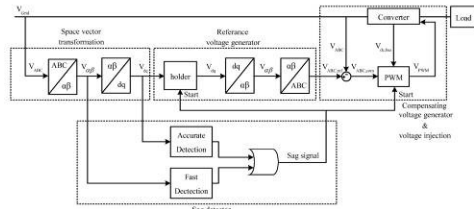


Fig.3. Block diagram of the control of the DVR

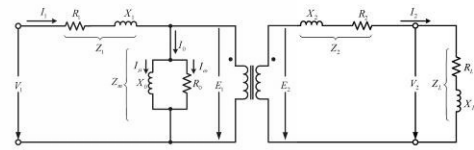


Fig.4. The equivalent circuit of series connected transformer

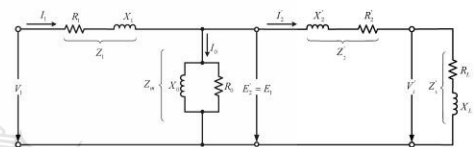


Fig.5. The complete equivalent circuit of series connected transformer

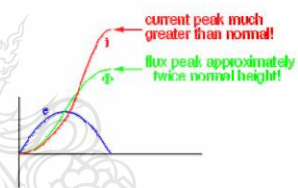


Fig.6. Current, flux and voltage waveform of series connected transformer.

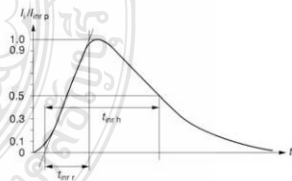


Fig.7. Inrush current waveform

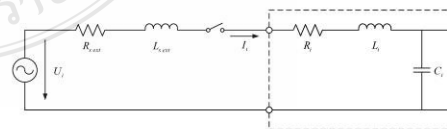


Fig.8. Circuit of occurred inrush current.

Inrush Current

When transformer connected to AC power supply the initial state will be surge current flow into through the primary winding, called inrush current. This is similar to the start-up of the motor suddenly.

When starting inject voltage to transformer, the magnetic flux and current in the coil will start at zero and gradually increases as shown in Fig. 6. So in the beginning of transformer flux is approximately twice the maximum size of the normal because the total area under waveforms of the voltage in first half cycle. In the ideal transformer, the magnetic current increases of approximately twice the normal maximum as well because generation magnetomotive force (mmf) which is flux higher than the normal. Winding currents generated mmf to cause flux in winding increases more than twice the maximum value of normal flux. This is causing inrush current in transformers. That requires a transformer rated is the 2 times of the rated DVR. If the transformer has a magnetic field residues in the core during the time of the connection to supply makes inrush current may have increased the intensity. From Fig. 7 and 8 the peak value ($I_{inr p}$) of the inrush current can be estimated as follows: [10].

$$I_{inr p} < \frac{U_i}{R_{s ext} + R_i} \tag{10}$$

The rise time $t_{inr r}$ is given by:

$$t_{inr r} \approx \frac{L_{s ext} + L_i}{R_{s ext} + R_i} \tag{11}$$

The time to half value $t_{inr h}$ is given by:

$$t_{inr h} \approx 0.7 \times (R_{s ext} + R_i) \times C_i + t_{inr r} \tag{12}$$

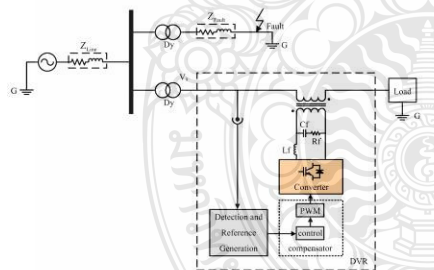
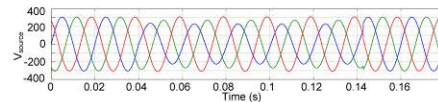


Fig.9. Circuit Simulation of the DVR.

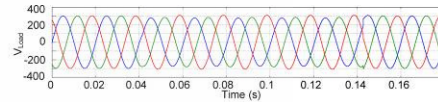
3. SIMULATION RESULTS

The simulation program is Matlab / Simulink. DVR will be connected to the secondary side of transformers in the distribution system as shown in Fig. 9. The defined as fault in the power system at a time 0.1 seconds until 0.04 seconds, three-phase voltage 380 V 50 Hz, Switching frequency 20 kHz, $C_i = 8\mu F$, $L_r = 2mH$, $R_r = 32\Omega$, $C_{bus} = 6,600 \mu F$, Criteria of the voltage sag $|V| \leq 198 V$,

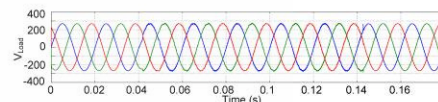
$\Delta\theta > 1.85^\circ$ or $\Delta\theta < -1.75^\circ$ and load is series RL, it has value 13Ω and $19 mH$ respectively.



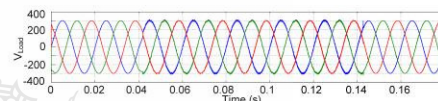
(a) Voltage power supply at occurred voltage sag.



(b) Compensation with transformer. (R_0, X_0 and Z_{01} are small)

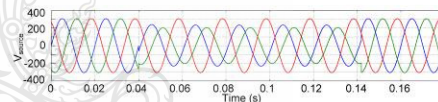


(c) Compensation with transformer. (R_0, X_0 and Z_{01} are large)

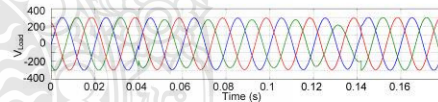


(d) Compensation without transformer.

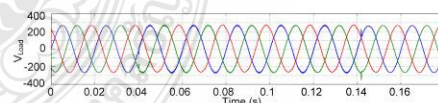
Fig.10. Compensation with DVR In case of a single-phase fault at phase A to ground.



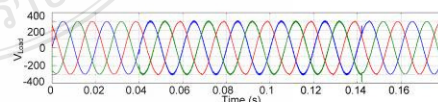
(a) Voltage power supply at occurred voltage sag.



(b) Compensation with transformer. (R_0, X_0 and Z_{01} are small)



(c) Compensation with transformer. (R_0, X_0 and Z_{01} are large)



(d) Compensation without transformer.

Fig.11. Compensation with DVR In case of a double-phase fault between phase A and B.

4. CONCLUSION

The comparison between with and without transformers is considered in this paper. Simulation results showed that the without transformers are performance better than with transformer, because the voltage after the installation of the DVR is about 1.0 p.u. compared with voltage of the power system is 1.0 p.u. For the compensated with transformer, the key factors affecting the performance of the DVR is impedance of the transformer. If the large impedance, the residual current in the transformers will the voltage drop of the transformers were large. Therefore, the size of the transformer should be selected to the small impedance can reduce voltage drop in the transformer. Moreover, if build a prototype. The DVR without transformers can reduce the cost of the transformer.

ACKNOWLEDGMENT

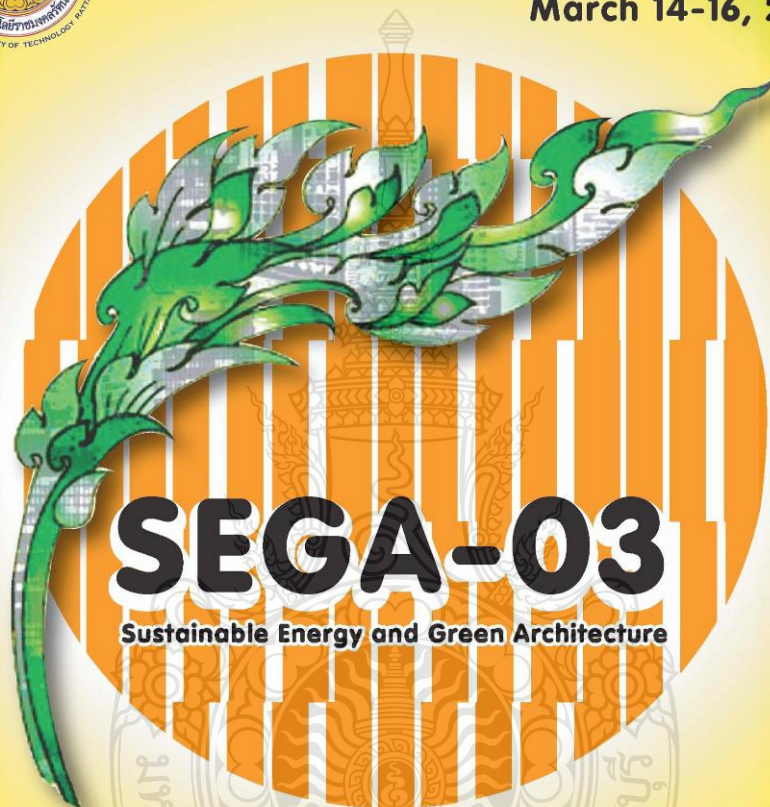
The authors would like to acknowledge the Power and Energy System Research Center, Department of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology, and the Fund Research and Development of the PEA.

REFERENCES

- [1] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, *IEEE Standards on Power Quality*, June 14, 1995, pp.12.
- [2] Liu, J. W., Choi, S. S., & Chen, S. 2003. Design of step dynamic voltage regulator for power quality enhancement, *In Proceedings of the IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1403 – 1409.
- [3] Eng Kian Kenneth Sng, S. S. Choi, D. Mahinda Vilathgamuwa. 2004. Analysis of Series Compensation and DC-Link Voltage Controls of a Transformerless Self-Charging Dynamic Voltage Restorer, *In Proceedings of the IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1511 – 1518.
- [4] M.R.Banaei, A. Nahavandi, S. H. Hosseini. 2009. Investigation of Multi-Functional DVR to Improve Power Quality Characteristic, *In Proceedings of the ECTICON 6th*, Pattaya Chonburi, pp. 144 – 149.
- [5] Kittiwat Chiangchin. 2006. Simplification of control algorithms for voltage sag compensators from practical viewpoints, *In Thesis of Electrical Engineering, chulalongkorn university*.
- [6] W. Chankhamrian and K. Bhumkittipich. 2010. Design of 10 kVA Dynamic Voltage Restorer by Three-Level Diode-Clamped Converter, *In proceeding of 33rd Electrical Engineering Conference*, Chiang Mai, 1-3 December, pp. 173-176.
- [7] ChaiChan Hinkerd, 2001. *machines 1*. TPA Publishing Bangkok.
- [8] Tony R. Kuphaldt. AC Theory-Table Of Contents. from the World Wide Web: http://www.opamp-electronics.com/tutorials/inrush_current_2_09_12.htm
- [9] Power-One. Power Supplies : Technical Information.



Program and Abstract Proceedings
The 3rd International Conference
on Sustainable Energy and Green Architecture
Chaophya Park Hotel, Bangkok, Thailand
March 14-16, 2012



SEGA-03
Sustainable Energy and Green Architecture

**Conference Theme: Climate Change Mitigation
 through Sustainable Built Environment Development**



Organized by:
 Rattanaksoin College for Sustainable Energy and Environment
 Rajamangala University of Technology Rattanakosin



Co-Hosted by:
 Faculty of Architecture Kasetsart University

Organizing Committees

Chairperson

- Joseph KHEDARI

Advisor

- Issaree HUNSACHAROONROJ

Treasurer

- Montana WISAWABUMRUNGCHAI

Conference Coordinator

- Pard TEEKASAP

International Scientific Committee

- Mana AMORNKITBAMRUNG *King Mongkut's University of Technology, Thailand*
- Hazim B. AWBI *University of Reading, UK*
- Nam-Choon BAEK *Korea Institute of Energy Research, Korea*
- Tika BUNNAG *Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Thailand*
- Preeda CHANTAWONG *King Mongkut's University of Technology, Thailand*
- Michel DAGUENET *France*
- David ETHERIDGE *University of Nottingham, UK*
- Gian Vincenzo FRACASTORO *Politecnico di Torino, Italy*
- Yves GAGNON *University of Moncton, Canada*
- Shabbir H. GHEEWALA *King Mongkut's University of Technology, Thailand*
- Fariborz HAGHIGHAT *Concordia University, Canada*
- Jongjit HIRUNLABH *King Mongkut's University of Technology, Thailand*
- Yoon Jong HO *Hanbat National University, Korea*
- Issaree HUNSACHAROONROJ *Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Thailand*
- Raphael Muzondiwa JINGURA *Chinhoyi University of Technology, Zimbabwe*

- Joseph KHEDARI *Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Thailand*
- Pojanie KHUMMONGKOL *King Mongkut's University of Technology, Thailand*
- Yuguo LI *University of Hong Kong, China*
- Martin LIDDAMENT *The International Journal of Ventilation, UK*
- Christian MASSON *University of Quebec, Canada*
- Noppanun NANKONGNAB *Mahidol University, Thailand*
- Hideaki OHGAKI *Nagoya University, Japan*
- S. A. OKE *University of Lagos, Nigeria*
- Phadungsak RATTANADECHO *Thammasat University, Thailand*
- Claude-Alain ROULET *Swiss Federal Institute of Technology, Switzerland*
- Massood SAMII *Southern New Hampshire University, USA*
- S. C. SEKHAR *National University of Singapore, Singapore*
- U-Cheul SHIN *Daejeon University, Korea*
- Suntud SIRIANUNTAPIBOON *King Mongkut's University of Technology, Thailand*
- Pasinee SUNAKORN *Kasetsart University, Thailand*
- Pattaranan TAKKANON *Kasetsart University, Thailand*
- Sombat TEEKASAP *Eastern Asia University, Thailand*
- Kittichai TRIRATANASIRICHAH *Khon Kaen University, Thailand*
- Ming-Lang TSENG *Ming Dao University, Taiwan*
- Sopa VISITSAK *Kasetsart University, Thailand*
- Jompob WAEWSAK *Thaksin University, Thailand*
- L. Q. "Rick" WANG *University of Hong Kong, China*
- Somchai WONGWISES *King Mongkut's University of Technology, Thailand*
- Nuparb YAMTRAIIPAT *Mahanakorn University of Technology, Thailand*
- Belkacem ZEGHMATI *Universite de Perpignan Via Domitia, France*

Committee

- Tika BUNNAG (Chair)
- Vorakamol BOONYAYOTHIN
- Kanokorn HUSSARO
- Waraporn KLINBUN
- Manjiri KUNTE
- Withaya PUANGSOMBUT
- Pard TEEKASAP
- Tusanee TONDEE

Conference Staff

- Jiraporn JOOMKAMTA
- Chaiporn SUPHAHITANUKOOL
- Montana WISAWABUMRUNGCHAI
- Pathummas YONGYOOT

Webmaster

- Adisorn SANGSONGFA

Cover Designer

- Thana ANANACHA



Abstract Contents (Cont.)

	Page
BT31 Prospective Framework for Exploitation of Agriculture Waste as Material for Energy Conservation Building	115
BT32 Test Performance of Side Lighting Through Light-Pipe Model for Buildings	116
BT33 Development of Dynamic Voltage Restorer by Using the Topology of Diode-Clamped Three-Level Converter	117
BT34 Experimental Investigation of Energy Performance of Split type Air Conditioning under various indoor setpoint temperatures and different air flowrates through cooling coil	118
BT35 An Experimental Study of Energy Performance of Split Type Air-Conditioner at Different Apparatus Dew Point Temperatures	119
BT36 Cost-Effectiveness Based On Assessment Of Energy Saving Roof and Wall Construction In Thailand	120
BT37 An Examination Of Energy Conservation Material For The Construction Of Bio Climatic House	121





SEGA-03
Sustainable Energy and Green Architecture

3rd International Conference on Sustainable Energy and Green Architecture
14-16 March, 2012, Bangkok

BT33

Development of Dynamic Voltage Restorer by Using the Topology of Diode-Clamped Three-Level Converter

Wuthikrai Chankhamrian, Krischonme Bhumkittipich

Power and Energy System Research Center, Department of Electrical Engineering
Rajamangala University of Technology Thanyaburi
39 Moo 1, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani 12110
Tel: 0-2549-3571 Fax: 0-2549-3422 Email: krischonme.b@en.rmutt.ac.th

Abstract

This paper presents development dynamic voltage restorer (DVR) using three-level diode-clamped converter for create voltage to compensate with switching device is IGBT. Converter controls injection voltage by using voltage regulations, low-pass filter for filter harmonics signal and reduce signal distortion from the DVR. It is considered output voltage waveform of the converter. Simulation and actual test results show the effectiveness of the DVR to present. The output voltage waveform of three-level diode-clamped converter has a signal distortion less than output voltage waveform of original two-level converter. Moreover, three-level diode-clamped converter can also get a higher voltage range as well.

Key words: Dynamic Voltage Restorer, Three-Level Diode-Clamped Converter, Voltage Sag

DEVELOPMENT OF DYNAMIC VOLTAGE RESTORER BY USING THE TOPOLOGY OF DIODE-CLAMPED THREE-LEVEL CONVERTER

Wuthikrai Chankhamrian, Krischonme Bhumkittipich
Power and Energy System Research Center, Department of Electrical Engineering
Rajamangala University of Technology Thanyaburi
39 Moo 1, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani 12110
Tel: 0-2549-3571 Fax: 0-2549-3422 Email: krischonme.b@en.rmutt.ac.th

ABSTRACT

This paper presents development dynamic voltage restorer (DVR) using three-level diode-clamped converter for create voltage to compensate with switching device is IGBT. Converter controls injection voltage by using voltage regulations, low-pass filter for filter harmonics signal and reduce signal distortion from the DVR. It is considered output voltage waveform of the converter. Simulation results show the effectiveness of the DVR to present. The output voltage waveform of three-level diode-clamped converter has a signal distortion less than output voltage waveform of original two-level converter. Moreover, three-level diode-clamped converter can also get a higher voltage range as well.

INTRODUCTION

Transmission power system is an important factor and have essential for economic development and the stability of Thailand, especially the development of industries that require large amounts of electrical energy. Transmission power system to supply the electric power to the load must have high reliability. If fault occurs in the power system will cause voltage sag, voltage swell, interruption or disturbances that cause rapid changes in voltage (Wanida, 2010). From the events above that causes the voltage difference of the normally wave form, these affect to consumers. Most of the electrical load currently is sensitive to the failure of the voltage, cause damage to the equipment and information systems, including the loss of time and business opportunities affected hugely damage. Considering the causes and effects of power quality problems to prepare to cope with this problem and create equipment in order to optimize system efficiency is improved.

The power quality problems that may affect the electrical equipment such as small electronic devices or other equipment contained in appliances, make device is damage or cannot use it, depending on the severity or type of problem. Short duration variation is phenomenon that is changing the voltage or current only a short time. Most caused by fault in power system. Which phenomenon of power quality in this group are voltage sag, voltage swell and voltage interruption (Liu, J. W. et al., 2003).

Therefore equipment will be used to solve the problem this is Dynamic Voltage Restorer (DVR)

which is connected for the generate voltage to compensate make load voltage is normal. DVR control is required to detection the voltage sag to calculation the voltage magnitude and frequency to compensate correct. Present the various technologies used to provide the features and performance the best. The important power system requirements are operation rapid of the DVR, for sensitive load not damaged or has been damaged the least.

In the recent past, there are many researches on the DVR, such as design using a single loop control. Which can control the peak of voltage but sensitivity of control is bad. It also does not display details of control (Liu, J. W. et al., 2003). Then, proposed a new method to the system. However, there is no clear comparison to the past research (Awad, H. et al., 2003). Later has tried to demonstrate the investment analysis of complex systems clearly, but also lack of basic information in order to understand easy (Ghosh, A. et al., 2003). Although, results of various researches can be compensate for voltage sag. Also has unclear in the control of the DVR. Therefore has tried to simplify the algorithm in terms of control. However, the converter is operating to make noise and disturb the measurement signal (Kittiwat, 2006).

Therefore, this paper proposes development of dynamic voltage restorer (DVR) by using the topology of diode-clamped three-level converter to reduce signal distortion from the DVR. The proposed procedure is as follows.

VOLTAGE DIP OR SAG

Voltage Dip or Sag is the magnitude of the voltage lower than normally voltage during a short period and return to normal. Which that period is the duration of the voltage sag, mainly, cause by a fault in the power system as shown in Figure 1 or the start-up of a large load. It has two important parameters, namely the magnitude and duration of the voltage sag.

The voltage sags in power system under IEEE 1159-1995 standard (IEEE Recommended, 1995) is the reduction of the magnitude of voltage supply in a short time, since 0.5 cycles until a minute and return to normal conditions as shown in Figure 2. The rms value of voltage between 0.1 p.u. and 0.9 p.u. compared with the voltage of the system is 1.0 p.u.. Mainly, cause by a fault in the power system as shown in Figure 3.

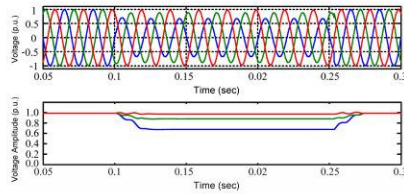


Figure 1 voltage sag caused by the single-phase to ground fault

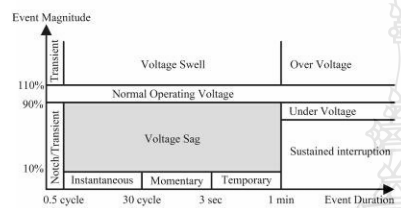


Figure 2 IEEE 1159-1995 standard

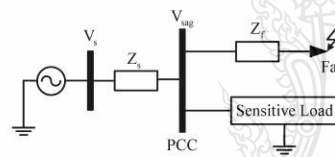


Figure 3 fault in power system that causes the voltage sag

Voltage sag drop across load line can be obtained from equation (1).

$$V_{sag} = V_s \frac{Z_f}{Z_s + Z_f} \quad (1)$$

When V_{sag} is peak value of voltage at PCC point when fault occurred
 V_s is voltage source
 Z_f is impedance between PCC point and Fault point
 Z_s is impedance between source and PCC point

Fault in the power system are not only voltage levels reduced but also the main reason that causes the phase angle of the electrical equipment as well

(Phichet, 2007). This can be obtained from equation (2).

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{X_f}{R_f} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{X_s + X_f}{R_s + R_f} \right) \quad (2)$$

When $Z_f = R_f + jX_f$ is impedance between PCC point and Fault point

$Z_s = R_s + jX_s$ is impedance between source point and PCC point

ϕ is voltage angle at PCC point when fault occurred

Voltage Sag Lost Energy Index

Voltage sag will cause power losses in power transmission systems, which can be found in the lost energy index follow equation (3) (R.S. Thallam et al., 2000).

$$W = \left\{ 1 - \frac{V_a}{V_{nom}} \right\}^{3.14} \times T_a + \left\{ 1 - \frac{V_b}{V_{nom}} \right\}^{3.14} \times T_b + \left\{ 1 - \frac{V_c}{V_{nom}} \right\}^{3.14} \times T_c \quad (3)$$

When W is lost energy index during voltage sag occur

V_a, V_b, V_c is amplitude of voltage sag for each phase

V_{nom} is normally voltage at voltage sag point

T_a, T_b, T_c is duration of voltage sag occur for each phase

DYNAMIC VOLTAGE RESTORER

The operation of DVR, initial will injected voltage into the power system to peak voltage, frequency and phase control at the grid points, to make the voltage at the load has been equal to the normal voltage. The structure of the DVR is show in Figure 4. Generally consists of a converter, filter, transformers, energy storage and control systems.

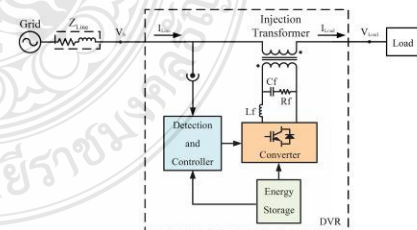


Figure 4 Components of the DVR

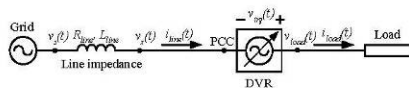


Figure 5 DVR is like a voltage source connected in series

Figure 5 shows the DVR, which is like a voltage source that can control the peak, frequency and phase of voltage.

Injected voltage series to the power system, reference voltage injection of the DVR into the system will be converted to a PWM signal to inverter operation. The difference of the reference voltage, depending on the suitability of various control methods. Is there a way to compensate for the 3 methods (Ahmed A. Helal et al., 2008) is

1. Pre-Sag Compensation: Magnitude and phase angle of the load voltage after compensation with DVR is the same as before the fault condition as shown in Figure 6.

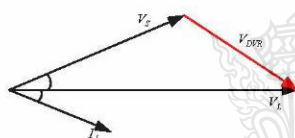


Figure 6 Phasor diagram of Pre-Sag Compensation method

2. In-Phase Compensation: The load voltage is compensated by the DVR will have the same phase of the load voltage after the fault as shown in Figure 7.

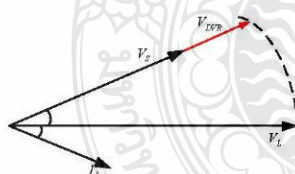


Figure 7 Phasor diagram of In-Phase Compensation method

3. Energy Optimization Technique: A method for reducing active power. Phase angle of the voltage injected into the system must be perpendicular to the current line as shown in Figure 8.

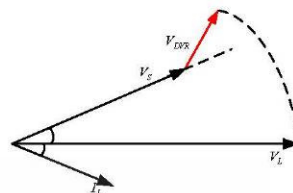


Figure 8 Phasor diagram of Energy Optimization Technique method

Compared methods the 3 methods, it is obvious that the magnitude of the voltage injected into the system of pre-fault compensation and minimum energy optimization is larger than the in-phase compensation methods, but The minimum energy optimization method, DVR will use active power in very small quantities. The pre-fault compensation method is used active power larger than other method. However, it is the most accurate to compensate. To simplify, we can split the components into 3 main parts (Kittiwat, 2006) is the converter, energy storage and controller parts.

Converter part

This part is used to generate a voltage compensate. The main component is the converter circuit. In addition transformer may be included, if the installation of power system has high and medium voltage. Figure 9 shows the 3-phase DVR. However, for power system has low voltage. It was not appreciated used transformer connect to between converter circuit and power system. It is a direct converter to power system. Because of the disadvantages of the transformer causes a phase shift and voltage drop (ChaiChan, 2001). In addition important problem is the saturation of the transformer and Inrush current. This makes requires transformer size is 2 times of size of the DVR (Power-One. Power Supplies, 2000). As a result, transformer has large size and expensive. In high and medium voltage power system that, when used transformer will have an impact on the transformer as well.

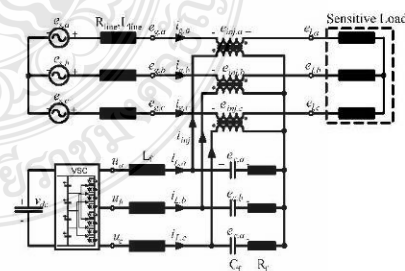


Figure 9 Circuit of the 3-phase DVR

Diode-clamped three-level converter

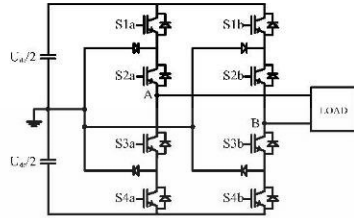


Figure 10 Diode-clamped three-level converter 1-phase type

Diode-clamped three-level converter 1-phase type shown in Figure 10 will use a three-level of DC voltage from the two capacitors connected in series to divide voltage of DC power supply. Three-level converter advantages over two-level converter is the voltage levels increase, making output current with low distortion and reduced inrush current for the switching device. Compared to the two-level converter with a DC link voltage is same. Generate pulse width modulation (PWM) method for multi-level converter can divide to 3 types (Bhabani Shankar Pattnaik et al., 2009) is

1. APOD: Alternative Phase Opposition Disposition Triangle waveform adjacent to the phase difference 180°. Triangle waveform for three-level converter is similar to generate PWM method POD type as shown in Figure 11.

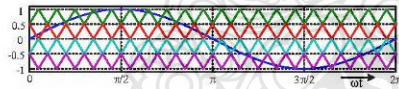


Figure 11 Alternative Phase Opposition Disposition (APOD)

2. POD: Phase Opposition Disposition Triangle waveform above with below when compared to the reference zero point will have the phase difference 180° as shown in Figure 12.

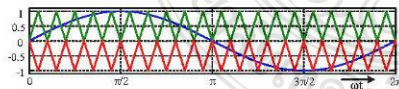


Figure 12 Phase Opposition Disposition) POD(

3. PD: Phase Disposition All triangle waveform must have the same phase as shown in Figure 13.

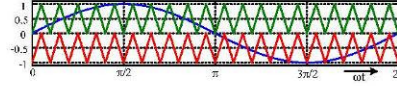


Figure 13 Phase Disposition) PD(

From 3 techniques above, generate PWM method PD type will cause the least harmonics. So in this paper select of techniques PD to generate signal as shown in Figure 14. The advantages of this technique is. Low frequency of the harmonics frequency was born the two times of the switching frequency. In addition the two times of harmonics frequency of the switching frequency will zero just remaining Sideband as shown in Figure 15. Thus makes it easy to filter.

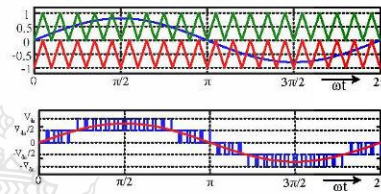


Figure 14 output of three-level converter using PWM signal PD type



Figure 15 spectrum of voltage using PWM signal PD type

Energy storage part

This part has important for capability to compensate for voltage sag in terms of load that can be received and the time to compensate. Generally use capacitors to be purchased easily and cheaply. Capacitor size can be obtained from equation (4).

$$C_{bus} = \frac{2V_{com(max)} I_{com(max)} t_{com(max)}}{(V_{bus(max)}^2 - V_{bus(min)}^2)} \quad (4)$$

When C_{bus} is capacitor size
 $V_{com(max)}$ is maximum voltage that can be compensate
 $I_{com(max)}$ is maximum current that can be compensate

- $t_{com(max)}$ is maximum duration can be compensate
- $V_{bus(max)}$ is maximum DC bus voltage
- $V_{bus(min)}$ is minimum DC bus voltage

Controller part

this part is the most important in the compensation voltage sag. Responsible for controlling the start or stop the system and calculate the compensate for voltage then send signal to the converter part to operation. Operation of control systems starting in occurred voltage sag. Detector will verify it. When there are signs it, the reference voltage generator part is created reference voltage for comparison with the actual voltage in the system. After, the voltage in this comparison will sent to PWM in the compensating voltage generator & voltage injection part for drive the converter, so it will inject voltage into the system. Block diagram of the control as show in Figure 16.

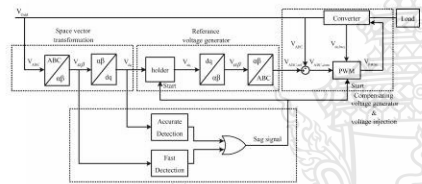


Figure 16 Block diagram of the control of the DVR

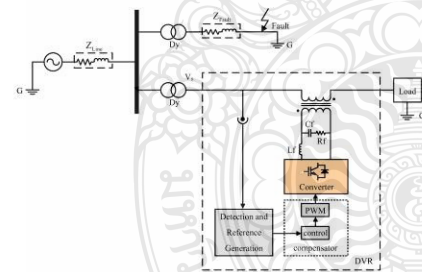


Figure 17 Circuit Simulation of the DVR

SIMULATION

The simulation program is MATLAB/SIMULINK. DVR will be connected to the secondary side of transformers in the distribution system as shown in Figure 17. The defined as fault in the power system at a time 0.1 seconds until 0.04 seconds, three-phase voltage 380 V 50 Hz, Switching frequency 20 kHz, $C_f = 8\mu F$, $L_f = 2mH$, $R_f = 32\Omega$, $C_{bus} = 6,600 \mu F$,

Criteria of the voltage sag $|V| \leq 198 V$, $\Delta\theta > 1.85^\circ$ or $\Delta\theta < 1.75^\circ$ and load is series RL, it has value 13 Ω and 19 mH respectively.

DISCUSSION AND RESULT ANALYSIS

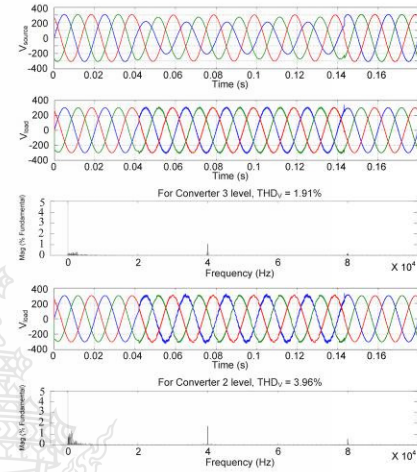


Figure 18 voltage compensation with three-levels and two-levels converter, respectively. In case of sigle line to ground fault at phase A to ground.

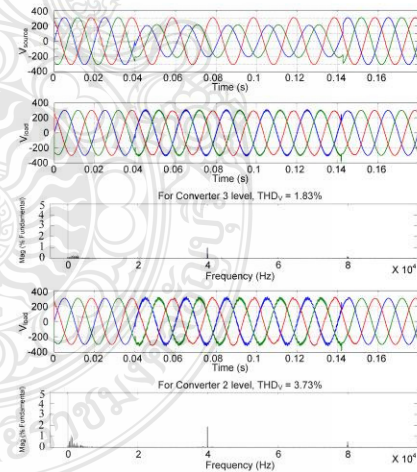


Figure 19 voltage compensation with three-levels and two-levels converter, respectively. In case of double line fault between phase A and B.

From simulation compensation voltage sag the results shown in Figure 18 and Figure 19. That compensation by three-level and two-level converters can compensate for voltage sag as well. However, in the circuit used three-level converter, it is obvious that the harmonics frequency (f_h) 40 kHz and 80 kHz is less than used two-level converter. The total harmonics distortion of voltage (THD_V) is equal to 1.91%. For the effect of a single line to ground fault, three-level converter is less than two-level converter to 2.05%. In the three-level converter circuit the THD_V equal to 1.83%. This is less than a two-level converter to 1.90% for the effect from double line fault.

CONCLUSION

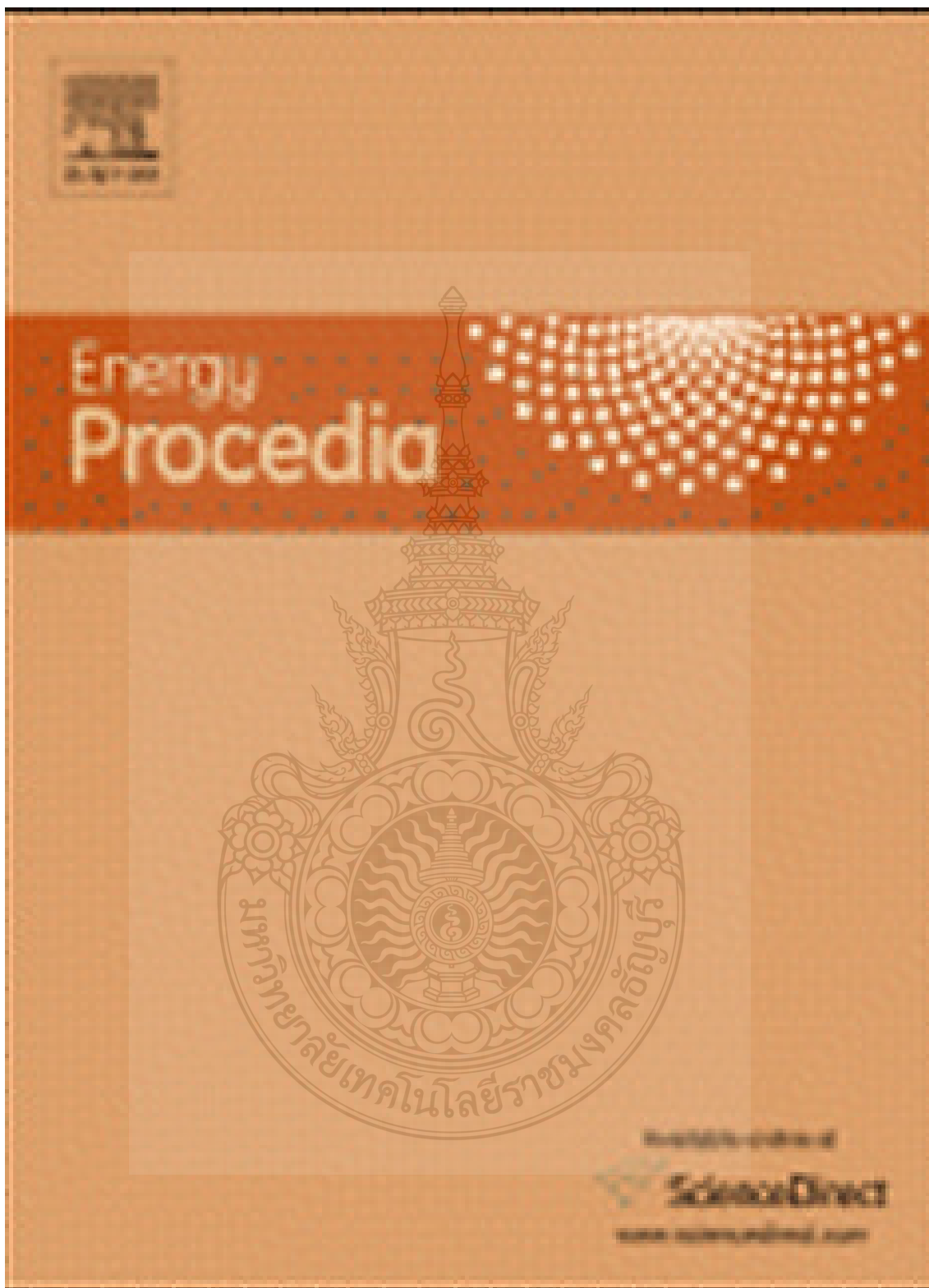
This paper presents reduction of distortion signal from the DVR by using three-level diode-clamped converter. The simulation results show that the voltage sag compensation by using three-level converter proposed can solve the voltage sag problem as well. Load voltage while the voltage sag occurs has close to normal voltage (1.0 p.u.). When compared with the two-level converter that although the voltage sag compensation is the same. However Voltage waveform of the three-levels converter has signal distortion is less than two-level converter. As a result, the harmonics in the power system has less as well.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to acknowledge the Power and Energy System Research Center, Department of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology.

REFERENCES

- Wanida Pusorn, 2010. Modelling of ac solid state circuit breaker for low voltage power distribution system. Thesis of electrical engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand.
- Liu, J. W., Choi, S. S., & Chen, S., 2003. Design of step dynamic voltage regulator for power quality enhancement. IEEE Transactions on Power Delivery.
- Awad, H., Svensson, J., & Bollen, M. H., 2003. Static series compensator for voltage dips mitigation. IEEE Bologna Power Tech Conf, Bologna.
- Ghosh, A., Jindal, A. K., & Joshi, A., 2003. Inverter control using output feedback for power compensating devices. TENCON. Conference on Convergent Technologies for Asia-Pacific Region.
- Kittiwat Chiangchin, 2006. Simplification of control algorithms for voltage sag compensators from practical viewpoints. Thesis, Electrical Engineering, chulalongkorn university, Bangkok, Thailand.
- IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, 1995. IEEE Standards on Power Quality.
- Phichet Tanin, 2007. Voltage sag detection 3 phase by using software phase lock loop. Thesis, Energy Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand.
- R.S. Thallam and G.T. Heydt, 2000. Power acceptability and voltage sag indices in the three phase sense. IEEE Power Summer Meeting.
- Ahmed A. Helal, & Mohamed H. Saied, 2008. Dynamic Voltage Restorer Adopting 150o Conduction Angle VSI. IEEE Electrical Power & Energy Conference.
- ChaiChan Hinkerd, 2001. Machines 1. TPA Publishing Bangkok, Thailand.
- Power-One. Power Supplies. 2000. Technical Information.
- Bhabani Shankar Pattnaik, Debendra Kumar Dash & Joydeep Mukherjee., 2009. Implementation of PWM based Firing Scheme for multilevel Inverter using microcontroller. Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela.



The Experimental Study on Pyrolysis of Cassava Rhizome Utilizing Flue Gas Karan Homchat and Thawan Sucharitakul	264
Screening of Oleaginous Yeasts and Optimization for Lipid Production using Crude Glycerol as a Carbon Source Suleeporn Kitcha and Benjamas Cheirsilp	274
Self-Assembly Monolayer Molecules for the Improvement of the Anodic Interface in Bulk Heterojunction Solar Cells L. Macaraig, T. Sagaw and S. Yoshikawa	283
Soot Treatment by using High Voltage Pulse Energized Electrostatic Precipitator Nakhorn Thonglek, Chanchai Dechthummarong and Tanongkiat Kiatsiriroat	292
State of the Art of Biomass Gasification Power Plants in Thailand Nathakich Assanee and Chakkawan Boonwan	299
The Effect of Series-Connected Transformer in DVR Applications Wuthikrai Chankhamrian and Krischonme Bhumkitipich	306
The Effect of the Input Load Current Changed to a 1.2 kW PEMFC Performance Winai Chanpeng and Yottana Khunatorn	316
Effects of Difference Flow Channel Designs on Proton Exchange Membrane Fuel Cell using 3-D Model Nattawut Janwasupant and Yottana Khunatorn	326
A Review of Biomass Energy Dependency in Tanzania Mwema Felix and Shabbir H. Gheewala	338
Modified Hot Air Dryer by Leaf Stove for Banana Drying Aphirak Khadwilard and Phairoach Chunkaew	344
Energy Utilization and the Status of Sustainable Energy in Union of Myanmar Wint Wint Kyaw, Sukruedee Sukchai, Nipon Ketjoy and Sahataya Ladpala	351
The Effect of Paddle Number and Immersed Radius Ratio on Water Wheel Performance Anurat Tevata and Chainarong Inprasit	359
Performance Enhancement of DVR for Mitigating Voltage Sag/Swell using Vector Control Strategy Krischonme Bhumkitipich and Nadarajah Mithulananthan	366
Optimization and Payback Period of Steam Production by Biomass Combustor for Agro-Industry B. Prasit, P. Maneechot, S. Ladpala and S. Vaivudh	380
Test-Accelerators as Coherent Terahertz Source Program (t-ACTS) at Tohoku University Hiroyuki Hama, Masayuki Kawai, Shigeru Kashiwagi, Fujio Hinode, Fusashi Miyahara, Ken-ichi Nanbu, Toshiya Muto, Yuu Tanaka, Xiangkun Li and Nuan-Ya Huang	391
A Thermal Coating Process using Self-Propagating High-Temperature Synthesis Assisted Flame Spray Coating Process Saowanee Singrathai, Vishnu Rachpech and Sutham Niyomwas	398
Sonochemical Synthesis and Characterization of Copper Oxide Nanoparticles Narongdet Wongpisutpaisan, Piyanut Charoonsuk, Naratip Vittayakorn and Wisanu Pecharapa	404
Synthesis and Characterization of MAI_2O_4 ($M = Ba, Ca, Sr$) Phosphor by Self-propagating High Temperature Synthesis Taschaporn Sathaporn and Sutham Niyomwas	410
Synthesis and Characterization of Nitrogen-doped TiO_2 Nanomaterials for Photocatalytic Activities under Visible Light Siriphan Chainarong, Lek Sikong, Sorapong Pavasupree and Sutham Niyomwas	418
Thermal and Morphological Properties of Polyurethane Foams Prepared from Microwave-Assisted Glycolized Products of PET Bottles Wastes Chutima Aiensa-art, Prompoom Phanwiroj and Pranut Potiyaraj	428
Effects of Voltage and Addition of Water on Photocatalytic Activity of TiO_2 Nanotubes Prepared by Anodization Method Kittirong Srimuangmak and Sutham Niyomwas	435
Preparation of High Photocatalyst Mesoporous TiO_2 from Nanosheets using Autoclave Unit (Thai Made) Athapon Simpraditpan, Thanakorn Wirunmongkol, Wisuthechai Boonwatcharapunsakun, Sommai Pivsa-art, Churairat Duangduen, Singto Sakulkhaemrueithai and Sorapong Pavasupree	440
Characterization of Sol-Gel Derived Ti-doped Tungsten Oxide Electrochromic Thin Films K. Paipitak, C. Kahattha, W. Techidheera, S. Porntheeraphat and W. Pecharapa	446
Curing Characteristics of Natural Rubber Filled with Gypsum Sittiporn Ngamsurat, Kanoktip Boonkerd, Uraivan Leela-adisorn and Pranut Potiyaraj	452
Development of Acetone Butanol Ethanol (ABE) Production from Palm Pressed Fiber by Mixed Culture of <i>Clostridium</i> sp. and <i>Bacillus</i> sp. Watchara Ponthein and Benjamas Cheirsilp	459
Electrically Controlled Aloe-Vera Extraction Release from Poly Acrylamide Hydrogel Sumonman Niamlang, Tawansorn Buranut and Amornrat Niansiri	468
Influence of Chromium on Microstructure and Electrical Properties of ZnO-based Varistor Materials Niti Yongvanich, Patama Visuttipitukkul, Rattikarn Pamem, Attaporn Sittikeadsakun and Arunrat Wittayaprasopchai	474
Material Analysis Laboratory in KU-FEL, Kyoto University Kyohei Yoshida, Taro Sonobe, Mahound Bakr, Tetsuo Sakka, Takashi Sagawa, Eiji Nakata, Takashi Morii, Toshiro Kii, Kai Masuda and Hideaki Ohgaki	483
Preparation of Urethane Oils from Microwave-Assisted Glycolized Products of Waste PET Bottles Onusa Saravari, Pranut Potiyaraj and Sivaphon Phuiphorm	491
Processing and Sintering of $Zn_{0.92}Sn_{0.04}Bi_{0.02}Co_{0.02}O_8$ Nanopowders Niti Yongvanich, Patama Visuttipitukkul, Waranya Assawasilapakul, Waranee Srichan and Siriporn Onlamoon	498
Synthesis and Characterization of Nitrogen-doped TiO_2 and its Photocatalytic Activity Enhancement under Visible Light Wanichaya Mekprasart and Wisanu Pecharapa	509

Available online at www.sciencedirect.com**SciVerse ScienceDirect**

Energy Procedia 9 (2011) 306 – 315

Energy

Procedia9th Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium

The Effect of Series-Connected Transformer in DVR Applications

Wuthikrai Chankhamrian and Krischonme Bhumkittipich*

*Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani 12110, Thailand*

Abstract

This paper presents the effect of Series-Connected Transformer in DVR Applications. Sizes of DVR are 10 kVA, 380 Volt and frequency 50 Hz. According to the DVR operation, the comparison of with and without series-connected transformer is studied. To shows that without transformer can be operated better than with transformer. Operation of with transformer will have an impact on the phase shift and voltage drop. The simulation results show that the magnitude of load voltage without the transformer about 1.0 p.u. (per unit) more than with transformer. Moreover, it has not effect of phase shift and no voltage drop. Therefore, it can be ensured that the effect of transformer, that occurred on results has to consider for DVR applications. In addition if build the prototype can be reduced cost of transformer.

© 2011 Published by Elsevier Ltd. Selection and/or peer-review under responsibility of CEO of Sustainable Energy System, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT).

Keywords: Dynamic Voltage Restorer; Transformer; Voltage Sag

1. Introduction

Voltage sag is the one of power quality problems that will damage production process, especially; the industry is controlled by power electronics equipments. The voltage sags in power system under IEEE 1159-1995 standard [1] is the reduction of the magnitude of voltage supply in a short time, since 0.5 cycles until a minute and return to normal conditions as shown in Fig. 1. The rms value of voltage between 0.1 p.u. and 0.9 p.u. compared with the voltage of the system is 1.0 p.u. There are two important variables, the magnitude and duration of voltage sag.

* Corresponding author. Tel.: +662-549-3571; fax: +662-549-3422.
E-mail address: krischonme.b@en.rmUTT.ac.th.

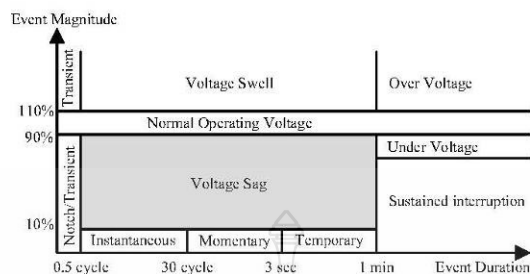


Fig. 1. IEEE 1159-1995 standard.

Dynamic Voltage Restorer (DVR) is the electrical equipment, installed to compensate for the lost voltage when voltage sag occurred. There are many researchers studied and developed the DVR technique. Single control loop technique is one of DVR technique which can control the peak of voltage but it has problem in control sensitivity and the presentation of control information [2]. Thus, DVR is not used injection voltage transformers and capacitors DC-link can be self-recharged in normal condition are developed. So if there is not transformer, then the DVR has been reducing the size and costs [3]. After that a multi-functional DVR presented that in addition to compensating voltage sag and voltage swell can limit fault current and keep constant large variation of the system frequency. But results showed that the efficiency of compensation is not clear [4]. Although the results of research are able to compensate for the voltage sag but the control of the DVR is still unclear. Therefore, an attempt to reduce the complexity of the algorithm in the control DVR and don't use transformers for Voltage injection [5].

The study of the DVR, mainly will not mentioned about the effect of the transformer. Knowledge, Transformers has flaw is incur phase shift and voltage drop. Moreover, the saturation of the transformer and inrush current is cause need to use is the transformer with rated 2 times the rated DVR [5]. Then this paper presents the analysis of DVR and comparison between with and without transformers. In addition, show that compensation method is not using transformers. It has effective more than with transformer. The presentation is the following steps.

This paper is organized as follows. The analysis of main performance of the DVR is described in Section II. Simulation and results using the Matlab/Simulink program is presented in Section III. And finally, conclusion of the DVR is presented in Section IV.

Nomenclature

DVR	Dynamic Voltage Restorer
p.u.	Per Unit
rms	Root Mean Square
AC	Alternating Current
DC	Direct Current
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers

PWM	Pulse-width modulation
mmf	Magnetomotive force
N	Number of turns in the coil
E	Voltage induced in the coil
I	Current in amperes
Z	Impedance of transformer
R	Resistance of transformer
X	Inductance of transformer
V	Voltage input/output of transformer
a	Ratio of transformer
U_i	the source and supply line impedance
t	Time of inrush current
C_i	Capacitance of the power supply
kHz	Kilohertz
μF	Microfarad
mH	Millihenry
Ω	Ohm

2. Analysis of main performance of DVR

All DVR generally consists of 3 main parts: energy conversion, energy storage, and controller as shown in Fig. 2. Compensate method for the voltage of the DVR can be classified into 3 methods [6];

- 1) Pre-Sag Compensation
- 2) in-Phase Compensation
- 3) Energy Optimization Technique

In this present work, Pre-Sag Compensation method is selected because can compensate both the size and voltage phase angle.

2.1. Control of DVR

Operation of control systems starting in occurred voltage sag. Detector will verify it. When there are signs it, the reference voltage generator part is created reference voltage for comparison with the actual voltage in the system. After, the voltage in this comparison will sent to PWM in the compensating voltage

generator & voltage injection part for drive the converter, so it will inject voltage into the system. Block diagram of the control as show in Fig. 3.

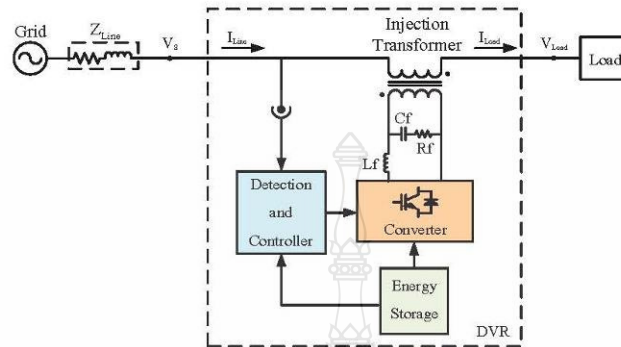


Fig. 2. Components of the DVR.

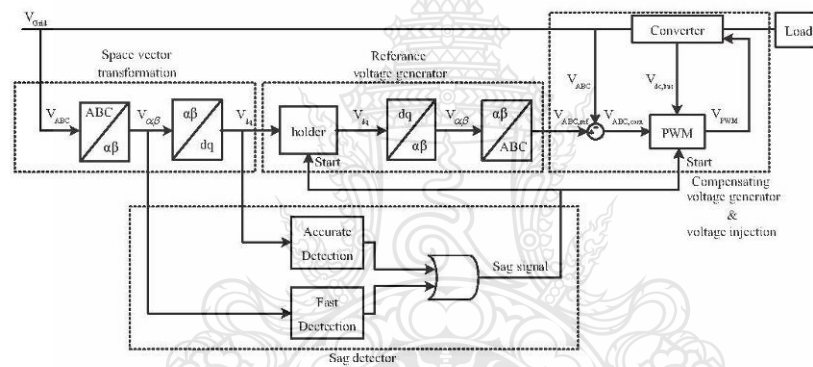


Fig. 3. Block diagram of the control of the DVR.

2.2. Series-connected transformer

Transformer acts as a power transfer from the DVR to the load. Transformer consists of 2 sets of windings around the core, which can be written in the equivalent circuit as shown in Fig. 4 [7]. For the equivalent circuit will be

$$X_0 = E_1 / I_\mu \tag{1}$$

$$R_0 = E_1 / I_0 \tag{2}$$

$$Z_m = R_0 // X_0 \tag{3}$$

$$Z_1 = R_1 + X_1 \tag{4}$$

From $E_2 / E_1 = N_2 / N_1 = a$ we can move values from one side to the other side. In Fig. 4 when the secondary winding moved toward primary winding. We can write the complete equivalent circuit of a transformer as shown in Fig. 5. Parameters move from the secondary winding toward the primary winding can be obtained from the following equation.

$$I_2' = aI_2 \tag{5}$$

$$V_2' = V_2 / a \tag{6}$$

$$R_2' = R_2 / a^2 \tag{7}$$

$$X_2' = X_2 / a^2 \tag{8}$$

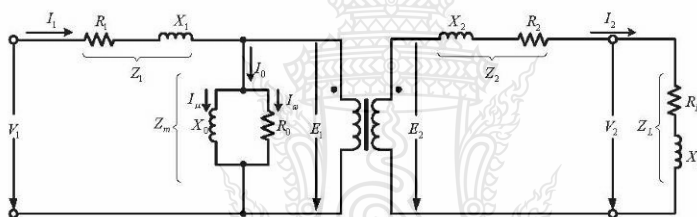


Fig. 4. The equivalent circuit of series connected transformer.

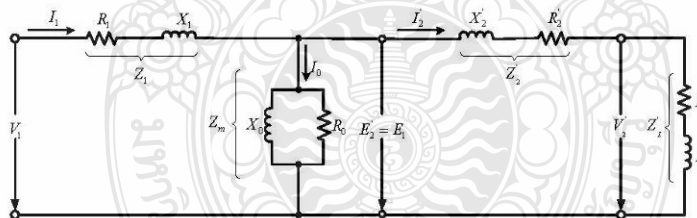


Fig. 5. The complete equivalent circuit of series connected transformer.

The complete equivalent circuit of transformer can be evaluated V_1' from the ratio of the voltage;

$$V_2' = \left(\frac{I_2' Z_2'}{I_1 Z_1 + I_0 Z_m} \right) V_1 \quad (9)$$

The transformer is connected between converter and power system will caused a phase shift and voltage drop due to the drawback of the transformer. Moreover, the transformer rate is 2 time of DVR rate because the saturation of transformer and inrush current. Thus, the transformer is large and expensive.

2.3. Inrush Current

When transformer connected to AC power supply the initial state will be surge current flow into through the primary winding, called inrush current. This is similar to the start-up of the motor suddenly.

When starting injects voltage to transformer, the magnetic flux and current in the coil will start at zero and gradually increases as shown in Fig. 6. So in the beginning of transformer flux is approximately twice the maximum size of the normal because the total area under waveforms of the voltage in first half cycle. In the ideal transformer, the magnetic current increases of approximately twice the normal maximum as well because generation magnetomotive force (mmf) which is flux higher than the normal. Winding currents generated mmf to cause flux in winding increases more than twice the maximum value of normal flux. This is causing inrush current in transformers. That requires a transformer rated is the 2 times of the rated DVR. If the transformer has a magnetic field residues in the core during the time of the connection to supply makes inrush current may have increased the intensity. From Fig. 7 and 8 the peak value ($I_{inr.p}$) of the inrush current can be estimated as follows: [10].

$$I_{inr.p} < \frac{U_i}{R_{s.eit} + R_i} \quad (10)$$

The rise time $t_{inr.r}$ is given by:

$$t_{inr.r} \approx \frac{L_{s.eit} + L_i}{R_{s.eit} + R_i} \quad (11)$$

The time to half value $t_{inr.h}$ is given by:

$$t_{inr.h} \approx 0.7 \times (R_{s.eit} + R_i) \times C_i + t_{inr.r} \quad (12)$$

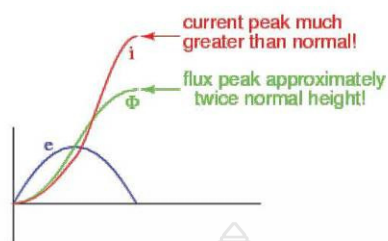


Fig. 6. Current, flux and voltage waveform of series connected transformer.

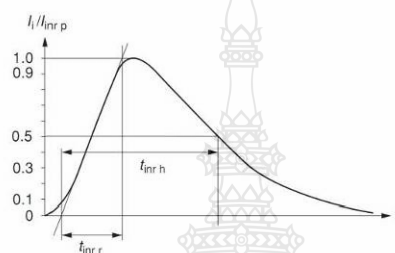


Fig. 7. Inrush current waveform.

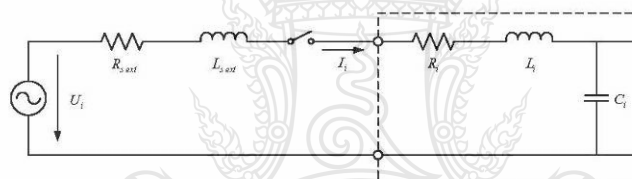


Fig. 8. Circuit of occurred inrush current.

3. Simulation results

The simulation program is Matlab/Simulink. DVR will be connected to the secondary side of transformers in the distribution system as shown in Fig. 9. The defined as fault in the power system at a time 0.1 seconds until 0.04 seconds, three-phase voltage 380 V 50 Hz, Switching frequency 20 kHz, $C_f = 8\mu\text{F}$, $L_f = 2\text{mH}$, $R_f = 32\Omega$, $C_{wsc} = 6,600\ \mu\text{F}$, Criteria of the voltage sag $|V| < 198\ \text{V}$, $\Delta\theta > 1.85^\circ$ or $\Delta\theta < 1.75^\circ$ and load is series RL, it has value $13\ \Omega$ and $19\ \text{mH}$ respectively.

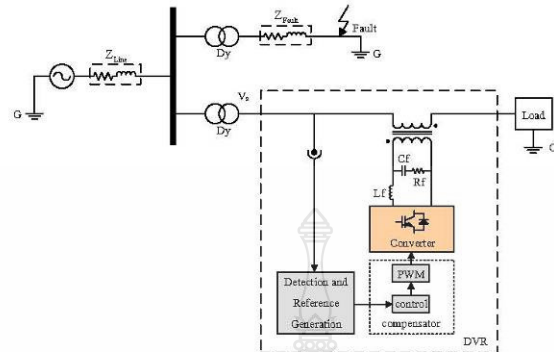
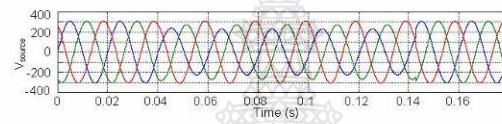
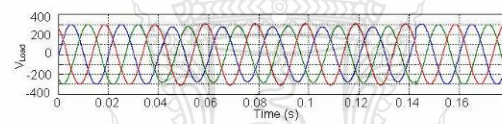


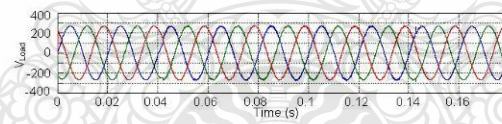
Fig. 9. Circuit Simulation of the DVR.



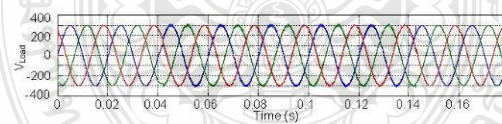
(a) Voltage power supply at occurred voltage sag.



(b) Compensation with transformer. (R_0, X_0 and Z_{01} are small)



(c) Compensation with transformer. (R_0, X_0 and Z_{01} are large)



(d) Compensation without transformer.

Fig. 10. Compensation with DVR In case of a single-phase fault at phase A to ground.

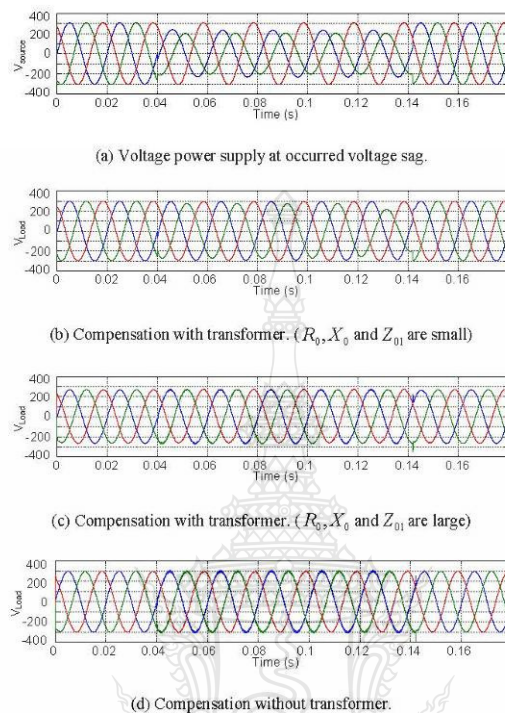


Fig. 11. Compensation with DVR In case of a double-phase fault between phase A and B.

4. Conclusions

The comparison between with and without transformers is considered in this paper. In Fig. 10 is compensation with DVR in case of a single-phase fault at phase A to ground. Compensation with transformer if R_0, X_0 and Z_{01} are small will be compensated bad and if R_0, X_0 and Z_{01} are large will be compensated bad and voltage drop as shown in Fig. 10(b), Fig. 10(c). In Fig. 10(d) showed that compensation without transformer will be compensated very well. In Fig. 11 is compensation with DVR in case of a double-phase fault between phase A and B. Compensation, both with and without transformers in this case same as in the previous case. Therefore Simulation results showed that the without transformers are performance better than with transformer, because the voltage after the installation of the DVR is about 1.0 p.u. compared with voltage of the power system is 1.0 p.u. For the compensated with transformer, the key factors affecting the performance of the DVR is impedance of the transformer. If the large impedance, the residual current in the transformers will the voltage drop of the transformers were large. Therefore, the size of the transformer should be selected to the impedance

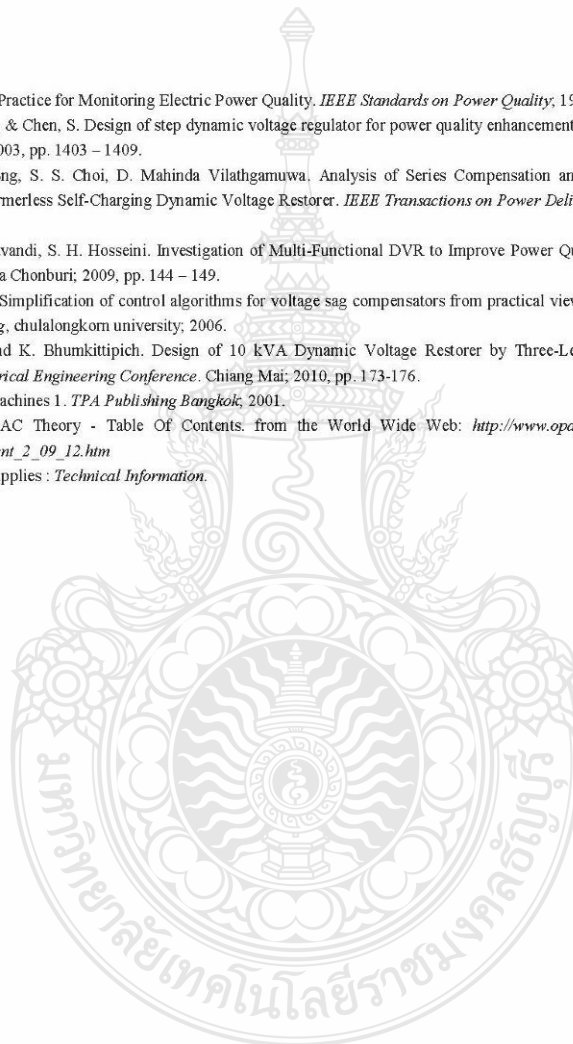
suitable can reduce voltage drop in the transformer and better compensation. Moreover, if build a prototype. The DVR without transformers can reduce the cost of the transformer.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the Power and Energy System Research Center, Department of Electrical Engineering, Rajamangala University of Technology, and the Fund Research and Development of the Provincial Electricity Authority.

References

- [1] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. *IEEE Standards on Power Quality*, 1995, pp.12.
- [2] Liu, J. W., Choi, S. S., & Chen, S. Design of step dynamic voltage regulator for power quality enhancement. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2003, pp. 1403 – 1409.
- [3] Eng Kian Kenneth Sng, S. S. Choi, D. Mahinda Vilathgamuwa, Analysis of Series Compensation and DC-Link Voltage Controls of a Transformerless Self-Charging Dynamic Voltage Restorer. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2004, pp. 1511 – 1518.
- [4] M.R.Banaei, A. Nahavandi, S. H. Hosseini. Investigation of Multi-Functional DVR to Improve Power Quality Characteristic. *BCTICON 6th*, Pattaya Chonburi; 2009, pp. 144 – 149.
- [5] Kittiwat Chiangchin. Simplification of control algorithms for voltage sag compensators from practical viewpoints. *In Thesis of Electrical Engineering*, chulalongkom university; 2006.
- [6] W. Chankhamrian and K. Bhunkittipich. Design of 10 kVA Dynamic Voltage Restorer by Three-Level Diode-Clamped Converter, *33rd Electrical Engineering Conference*. Chiang Mai; 2010, pp.173-176.
- [7] ChaiChan Hinkerd. machines 1. *TPA Publishing Bangkok*, 2001.
- [8] Tony R. Kuphaldt. AC Theory - Table Of Contents. from the World Wide Web: http://www.opamp-electronics.com/tutorials/inrush_current_2_09_12.htm
- [9] Power-One. Power Supplies : *Technical Information*.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายวุฒิไกร จันทร์ขามเรียน
วัน เดือน ปีเกิด	26 สิงหาคม 2529
ที่อยู่	50 หมู่ 3 ตำบลย่อ อำเภอคำเขื่อนแก้ว จังหวัดยโสธร 35110
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปี พ.ศ. 2552
ประสบการณ์การทำงาน	ผู้ช่วยวิจัยที่ศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

