

การวิเคราะห์สมรรถนะการชดเชยแรงดันของ DVR โดยใช้ทฤษฎีกำลังไฟฟ้าทันได

ถนอมศักดิ์ แก้วสุกณี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

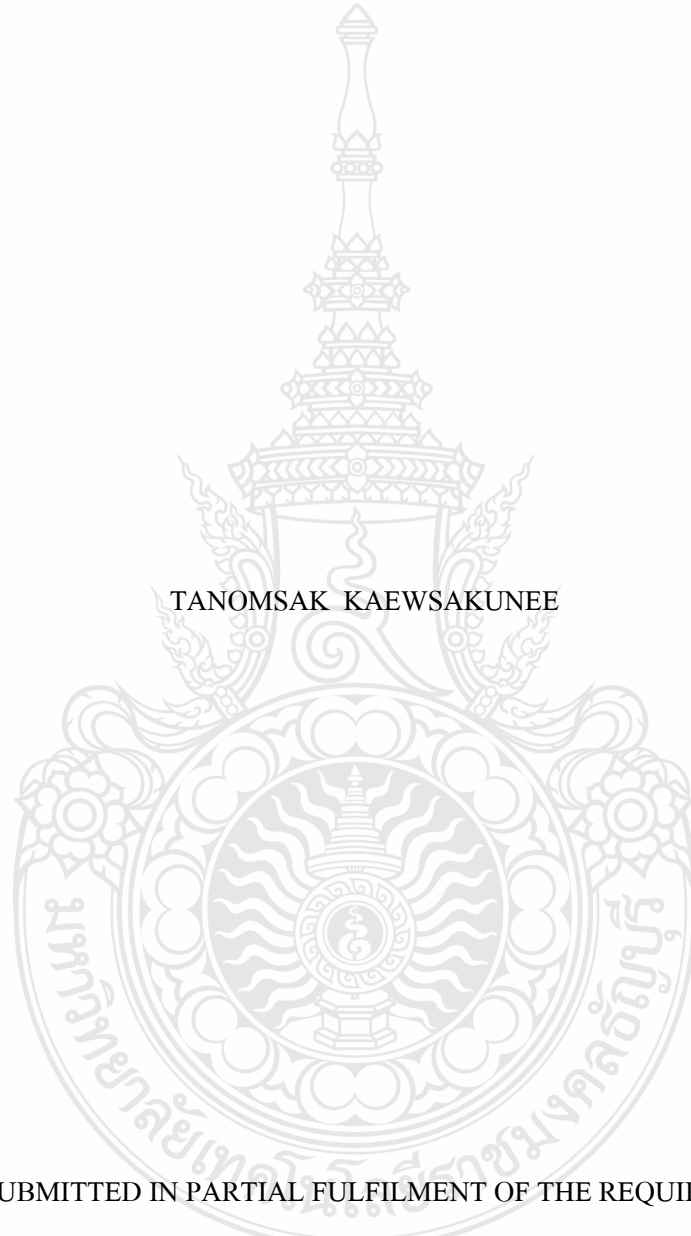
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2554

**VOLTAGE-COMPENSATION PERFORMANCE ANALYSIS OF DVR USING THE  
INSTANTANEOUS POWER THEORY**

TANOMSAK KAEWSAKUNEE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENTS FOR  
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING  
IN ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

2011

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์สมรรถนะการชดเชยแรงดันของ DVR โดยใช้ทฤษฎีกำลังไฟฟ้าทันได
นักศึกษา	นายธนอมศักดิ์ แก้วสกุณี
รหัสประจำตัว	115070402015-7
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร. กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการวิเคราะห์สมรรถนะการชดเชยแรงดันของตัวชดเชยแรงดัน(DVR) ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าทันได โดยตัวชดเชยแรงดันเป็นอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งเข้าไปเพื่อชดเชยกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนเข้าสู่ระบบเพื่อรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อให้มีเสถียรภาพที่ดี เป็นการเพิ่มระดับคุณภาพและความน่าเชื่อถือให้กับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ในส่วนการสร้างแบบจำลองของระบบจำหน่ายด้วย โปรแกรม MATLAB/SIMULINK โดยระบบจำหน่ายประกอบด้วยระบบจำหน่ายหลักแรงดัน 22 กิโลโวลต์ 1,000 kVA , 3 เฟส, 22kV จ่ายให้กับโหลดจำนวน 2 วงจรย่อยผ่านหม้อแปลงขนาดพิกัด 50 kVA 22,000/380 V( $\Delta/Y_n$ ) จำนวน 2 ชุด แต่ละชุดต่อกับโหลด. ตัวชดเชยแรงดันถูกต่อกับเซ็นซิทิฟ โหลดขนาด 50 kVA, 3 เฟส 380 V ตัวประกอบกำลัง 0.95(ล่าหลัง) รับแรงดันจากระบบ 22 kV(rms) ผ่านหม้อแปลงขนาด 50 kVA 22 kV/380 V. การคำนวณค่าแรงดันชดเชย กระทำบนแกน  $\alpha\beta$  แล้วจึงแปลงแรงดันชดเชยกลับไปสู่แกนปกติ( $v_{abc}$ ) จากนั้นค่ามอดูลเซ็นอินเด็กซ์จะถูกส่งให้ชุดแปลงผันแรงดันไฟฟ้า (Inverter) เพื่อสร้างแรงดันชดเชยผ่านหม้อแปลงชนิดแรงดันขนาด 6.6 kVA, 220/5,080 V จำนวน 3 ชุด เข้าที่จุดเชื่อมต่อเพื่อชดเชยแรงดันให้เซ็นซิทิฟ โหลด

ทำการจำลองสภาวะแรงดันตกชั่วขณะขนาด 0.6 pu. ช่วงเวลา 150 ms จำนวน 3 กรณี คือ ฟอลต์ แบบหนึ่งเฟสต่อลงดิน, แบบระหว่างเฟสกับเฟสต่อลงดิน และ แบบสามสายต่อลงดิน ผลการจำลองพบว่าในสภาวะฟอลต์แบบหนึ่งเฟสต่อลงดิน และแบบสามเฟสต่อลงดิน ค่าแรงดันที่จุดเชื่อมต่อที่โหลดชุดแรกอยู่ในค่ามาตรฐาน ส่วนสภาวะฟอลต์แบบระหว่างเฟสกับเฟสต่อลงดินค่า %THD ของแรงดันที่โหลดเกินค่ามาตรฐานเพียงเล็กน้อย ผลการจำลองการทำงานแสดงถึงประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอและอุปกรณ์ชดเชยแรงดันสามารถเพิ่มเสถียรภาพและความน่าเชื่อถือได้

คำสำคัญ : ทฤษฎีกำลังไฟฟ้าทันได, ตัวชดเชยแรงดันตก, ฟอลต์

**Thesis Title :** VOLTAGE-COMPENSATION PERFORMANCE ANALYSIS  
OF DVR USING THE INSTANTANEOUS POWER THEORY

**Student Name :** Mr. Tanomsak Kaewsakunee

**Student ID :** 115070402015-7

**Degree Award :** Master of Engineering

**Study Program :** Electrical Engineering

**Academic Year :** 2010

**Thesis Advisor :** Dr. Krischonme Bhumkittipich

### ABSTRACT

This thesis presents analysis of voltage-compensation performance analysis of Dynamic Voltage Restorer (DVR) using the Instantaneous Power Theory . DVR device is the compensation device that use for injection the real power and imaginary power into the power system in order to improve the voltage stability.

The purposed to simulation on Matlab/Simulink to a simple power system. The 22 kV(rms) (1,000 kVA, 3 $\phi$ , 22 kV) main feeder is supplied to two identical distribution transformers (50 kVA, 22kV/380 V) each feeder is connected to load. The DVR is connected to a sensitive load as rated 50 kVA 95% power factor lagging and received power from grid at 22 kV(rms) . The injected voltage calculated is performed on the  $o\alpha\beta$  axis and transformed to ordinary axis ( $v_{abc}$ ) . As the modulation index control is commanded to inverters for supplied the injection transformers at rated 6.66 kVA, 220/5,080 V which allowed to compensated load voltage.

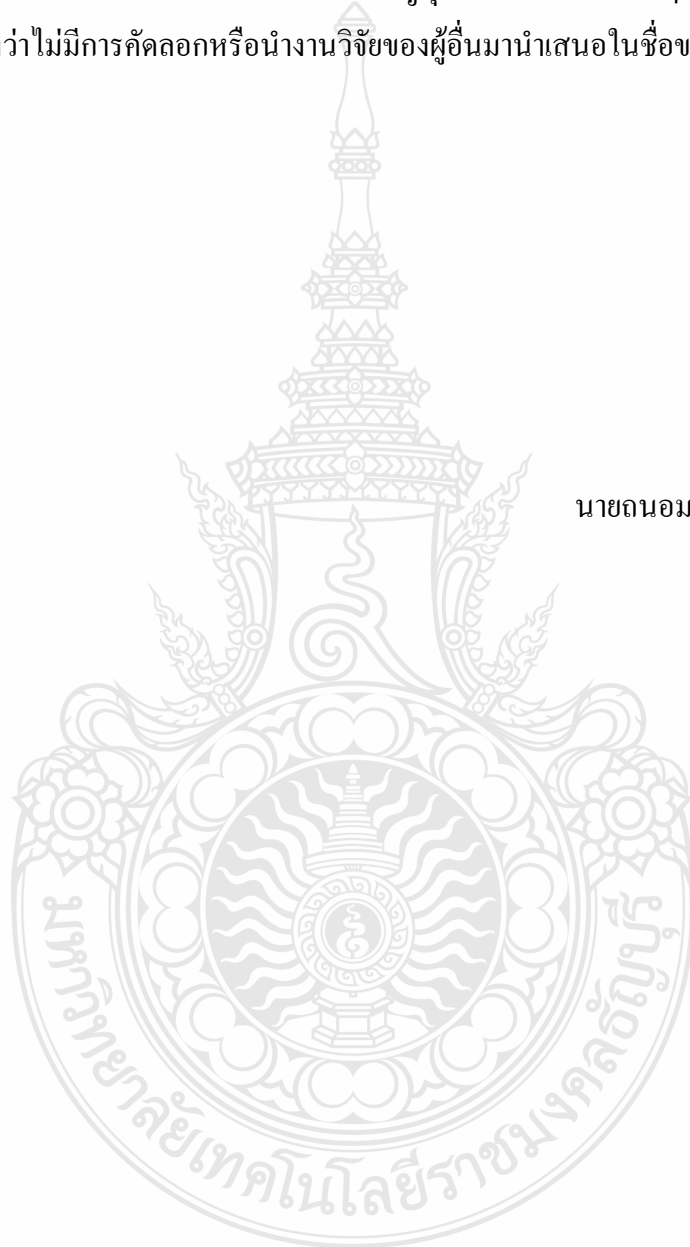
Voltage sag simulated is presented to 0.6 pu. 150 ms. duration divided to 3 cases , as single Line to ground fault , Double line to ground fault and Three line to ground fault .The first and the third case result illustrated the %THD of load voltage is complied to the standard. The second simulations results illustrated the %THD of load voltage is a little over the standard. The simulation results illustrated the effectiveness of the proposed algorithms. And show that the DVR devices can improve the voltage stability on the system

Keywords : Instantaneous Power Theory, DVR, Faults



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัยขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือ  
เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

นายถนอมศักดิ์ แก้วสุกณี





# ใบรับรองวิทยานิพนธ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์สมรรถนะการชดเชยแรงดันของ DVR โดยใช้ทฤษฎีกำลังไฟฟ้าทันใด

VOLTAGE-COMPENSATION PERFORMANCE ANALYSIS OF DVR USING THE INSTANTANEOUS POWER THEORY

ชื่อนักศึกษา

นายธนอมศักดิ์ แก้วสุกัญญา

รหัสประจำตัว

115070402015-7

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ดร. กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์

วัน เดือน ปี ที่สอบ

26 กุมภาพันธ์ 2554

สถานที่สอบ

ห้องประชุมชมพูพันธุ์ทิพย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประมุข อุณหเลขกะ)

.....กรรมการ

(ดร. วันชัย ทรัพย์สิงห์)

.....กรรมการ

(ดร. สุรินทร์ แหงมงาม)

.....กรรมการ

(ดร. กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์)

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมหมาย ผิวสะอาด)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ ที่คอยดูแลให้คำชี้แนะที่มีคุณค่าด้านงานวิชาการแก่ข้าพเจ้าตลอดมา รวมถึงท่าน คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่กรุณาช่วยให้คำแนะนำ ชี้แนะ ต่องานวิจัย ขอบคุณอย่างมากสำหรับกำลังใจ ความช่วยเหลือเอื้ออาทรในด้านต่างๆ ต่องานวิจัย จากเพื่อนๆ สมาชิกห้องปฏิบัติการระบบไฟฟ้าและพลังงานทุกท่าน

ขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ภรรยา และลูกๆ ที่คอยเป็นกำลังใจในยามที่ข้าพเจ้าเหนื่อย ท้อแท้ ขอบคุณ โลกการสื่อสารที่ไร้พรมแดนที่ช่วยให้ข้าพเจ้าเข้าถึงแหล่งข้อมูลได้อย่างสะดวก รวดเร็ว

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณผู้บริหาร สถาบันนวัตกรรมทีโอที บริษัท ทีโอที จำกัด (มหาชน) ที่กรุณาให้การสนับสนุนด้านเวลาเพื่อการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

ถนอมศักดิ์ แก้วสุกณี

26 กุมภาพันธ์ 2554



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์	2
1.3 สมมุติฐาน	2
1.4 ขอบเขต	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.6 ข้อยกเว้น	3
1.7 ลักษณะรายละเอียด	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.2 มาตรฐานการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน	8
2.3 มาตรฐานการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ของ IEEE 1159-1995	10
2.4 แรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ	12
2.5 ความไม่สมมาตรของแรงดันไฟฟ้า	31
2.6 ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบอนุกรม	33
2.7 การจำลองตัวชดเชยแรงดันแบบอนุกรม	38
2.8 ทฤษฎีกำลังไฟฟ้าทันได	53
2.9 การควบคุมการทำงานของตัวชดเชยแรงดันแบบอนุกรม	55
บทที่ 3 วิธีดำเนินการ	57
3.1 การคำนวณหาขนาดของหม้อแปลงจืดแรงดัน	57
3.2 การออกแบบวงจรกรอง	59

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	64
4.1 การจำลองความสามารถในการชดเชยแรงดันDVR ขณะฟอลต์แบบหนึ่งเฟส ต่อลงดิน(Single Line to Ground Fault )	64
4.2 การจำลองความสามารถในการชดเชยแรงดันDVR ขณะฟอลต์แบบสองเฟส ต่อลง ดิน(Double Line to Ground Fault )	71
4.3 การจำลองความสามารถในการชดเชยแรงดันDVR ขณะฟอลต์แบบสามเฟส ต่อลงดิน(Triple Line to Ground Fault )	77
4.4 สรุปผลการทดลอง	83
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	84
5.1 สรุปผล	84
5.2 ข้อเสนอแนะ	85
เอกสารอ้างอิง	86
ภาคผนวก	
ก มาตรฐานการเปลี่ยนแปลงแรงดัน IEEE1159 - 1195	87
ข รายละเอียดการสร้างแบบจำลอง	91
ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	94
ประวัติผู้เขียน	128

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 The Voltage Tolerance for some Devices	9
2.2 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงระยะเวลาสั้น	11
2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงระยะเวลายาว	12
2.4 การเปรียบเทียบมาตรฐานของปรากฏการณ์แรงดันตกชั่วคราว	13
2.5 ค่าแรงดันด้านทฤษฎีของหม้อแปลงในขณะเกิดความผิดปกติ	14
3.1 ค่าพารามิเตอร์ใช้ในการออกแบบวงจรกรอง	60
3.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับ Simulations	62
4.1 ค่าฮาร์มอนิกและขนาดของแรงดันที่โหลด	66
4.2 ค่าฮาร์มอนิกและขนาดของกระแสที่โหลด	68
4.3 ค่าฮาร์มอนิกและขนาดของแรงดันที่โหลด	72
4.4 ค่าฮาร์มอนิกและขนาดของกระแสที่โหลด	74
4.5 ค่าฮาร์มอนิกและขนาดของแรงดันที่โหลด	78
4.6 ค่าฮาร์มอนิกและขนาดของกระแสที่โหลด	80



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ส่วนประกอบหลักของการควบคุมการชดเชยแรงดันแบบอนุกรม	2
2.1 Typical Computer Voltage Tolerance ( ITIC CURVE)	10
2.2 มาตรฐานการเปลี่ยนแปลงแรงดัน IEEE 1159-1995	10
2.3 แรงดันตกชั่วขณะจากความผิดพลาดชนิด 1 เฟส	12
2.4 ระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะ	13
2.5 เฟสเซอร์ของแรงดันตกชั่วขณะในระบบ	15
2.6 เฟสเซอร์แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดจากความผิดพลาดแบบ 3 เฟส	16
2.7 เฟสเซอร์แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดจากความผิดพลาดลงดินเส้นเดียว	16
2.8 เฟสเซอร์แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดจากความผิดพลาดระหว่างสายในระบบที่ต่อลงดิน	17
2.9 เฟสเซอร์แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดจากความผิดพลาดระหว่าง	17
2.10 องค์ประกอบสมมาตรระบบจำหน่าย	18
2.11 วงจรสมมูลสภาวะผิดพลาดแบบหนึ่งเฟสต่อลงดิน (SLG )	20
2.12 วงจรสมมูลสภาวะผิดพลาดแบบระหว่างเฟสกับเฟส (LLF )	22
2.13 วงจรสมมูลสภาวะผิดพลาดแบบระหว่างเฟสกับเฟสต่อลงดิน (DLG )	25
2.14 สภาวะผิดพลาดแบบสภาวะผิดพลาดแบบ 3 สายลงดิน (TLG)	29
2.15 การเกิดแรงดันไฟฟ้าไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้า 3 เฟส	32
2.16 องค์ประกอบของความไม่สมมาตรของแรงดัน 3 เฟส	33
2.17 ตัวควบคุมแบบอนุกรม	33
2.18 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบอนุกรม	34
2.19 โครงสร้างของตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่	35
2.20 ระบบที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์แบบอนุกรมและเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดัน	35
2.21 ระบบที่ติดตั้งตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ และเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดัน	36
2.22 เฟสเซอร์การชดเชยแรงดันของ DVR	39
2.23 เฟสเซอร์การชดเชยแรงดันแบบ Pre-sag	39
2.24 เฟสเซอร์การชดเชยแรงดันแบบ In-phase	40
2.25 เฟสเซอร์การชดเชยแรงดันแบบ Fully Optimal	41
2.26 รูปแบบการทำงานของตัวชดเชยแรงดัน (DVR)	41
2.27 ตัวชดเชยแรงดันตกชั่วขณะและตำแหน่งการติดตั้ง	44
2.28 แผนภาพการหาค่าอัตราส่วนหม้อแปลงลดแรงดันไฟฟ้า	46

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.29 ส่วนการแปลงพลังงานซึ่งใช้ในระบบไฟฟ้าระดับแรงดันสูงและกลาง	47
2.30 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ 1 เฟส	47
2.31 แบบ PWM ด้วยการสวิตช์แรงดันแบบสภาวะชั่วเดียว	49
2.32 วงจรสมมูลของวงจรกรอง	51
2.33 วงจรสมมูลของวงจรกรอง	53
2.34 แผนภาพการควบคุม DVR	56
3.1 วงจรสมมูลของวงจรกรองที่ใช้ในการออกแบบ	60
3.2 ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรอง	62
4.1 วงจรสมมูลตำแหน่งฟอล์ท	64
4.2 ค่าแรงดันที่แหล่งจ่าย (SLG)	65
4.3 ค่าแรงดันที่ DVR (SLG)	65
4.4 ค่าแรงดันที่โหลด (SLG)	66
4.5 ค่ากระแสที่แหล่งจ่าย (SLG)	66
4.6 ค่ากระแสที่ DVR (SLG)	67
4.7 ค่ากระแสที่โหลด (SLG)	67
4.8 ค่า Instantaneous Real Power ที่แหล่งจ่าย (SLG)	68
4.9 ค่า Instantaneous Real Power ที่ DVR (SLG)	68
4.10 ค่า Instantaneous Real Power ที่โหลด (SLG)	69
4.11 ค่า Instantaneous Img. Power ที่แหล่งจ่าย (SLG)	69
4.12 ค่า Instantaneous Img. Power ที่ DVR (SLG)	70
4.13 ค่า Instantaneous Img. Power ที่โหลด (SLG)	70
4.14 ค่าแรงดันที่แหล่งจ่าย (DLG)	71
4.15 ค่าแรงดันที่ DVR (DLG)	71
4.16 ค่าแรงดันที่โหลด (DLG)	72
4.17 ค่ากระแสที่แหล่งจ่าย (DLG)	72
4.18 ค่ากระแสที่ DVR (DLG)	73
4.19 ค่ากระแสที่โหลด (DLG)	73
4.20 ค่า Instantaneous Real Power ที่แหล่งจ่าย (DLG)	74
4.21 ค่า Instantaneous Real Power ที่ DVR (DLG)	74



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 ค่า Instantaneous Real Power ที่โหลด (DLG)	75
4.23 ค่า Instantaneous Img. Power ที่แหล่งจ่าย (DLG)	75
4.24 ค่า Instantaneous Img. Power ที่ DVR (DLG)	76
4.25 ค่า Instantaneous Img. Power ที่โหลด (DLG)	76
4.26 ค่าแรงดันที่แหล่งจ่าย (TLG)	77
4.27 ค่าแรงดันที่ DVR (TLG)	77
4.28 ค่าแรงดันที่โหลด (TLG)	78
4.29 ค่ากระแสที่แหล่งจ่าย (TLG)	79
4.30 ค่ากระแสที่ DVR (TLG)	79
4.31 ค่ากระแสที่โหลด (TLG)	80
4.32 ค่า Instantaneous Real Power ที่แหล่งจ่าย (TLG)	80
4.33 ค่า Instantaneous Real Power ที่ DVR (TLG)	81
4.34 ค่า Instantaneous Real Power ที่โหลด (TLG)	81
4.35 ค่า Instantaneous Img. Power ที่แหล่งจ่าย (TLG)	82
4.36 ค่า Instantaneous Img. Power ที่ DVR (TLG)	82
4.37 ค่า Instantaneous Img. Power ที่ LOAD (TLG)	83

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

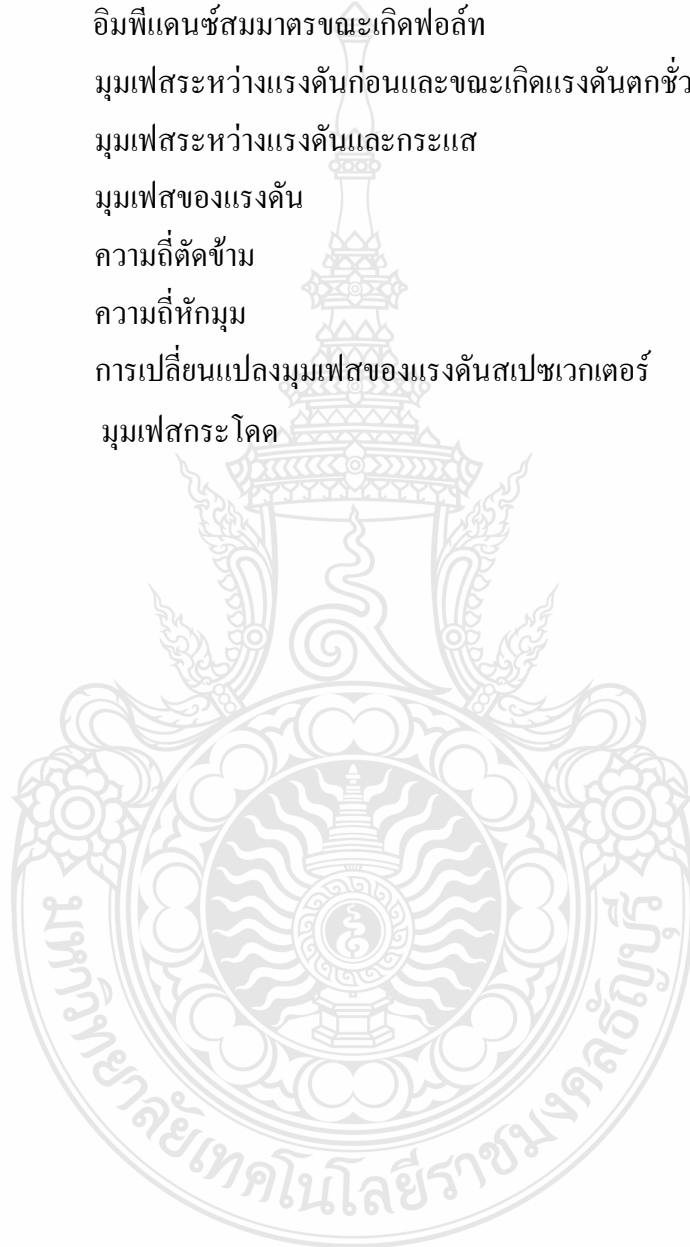
สัญลักษณ์	ความหมาย
ASD	Adjustable Speed Drive
DLG	ฟอลต์แบบระหว่างเฟสกับเฟสต่อลงดิน
DVR	Dynamic Voltage Restorer
dB	Decibel
$f_L$	ตัวเหนี่ยวนำวงจรกรอง
$i_0, i_{a1}, i_{a2}$	กระแสสมมาตร
$I_{f0}, I_{f1}, I_{f2}$	กระแสสมมาตรขณะเกิดฟอลต์
$I_{df}, I_{bf}, I_{cf}$	กระแสไฟฟ้าที่มีการเรียงลำดับขณะเกิดสภาวะผิดปกติ
$i_\alpha, i_\beta$	กระแสนแกน $\alpha, \beta$
$i_0, i_{a1}, i_{a2}$	กระแสสมมาตร
$I_{f0}, I_{f1}, I_{f2}$	กระแสสมมาตรขณะเกิดฟอลต์
$I_{pr}$	พิกัดของกระแสด้านปฐมภูมิ
$jx_c$	รีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์อนุกรม
$jX_s$	ค่าอินดักแตนซ์ของแหล่งจ่าย
$jX_f$	ค่าอินดักแตนซ์ระหว่างจุดต่อร่วมกับตำแหน่งที่เกิดฟอลต์
$K_s$	ตัวคูณความปลอดภัย
PI	Proportional plus integral
PLL	Phase-locked-loop
PCC	Point of common coupling
PWM	Pulsewidth modulated
p.u.	Per Unit
$P_{dvr}$	กำลังไฟฟ้าจริง ที่ DVR
$P_{in}$	กำลังไฟฟ้าจริงจากแหล่งจ่าย
$P_{out}$	กำลังไฟฟ้าจริงที่โหลด
$Q_{dvr}$	กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ DVR
$Q_{in}$	กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ แหล่งจ่าย
$Q_{out}$	กำลังไฟฟ้าเสมือนที่ โหลด
$R_f$	ตัวต้านทานภายในตัวเหนี่ยวนำในวงจรกรอง

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

คำย่อ	ความหมาย
RMS	Root-mean-square
$R_s$	ค่าความต้านทานของแหล่งจ่าย
SLG	พอลต์แบบหนึ่งเฟสต่อลงดิน
SPWM	Sinusoidal pulsewidth modulation
SRF	Synchronous reference frame
THD	Total Harmonic Distortion
TLG	พอลต์แบบระหว่างสามเฟสต่อลงดิน
$V$	แรงดันไฟฟ้าในวงจร หน่วย โวลต์
$V_a, V_b, V_c$	แรงดันด้านแหล่งจ่ายที่เฟส A,B และ C
$V_{af}, V_{bf}, V_{cf}$	แรงดันไฟฟ้าที่มีการเรียงลำดับขณะเกิดสถานะผิดปกติ
$V_C$	แรงดันที่ชดเชยด้วยคาปาซิเตอร์
$V_{dvr}^j$	แรงดันที่ DVR
$V_{inj}$	พิกัดแรงดันที่ชดเชย
$V_{pr}$	พิกัดของแรงดันด้านปฐมภูมิ
$V_{pre}$	ขนาดของแรงดันก่อนเกิดแรงดันตกชั่วขณะ
$v_r$	แรงดันที่โหลด
VSC	Voltage source converter
$v_s$	แรงดันที่แหล่งจ่าย
$V_{sag}$	ขนาดของแรงดันตกชั่วขณะ
$V_{sec}$	พิกัดของแรงดันด้านทุติยภูมิ
$V_{3\phi dev}$	ค่าสูงสุดของแรงดันเปลี่ยนแปลงจากค่าเฉลี่ยของแรงดันทั้ง 3 เฟส
$V_{3\phi avg}$	ค่าเฉลี่ยของแรงดันทั้ง 3 เฟส
$v_0, v_{a1}, v_{a2}$	แรงดันสมมาตร
$v_\alpha, v_\beta$	แรงดันบนแกน $\alpha, \beta$
$v_{0f}, v_{a1f}, v_{a2f}$	แรงดันสมมาตรขณะเกิดฟอลต์
$Z_f$	ค่าสภาวะผิดปกติของอิมพีแดนซ์
$Z_g$	ค่าอิมพีแดนซ์จากสายไปยังดิน
$Z_s$	ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายที่ต้นสายกับจุดต่อรวม

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

คำย่อ	ความหมาย
$Z_f$	ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างจุดต่อร่วมกับตำแหน่งที่เกิดฟอลต์
$Z_0, Z_{a1}, Z_{a2}$	อิมพีแดนซ์สมมาตร
$Z_0, Z_{a1}, Z_{a2}$	อิมพีแดนซ์สมมาตรขณะเกิดฟอลต์
$\varphi$	มุมเฟสระหว่างแรงดันก่อนและขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะ
$\gamma$	มุมเฟสระหว่างแรงดันและกระแส
$\omega$	มุมเฟสของแรงดัน
$\omega_0$	ความถี่ตัดข้าม
$\omega_{cn}$	ความถี่หักมุม
$\frac{d\omega}{dt}$	การเปลี่ยนแปลงมุมเฟสของแรงดันสเปซเวกเตอร์
$\Delta\phi$	มุมเฟสกระโดด



# บทที่ 1

## บทนำ

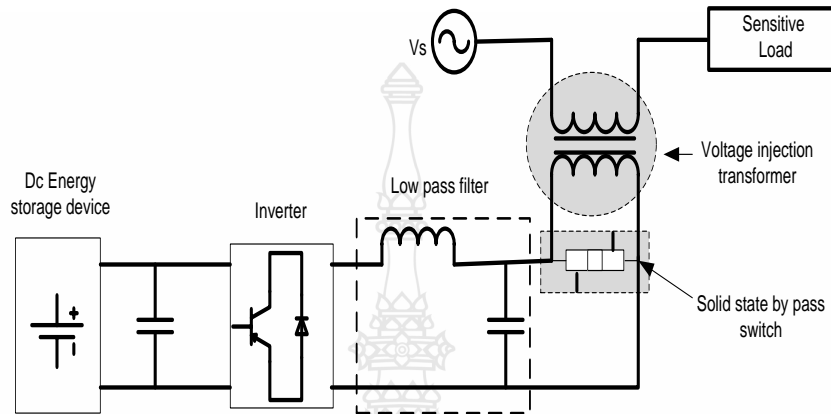
### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว ทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบเกิดความผิดปกติเพิ่มขึ้นไปจากเดิม [1] ซึ่งความผิดปกติของระบบจำหน่ายไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็นหลายประเภท ตามลักษณะการเกิด ระยะเวลา และขนาดของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันหรือกระแส เช่น ไฟฟ้าดับ แรงดันไฟฟ้าเกิน แรงดันไฟฟ้าตก กระแสไฟฟ้าเกิน เป็นต้น จากผลการศึกษาพบว่าความผิดปกติที่พบบ่อยครั้งนั้นคือการเกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะและแรงดันไฟฟ้าไม่สมมาตรขึ้นในระบบ [2] นอกจากส่งผลกระทบต่อทำให้อุปกรณ์ป้องกันบางชนิดทำงานผิดพลาดแล้วยังสร้างผลกระทบอย่างรุนแรงกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น อุปกรณ์ที่ถูกควบคุมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (Programmable Logic Controller) อุปกรณ์ควบคุมการปรับความเร็ว (Adjustable Speed Drive) ทำงานผิดพลาด และเนื่องจากตัวอุปกรณ์ประเภทนี้เป็นส่วนหนึ่งของสายการผลิต ผลเสียหายที่เกิดขึ้น นอกจากเกิดกับตัวอุปกรณ์เองแล้ว สายการผลิตก็เสียหายไปด้วย ผลที่ตามมา ก็คือผลเสียหายทางเศรษฐกิจเช่น ความเสียหายจากการที่ไม่สามารถผลิตสินค้าได้ตามเวลา ค่าเสียหายจากค่าวัสดุค้ำ ค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซม เป็นต้น เหตุนี้จึงทำให้ปัญหาแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะและแรงดันไฟฟ้าเกิดความไม่สมมาตรเป็นปัญหาสำคัญในระบบไฟฟ้าที่กำลังได้รับความสนใจ ศึกษาค้นคว้าเพื่อการแก้ไขให้คุณภาพของระบบไฟฟ้าดียิ่งขึ้น

อุปกรณ์ส่งผ่านระบบไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นได้ (Flexible AC Transmission Systems, FACTS)[3] นิยามของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ายืดหยุ่นได้ตามมาตรฐานของ Institute of Electrical and Electronics Engineers:IEEE หมายถึงระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่รวมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้ากับอุปกรณ์ควบคุมแบบคงที่ (Static Controller Devices) อย่างอื่น เพื่อเพิ่มขีดความสามารถและส่งเสริมการควบคุมการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่ง ความสามารถหลักของอุปกรณ์คือ การชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน การควบคุมแรงดันไฟฟ้า และการควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในสถานะเมื่อในระบบไฟฟ้ามีความ ผิดเพี้ยนของแรงดันเกิดขึ้น

ดังนั้นงานวิทยานิพนธ์นี้จึงมีแนวคิดในการศึกษาวิเคราะห์การนำชุดชดเชยแรงดันไฟฟ้าแบบไดนามิก (Dynamics Voltage Restorer) ต่อเข้ากับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยใช้หลักการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ ด้วยการควบคุมแบบทฤษฎีกำลังไฟฟ้าทันใด (Power Instantaneous Theory) โดยการควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าจริง (Real Power)และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Imaginary Power) ของจุดเชื่อมต่อ ในขณะที่เกิดสถานะแรงดันตกชั่วขณะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าไม่สมมาตรขึ้น ค่า

แรงดันชดเชยบนแกนนิ่ง ( $\alpha\beta$ ) จะถูกคำนวณและแปลงค่ากลับไปเป็นค่าแรงดันที่ต้องการ ( $V_{abc}$ ) แล้วสั่งการชุดแปลงผันแรงดันไฟฟ้า (Inverter) ให้มีการฉีดแรงดันที่ต้องการชุดชดเชยผ่านหม้อแปลงเข้าในระบบเพื่อเป็นการรักษาระดับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อให้มีเสถียรภาพที่ดี



รูปที่ 1.1 ส่วนประกอบหลักของการควบคุมการชดเชยแรงดันแบบอนุกรม

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงคุณภาพของแรงดัน และการเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้าแบบไม่สมมาตร โดยอ้างอิงมาตรฐานสากล

1.2.2 เพื่อศึกษาการทำงานของชุดชดเชยแรงดันไฟฟ้าแบบอนุกรมในระบบจำหน่ายไฟฟ้าในขณะ เกิดความผิดปกติแบบไม่สมมาตร

1.2.3 เพื่อศึกษาการชดเชยแรงดันตกชั่วขณะ แบบไม่สมมาตร โดยการนำชุดชดเชยแรงดันไฟฟ้าต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า 3 เฟส

## 1.3 สมมุติฐาน

ทฤษฎีกำลังไฟฟ้าทันใดสามารถปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้า หรือชดเชยกำลังไฟฟ้าจริง (Real Power) และค่ากำลังไฟฟ้าเสมือน (Imaginary Power) ให้กับระบบไฟฟ้า ขณะเกิดความผิดปกติ เพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐาน IEEE1159 -1995 ได้

## 1.4 ขอบเขต

1.4.1 อธิบายถึงคุณภาพของระบบไฟฟ้า และการเกิดความผิดปกติในระบบ ที่ทำให้เกิดความไม่สมมาตรของแรงดันไฟฟ้า โดยอ้างอิงมาตรฐานสากล

1.4.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชุดเซยแรงดันเพื่อชุดเซยค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน ขณะเกิดความผิดปกติในระบบที่แรงดัน 22 กิโลโวลต์

1.4.3 ทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชุดควบคุม ชุดเซยแรงดันกับระบบไฟฟ้า

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

งานวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษา และวิเคราะห์การชุดเซยกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือน ให้กับระบบไฟฟ้า 3 เฟส ขณะเกิดความผิดปกติในระบบ โดยทำการวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ และสร้างเป็นแบบจำลองการควบคุมระบบขึ้นใน MATLAB/SIMULINK โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1.5.1 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ตามมาตรฐาน IEEE1159 -1995

1.5.2 ศึกษาหลักการควบคุมการชุดเซยแรงดันด้วยอุปกรณ์ส่งผ่านระบบไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นได้

1.5.3 ศึกษาหลักการแปลงรูปของสมการทางคณิตศาสตร์และหลักการควบคุมแบบ PI เบื้องต้น

1.5.4 วิเคราะห์และออกแบบ ชุดชุดเซยแรงดันระบบไฟฟ้า แบบ 3 เฟส

1.5.6 ศึกษาการสร้างชุดควบคุมบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK

1.5.7 วิเคราะห์ ออกแบบและทดสอบการตรวจจับแรงดัน ชุดควบคุมกระแส ชุดควบคุมแรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรงและชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนในระบบ

1.5.8 ทดสอบชุดชุดเซยแรงดันเข้ากับระบบ ในสภาวะการเกิดแรงดันไม่สมมาตรขึ้นในระบบ

1.5.9 สรุปและอภิปรายผลวิทยานิพนธ์

## 1.6 ข้อยกเว้น

การศึกษาในงานวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นการแก้ปัญหาของระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบ 3 เฟสเมื่อเกิดสภาวะแรงดันตกชั่วขณะแบบไม่สมมาตรของแรงดันขึ้น โดยไม่พิจารณาส่วนที่เป็นฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ

## 1.7 ลักษณะรายละเอียด

การนำเสนอวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีด้วยกัน 5 บท บทที่ 1 ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาในการปรับปรุงคุณภาพไฟฟ้าในระบบที่แรงดัน 22 กิโลโวลต์เมื่อในระบบเกิดความไม่สมมาตร หรือความไม่สมดุลของแรงดัน 3 เฟสในขณะเกิดสภาวะแรงดันตกในชั่วขณะ โดยใช้การควบคุมบนแกนเวกเตอร์  $\alpha\beta$  เพื่อควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าจริง (Real Power) และกำลังไฟฟ้าเสมือน (Imaginary Power) ของจุดเชื่อมต่อ ให้เกิดความสมมาตรของแรงดันขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์สำหรับ

การศึกษา พร้อมทั้งสมมุติฐาน ขอบเขต และขั้นตอนในการศึกษาในงานวิทยานิพนธ์ บทที่ 2 เป็นการศึกษาทฤษฎีสำหรับการออกแบบการควบคุม เช่น ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตกชั่วขณะ ความไม่สมมาตรของแรงดัน หลักการควบคุมแรงดัน และหลักการเบื้องต้นของการควบคุม DVR รวมถึงงานวิจัยหรือวิทยานิพนธ์ที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ได้แนวทาง บทที่ 3 เป็นการนำแนวทางและความรู้ที่ได้จากข้างต้นมาใช้และการออกแบบชุดควบคุมการชดเชยแรงดัน บทที่ 4 แสดงผลการจำลองสมรรถนะของชุดควบคุมการชดเชยแรงดันบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลอง บทที่ 5 เป็นการสรุปผลการจัดทำวิทยานิพนธ์เชิงอภิปรายอีกทั้งยังกล่าวถึงข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางสำหรับการทำงานวิจัยต่อไป





## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาทฤษฎีหรือวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการควบคุมชุดชดเชยแรงดัน เพื่อแก้ปัญหาของแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ ที่สภาวะแรงดันไฟฟ้าไม่สมมาตร ตามมาตรฐานการเปลี่ยนแปลงแรงดัน IEEE 1159-1995 เพื่อให้เกิดแนวทางการวิเคราะห์ สรุปได้ดังนี้

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาจากบทความต่างประเทศที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเนื่องจากในประเทศไทยยังมีผู้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้ในเชิงการวิเคราะห์ไม่มากนัก จึงยากต่อการหาเอกสารอ้างอิงสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ สำหรับเอกสารที่ได้ศึกษามา สรุปได้พอสังเขปดังนี้

S.V. Ravi Kumar และคณะ [4] นำเสนอบทความการปรับปรุงคุณภาพของระบบไฟฟ้าโดย D-Statcom และ DVR “Power Quality Improvement Using D-Statcom and DVR” บทความนี้เป็นการนำเสนอหลักการควบคุมการเกิดความไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้าขนาด 13 kV ได้อธิบายหลักการควบคุม DVR โดยค่าแรงดันชดเชยได้จากผลต่างระหว่างค่าแรงดันอ้างอิงและค่าแรงดันที่ชั่วขณะโพลขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะด้วยการควบคุมแบบ PI ค่ามุมเฟสจะถูกส่งให้ชุดสร้างสัญญาณเฟส มอดูเลชันสั่งให้คอนเวอร์เตอร์ทำการฉีดแรงดันชดเชยให้กับระบบในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ ในส่วนของตัว D-Statcom ประกอบด้วย คอนเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันแบบสองระดับที่ต้องขนานกับระบบ, แหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง, หม้อแปลงคลี่ปลีง ชุดคอนเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงแรงดันกระแสตรงเป็นค่าแรงดันกระแสสลับที่อินเฟสกับแรงดันที่ระบบ โดยผ่านคาร์รีแอกแทนซ์ของหม้อแปลงคลี่ปลีง การปรับค่ามุมเฟสและขนาดแรงดันด้านออกที่เหมาะสมให้กับตัว D-Statcom จะช่วยให้สามารถควบคุมการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ค่าเสมือนระหว่างตัวอุปกรณ์และระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ สุดท้ายทำการจำลองเปรียบเทียบสมรรถนะการชดเชยแรงดันระหว่าง DVR และ D-Statcom โดยทำการสร้างแบบจำลองแรงดันตกชั่วขณะแบบ 1 เฟส กับดิน ขนาด 0.6 p.u. ช่วงเวลา 400 ms โดยโปรแกรม Matlab/Simulink ผลการจำลองพบว่าระดับค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผล อยู่ที่ 0.98 p.u. จากที่กล่าวมาพบว่าผู้นำเสนอบทความไม่ได้แสดงรายละเอียดลักษณะและค่าแรงดันแต่ละเฟสที่จุดเชื่อมต่อกับโพลดแต่อย่างใด

Joao L. Afonso และคณะ [5] นำเสนอบทความผลการจำลองการควบคุม Active Filters ด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าทันใด “Active Filters With Control Based on The p-q Theory” บทความนี้เป็นการนำเสนอการแก้ปัญหากระแสฮาร์โมนิกในระบบจำหน่ายด้วย Active Filter สืบเนื่องจากการที่แต่เดิม

การแก้ปัญหากระแสฮาร์มอนิกนั้นการมักใช้อุปกรณ์ประเภท Passive Filter แต่ข้อจำกัดของอุปกรณ์ประเภทนี้ก็คืออุปกรณ์ดังกล่าวจะกรองค่ากระแสฮาร์มอนิกเฉพาะค่าความถี่ที่ถูกปรับค่าไว้เท่านั้น ดังนั้นในกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโหลดที่สร้างค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ค่าความถี่อื่น อุปกรณ์จะไม่สามารถแก้ปัญหาได้อีกทั้งยังอาจเกิดความถี่เรโซแนนซ์จากตัวอุปกรณ์กับโหลดตัวอื่นในระบบจำหน่ายด้วย โดยทั่วไปแบ่ง Active Filter เป็น 3 ประเภทคือ แบบขนาน แบบอนุกรม และแบบผสม ข้อดีของ Active Filter แบบขนานคือสามารถชดเชยได้ทั้งค่ากระแสฮาร์มอนิกและ ค่าตัวประกอบกำลัง ข้อดีของ Active Filter แบบอนุกรมคือสามารถชดเชยค่าแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดเชื่อมต่อทำให้แรงดันมีลักษณะเป็น Sinusoidal ข้อดีของ Active Filter แบบผสม เป็นการรวมข้อดีของแบบขนานและแบบอนุกรมทำให้ Active Filter สามารถชดเชยค่ากระแสฮาร์มอนิก, ค่าตัวประกอบกำลัง และชดเชยค่าแรงดันที่จุดเชื่อมต่อได้ เนื่องจากมีเฉพาะ Active Filter แบบแรกเท่านั้นที่มีใช้งานจริง ส่วนแบบที่สองและแบบสุดท้ายยังอยู่ในช่วงการทำต้นแบบเท่านั้น ผู้นำเสนอบทความจึงนำเสนอแบบจำลองการควบคุมด้วยทฤษฎีกำลังไฟฟ้าทันใด เฉพาะ Active Filter แบบแรกเท่านั้น เนื่องจากจุดเด่นของทฤษฎีกำลังไฟฟ้าทันใด คือ

- เป็นทฤษฎีที่ใช้กับระบบสามเฟส
- สามารถปรับเข้ากับระบบสามเฟสทั้งแรงดันและกระแส แบบสมมูล, แบบไม่สมมูล, แบบสมมาตร, แบบไม่สมมาตร
- เนื่องจากอยู่บนค่า instantaneous ทำให้มีค่าพลวัตการตอบสนองที่ดี
- การคำนวณค่าชดเชยไม่ยุ่งยาก เนื่องจากใช้สมการคณิตศาสตร์ที่ไม่ซับซ้อนสามารถกระทำบนอุปกรณ์ประมวลผลมาตรฐานทั่วไปได้
- สามารถควบคุมได้สองวิธีคือ วิธีกำลังไฟฟ้าคงที่ และ วิธีแหล่งจ่ายกระแสคลื่นไซน์

การทำงานของ Active Filter แบบขนาน เริ่มจากค่าแรงดันและกระแสที่จุดเชื่อมต่อจะถูกตรวจวัดและแปลงสู่แกนนิ่ง ( $\alpha\beta$ ) เพื่อนำค่ามาคำนวณหาค่า กำลังไฟฟ้าจริงทันใดและกำลังไฟฟ้าเสมือนทันใด ในกรณีที่เกิดฮาร์มอนิกขึ้นในระบบ ค่ากระแสชดเชยจะถูกคำนวณบนแกนนิ่งแล้วจึงแปลงกลับมานบนแกนปกติ ส่งค่ามอดูเลชันให้คอนเวอร์เตอร์ฉีดกระแสเข้าชดเชยให้กับระบบจำหน่ายไฟฟ้าจากผลการจำลองโดยโปรแกรม Matlab/Simulink พบว่าสามารถชดเชยกระแสฮาร์มอนิก, กระแสไม่สมมาตรรวมถึงปรับค่าตัวประกอบกำลังได้ดีกว่าการใช้อุปกรณ์ Passive Filter ร่วมกับตัวคาปาซิเตอร์เพื่อแก้ปัญหาค่ากระแสฮาร์มอนิกและค่าตัวประกอบกำลัง

Byung M. และคณะ [6] นำเสนอบทความผลการจำลองการทำงานของตัวชดเชยแรงดันแบบสามเฟสร่วมกับเทคนิคการตรวจจับสัญญาณแรงดันตกช่วงแบบไฮบริด “3-Phase Line-Interactive Dynamic Voltage Restorer with Hybrid Sag Detection Algorithm” ผู้นำเสนอบทความจัดแบ่งตัวชดเชยแรงดันตามลักษณะรูปแบบการต่อวงจรเป็นสองรูปแบบคือ แบบแรกเป็นรูปแบบทั่วไปคือต่ออนุกรมเข้ากับจุดเชื่อมต่อ แบบที่สองซึ่งเป็นแบบที่นำเสนอคือแบบขนานกับจุดเชื่อมต่อและทำงาน

สัมพันธ์กับสถานะแรงดันที่สายร่วมกับการตรวจจับสัญญาณแรงดันตกชั่วขณะแบบไฮบริด เทคนิคการตรวจจับแรงดันตกชั่วขณะ ประกอบด้วยเทคนิคการตรวจจับแบบเร็วโดยใช้การตรวจจับค่า Instantaneous Voltage แต่ในกรณีที่แรงดันประกอบด้วยแรงดันฮาร์มอนิกเทคนิคแบบนี้จะไม่สามารถแยกแยะแรงดันได้ถูกต้อง จึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคการตรวจจับแบบ RMS มาช่วยเสริม แรงดันไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อจะถูกตรวจวัด และนำมาคำนวณค่าแรงดัน RMS บนตัวประกอบมูลฐานโดยใช้เทคนิค DFT จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าแรงดันตกชั่วขณะอ้างอิง การทำงานของตัวชดเชยแรงดัน เริ่มจากในสภาวะปกติแรงดันจากแหล่งจ่ายจะถูกต่อตรงผ่านไทรสเตอร์สวิตช์มายังโหลด เมื่อเกิดแรงดันตกชั่วขณะและตัวตรวจจับแบบไฮบริดทำงานส่งสัญญาณให้กับไทรสเตอร์สวิตช์เพื่อตัดแหล่งจ่ายแรงดันออกจากโหลด พร้อมส่งสัญญาณให้อินเวอร์เตอร์จ่ายค่าแรงดันชดเชยให้กับโหลดผ่านหม้อแปลงชนิดแรงดัน โดยการคิซซาร์จตัวชุปเปอร์คาปาซิเตอร์ เมื่อแหล่งจ่ายแรงดันกลับมาสู่สภาวะปกติสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์ถูกตัดออกและตัวไทรสเตอร์สวิตช์จะต่อแหล่งจ่ายแรงดันเข้ากับโหลดอีกครั้ง หลังจากนั้นตัวชุปเปอร์คาปาซิเตอร์จะถูกชาร์จประจุเตรียมไว้สำหรับใช้งานต่อไป สุดท้ายทำการจำลอง โดยทำการสร้างแบบจำลองแรงดันตกชั่วขณะแบบ 3 เฟส กับดิน ขนาด 0.5 p.u. ช่วงเวลา 4 sec ที่โหลด 3 kVA, 3  $\phi$ , 220 V โดยโปรแกรม PSCAD/EMTDC ผลการจำลองพบว่าระดับค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดอยู่ในสภาวะปกติโดยมีช่วงดีเลย์อยู่ 2 ms

ROSLI OMAR และคณะ [7] นำเสนอบทความ สร้างแบบจำลองและจำลองการชดเชยแรงดันตกชั่วขณะและแรงดันเกินชั่วขณะด้วยตัวชดเชยแรงดัน “Modeling and Simulation for Voltage Sags/Swells Mitigation Using Dynamic Voltage Restorer” ผู้นำเสนอบทความนำเสนอวิธีการควบคุมตัวชดเชยแรงดัน โดยกระทำบนแกนหมุน ( $dq0$ ) ค่าแรงดันที่จุดเชื่อมต่อจะถูกตรวจวัดและแปลงค่าจากแกนปกติ ( $V_{abc}$ ) มาอยู่บนแกนหมุนโดยสมการแปลงของปาร์ก (Park's Transformation) ค่าแรงดันตกชั่วขณะจะถูกตรวจจับเมื่อค่าแรงดันที่จุดเชื่อมต่อต่ำกว่า 0.9 p.u. ในกรณีแรงดันเกินชั่วขณะจะถูกตรวจจับเมื่อค่าแรงดันที่จุดเชื่อมต่อมากกว่า 1.25 p.u. ค่าที่วัดได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าแรงดันอ้างอิงบนแกน  $dq0$  จากนั้นนำค่าที่ได้แปลงกลับมาอยู่บนแกนปกติ ( $V_{abc}$ ) โดยสมการแปลงกลับของปาร์ก (Inverse Park's Transformation) ร่วมกับค่า sine และ cos ที่ได้จาก PLL นำค่าที่ได้ไปสร้างสัญญาณมอดูเลชันซึ่งอินเฟสกับแรงดันที่จุดเชื่อมต่อ สุดท้ายทำการจำลอง โดยทำการสร้างแบบจำลองโดยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK เป็น 2 กรณี คือ กรณีแรกจำลองสภาวะแรงดันตกชั่วขณะแบบ 3 เฟส กับดิน ขนาด 0.5 p.u. ช่วงเวลา 0.2 sec ผลการจำลองพบว่าระดับค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดอยู่ในสภาวะปกติ ต่อมาทำการจำลองสภาวะแรงดันเกินชั่วขณะแบบ 3 เฟสขนาด 1.25 p.u. ช่วงเวลา 0.2 sec ผลการจำลองพบว่าระดับค่าแรงดันไฟฟ้าที่โหลดอยู่ในสภาวะปกติเช่นเดียวกัน

การแสดงผลถึงคุณภาพไฟฟ้าตามมาตรฐานIEEE (IEEE Std. 1159-95,1995) “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality [8]” บทความนี้เป็นได้อธิบาย และ จำลองผล ถึงผลกระทบของแรงดันเมื่อในระบบเกิดการ เปลี่ยนแปลงขึ้นในกรณีต่างๆ ตามช่วงเวลา ของการเกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน มีการให้คำจำกัดความของการเกิดการเปลี่ยนแปลงของ แรงดันแต่ละเหตุการณ์ เพื่อให้มีความเข้าใจต่อเหตุการณ์ และใช้ศัพท์คำจำกัดความเป็นในแนวทาง เดียวกันตามมาตรฐานของ IEEE 1159-1995,1995

จากการวิจัยที่ได้ศึกษาเห็นความสำคัญของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันที่สามารถแก้ปัญหาใน ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีความซับซ้อนและยุ่งยากในการควบคุมได้ และทฤษฎีกำลังไฟฟ้าทันสมัย สามารถประยุกต์ใช้ได้กับการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ได้เป็นอย่างดี

## 2.2 มาตรฐานการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน

งานวิจัยนี้ได้รวบรวมมาตรฐานเพื่อให้การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ามีคุณภาพที่ดีขึ้นอีกด้วย ซึ่ง รวบรวมเท่าที่มีอยู่ในปัจจุบัน ในแต่ละมาตรฐานจะมีข้อกำหนดและลักษณะการใช้แตกต่างกันไป ลักษณะของปัญหาที่เกิดขึ้นจากแรงดันไฟฟ้าตกชั่วคราวสามารถสรุปแต่ละมาตรฐานดังนี้

### 2.2.1 International Electrotechnical Commission (IEC)

เทอมที่ใช้ในมาตรฐาน IEC คือการเข้ากันได้ทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Compatibility: EMC) ซึ่งกำหนดคำว่า EMC เป็นความสามารถของชิ้นส่วนอุปกรณ์ เครื่องมือ หรือ ระบบฟังก์ชันการทำงาน ที่สามารถทำงานได้เป็นที่น่าพอใจในสภาพแวดล้อมทางสนามแม่เหล็ก ปกติการณณ์สิ่งรบกวนทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่พิจารณาใน IEC 1000-2-x มีดังนี้

- ฮาร์โมนิก
- อินเตอร์ฮาร์โมนิก
- แรงดันกระเพื่อม
- ค่าแรงดันตกและไฟฟ้าขัดข้องระยะสั้นๆ
- สัญญาณไฟฟ้าหลัก
- การแปรเปลี่ยนความถี่กำลังไฟฟ้า
- องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรง

### 2.2.2 European Committee for Electrotechnical Standardization

เป็นมาตรฐานที่อธิบายถึงคำนิยามและคุณลักษณะที่สำคัญของแรงดันที่เกี่ยวกับความถี่ ขนาด รูปคลื่น และความสมดุลของแรงดันทั้งสามเฟส ณ จุดจ่ายไฟฟ้าให้กับผู้ใช้ไฟฟ้าภายใต้การใช้งาน ในสภาวะปกติ ทั้งระบบแรงต่ำ (น้อยกว่า 1000 Vrms) และแรงดันปานกลาง (1 kVrms ถึง 35 kVrms) ซึ่งมาตรฐานนี้ได้อธิบายคุณภาพของกำลังไฟฟ้าที่ผู้ใช้ไฟฟ้าได้รับการบริการว่าอยู่ในช่วงระดับใด

### 2.2.3 Institute of Electrical and Electronics Engineerings (IEEE)

เป็นองค์กรมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกาทั้ง ANSI และ IEEE มาตรฐานนี้เป็นมาตรฐานที่ให้แนวทางการปฏิบัติและทฤษฎีพื้นฐานของปรากฏการณ์ ซึ่งจะมีเอกสารทางมาตรฐานมากพอไว้ให้อ้างอิง จากผลการศึกษาได้แบ่งกลุ่มปัญหาทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าไว้ 7 กลุ่ม ดังนี้

- ภาวะชั่วคราว
- การเปลี่ยนแปลงช่วงระยะเวลาสั้น
- การเปลี่ยนแปลงช่วงระยะเวลายาว
- แรงดันไม่สมดุล
- ความผิดเพี้ยนรูปคลื่น
- แรงดันกระเพื่อม
- การแปรเปลี่ยนความถี่กำลังไฟฟ้า

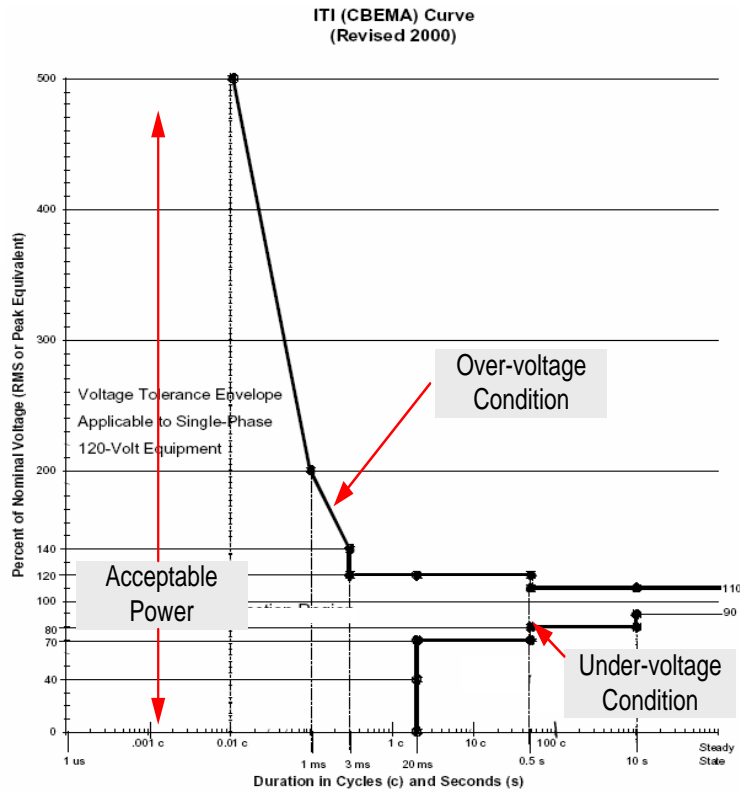
### 2.2.4 เส้นกราฟ ITIC

รูปที่ 2.1 เป็นกราฟที่เกิดจากการพัฒนาของคณะกรรมการอุตสาหกรรมเทคโนโลยีสารสนเทศ (Information Technology Industry Council หรือ ITIC) ซึ่งผู้ผลิตคอมพิวเตอร์และเครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ใช้เป็นมาตรฐานในการออกแบบอุปกรณ์ดังกล่าวเพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องแม้ในสภาวะขีดจำกัดของแรงดันรบกวนทั้งขนาดและช่วงเวลาของการเกิด และปัจจุบันได้นำมาใช้วัดคุณสมบัติของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ไป อีกทั้งยังใช้ในการอ้างอิงเมื่อกล่าวถึงคุณภาพกำลังไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 The Voltage Tolerance for some Devices

อุปกรณ์	ช่วงระยะเวลาการเกิดแรงดันตกสูงสุด(Max. Duration)	ขนาดแรงดันตกต่ำสุด (Min.Voltage Magnitude)
PLC	260 ms	0.60 p.u.
AC Control Relay	20 ms	0.65 p.u.
5 Hp AC Drive	50 ms	0.75 p.u.
Motor Starter	50 ms	0.50 p.u.
Personal Computer	50 ms	0.50 p.u.

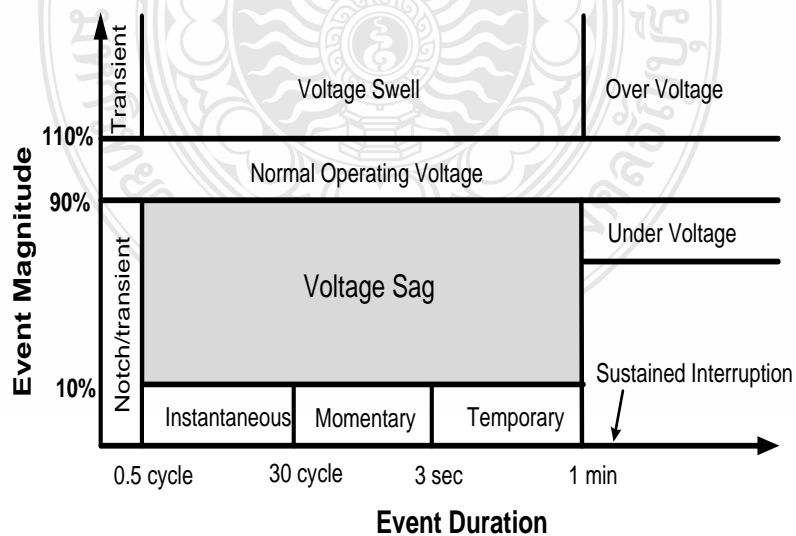
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าช่วงระยะเวลาการเกิดแรงดันตกสูงสุด (Max. Duration) และขนาดแรงดันตกต่ำสุด (Min.Voltage Magnitude) ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวยังคงสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง จากตารางเราจะพบว่าแรงดันตกชั่วขณะจะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ต่างชนิดแตกต่างกันไป



รูปที่ 2.1 Typical Computer Voltage Tolerance (ITIC CURVE)

### 2.3 มาตรฐานการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ของ IEEE 1159-1995

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้มาตรฐานการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ของ IEEE 1159-1995 เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการวิเคราะห์ระบบดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 มาตรฐานการเปลี่ยนแปลงแรงดัน IEEE 1159-1995

การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผล (Vrms) แบ่งการเกิดการเปลี่ยนแปลงออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงการเปลี่ยนแปลงช่วงระยะสั้น (Short Duration Variation) และช่วงระยะยาว (Long Duration Variation)

### 2.3.1 ช่วงระยะสั้น

ช่วงระยะสั้น คือการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้า ที่มีระยะเวลาตั้งแต่ 0.5 - 1 นาที สาเหตุเกิดจากการเปลี่ยนแปลงซึ่งในการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้านั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะตามพฤติกรรมการเกิดเหตุการณ์ของระบบไฟฟ้า คือแรงดันไฟฟ้าตก (Voltage Sag or Voltage Dip) แรงดันไฟฟ้าเกิน (Voltage Swell or Voltage Surge) และไฟฟ้าดับ (Voltage Interruption) ซึ่งการเกิดทั้ง 3 ลักษณะนั้นแบ่งช่วงระยะเวลาของการเกิดเหตุการณ์ต่างๆ ได้ 3 ช่วงเวลาดังนี้ คือ แบบทันทีทันใด (Instantaneous) แบบชั่วขณะ (Momentary) และแบบชั่วคราว (Temporary) ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงระยะเวลาสั้น

ช่วงระยะเวลาสั้น (Short Duration)		ช่วงระยะเวลาการเกิด (Typical Duration)	ขนาดแรงดัน (Voltage Magnitude)
แบบทันทีทันใด (Instantaneous)	Sag	0.5-30 คาบ (10 มิลลิวินาที-1 วินาที)	0.1-0.9 p.u.
	Swell	0.5-30 คาบ (10 มิลลิวินาที-1 วินาที)	1.1-1.8 p.u.
แบบชั่วขณะ (Momentary)	Interruption	0.5 คาบ-3 วินาที(10 มิลลิวินาที-3วินาที)	< 0.1 p.u.
	Sag	30 cycles-3 s (1 - 3 วินาที)	0.1-0.9 p.u.
	Swell	30 cycles-3 s (1 - 3 วินาที)	1.14-1.4 p.u.
แบบชั่วคราว (Temporary)	Interruption	3 s-1 min (3 วินาที - 1 นาที)	< 0.1 p.u.
	Sag	3 s-1 min (3 วินาที - 1 นาที)	0.1-0.9 p.u.

### 2.3.2 ช่วงระยะยาว

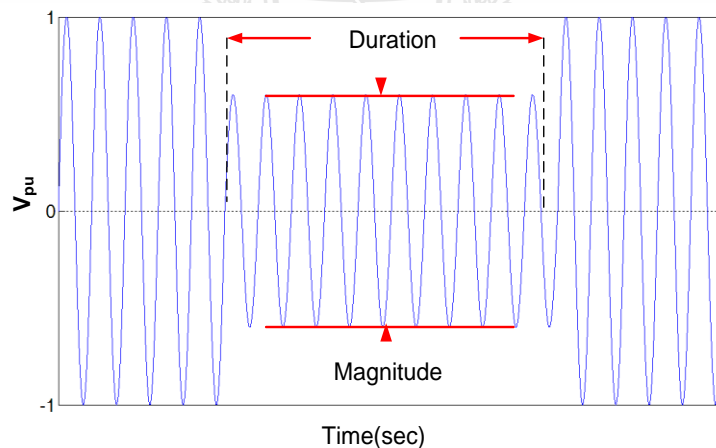
ช่วงระยะยาว คือการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า ประสิทธิผล สาเหตุเกิดจากการเปลี่ยนแปลงการทำงานของโหลดขนาดใหญ่หรือขณะการทำงานการสวิตชิงระบบ โดยมีระยะเวลา มากกว่า 1 นาที โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 เหตุการณ์ด้วยดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงระยะเวลายาว

ช่วงระยะเวลายาว (Long Duration)	ช่วงระยะเวลาการเกิด (Typical Duration)	ขนาดแรงดัน (Voltage Magnitude)
Interruption, Sustained	>1 min	0.0 p.u.
Under Voltage	>1 min	0.8-0.9 p.u.
Over Voltage	>1 min	1.1-1.2 p.u.

## 2.4 แรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ (Voltage Sag)

แรงดันตกชั่วขณะคือ ระดับแรงดันที่ลดลงระหว่าง 0.1-0.9 p.u. จากระดับแรงดันประสิทธิผลปกติ ภายในช่วงเวลา 10 มิลลิวินาที (0.5 คาบ) ถึง 1 นาที และตัวบ่งชี้ระดับความรุนแรงของปัญหาประกอบด้วย ขนาดความลึกของแรงดัน (Sag Magnitude) ในระหว่างการเกิด ความผิดพลาด (Fault) มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์หรือ p.u. ช่วงเวลาในการเกิด (Sag Duration) และการเลื่อนเฟส (Phase Shift) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แรงดันตกชั่วขณะจากความผิดพลาดชนิด 1 เฟส

ขนาด และ ระยะเวลา ในแต่ละมาตรฐานได้มีการกำหนด ชื่อ ขนาด และระยะเวลาที่เกิดขึ้น โดยทั่วไป แตกต่างกันดังตารางต่อไปนี้

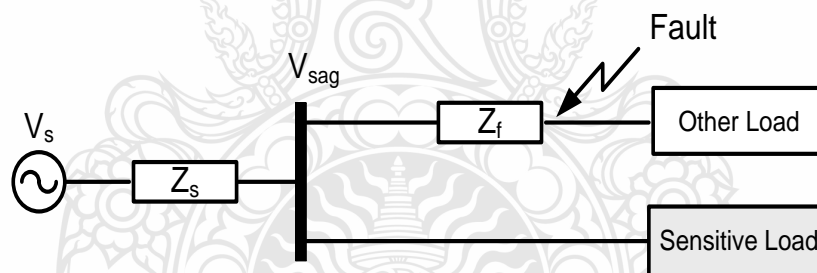


ตารางที่ 2.4 การเปรียบเทียบมาตรฐานของปรากฏการณ์แรงดันตกชั่วคราว

มาตรฐาน ตัวแปร	IEC 1000-2-1-1990	prEN50160-1993	IEEE Std 1159-1995
ชื่อ	Voltage Dips	Voltage Dips	Voltage Sags
ขนาด (p.u.)	0.0-0.9	0.01-0.9	0.1-0.9
ช่วงระยะเวลา	½ c – few sec	10ms – 1min	½ c -1 min

#### 2.4.1 สาเหตุการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ

แรงดันตกชั่วขณะสามารถเกิดได้จากหลากหลายปัจจัย สาเหตุส่วนใหญ่มักเกิดจากความผิดปกติ (Fault) ในระบบจำหน่ายหรือระบบสายส่งสามารถแบ่งตามลักษณะดังนี้ ความผิดปกติแบบ 1 เฟสลงดิน (SLG) ความผิดปกติระหว่าง เฟสกับเฟส (LLF) ความผิดปกติระหว่าง เฟสกับเฟสลงดิน (DLG) ความผิดปกติระหว่าง 3 เฟสลงดิน (TLG) โดยทั่วไป มักเกิดในสถานะ พายุ ฝน ลมแรง ไฟฟ้า เกิดจากสัตว์ กิจกรรมของมนุษย์ เช่นการก่อสร้างหรืออุบัติเหตุ และผลกระทบ จากการลัดวงจรของวงจรใกล้เคียงในระบบจำหน่าย จากผลการศึกษาพบว่าความผิดปกติแบบ 1 เฟสลงดิน (SLG) เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะ [9]



รูปที่ 2.4 การเกิดความผิดปกติในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่ทำให้เกิดแรงดันตกชั่วขณะ

จากรูป 2.4 ขนาดของแรงดันตกชั่วขณะสามารถแทนด้วยสมการแบ่งแรงดัน โดยเมื่อไม่พิจารณาค่ากระแสไหลด สมการขนาดของแรงดันตกชั่วขณะคือ

$$V_{sag} = \frac{Z_s}{Z_s + Z_f} \times V_s \quad (2.1)$$

เมื่อ  $V_{sag}$  = ขนาดของแรงดันตก

$Z_s$  = ค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายที่ต้นสายกับจุดต่อร่วม

$Z_f$  = ค่าอิมพีแดนซ์ระหว่างจุดต่อร่วมกับตำแหน่งที่เกิดฟอลต์

โดยทั่วไปการเกิดแรงดันตกชั่วขณะมักเกิดมมเฟสกระโดด ( $\Delta\Phi$ ) ร่วมด้วย ดังสมการที่ 2.4

$$Z_s = R_s + jX_s \quad (2.2)$$

$$Z_f = R_f + jX_f \quad (2.3)$$

$$\Delta\Phi = \arg(V_{sag}) = \arctan\left(\frac{X_f}{R_f}\right) - \arctan\left(\frac{X_s+X_f}{R_s+R_f}\right) \quad (2.4)$$

ตารางที่ 2.5 แสดงค่าแรงดันตกชั่วขณะด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงซึ่งเกิดผลกระทบเนื่องจากความผิดพลาดแบบ 1 เฟสลงดิน ตามลักษณะของการต่อของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสในระบบจำหน่าย

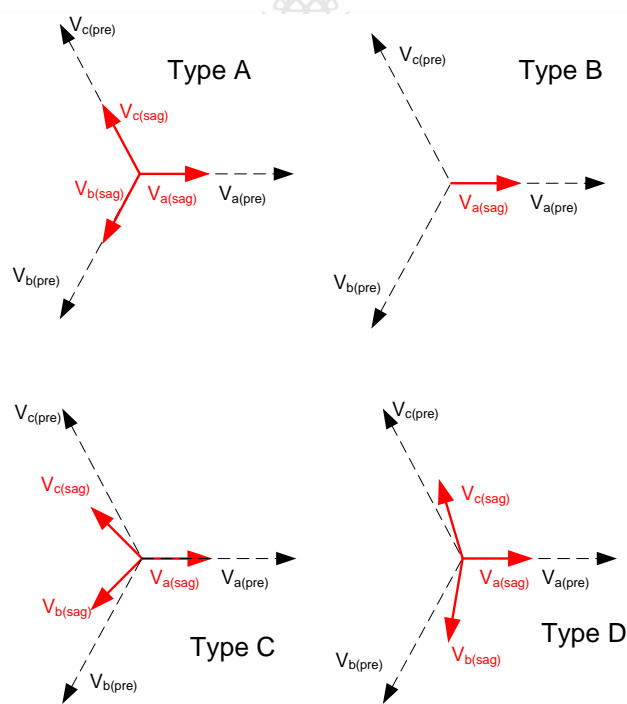
ตารางที่ 2.5 ค่าแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงในขณะที่เกิดความผิดพลาด

Transformer Connection	Phase to Phase			Phase to Neutral		
	$V_a$	$V_b$	$V_c$	$V_{an}$	$V_{bn}$	$V_{cn}$
(Primary-Secondary)						
Ground wye - ground wye	0.58	1.00	0.58	0.00	1.00	1.00
Ground wye - unground wye	0.58	1.00	0.58	0.00	1.00	1.00
Unground wye - unground wye	0.58	1.00	0.58	0.33	0.88	0.88
Unground wye - ground wye	0.58	1.00	0.58	0.33	0.88	0.88
Delta - delta	0.58	1.00	0.58	---	---	---
Unground wye - delta	0.33	0.88	0.88	---	---	---
Ground wye - delta	1.00	0.50	0.50	---	---	---
Delta - ground wye	0.88	0.88	0.33	0.58	1.00	0.58
Delta - unground wye	0.88	0.88	0.33	0.58	1.00	0.58

ตัวอย่างเช่น ในกรณีทีลักษณะของการต่อของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นแบบ wye-wye หรือ delta-delta ค่าแรงดันเฟสถึงเฟส  $V_a$  และ  $V_c$  มีค่า 0.58 p.u. ในขณะที่  $V_b$  มีค่า 1 p.u. สำหรับการต่อของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นแบบ delta-wye และ wye-delta ค่าแรงดันเฟสถึงเฟส  $V_a$  มีค่า 0.33 p.u. ในขณะที่  $V_b$  และ  $V_c$  มีค่า 0.88 p.u.

## 2.4.2 ลักษณะของแรงดันตกชั่วขณะ

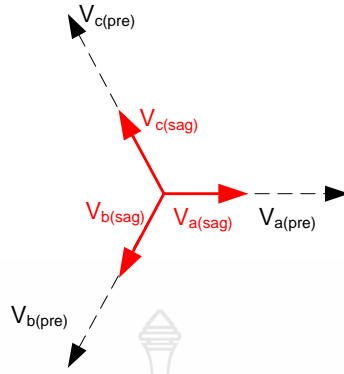
แรงดันตกชั่วขณะมีลักษณะทั้งแบบสมดุล (Balanced) และไม่สมดุล (Un-balance) ถ้าในระหว่างการเกิดฟอลต์ ทำให้ขนาดแรงดันตกชั่วขณะในเฟสไม่เท่ากัน หรือ ทำให้ค่าความต่างเฟสไม่เท่ากับ 120 องศา จัดเป็นแรงดันตกชั่วขณะแบบไม่สมดุล (Unbalance Sag) ทั้งนี้ขนาดและลักษณะของแรงดันตกชั่วขณะจะขึ้นอยู่กับ ประเภท, ตำแหน่งของฟอลต์, อุปกรณ์ที่ต่อร่วม รวมถึงลักษณะของการต่อของหม้อแปลงไฟฟ้า 3 เฟสที่ต่ออยู่ในระบบไฟฟ้า ในระบบไฟฟ้าแรงดันระดับกลางที่มีหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส แบบ เดลต้า/วาย ต่ออยู่ สามารถแบ่งลักษณะของแรงดันตกชั่วขณะได้เป็น 4 ประเภท คือ A, B, C และ D โดยแรงดันตกชั่วขณะแบบ A จัดเป็นแบบสมดุล ส่วนแบบอื่นจัดเป็นแบบไม่สมดุล ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เฟสเซอร์ของแรงดันตกชั่วขณะในระบบ

รูปที่ 2.5 แสดงเฟสเซอร์ของแรงดันตกชั่วขณะ ซึ่งแบ่งตามการเกิดความผิดปกติพ่วงขึ้นในระบบไฟฟ้า ซึ่งมีหม้อแปลงแรงดันไฟฟ้า 3 เฟสชนิด เดลต้า/วาย ต่ออยู่ในระบบ ดังนั้นจึงแบ่งชนิดของแรงดันตกชั่วขณะ ได้เป็น 4 ประเภทที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้

1. แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดจากความผิดปกติพ่วงแบบ 3 เฟสชนิด A โดยทั่วไปเกิดกับอุปกรณ์ด้านผู้ใช้ไฟฟ้า (End User Device) มักไม่เกิดกับระบบจำหน่าย มีลักษณะของแรงดันที่ขนาดลดลงจากปกติแบบสมมาตรและไม่มีการกระโดดของมุม ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และสมการที่ 2.5-2.7



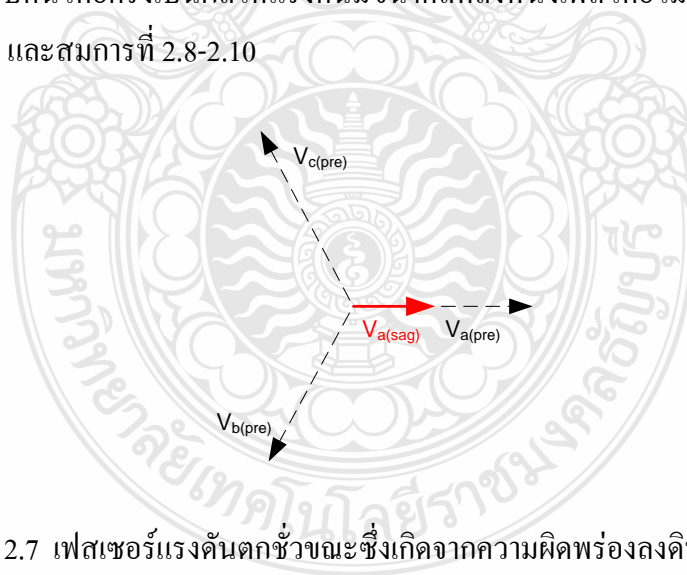
รูปที่ 2.6 เฟสเซอร์แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดจากความผิดปกติแบบ 3 เฟส

$$V_a = V \quad (2.5)$$

$$V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V \quad (2.6)$$

$$V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V \quad (2.7)$$

2. แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดจากความผิดปกติแบบ 3 เฟสแบบ B เป็นแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากความผิดปกติลงดินเส้นเดียวซึ่งเป็นความผิดที่เกิดขึ้นมากที่สุด แรงดันตกชั่วขณะแบบ B เป็นระบบต่อกับดินโดยตรงเป็นผลให้แรงดันมีขนาดลดลงหนึ่งเฟสโดยไม่เกิดที่เฟสอื่นแสดง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และสมการที่ 2.8-2.10



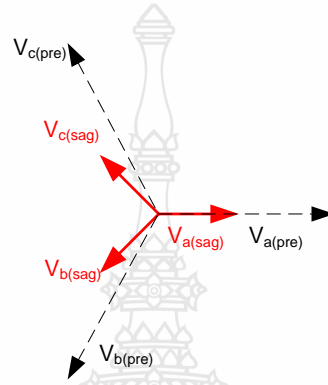
รูปที่ 2.7 เฟสเซอร์แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดจากความผิดปกติลงดินเส้นเดียว

$$V_a = V \quad (2.8)$$

$$V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V \quad (2.9)$$

$$V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V \quad (2.10)$$

3. แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดจากความผิดปกติของแบบ 3 เฟส ชนิด C เป็นแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากความผิดปกติระหว่างสายในระบบที่ต่อลงดิน (Double Line Fault) เมื่อเกิดความผิดปกติระหว่างสายขึ้น ระดับแรงดันจะลดลงทั้งสองเฟสและมีผลทำให้มีมุมเลื่อนเฟสเกิดขึ้นด้วย นอกจากนี้ระบบที่ไม่ต่อลงดินก็สามารถก่อให้เกิดรูปแบบชนิดนี้ได้เช่นกัน หากเกิดความผิดปกติแบบลงดินเส้นเดียวขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และสมการที่ 2.11-2.13



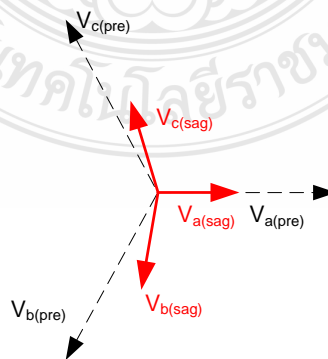
รูปที่ 2.8 เฟสเซอร์แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดจากความผิดปกติระหว่างสายในระบบที่ต่อลงดิน

$$V_a = V \quad (2.11)$$

$$V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V \quad (2.12)$$

$$V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V \quad (2.13)$$

4. แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดจากความผิดปกติของแบบ 3 เฟส ชนิด D เป็นแรงดันตกชั่วขณะที่เกิดจากความผิดปกติระหว่างสาย ซึ่งเป็นผลให้แรงดันมีขนาดลดลงหนึ่งเฟสและเกิดมุมเลื่อนเฟสขึ้นด้วย โดยทั่วไปจะเกิดแรงดันตกชั่วขณะแบบ D ระบบต่อกับดินโดยผ่านอิมพีแดนส์เป็นผลให้แรงดันและมุมเฟสที่เฟสอื่นๆ มีการเปลี่ยนแปลงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และสมการที่ 2.14-2.16



รูปที่ 2.9 เฟสเซอร์แรงดันตกชั่วขณะซึ่งเกิดจากความผิดปกติระหว่างสาย

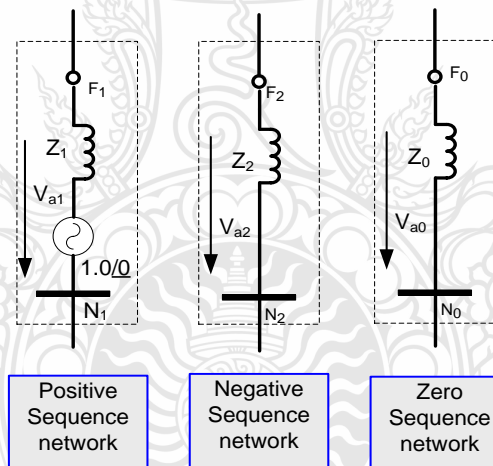
$$V_a = V \quad (2.14)$$

$$V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V \quad (2.15)$$

$$V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V \quad (2.16)$$

### 2.4.3. การวิเคราะห์สภาวะผิดปกติ (Analysis of Fault)

สภาวะผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ สภาวะผิดปกติแบบสมมาตร (Symmetrical Fault) ได้แก่ สภาวะผิดปกติแบบ 3 สายต่อลงดิน (Three Line to Ground Fault) และสภาวะผิดปกติแบบไม่สมมาตร (Unsymmetrical Fault) ได้แก่ สภาวะผิดปกติแบบหนึ่งเฟสต่อลงดิน (Single Line to Ground Fault) สภาวะผิดปกติแบบระหว่างเฟสกับเฟสต่อลงดิน (Double Line to Ground Fault) และสภาวะผิดปกติแบบระหว่างเฟสกับเฟส (Line to Line Fault) การหาค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าขณะเกิดสภาวะผิดปกติข้างต้นทำได้โดยใช้หลักการองค์ประกอบสมมาตรมาพิจารณาการเรียงลำดับของวงจร ที่ตำแหน่งการเกิดสภาวะผิดปกติ



รูปที่ 2.10 องค์ประกอบสมมาตรระบบจำหน่าย

ในสภาวะปกติจะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเพื่อจ่ายไปยังทุกส่วนเพื่อจ่ายไปโหลด แต่เมื่อเกิดสภาวะผิดปกติที่ตำแหน่งใดๆ กระแสไฟฟ้าจะไหลมาที่ตำแหน่งสภาวะผิดปกติให้ส่วนอื่นๆ ในระบบจำหน่ายกลายเป็นเสมือนแหล่งจ่ายกระแส ดังนั้นส่วนประกอบของวงจรที่มีการเรียงลำดับ ที่ตำแหน่งสภาวะผิดปกติ จึงมีลักษณะคล้ายกับวงจรที่มีการเรียงลำดับของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตามรูปที่ 2.10 สำหรับแรงดันไฟฟ้าที่มีการเรียงลำดับขององค์ประกอบสมมาตรที่ใช้ในการวิเคราะห์สภาวะผิดปกติได้จากสมการดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

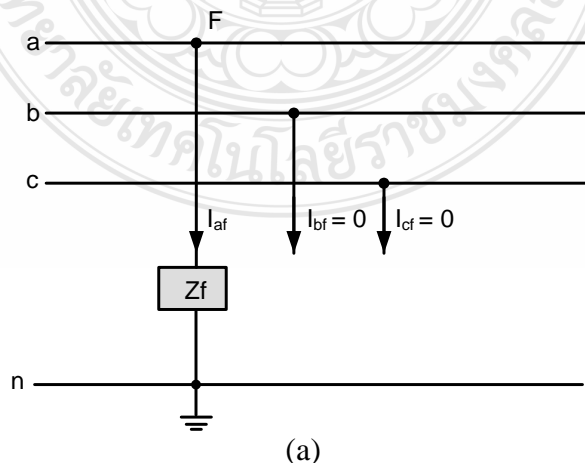
ค่า  $E_a = 1.0/0^\circ$  p.u.

จากสมการ (2.17) ทำให้ทราบว่า การหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีการเรียงลำดับนั้นจะต้องทราบค่ากระแสไฟฟ้าที่มีการเรียงลำดับ ( $I_{a0}, I_{a1}, I_{a2}$ ) เสียก่อน แต่ต้องระลึกเสมอว่า กระแสไฟฟ้าที่มีการเรียงลำดับของสภาวะผิดปกติแต่ละประเภทมีค่าไม่เท่ากัน สมมติเราทราบค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีการเรียงลำดับ และกระแสไฟฟ้าที่มีการเรียงลำดับแล้วนำไปแทนค่าในสมการ (2.18) และสมการ (2.19) ก็จะได้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขณะเกิดสภาวะผิดปกตินั้นเอง

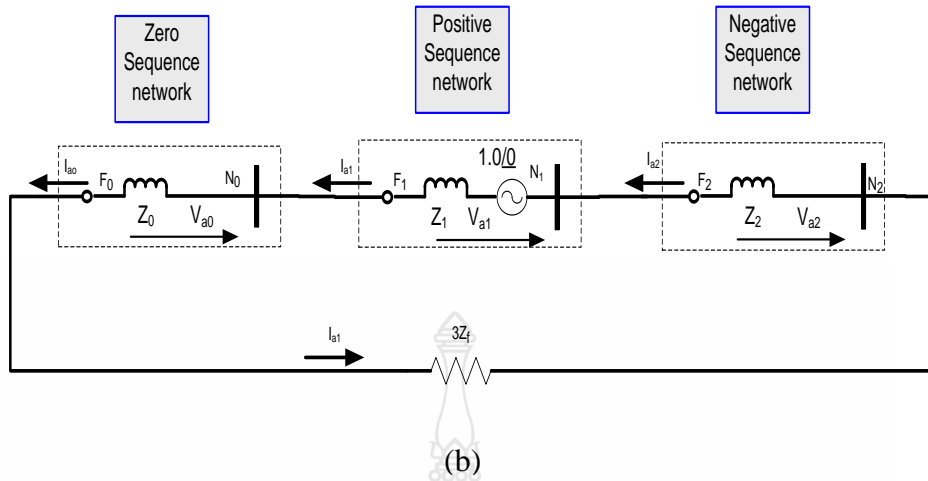
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

- สภาวะผิดปกติแบบหนึ่งเฟสต่อลงดิน (Single Line to Ground Fault)  
สภาวะผิดปกติแบบหนึ่งเฟสต่อลงดินเกิดขึ้นเมื่อสายตัวนำเส้นหนึ่งสัมผัสกับกับดินหรือสายนิวตรอลของระบบที่มีการต่อลงดิน



(a)



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลสถานะผิดปกติของแบบหนึ่งเฟสต่อลงดิน (SLG)

จากรูปที่ 2.11(a) แสดงวงจรสมมูลของสายส่งขณะเกิดสถานะผิดปกติเนื่องจากสายตัวนำเฟส A ต่อดินที่จุด F สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูป 2.11(b) แสดงให้เห็นว่าขณะเกิดสถานะผิดปกติประเภทนี้

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} \quad (2.20)$$

กำหนด  $Z_f$  = ค่าอิมพีแดนซ์ขณะเกิดสถานะผิดปกติ,  $E_a$  ตามสมการที่ (2.17) =  $1.0\angle 0^\circ$  p.u. ทำให้กระแสไฟฟ้าที่มีการเรียงลำดับขณะเกิดสถานะผิดปกติมีค่าดังนี้

$$I_{af} = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \quad (2.21)$$

จากสมการ (2.19)

$$\begin{bmatrix} I_{af} \\ I_{bf} \\ I_{cf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

จากรูป 2.11 ทำให้เราทราบว่าขณะเกิดสถานะผิดปกติ  $I_{bf} = I_{cf} = 0$  ส่วนกระแสไฟฟ้าที่เฟส a ขณะเกิดสถานะผิดปกติ ( $I_{af}$ ) หาได้ดังสมการที่ 2.23

$$I_{af} = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \quad (2.23)$$



จากสมการ (2.20)

$$I_{af} = 3I_{a0} = 3I_{a1} = 3I_{a2} \quad (2.24)$$

จากรูป 2.11(a) ทำให้เราทราบว่าแรงดันที่เฟส a ขณะเกิดสภาวะผิดปกติ ( $V_{af}$ ) มีค่าเป็น

$$V_{af} = Z_f I_{af} \quad (2.25)$$

แทนที่สมการที่ (2.24) ลงใน สมการ (2.25) จะได้

$$V_{af} = 3Z_f I_{a1} \quad (2.26)$$

หรือ

$$V_{af} = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \quad (2.27)$$

$$V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = 3Z_f I_{a1} \quad (2.28)$$

เมื่อ  $E_a$  ในสมการ (2.17) =  $1.0\angle 0^\circ$  p.u.

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1.0\angle 0^\circ \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

ทำให้เราทราบว่าขณะเกิดสภาวะผิดปกติประเภทนี้

$$V_{a0} = -Z_0 I_{a0} \quad (2.30)$$

$$V_{a1} = 1.0 - Z_1 I_{a1} \quad (2.31)$$

$$V_{a2} = -Z_2 I_{a2} \quad (2.32)$$

แรงดันไฟฟ้าที่เฟส b และ เฟส c หาได้จากสมการ (2.18)

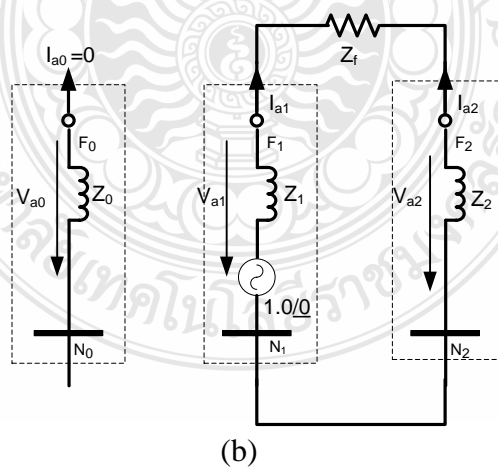
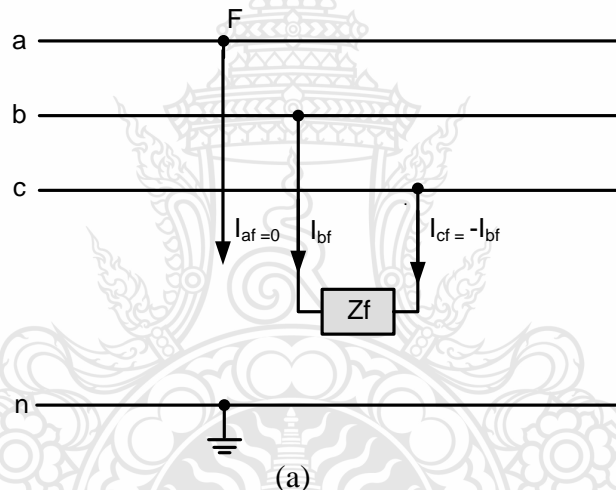
$$\begin{bmatrix} V_{af} \\ V_{bf} \\ V_{cf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

$$V_{bf} = V_{a0} + a^2V_{a1} + aV_{a2} \quad (2.34)$$

$$V_{cf} = V_{a0} + aV_{a1} + a^2V_{a2} \quad (2.35)$$

- สถานะผิดปกติแบบระหว่างเฟสกับเฟส (Line to Line Fault)

สถานะผิดปกติแบบระหว่างเฟสกับเฟสเกิดขึ้นเมื่อสายตัวนำสองเส้นหนึ่งสัมผัสกันทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้น



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลสถานะผิดปกติแบบระหว่างเฟสกับเฟส (LLF)

รูปที่ 2.12 (a) แสดงการเกิดสภาวะผิดปกติของแบบระหว่างเฟสกับเฟส ที่ตำแหน่ง F ระหว่างเฟส a และ เฟส b ซึ่งสามารถเขียนวงจรที่มีการเรียงลำดับได้ดังรูป 2.12 (b) เมื่อพิจารณารูปที่ 2.12 (a) จะพบว่า ขณะเกิดสภาวะผิดปกติประเภทนี้

$$I_{af} = 0 \quad (2.36)$$

$$I_{bf} = -I_{cf} \quad (2.37)$$

$$V_{bc} = V_b - V_c = Z_f I_{bf} \quad (2.38)$$

จากรูป 2.12 (b) หาค่ากระแสไฟฟ้าที่มีการเรียงลำดับได้ดังนี้คือ

$$I_{a0} = 0 \quad (2.39)$$

$$I_{a1} = -I_{a2} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (2.40)$$

ถ้า  $Z_f = 0$

$$I_{a1} = -I_{a2} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{Z_1 + Z_2} \quad (2.41)$$

แทนค่าสมการ 2.39 และสมการ 2.40 ลงในสมการ 2.22

$$I_{bf} = -I_{cf} = \sqrt{3} I_{a1} \angle -90^\circ \quad (2.42)$$

ในทำนองเดียวกัน หาค่าแรงดันไฟฟ้าเรียงลำดับได้จากการแทนสมการ 2.39 และสมการ 2.40 ลงในสมการ 2.29

$$V_{a0} = 0 \quad (2.43)$$

$$V_{a1} = 1.0 - Z_1 I_{a1} \quad (2.44)$$

$$V_{a2} = -Z_2 I_{a2} = Z_2 I_{a1} \quad (2.45)$$

แทนสมการ 2.43 ถึง 2.45 ลงในสมการ 2.33

$$V_{af} = V_{a1} + V_{a2} \quad (2.46)$$

$$V_{af} = 1.0 + I_{a1}(Z_2 - Z_1) \quad (2.47)$$

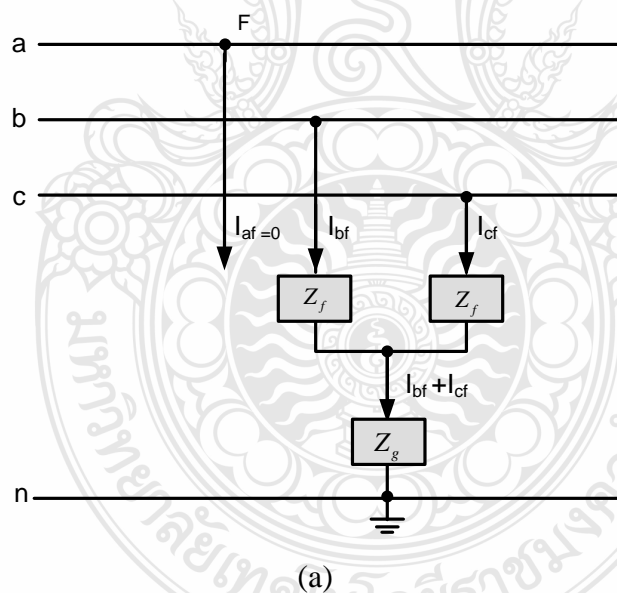
$$V_{bf} = a^2 V_{a1} + a V_{a2} \quad (2.48)$$

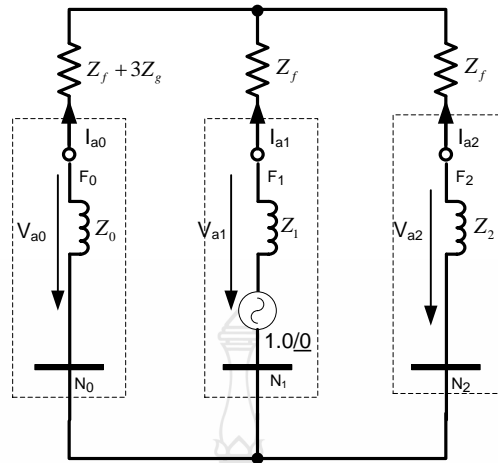
$$V_{bf} = a^2 + I_{a1}(aZ_2 - a^2Z_1) \quad (2.49)$$

$$V_{cf} = a V_{a1} + a^2 V_{a2} \quad (2.50)$$

$$V_{cf} = a + I_{a1}(a^2Z_2 - aZ_1) \quad (2.51)$$

- สภาวะผิดปกติแบบระหว่างเฟสกับเฟสต่อลงดิน (Double Line to Ground Fault)  
สภาวะผิดปกติแบบระหว่างเฟสกับเฟสต่อลงเกิดขึ้นเมื่อสายตัวนำสองหนึ่งสัมผัสกับกับดินหรือสายนิวตรอลของระบบที่มีการต่อลงดิน





(b)

รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลสภาวะผิดปกติพร้อมแบบระหว่างเฟสกับเฟสต่อลงดิน (DLG)

รูปที่ 2.13(a) แสดงการเกิดสภาวะผิดปกติพร้อมแบบระหว่างเฟสกับเฟสต่อลงดินที่ตำแหน่ง F โดยระหว่างเฟส a และ เฟส b ต่อลงดิน ,  $Z_f$  = ค่าสภาวะผิดปกติพร้อมอิมพีแดนซ์ และ  $Z_g$  = ค่าอิมพีแดนซ์จากสายไปยังดินซึ่งสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูป 2.13(b)

เมื่อพิจารณารูป 2.13 (a) จะพบว่า ขณะเกิดสภาวะผิดปกติพร้อม

$$I_{af} = 0 \quad (2.52)$$

$$V_{bf} = (Z_f + Z_g)I_{bf} + Z_g I_{cf} \quad (2.53)$$

$$V_{cf} = (Z_f + Z_g)I_{cf} + Z_g I_{bf} \quad (2.54)$$

จากรูป 2.13 (b)

$$I_{a1} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{(Z_1 + Z_f) + \frac{(Z_2 + Z_f)(Z_0 + Z_f + 3Z_g)}{(Z_0 + Z_2 + 2Z_f + 3Z_g)}} \quad (2.55)$$

$$I_{a2} = \left[ \frac{(Z_0 + Z_f + 3Z_g)}{(Z_0 + Z_f + 3Z_g) + (Z_2 + Z_f)} \right] I_{a1} \quad (2.56)$$

$$I_{a0} = \left[ \frac{(Z_2 + Z_f)}{(Z_2 + Z_f) + (Z_0 + Z_f + 3Z_g)} \right] I_{a1} \quad (2.57)$$

หรือใช้วิธีย้ายค่าดังนี้

$$I_{af} = 0 = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \quad (2.58)$$

ถ้าทราบค่า  $I_{a1}$  และ  $I_{a2}$  เราจะได้

$$I_{a0} = -(I_{a1} + I_{a2}) \quad (2.59)$$

ในกรณี  $Z_f = 0$  และ  $Z_g = 0$  จะหาค่ากระแสไฟฟ้าที่มีการเรียงลำดับได้จาก

$$I_{a1} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{Z_1 + (Z_0 + Z_2) / (Z_0 + Z_2)} \quad (2.60)$$

$$I_{a2} = \left[ \frac{Z_0}{(Z_0 + Z_2)} \right] I_{a1} \quad (2.61)$$

$$I_{a0} = - \left[ \frac{Z_2}{(Z_0 + Z_2)} \right] I_{a1} \quad (2.62)$$

หาค่ากระแสไฟฟ้าที่เฟส b และ c ขณะเกิดสภาวะผิดปกติโดยการแทนสมการ 2.55 ถึงสมการ 2.57 ลงในสมการ 2.22

$$I_{bf} = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} \quad (2.63)$$

$$I_{cf} = I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2} \quad (2.64)$$

จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้ารวมที่ไหลในสายนิวทรัลขณะเกิดสภาวะผิดปกติคือ

$$I_n = I_{bf} + I_{cf} = 3I_{a0} \quad (2.65)$$

หาค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีการเรียงลำดับได้โดยแทนสมการ 2.55 ถึงสมการ 2.57 ลงในสมการ 2.29

$$V_{a0} = -Z_0 I_{a0} \quad (2.66)$$

$$V_{a1} = 1.0 - Z_1 I_{a1} \quad (2.67)$$

$$V_{a2} = -Z_2 I_{a2} \quad (2.68)$$

จากสมการ 2.33

$$V_{af} = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \quad (2.69)$$

$$V_{bf} = V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2} \quad (2.70)$$

$$V_{cf} = V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2} \quad (2.71)$$

หรืออีกวิธีการหนึ่งคือหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่เฟส b และ c ขณะเกิดสภาวะผิดปกติ ( $V_{bf}$  และ  $V_{cf}$ ) จากสมการ 2.53 และสมการ 2.54 ซึ่งทำให้หาค่าแรงดันไฟฟ้าที่สายขณะเกิดสภาวะผิดปกติได้ ดังนี้

$$V_{abf} = V_{af} - V_{bf} \quad (2.72)$$

$$V_{bcf} = V_{bf} - V_{cf} \quad (2.73)$$

$$V_{caf} = V_{cf} - V_{af} \quad (2.74)$$

กรณี  $Z_f = 0$  และ  $Z_g = 0$  แรงดันไฟฟ้าที่มีการเรียงลำดับจะมีค่าเป็น

$$V_{a0} = V_{a1} = V_{a2} = 1.0 - Z_1 I_{a1} \quad (2.75)$$

เราหาค่า  $I_{a1}$  จากสมการ 2.60 ส่วน  $I_{a2}$  และ  $I_{a0}$  จะหาค่าได้ก็ต่อเมื่อทราบค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีการเรียงลำดับจากสมการ 2.75 ก่อน

$$I_{a2} = \frac{V_{a2}}{Z_2} \quad (2.76)$$

$$I_{a0} = -\frac{V_{a0}}{Z_0} \quad (2.77)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการ 2.75 แรงดันไฟฟ้าที่เฟสขณะเกิดสภาวะผิดปกติที่แสดงในสมการ 2.69 ถึง 2.71 จึงมีค่าเป็น

$$V_{af} = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} = 3V_{a1} \quad (2.78)$$

$$V_{bf} = V_{cf} = 0 \quad (2.79)$$

ดังนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าที่สายขณะเกิดสภาวะผิดปกติ หาได้ดังนี้

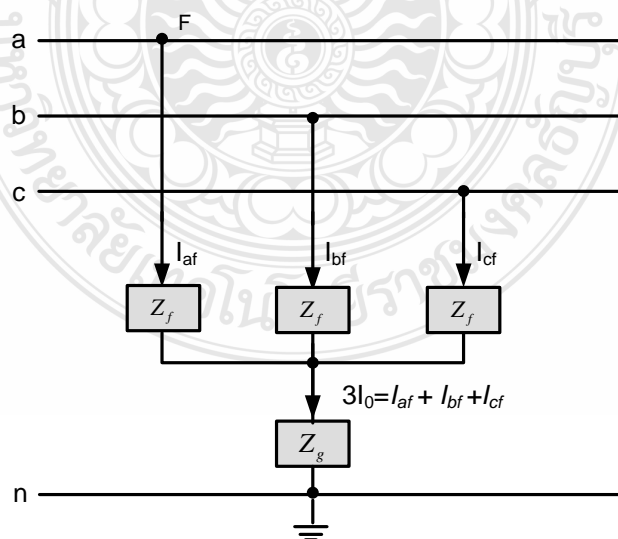
$$V_{abf} = V_{af} - V_{bf} = V_{af} \quad (2.80)$$

$$V_{bcf} = V_{bf} - V_{cf} = 0 \quad (2.81)$$

$$V_{caf} = V_{cf} - V_{af} = -V_{af} \quad (2.82)$$

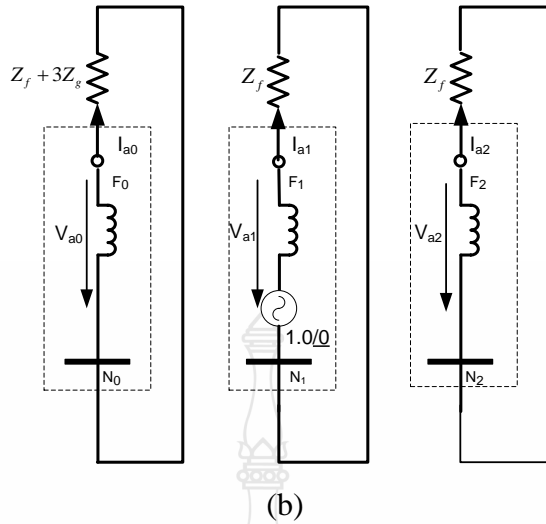
- **สภาวะผิดปกติแบบ 3 สายลงดิน (Three Line to Ground Fault)**

สภาวะผิดปกติแบบ 3 สายลงดิน เกิดขึ้นเมื่อสายตัวนำทั้งสามสัมผัสกับดินหรือสายนิวตรอลของระบบที่มีการต่อลงดิน ดังแสดงในรูป 2.14



(a)





รูปที่ 2.14 สภาวะผิดปกติแบบสภาวะผิดปกติแบบ 3 สายลงดิน(TLG)

รูปที่ 2.14(a) แสดงการเกิดสภาวะผิดปกติแบบระหว่างสามเฟสต่อลงดินที่ตำแหน่ง F เนื่องจากสภาวะผิดปกติประเภทนี้เป็นสภาวะผิดปกติแบบสมมาตรวงจรที่มีการเรียงลำดับ จึงเป็นอิสระต่อกันดังรูป 2.14(b) และเป็นวงจรที่มีการเรียงลำดับแบบบวกเท่านั้นที่มีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้านั้น

$$V_{a0} = 0; V_{a2} = 0; I_{a0} = 0; I_{a2} = 0; \quad (2.83)$$

ถ้าไม่คิดค่าอิมพีแดนซ์สายดิน ( $Z_g = 0$ )

$$I_{a1} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{Z_1 + Z_f} \quad (2.84)$$

และถ้าค่าอิมพีแดนซ์ขณะเกิดสภาวะผิดปกติ  $Z_f = 0$

$$I_{a1} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{Z_1} \quad (2.85)$$

แทนสมการ 2.83 ถึง 2.84 ลงในสมการ 2.22

$$\begin{bmatrix} I_{af} \\ I_{bf} \\ I_{cf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_{a1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.86)$$

$$I_{af} = I_{a1} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{Z_1 + Z_f} \quad (2.87)$$

$$I_{bf} = a^2 I_{a1} = \frac{1.0 \angle 240^\circ}{Z_1 + Z_f} \quad (2.88)$$

$$I_{cf} = a I_{a1} = \frac{1.0 \angle 120^\circ}{Z_1 + Z_f} \quad (2.89)$$

เมื่อพิจารณารูปที่ 2.14(b) จะพบว่าในขณะที่เกิดสถานะผิดปกติประเภทนี้ อิมพีแดนซ์ที่มีการเรียงลำดับ ( $Z_0$ ,  $Z_1$  และ  $Z_2$ ) จะถูกตัดวงจร ดังนั้น

$$V_{a0} = 0 \quad (2.90)$$

$$V_{a1} = Z_f I_{a1} \quad (2.91)$$

$$V_{a2} = 0 \quad (2.92)$$

แทนสมการ 2.90 ถึงสมการ 2.92 ในสมการ 2.33

$$\begin{bmatrix} V_{af} \\ V_{bf} \\ V_{cf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ V_{a1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.93)$$

ดังนั้น

$$V_{af} = V_{a1} = Z_f I_{a1} \quad (2.94)$$

$$V_{bf} = a^2 V_{a1} = Z_f I_{a1} \angle 240^\circ \quad (2.95)$$

$$V_{cf} = a V_{a1} = Z_f I_{a1} \angle 120^\circ \quad (2.96)$$

หาค่าแรงดันไฟฟ้าที่สายขณะเกิดสถานะผิดปกติได้ดังนี้

$$V_{abf} = V_{af} - V_{bf} = V_{a1}(1 - a^2)$$

$$V_{abf} = \sqrt{3}Z_f I_{a1} \angle 30^\circ \quad (2.97)$$

$$V_{bcf} = V_{bf} - V_{cf} = V_{a1}(a^2 - a)$$

$$V_{bcf} = \sqrt{3}Z_f I_{a1} \angle -90^\circ \quad (2.98)$$

$$V_{caf} = V_{cf} - V_{af} = V_{a1}(a - 1)$$

$$V_{caf} = \sqrt{3}Z_f I_{a1} \angle -150^\circ \quad (2.99)$$

จากสมการ 2.87 ถึง 2.99 ทำให้ทราบว่า ถ้า  $Z_f = 0$

$$I_{af} = \frac{1.0 \angle 0^\circ}{Z_1} \quad (2.100)$$

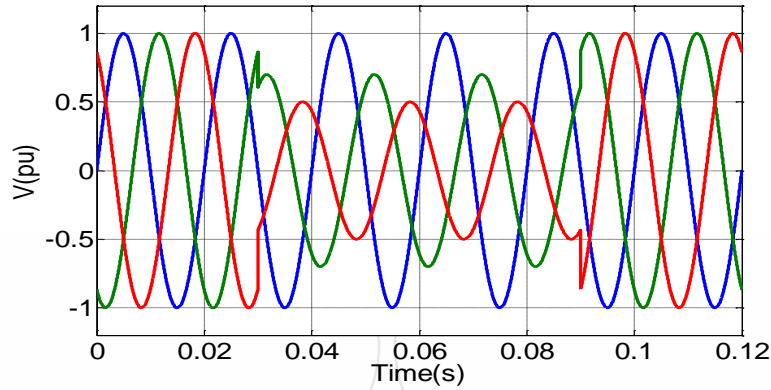
$$I_{bf} = \frac{1.0 \angle 240^\circ}{Z_1} \quad (2.101)$$

$$I_{cf} = \frac{1.0 \angle 120^\circ}{Z_1} \quad (2.102)$$

$$V_{af} = 0 \quad (2.103)$$

## 2.5 ความไม่สมมาตรของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Unbalance)

แรงดันไฟฟ้าไม่สมมาตร [2] คือความไม่สมมาตรกันในระบบไฟฟ้า 3 เฟสไม่ว่าจะเป็นส่วนของขนาด, มุมต่างเฟส (แต่ละเฟสห่างกัน  $120^\circ$ ) และองค์ประกอบของสัญญาณไฟฟ้า ทั้งลำดับบวก (Positive Sequence) ลำดับลบ (Negative Sequence) และลำดับศูนย์ (Zero Sequence) ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการเกิดความผิดปกติของระบบไฟฟ้าหรือการสตาร์ทโหลดขนาดใหญ่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.15 การเกิดแรงดันไฟฟ้าไม่สมมาตรในระบบไฟฟ้า 3 เฟส

ระดับค่าแรงดันไฟฟ้าประสิทธิผลไม่สมมาตรหาได้จากสมการดังนี้

$$V_{3\phi dev} = \text{ค่าสูงสุดของแรงดันเปลี่ยนแปลงจากค่าเฉลี่ยของแรงดันทั้ง 3 เฟส}$$

$$V_{3\phi avg} = \frac{\text{ผลรวมของค่าแรงดันแต่ละเฟส}}{3}$$

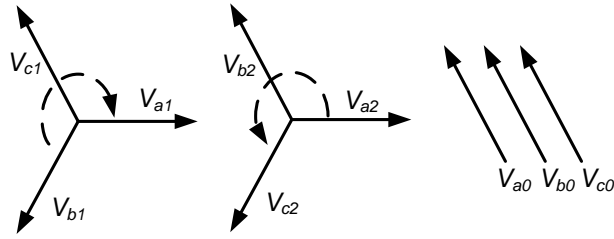
$$\text{แรงดันไฟฟ้าไม่สมมาตร} = \frac{V_{3\phi dev}}{V_{3\phi avg}} \times 100 \% \quad (2.104)$$

การเกิดสถานะไม่สมมาตรของแรงดัน 3 เฟส ( $V_a$ ,  $V_b$  และ  $V_c$ ) สามารถทำให้องค์ประกอบของแรงดันมีความแตกต่างกันด้วย ดังนี้

1. องค์ประกอบลำดับบวก (Positive – sequence Components) นั่นคือ  $V_{a1}$ ,  $V_{b1}$  และ  $V_{c1}$  ซึ่งประกอบไปด้วยแรงดันทั้ง 3 เฟส มีขนาดแรงดันเท่ากัน มีมุมต่างกัน  $120^\circ$  ในแต่ละเฟส และมีการลำดับเฟสเหมือนกันกับแรงดันเริ่มต้น (Original)

2. องค์ประกอบลำดับลบ (Negative – sequence Components) นั่นคือ  $V_{a2}$ ,  $V_{b2}$  และ  $V_{c2}$  ซึ่งประกอบไปด้วยแรงดันทั้ง 3 เฟส มีขนาดแรงดันเท่ากัน มีมุมต่างกัน  $120^\circ$  ในแต่ละเฟส และมีการลำดับเฟสตรงกันข้ามกับแรงดันเริ่มต้น

3. องค์ประกอบลำดับศูนย์ (Zero – sequence Components) นั่นคือ  $V_{a0}$ ,  $V_{b0}$  และ  $V_{c0}$  ซึ่งประกอบไปด้วยแรงดันทั้ง 3 เฟส มีขนาดแรงดันเท่ากัน และมีเฟสไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 2.16 องค์ประกอบของความไม่สมมาตรของแรงดัน 3 เฟส

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (2.105)$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \quad (2.106)$$

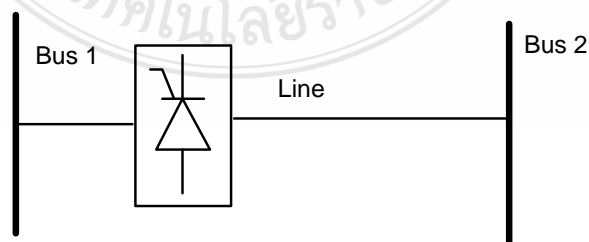
$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \quad (2.107)$$

จากสมการด้านบนสามารถเขียนในรูปของเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ 1.108

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.108)$$

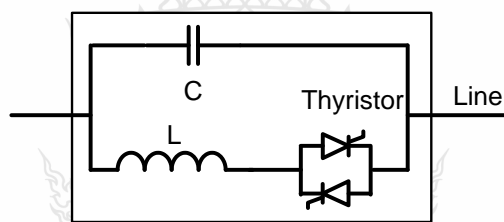
โดยที่  $V_a, V_b$  และ  $V_c$  = ค่าแรงดันระหว่างเฟสกับนิวตรอน  
 $V_a^0, V_b^+, V_c^-$  หรือ  $v_a^0, v_a^+, v_a^-$  = ค่าองค์ประกอบแรงดันลำดับศูนย์ ลำดับบวก และ ลำดับลบ ที่แสดงนี้เป็นแรงดันที่เฟส A  
 $\alpha = e^{j2\pi/3}$  = ตัวแปรของการเลื่อนเฟส (Phase-shift)

## 2.6 ตัวควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบอนุกรม



รูปที่ 2.17 ตัวควบคุมแบบอนุกรม

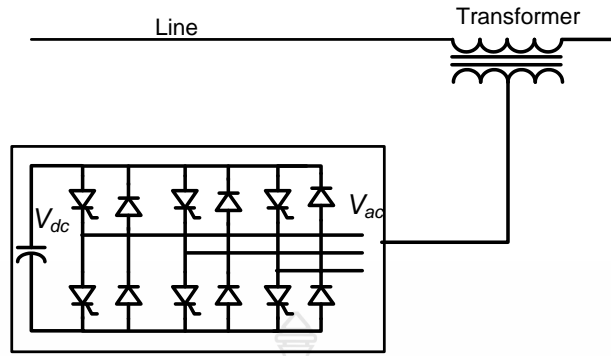
ตัวควบคุมแบบอนุกรมจะต่ออนุกรมกับสายส่งดังแสดงในรูปที่ 2.17 อุปกรณ์ชนิดนี้อาจเรียกได้ว่าเป็นอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนแปลงค่าได้ ซึ่งอาจเป็นได้ทั้ง คาปาซิเตอร์หรือรีแอคแตนซ์ บางครั้งอาจเรียกว่าแหล่งจ่ายอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่เปลี่ยนแปลงค่าได้ การทำงานหลักของอุปกรณ์ที่ต่อในลักษณะนี้จะเป็นการฉีดแรงดันที่อนุกรมกับสายส่ง การทำงานของอุปกรณ์ตัวควบคุมแบบอนุกรมจึงเหมือนกับเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่ารีแอคแตนซ์ของสายส่งได้จุดประสงค์หลักของอุปกรณ์นี้คือการควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าในสายส่ง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายส่งโดยการเปลี่ยนแปลงรีแอคแตนซ์ของสายส่งนั่นเอง ตัวอย่างหนึ่งของอุปกรณ์ในประเภท ตัวควบคุมแบบอนุกรมคือ ตัวชดเชยอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor Controlled Series Compensator; TCSC) วงจรพื้นฐาน TCSC ประกอบด้วยคาปาซิเตอร์อนุกรม และรีแอคเตอร์ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ต่อขนานกันดังแสดงในรูปที่ 2.18 ตัวชดเชยอนุกรมควบคุมด้วยไทรสเตอร์จะต่ออนุกรมกับสายส่ง เพื่อควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนแปลงค่ารีแอคแตนซ์อนุกรมนี้



รูปที่ 2.18 โครงสร้างของตัวควบคุมแบบอนุกรม

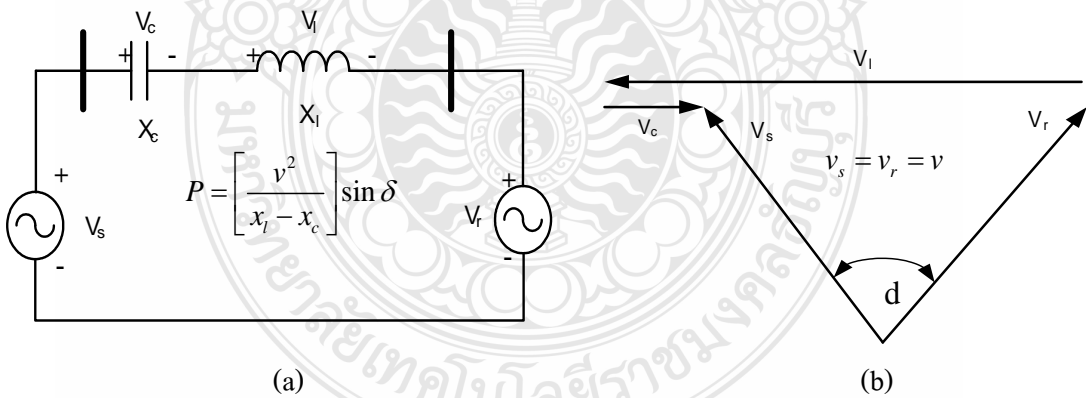
### 2.6.1 ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่

ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่สำคัญในจำพวกของตัวควบคุมแบบอนุกรม โดยส่วนใหญ่แล้วการทำงานของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ อาศัยหลักการของตัวแปลงผันแหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งจะต่ออนุกรมกับสายส่งผ่านหม้อแปลงอนุกรมซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.19 แรงดันที่ถูกผลิตขึ้นโดยตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ นี้จะถูกฉีดเข้าไปในสายส่งโดยผ่านหม้อแปลงอนุกรมเพื่อชดเชยแรงดันที่ตกคร่อมในสายส่ง และนอกจากนี้ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ยังสามารถใช้ควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งได้อีกด้วย



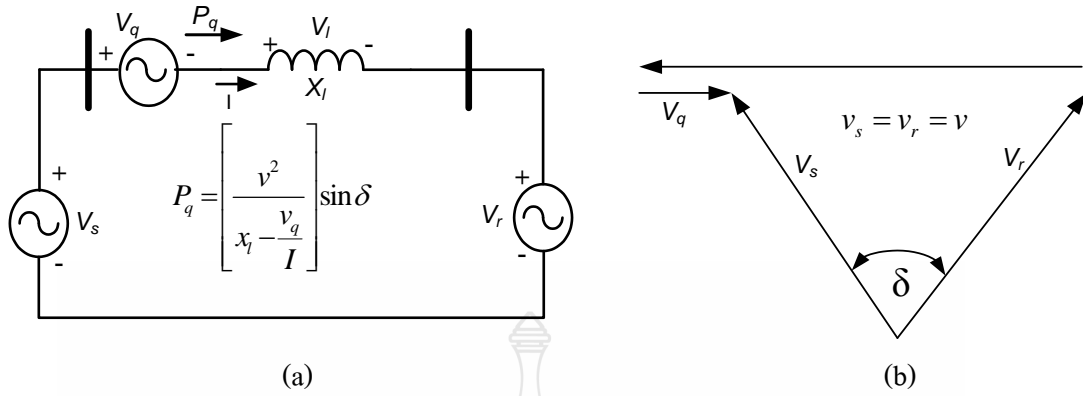
รูปที่ 2.19 โครงสร้างของตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่

ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ เป็นอุปกรณ์ชดเชยอีกชนิดหนึ่งที่อยู่ในกลุ่มของเทคโนโลยี วงจรแปลงผันแบบแหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ชดเชยแบบอนุกรมถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Gyugyi ในปี 1989 หลักการทำงานของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ สามารถอธิบายโดยโดยการ เริ่มต้นพิจารณาจากการชดเชยด้วยคาปาซิเตอร์แบบอนุกรมดังแสดงในรูปที่ 2.20 (a) สัมพันธ์กับเฟส เซอร์โอดีอะแกรมของแรงดันในรูปที่ 2.20 (b) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่กระแสของสายส่งที่กำหนด แรงดัน ที่ตกคร่อมตัวคาปาซิเตอร์อนุกรมจะส่งผลให้ แรงดันตกคร่อมรีแอกแตนซ์สายส่งมีค่าเพิ่มขึ้น นั่น หมายความว่า การชดเชยคาปาซิเตอร์แบบอนุกรมทำงาน โดยการเพิ่มแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของ สายส่ง ซึ่งการเพิ่มขึ้นของแรงดันนี้สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของกระแสในสายส่งและกำลังไฟฟ้าที่ สายส่ง



รูปที่ 2.20 ระบบที่ติดตั้งคาปาซิเตอร์แบบอนุกรมและเฟสเซอร์โอดีอะแกรมของแรงดัน

ลักษณะการชดเชยแบบนี้สามารถทำได้เช่นเดียวกัน โดยใช้ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ที่สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับซิงโครนัส (Synchronous AC Voltage) ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งแรงดันเอาต์พุตนี้มีลักษณะที่เหมือนกันกับแรงดันตกคร่อมคาปาซิเตอร์อนุกรมดังสมการ (2.109)



รูปที่ 2.21 ระบบที่ติดตั้ง ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่และเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดัน

$$V_q = V_c = -jX_c I = -jkXI \quad (2.109)$$

โดยที่  $V_c =$  แรงดันที่ชดเชยด้วยคาปาซิเตอร์  
 $I =$  กระแสไฟฟ้าในสายส่ง  
 $jX_c =$  รีแอกแตนซ์ของคาปาซิเตอร์อนุกรม  
 $k = \frac{X_c}{X} =$  Degree ของการชดเชยแบบอนุกรม

ดังนั้นการทำให้แรงดันเชิงโครน์สเตตัส (V<sub>q</sub>) เป็นฟังก์ชันของกระแสไฟฟ้าในสายส่ง จะทำให้ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ทำหน้าที่เหมือนกับคาปาซิเตอร์อนุกรมได้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม ในทางตรงกันข้ามกับคาปาซิเตอร์อนุกรม ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ สามารถรักษาแรงดันชดเชยให้คงที่ได้ในขณะที่กระแสในสายส่งเกิดการเปลี่ยนแปลง หรืออาจกล่าวได้ว่า ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ สามารถควบคุมขนาดของแรงดันชดเชยที่แทรกเข้าไปในสายส่งได้โดยไม่ขึ้นกับกระแสในสายส่ง โดยทั่วไปแล้วการชดเชยคาปาซิทีฟ แรงดันเอาต์พุตจะล่าหลังกระแสในสายส่งเป็นมุม 90 องศา สำหรับตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ แรงดันเอาต์พุตสามารถควบคุมให้นำหน้าหรือล่าหลังกระแสในสายส่งเป็นมุม 90 องศาได้ ซึ่งส่งผลให้สามารถลดหรือเพิ่มแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของสายส่งได้

ในทำนองเดียวกันกับ TCSC ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่สามารถป้องกันการเกิดความไม่เสถียรภาพของแรงดันได้ นอกจากนี้การติดตั้ง ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ยังสามารถเพิ่มขีดความสามารถควบคุมการส่งกำลังไฟฟ้าได้อีกด้วย การประยุกต์ใช้งานอีกอย่างหนึ่งของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ คือการนำไปติดตั้งกับระบบไฟฟ้าเพื่อส่งเสริมเสถียรภาพชั่วคราวของระบบ



และยิ่งไปกว่านั้นการติดตั้ง ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ยังสามารถลดการแกว่งของกำลังไฟฟ้าได้  
อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่และ TCSC มีการประยุกต์ใช้งานเหมือนกันแต่ใน  
การทำงานและรูปแบบการชดเชยของทั้งสองจะแตกต่างกัน ซึ่งความแตกต่างนี้สัมพันธ์กับ  
ความแตกต่างของวงจรกำลังของอุปกรณ์ทั้งสอง คุณสมบัติของวงจรแปลงผันแบบแหล่งจ่ายแรงดัน  
ของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ มีความสามารถและรูปแบบการทำงานบางอย่างที่ TCSC ไม่สามารถ  
ทำได้ ความแตกต่างของอุปกรณ์ทั้งสองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ สามารถกำเนิดแรงดันชดเชยที่ควบคุมภายในทั้งย่านคา  
ปาซิทีฟและอินดักทีฟโดยไม่ขึ้นกับขนาดกระแสในสายส่ง ในขณะที่การรักษาแรงดันชดเชยของ  
TCSC จะขึ้นอยู่กับกระแสในสายส่ง

2. ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงภายนอก  
สามารถชดเชยในส่วนที่เป็นความต้านทานของสายส่ง โดยการฉีดกำลังไฟฟ้าจริง และสามารถชดเชย  
ในส่วนที่เป็นรีแอกแตนซ์ของสายส่งด้วยการฉีดกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ ในขณะที่ TCSC ชดเชยในส่วน  
ที่เป็นรีแอกแตนซ์ของสายส่งเท่านั้น แต่ไม่สามารถแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริง (ยกเว้นการสูญเสียใน  
วงจร) กับสายส่งได้

3. ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ที่เชื่อมต่อแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (หรือแหล่งจ่าย  
สำรอง) จะเพิ่มประสิทธิภาพในการหน่วงการแกว่งของกำลังไฟฟ้า โดยการชดเชยทั้งกำลังไฟฟ้าจริง  
และกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟผสมกัน ในขณะที่ TCSC สามารถหน่วงการแกว่งของกำลังไฟฟ้าโดยการ  
ชดเชยเฉพาะกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเท่านั้น

4. อุปกรณ์ TCSC จะเชื่อมต่อโดยตรงกับสายส่งซึ่งต้องทำการติดตั้งบนลานสำหรับ  
แรงดันสูง นอกจากนี้ระบบการทำความเย็นและการควบคุมต้องมีขนาดที่ทนแรงดันสูงได้ ในขณะที่  
ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ จะเชื่อมต่อกับสายส่งผ่านทางหม้อแปลงอนุกรม และต้องการคาปาซิเตอร์  
สำหรับเก็บพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง การติดตั้ง ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ สามารถทำงานติดตั้ง  
ภายในอาคารและใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ (โดยทั่วไปประมาณ 20 kV) นอกจากนี้ ตัวชดเชยอนุกรมแบบ  
คงที่ ต้องการระบบทำความเย็นและระบบควบคุมที่ใช้ขนาดที่ทนแรงดันต่ำกว่า TCSC

จนถึงปัจจุบันการติดตั้งใช้งานของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ยังไม่ปรากฏให้เห็น  
อย่างไรก็ตามมีการวิจัยและการศึกษาเกี่ยวกับ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ หลายบทความด้วยกัน เช่น  
Han และคณะ [10] ได้นำเสนอการศึกษาลักษณะเชิงพลวัตของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ที่มีแบบ  
แผนของวงจรแปลงผัน 6 บริดจ์ซึ่งใช้ใช้การควบคุมแบบ PWM การศึกษานี้ทำการจำลองบน  
คอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม EMTP ระบบไฟฟ้าที่นำมาจำลองเป็นระบบเครื่องจักร 1 ตัว เชื่อมต่อ  
กับบัสอนันต์ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ถูกแทรกอนุกรมเข้าสายส่งโดยไม่ผ่านหม้อแปลง  
ซึ่งกำเนิดแรงดันเอาต์พุตที่มีเฟสต่างจากกระแสในสายส่งเป็นมุม 90 องศา ทำการทดสอบการทำงาน

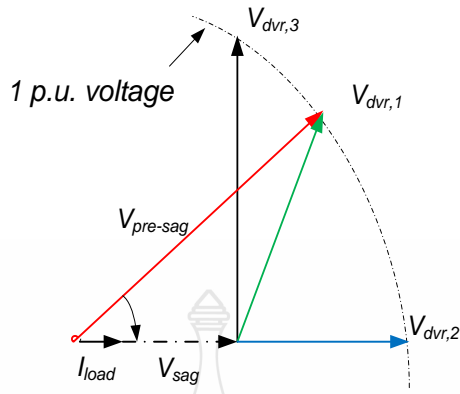
ในโหมดของคาปาซิทีฟและอินดักทีฟ ผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมเชิงพลวัตของการทำงานทั้งในโหมดคาปาซิทีฟและอินดักทีฟได้เป็นอย่างดี ต่อมา Zhang [11] ได้นำเสนอ

แบบจำลองตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ที่มีการควบคุมหลายฟังก์ชันสำหรับการควบคุมตัวแปรของการไหลกำลังไฟฟ้าที่ใช้การคำนวณแบบ Newton ซึ่งพิจารณา ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ สำหรับควบคุมตัวแปรการไหลของกำลังไฟฟ้าในสถานะคงตัว ได้แก่ กำลังไฟฟ้าจริงที่ไหลในสายส่ง กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่ไหลในสายส่ง แรงดันที่บัส และอิมพีแดนซ์ของสายส่ง โดยพิจารณาการควบคุมตัวแปรที่ละตัวซึ่งแบบจำลองนี้ได้คำนึงถึงเงื่อนไขบังคับกระแสและแรงดันของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ด้วยการตรวจสอบได้ทำการทดสอบสมรรถนะของขั้นตอนวิธีการไหลของกำลังไฟฟ้าแบบ Newton ที่ประกอบด้วยแบบจำลองของ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ กับระบบ IEEE 30 บัส และ 118 บัส และ 300 บัส ผลจากการทดสอบพบว่า การแก้ปัญหาการไหลของกำลังไฟฟ้าจริง ด้วยวิธี Newton ที่ประกอบด้วยแบบจำลอง ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ สามารถลู่เข้าโดยใช้การคำนวณหลายรอบและมีความคลาดเคลื่อนยินยอมเท่ากับ  $10^{-12}$  p.u. นอกจากนี้ Haque [12] ได้นำเสนอการเปรียบเทียบระหว่าง ตัวชดเชยแบบคงที่ และ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ในการปรับปรุงขีดจำกัดของเสถียรภาพ ภายใต้การพิจารณาการหน่วงการแกว่งของกำลังไฟฟ้า ซึ่งระบบทดสอบเป็นระบบแบบเครื่องจักร 1 ตัวเชื่อมกับบัสอนันต์ ที่ประกอบด้วยตัวชดเชยแบบคงที่ และตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ผลจากการทดสอบแสดงให้เห็นว่าตัวชดเชยแบบคงที่ มีประสิทธิภาพดีกว่าตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ในการปรับปรุงเสถียรภาพการแกว่งของกำลังไฟฟ้าในคาบต่อมา และนอกจากนี้ Jowder [13] ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่กับ Wind Farms แบบความเร็วคงที่ซึ่ง Wind Frames นี้ตั้งอยู่ห่างจากระบบไฟฟ้าและส่งกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่งที่มีความยาวมาก ส่งผลให้ความสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้ลดลง ในขณะที่ต้องการกำลังไฟฟารีแอกทีฟมากขึ้น การประยุกต์ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่กับ Wind Farms จะเชื่อมต่ออนุกรมเข้ากับกลางสายส่งเพื่อใช้รักษาแรงดันที่ขั้วที่ทำการเชื่อมต่อ ตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ ทางด้าน Wind Farms การทดสอบทำการจำลองบนคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม Hypersim ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าตัวชดเชยอนุกรมแบบคงที่ที่สามารถรักษาระดับแรงดันที่ขั้วได้ นอกจากนี้ยังสามารถชดเชยอินดักทีฟได้อีก

## 2.7 การจำลองตัวชดเชยแรงดันแบบอนุกรม

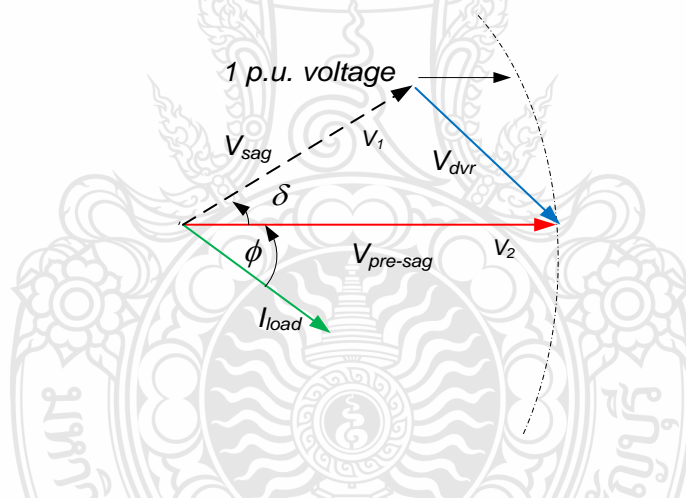
### 2.7.1 รูปแบบการชดเชยแรงดันตกชั่วขณะ

การชดเชยแรงดันตกชั่วขณะในอดีตที่ผ่านมาได้มีการศึกษาวิจัยการแก้ปัญหาแรงดันตกชั่วขณะอย่างมากมาย การสร้างแรงดันชดเชยเพื่อแก้ปัญหาคุณภาพของแรงดันที่โหลดได้รับนี้เป็นวิธีที่ได้ผลดีที่สุดวิธีหนึ่งทั้งในแง่ของขนาด ราคาและประสิทธิภาพ โดยสมรรถนะของการชดเชยแรงดันจะขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าจริงและแรงดันที่ต้องชดเชยเข้าไปในระบบ วิธีการโดยทั่วไปมีดังนี้



รูปที่ 2.22 เฟสเซอร์การชดเชยแรงดันของ DVR

1. วิธีชดเชยแรงดันตกชั่วขณะแบบ Pre-sag Compensation ค่าขนาดแรงดันและมุมเฟสของระบบจะถูกตรวจสอบอย่างต่อเนื่อง กรณีเกิดแรงดันตกชั่วขณะแรงดันโหลดจะถูกชดเชย( $V_{dvr}$ )ไปที่ค่าก่อนหน้า( $V_{pre-sag}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.23 ข้อดีของการชดเชยแบบนี้คือ ค่าแรงดันที่โหลดและมุมเฟสจะใกล้เคียงกับค่าสภาวะปกติ ส่วนข้อด้อยคือ ต้องการค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูงสำหรับการชดเชย



รูปที่ 2.23 เฟสเซอร์การชดเชยแรงดันแบบ Pre-sag

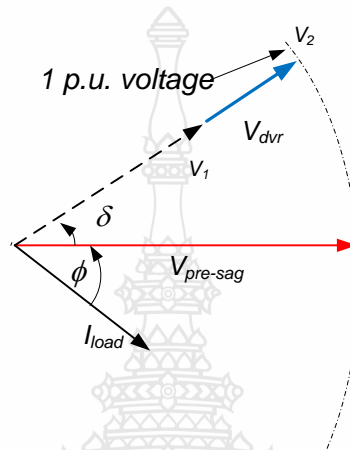
ค่าแรงดันชดเชย และ กำลังไฟฟ้าจริงสามารถหาได้ตาม สมการที่ 2.110 และ 2.111

$$V_{dvr}^j = \sqrt{V_2^2 + V_{1j}^2 \cos(\delta_j)} \quad (2.110)$$

$$P_{dvr} = 3V_2 I \cos(\varphi) \sum_{\forall j}^n I \cos(\varphi + \delta_j) \quad (2.111)$$

$$j = \text{ลำดับเฟส} \quad j=1,2,3$$

2. วิธีชดเชยแรงดันตกชั่วขณะแบบ In-phase Compensation กรณีเกิดแรงดันตกชั่วขณะ แรงดันโหลดจะถูกชดเชยเฉพาะค่าขนาดของแรงดันเท่านั้น โดยแรงดันที่ชดเชย( $V_{dvr}$ )จะมีเฟสตรงกัน กับค่าแรงดันเฟส( $V_1$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.24 ข้อดีของการชดเชยแบบนี้คือ ค่าแรงดันที่ใช้ชดเชยต่ำ ส่วนข้อด้อยคือ จะเกิดมุมกระโดด (Phase jump) ที่โหลด



รูปที่ 2.24 เฟสเซอร์การชดเชยแรงดันแบบ In-phase

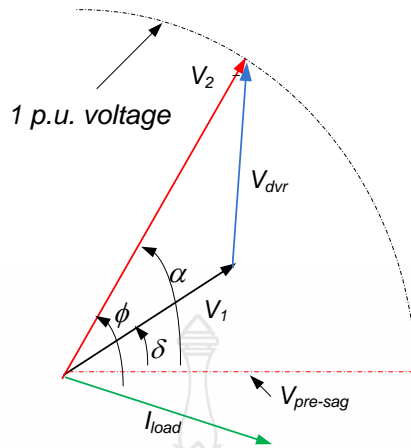
ค่าแรงดันชดเชย และ กำลังไฟฟ้าจริงสามารถหาได้ตามสมการ ที่ 2.112 และ 2.113

$$V_{dvr}^j = V_2 - V_1 \quad (2.112)$$

$$P_{dvr} = 3V_2 I \cos(\varphi) \sum_{j=1}^n V_{ij} I \cos(\varphi) \quad (2.113)$$

$j =$  ลำดับเฟส  $j=1,2,3$

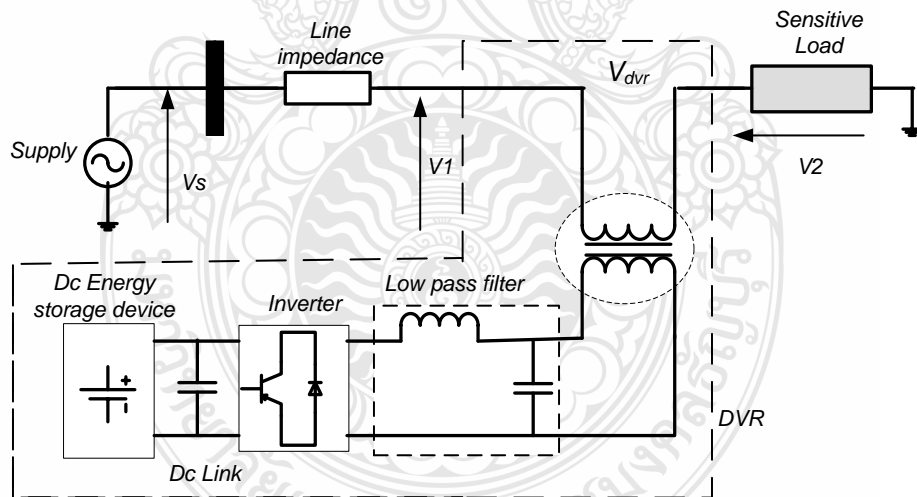
3. วิธีชดเชยแรงดันตกชั่วขณะแบบ Fully Optimal Compensation วิธีนี้เป็นการใช้แหล่งพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพเต็มที่ ข้อมูลกระแสโหลดถูกนำมาใช้เพื่อจำกัดพลังงานต่ำสุดที่ต้องใช้ในการฉีดเข้าระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.25 ข้อดีของการชดเชยแบบนี้คือความซับซ้อนของระบบควบคุมและค่าแรงดันที่ใช้ชดเชยสูง



รูปที่ 2.25 เฟสเซอร์การชดเชยแรงดันแบบ Fully Optimal

จากรูปที่ 2.25 ในกรณีที่โหลดไม่ไวต่อมุมเฟสที่เปลี่ยนแปลงทำให้เราสามารถวางเฟสเซอร์แรงดัน โหลดหลังการชดเชย ( $v_2$ ) ไว้ที่จุดใดๆบนเส้นโค้ง (1 p.u.) ได้

ลักษณะการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนระหว่างตัวชดเชยแรงดันแบบอนุกรม (DVR) และระบบจำหน่ายไฟฟ้า สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 2.25 และสมการด้านล่าง



รูปที่ 2.26 รูปแบบการทำงานของตัวชดเชยแรงดันแบบอนุกรม (DVR)

$V_s$  = แรงดันแหล่งจ่าย ( Supply Voltage )

$V_1$  = แรงดันด้านเข้า ( Incoming Supply Voltage )

$V_2$  = แรงดันโหลด ( Load Voltage )

$I$  = กระแสโหลด ( Load Current )

$\varphi$  = มุมเฟสโหลด ( Load Power Factor )

$\delta$  = มุมเฟสของแหล่งจ่ายแรงดัน ( Supply Voltage Phase Angle )

$\alpha$  = มุมแรงดันโหลดกับแรงดันก่อนการเกิดแรงดันตกชั่วขณะ  
(Load Voltage Advance Angle)

เราสามารถปรับค่าพลังงานชดเชยเหมาะสมได้โดยการปรับค่ามุม  $\alpha$  โดยค่ากำลังไฟฟ้าจริงได้มาจากอุปกรณ์เก็บพลังงานในรูปแบบแบตเตอรี่ คาปาซิเตอร์แบงค์ และระบบจำหน่าย เป็นต้น ส่วนค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนถูกสร้างโดยอินเวอร์เตอร์ แสดงได้ดังนี้

ให้  $P_{in}$  = กำลังไฟฟ้าจริงจากแหล่งจ่าย

$P_{out}$  = กำลังไฟฟ้าจริงที่โหลด

$P_{dvr}$  = กำลังไฟฟ้าจริงที่จ่ายจาก DVR

$$P_{in} = \sum_{\forall j} V_{1j} I_j \cos(\varphi - \alpha + \delta_j) \quad (2.114)$$

$$P_{out} = \sum_{\forall j} V_{2j} I_j \cos(\varphi) \quad (2.115)$$

$j$  = ลำดับเฟส  $j=1,2,3$

สมมติฐานให้ ตัวชดเชยแรงดันแบบอนุกรมสามารถชดเชยแรงดันได้ถูกต้อง สมมติให้โหลดสมดุล ( $|j|=1$ ) และ ค่าแรงดันเอาต์พุตสมดุล  $V_{2j}=V_2$

$$P_{out} = 3V_2 I \cos(\varphi) \quad (2.116)$$

$$P_{dvr} = P_{out} - P_{in} \quad (2.117)$$

$$P_{dvr} = 3V_2 I \cos(\varphi) - \sum_{\forall j} V_{1j} I \cos(\varphi - \alpha + \delta_j) \quad (2.118)$$

โดยสมมุติฐานเดียวกัน

ให้  $Q_{in}$  = กำลังไฟฟ้าเสมือนจากแหล่งจ่าย  
 $Q_{out}$  = กำลังไฟฟ้าเสมือนที่โหลด  
 $Q_{dvr}$  = กำลังไฟฟ้าเสมือนที่จ่ายจาก DVR

$$Q_{in} = \sum_{\forall j} V_{1j} I_j \sin(\varphi - \alpha + \delta_j) \quad (2.119)$$

$$Q_{out} = \sum_{\forall j} V_{2j} I_j \sin(\varphi) \quad (2.120)$$

$$j = \text{ลำดับเฟส} \quad j=1,2,3$$

$$Q_{out} = 3V_2 I \sin(\varphi) \quad (2.121)$$

$$Q_{dvr} = Q_{out} - Q_{in} \quad (2.122)$$

$$Q_{dvr} = 3V_2 I \sin(\varphi) - \sum_{\forall j} V_{1j} I \sin(\varphi - \alpha + \delta_j) \quad (2.123)$$

จากสมการ 2.118 และ 2.223 แสดงให้เห็นว่าการแลกเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าจริง(Real Power) และ กำลังไฟฟ้าเสมือน(Reactive Power)ระหว่างตัวชดเชยแรงดันแบบอนุกรมและระบบจำหน่ายไฟฟ้า (Distribution System)สามารถควบคุมได้โดยปรับ มุมเฟส  $\alpha$  ที่สัมพันธ์กับค่า  $\varphi, \delta, V_1, V_2$

จากหลักการข้างต้น ทำให้สามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงต่ำสุดที่ตัวชดเชยแรงดันแบบอนุกรมฉีดเข้าระบบจำหน่ายได้โดยการกำหนดค่ามุม  $\alpha$  ที่เหมาะสม จากสมการด้านล่าง

$$\text{ถ้า} \quad \sqrt{\left[ \sum_{\forall j} V_{1j} \cos(\delta_j) \right]^2 + \left[ \sum_{\forall j} V_{1j} \sin(\delta_j) \right]^2} \geq 3V_2 \cos(\varphi) \quad (2.124)$$

$$\alpha_{opt} = \varphi + \beta - \arccos \left[ \frac{3V_2 \cos(\varphi)}{\sqrt{\left[ \sum_{\forall j} V_{1j} \cos(\delta_j) \right]^2 + \left[ \sum_{\forall j} V_{1j} \sin(\delta_j) \right]^2}} \right] \quad (2.125)$$

$$\beta = \arctan \left[ \frac{\sum V_{1j} \sin(\delta_j)}{\sum V_{1j} \cos(\delta_j)} \right] \quad (2.126)$$

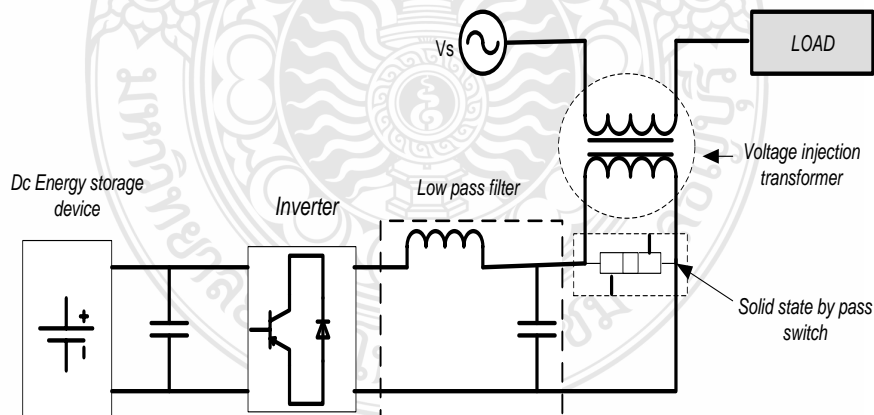
หรือ  $\alpha_{opt} = \varphi + \beta \quad (2.127)$

$$V_{dvr}^j = \sqrt{V_2^2 + V_{1j}^2 - 2V_2V_{1j}\cos(\alpha_{opt} - \delta_j)} \quad (2.128)$$

$$P_{dvr}^{opt} = 3V_2I\cos(\varphi) - \sum_{\forall j} V_{1j}I\cos(\varphi - \alpha_{opt} + \delta_j) \quad (2.129)$$

### 2.7.2 ตัวชดเชยแรงดันแบบอนุกรมตักชั่วขณะ(Dynamic Voltage Restorer)

การสร้างแรงดันชดเชยเพิ่มเข้าไปในระบบไฟฟ้าใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ตัวชดเชยแรงดันแบบอนุกรม ซึ่งโดยทั่วไปประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก คือ ส่วนแหล่งพลังงาน หม้อแปลงไฟฟ้า ส่วนแปลงพลังงาน ตัวกรองต่ำผ่าน และ หม้อแปลงไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.27 ขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะการทำงานของตัวชดเชยแรงดันแบบอนุกรมเป็นการสร้างแรงดันบวกเพิ่มเข้าไปในระบบเพื่อชดเชยผลต่างแรงดันระหว่างแรงดันตกชั่วขณะและแรงดันปกติ เมื่อระหว่างสภาวะปกติการทำงานของตัวชดเชยแรงดันแบบอนุกรม จะทำหน้าที่เสมือนตัวนำให้กระแสไหลผ่านได้ปกติ นั่นคือจะทำงานหรือทำการชดเชยแรงดันเพียงขณะการเกิดแรงดันตกชั่วขณะเท่านั้น



รูปที่ 2.27 ตัวชดเชยแรงดันแบบอนุกรมตักชั่วขณะและตำแหน่งการติดตั้ง



- แหล่งพลังงาน( Energy Source)

เป็นส่วนที่มีความสำคัญต่อความสามารถในการชดเชยแรงดันตกชั่วขณะในแง่ของโหลดที่สามารถรับได้ และเวลาในการชดเชย โดยได้จากระบบเก็บพลังงานหรือจากระบบแรงดันกริดที่ต่อร่วมก็ได้

- หม้อแปลงชนิดแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ

การฉีดแรงดันชดเชยเข้าระบบจำหน่ายไฟฟ้าจำเป็นต้องฉีดแรงดันผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าที่ถูกต้องอนุกรมกับสายส่งในระบบจำหน่าย ข้อดีของการฉีดแรงดันชดเชยผ่านระบบหม้อแปลงคือสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้สูงและมีการแยกกันระหว่างแรงดันระบบจำหน่ายกับแรงดันชดเชย ส่วนข้อด้อยของหม้อแปลงไฟฟ้าคือทำให้เกิดการเลื่อนเฟส (Phase-shift) และแรงดันตกคร่อม (Voltage - drop) เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง ในการออกแบบหม้อแปลงชนิดแรงดันจำเป็นต้องออกแบบที่พิกัดสูงสุดเพื่อความปลอดภัยต่อระบบและตัว DVR เอง องค์ประกอบที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบหม้อแปลงชนิดแรงดันมีดังนี้

- พิกัดของหม้อแปลง

พิกัดของหม้อแปลงสามารถหาได้จากสมการที่ 2.130

$$P = K_s V_{pr} I_{pr} \quad (2.130)$$

เมื่อ

$K_s$  = Safety margin

$V_{pr}$  = พิกัดของแรงดันด้านปฐมภูมิ

$I_{pr}$  = พิกัดของกระแสด้านปฐมภูมิ

เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการอิ่มตัวของหม้อแปลงและกระแสอินรัช (Inrush current) ทำให้ต้องใช้หม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดพิกัดเป็น 2 เท่าของพิกัดตัวชดเชยแรงดันแบบอนุกรมตกชั่วขณะ ดังนั้นค่า  $K_s = 2$

- พิกัดของแรงดันและกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

เนื่องจากหม้อแปลงชนิดแรงดันถูกต้องอนุกรมกับระบบจำหน่ายดังนั้นค่าพิกัดของกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงจึงเท่ากับค่าพิกัดของกระแสโหลด ส่วนค่าพิกัดของแรงดันด้านปฐมภูมิสามารถหาได้จากสมการที่ 2.123 ด้านล่าง

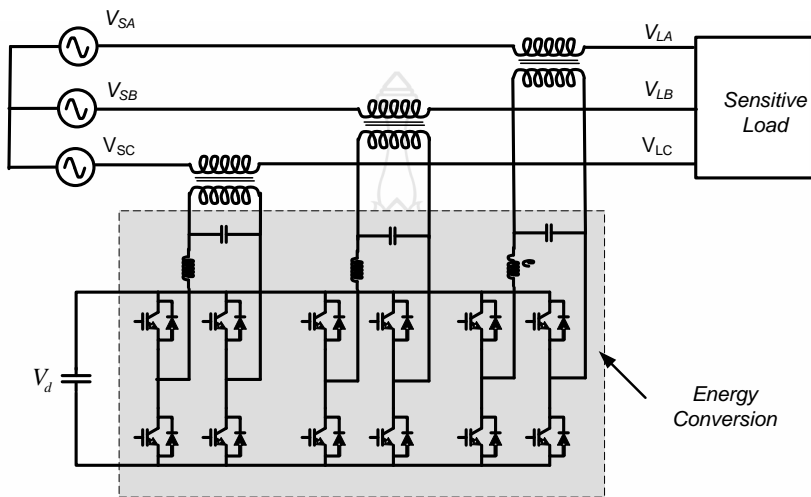
$$V_{inj} = DV_r \quad (2.131)$$

$$V_s = (1 - D)V_r \quad (2.132)$$



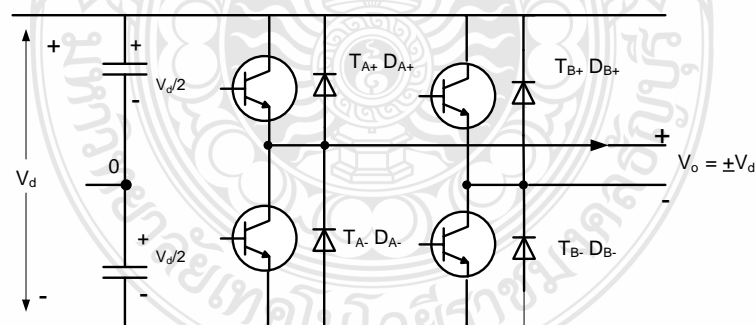
- ส่วนการแปลงพลังงาน

เป็นส่วนใช้สร้างแรงดันชดเชยซึ่งส่วนประกอบหลักคือ อินเวอร์เตอร์และตัวกรองผ่านต่ำ โดยแรงดันชดเชยจะส่งผ่านจากอินเวอร์เตอร์ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ



รูปที่ 2.29 ส่วนการแปลงพลังงานซึ่งใช้ในระบบไฟฟ้าระดับแรงดันสูงและกลาง

ตัวชดเชยแรงดันแบบอนุกรมซึ่งติดตั้งในระบบไฟฟ้าระดับแรงดันปานกลางนิยมใช้อินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ 1 เฟส จำนวน 3 ตัวดังรูปที่ 2.29 ต่ออนุกรมกับระบบไฟฟ้าและมีการขับนำสวิตช์แบบมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) ที่ใช้การสวิตช์แรงดันแบบขั้วเดียว (Unipolar Voltage Switching)



รูปที่ 2.30 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์ 1 เฟส

การขับนำสวิตช์แบบมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) ที่ใช้การสวิตช์แรงดันแบบขั้วเดียว (Unipolar Voltage Switching) ของวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ได้ถูกออกแบบให้ทำงานไม่พร้อมกัน โดยสัญญาณการควบคุมขา A ต้องแยกกับขา B ด้วยรูปแบบดังนี้ คือสัญญาณการควบคุมขา

A ได้รับจากการเปรียบเทียบกับแรงดัน  $V_{tri}$  กับ  $V_{control}$  และสัญญาณการควบคุมขา B ได้รับจากการเปรียบเทียบกับแรงดัน  $V_{tri}$  กับ  $-V_{control}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.31 สัญญาณลอจิกสำหรับการควบคุมสวิตซ์ขา A ได้จากผลของการเปรียบเทียบกับแรงดัน  $V_{tri}$  กับ  $V_{control}$  ตามสมการข้างล่างนี้

$$V_{control} > V_{tri} : T_{A+} \text{ นำกระแสได้ } V_{AN} = V_d \quad (2.133)$$

$$\text{และ } V_{control} > V_{tri} : T_{A+} \text{ นำกระแสได้ } V_{AN} = 0 \quad (2.134)$$

แรงดันเอาต์พุตที่ขา A เมื่อเทียบกับบัส N จะได้ตามรูปที่ 2.31 สำหรับสัญญาณลอจิกที่ใช้ควบคุมสวิตซ์ขา B และได้จากการเปรียบเทียบกับแรงดัน  $V_{tri}$  กับ  $-V_{control}$  เป็นไปตามสมการข้างล่างนี้

$$-V_{control} > V_{tri} : T_{B+} \text{ นำกระแสได้ } V_{BN} = -V_d \quad (2.135)$$

$$\text{และ } -V_{control} > V_{tri} : T_{B+} \text{ นำกระแสได้ } V_{BN} = 0 \quad (2.136)$$

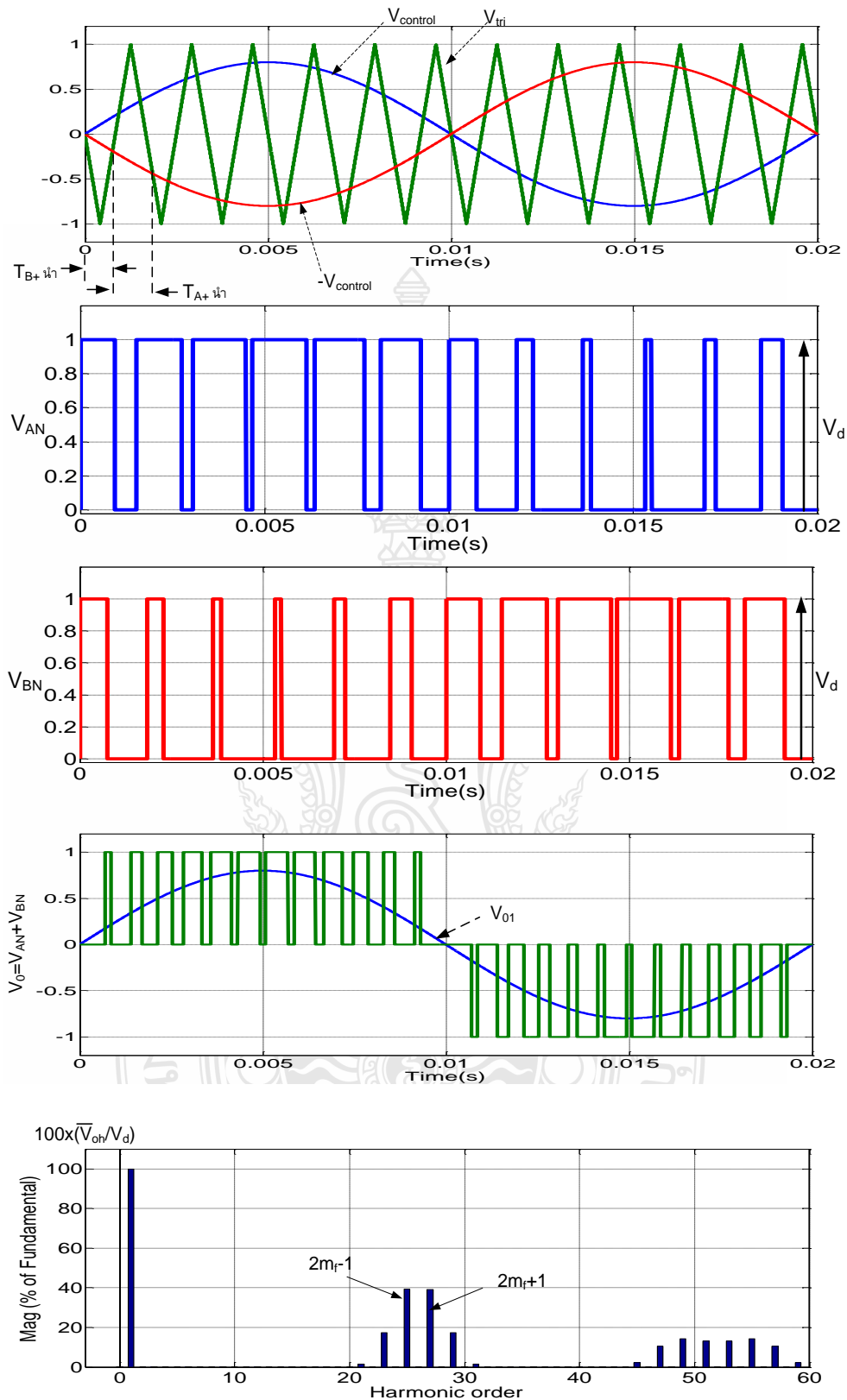
เนื่องจากไดโอดได้ต่อขนานแบบสลับขั้ว (Anti-Parallel) ดังนั้นแรงดันที่ได้ระบุในสมการที่ 2.127 และ 2.128 ไม่ขึ้นกับทิศทางของกระแสเอาต์พุต  $I_o$

$$1. T_{A+}, T_{B+} \text{ นำกระแส} : V_{AN} = V_d, V_{BN} = 0 ; \text{ได้ } V_o = V_d$$

$$2. T_{A-}, T_{B-} \text{ นำกระแส} : V_{AN} = 0, V_{BN} = V_d ; \text{ได้ } V_o = -V_d$$

$$3. T_{A+}, T_{B-} \text{ นำกระแส} : V_{AN} = V_d, V_{BN} = V_d ; \text{ได้ } V_o = 0$$

$$4. T_{A-}, T_{B+} \text{ นำกระแส} : V_{AN} = 0, V_{BN} = 0 ; \text{ได้ } V_o = 0$$



รูปที่ 2.31 แบบ PWM ด้วยการสวิตช์แรงดันแบบสภาพขั้วเดียว

ถ้าสวิตช์คู่บนนำกระแสทั้งคู่ แรงดันเอาต์พุตเท่ากับศูนย์ โดยกระแสเอาต์พุตที่ไหลในวง(loop)ที่ผ่าน  $T_{A+}$  กับ  $D_{B+}$  หรือ  $D_{A+}$  กับ  $T_{B+}$  จะขึ้นกับทิศทางกระแส  $I_o$  ในขณะที่กระแส  $I_d$  เท่ากับศูนย์ ในทำนองเดียวกัน ถ้าสวิตช์คู่ล่างคือ  $T_{A-}$  กับ  $T_{B-}$  นำกระแสทั้งคู่จะได้ผลลัพธ์เหมือนกับคู่บนทุกประการ ในขณะที่สวิตช์ การเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันจะเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 0 กับ  $V_d$  หรือ 0 กับ  $-V_d$  ข้อดีของการสวิตช์แบบนี้ คือความถี่ต่ำสุดของฮาร์มอนิกเกิดขึ้นที่ความถี่สองเท่าของความถี่การสวิตช์ทำให้แนวสเปกตรัม (Spectrum) ฮาร์มอนิกของรูปคลื่นเอาต์พุตในแถบข้าง (Sideband) ได้เกิดเป็นสองค่าความถี่ ในขณะที่แอมพลิจูดมีค่าเดียวกัน (ในอุดมคติ) โดยเฉพาะกับฮาร์มอนิกค่าต่ำ ในกรณีที่เลือกอัตราส่วนความถี่มอดูเลต(mf) ของอินเวอร์เตอร์เฟสเดียวเป็นเลขคี่ เนื่องจากรูปคลื่นแรงดัน  $V_{AN}$  และ  $V_{BN}$  ได้ถูกดึงให้ต่างเฟสซึ่งกันและกันเป็นมุม 180 องศา ดังนั้น เฟสของฮาร์มอนิกที่ประกอบขึ้นในขณะที่ความถี่การสวิตช์ของแรงดัน  $V_{AB}$  และ  $V_{BN}$  เป็นเฟสเดียวกัน ( $\phi_{AN} - \phi_{BN} = 180^\circ \times mf = 0$ ) เนื่องจากรูปคลื่นต่างเฟสซึ่งกันและกัน 180° และ mf ได้ถูกกำหนดเป็นเลขคู่ ผลก็คือ ทำให้ฮาร์มอนิกที่ได้จากการสวิตช์ ด้วยของแรงดันเอาต์พุตเกิดการหักล้างกันเองเพราะ  $V_o = V_{AN} - V_{BN}$  รวมทั้งฮาร์มอนิกแถบข้างที่เกิดจากความถี่ของการสวิตช์ความถี่ของการสวิตช์จะไม่ปรากฏขึ้น คล้ายกับการหักล้างกันของฮาร์มอนิกโคไซน์ที่เกิดขึ้นจากความถี่การสวิตช์สองครั้ง และขณะที่ไม่ปรากฏแถบข้าง ดังนั้น ได้

$$V_{o1} = maV_d \quad (ma < 1)$$

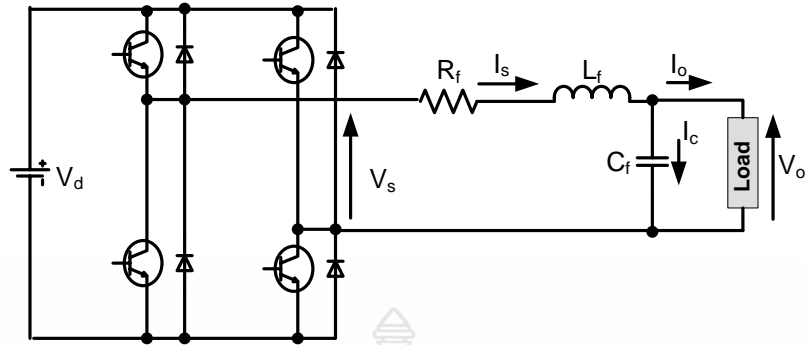
$$V_d < V_{o1} < 4V_d / \pi \quad (mf > 1.0)$$

● การออกแบบวงจรกรองผ่านต่ำการสวิตช์ด้านออก

เนื่องจากแรงดันที่ได้จากการสร้างโดยอินเวอร์เตอร์จะมีแรงดันฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่การสวิตช์ปะปนอยู่มากดังนั้นทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์จำเป็นต้องมีวงจรกรอง โดยตำแหน่งของวงจรกรองในอุปกรณ์ตัวชดเชยแรงดันแบบอนุกรม (DVR) มี 2 ลักษณะคือ

- แบบต่อวงจรกรองด้านสายจำหน่าย (Line Side Filter)
- แบบต่อวงจรกรองด้านอินเวอร์เตอร์ (Inverter Side Filter)

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้การต่อฟิลเตอร์ด้านอินเวอร์เตอร์เนื่องจากมีข้อดีคือตัวฟิลเตอร์ติดตั้งอยู่ใกล้กับแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์มอนิกส์ ทำให้แรงดันฮาร์มอนิกส์ไม่ถูกส่งเข้าไปที่หม้อแปลงลดแรงดันไฟฟ้า แต่ข้อเสียคือเกิดค่าแรงดันตกคร่อมที่ฟิลเตอร์รวมถึงการเลื้อนเฟสของแรงดันชดเชยด้วย เพื่อให้ง่ายในการออกแบบและสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังแสดงในรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 วงจรสมมูลของวงจรกรอง

$V_d$  = แรงดันบัสกระแสตรง

$V_s$  = แรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์

$V_o$  = แรงดันที่โหลด

$I_s$  = กระแสด้านออกของอินเวอร์เตอร์

$I_c$  = กระแสคาปาซิเตอร์

$I_o$  = กระแสโหลด

โดยกำหนดให้

- แรงดันบัสกระแสตรงไม่มีการกระเพื่อม(Ripple Free)
- อุปกรณ์สวิตช์ซึ่งเป็นอุดมคติ
- ไม่พิจารณาค่าความต้านทานแฝงของคาปาซิเตอร์
- โหลดเป็นลิเนียร์
- $R_f \ll jX_{L_f}$

จากรูป 2.32 สามารถเขียนสมการแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ได้คือ

$$V_s = V_o + R_f I_s + L_f \frac{dI_s}{dt} \quad (2.137)$$

จากข้อกำหนดข้างต้นขั้นตอนการออกแบบอุปกรณ์ฟิลเตอร์แบ่งเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

- คำนวณหาค่าอัตราส่วนการมอดูเลตแอมพลิจูด ( $k$  : Modulation Amplitude) ได้จากสมการที่ 2.138

$$k = \sqrt{2} \frac{V_o}{V_d} \quad (2.138)$$

เนื่องจากค่าแรงดันตกคร่อมไม่สามารถหาได้ก่อนการกำหนดค่าพารามิเตอร์อื่นๆของได้ จึงไม่พิจารณาค่าแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ จะมีค่าเท่ากับแรงดันที่โหลด ( $V_s \cong V_o$ ) ต่อมาเป็นขั้นตอนการคำนวณหาค่า  $K$  ได้จากสมการ 2.139

$$K = \sqrt{\frac{k^2 - \frac{15}{4}k^4 + \frac{64}{5\pi}k^5 - \frac{5}{4}k^6}{1440}} \quad (2.139)$$

- คำนวณหาค่า  $L_f$  ได้จากสมการ 2.140

$$L_f = \frac{V_o}{I_o f_s} \sqrt{K \frac{V_d}{V_{o,av}} \left[ 1 + 4\pi^2 \left( \frac{f_r}{f_s} \right)^2 K \frac{V_d}{V_{o,av}} \right]} \quad (2.140)$$

$f_s$  = ความถี่สวิตซ์ซิ่ง

$f_r$  = ความถี่หลักมูล

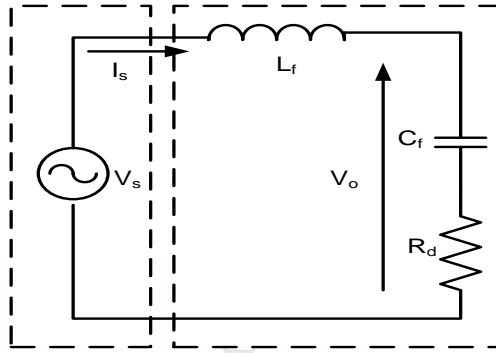
$V_{o,av}$  = แรงดันฮาร์มอนิกรวมที่โหลด

- คำนวณหาค่า  $C_f$  ได้จากสมการ 2.141

$$C_f = K \frac{V_d}{L_f f_s^2 V_{o,av} V_d} \quad (2.141)$$

นำค่า  $L_f$  และ  $C_f$  มาหาค่า  $R_d$  (Damping Resistance) สามารถเขียนวงจรสมมูล ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.32





รูปที่ 2.33 วงจรสมมูลของวงจรกรอง

- กำหนดค่าตัวประกอบหน่วง(Damping Factor) เท่ากับ 1 จากรูปที่ 2.33

สามารถเขียนอัตราส่วนระหว่างแรงดันด้านออกกับแรงดันที่อินเวอร์เตอร์ ได้ดัง

สมการที่ 2.142

$$\frac{V_o}{V_{inv}} = \frac{C_f R_d s + 1}{C_f L_f s^2 + C_f R_d s + 1} \quad (2.142)$$

จากสมการที่ 2.142 สามารถหาค่าตัวประกอบหน่วง ได้ดังสมการ 2.143

$$\xi_f = \frac{R_d}{2} \sqrt{\frac{C_f}{L_f}} \quad (2.143)$$

และจะได้ว่า

$$R_d = 2 \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \quad (2.144)$$

## 2.8 ทฤษฎีกำลังไฟฟ้าทันใด(Instantaneous Power Theory)

ทฤษฎีกำลังไฟฟ้าทันใดที่ถูกนำเสนอครั้งแรกในปี คศ 1983 .โดย Akagi et al. เป็นการศึกษา กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกตีฟของระบบสามเฟสสามสายที่ในเชิงเวลา ที่สามารถนำมา ประยุกต์ใช้กับได้กับระบบทั้งในสภาวะคงตัว และสภาวะชั่วขณะ การคำนวณหาค่า กำลังไฟฟ้าทันใด ถูกดำเนินการ โดยการแปลงแรงดัน ( $v_{abc}$ ) ที่จุดเชื่อมต่อและกระแสที่ไหลในสาย( $i_{abc}$ ) ให้อยู่บน แกน  $\alpha\beta$  โดยใช้การเปลี่ยนรูปแบบ Clark Transformation [14] ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2.145)$$

เมื่อ  $x$  คือ แรงดันหรือกระแสไฟฟ้า เนื่องจากไม่ปรากฏองค์ประกอบลำดับศูนย์  $i_0$  ในระบบสามเฟสสามสายจึงสามารถแยกพิจารณาเฉพาะแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า จากองค์ประกอบ  $\alpha$  และ  $\beta$  เท่านั้น จะได้

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2.146)$$

$$e = v_\alpha + jv_\beta \quad (2.147)$$

$$i = i_\alpha + ji_\beta \quad (2.148)$$

จากสมการที่(2.147) และ(2.148) สามารถคำนวณหากำลังไฟฟ้าได้ดังนี้

$$s = e.i^* = (v_\alpha + jv_\beta)(i_\alpha - ji_\beta) \quad (2.149)$$

$$s = (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) + j(v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) \quad (2.150)$$

$$p = (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) \quad (2.151)$$

$$q = j(v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) \quad (2.152)$$

นำสมการที่ 2.151 และ 2.152 มาเขียนเมทริกซ์เป็น

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.153)$$

กำลังไฟฟ้าจริงประกอบด้วย ค่ากำลังไฟฟ้าจริงเฉลี่ยและกำลังไฟฟ้าจริงที่มีการออสซิลเลตอยู่ระหว่างแรงจ่ายและโหลด ส่วนกำลังไฟฟ้าเสมือนก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน ดังสมการด้านล่าง

$$p = \bar{p} + p\% \quad (2.154)$$

$$q = \bar{q} + q\% \quad (2.155)$$

$\bar{p}$  = กำลังไฟฟ้าจริงชั่วขณะเฉลี่ย

$p\%$  = กำลังไฟฟ้าจริงชั่วขณะออสซิลเลต

$\bar{q}$  = กำลังไฟฟ้าเสมือนชั่วขณะเฉลี่ย

$q\%$  = กำลังไฟฟ้าเสมือนออสซิลเลตชั่วขณะ

## 2.9 การควบคุมการทำงานของตัวชดเชยแรงดันแบบอนุกรม

การควบคุมการทำงานของ DVR จะประกอบด้วย ชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ โดยกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ จะถูกนำมาคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิงบนแกน  $0\alpha\beta$  ได้ดังสมการที่ 2.156 จากนั้นจึงนำค่า  $V_{c\alpha}$  และ  $V_{c\beta}$  มาหาค่าขนาดตามสมการที่ 2.157 นำค่า  $V_{c\alpha}$  และ  $V_{c\beta}$  มาหาค่าขนาดตามสมการที่ 2.157 พร้อมกับรับค่ามุมเฟสของแรงดันที่บัสจากวงจร PLL มาหาค่า  $V_{c\alpha new}$  และ  $V_{c\beta new}$  ตามสมการที่ 2.158 และ 2.159 ตามลำดับ แรงดันอ้างอิงบนแกน  $\alpha\beta$  จะถูกแปลงกลับไปเป็นแรงดันอ้างอิง 3 เฟสบนแกนปกติ สำหรับชดเชย ดังแสดงในรูปที่ 2.34 และสมการที่ 2.160

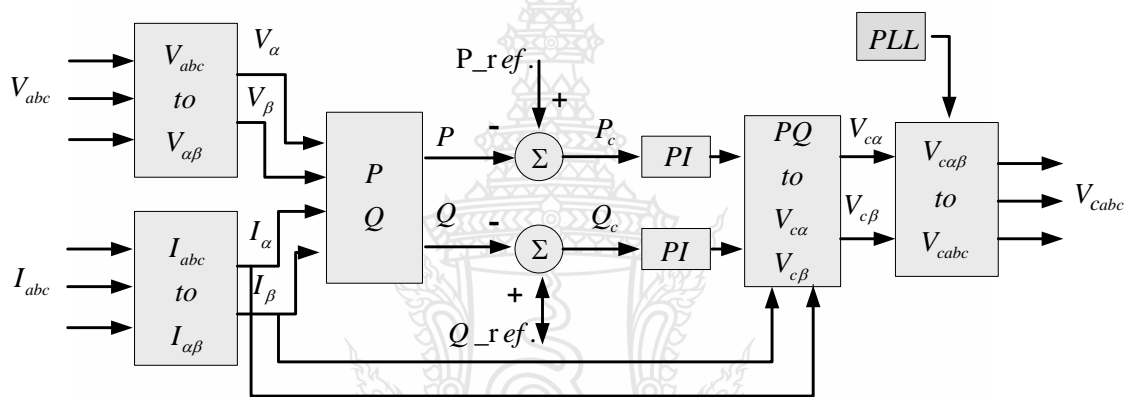
$$\begin{bmatrix} V_{c\alpha} \\ V_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \begin{bmatrix} i_\alpha & -i_\beta \\ i_\beta & i_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (2.156)$$

$$|V_{c\alpha\beta}| = \sqrt{V_{c\alpha}^2 + V_{c\beta}^2} \quad (2.157)$$

$$V_{\alpha new} = |V_{\alpha\beta}| \cos(\phi) \quad (2.158)$$

$$V_{\beta new} = -|V_{\alpha\beta}| \sin(\phi) \quad (2.159)$$

$$\begin{bmatrix} v_{Ca}^* \\ v_{Cb}^* \\ v_{Cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\alpha new} \\ v_{\beta new} \end{bmatrix} \quad (2.160)$$



รูปที่ 2.34 แผนภาพการควบคุม DVR

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิทยานิพนธ์

บทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบ วงกรอง (Filter) ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ การเลือกพิกัดของหม้อแปลงฉีดแรงดันและการกำหนดเกณฑ์ในการพิจารณาแรงดันตกชั่วขณะ โดยกำหนดให้ โหลดขนาด 50 kVA แรงดัน 22kV/380 V 3 เฟส ความถี่ 50 Hz กระแสโหลดสูงสุด 1.312 A /75 A ความถี่การสวิตช์ 10 kHz และแรงดันบัสไฟตรง 311 V สามารถชดเชยแรงดันตกชั่วขณะขนาด 0.6 p.u. ได้นานที่สุดเป็นเวลา 0.15 วินาที

#### 3.1 การคำนวณหาขนาดของหม้อแปลงฉีดแรงดัน

เนื่องจากด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงฉีดแรงดันต่ออนุกรมอยู่ระหว่างแหล่งจ่ายแรงดันและโหลด ดังนั้นกระแสด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงฉีดแรงดันเท่ากับกระแสโหลด สามารถหาค่าได้ตามสมการ ที่ 3.1

$$I_{pr} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times V_l} \quad (3.1)$$

แทนค่าลงในสมการที่ 3.1

$$I_{pr} = \frac{50 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 22 \times 10^3} = 1.312 \text{ A}$$

กำหนดค่าแรงดันชดเชยแรงดันตกชั่วขณะ = 0.4 p.u. ดังนั้นแรงดันเฟสด้านปฐมภูมิสามารถหาค่าได้ตามสมการ ที่ 3.2

$$V_{Lpri} = D \times V_L \quad (3.2)$$

แทนค่าลงในสมการที่ 3.2

$$V_{Lpri} = 0.4 \times 22 \times 10^3 = 8.8 \text{ kV}$$

และแรงดันระหว่างสายกับดินด้านปฐมภูมิสามารถหาค่าได้ตามสมการ ที่ 3.3

$$V_{L_{pri}} = \frac{V_{L_{pri}}}{\sqrt{3}} \quad (3.3)$$

แทนค่าลงในสมการที่ 3.3

$$V_{L_{pri}} = 5.08 \text{ kV}$$

พิกัด ของหม้อแปลงชนิดแรงดัน(kVA )สามารถหาค่าได้ตามสมการ ที่ 3.4

$$S_{DVR} = \sqrt{3} \times V_{L_{pri}} \times I_{pr} \quad (3.4)$$

แทนค่าลงในสมการที่ 3.4

$$S_{DVR} = \sqrt{3} \times 8.8 \times 10^3 \times 1.321 = 20 \text{ kVA}$$

ในการจำลองระบบเลือกใช้หม้อแปลงแบบ 1 เฟส 5.08 kV/220 V ขนาด 6.66 kVA จำนวน 3 ลูกต่อแบบ Y จะได้ค่าแรงดันทุติยภูมิ = 380 V กระแสด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงชนิด แรงดันสามารถหาค่าได้ตามสมการ ที่ 3.5

$$I_{sec} = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times V_{sec}} \quad (3.5)$$

แทนค่าลงในสมการที่ 3.5

$$I_{sec} = \frac{20 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380} = 30.38 \text{ A}$$

นำค่าจากตารางที่ 3.2 มาแปลงค่าเป็นระบบเปอร์ยูนิต

จาก  $R_{base} = \frac{V_n^2}{P_n} \quad (3.6)$

และ  $L_{base} = \frac{R_{base}}{2\pi f_n} \quad (3.7)$

จะได้

แทนค่าลงในสมการที่ 3.6

$$R_{base} = \frac{220^2}{6.66 \text{ kVA}} = 7.33 \ \Omega$$

แทนค่าลงในสมการที่ 3.7

$$L_{base} = \frac{7.33}{2 \times \pi \times 50} = 23.35 \text{ mH}$$

$$R_{sec} = 0.056 \ \Omega, L_{sec} = 0.067 \text{ mH}, R_{pri} = 0.28 \ \Omega, L_{pri} = 1.11 \text{ mH}$$

จาก 
$$R_{pu} = \frac{R(\Omega)}{R_{base}} \quad (3.8)$$

และ 
$$L_{pu} = \frac{L(H)}{L_{base}(H)} \quad (3.9)$$

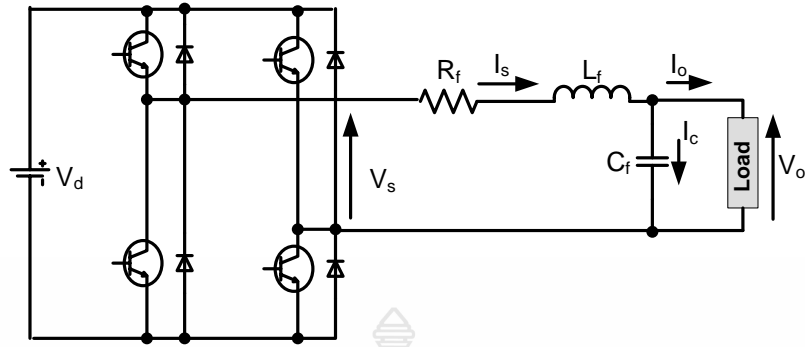
แทนค่าลงในสมการที่ 3.8 และ 3.9

$$R_{(pu)} \text{ ด้านทุติยภูมิ} = \frac{0.056}{7.33} = 0.00771 \text{ p.u.}, R_{(pu)} \text{ ด้านปฐมภูมิ} = \frac{0.28}{7.33} = 7.22 \times 10^{-5} \text{ p.u.}$$

$$L_{(pu)} \text{ ด้านทุติยภูมิ} = \frac{0.067}{23.35} = 0.00289 \text{ p.u.}, L_{(pu)} \text{ ด้านปฐมภูมิ} = \frac{1.11}{23.35} = 8.99 \times 10^{-5} \text{ p.u.}$$

### 3.2 การออกแบบวงจรกรอง

ในสถานะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะและชุดอินเวอร์เตอร์ทำการฉีดแรงดันแทรกเข้าสู่ระบบผ่านหม้อแปลงฉีดแรงดันแต่เนื่องจากแรงดันที่อินเวอร์เตอร์สร้างขึ้นจะมีริบเปลือยอยู่เป็นจำนวนมากทำให้แรงดันที่ได้ไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ดังนั้นก็จำเป็นต้องต่อวงจรกรองที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์เพื่อกรองความถี่ที่ไม่ต้องการไม่ให้เข้าไปในระบบไฟฟ้ามากเกินไปโดยในการออกแบบจะละเลยผลกระทบของโหลดและแรงดันในระบบไฟฟ้าเพื่อให้ง่ายในการออกแบบและสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งการออกแบบมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของวงจรกรองที่ใช้ในการออกแบบ

จากรูปที่ 3.1 สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$V_s = V_o + R_f I_s + L_f \frac{dI_s}{dt} \quad (3.10)$$

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ใช้ในการออกแบบวงจรกรอง

$V_d$ (V)	$V_o$ (v)	$F_r$ (Hz)	$F_s$ (Hz)	$I_o$ (A)	$V_{o,av}$ (%)
311	220	50	10k	31	1

นำค่าในตารางที่ 3.1 แทนที่ลงในสมการด้านล่าง

$$k = \sqrt{2} \frac{V_o}{V_d} \quad (3.11)$$

$$K = \sqrt{\frac{k^2 - \frac{15}{4}k^4 + \frac{64}{5\pi}k^5 - \frac{5}{4}k^6}{1440}} \quad (3.12)$$

$$L_f = \frac{V_o}{I_o f_s} \sqrt{K \frac{V_d}{V_{o,av}} \left[ 1 + 4\pi^2 \left( \frac{f_r}{f_s} \right)^2 K \frac{V_d}{V_{o,av}} \right]} \quad (3.13)$$

$$C_f = K \frac{V_d}{L_f f_s^2 V_{o,av} V_d} \quad (3.14)$$



$$\begin{aligned} \text{จะได้ค่า} \quad L_f &= 0.715 \text{ mH} \\ C_f &= 14.19 \text{ }\mu\text{F} \end{aligned}$$

กำหนดค่าตัวประกอบหน่วง(Damping Factor) เท่ากับ 1 สามารถเขียนอัตราส่วนระหว่างแรงดันด้านออกกับแรงดันที่อินเวอร์เตอร์สร้างได้ดังสมการที่ 3.15

$$\frac{V_o}{V_{inv}} = \frac{C_f R_d s + 1}{C_f L_f s^2 + C_f R_d s + 1} \quad (3.15)$$

จากสมการที่ 2.133 สามารถหาค่าตัวประกอบหน่วง ได้ดังสมการ 4.6

$$\xi_f = \frac{R_d}{2} \sqrt{\frac{C_f}{L_f}} \quad (3.16)$$

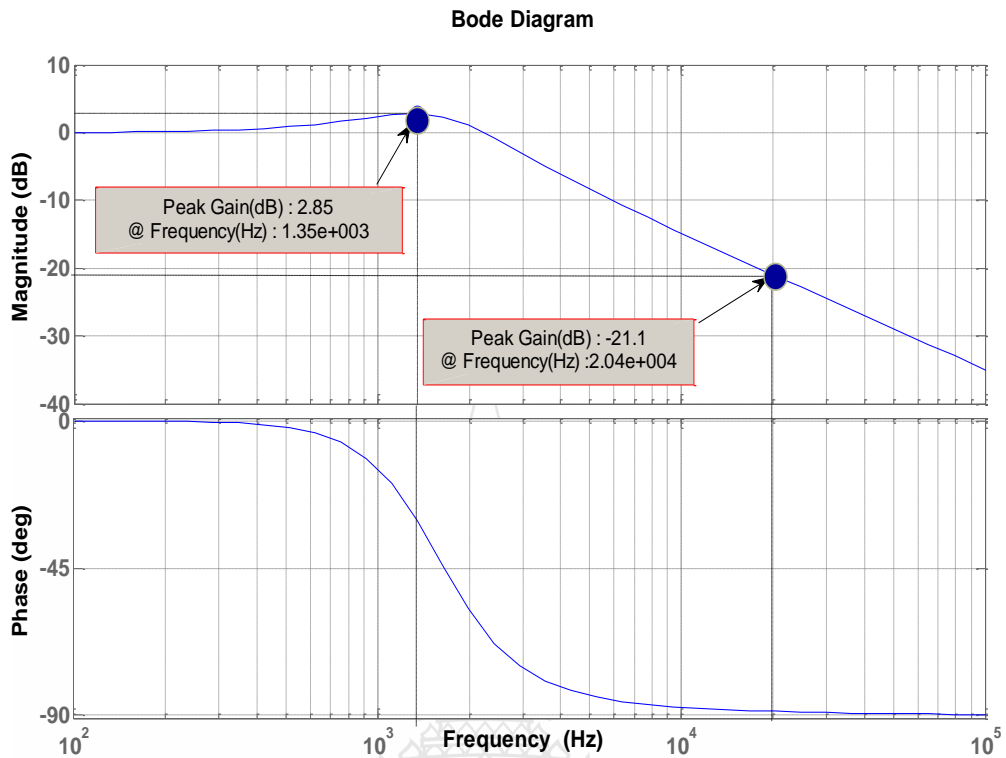
จะได้ค่าความต้านทานหน่วง ตามสมการที่ 3.17

$$R_d = 2 \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \quad (3.17)$$

และจากสมการที่ 3.17 แทนค่าตัวเหนี่ยวนำ  $L_f$  และตัวเก็บประจุ  $C_f$  จะได้ค่าตัวต้านทานหน่วงของวงจรองเท่ากับ

$$R_d = 14.20 \text{ }\Omega$$

เนื่องจากต้องการอัตราขยายที่ความถี่เรโซแนนซ์ไม่เกิน 3 dB ดังนั้นจึงเลือกใช้  $R_d = 8 \text{ }\Omega$  จากรูปที่ 3.2 แสดงผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรองที่ได้ออกแบบที่ความถี่ฮาร์มอนิก 20 kHz มีอัตราการลดทอน 11.12 เท่าและที่ความถี่เรโซแนนซ์มีอัตราขยาย 2.85 dB ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรอง

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับ Simulations

ข้อมูลระบบสำหรับการจำลอง	
ความถี่ระบบ	50 Hz
ความถี่การสุ่ม	1 MHz
ข้อมูลระบบจำหน่าย	
แรงดันแหล่งจ่าย ( $V_L$ )	22 kV(rms)
แรงดันแหล่งจ่าย ( $V_\phi$ )	12.7 kV(rms)
ข้อมูลอุปกรณ์ชดเชยแรงดัน	
ขนาด kVA ( $3\phi$ )	20 kVA(3x6.66 kVA)
สมรรถนะฉีดแรงดัน	< 0.4 p.u.
ค่าแรงดันฉีดสูงสุด / $\phi$	5.08 kV(rms)
ข้อมูลเซ็นซิติฟโหด	
ขนาด kVA ( $3\phi$ )	50 kVA
ค่าตัวประกอบกำลัง	0.95 (ล้าหลัง)
แรงดันที่ $\phi$	380 V(rms)

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์สำหรับ Simulations (ต่อ)

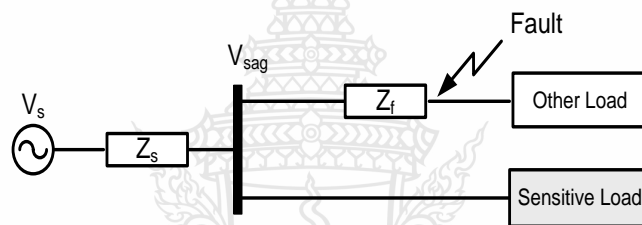
ข้อมูลอินเวอร์เตอร์	
ขนาด kVA ( $3\phi$ )	3x6.6 kVA
ความถี่สวิทซ์	10 kHz
ข้อมูลฟิลเตอร์	
ค่าอินดักแตนซ์	0.715 mH
ค่าคาปาซิแตนซ์	14.2 $\mu$ F
ค่ารีซิสแตนซ์	8 $\Omega$
ความถี่เรโซแนนซ์	1,350 Hz
ข้อมูลบัลลัสเตตรง	
ค่าแรงดันบัลลัสเตตรง	311 V(dc)
ข้อมูลชุด พีโอ คอนโทรล	
ชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าจริง	Kp=0.6 ,Ki=0.1
ชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน	Kp=0.3 ,Ki=0.1



## บทที่ 4

### ผลการจำลองการทำงาน

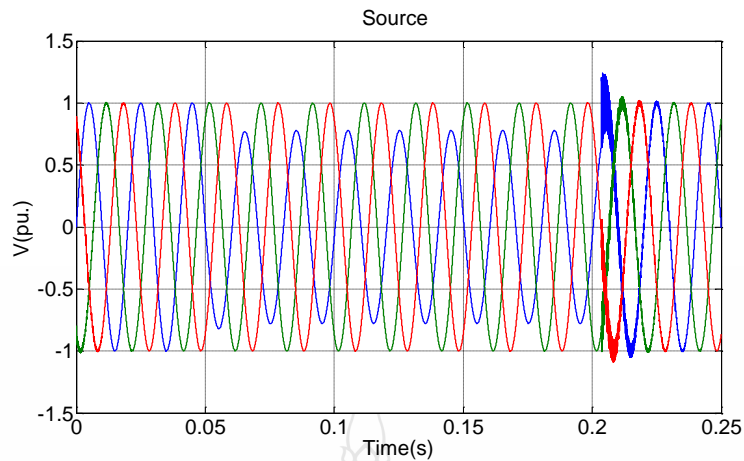
บทนี้ได้นำเสนอผลการจำลองการทำงานของตัวชดเชยแรงดันตกชั่วขณะ โดยทำการจำลองความสามารถในการชดเชยแรงดันให้กับเซ็นซิทีฟโหลด ขนาด 50 kVA 380 V 0.95 pf (ถ้าหลัง) ในขณะที่เกิดฟอลต์แบบหนึ่งเฟสต่อลงดิน(single Line to Ground Fault ), ฟอลต์แบบระหว่างเฟสกับเฟสต่อลงดิน(Double Line to Ground Fault ) และ ฟอลต์แบบ 3 เฟสลงดิน(Three Line to Ground Fault ) ขนาด 0.6 pu ช่วงเวลา 150 ms โดยใช้โปรแกรม SIMULINK/MATLAB ซึ่งได้ดำเนินการจำลองการทำงานดังนี้



รูปที่ 4.1 วงจรสมมูลตำแหน่งฟอลต์

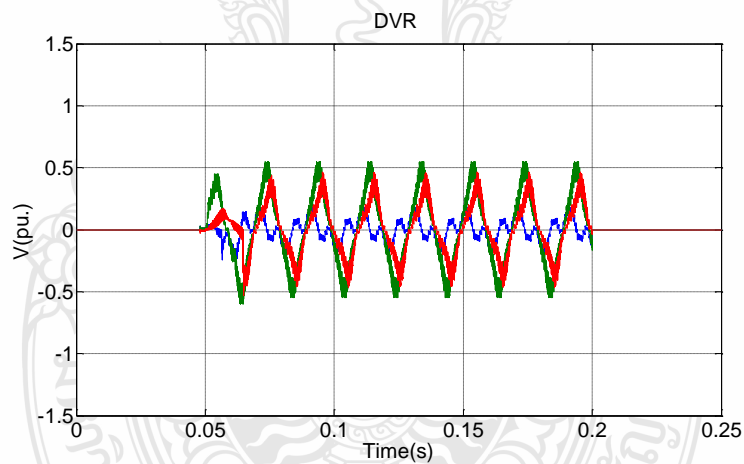
#### 4.1 การจำลองความสามารถในการชดเชยแรงดันของตัวชดเชยแรงดันขณะฟอลต์แบบหนึ่งเฟสต่อลงดิน (Single Line to Ground Fault )

ผลการจำลองพลวัตของ DVR ต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันได้สภาวะแรงดันตกชั่วขณะขนาด 0.6 pu ในช่วงเวลา 0.05 - 0.2 วินาที พบว่าตัวชดเชยแรงดันสามารถชดเชยแรงดันให้กับโหลดได้ดี โดยค่าแรงดันและกระแสโหลด ยังคงต่อเนื่องโดยค่ากำลังไฟฟ้าจริงและส่วนค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนแกว่งอยู่ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าจริงเฉลี่ยและส่วนค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนเฉลี่ย



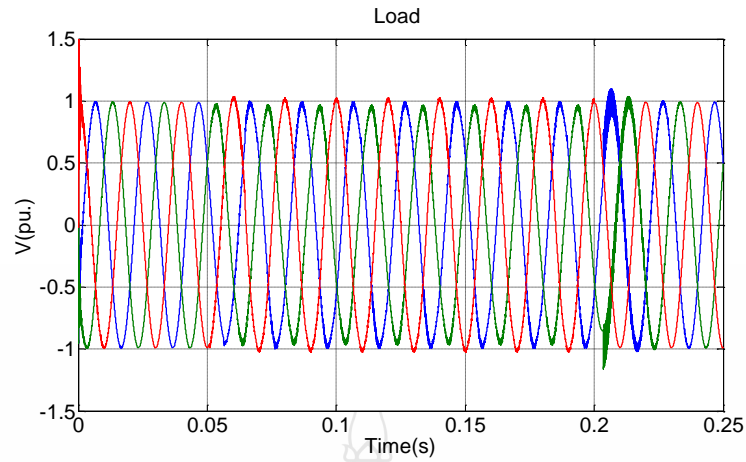
รูปที่ 4.2 ค่าแรงดันที่แหล่งจ่าย (SLG)

จากรูปที่ 4.2 แสดงค่าแรงดันแหล่งจ่ายด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงโวลต์ในขณะเกิดความผิดปกติพร้อมแบบ 1 เฟสลงดินที่เฟส A จะเห็นได้ว่ามีแรงดันเฟสที่มีการเปลี่ยนแปลงคือ เฟส A ส่วนเฟส B และ C ไม่มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.3 ค่าแรงดันที่ DVR (SLG)

จากรูปที่ 4.3 แสดงค่าแรงดันที่ตัวชดเชยแรงดันชนิดแรงดันเข้าที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงชนิดแรงดันในขณะเกิดความผิดปกติพร้อมแบบ 1 เฟสลงดิน โดยที่จะเห็นได้ว่าทั้งสามเฟสมีการฉีดแรงดันชดเชย ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการเลื่อนของมุมเฟสร่วมด้วย

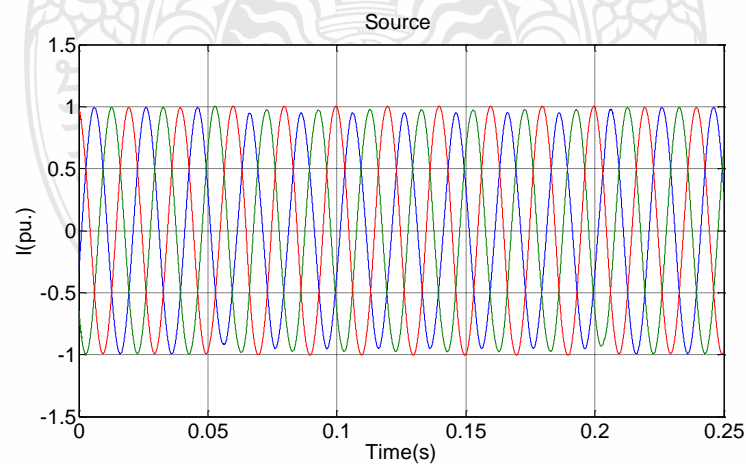


รูปที่ 4.4 ค่าแรงดันที่โหลด (SLG)

จากรูปที่ 4.4 แสดงค่าแรงดันแหล่งจ่ายด้านทุติยภูมิหม้อแปลงโหลดในขณะเกิดความผิดปกติเฟสลงดิน โดยค่าแรงดันที่โหลดแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

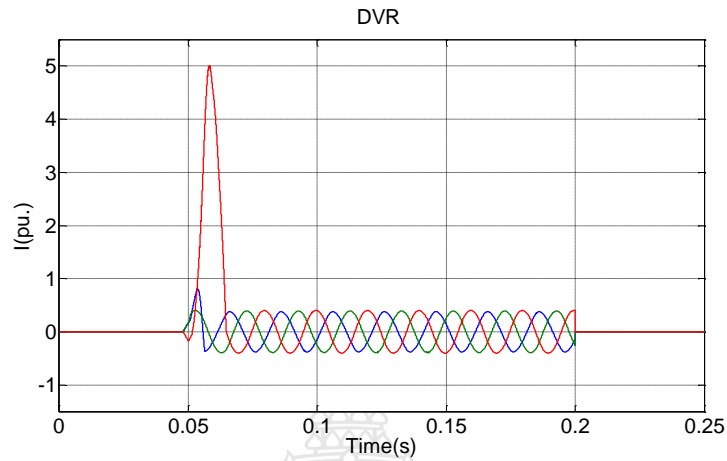
ตารางที่ 4.1 ค่าฮาร์มอนิกและขนาดของแรงดันที่โหลด

ลำดับเฟส	Vrms(p.u.)	%THD
เฟส A	0.97	3.29
เฟส B	0.95	3.22
เฟส C	1.02	2.21



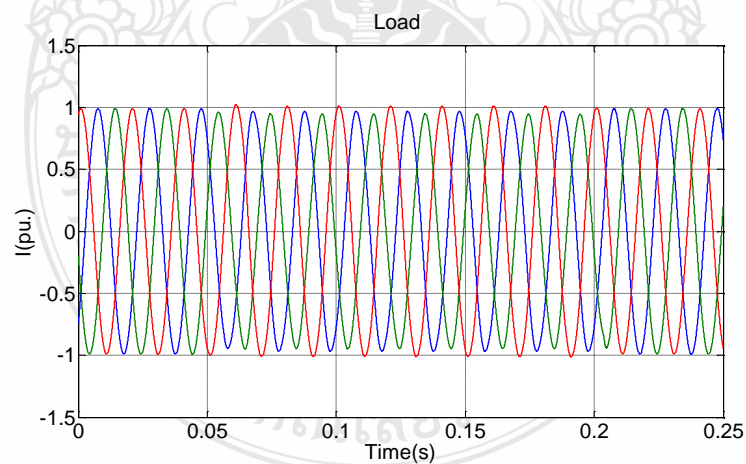
รูปที่ 4.5 ค่ากระแสที่แหล่งจ่าย (SLG)

จากรูปที่ 4.5 แสดงค่ากระแสแหล่งจ่ายด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงโหลดในขณะเกิดความผิดปกติพร้อมแบบ 1 เฟสลงดิน จะเห็นได้ว่ากระแสทั้งสามเฟสมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเนื่องจากตัวชดเชยแรงดันชนิดแรงดันชดเชยเข้าสู่ระบบไฟฟ้า



รูปที่ 4.6 ค่ากระแสที่ DVR (SLG)

จากรูปที่ 4.6 แสดงค่ากระแสที่ตัวชดเชยแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงชนิดแรงดันในขณะเกิดความผิดปกติพร้อมแบบ 1 เฟสลงดิน โดยที่ จะเห็นได้ว่าที่เฟส A เกิดกระแสสูงถึง 5 เท่าในช่วง 0.5 ไซเคิลแรกหลังจากนั้นกระแสทั้งสามเฟสเข้าสู่สถานะอยู่ตัว

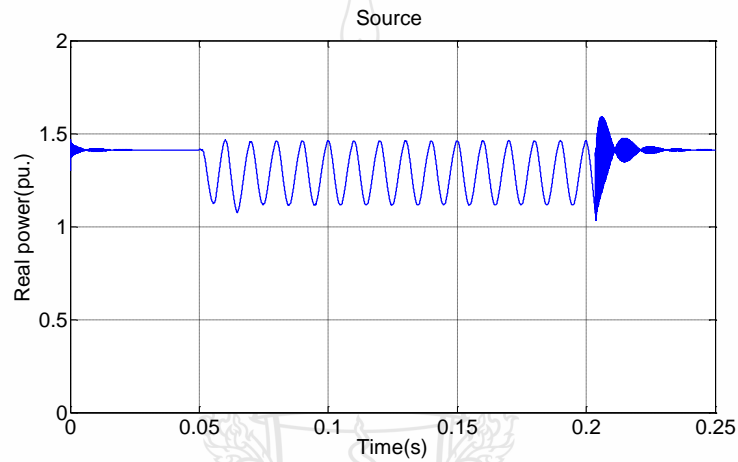


รูปที่ 4.7 ค่ากระแสที่โหลด (SLG)

จากรูปที่ 4.7 แสดงค่ากระแสด้านแหล่งจ่ายด้านทุติยภูมิหม้อแปลงโหลดในขณะเกิดความผิดปกติพร้อมแบบ 1 เฟสลงดิน โดยกระแสที่โหลดแสดงไว้ในตารางที่ 4.2

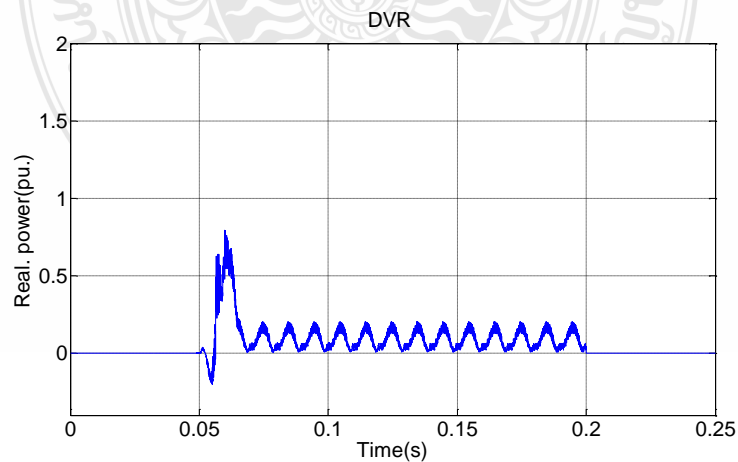
ตารางที่ 4.2 ค่าฮาร์มอนิกและขนาดของกระแสที่โหลด

ลำดับเฟส	Irms(p.u.)	%THD
เฟส A	0.97	2.26
เฟส B	0.95	2.17
เฟส C	1.02	1.53



รูปที่ 4.8 ค่า Instantaneous Real Power ที่แหล่งจ่าย (SLG)

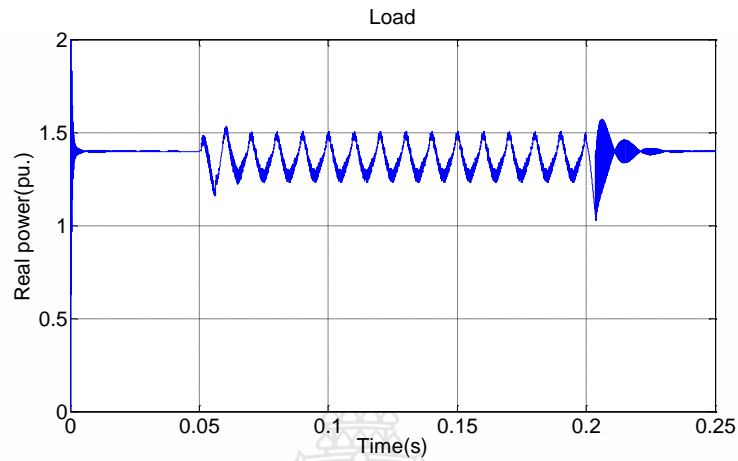
จากรูปที่ 4.8 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าจริงของแหล่งจ่ายด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงโหลดในขณะที่เกิดความผิดปกติแบบ 1 เฟสลงดิน จะเห็นได้ว่าในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะกำลังไฟฟ้าจริงจะมีการแกว่งอยู่ระหว่างค่า 1.05 pu กับ 1.40 p.u.



รูปที่ 4.9 ค่า Instantaneous Real Power ที่ DVR (SLG)

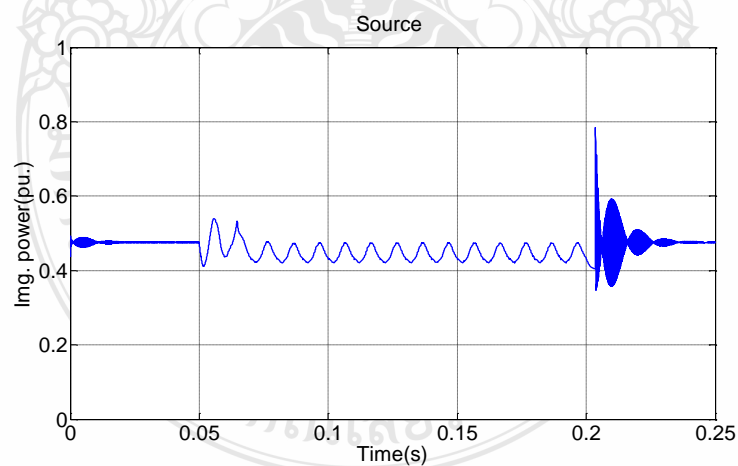


จากรูปที่ 4.9 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ตัวชดเชยแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงฉีดแรงดัน ในขณะที่เกิดความผิดปกติแบบ 1 เฟสลงดิน โดยที่จะเห็นได้ว่าในช่วง 0.5 ไซเคิลแรกหลังค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูงถึง 0.75 p.u. หลังจากนั้นจึงกลับมาแกว่งที่ระหว่า 0 p.u. กับค่า 0.2 pu



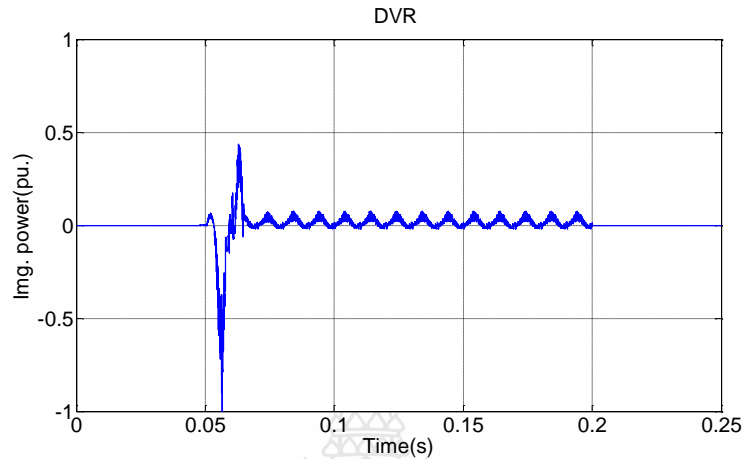
รูปที่ 4.10 ค่า Instantaneous Real Power ที่โหลด (SLG)

จากรูปที่ 4.10 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ด้านแหล่งจ่ายด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงโหลด ในขณะที่เกิดความผิดปกติแบบ 1 เฟสลงดิน โดยที่จะเห็นค่ากำลังไฟฟ้าจริงแกว่งอยู่ระหว่าง 1.25 pu และ 1.50 p.u.



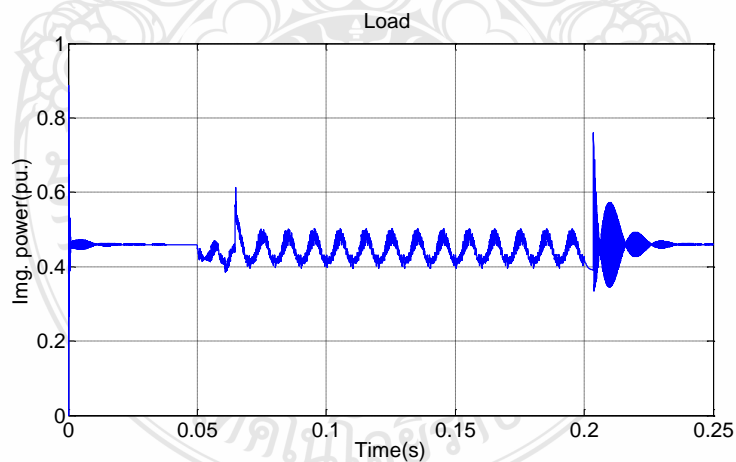
รูปที่ 4.11 ค่า Instantaneous Img. Power ที่แหล่งจ่าย (SLG)

จากรูปที่ 4.11 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่แหล่งจ่ายด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงโหลด ในขณะที่เกิดความผิดปกติแบบ 1 เฟสลงดิน จะเห็นได้ว่าในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะกำลังไฟฟ้าจริง จะมีการแกว่งอยู่ระหว่างค่า 0.42 pu กับ 0.47 p.u.



รูปที่ 4.12 ค่า Instantaneous Img. Power ที่ DVR (SLG)

จากรูปที่ 4.12 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่ตัวชดเชยแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงชนิดแรงดันในขณะที่เกิดความผิดปกติแบบ 1 เฟสลงดิน โดยที่จะเห็นได้ว่าในช่วง 0.5 ไซเคิลแรกค่ากำลังไฟฟ้าจริงสูงถึง 0.8 p.u. หลังจากนั้นจึงกลับมาแกว่งที่ระหว่าง 0 p.u. กับค่า 0.1 pu

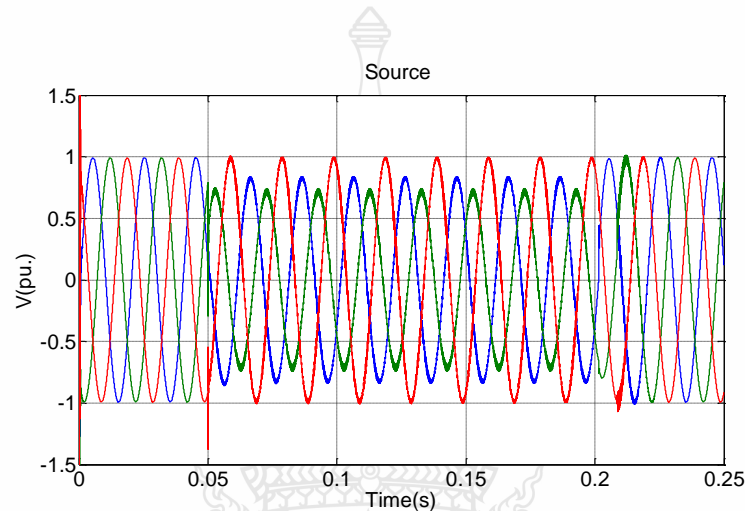


รูปที่ 4.13 ค่า Instantaneous Img. Power ที่โหลด (SLG)

จากรูปที่ 4.13 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่ด้านแหล่งจ่ายด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงโหลด ในขณะที่เกิดความผิดปกติแบบ 1 เฟสลงดิน โดยที่จะเห็นค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนแกว่งอยู่ระหว่าง 0.4 pu และ 0.5 pu

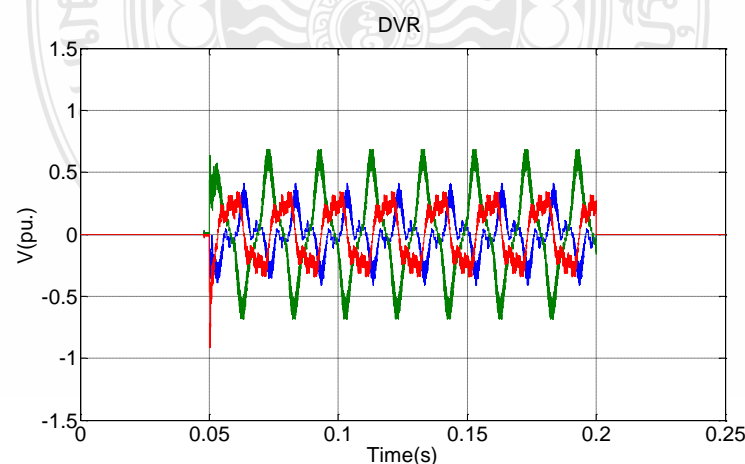
## 4.2 การจำลองความสามารถในการชดเชยแรงดันตัวชดเชยแรงดันขณะฟอลต์แบบสองเฟสต่อลงดิน (Double Line to Ground Fault)

ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า DVR สามารถชดเชยแรงดันให้กับโหลดได้ดี โดยค่าแรงดันและกระแสโหลดยังคงต่อเนื่องโดยค่ากำลังไฟฟ้าจริงและส่วนค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนแกว่งอยู่ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าจริงเฉลี่ยและส่วนค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนเฉลี่ย



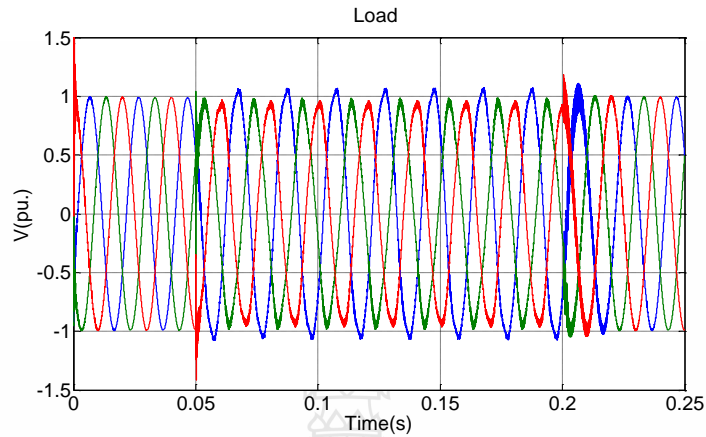
รูปที่ 4.14 ค่าแรงดันที่แหล่งจ่าย (DLG)

จากรูปที่ 4.14 แสดงค่าแรงดันแหล่งจ่ายด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงโหลดในขณะที่เกิดจากความผิดปกติแบบ 2 เฟสลงดิน ที่เฟส A และ B จะเห็นได้ว่ามีแรงดันเฟสที่มีการเปลี่ยนแปลงคือเฟส A และ B ส่วนที่เฟส C ไม่มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.15 ค่าแรงดันที่ DVR (DLG)

จากรูปที่ 4.15 แสดงค่าแรงดันที่ตัวชดเชยแรงดันจุดแรงดันเข้าที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง  
จุดแรงดันในขณะเกิดจากความผิดปกติพ่วงแบบ 2 เฟสลงดิน โดยที่จะเห็นได้ว่าทั้งสามเฟสมีการจุด  
แรงดันเพื่อชดเชยแรงดัน ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการเลื่อนของมุมเฟสรวมด้วย

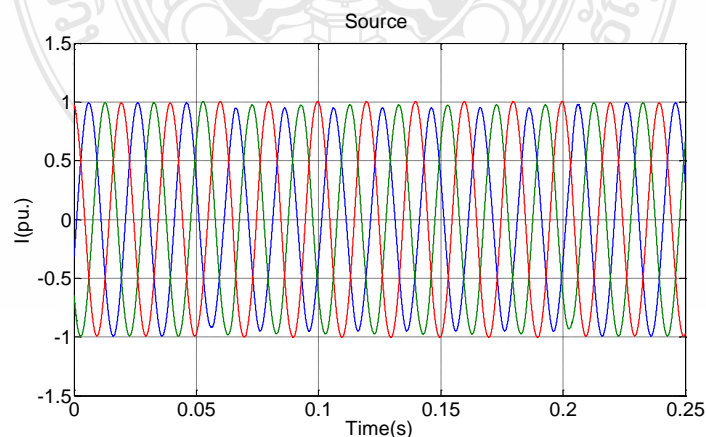


รูปที่ 4.16 ค่าแรงดันที่โหลด (DLG)

จากรูปที่ 4.16 แสดงแรงดันแหล่งจ่ายด้านทุติยภูมิหม้อแปลงโหลดในขณะเกิดจากความผิด  
พ่วงแบบ 2 เฟสลงดิน โดยค่าแรงดันที่โหลดแสดงไว้ในตารางที่ 4.3

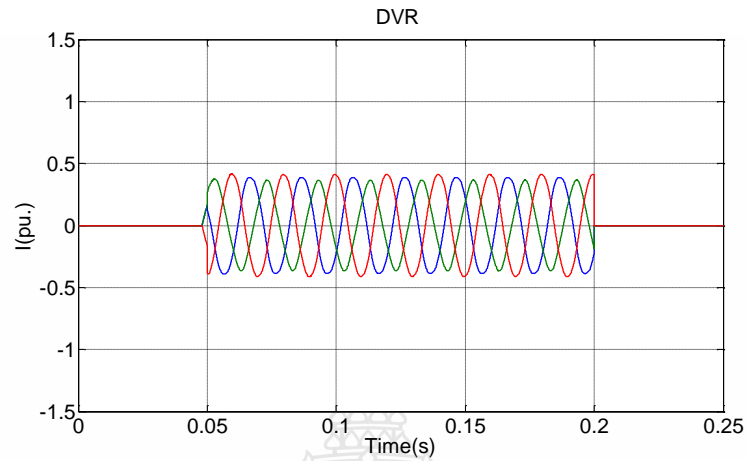
ตารางที่ 4.3 ค่าฮาร์มอนิกและขนาดของแรงดันที่โหลด

ลำดับเฟส	Vrms(p.u.)	%THD
เฟส A	1.06	3.29
เฟส B	0.95	6.17
เฟส C	0.96	4.42



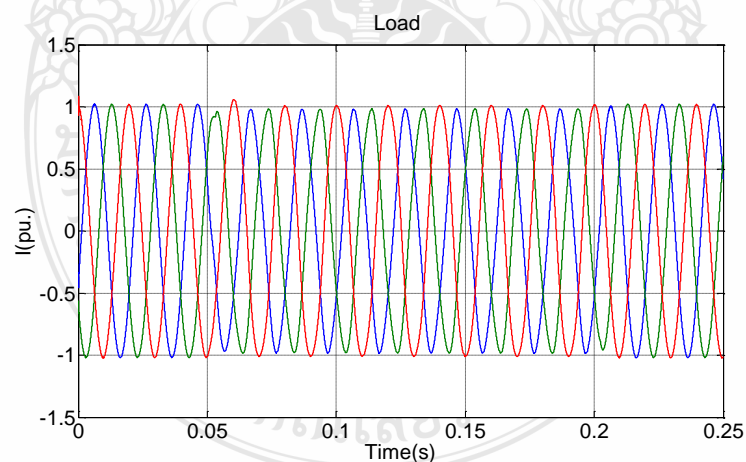
รูปที่ 4.17 ค่ากระแสที่แหล่งจ่าย(DLG)

จากรูปที่ 4.17 แสดงกระแสแหล่งจ่ายด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงโหลดในขณะเกิดจากความผิดปกติแบบ 2 เฟสลงดิน จะเห็นได้ว่ามีกระแสทั้งสามเฟสมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเนื่องจากตัวชดเชยแรงดันชนิดแรงดันชดเชยเข้าสู่ระบบไฟฟ้า



รูปที่ 4.18 ค่ากระแสที่ DVR (DLG)

จากรูปที่ 4.18 แสดงกระแสที่ตัวชดเชยแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงชนิดแรงดันในขณะเกิดจากความผิดปกติแบบ 2 เฟสลงดิน โดยที่ จะเห็นได้ว่ากระแสทั้งสามเฟสเข้าสู่สถานะอยู่ตัวอย่างรวดเร็ว

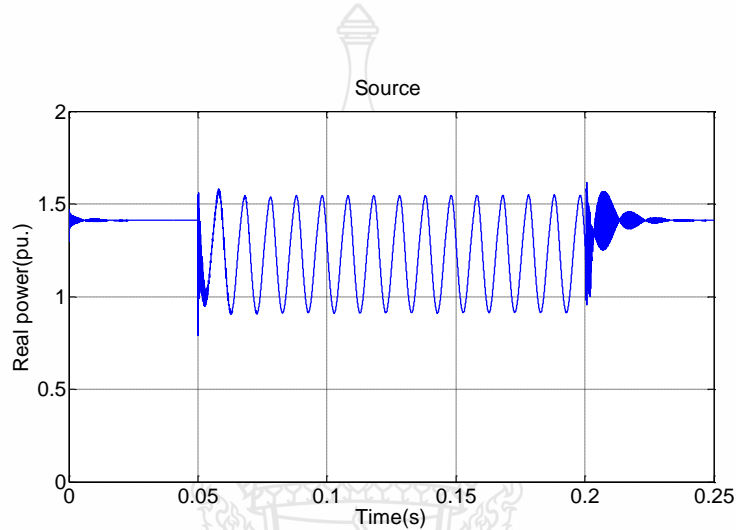


รูปที่ 4.19 ค่ากระแสที่โหลด (DLG)

จากรูปที่ 4.19 แสดงค่ากระแสด้านแหล่งจ่ายด้านทุติยภูมิหม้อแปลงโหลดในขณะเกิดจากความผิดปกติแบบ 2 เฟสลงดิน โดยกระแสที่โหลดแสดงไว้ในตารางที่ 4.4

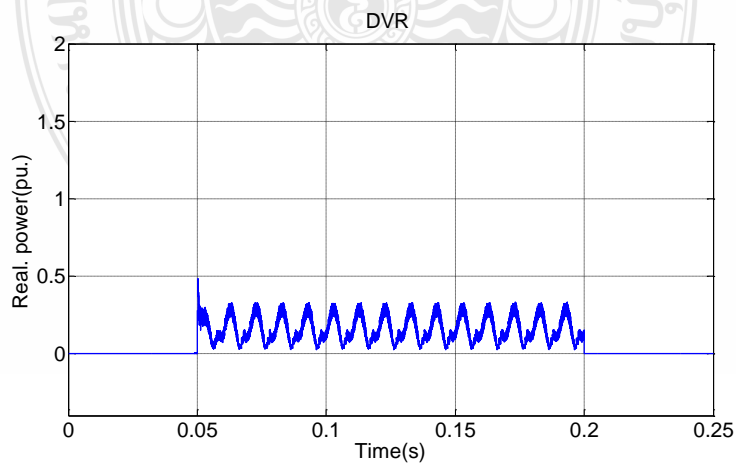
ตารางที่ 4.4 ค่าฮาร์มอนิกและขนาดของกระแสที่โหลด

ลำดับเฟส	Irms(pu)	%THD
เฟส A	1.06	2.58
เฟส B	0.97	4.31
เฟส C	0.98	2.95



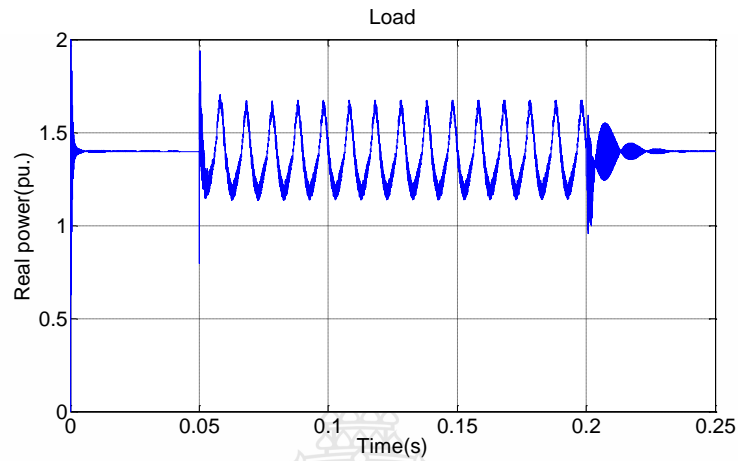
รูปที่ 4.20 ค่า Instantaneous Real Power ที่แหล่งจ่าย (DLG)

จากรูปที่ 4.20 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าจริงของแหล่งจ่ายด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงโหลด ในขณะที่เกิดจากความผิดปกติแบบ 2 เฟสลงดิน จะเห็นได้ว่าในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะค่ากำลังไฟฟ้าจริงจะมีการแกว่งอยู่ระหว่างค่า 0.90 pu กับ 1.55 p.u.



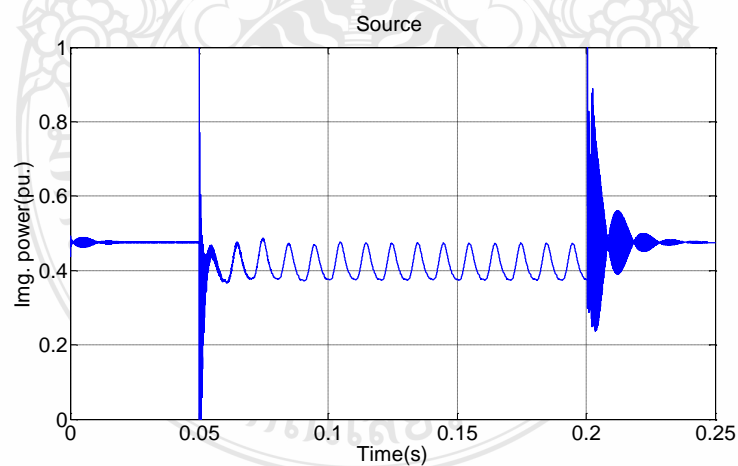
รูปที่ 4.21 ค่า Instantaneous Real Power ที่ DVR (DLG)

จากรูปที่ 4.21 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ตัวชดเชยแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงชนิดแรงดันในขณะเกิดจากความผิดปกติแบบ 2 เฟสลงดิน โดยที่จะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าจริงแกว่งที่ระหว่าง 0 p.u. กับค่า 0.38 pu



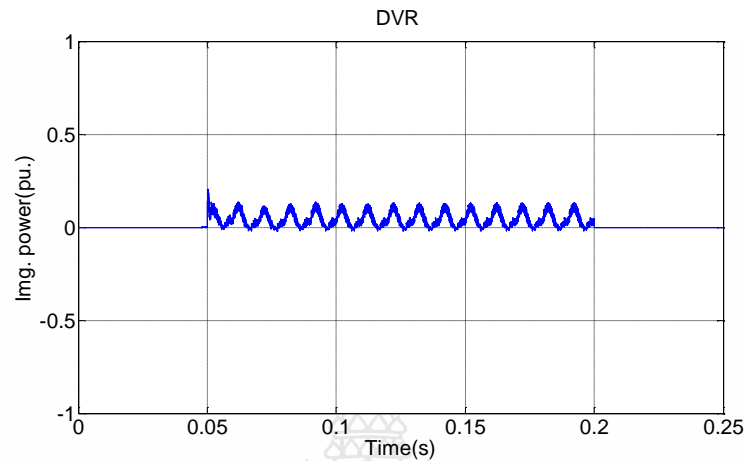
รูปที่ 4.22 ค่า Instantaneous Real Power ที่ โหลด (DLG)

จากรูปที่ 4.22 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ด้านแหล่งจ่ายด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงโหลดในขณะเกิดจากความผิดปกติแบบ 2 เฟสลงดิน โดยที่จะเห็นค่ากำลังไฟฟ้าจริงแกว่งอยู่ระหว่าง 1.20 pu และ 1.60 pu



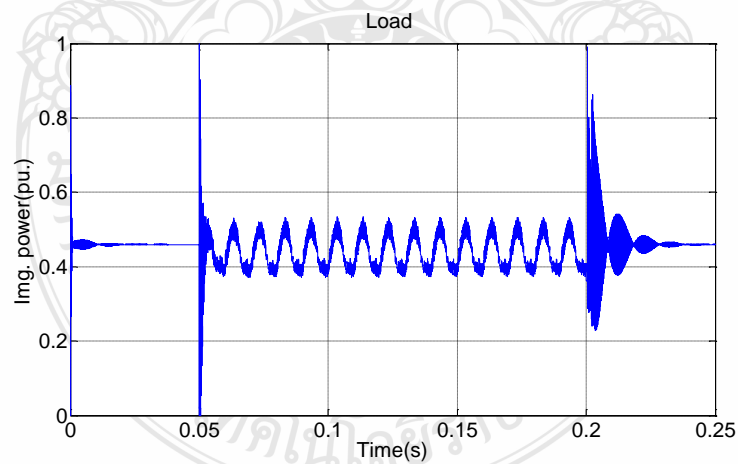
รูปที่ 4.23 ค่า Instantaneous Img. Power ที่แหล่งจ่าย (DLG)

จากรูปที่ 4.23 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่แหล่งจ่ายด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงโหลด ในขณะที่เกิดจากความผิดปกติแบบ 2 เฟสลงดิน จะเห็นได้ว่าในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ กำลังไฟฟ้าเสมือนจะมีการแกว่งอยู่ระหว่างค่า 0.38 pu กับ 0.47 p.u.



รูปที่ 4.24 ค่า Instantaneous Img. Power ที่ DVR (DLG)

จากรูปที่ 4.24 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่ตัวชดเชยแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงชนิดแรงดันในขณะที่เกิดจากความผิดปกติแบบ 2 เฟสลงดิน โดยที่จะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนแกว่งอยู่ระหว่าง 0 p.u. กับค่า 0.3 pu



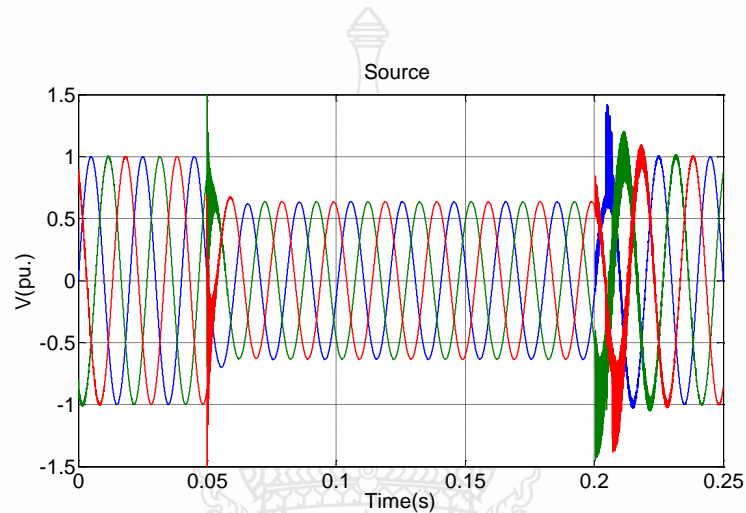
รูปที่ 4.25 ค่า Instantaneous Img. Power ที่โหลด (DLG)

จากรูปที่ 4.25 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่ด้านแหล่งจ่ายด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงโหลด ในขณะที่เกิดจากความผิดปกติแบบ 2 เฟสลงดิน โดยที่จะเห็นค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนแกว่งอยู่ระหว่าง 0.4 pu และ 0.5 pu



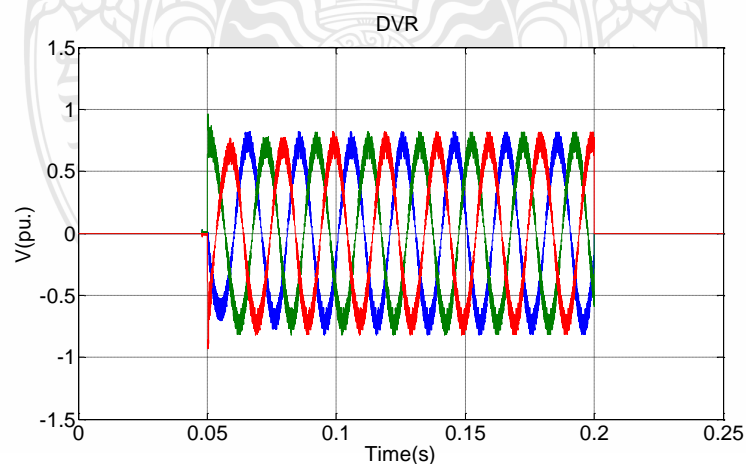
### 4.3 การจำลองความสามารถในการชดเชยแรงดันDVR ขณะฟอลต์แบบสามเฟสต่อลงดิน (Triple Line to Ground Fault)

ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า DVR สามารถ ชดเชยแรงดันให้กับโหลดได้ดี โดยค่าแรงดันและกระแสโหลด ยังคงต่อเนื่องโดยค่ากำลังไฟฟ้าจริงและส่วนค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนแกว่งอยู่ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าจริงเฉลี่ยและส่วนค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนเฉลี่ย



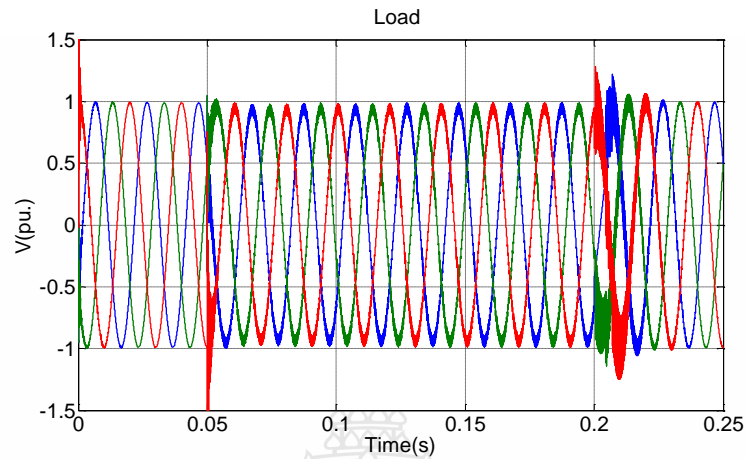
รูปที่ 4.26 ค่าแรงดันที่แหล่งจ่าย (TLG)

จากรูปที่ 4.26 แสดงแรงดันแหล่งจ่ายด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงโหลดในขณะเกิดจากความผิดปกติแบบ 3 เฟสลงดิน จะเห็นได้ว่ามีแรงดันเฟสที่มีการเปลี่ยนแปลงคือ เฟส A , B และ C



รูปที่ 4.27 ค่าแรงดันที่ DVR (TLG)

จากรูปที่ 4.27 แสดงค่าแรงดันที่ตัวชดเชยแรงดันจืดแรงดันเข้าที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง  
 จืดแรงดันในขณะเกิดจากความผิดปกติพ่วงแบบ 3 เฟสลงดิน โดยที่จะเห็นได้ว่าทั้งสามเฟสมีการจืด  
 แรงดันแบบสมมาตร ขนาด 0.5 pu

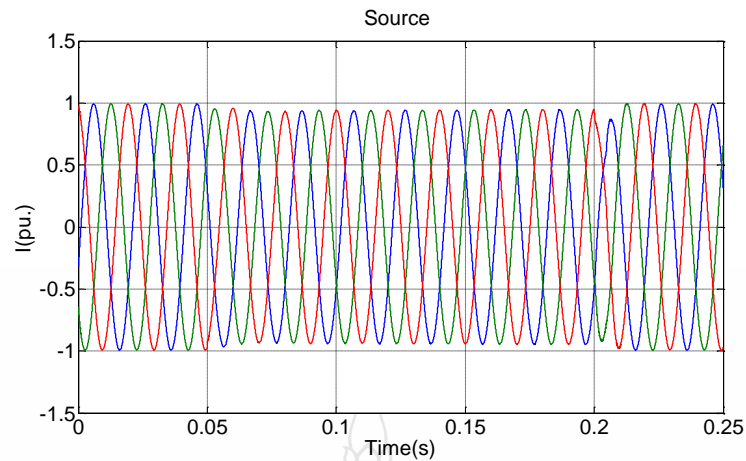


รูปที่ 4. 28 ค่าแรงดันที่โหลด (TLG)

จากรูปที่ 4.28 แสดงแรงดันแหล่งจ่ายด้านทุติยภูมิหม้อแปลงโหลดในขณะเกิดจากความผิด  
 พ่วงแบบ 3 เฟสลงดิน โดยค่าแรงดันที่โหลดแสดงไว้ในตารางที่ 4.5

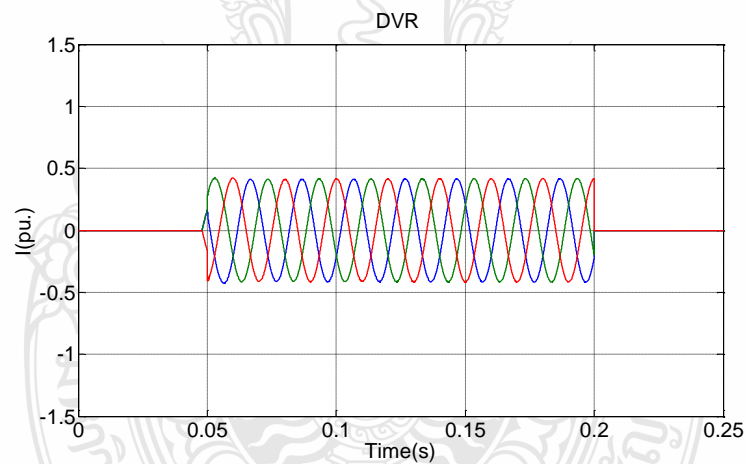
ตารางที่ 4.5 ค่าฮาร์มอนิกและขนาดของแรงดันที่โหลด

ลำดับเฟส	Vrms(pu)	%THD
เฟส A	0.97	2.77
เฟส B	0.97	2.77
เฟส C	0.97	2.77



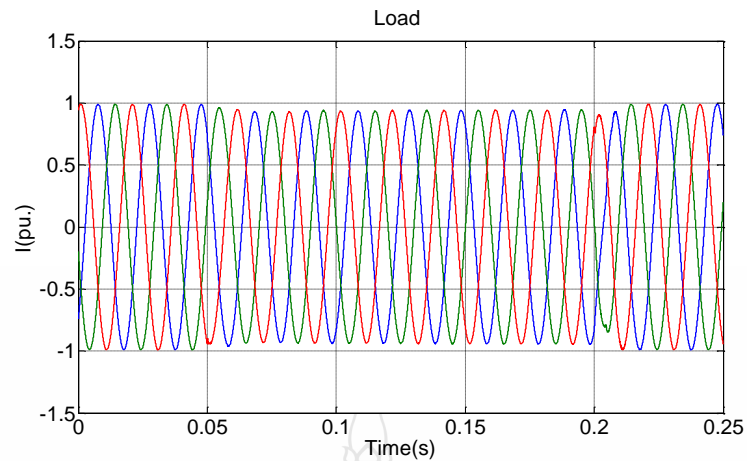
รูปที่ 4.29 ค่ากระแสที่แหล่งจ่าย (TLG)

จากรูปที่ 4.29 แสดงกระแสแหล่งจ่ายด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงโหลดในขณะเกิดจากความผิดปกติแบบ 3 เฟสลงดิน จะเห็นได้ว่ากระแสทั้งสามเฟสมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเนื่องจากตัวชดเชยแรงดันชนิดแรงดันเข้าสู่ระบบไฟฟ้า



รูปที่ 4.30 ค่ากระแสที่ DVR (TLG)

จากรูปที่ 4.30 แสดงกระแสที่ตัวชดเชยแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงชนิดแรงดันในขณะเกิดจากความผิดปกติแบบ 3 เฟสลงดิน โดยที่ จะเห็นได้ว่ากระแสทั้งสามเฟสเข้าสู่สถานะอยู่ตัวอย่างรวดเร็ว

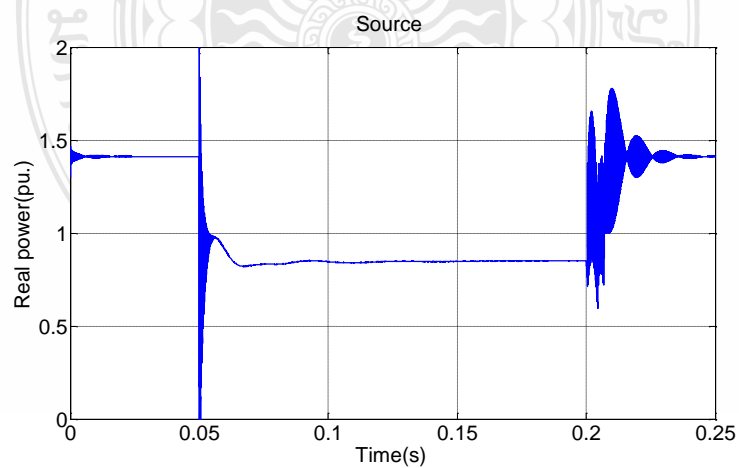


รูปที่ 4.31 ค่ากระแสที่โหลด (TLG)

จากรูปที่ 4.31 แสดงค่ากระแสด้านแหล่งจ่ายด้านทุติยภูมิหม้อแปลงโหลดในขณะที่เกิดจากความผิดปกติแบบ 3 เฟสลงดิน โดยกระแสที่โหลดแสดงไว้ในตารางที่ 4.6

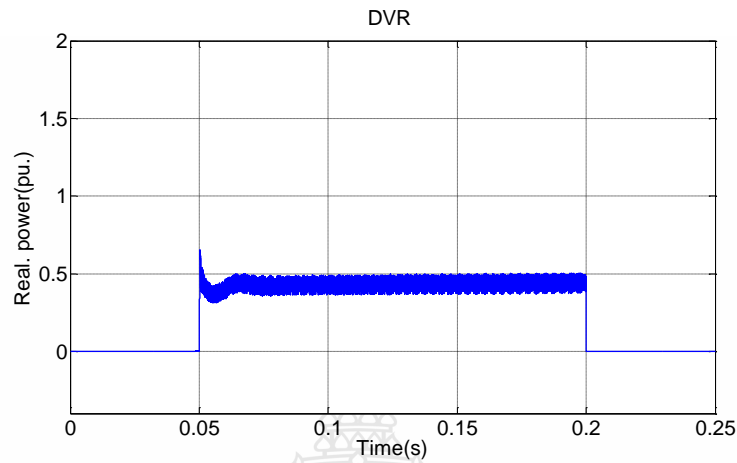
ตารางที่ 4.6 ค่าฮาร์มอนิกและขนาดของกระแสที่โหลด

ลำดับเฟส	Irms (pu)	% THD
เฟส A	0.97	0.09
เฟส B	0.97	1.18
เฟส C	0.97	0.69



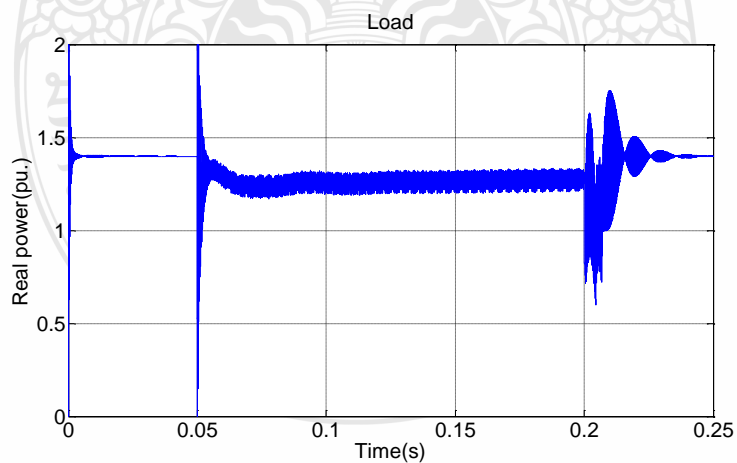
รูปที่ 4.32 ค่า Instantaneous Real Power ที่แหล่งจ่าย (TLG)

จากรูปที่ 4.32 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าจริงแหล่งจ่ายด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงโหลดในขณะที่เกิดจากความผิดปกติแบบ 3 เฟสลงดิน จะเห็นได้ว่าในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะกำลังไฟฟ้าจริงจะมีการแกว่งที่ 0.5 ไซเคิลแรกเท่านั้น หลังจากนั้นค่ากำลังไฟฟ้าจริงคงที่อยู่ที่ 0.84 p.u.



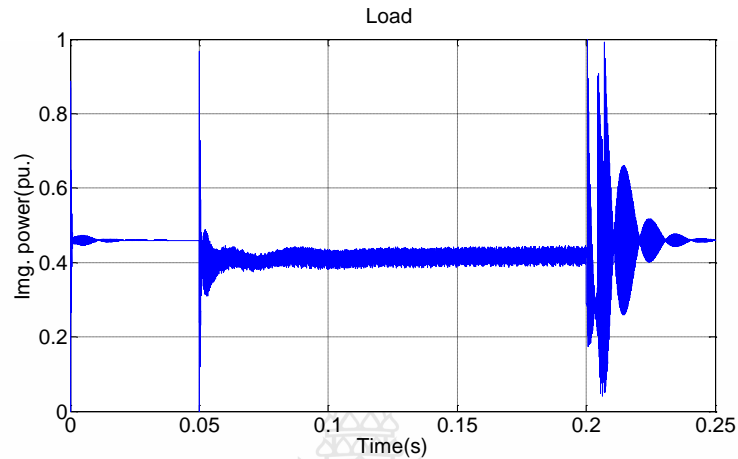
รูปที่ 4.33 ค่า Instantaneous Real Power ที่ DVR (TLG)

จากรูปที่ 4.33 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ตัวชดเชยแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงชนิดแรงดันในขณะที่เกิดจากความผิดปกติแบบ 3 เฟสลงดิน โดยที่ จะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าแกว่งอยู่ที่ 0.4 pu และ 0.48 p.u.



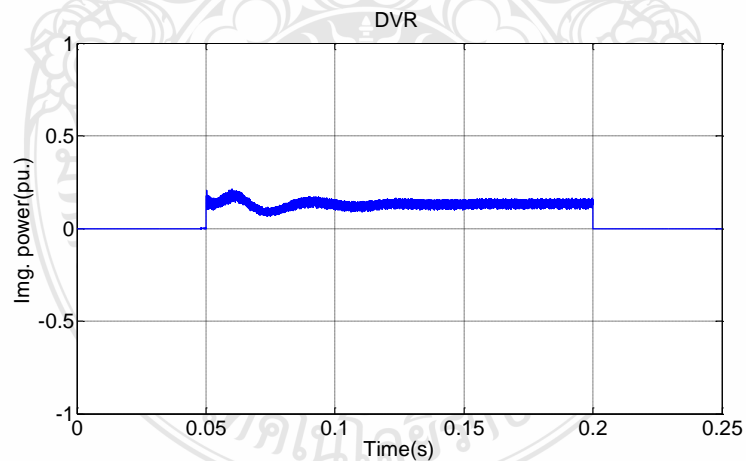
รูปที่ 4.34 ค่า Instantaneous Real Power ที่ โหลด (TLG)

จากรูปที่ 4.34 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ด้านแหล่งจ่ายด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงโหลด ในขณะที่เกิดจากความผิดปกติแบบ 3 เฟสลงดิน โดยที่จะเห็นค่ากำลังไฟฟ้าจริงแกว่งอยู่ที่ 1.2 pu และ 1.38 p.u.



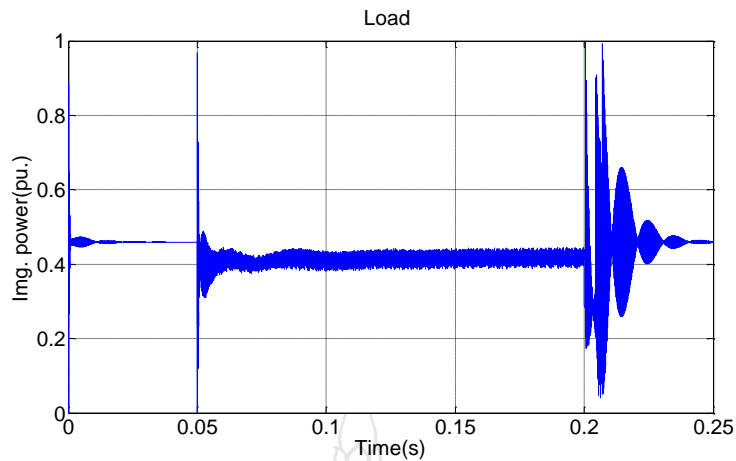
รูปที่ 4.35 ค่า Instantaneous Img. Power ที่แหล่งจ่าย (TLG)

จากรูปที่ 4.35 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนแหล่งจ่ายด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงโหลดในขณะที่เกิดจากความผิดปกติแบบ 3 เฟสลงดิน จะเห็นได้ว่าในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะกำลังไฟฟ้าเสมือนจะมีการแกว่งที่ 0.5 ไซเคิลแรกเท่านั้น หลังจากนั้นค่ากำลังไฟฟ้าจริงคงที่อยู่ที่ 0.3 p.u.



รูปที่ 4.36 ค่า Instantaneous Img. Power ที่ DVR (TLG)

จากรูปที่ 4.24 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่ตัวชดเชยแรงดันด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงชนิดแรงดันในขณะที่เกิดจากความผิดปกติแบบ 3 เฟสลงดิน โดยที่จะเห็นได้ว่าค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนเฉลี่ยอยู่ที่ 0.19 pu



รูปที่ 4.37 ค่า Instantaneous Img. Power ที่ LOAD (TLG)

จากรูปที่ 4.36 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าเสมือนที่ด้านแหล่งจ่ายด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงโหลด ในขณะที่เกิดจากความผิดปกติแบบ 3 เฟสลงดิน โดยที่จะเห็นค่ากำลังไฟฟ้าจริงเฉลี่ยอยู่ที่ 0.46 pu

#### 4.4 สรุปผลการจำลอง

จากผลจำลองการทำงานเชิงพลวัตของตัวชดเชยแรงดันตกชั่วขณะ (DVR) บนโปรแกรม SIMULINK/MATLAB โดยใช้ค่า Instantaneous Real Power และ Instantaneous Imaginary Power ของโหลดก่อนการเกิดแรงดันตกชั่วขณะเป็นค่าอ้างอิงพบว่า DVR ให้ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตกชั่วขณะที่ดี โดยผลการจำลองในกรณีที่ 1 DVR สามารถรักษาค่าแรงดันและกระแสรวมถึงค่า%THD ที่โหลดให้อยู่ในค่ามาตรฐานได้แสดงถึงสมรรถนะของการควบคุมที่ดี ส่วนกรณีที่ 2 ที่ในภาพรวม VDR สามารถรักษาค่าแรงดันและกระแสได้แต่ที่เฟส B พบว่าค่า %THD ของแรงดันโหลด = 6.17 % ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐานคือ 5 % อยู่เล็กน้อยสุดท้ายในกรณีที่ 3 ผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของการทำงานที่ดีในการควบคุม

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

##### 5.1.1 ผลของการศึกษาคุณภาพของแรงดันและการเกิดความผิดปกติในระบบไฟฟ้า แบบไม่สมมาตรโดยอ้างอิงมาตรฐานสากล

จากการศึกษาถึงคุณภาพของแรงดันไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE1159-1995 พบว่าแรงดันในระบบไฟฟ้า มีการเปลี่ยนแปลงได้หลายรูปแบบ โดยระดับความรุนแรงและผลกระทบขึ้นอยู่กับรูปแบบของการเกิดความผิดปกติที่เกิดขึ้น สำหรับงานวิจัยนี้เรามุ่งประเด็นแก้ปัญหาการเกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันตกชั่วขณะ แบบไม่สมมาตร หรือการเกิดความไม่สมดุลขึ้นของแรงดันแต่ละเฟส โดยตามมาตรฐานระบุไว้ว่า ช่วงระยะเวลาเกิดแรงดันตกชั่วขณะ อยู่ที่ช่วงเวลาดังแต่ 10 มิลลิวินาที(0.5 คาบ) จนถึง 1 นาที ซึ่งมีผลของการเกิดแรงดันตกที่ 0.1 ถึง 0.9 เปอร์เซ็นต์ ค่าความรุนแรงของการเกิดความผิดปกติขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของแรงดันตกชั่วขณะ และช่วงระยะเวลาที่เกิดสาเหตุของการเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้าในกรณี 3 เฟสลงกราวด์จัดเป็นภาวะความผิดปกติแบบสมมาตร ส่วนสภาวะความผิดปกติขึ้นในระบบไฟฟ้าที่ส่งผลให้แรงดันเกิดความไม่สมมาตรขึ้น แบ่งได้เป็น 3 ประเภทนั่นคือ 1 เฟสลงกราวด์ 2 เฟสลงกราวด์และระหว่างเฟสกับเฟสในกรณี 3 เฟสลงกราวด์ ผลของการเกิดความไม่สมมาตรของแรงดัน 3 เฟส ทำให้องค์ประกอบของแรงดันมีความแตกต่างกันด้วย นั่นคือ องค์ประกอบลำดับบวก ลบ และ ศูนย์

จากการศึกษาดังกล่าวเป็นพื้นฐานสำหรับแนวคิดในการสร้างชุดควบคุมการชดเชยแรงดันให้กับระบบไฟฟ้าเพื่อลดความเสียหายต่อโหลดที่ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้า เมื่อในระบบไฟฟ้าเกิดสภาวะการเปลี่ยนแปลงแรงดันตกชั่วขณะแบบไม่สมมาตรต่อไป

##### 5.1.2 ผลการศึกษาการทำงานของชุดชดเชยแรงดันไฟฟ้า แบบอนุกรม

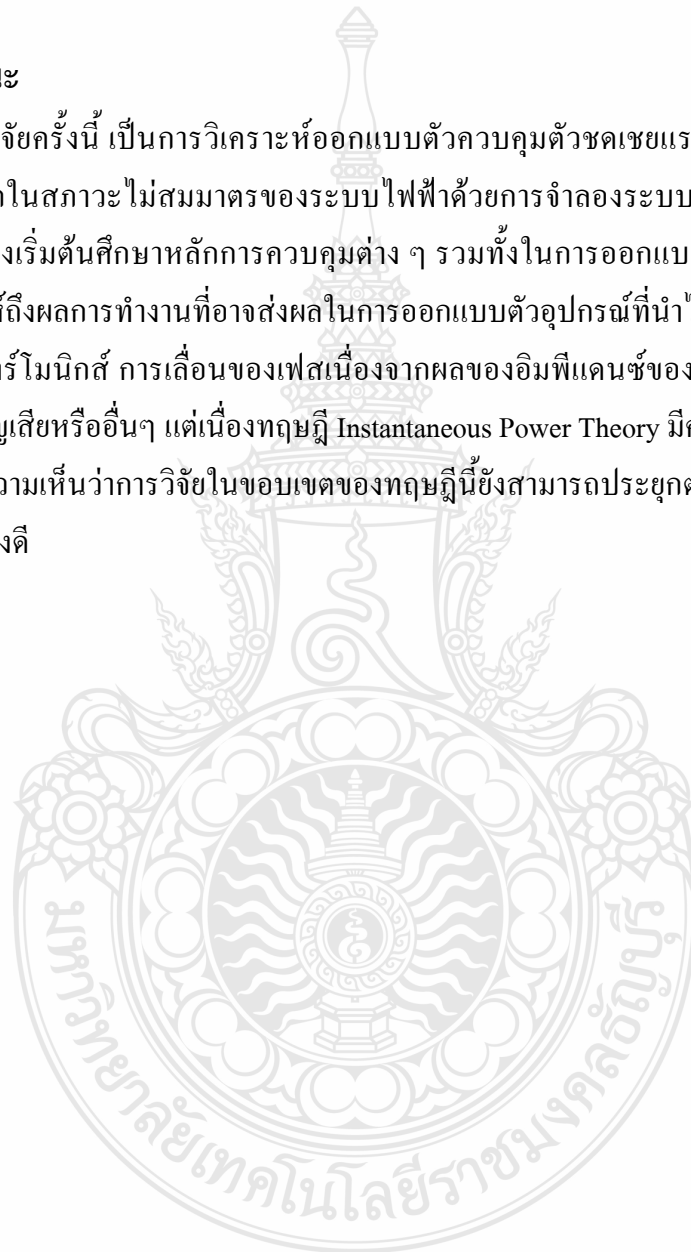
งานวิจัยนี้ได้นำเสนออัลกอริทึมควบคุมการชดเชยแรงดันตกชั่วขณะซึ่งใช้การควบคุมแบบสเปซเวกเตอร์บนระนาบ  $0\alpha\beta$  โดยใช้ค่าทฤษฎี Instantaneous Power Theory เป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบ ควบคุมการชดเชยค่าแรงดันไฟฟ้าให้กับเซ็นซิทีฟโหลดในขณะที่เกิดแรงดันไฟฟ้าตกชั่วขณะ ค่า Real nstantaneous Power และค่า Real nstantaneous Power ก่อนเกิดสภาวะแรงดันตกชั่วขณะจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณค่าแรงดันชดเชยให้กับเซ็นซิทีฟโหลดส่วนการสร้างแรงดันชดเชย ใช้การชดเชยแรงดันแบบ Pre-sag Technic ซึ่งหลักการนี้แรงดันที่โหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะจะเหมือนขณะปกติ



จากผลการทดลองการทำงานของอัลกอริทึม สรุปได้ว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถชดเชยแรงดันตกชั่วขณะได้ดี ทั้งแรงดันและกระแสที่โหลดขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะมีความใกล้เคียงกับขณะปกติมากตามที่ต้องการใน 2 กรณี มีเพียงกรณีของแรงดันตกชั่วขณะแบบระหว่างเฟสกับเฟสต่อลงดิน (Double Line to Ground Fault) เท่านั้นที่ค่าฮาร์มอนิกของแรงดันที่โหลด (%THD) = 6.17 % ซึ่งเกิน จากค่ามาตรฐานคือ 5 % เพียงเล็กน้อย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยครั้งนี้ เป็นการวิเคราะห์ออกแบบตัวควบคุมตัวชดเชยแรงดันแบบอนุกรมเพื่อชดเชยแรงดันตกในสถานะไม่สมมาตรของระบบไฟฟ้าด้วยการจำลองระบบจำหน่ายไฟฟ้า 3 เฟส เนื่องจากผู้วิจัยเพิ่งเริ่มต้นศึกษาหลักการควบคุมต่าง ๆ รวมทั้งในการออกแบบตัวอุปกรณ์ จึงยังไม่สามารถวิเคราะห์ถึงผลการทำงานที่อาจส่งผลในการออกแบบตัวอุปกรณ์ที่นำไปใช้งานเชิงปฏิบัติได้ เช่น การเกิดค่าฮาร์มอนิก การเลื่อนของเฟสเนื่องจากผลของอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงชนิดแรงดัน การเกิดค่าการสูญเสียหรืออื่นๆ แต่เนื่องจากทฤษฎี Instantaneous Power Theory มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง ผู้วิจัยมีความเห็นว่าการวิจัยในขอบเขตของทฤษฎีนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ FACT อื่นๆ ได้เป็นอย่างดี



## เอกสารอ้างอิง

- [1] ชาญณรงค์ สอนดิษฐ์, “ปัญหาไฟฟ้าขัดข้องและคุณภาพไฟฟ้า”, เล่มที่ 23, 2550. หน้า 6-11.
- [2] Bergen, A.R. and Vittal, V., “Power Systems Analysis”, Prentice-hall Inc, 2000, pp.90-100.
- [3] Hingorani, N.G., “Understanding FACTS”, IEEE Power Engineering society. n.p. 2000
- [4] S.V. Ravi Kumar and S.Siva Nagaraju J.N.T.U. College of Engineering, Kakinada, A.P., India  
“Power Quality Improvement Using D-Statcom and DVR”, 2007
- [5] Joao Afonso, Carlos Couto, Julio Martins, Departamento de Electronica Industrial  
Universidade do Minho “Active Filters with Control Based on The p-q Theory”, 2000
- [6] Byung M.Han, Jong-Kyu Jeong, and Ji-Heon Lee “3-Phase Line\_interactive Voltage Restorer  
with Hybrid Sag Detector Algorithm”, 2010
- [7] Rosli omar, Narrudin Abd Rahim, “Modelling and Simulation for Voltage Sags/Swells  
Mitigation using Dynamic Voltage Restorer(DVR)”, 2007
- [8] IEEE Standards Board., “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power  
Quality,” IEEE Standards Coordinating Committee 22 on Power Quality : IEEE Std 1159-  
1995, Approved June 14, 1995.
- [9] Lamoree et al., “Voltage Sag Analysis Case Studies”, IEEE Transactions on Industry  
Application, Vol. 30, No. 4, July / August 1994, pp 1083-1089.
- [10] HAN, B. Moon, S. Park, J. and Karady, G.(2000). “Dynamic Characteristic Analysis of Multi-  
bridge PWM Inverter for SSSC.” Power Engineering society Summer Meeting, 2000.  
IEEE.”(pp.1618-1623). New York : IEEE Press
- [11] Xiao-Ping Zhang. (2003). “ Advanced Modeling of The Multi-control Function  
Static Synchronous Series Compensator (SSSC) in Newton Power Flow ”, Power System,  
IEEE Transactions 18(4) : 1410-1416.
- [12] Haque, M.H. (2005) “ Stability Improvement by FACTS devices : a comparison between  
STATCOM and SSSC ”, Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE.(pp.1708 -  
1717). New York : IEEE Press
- [13] Jowder, F.(2007) “Application of Static Synchronous Series Compensation to Wind Farms”,  
Power Engineering Conference, 2007. IPEC 2007, International.(pp 544 -549). New York :  
IEEE Press
- [14] “Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning”, Hirofumi Akagi,  
Edson Hirokazu Watanabe, Mauricio Aredes, ISBN-978-0-470-10761-4

ภาคผนวก ก

มาตรฐานการเปลี่ยนแปลงแรงดัน IEEE1159 – 1995



# IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality

Sponsor

**IEEE Standards Coordinating Committee 22 on  
Power Quality**

Approved June 14, 1995

**IEEE Standards Board**

**Abstract:** The monitoring of electric power quality of ac power systems, definitions of power quality terminology, impact of poor power quality on utility and customer equipment, and the measurement of electromagnetic phenomena are covered.

**Keywords:** data interpretation, electric power quality, electromagnetic phenomena, monitoring, power quality definitions

---

The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.  
345 East 47th Street, New York, NY 10017-2394, USA

Copyright © 1995 by the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.  
All rights reserved. Published 1995. Printed in the United States of America.

ISBN 1-55937-549-3

No part of this publication may be reproduced in any form, in an electronic retrieval system or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

**Table 1—Principal phenomena causing electromagnetic disturbances as classified by the IEC**

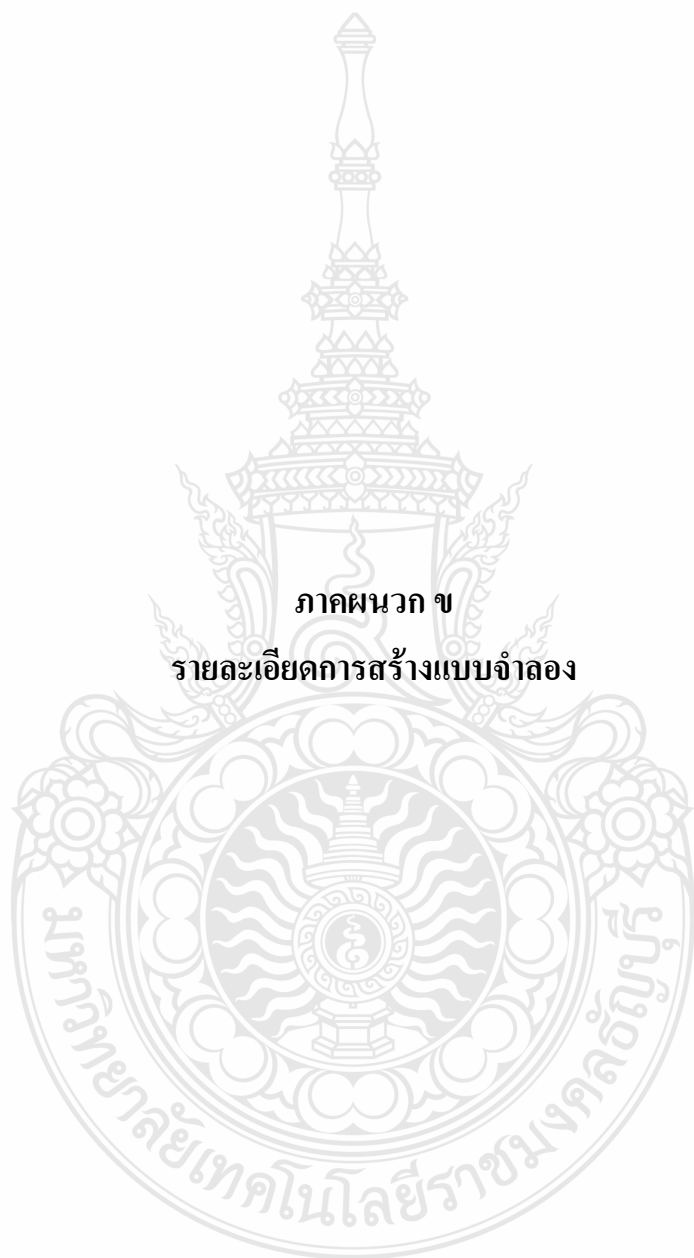
<b>Conducted low-frequency phenomena</b>	Harmonics, interharmonics
	Signal systems (power line carrier)
	Voltage fluctuations
	Voltage dips and interruptions
	Voltage imbalance
	Power-frequency variations
	Induced low-frequency voltages
	DC in ac networks
<b>Radiated low-frequency phenomena</b>	Magnetic fields
	Electric fields
<b>Conducted high-frequency phenomena</b>	Induced continuous wave voltages or currents
	Unidirectional transients
	Oscillatory transients
<b>Radiated high-frequency phenomena</b>	Magnetic fields
	Electric fields
	Electromagnetic fields
	Continuous waves
	Transients
<b>Electrostatic discharge phenomena</b>	—
<b>Nuclear electromagnetic pulse</b>	—

The phenomena listed in table 1 can be described further by listing appropriate attributes. For steady-state phenomena, the following attributes can be used [B10]:

- Amplitude
- Frequency
- Spectrum
- Modulation
- Source impedance
- Notch depth
- Notch area

**Table 2—Categories and typical characteristics of power system electromagnetic phenomena**

Categories	Typical spectral content	Typical duration	Typical voltage magnitude
1.0 Transients			
1.1 Impulsive			
1.1.1 Nanosecond	5 ns rise	< 50 ns	
1.1.2 Microsecond	1 $\mu$ s rise	50 ns–1 ms	
1.1.3 Millisecond	0.1 ms rise	> 1 ms	
1.2 Oscillatory			
1.2.1 Low frequency	< 5 kHz	0.3–50 ms	0–4 pu
1.2.2 Medium frequency	5–500 kHz	20 $\mu$ s	0–8 pu
1.2.3 High frequency	0.5–5 MHz	5 $\mu$ s	0–4 pu
2.0 Short duration variations			
2.1 Instantaneous			
2.1.1 Sag		0.5–30 cycles	0.1–0.9 pu
2.1.2 Swell		0.5–30 cycles	1.1–1.8 pu
2.2 Momentary			
2.2.1 Interruption		0.5 cycles–3 s	< 0.1 pu
2.2.2 Sag		30 cycles–3 s	0.1–0.9 pu
2.2.3 Swell		30 cycles–3 s	1.1–1.4 pu
2.3 Temporary			
2.3.1 Interruption		3 s–1 min	< 0.1 pu
2.3.2 Sag		3 s–1 min	0.1–0.9 pu
2.3.3 Swell		3 s–1 min	1.1–1.2 pu
3.0 Long duration variations			
3.1 Interruption, sustained		> 1 min	0.0 pu
3.2 Undervoltages		> 1 min	0.8–0.9 pu
3.3 Overvoltages		> 1 min	1.1–1.2 pu
4.0 Voltage imbalance		steady state	0.5–2%
5.0 Waveform distortion			
5.1 DC offset		steady state	0–0.1%
5.2 Harmonics	0–100th H	steady state	0–20%
5.3 Interharmonics	0–6 kHz	steady state	0–2%
5.4 Notching		steady state	
5.5 Noise	broad-band	steady state	0–1%
6.0 Voltage fluctuations	< 25 Hz	intermittent	0.1–7%
7.0 Power frequency variations		< 10 s	



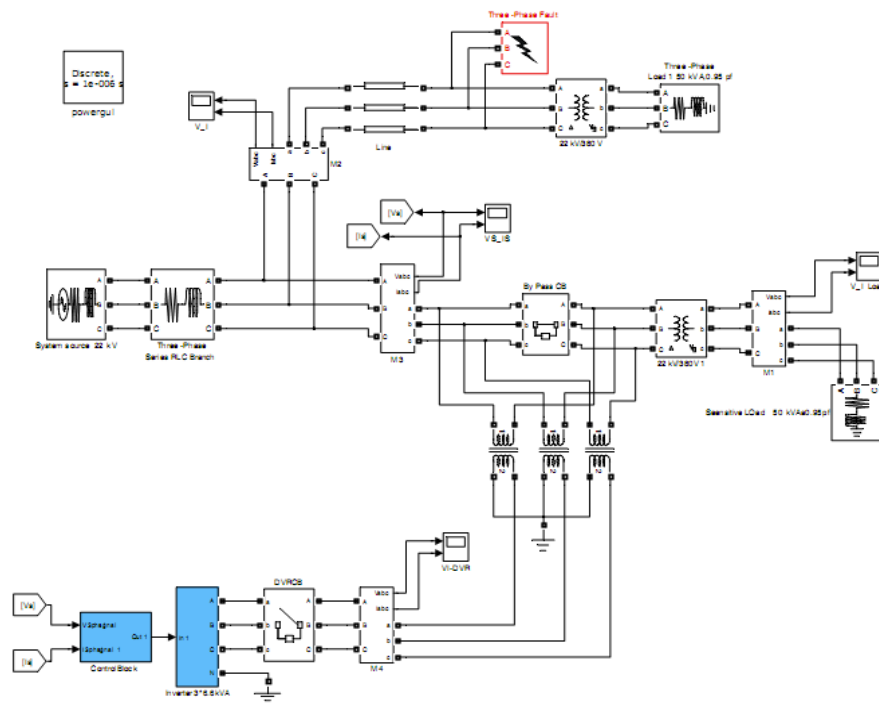
**ภาคผนวก ข**

**รายละเอียดการสร้างแบบจำลอง**

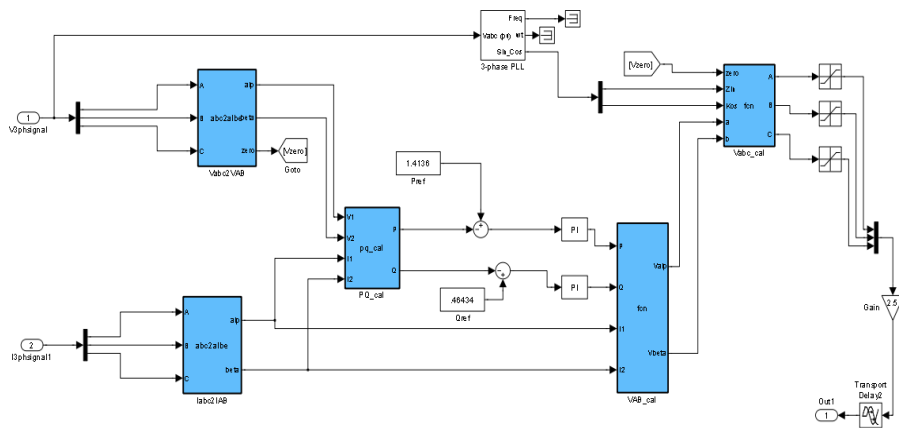
# รายละเอียดการสร้างแบบจำลองใน MATLAB/SIMULINK

File : PQDVR.mdl

## 1. ชุดแบบจำลองวงจรรวม SIMULATION

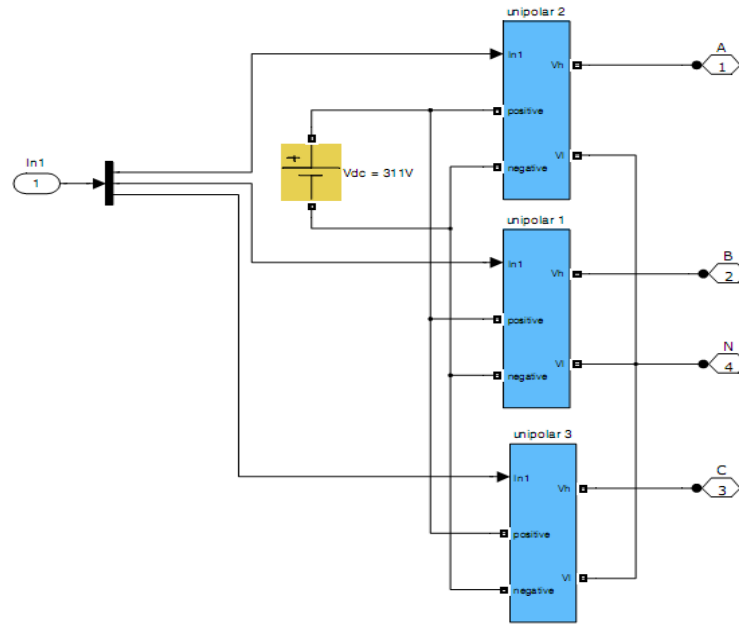


## 2. ชุดแบบจำลองการควบคุมค่าแรงดันชดเชย

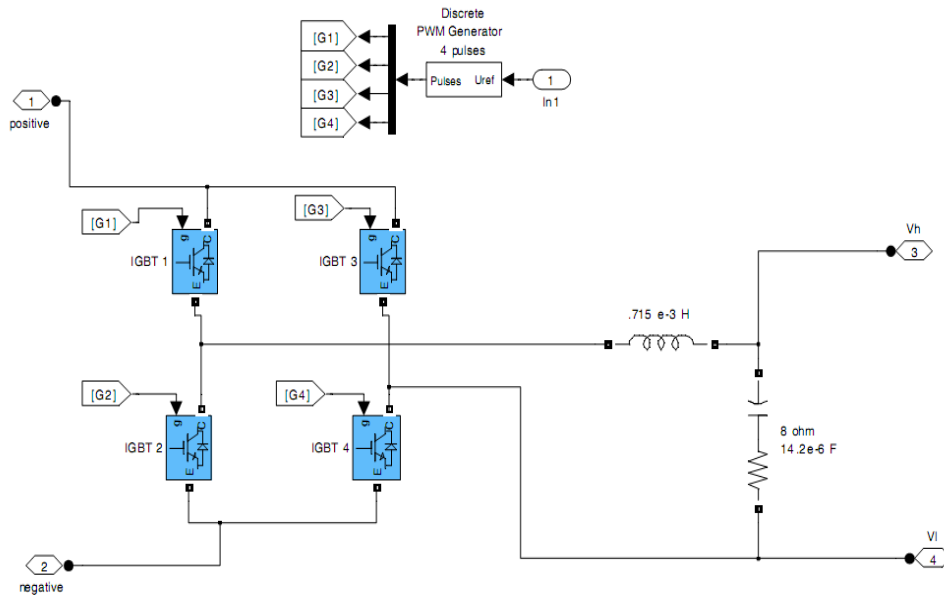




### 3. ชุดแบบจำลองการต่อชุดแปลงผันกำลัง



### 4. ชุดแบบจำลองชุดแปลงผันกำลังและชุดกรองฮาร์โมนิก





# บทคัดย่อ

การประชุมวิชาการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 3

“การพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในยุคเศรษฐกิจสร้างสรรค์”



24 - 26 พฤศจิกายน 2553  
ศูนย์ประชุมสถาบันวิจัยจุฬาภรณ์ กรุงเทพฯ



9.00-9.15	NE-EN-012	การศึกษาความเป็นไปได้ของการบูรณาการระบบจัดการพลังงานสำหรับอาคารควบคุมในประเทศไทย	เอกตระกูล นาคปลัด
9.15-9.30	NE-EN-014	การศึกษาความเหมาะสมในการออกแบบและประยุกต์ใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสนามแม่เหล็ก ตามแนวแกนกับจักรยาน ออกกำลังกายเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า	อานนท์ พวงชิงงาม
9.30-9.45	NE-EN-016	ระบบเฝ้าสังเกตการทำงานของระบบผลิตไฟฟ้าจาก เซลล์แสงอาทิตย์และกักเก็บด้วย พืชี	ไชยยันต์ บุญมี
9.45-10.00	NE-MT-007	เทคโนโลยีการแบ่งเซลล์ด้วยเทคนิคเลเซอร์ของแสงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอนบนพื้นที่ขนาดใหญ่	วิจิต แสงสุวรรณ
10.00-10.15	พักรับประทานอาหารว่าง		
	Chair:	ดร. สำเนียง อังสุพันธ์กุล	มทร. รัตนโกสินทร์
	Co-chair:	ดร. วีระศักดิ์ ละออจันทร์	มทร. รัชบุรี
10.15-10.30	NE-CE-006	การพัฒนาคอนกรีตพรุนเพื่อการระบายน้ำ	นันทชัย ชูศิลป์
10.30-10.45	NE-CE-014	อิฐบล็อกประสานผสมตะกอนจากระบบประปา	จรูญ เจริญเนตรกุล
10.45-11.00	NE-CE-017	การพัฒนาภาษาไพธอนสำหรับเขียนแบบก่อสร้าง	สำเนียง อังสุพันธ์กุล
11.00-11.15	NE-CE-019	ระบบฐานข้อมูลติดตามรายละเอียดความคืบหน้าของการบำรุงรักษาโยธา	พงศกร บุบผาโสมตระกูล
11.15-11.30	NE-CE-018	การสร้างฝายแม้วในเขตพื้นที่ลุ่มน้ำอุบลคอนบน	โกวิท บุญรอด
12.00-13.00	พักรับประทานอาหารกลางวัน		
	Chair:	รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ	สจล.
	Co-chair:	ดร. กฤษณ์ชนม์ ภูมิภคดิพิชญ์	มทร. รัชบุรี
13.00-13.15	NE-EE-002	ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์	สมยศ สีแสนสุข
13.15-13.30	NE-EE-003	การควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยการปรับความสมดุลย์โหลด	คนุพล คำปัญญา
13.30-13.45	NE-EE-009	การปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม	ถนอมศักดิ์ แก้วสฤณี
13.45-14.00	NE-EE-023	การปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าในระบบจำหน่าย 22 kV อ.เขาคิชฌกูฏ จ.จันทบุรี	คณัฏ ทองธวัช
14.00-14.15	NE-EE-027	มูลค่าความเสียหายจากเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องของกลุ่มพาณิชย์กรรมในประเทศไทย ด้วยวิธีการพีชชีโลจิก	ปริญญา สมเงิน





# การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการ ครั้งที่ 3 “รูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย”

3<sup>rd</sup> Thailand Renewable Energy for Community Configuration Conference

15-17 ธันวาคม 2553

กลุ่มของสาขาบทความ

กลุ่มที่ 1 เทคโนโลยีพลังงานชุมชน

กลุ่มที่ 2 การจัดการพลังงานชุมชน

กลุ่มที่ 3 ธุรกิจพลังงานชุมชน

กลุ่มที่ 4 กลยุทธ์การพัฒนาพลังงานชุมชน

ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา 5 ธันวาคม 2550

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



## สารบัญ

บทความ	หน้า
ET041 การศึกษาเทคนิคสำหรับการกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมของระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ในระบบจำหน่ายแบบเรเดียล อมรเทพ แพทยานันท์ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์	155
ET043 การจำลองสภาวะการทำงานของอุปกรณ์ขดเซียงแรงดันแบบอนุกรมด้วยทฤษฎีถนอมศักดิ์ แก้วสุกณี กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์	163
ET044 การออกแบบและวิเคราะห์วงจรทระดับแรงดันแบบดูลล์สำหรับระบบพลังงานทดแทนศุภวัฒน์ คำทิพย์ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์	169
ET045 การออกแบบชุดควบคุมระบบไฟฟ้าแสงสว่างสำหรับทางเดินสาธารณะโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับสายส่ง อุทัย ศรีพันธ์ จิรวิภาวินท์ รัชชวีเชียร ประพิชารีย์ ธนารักษ์	177
ET046 วิธีไฮโดรเทอร์มอลสำหรับการสังเคราะห์นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากแหล่งธรรมชาติ นิชธิมา รุ่งปิ่น สรพงษ์ ภาสุปรีย์ ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ	185
ET047 ระบบผสมผสานเตาแก๊สชีวมวลร่วมกับเทอร์โมอิเล็กทริกเพื่อผลิตความร้อนและไฟฟ้า ฉันทนา พันธุ์เหล็ก สมชาย มณีวรรณ	191
<b>กลุ่มที่ 2 การจัดการพลังงานชุมชน (EB)</b>	
EB001 การศึกษาประสิทธิภาพและการจัดการโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาด 1,500 กิโลวัตต์ กรณีศึกษา ห.ส.น. รัชัญญกิจ นครปฐม มณฑล นครทิพย์ สหทัย ลาตปาละ นิพนธ์ เกตุจ้อย	201
EB004 การวิเคราะห์ต้นทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเชื้อเพลิงชีวอัดแท่งจากลำตันข้าวโพด กิ่งกานต์ พันธวานิชย์ วรวิมล ดุจทรัพย์ พิสิษฐ์ มณีโชติ	209
EB005 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางการเงินของการลงทุนระบบก๊าซชีวภาพ กรณีศึกษา คำแสต ริเวอร์แคว รีสอร์ท วรรณญา ทองสกุลพานิชย์ ประพิชารีย์ ธนารักษ์	215

## การจำลองสภาวะการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมด้วยทฤษฎี

### Instantaneous Power Theory

#### DVR Based on Instantaneous Power Theory Performance Simulations

ถนอมศักดิ์ แก้วสุกณี\* และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์\*

\*ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

อ. ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110 โทรศัพท์: +66(2)-549-3571 โทรสาร: +66(2)-549-3422 E-mail:krischonme.b@en.rmutt.ac.th

#### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิธีการชดเชยแรงดันตกชั่วคราวในระบบจำหน่ายไฟฟ้าเมื่อเกิดสภาวะแรงดันตกชั่วคราวด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม เพื่อแก้ไขปัญหาแรงดันตกชั่วคราวที่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ที่มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันโดยใช้ทฤษฎี Instantaneous Power Theory ในการออกแบบอุปกรณ์ชดเชยแรงดันด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากการออกแบบสภาวะการเกิดแรงดันตกเนื่องจากความผิดปกติของระบบแบบ Single Phase to Ground, Two Phase to Ground และ Symmetrical Three Phase to Ground ขนาดแรงดัน 0.6 p.u. ในช่วงเวลา 200ms. ผลจากการจำลองการชดเชยระบบด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมพบว่า สามารถรักษาระดับแรงดันของระบบที่เกิดความผิดปกติไปจากเดิมได้ โดยค่าแรงดันที่ได้จากการชดเชยระบบมีค่าเท่ากับ 1 p.u. ผลการศึกษาช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบจำหน่ายไฟฟ้าเมื่อเกิดแรงดันตกชั่วคราว หากถูกทำการชดเชยด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมแล้ว จะส่งผลถึงความปลอดภัยของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในระบบให้ยาวนานยิ่งขึ้น เป็นการรักษาคุณภาพไฟฟ้าให้แรงดันมีเสถียรภาพที่ดี

**คำสำคัญ** แรงดันตกชั่วคราว, อุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม, เสถียรภาพแรงดัน

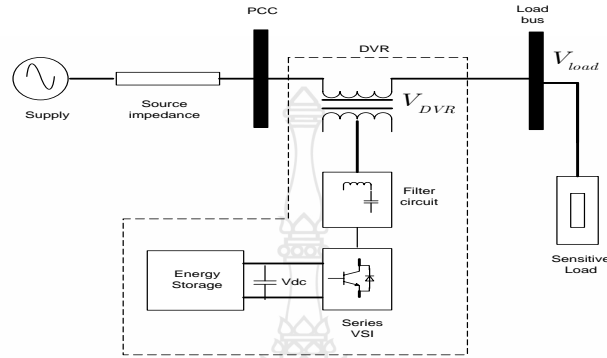
#### 1. บทนำ

เนื่องจากการเติบโตอย่างรวดเร็วของการผลิตสินค้าในภาคอุตสาหกรรม ขบวนการผลิตสินค้าจึงต้องมีขั้นตอนการผลิตที่มีประสิทธิภาพสูง ถูกต้อง รวดเร็ว และแม่นยำ ระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ เครื่องจักร และอุปกรณ์ที่มีเทคโนโลยีทันสมัยใหม่ๆ ถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในทุกขั้นตอนการผลิต ซึ่งระบบหรืออุปกรณ์ข้างต้นมักมีอุปกรณ์พาวเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นส่วนประกอบหลัก เนื่องจากอุปกรณ์พาวเวอร์อิเล็กทรอนิกส์เป็นอุปกรณ์ที่ความอ่อนไหวสูง (High Sensitive Equipment) ทำให้ต้องการระบบไฟฟ้ากำลังที่มีคุณภาพสูง ดังนั้นความผิดปกติใดๆที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้า(แรงดันตกชั่วคราว แรงดันเพิ่มชั่วคราว ไฟกระพริบ ฮาร์โมนิกส์ แรงดันกระชอก) มักทำให้อุปกรณ์พาวเวอร์อิเล็กทรอนิกส์เสียหายหรือทำงานผิดพลาดได้ โดยทั่วไปความผิดปกติในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีความถี่ในการเกิดบ่อยครั้งและมีผลกระทบในวงกว้างก็คือแรงดันตกชั่วคราว ตัวอย่างผลกระทบจากแรงดันตกชั่วคราวที่พบในระบบการผลิตเช่น ความเสียหายที่เกิดกับอุปกรณ์ตัวขับเคลื่อนความเร็วรอบของมอเตอร์(Adjustable Speed Drive) การทริปของอุปกรณ์หลักที่ทำให้ขบวนการผลิตล้มเหลว เป็นต้น เพื่อลดผลกระทบจากแรงดันตกชั่วคราวและเพิ่มคุณภาพระบบไฟฟ้ากำลัง อุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม หรือ DVR (Dynamic Voltage Restorer) จึงถูกนำมาติดตั้งเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว

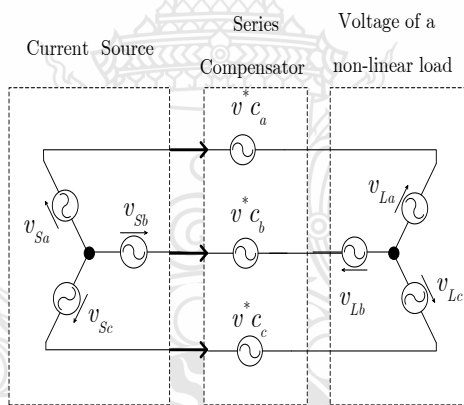
#### 2. วิธีการวิจัย

##### 2.1. อุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม (DVR)

อุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมหรือ DVR จะสร้างแรงดันชดเชยแทรกเข้าไปในระบบไฟฟ้าในขณะเกิดแรงดันตกชั่วคราว ซึ่งโดยทั่วไปประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก คือ ส่วนแปลงพลังงานและตัวกรองฮาร์มอนิกส์ ส่วนที่ใช้เก็บพลังงาน หม้อแปลงสำหรับฉีดแรงดันเข้าระบบ และส่วนการควบคุม ในสภาวะปกติ DVR จะถูกบายพาสเพื่อลดกำลังสูญเสีย เมื่อเกิดแรงดันตกชั่วคราว ส่วนการควบคุมของ DVR จะสั่งให้ DVR สร้างแรงดันแทรกเพิ่มเข้าไปในระบบเพื่อชดเชยผลต่างแรงดันระหว่างแรงดันตกชั่วคราวและแรงดันปกติ นั่นคือจะทำงานหรือทำการชดเชยแรงดันเพียงขณะการเกิดแรงดันตกชั่วคราวเท่านั้น



รูปที่ 1 โครงสร้าง DVR



รูปที่ 2 วงจรสมมูลของ DVR

ในบทความ [1] นำเสนอการควบคุม DVR โดยการใช้การแปลงองค์ประกอบของแรงดันและจากแกนหนึ่งไปแกนหมุนร่วมกับเทคนิคการควบคุมแรงดันของอินเวอร์เตอร์แบบฮีสเตอร์รีซีส บทความที่ [2] นำเสนอการควบคุม DVR โดยการใช้การแปลงองค์ประกอบของแรงดันและจากแกนหนึ่งไปแกนหมุนร่วมกับเทคนิคการควบคุมแรงดันของอินเวอร์เตอร์แบบหลายระดับ บทความที่ [3] นำเสนอการควบคุม Active Filters เพื่อแก้ปัญหากระแสฮาร์มอนิกส์ในระบบจำหน่ายโดยใช้ทฤษฎี Instantaneous Power Theory ดังนั้นบทความนี้จะได้นำเสนอรูปแบบการควบคุมนำ DVR แบบใหม่โดยใช้ทฤษฎี Instantaneous Power Theory กรอบการนำเสนอในบทความนี้ประกอบด้วย ลำดับแรกจะอธิบายถึงการทำงานและสมรรถนะเชิงพลวัตของ DVR ในการปรับปรุงคุณภาพกำลังไฟฟ้าในระบบส่งจำหน่ายไฟฟ้า ต่อจากนั้นจะนำเสนอแบบจำลองของ DVR ในแบบสามเฟสสามสาย พร้อมทั้งนำเสนอระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ จุดเชื่อมต่อ โดยใช้ทฤษฎี Instantaneous Power Theory ซึ่งจะถูกจำลองลงบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สุดท้ายจะกล่าวสรุปผลการทดลองและกล่าวถึงขีดจำกัดและงานวิจัยขั้นต่อไป

## 2.2. ทฤษฎี Instantaneous Power Theory

ทฤษฎี Instantaneous Power Theory ถูกนำเสนอครั้งแรกในปี คศ .1983 โดย Akagi et al. เป็นการศึกษากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟของระบบสามเฟสสามสายที่ในเชิงเวลา ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับได้กับระบบทั้งในสภาวะคงตัว และสภาวะชั่วขณะ การคำนวณหาค่า Instantaneous Power ถูกดำเนินการโดยการแปลงแรงดัน ( $V_{abc}$ ) ที่จุดเชื่อมต่อและกระแสที่ไหลในสาย ( $I_{abc}$ ) ให้อยู่บนแกน  $\alpha\beta$  โดยใช้การเปลี่ยนรูปแบบ Clark Transformation [5] ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} & -\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

เมื่อ  $x$  คือ แรงดันหรือกระแสไฟฟ้า เนื่องจากไม่ปรากฏองค์ประกอบลำดับศูนย์ ( $v_0$  และ  $i_0$ ) ในระบบสามเฟสสามสายจึงสามารถแยกพิจารณาเฉพาะแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า จากองค์ประกอบ  $\alpha$  และ  $\beta$  เท่านั้น จะได้

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$e = v_\alpha + jv_\beta \quad (3)$$

$$i = i_\alpha + ji_\beta \quad (4)$$

จากสมการที่ (3) และ (4) สามารถคำนวณหาลำดับกำลังไฟฟ้าได้ดังนี้

$$s = e \cdot i^* = (v_\alpha + jv_\beta)(i_\alpha - ji_\beta) \quad (5)$$

$$s = (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) + j(v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) \quad (6)$$

$$p = (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) \quad (7)$$

$$q = j(v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) \quad (8)$$

นำสมการที่(7)และ(8) มาเขียนเมทริกซ์

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (10)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (11)$$

$\bar{p}$  = กำลังไฟฟ้าจริงชั่วขณะเฉลี่ย

$\tilde{p}$  = กำลังไฟฟ้าจริงชั่วขณะออสซิลเลต

$\bar{q}$  = กำลังไฟฟ้าเสมือนชั่วขณะเฉลี่ย

$\tilde{q}$  = กำลังไฟฟ้าเสมือนออสซิลเลตชั่วขณะ

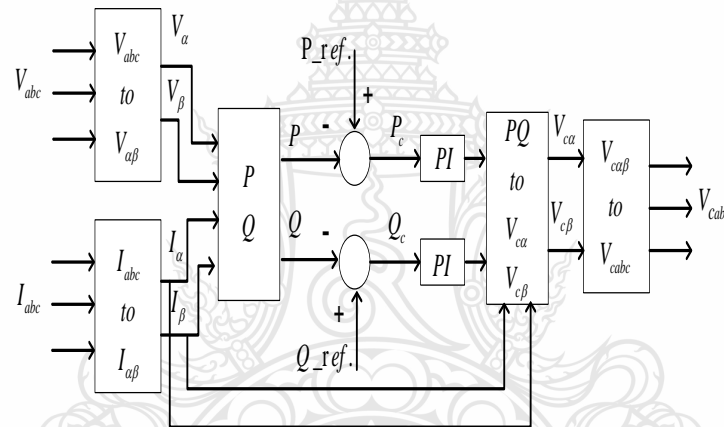


### 2.3 การควบคุมการทำงานของ DVR

การควบคุมการทำงานของ DVR จะประกอบด้วย ชุดควบคุมกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้รีแอกตีฟ โดยกำลังไฟฟ้าจริง และกำลังไฟฟ้รีแอกตีฟ จะถูกนำมาคำนวณหาค่าแรงดันอ้างอิงบนแกน  $\alpha\beta$  ได้ดังสมการที่(12) จากนั้นแรงดันอ้างอิงบนแกน  $\alpha\beta$  จะถูกแปลงกลับไปเป็นแรงดันอ้างอิง 3 เฟส สำหรับชดเชย ดังแสดงในสมการที่(13)

$$\begin{bmatrix} v_{C\alpha}^* \\ v_{C\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \begin{bmatrix} i_\alpha & -i_\beta \\ i_\beta & i_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^* \\ q^* \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} v_{Ca}^* \\ v_{Cb}^* \\ v_{Cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha^* \\ v_\beta^* \end{bmatrix} \quad (13)$$



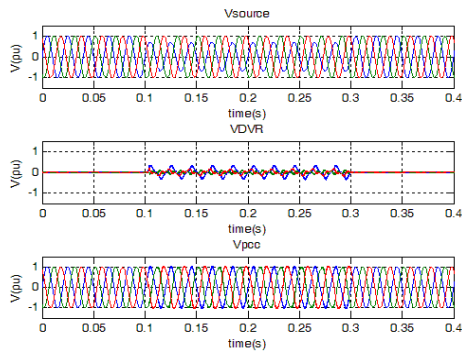
รูปที่ 3 ไลอะแกรมการควบคุม DVR

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของระบบในการจำลอง

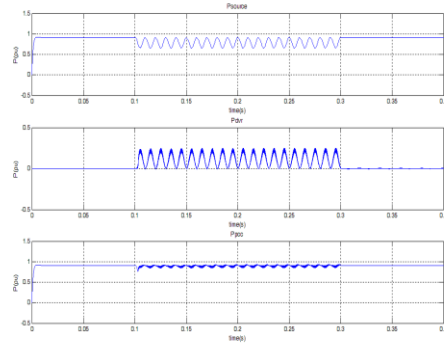
ตัวแปร	ค่าตัวแปร
แหล่งจ่ายแรงดัน	380Vrms 50 Hz
อัตราส่วนหม้อแปลงอนุกรม	1:1
แรงดันบัสกระแสตรง	570 Vdc
ฟิลเตอร์อินดักแตนซ์	12.6 mH.
ฟิลเตอร์คาปาซิแตนซ์	32.2 $\mu$ F.
ฟิลเตอร์รีซิสแตนซ์	39.6 $\Omega$
เซนส์ซิติฟโวลต์	2.97E3+j1.4E3

### 3. ผลและการอภิปรายผล

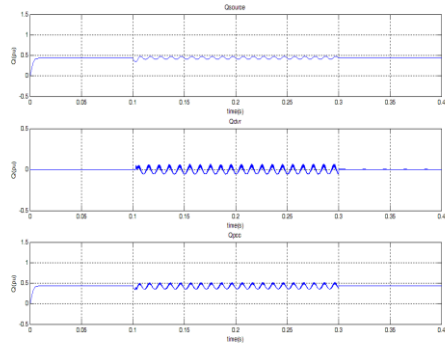
จากรูปที่ 3 จำลองการทำงานบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในการจำลองการควบคุมการทำงานของ DVR โดยการควบคุมค่าแรงดันที่จุดเชื่อมต่อในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะในระยะเวลา 200 ms ให้มีค่าเท่ากับ 1 pu โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบและค่าคงที่ ตามตารางที่ 1 ดำเนินการจำลองการควบคุมการทำงานของ DVR โดยแบ่งการจำลองออกเป็น 3 กรณี คือ กรณีที่ 1 จำลองการควบคุมการทำงานของ DVR ในสภาวะแรงดันตกชั่วขณะ Single Phase to Ground ขนาด 0.6 p.u. ระยะเวลา 200 ms กรณีที่ 2 จำลองการควบคุมการทำงานของ DVR ในสภาวะแรงดันตกชั่วขณะแบบ Two Phase to Ground ขนาด 0.6 p.u. ระยะเวลา 200 ms และกรณีที่ 3 จำลองการควบคุมการทำงานของ DVR ในสภาวะแรงดันตกชั่วขณะแบบ Symmetrical Three Phase to Ground ขนาด 0.6 p.u. ระยะเวลา 200 ms



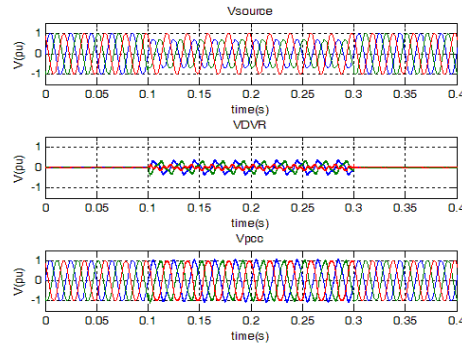
รูปที่ 4 Vsource, Vdvr, Vpcc ขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะแบบ Single Phase to Ground



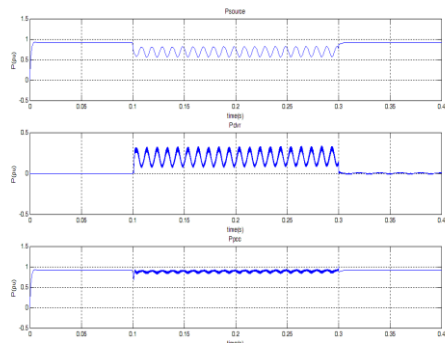
รูปที่ 5 Psource, Pdvr, Ppcc ขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะแบบ Single Phase to Ground



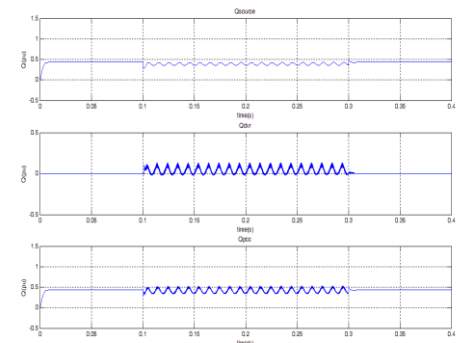
รูปที่ 6 Qsource, Qdvr, Qpcc ขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะแบบ Single Phase to Ground



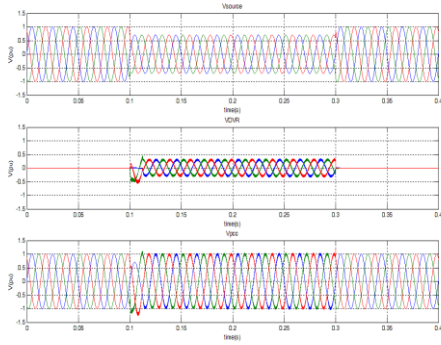
รูปที่ 7 Vsource, Vdvr, Vpcc ขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะแบบ Two Phase to Ground



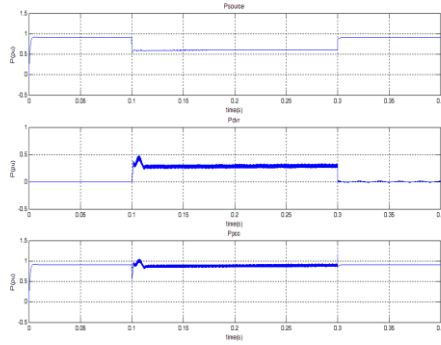
รูปที่ 8 Psource, Pdvr, Ppcc ขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะแบบ Two Phase to ground



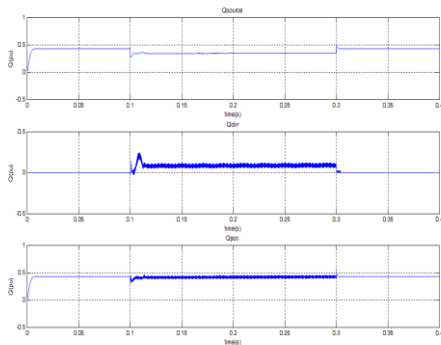
รูปที่ 9 Qsource, Qdvr, Qpcc ขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะแบบ Two Phase to Ground



รูปที่ 10 Vsource, Vdvr, Vpcc ขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะแบบ Symmetrical Three Phase to Ground



รูปที่ 11 Pref., Psource, Pdvr, Ppcc ขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะแบบ Symmetrical Three Phase to Ground



รูปที่ 12 Qref., Qsource, Qdvr, Qpcc ขณะเกิดแรงดันตกชั่วขณะ แบบ Symmetrical Three Phase to Ground

#### 4. สรุปผลการวิจัย

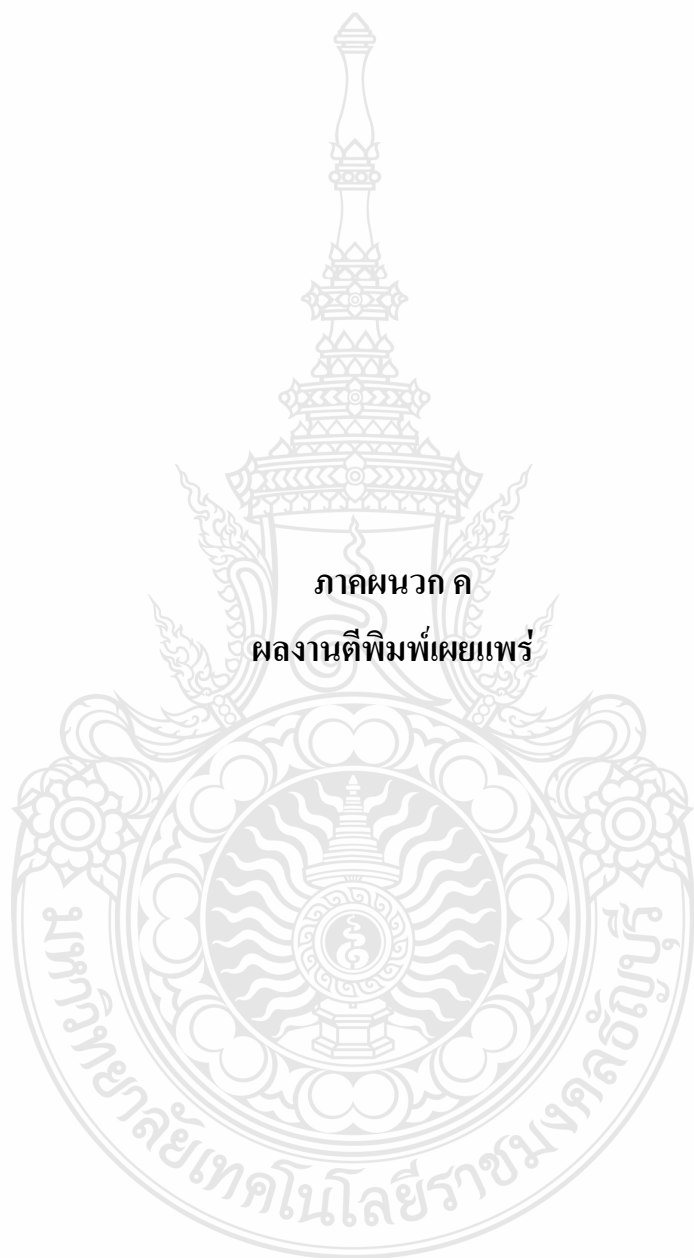
บทความนี้นำเสนอ การทำงานเชิงพลวัตของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมหรือ DVR โดยทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่จุดต่อร่วมในขณะที่เกิดแรงดันตกชั่วขณะ โดยจำลองบนโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าในกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 DVR สามารถชดเชยแรงดันที่จุดต่อร่วมได้ตามกำหนดแสดงสมรรถนะของการควบคุมที่ดี ส่วนในกรณีที่ 3 เกิดการดีเลย์ที่เฟส a ที่เวลา 1/2 ไซเคิลแรก รวมทั้งเกิดแรงดันเกินชั่วขณะที่เฟส b และ c ขนาดประมาณ 1.1 pu และ 1.2 p.u. ที่เวลา 1/2 ไซเคิลแรกหลังจากนั้น DVR สามารถชดเชยแรงดันที่จุดต่อร่วมได้ตามกำหนด

#### 5. เอกสารอ้างอิง

- [1] H.Ezogi, A.Sheikholeslami, M.Tabasi,M.Saeednia " Simalation of Dynamics Voltage Restorer Using Hysterresis Voltage Control" European Journal of scientific Reserch 2009
- [2] RSOLI OMAR, NARUSDIN ABD RAHIM, MARIZAN SULIAMAN "Modeling and Simulation for Voltage sag/Sweels Mitigation using Dynamics Voltage Restorer(DVR) " Journal of Theoretical and Applied Information Technology @ 2005-2009 JATIT
- [3] Jose' H. and Julie D.Zambrano " Control of Thyristor Controlled Series Capacitor Based on Instantaneous Power Theory" IEEE Journal 2008
- [4] P.Booncham and N.Mithulananthan" Understanding of dynamics Voltage Restorers through MATLAB Simulation" Thammasat Int. J. Sc. Tech. Vol.11 N0.3 july-Sept 2006

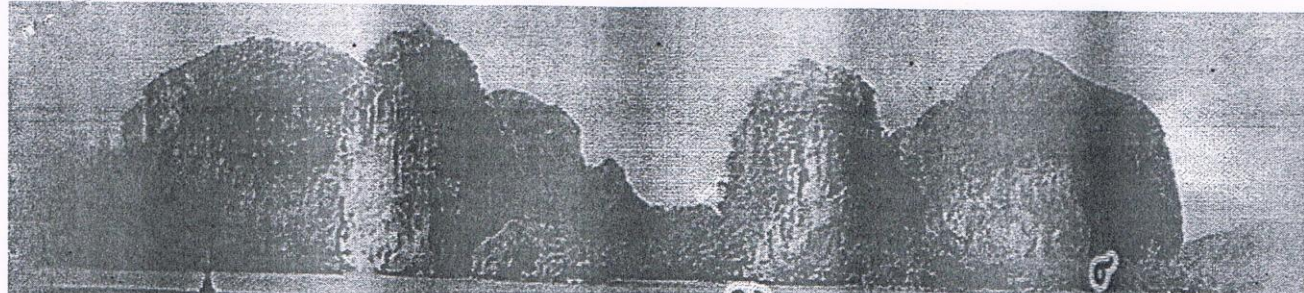
[5] Hirofumi Akagi, Edson Hirokazu Watanabe, Mauricio Aredes "Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioner" Wiley-Interscience A John Wiley & son ,Inc., Publication 2007





ภาคผนวก ค  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





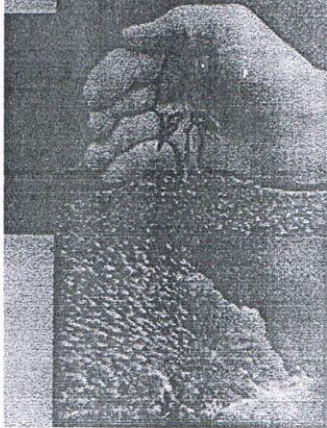
# ฉบับสมบูรณ์

## การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ ครั้งที่ 1

‘ถ่ายทอดงานวิจัยสู่สังคม เพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน’

ระหว่างวันที่ 27-29 สิงหาคม 2551

โรงแรมธรรมรินทร์ ธนา จังหวัดตรัง





## รวมเรื่องเต็ม ฉบับสมบูรณ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลวิชาการ ครั้งที่ 1  
Rajamangala University Conference 2008, 1<sup>st</sup>  
“ถ่ายทอดงานวิจัยสู่สังคม เพื่อการพัฒนาอย่างยั่งยืน”

วันที่ 27-29 สิงหาคม 2551

โรงแรมธรรมรินทร์ ธนา จังหวัดศรีสะเกษ

ประธานคณะกรรมการจัดงาน  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลวิชาการ ครั้งที่ 1  
รองศาสตราจารย์ประจักษ์ ชูพันธ์  
อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ประธานคณะกรรมการจัดงาน ฝ่ายวิชาการ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลวิชาการ ครั้งที่ 1  
รองศาสตราจารย์ ดร. สุวัฒน์ ธีรยุทธ  
ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

### จัดโดย...

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

### **สนับสนุนโดย...**

สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา(สกอ)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ(วช)

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว)

สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ(สนช)

หอการค้าจังหวัดศรี

เครือข่ายการวิจัยภาคใต้ตอนบน

เครือข่ายการวิจัยภาคใต้ตอนล่าง

### **เจ้าของลิขสิทธิ์**

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

### **บรรณาธิการ**

รองศาสตราจารย์ ดร.สุวัฒน์ ธีญรส

### **จัดพิมพ์โดย**

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตรัง

179 หมู่ 3 ตำบลไม้ฝาด อำเภอเสีเกา จังหวัดศรี 92150

Tel: +66 075 274 170, Fax: +66 075 274 171

<http://rdi.rmutsv.ac.th>

**ISBN: 978-974-625-431-1**

---



## Detailed Analysis of Control Strategies for Medium Voltage Dynamic Voltage Restorer

Tanonsak Keawsakunee Paisan Boonchiam

### Abstract

This paper presents the detailed analysis of control strategies for medium voltage dynamic voltage restorer (DVR) that used for enhancing power quality. DVR is a custom power device used to correct voltage sag by injecting voltage as well as power into power distribution systems. A method of determining the exact amount of voltage injection required to correct a specific voltage reduction with minimum power injection is described. Analytical expressions for both magnitude and angle of the injected voltage are also derived. It has been shown that a voltage reduction and power factor should be analyzed before compensating the voltage.

### Introduction

Voltage sags are now one of the most important power quality problems in the power distribution systems [1]. A voltage sag is a momentary decrease in rms ac voltage (0.1 – 0.9 p.u. of the nominal voltage), at the power frequency, of duration from cycles to a few seconds as shows in Fig. 1. Most voltage sags are caused by remote faults, such as single-line-to-ground fault, double line to ground fault on the power distribution system or due to starting of large induction motors and switching of capacitor bank [2].

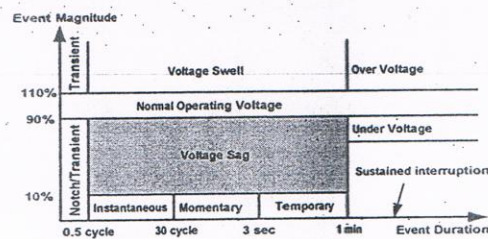


Fig. 1 Voltage Reduction Standard of IEEE Std. 1159-1995.

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 12110 Thailand  
Corresponding author. E-mail: paisan@rmutt.ac.th

A dynamic voltage restorer (DVR) is a custom power device capable of protecting sensitive loads against the voltage variations or disturbances. A DVR is a forced commutated voltage source converter (VSC) that injects a dynamically controlled voltage in series with the supply voltage through three single-phase transformers for correcting the load voltage. When the injected voltage is in-phase with the supply voltage, the desired voltage correction can be achieved with a minimum voltage injection but it may require a considerable amount of active power injection into the system [3]. When the injected voltage leads the supply voltage, the same correction can be made with a lower value of power injection. When the power injection by the DVR is minimized, the same energy storage can be used for a longer period. Such an operation requires careful determination of injected voltage magnitude and angle, however.

The objective of this paper is to determine the magnitude and angle of the DVR injected voltage so that a given voltage sag can be corrected with minimum active power injection into the system. Analytical expressions for the injected voltage magnitude and angle, in terms of voltage sag and power factor, are also derived. Fig. 2 shows the schematic diagram of a typical DVR used for voltage correction. When the supply voltage  $V_s$  changes, the DVR injects a voltage  $V_i$  in such a way that the desired load voltage magnitude can be maintained. DVR is simply a VSC that produces an ac output voltage and injects in series with the supply voltage through a transformer. To correct a given voltage sag, not only voltage but also active and/or reactive power injections are needed. The DVR itself is capable for generating the reactive power, but the injected active power must come from the energy storage part of the DVR. Thus minimization of active power injection is essential to increase the life of the energy storage.

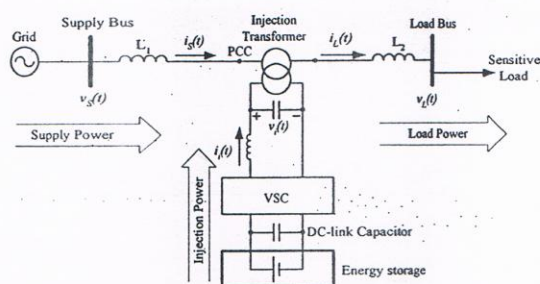


Fig. 2 Schematic diagram of a typical DVR.

This paper is organized as follows: Section 2 presents the control requirement of DVR. The



control strategies are shown in Section 3. Section 4 presents the comparison of control strategies using mathematical analysis. The loop control to reduce transient response and steady state error are presented in Section 5. Finally the conclusion is given in section 6, respectively.

### Control Requirement

A DVR must be able to react very fast on different kinds of voltage sags. The amplitude of the load-side voltage must be restored and for most loads large phase jumps must be avoided. Especially, the correct compensation of single phase voltage sags is a major issue. Control of a DVR can be realized by using dqn-components.

This transformation allows to control DC-components, which is much simpler than AC-components. Since the DVR uses the energy stored in the DC-link, it will be discharged during the compensation. Hence, the DC-link voltage is constantly decreasing during operation mode. Since the amplitude of the fundamental must be kept constant the modulation index must be adapted during the whole time and is therefore not constant. Consequently, the complete amount of energy stored in the DC-link cannot be used, due to the maximum voltage in overmodulation. To minimize cost and devices the needed voltage amplitude for a given sag should be as small as possible. The following section deals with three control strategies, whereby every single one is able to fulfill one of these aspects.

### Control Strategies

As already mentioned different strategies can be used to achieve at least one aspect of an optimized control. The three basic strategies are the Pre-Sag Compensation, the In-Phase-Compensation and the Energy-optimized Compensation. To avoid a loss of power supply, the amplitude of the load voltage has to be restored by the DVR. Therefore, different strategies can be used to achieve this goal.

#### *A. Pre-sag Compensation*

The standard solution for compensating voltage sags is to re-establish the exact voltage before the sag. Therefore, the amplitude and the phase of the voltage before the sag have to be exactly restored. The resulting vector is shown in the following Figure 3. This compensation leads to the lowest distortions at the load, because the voltage at the load is not changed due to the sag. For this strategy, a PLL will be synchronized with the load voltage. As soon as the failure occurs, the PLL will be locked and therefore the phase angle can be restored. Depending on the phase of the new grid voltage, the DVR has to deliver higher voltage amplitude than needed in order to restore the correct voltage magnitude.

Therefore, the system has to be designed for a higher maximum voltage (VDVR) and less energy from the DC-Link can be used.

### B. In-Phase Compensation

As already mentioned, the Pre-Sag Compensation does not lead to a minimized voltage amplitude. This can be realized with the In-Phase Strategy, which is designed to control the DVR with a minimum output voltage. In Fig. 4, the voltages for this strategy are depicted. In contrast to the Pre-Sag version, the voltage is now compensated in phase to the grid voltage after the sag. Hence, the needed voltage amplitude is minimized.

In most cases, a voltage sag leads to a phase jump, therefore the distortions due to phase changes are not minimized. As a consequence, a phase jump will occur at the load, leading to transient currents. If a sensible load is secured, then the In-Phase compensation cannot be used, because it would lead to a loss of power supply. To realize this strategy, the PLL has to be synchronized to the grid voltage itself and therefore will not be locked during the compensation.

### C. Energy Optimized Compensation

Another existing control strategy is to use as much reactive power as possible to compensate the sag. Therefore, the DVR voltage is controlled in such a way that the load current is in phase with the grid voltage after the sag. As long as the voltage sag is quite shallow, it is possible to compensate a sag with pure reactive power and therefore the compensation time is not limited. In Fig.5 the voltages for the energy optimized compensation are depicted.

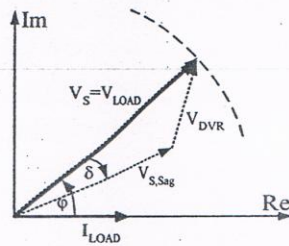


Fig. 3 Pre-Sag Compensation.

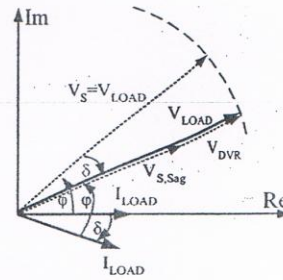


Fig. 4 In-Phase Compensation.



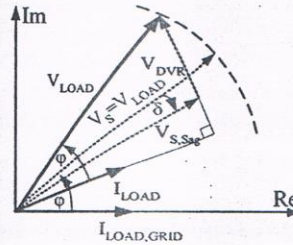


Fig. 5 Energy Minimized Compensation.

Beside the enormous advantage of not requiring active power, this strategy has in most cases two major disadvantages. On the one hand, the phase distortions and on the other hand the needed voltage amplitude are quite high. Furthermore, the compensation with pure reactive power is only possible for shallow sags. If a deep sag occurs, active power is needed and in an extreme case it becomes equal to the Pre-Sag Compensation.

#### Comparison of Different Control Strategies

In this section the already presented control strategies will be analyzed by comparing the needed voltage, active power, maximum compensating time for different sags and power factors. This comparison is based on a medium-voltage DVR system with a constant DC link capacitor and the parameters given in Table I. For these comparisons either the sag depth, phase angle and phase jump will be varied *ceteris paribus*.

Table I: Scenario Parameters.

	parameter	Value
Grid	Nominal grid line to line voltage	380 V
	Frequency	50 Hz
DVR	Switching frequency	5 kHz
	Inverter filter inductance	600 mH
	Inverter filter capacitance	200 $\mu$ F
	DC-link capacitance	47 mF
Injection transformer	Power	60 kVA
	Primary voltage	3.0 kV
	Secondary voltage	0.3 kV
	Leakage impedance	0.05 p.u.
Step-up Transformer	Power	50 kVA
	Primary voltage	0.4 kV
	Secondary voltage	22 kV
	Leakage impedance	0.03 p.u.

Step-down Transformer	Power	50 kVA
	Primary voltage	10 kV
	Secondary voltage	0.4 kV
	Leakage impedance	0.036 p.u.
Case study	Sag depth	0.3 p.u.
	Phase jump	10°
	Apparent power at the load	10 MVA
	Power factor	0.85

#### A. General Equation

First, the equations for the required voltage amplitude, the active power and maximum compensation time will be derived. Considering the previously presented vector diagrams the voltage amplitude for all three strategies can be calculated. Leading to the following equations 1-3:

Pre-Sag Compensation

$$\hat{V}_{inj} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times V_N \times \sqrt{1 + (1 - \varepsilon)^2 - 2(1 - \varepsilon)\cos\delta} \quad (1)$$

where:  $V_N$  = nominal grid voltage

$\varepsilon$  = Sag depth

$\delta$  = Phase jump during short circuit

In-Phase Compensation

$$\hat{V}_{inj} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times V_N \times \varepsilon \quad (2)$$

Energy Optimized Compensation

$$\hat{V}_{inj} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times V_N \times \left( \sin\varphi - \sqrt{(1 - \varepsilon)^2 - \cos^2\varphi} \right) \quad (3)$$

where:  $\varphi$  = phase angle between load current and voltage

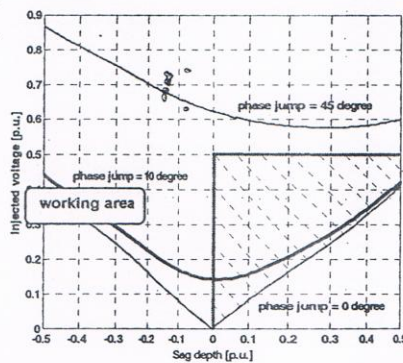


Fig. 6 The relationship between injected voltage and sag depth when used pre-sag method.

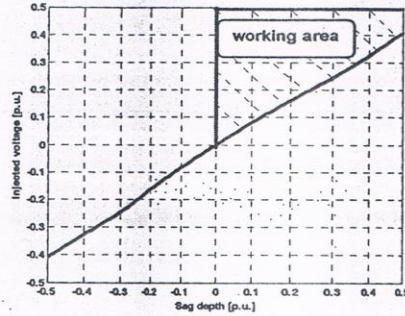


Fig. 7 The relationship between injected voltage and sag depth when used In-phase method

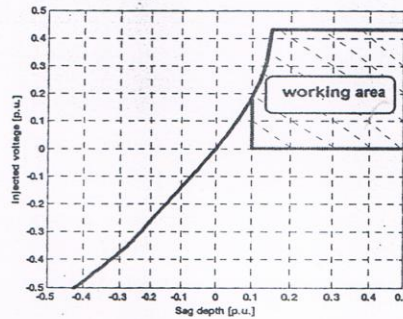


Fig. 8 The relationship between injected voltage and sag depth when used energy optimized method

Next the required active power will be calculated which is also based on the vector diagrams. In general, this power must be equal to the difference between the demanded power of the load and the remaining active power delivered by the grid. Therefore, the active power can be derived for each strategy according to the following equations 4-6:

Pre-Sag Compensation:

$$P_{inj} = 3 \cdot \epsilon \cdot (P_{load} - P_{grid})$$

$$= \sqrt{3} V_N I_N \cdot (\cos \varphi - (1 - \epsilon) \cos(\varphi - \delta)) \quad (4)$$

In-Phase Compensation:

$$P_{inj} = \sqrt{3} V_N I_N \cdot \epsilon \cdot \cos \varphi \quad (5)$$

Energy-Optimized Compensation:

$$P_{inj} = \sqrt{3} V_N I_N \cdot (\cos \varphi - 1 + \epsilon) \quad (6)$$



Based on these equations the maximum compensation time can now be calculated. The active power is limited by the size of the DC-link capacitor and the lowest possible DC link voltage which is sufficient for a proper restoration of the load voltage. Based on these assumptions the following equation can be derived.

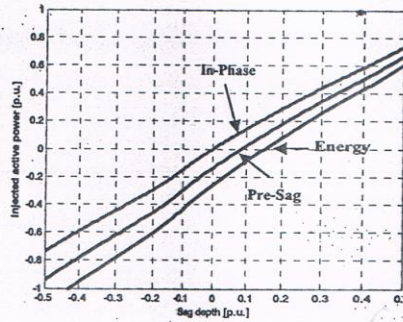


Fig. 9 The relationship between injected power and sag depth when used all methods.

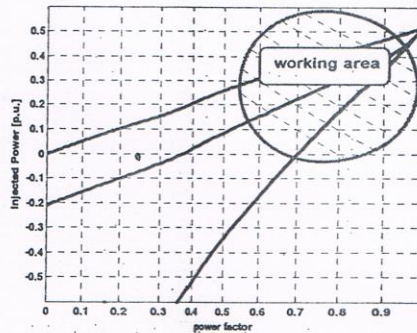


Fig. 10 The relationship between injected power and power factor when used all methods.

### Control Strategy with Different Loop Scheme

To control the DVR output voltages, numerous voltage control schemes have been proposed, e.g. single-loop voltage control, feedforward and feedback control [1,2] (Fig. 3(a)), multi-loop control with an inner current loop and outer voltage loop [3,4] (Fig. 3(b)), etc. A brief discussion on these control schemes with a focus on their effectiveness for the filter LC resonance damping is presented in this subsection.

#### A. Single voltage loop control

Single voltage loop control of DVR (Fig. 3(a)) is commonly used to save extra sensors and it provides simple controller implementation while maintaining its ability of the reference voltage tracking and



satisfying steady-state performance. But the conflicting requirements of the transient and steady-state performance are serious, since larger controller gain is required for good steady-state performance, but this large control loop gain will deteriorate the transient performance and tends to cause an unstable system. If a small gain is used to obtain adequate stability margins, a significant steady-state error may occur.

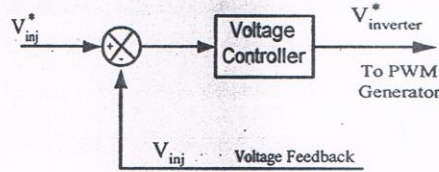


Fig. 11 Single voltage loop control.

*B. Single voltage loop control with feedforward*

To increase the transient response, a feedforward loop is often added from the reference signal to the input of the PWM modulator (Fig. 3(a)) [1, 2]. As seen from Fig. 4, the bandwidth is obviously increased by feeding forward the DVR voltage reference. But the drawback is also obvious as illustrated, where the LC resonance is increased.

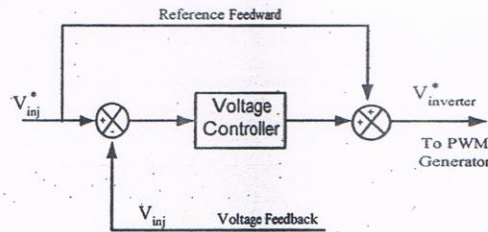


Fig. 12 Single voltage loop control with feedforward

*C. Double loop control*

To have a system with both good transient and steady-state performance, a multi-loop control can be used, with an inner current loop for ensuring fast response as well as good attenuation of the filter LC resonance peak. Although a larger current controller gain  $k_C$  would introduce more damping into the system, the value of  $k_C$  is always limited due to practical considerations such as amplification of capacitor current noise or DC offset of current measurement if any.

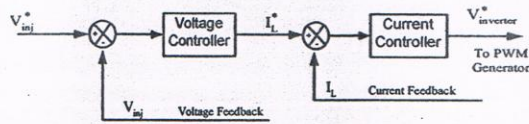


Fig. 13 double loop control.

#### D. Double loop control with feedforward

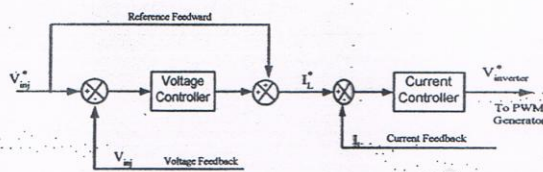


Fig. 14 double loop control with feedforward.

#### Conclusion

This paper presents the detailed analysis of control strategies for medium voltage dynamic voltage restorer (DVR) that used for enhancing power quality. A method of determining the exact amount of voltage injection required to correct a specific voltage reduction with minimum power injection is described. Analytical expressions for both magnitude and angle of the injected voltage are derived. The simulation results show the capabilities of proposed DVR along with the low pass filter in mitigating voltage sag/swell in a 22 kV distribution system.

#### References

- Ghosh, A. and Ledwich, G. *Power Quality Enhancement using Custom Power Devices*. Kluwer Academic Publishers, United States, 2002.
- IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, IEEE Std. 1159, 1995.
- Hingorani, N. G. Introducing Custom Power. *IEEE Spectrum* 32(6), pp. 41-48, 1995.
- D. M. Vilathgamuwa, A.A.D.R. Perera, and S.S.Choi, "Performance improvement of the dynamic voltage restorer with closed-loop load voltage and current-mode control," *IEEE Trans. On Power Electronics*, vol.17, np.5, pp. 824-834, Sept. 2002.

- I. Etxeberria-Otadui, U. Viscarret, S. Bacha, M. Caballero, and R. Rezero, "Evaluation of different strategies for series voltage sag compensation," *Conf. Rec IEEE PESC 2002*, pp. 1797-1802.
- A. Ghosh, and A. Joshi, "A new algorithm for the generation of reference voltage of a DVR using the method of instantaneous symmetrical components," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 22, no.1, pp. 63-65, Jan. 2002.
- Liu, J. W., Choi, S. S., & Chen, S. "Design of step dynamic voltage regulator for power quality enhancement," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no.4, pp. 1403 – 1409, 2002.
- Nielsen, J.G.; Blaabjerg, F.; Mohan, N., "Control strategies for dynamic voltage restorer compensating voltage sags with phase jump," *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE*, vol.2, pp. 1267 - 1273, 4-8 March 2001
- M. J. Newman, D.G. Holmes, J.G.Nielsen, and F. Blaabjerg, "A dynamic voltage restorer (DVR) with selective harmonic compensation at medium voltage level," *Conf. Rec. IEEE IAS 2003*, pp. 1228-1235, 2003

## ประวัติผู้เขียน

**ชื่อ – นามสกุล** นายถนอมศักดิ์ แก้วสกุณี  
**วัน เดือน ปี** 1 มีนาคม 2508  
**ที่อยู่** 99/24 ต.บางกระสอ อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000  
**ประวัติการศึกษา** สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาไฟฟ้ากำลัง จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพ เมื่อ พ.ศ.2533

**ประวัติการทำงาน**  
2527 – 2547 นายช่างเทคนิคสายอากาศ แผนกออกแบบและประมาณราคา การไฟฟ้า นครหลวง  
2535 – ปัจจุบัน วิศวกร สถาบันนวัตกรรม ทีโอที บริษัท ทีโอที จำกัด(มหาชน)

### ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

Tanomsak kaewsakunee, Paisan Boonchiam , “Detailed Analysis of Control Strategies for Medium Voltage Dynamic Voltage Restorer”, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลวิชาการครั้งที่ 1 , วันที่ 27-29 สิงหาคม 2551 ณ. โรงแรมธรรมรินทร์ ธนา จังหวัดตรัง

ถนอมศักดิ์ แก้วสกุณี และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ , “การปรับปรุงเสถียรภาพแรงดันไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรม”, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลวิชาการครั้งที่ 3 วันที่ , วันที่ 24-26 พฤศจิกายน 2553 ณ. ศูนย์ประชุมสถาบันวิจัยจุฬาภรณ์ กรุงเทพฯ

ถนอมศักดิ์ แก้วสกุณี และ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ , “ การจำลองสภาวะการทำงานของอุปกรณ์ชดเชยแรงดันแบบอนุกรมด้วยทฤษฎี Instantaneous Power Theory ”, การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3 , วันที่ 15-17 ธันวาคม 2553 ณ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี