

การออกแบบการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็กเข้ากับกริดโดย  
ใช้การควบคุมแบบเวกเตอร์

**GRID CONNECTION DESIGN OF PERMANENT MAGNET  
SYNCHRONOUS GENERATOR USING VECTOR CONTROL**

สนธยา มั่นหมาย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

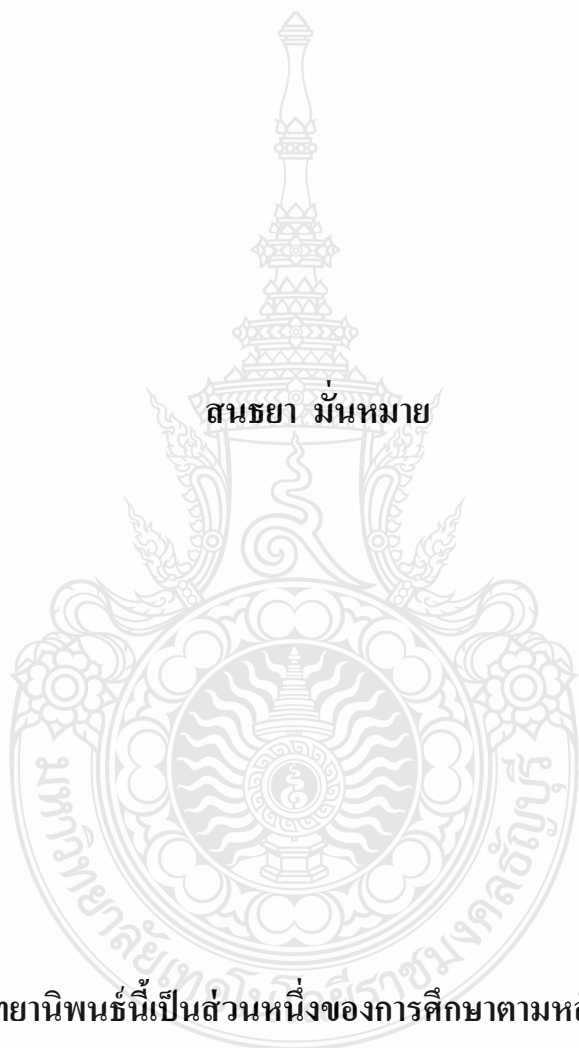
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การออกแบบการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็กเข้ากับ  
กริดโดยใช้การควบคุมแบบเวกเตอร์



สนธยา มั่นหมาย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็กเข้ากับกริดโดยใช้การควบคุมแบบเวกเตอร์

Grid Connection Design of Permanent Magnet Synchronous Generator Using Vector Control

ชื่อ - นามสกุล

ว่าที่ร้อยตรีสนธยา มั่นหมาย

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

อาจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.

ปีการศึกษา

2555

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นภาพร พ่วงพรพิทักษ์, Ph.D.)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมชัย หิรัญวโรดม, Ph.D.)

..... กรรมการ

(อาจารย์ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

วันที่ 10 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2556

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็กเข้ากับกริดโดยใช้การควบคุมแบบเวกเตอร์
ชื่อ – นามสกุล	ว่าที่ร้อยตรี สนธยา มั่นหมาย
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ณัฐภัทร พันธุ์คง, Ph.D.
ปีการศึกษา	2555

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบจำลองของคอนเวอร์เตอร์กำลัง แบบแหล่งจ่ายแรงดัน จำนวน 2 ชุด ขนาด 20 kW ต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็กเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าที่สามารถเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าทำให้การใช้ไฟฟ้ามีคุณภาพและเสถียรภาพขึ้น

การใช้กังหันน้ำที่มีอัตราการไหลคงที่เป็นต้นกำลังต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยที่จำลองการทำงานของกังหันน้ำด้วยซิงโครนัสมอเตอร์เป็นต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรในห้องปฏิบัติการทดลอง เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้าต่อเข้ากับคอนเวอร์เตอร์กำลัง โดยต่อเข้าด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร และต่อเข้าทางด้านระบบกริดการไฟฟ้าตามลำดับ โดยรักษาระดับแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงให้คงที่ 650 โวลต์ ค่าเบี่ยงเบนไม่เกินร้อยละ 10 ใช้เทคนิคเฟสล็อกคัลรวมสร้างสัญญาณควบคุมคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านระบบกริดให้ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบกริดได้อย่างต่อเนื่อง วิเคราะห์การทำงานด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม PSIM กับ Matlab/Simulink ร่วมกับโปรแกรม dSPACE ในการสร้างสัญญาณควบคุมผ่านบอร์ดเชื่อมต่อ DS1104

ผลการทดลองพบว่าเมื่อเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริด ที่เวลา 0.2 วินาที และปลดวงจรรอกที่เวลา 0.4 วินาที ระบบจะมีการกระเพื่อมของแรงดันไฟตรงเพียงเล็กน้อยและระบบควบคุมจะปรับการทำงานของคอนเวอร์เตอร์กำลังเพื่อส่งผ่านกำลังไฟฟ้าเข้าสู่กริดระบบ ในขณะที่เดียวกันกริดระบบจะลดการจ่ายกำลังให้กับโหลดลงเมื่อมีการเชื่อมต่อ และระบบควบคุมยังรักษาระดับแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงให้กลับมาคงที่ได้ภายในเวลา 0.02 วินาที จากระดับแรงดันอ้างอิงไฟตรงที่ต้องการ

**คำสำคัญ:** คอนเวอร์เตอร์กำลัง เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร การควบคุมแบบเวกเตอร์

<b>Thesis Title</b>	Grid Connection Design of Permanent Magnet Synchronous Generator using Vector Control
<b>Name - Surname</b>	Acting Sub. LT. Sontaya Manmai
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Krischonme Bhumkittipich, Ph.D.
<b>Thesis Co-advisor</b>	Mr. Nathabhat Pankong, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2012

## ABSTRACT

This thesis presents the grid connection design of Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) generator using vector control which is controlled via back to back power converter. The objective of this study is to connect the small hydro electricity generator into the grid for improving the power system stability and reliability.

The hydro energy with constant flow rated can generate electricity and transmits the power into power system. The experiment had used synchronous motor coupling directly with PMSG for generating electricity that is driven by hydro turbine simulator in laboratory. The small hydro generator generates the electricity to the B2B power converter and transmits the power to the grid system. The control system has controlled using dSPACE board. The control system must be maintained the DC link voltage at 650 V and 10 % deviation during operation times. During same time the grid side converter injects the active power and reactive power into the grid system. The phase lock loop technique is the one part of detection for power injections. The system analysis is simulated using PSIM and Matlab/Simulink environment.

The results show that the DC voltage has fluctuated at 0.2 s and 0.4 s at synchronizes and desynchronizes times respectively. The power convertor has controlled by voltage controller for generating electricity and injected the active and reactive power to grid system, at the same time the grid side power was small decreased. The voltage controller will adjust the DC-link voltage close to the reference voltage within 0.02 s.

**Keywords:** power converter, permanent magnet synchronous generator, vector control

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี โดยได้รับความเมตตากรุณาให้คำปรึกษาแนะนำจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ดร.ณัฐภัทร พันธุ์คง ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชัย หิรัญวโรดม กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภาพร พ่วงพรพิทักษ์ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทั้ง 5 ท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ประเมินรับรองต้นแบบชิ้นงาน วิจัยและให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในการทำวิจัย ขอขอบคุณศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ขอขอบคุณคณะผู้บริหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะผู้บริหารบริษัทแคเรียร์-ลินด์เร่รีเฟรเจอเรชั่น (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้โอกาสในการทำงาน และดำเนินงานวิจัยจนลุล่วง ขอขอบคุณเพื่อนนักศึกษาระดับปริญญาโททุกคนที่ให้กำลังใจซึ่งกันและกัน ขอขอบคุณบุคลากรบัณฑิตวิทยาลัยทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย ขอขอบคุณครอบครัวมันหมาย โดยเฉพาะคุณ สุชาติ มันหมาย พี่ชายที่ทำงานแดนไกลให้กำลังใจและสนับสนุนทุนทรัพย์ในยามยาก ขอขอบคุณน้ำใจพี่ๆ เพื่อนเก่าๆ ที่ช่วยเหลือในยามขัดสน ทำให้การศึกษา และการทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงด้วยดี และสุดท้ายที่ขาดไม่ได้คือ ลูกภู ลูกผิง และแม่แหม่ม ที่เสียสละเวลาให้พ่อได้ศึกษาหาความรู้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถ นำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

สนธยา มันหมาย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ง
กิตติกรรมประกาศ .....	จ
สารบัญ .....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
สัญลักษณ์และคำย่อ .....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย .....	4
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย .....	4
1.5 ทฤษฎี สมมุติฐานและหรือกรอบแนวความคิดของการวิจัย .....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	5
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	6
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	6
2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก .....	10
2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส .....	11
2.4 วงจรแปลงผันกำลัง .....	17
3 รายละเอียดเกี่ยวกับวิธีดำเนินการวิจัย .....	25
3.1 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน .....	25
3.2 การออกแบบ / เครื่องมือ .....	25
3.3 การหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบขั้วแม่เหล็กถาวร .....	29
3.4 การออกแบบคอนเวอร์เตอร์กำลัง .....	30
3.5 การออกแบบโหลดทางไฟฟ้าเพื่อทดสอบการทำงานของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	35
3.6 การใช้มอเตอร์จำลองแทนต้นกำลังกังหันน้ำ .....	35

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.7 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสแม่เหล็กถาวร .....	36
3.8 การออกแบบเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้า.....	36
3.9 ภาควงจรควบคุม .....	39
3.10 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ L.C (LC Filter) .....	43
3.11 ชุดควบคุมและแสดงผล dSPACE .....	51
4 ผลการจำลองและการทดสอบ .....	53
4.1 การหาค่าจากจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสแบบขั้วแม่เหล็กถาวร	53
4.2 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสแม่เหล็กถาวร .....	54
4.3 ติดตั้งและทดสอบโหลดความต้านทานกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสแม่เหล็กถาวร	55
4.4 ผลการจำลองการทำงานด้านคอนเวอร์เตอร์กำลัง .....	57
4.5 ผลการทดลองการทำงานด้านคอนเวอร์เตอร์กำลัง .....	73
4.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง .....	85
5 สรุป และข้อเสนอแนะ .....	86
5.1 สรุป .....	86
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	87
รายการอ้างอิง.....	89
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก Datasheet.....	92
ภาคผนวก ข อุปกรณ์การทดลอง .....	101
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ .....	109
ประวัติผู้เขียน .....	139



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สถานะสวิทช์เมื่อเชื่อมต่อกับบัสบวกและบัสลบ .....	22
4.1 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบขั้วแม่เหล็กถาวร .....	53



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG แบบ B2B ด้วยกังหันน้ำ ...	2
2.1 ไดอะแกรมของระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG ด้วยกังหันน้ำ .....	8
2.2 ไดอะแกรมคอนเวอร์เตอร์กำลัง B2B .....	9
2.3 ไดอะแกรมคอนเวอร์เตอร์กำลังทางด้านกริดระบบ .....	9
2.4 ไดอะแกรมคอนเวอร์เตอร์กำลังทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	10
2.5 การแปลงเวกเตอร์ abc เป็น dq .....	16
2.6 วงจรเรียงกระแสไดโอดแบบบริดจ์ .....	18
2.7 วงจรเรียงกระแสควบคุมได้แบบบริดจ์ .....	19
2.8 วงจรอินเวอร์เตอร์ .....	20
2.9 วงจรแปลงผันแรงดันแบบ B2B .....	21
2.10 สถานะสวิทช์เมื่อเชื่อมต่อ巴士 .....	22
2.11 สเปซเวกเตอร์ .....	23
3.1 จำลองแรงบิด .....	26
3.2 บล็อกย่อย $i_{sd}, i_{sq}$ ภายในบล็อก PMSG .....	26
3.3 บล็อกย่อย $\omega_{me}, \theta$ ภายในบล็อก PMSG .....	27
3.4 บล็อกย่อยหาค่าแรงดันบนแกนหมุน $u_{sd}, u_{sq}$ ภายในบล็อก PMSG .....	27
3.5 บล็อกย่อยจำลองการหาค่ากำลังแอกทีฟและรีแอกทีฟภายในบล็อก PMSG .....	28
3.6 บล็อกย่อยจำลองการหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กภายในบล็อก PMSG .....	28
3.7 บล็อกย่อยจำลองการหาค่าแรงบิดภายในบล็อก PMSG .....	29
3.8 ไดอะแกรมของคอนเวอร์เตอร์กำลัง .....	30
3.9 ไดอะแกรมการต่อคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	31
3.10 แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้าวงจรเรียงกระแส .....	32
3.11 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อผ่านวงจรเรียงกระแส .....	32
3.12 วงจรเรียงกระแส 3 เฟส เต็มคลื่นแบบไดโอดบริดจ์ .....	33
3.13 ไดอะแกรมวงจรควบคุมในคอนเวอร์เตอร์เซมิคอน .....	33
3.14 ชุดคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบ .....	34
3.15 ตัวเก็บประจุของแรงดันเชื่อมโยงไฟตรง .....	34

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.16 โหลดความต้านทานขนาด 20 kW. ....	35
3.17 มอเตอร์ต้นกำลังขนาด 20 kW. ....	35
3.18 การต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับมอเตอร์ .....	36
3.19 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับมอเตอร์ต้นกำลัง .....	36
3.20 การต่อวงจรวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของ LV25-P .....	37
3.21 ชุดเครื่องมือวัด LV25-P .....	38
3.22 วงจรชุดเครื่องมือวัดกระแส .....	38
3.23 ชุดเครื่องมือวัดกระแส .....	39
3.24 ภาควงจรขับสวิตช์ไอจีบีที .....	40
3.25 ชุดขับสวิตช์ไอจีบีทีโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250 .....	41
3.26 ชุดขับสวิตช์เชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากริดระบบ .....	41
3.27 ไดอะแกรมของระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์กำลังทางด้านการกริดระบบ .....	42
3.28 วงจรสมมูลของวงจรกริดที่ใช้ในการออกแบบ .....	43
3.29 วงจรกริดความถี่ต่ำผ่าน .....	47
3.30 ควบคุมการทำงานของวงจรผ่าน โพรแกรมดีสเปซ และบอร์ด DS1104 .....	51
3.31 วงจรควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่าน โพรแกรมดีสเปซและบอร์ด DS1104 .....	52
4.1 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแม่เหล็กถาวรแบบ D.C. Test .....	54
4.2 การต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับมอเตอร์ .....	54
4.3 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับมอเตอร์ต้นกำลัง .....	55
4.4 การต่อโหลดความต้านทานเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแม่เหล็กถาวร .....	55
4.5 โหลดความต้านทาน .....	56
4.6 กราฟแรงดันค่ายอด $V_{pp}$ .....	56
4.7 แรงดันเชื่อมต่อไฟตรง (DC LINK) .....	57
4.8 แรงดันด้านการกริดระบบ (หน่วยเปอร์เซ็นต์) .....	58
4.9 ขยายช่วง On Grid แรงดันด้านการกริดระบบ (ขยายจากภาพที่ 4.8) .....	58
4.10 ขยายช่วง Off Grid แรงดันด้านการกริดระบบ (ขยายจากภาพที่ 4.8) .....	58
4.11 กระแสด้านการกริดระบบ (หน่วยเปอร์เซ็นต์) .....	59

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.12 ขยายกระแสต้านกริกระบบ (ขยายภาพที่ 4.11) .....	59
4.13 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดต้านกริกระบบ .....	60
4.14 แรงดันด้านออกจากคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริกระบบ .....	61
4.15 แรงดันด้านออกจากคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริกระบบเมื่อผ่านวงจรกรองความถี่ .....	61
4.16 ขยายแรงดันออกจากคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริกระบบ (ขยายภาพที่ 4.15) .....	62
4.17 ขยายแรงดันออกจากคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริกระบบ (ขยายภาพที่ 4.15) .....	62
4.18 กระแสคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริกระบบ .....	63
4.19 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดของคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริกระบบ .....	63
4.20 การแปลงแกนกระแสจากแกนนิ่ง 3 เฟส สู่แกนนิ่ง 2 เฟส .....	64
4.21 การแปลงแกนแรงดันจากแกนนิ่ง 3 เฟส สู่แกนนิ่ง 2 เฟส .....	65
4.22 การแปลงแกนกระแสจากแกนนิ่ง 2 เฟส สู่แกนหมุน 2 เฟส.....	65
4.23 การแปลงแกนแรงดันจากแกนนิ่งสู่แกนหมุน .....	66
4.24 แรงดันที่โหลดความต้านทานขนาด 20 kW .....	67
4.25 ขยายแรงดันที่โหลดความต้านทานขนาด 20 kW (ขยายภาพที่ 4.24) .....	67
4.26 ขยายแรงดันที่โหลดความต้านทานขนาด 20 kW (ขยายจากภาพที่ 4.24) .....	67
4.27 กระแสที่โหลดความต้านทานขนาด 20 kW .....	68
4.28 ขยายกระแสที่โหลดความต้านทานขนาด 20 kW (ขยายจากภาพที่ 4.27) .....	68
4.29 ขยายกระแสที่โหลดความต้านทานขนาด 20 kW (ขยายจากภาพที่ 4.27) .....	69
4.30 การแปลงแกนแรงดัน $\alpha\beta$ to $abc$ เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมคอนเวอร์เตอร์กำลัง .....	69
4.31 กระแสวิตซ์ซึ่งในอุปกรณ์คอนเวอร์เตอร์กำลัง .....	70
4.32 แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ .....	70
4.33 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ .....	71
4.34 จำลองสัญญาณขับเคลื่อนด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์ .....	72
4.35 แรงดันเชื่อมต่อไฟตรงที่ได้จากการทดลอง .....	73
4.36 แรงดันด้านกริกระบบที่ได้จากการทดลอง .....	73
4.37 กระแสและแรงดันด้านกริกระบบก่อนการเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า .....	75

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.38 กระแสด้านกริดระบบเมื่อมีการเชื่อมโยงเข้ากับกริดเมื่อเวลา 100 วินาที .....	75
4.39 กระแสและแรงดันด้านกริดระบบเมื่อมีการเชื่อมโยงเข้ากับกริด เมื่อเวลา 100 วินาที .	76
4.40 แรงดันและกระแสด้านกริดระบบก่อนผ่านวงจรกรองความถี่ .....	77
4.41 แรงดันด้านออกของคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบจากการทดลอง .....	77
4.42 แรงดันและกระแสด้านออกของคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดผ่านวงจรกรองความถี่ ..	78
4.43 ฮาร์โมนิกของคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบ .....	78
4.44 สัญญาณเฟสล็อกคูล .....	79
4.45 สัญญาณยับเกทจากบอร์ด DS1104 .....	80
4.46 สัญญาณยับเกทจากบอร์ด DS1104 ที่ผ่านวงจรยับเกท TLP250 .....	80
4.47 สัญญาณยับเกทจากบอร์ด DS1104 ที่ผ่านวงจรยับเกท TLP250 (ภาพขยาย) .....	81
4.48 การแปลงกระแสรอบ $abc$ เป็น $\alpha\beta$ .....	82
4.49 การแปลงกระแสแกนนิ่ง $\alpha\beta$ เป็น $dq$ จากการทดลอง .....	82
4.50 การแปลงแรงดันระบบ $abc$ เป็น $\alpha\beta$ .....	83
4.51 การแปลงแรงดันแกนนิ่ง $\alpha\beta$ เป็นแกนหมุน $dq$ .....	83
4.52 ค่าเดดไทม์ของสวิตช์ไอจีบีทีที่กึ่งบนและกึ่งล่าง .....	84
4.53 สัญญาณ T1/TP และ T2/TP เชื่อมต่อกับบล็อก DS1104 SL_CP_PWMSV .....	84
4.54 สัญญาณ Sector สำหรับเชื่อมต่อกับบล็อก DS1104 SL_CP_PWMSV .....	85

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

B	แรงต้านทานจากความหนืด (Viscous Friction)
B2B	Back to Back Converter
DFIG	Double Fed Induction Generator
$i_{sd}, i_{sq}$	กระแสสเตเตอร์ในแกน d,q (d,q Axis Stator Currents)
J	แรงเฉื่อย (Moment of Inertia)
L	Inductance
Ld, Lq	ค่าความเหนี่ยวนำในระบบ d,q
$L_{lr}$	ความเหนี่ยวนำรั่วไหลโรเตอร์ (Rotor Leakage Inductance)
$L_{ls}$	ความเหนี่ยวนำรั่วไหลสเตเตอร์ (Stator Leakage Inductance)
$L_m$	ค่าความเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (Magnetizing Inductance)
PLL	Phase Lock Loop
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator
$R_r$	ความต้านทานของโรเตอร์ (Rotor Resistance)
$R_s$	ความต้านทานของสเตเตอร์ (Stator Resistance)
$R_f$	ความต้านทานของโรเตอร์ (Rotor Resistance)
SCIG	Squaral cage Induction Generator
Td	แรงบิดของแรงต้านทานแห้ง (Dry Friction Torque)
TL	แรงบิดของโหลด (Load Torque)
$U_{sd}, U_{sq}$	แรงดันสเตเตอร์ในแกน d,q (d,q Axis Stator Voltages)
$\omega_e$	ความเร็วทางไฟฟ้าในหน่วย เรเดียนต่อวินาที (Rad/sec)
WRIG	Wound Rotor Induction Generator
WRSG	Wound rotor Synchronous Generator
Z	Impedance
$\Psi_d, \Psi_q$	เส้นแรงแม่เหล็กค้ำของสเตเตอร์ในแกน d,q (d,q Axis Stator Flux)
$\Psi_m$	เส้นแรงแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการผลิตไฟฟ้าที่มาจากพลังงานเชื้อเพลิงจากแหล่งฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ โดยพลังงานดังกล่าวเมื่อนำมาผ่านกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจะมีข้อจำกัดในด้านการสร้างปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้งเป็นพลังงานที่สิ้นเปลืองและมีแนวโน้มที่จะเข้าสู่ภาวะขาดแคลนในอนาคต ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่ หรือจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน เช่น แสงอาทิตย์ ลม น้ำ ชีวมวล ไฮโดรเจน และแรงคลื่นจากทะเล ซึ่งพลังงานเหล่านี้เป็นพลังงานที่สะอาดที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างไม่รู้จักหมดสิ้น อีกทั้งยังเป็นการช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อันเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดสภาวะโลกร้อน โดยปัจจุบันพลังงานทางเลือกจึงมีบทบาทที่สำคัญในการนำมาผลิตกระแสไฟฟ้า โดยการนำพลังงานจลน์จากแหล่งพลังงานจากธรรมชาติมาเปลี่ยนเป็นพลังงานทางกลเพื่อเป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า ทดแทนการใช้พลังงานเชื้อเพลิงจากแหล่งพลังงานสิ้นเปลือง

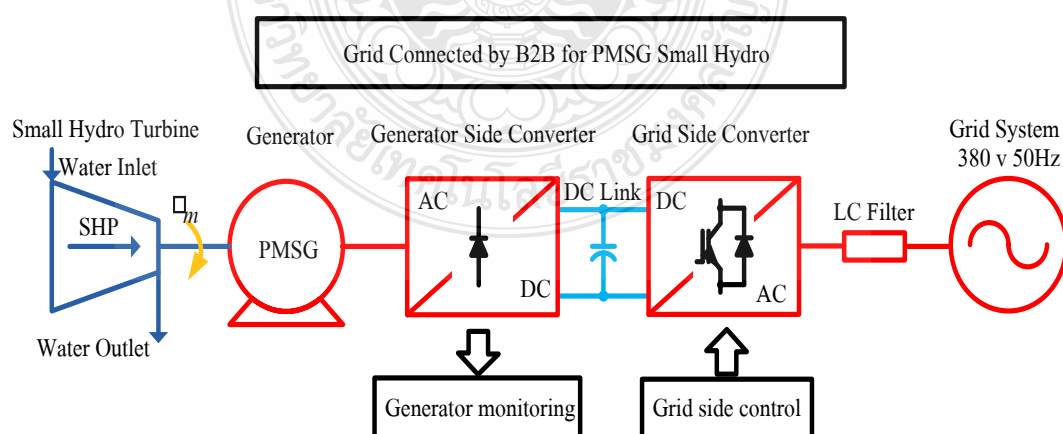
โครงสร้างโดยทั่วไปของชุดขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนส่วนใหญ่จะใช้พลังงานลมเป็นต้นกำลังในการหมุนชุดขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือเรียกว่าเครื่องกังหันลม (Wind Turbine) ซึ่งมีขนาดพิกัดกำลังของเครื่องกังหันลม ตั้งแต่ 50 kW ถึง 5 MW โดยโครงสร้างของกังหันลมสามารถแบ่งออกได้ 2 ลักษณะ คือ แบบมีระบบเกียร์และแบบไม่มีระบบเกียร์ ต่อเข้ากับชุดขับเคลื่อนเพื่อเป็นต้นกำลังให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งแบบซิงโครนัสและแบบอินเวอร์เตอร์ เพื่อเชื่อมต่อพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตออกมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่กริดระบบ (Grid Connected System) โดยผ่านคอนเวอร์เตอร์กำลัง (Power Converter) หรือเชื่อมต่อเข้ากับกริดระบบโดยตรง ซึ่งโหมดการทำงานของกังหันลมนั้นจะถูกแบ่งออกได้ 2 ลักษณะ คือ แบบปรับความเร็วรอบได้และแบบความเร็วรอบคงที่

สำหรับโหมดการทำงานแบบความเร็วรอบคงที่นั้นกังหันลมจะต่อทำงานร่วมกับระบบเกียร์ เพื่อรักษาความเร็วรอบให้คงที่ตลอดเวลาในการหมุนชุดขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วจะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอินเวอร์เตอร์ โดยทำการเชื่อมต่อพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่กริดระบบโดยตรง ซึ่งระบบขับเคลื่อนนี้มีข้อดีในเรื่องของโครงสร้างง่ายไม่ซับซ้อน มีความแข็งแรงทนทาน และค่าบำรุงรักษาค่อนข้างต่ำ แต่อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของกังหันลมที่ทำงานแบบความเร็วรอบคงที่คือ ประสิทธิภาพการทำงานของการส่งผ่านพลังงานจลน์จากกังหันลมเป็นพลังงานไฟฟ้าเข้า

ผู้ก่ิรระบบก่อนข้างต่ำ และต้องการการบำรุงรักษาชุดระบบเกียร์ก่อนข้างสูงมากและคุณภาพระบบไฟฟ้าทางด้านกริดต่ำ เนื่องจากระบบขับเคลื่อนกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ (Reactive Power) จากกริดระบบเข้าสู่ตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) ต่ำ

ในกรณีของโหมดการทำงานแบบปรับความเร็วรอบได้ ซึ่งมีใช้งานมากที่สุดในปัจจุบัน โดยจะใช้กังหันลมต่อขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอินดิคเตอร์โรเตอร์ (Wound Rotor) หรือเรียกว่า Doubly Fed Induction Generator (DFIG) ซึ่งด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต่อเข้ากับกริดระบบโดยตรง ในขณะที่ด้านโรเตอร์ต่อผ่านคอนเวอร์เตอร์กำลังชนิดคู่ หรือเรียกว่า Back-to-Back Converter (B2B) ซึ่งเป็นระบบขับเคลื่อนที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถควบคุมการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่กริดระบบได้สูงสุด อีกทั้งยังสามารถควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟที่แยกอิสระต่อกันได้ ทำให้คุณภาพระบบไฟฟ้าสูงขึ้น แต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการบำรุงรักษาทางแวนด้านโรเตอร์

แนวความคิดสำหรับวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอจะ ใช้กับแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ได้มาจากแหล่งพลังงานน้ำทดแทนการใช้แหล่งพลังงานลม โดยจะใช้กังหันน้ำ (Hydro Turbine) เปลี่ยนพลังงานจลน์ในการหมุนขับเคลื่อนกำลังของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และจะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดอินดิคเตอร์โรเตอร์แบบกระตุ้นด้วยแม่เหล็ก (PMSG) แทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า DFIG แบบดั้งเดิม บนพื้นฐานของการควบคุมการทำงานในโหมดปรับความเร็วรอบได้ พลังงานไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG จ่ายออกมาจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับกริดระบบโดยผ่านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง ด้วยคอนเวอร์เตอร์กำลัง B2B เช่นเดียวกับระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า DFIG ดังแสดงโครงสร้างพื้นฐานของระบบขับเคลื่อนที่นำเสนอตามภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG แบบ B2B ด้วยกังหันน้ำ



จากภาพที่ 1.1 โครงสร้างของระบบขับที่นำเสนอมจะประกอบไปด้วยชุดกึ่งพ่นน้ำ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นต้นกำลังให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG เป็นเครื่องจักรกลที่มีแม่เหล็กถาวรฝังอยู่ในตัว โดยจะทำหน้าที่เป็นวงจรกระตุ้นสนามแม่เหล็กให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งไม่จำเป็นต้องมีวงจรกระตุ้นสนามแม่เหล็ก (Field Excitation) สำหรับกระตุ้นสนามแม่เหล็กเหมือนกับเครื่องกำเนิดเชิงโครนัสทั่วไป อีกทั้งลักษณะของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นแบบหลายขั้วแม่เหล็ก (Multi Pole) จึงสามารถประยุกต์ใช้งานได้ด้วยตัวขับกึ่งพ่นน้ำที่หมุนในย่านความเร็วรอบต่ำได้ โดยไม่ต้องต่อชุดเกียร์เพิ่ม ทำให้ไม่ต้องเสียค่าบำรุงรักษาในส่วนของชุดเกียร์ ภาควงจรกำลังสุดท้ายเป็นคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบ B2B ทำหน้าที่ส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่กริดของระบบ การทำงานของคอนเวอร์เตอร์กำลังนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) คอนเวอร์เตอร์กำลังต่อต้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยจะแปลงกำลังไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะทำงานในลักษณะเรียงกระแสไฟฟ้า (Rectifier) ในส่วนที่ 2) คอนเวอร์เตอร์กำลังต่อต้านกริดระบบ ทำหน้าที่แปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากวงจรเชื่อมโยงไฟตรงให้เป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับป้อนเข้าสู่กริดระบบ ซึ่งจะควบคุมแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา และสามารถควบคุมการป้อนกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟรีแอกทีฟของคอนเวอร์เตอร์กำลัง B2B ที่นำเสนอในโครงการนี้ด้วยวิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector Control)

สำหรับแผนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์ที่นำเสนอนี้ ในการนำแหล่งพลังงานน้ำที่ได้มาจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนมาป้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่กริดระบบของการไฟฟ้า โดยการศึกษาวิจัยเชิงเทคนิคในโครงการนี้จะทำการศึกษา วิเคราะห์ และออกแบบจากการทำงานทั้งหมดของระบบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นจะออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบของระบบ ทั้งภาควงจรกำลังและภาควงจรควบคุมที่ได้นำเสนอตามภาพที่ 1.1 ในขนาดพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG ขนาด 20 kW ใช้ภายในห้องปฏิบัติการ เพื่อทำการศึกษา วิเคราะห์ ทดสอบ และแก้ไขการทำงานต่างๆ ทั้งหมดของระบบขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากห้องปฏิบัติการ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 ออกแบบและสร้างคอนเวอร์เตอร์กำลัง แบบแหล่งจ่ายแรงดัน B2B จำนวน 2 ชุด โดยมีขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 20 kW ซึ่งต่อเข้ากับทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG และทางด้าน กริดระบบแหล่งจ่ายการไฟฟ้าตามลำดับ โดยทำการรักษาระดับแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงคงที่เท่ากับ 650 โวลต์ และเชื่อมต่อเพื่อส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้ากับกริดระบบไฟฟ้า 380 โวลต์ 3 เฟส 50 เฮิร์ต (380 V/ 3Ph/ 50 Hz) โดยจะถูกควบคุมด้วยวิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์

1.2.2 วิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของระบบที่นำเสนอด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม PSIM ร่วมกับแมทแล็บซิมมูลิ่งค์ และทดสอบจริงในห้องวิจัยปฏิบัติการโดยจะสร้างจากเครื่องต้นแบบขนาด 20 kW เพื่อศึกษา วิเคราะห์ระบบควบคุม เปรียบเทียบทั้งในเชิงทฤษฎีและในเชิงปฏิบัติการจริงด้วยตัวควบคุมประมวลผลแบบดิจิทัล dSPACE

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ออกแบบ สร้าง และทดสอบระบบการควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG ขนาด 20 kW เชื่อมต่อเข้ากับกริดระบบ 380/220 โวลต์ 50 เฮิร์ต โดยใช้ตัวขับเคลื่อนกำลังเป็นซิงโครนสมอเตอร์ที่ปรับความเร็วรอบได้ด้วยอินเวอร์เตอร์แทนกังหันน้ำที่มีการปรับความเร็วรอบคงที่และปรับความเร็วรอบได้

1.3.2 ทดสอบและวิเคราะห์ระบบควบคุมกับโหลดเชิงเส้น 3 เฟส สมดุลและไม่สมดุล ทั้งสภาวะคงตัวและสภาวะชั่วขณะ

1.3.3 ระบบควบคุมต้องรักษาแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงให้คงที่ ในขณะที่เชื่อมต่อเข้ากับกริดระบบของการไฟฟ้า โดยรักษาระดับแรงดันไม่เกินร้อยละ  $\pm 10$  ของค่าแรงดันไฟตรง 650 โวลต์

### 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาและวิเคราะห์การทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ PMSG ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม PSIM ร่วมกับโปรแกรมแมทแล็บซิมมูลิ่งค์ ทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG ในการจ่ายโหลดเชิงเส้นแบบสมดุลในห้องปฏิบัติการ โดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ที่ปรับความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เป็นตัวจำลองภาระการทำงานของกังหันน้ำ

1.4.2 ภากระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ด้วยคอนเวอร์เตอร์กำลัง B2B ทำการออกแบบ สร้างและทดสอบ ชุดคอนเวอร์เตอร์กำลังจำนวน 2 ชุด ขนาดพิกัดกำลัง 20 kW เพื่อใช้เป็นเครื่องต้นแบบในห้องปฏิบัติการสำหรับใช้งานกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG ขนาด 20 kW

### 1.5 ทฤษฎี สมมุติฐาน และหรือกรอบแนวความคิดของการวิจัย

การแปลงรูปพลังงานจากพลังงานจลน์ให้เป็นพลังงานกลศาสตร์ สำหรับใช้เป็นตัวขับเคลื่อนกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับภาระโหลดหรือเชื่อมต่อเข้ากับกริดระบบ โดยได้นำเสนอแนวทางการพัฒนา ออกแบบ และสร้างทดสอบ เพื่อเป็นเครื่องต้นแบบ โดยใช้พลังงานจากแหล่งน้ำในการขับเคลื่อนกังหันน้ำขนาดเล็ก (Small Hydro Turbine) เพื่อเป็นต้นกำลังในการหมุน

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG และใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ด้วยวงจรถอนเวอร์เตอร์ B2B ในการเชื่อมต่อพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG เข้าไปช่วยจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับกริดระบบ สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และขจัดปัญหาด้านคุณภาพระบบไฟฟ้า และที่สำคัญอย่างยิ่งพลังงานที่ได้จากแหล่งน้ำภายในประเทศไทย ซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียนที่มีอยู่มากมายหลายแหล่ง จึงมีความเหมาะสมและมีความเป็นไปได้สูงที่จะพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านระบบควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG ด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่กริดระบบ ลดการนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศ และพัฒนาเครื่องต้นแบบที่สามารถนำไปใช้งานได้จริงต่อไป

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้องค์ความรู้ใหม่ในเชิงวิชาการ ด้านวิจัยและพัฒนา สำหรับการนำมาออกแบบ สร้างและทดสอบเครื่องต้นแบบระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG ด้วยกังหันน้ำเชื่อมต่อเข้ากับกริดระบบ

1.6.2 ได้ผลการศึกษารายละเอียด การวิเคราะห์ และทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG และคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบ B2B ด้วยวิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์ ที่สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าได้ทั้งด้าน Active Power และ Reactive Power

1.6.3 เป็นการพัฒนางานวิจัยด้านเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมไฟฟ้าของตนเองสำหรับนำพลังงานหมุนเวียนหรือพลังงานทางเลือกจากแหล่งผลิตพลังงานธรรมชาติมาใช้ให้เกิดประโยชน์

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาทฤษฎีหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้มอเตอร์ซิงโครนัสแบบต่างๆ โดยที่มีระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังทั้งที่แบบควบคุมได้ และควบคุมไม่ได้ รวมไปถึงข้อดีข้อเสียของการใช้ชุดเฟืองทดรอบเพื่อปรับความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และยังต้องพิจารณาในเรื่องของคุณภาพของระบบไฟฟ้า โดยทางด้านออกของคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบจะต่อตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวกรองกระแสด้านออกของคอนเวอร์เตอร์กำลังที่ไหลเข้าสู่กริดให้มีความใกล้เคียงคลื่นไซน์ (Sinusoidal) เนื่องจากคอนเวอร์เตอร์กำลังนี้ถูกควบคุมให้ทำงานที่ความถี่การสวิตช์ที่สูง ทำให้มีความง่ายต่อการกรองกระแสฮาร์มอนิกส์ ซึ่งจะส่งผลต่อค่า THD (Total Harmonic Distortion) ของคลื่นกระแสที่ต่ำหลังจากผ่านชุดตัวเหนี่ยวนำแล้ว จะเชื่อมต่อเข้ากับระบบสายส่งนั้นพบว่าล้วนต้องการให้การกำเนิดไฟฟ้าเป็นไปได้อย่างต่อเนื่องและคงที่เพื่อเสถียรภาพของการใช้งาน ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะพูดถึงการเชื่อมต่อเข้ากับกริดของการไฟฟ้า และในการเชื่อมต่อนั้นจะมองที่แรงดันและความถี่เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อเข้ากับกริดระบบได้ อีกทั้งยังต้องสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนเข้ากับกริดได้อย่างต่อเนื่องและมีเสถียรภาพ สำหรับงานวิจัยที่ได้ใช้อ้างอิงเป็นแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์นี้

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับงานวิจัยที่ได้ใช้อ้างอิงเป็นแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์นี้ จะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้พลังงานจากลมในการสร้างพลังงานกลในการขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อสร้างพลังงานไฟฟ้า โดยมีหลากหลายวิธีในการพัฒนาเทคนิคเพื่อขยับกังหันลมโดย

F.D.Bianchi, H. D.Battista and R. J. Mantz. [1] ได้นำเสนอระบบขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า SCIG โดยใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอะซิงโครนัส หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ถูกขับเคลื่อนกำลังด้วยกังหันลมที่ทำงานในโหมดความเร็วรอบคงที่ ซึ่งได้นำเสนอระบบเกียร์ทดความเร็วรอบระหว่างกังหันลมกับด้านเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในขณะที่ทางด้าน สเตเตอร์ต่อโดยตรงเข้ากับกริดระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยระบบขับนี้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าแอกทีฟเข้าสู่กริดได้โดยตรง แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะดึงกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กส่งผลทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของกริดระบบต่ำ จำเป็นที่จะต้องต่อชุดตัวเก็บประจุเพื่อทำหน้าที่แก้ค่าตัว

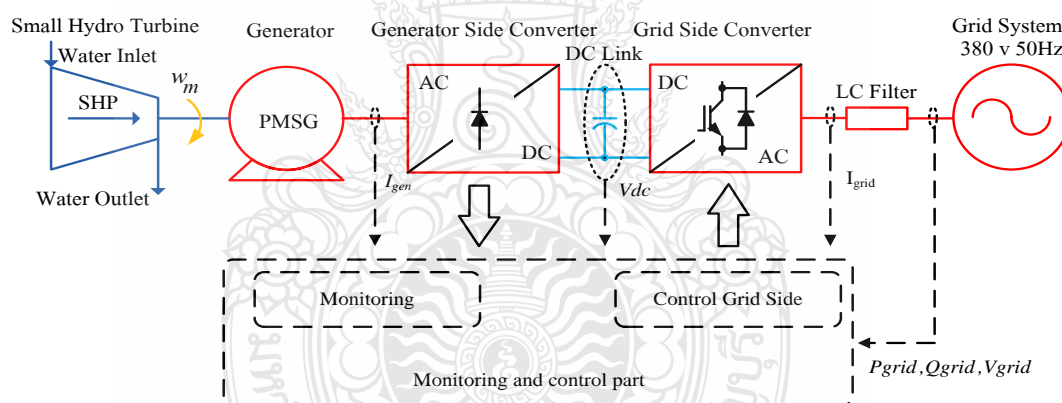
ประกอบกำลังไฟฟ้าของกริดให้สูงขึ้นเข้ากับทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยภาพรวมระบบขั้วนี้เป็นระบบขั้วด้วยกังหันลมที่มีโครงการที่ง่ายไม่ซับซ้อน มีความปลอดภัยค่อนข้างสูง แต่จะมีข้อจำกัดในเรื่องของการบำรุงรักษาระบบทางกลของภาคเกียร์ทดความเร็วรอบและปัญหาในเรื่องของคุณภาพระบบไฟฟ้า

F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. Timbus. [2], R. S. Pena, R. J. Cardenas, G. M. Asher and J. C. Clare. [3], B. Bose. [4], R. Teodorescu and F. Blaabjerg. [5], G. Poddar and V.T. Ranganathan .[6], R. Pena, J. C. Clare, and G. M. Asher. [7], ได้นำเสนอระบบขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยกังหันลม ที่สามารถทำงานในโหมดปรับความเร็วรอบได้ วัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของกังหันลมให้สูงขึ้น โดยใน [2] ใช้โครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอินเวอร์ตแบบวาร์ดโรเตอร์ WRIG ที่ทางด้านวงจรรอเตอร์จะต่อตัวต้านทานปรับค่าได้จากภายนอก เพื่อทำหน้าที่ช่วยปรับความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ทำงานร่วมกับกังหันลมและชุดเกียร์ทด ในขณะที่ทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต่อโดยตรงเข้ากับด้านกริดระบบ วิธีการดังกล่าวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของกำลังงานกลจากกังหันลมผ่านตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้สูงขึ้นได้ (เมื่อเทียบกับวิธี SCIG) แต่ถึงอย่างไรก็ตามระบบขั้วก็ยังดึงกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟจากกริดระบบลงมายังตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าจากทางด้านกริดระบบยังคงต่ำ อีกทั้งยังเกิดความสูญเสียในเรื่องของความร้อนบนตัวความต้านทานในวงจรรอเตอร์ ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต่ำลง

ซึ่งในงานวิจัย [5-9] ได้นำเสนอระบบการขับเคลื่อนที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ด้วยโครงสร้างแบบวาร์ดโรเตอร์ ที่เรียกว่า DFIG โดยทางด้านสเตเตอร์จะต่อโดยตรงเข้ากับกริดระบบ ในขณะที่ด้านโรเตอร์ จะใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ด้วยวงจรรคอนเวอร์เตอร์กำลัง B2B ให้ทำหน้าที่เป็นเรกติไฟเออร์และอินเวอร์เตอร์ ที่ต่อระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับด้านกริดตามลำดับ ในการส่วนผ่านกำลังไฟฟ้าออกมาทางวงจรรอเตอร์ผ่านชุดคอนเวอร์เตอร์กำลัง B2B ทั้ง 2 ตัว ด้วยวิธีการควบคุมแบบต่างๆ เช่น การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยตรง การควบคุมแรงบิดโดยตรง และการควบคุมแบบเวกเตอร์ ซึ่งขนาดพิกัดกำลังของคอนเวอร์เตอร์กำลังจะมีค่าประมาณร้อยละ 20 ถึง ร้อยละ 30 ของขนาดพิกัดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ยานความเร็วรอบในการทำงานประมาณร้อยละ  $\pm 30$  ของความเร็วซิงโครนัส ระบบขั้วนี้มีข้อเด่นในเรื่องขนาดพิกัดกำลังของคอนเวอร์เตอร์ที่มีขนาดไม่สูงมาก การสูญเสียของคอนเวอร์เตอร์จึงต่ำ อีกทั้งวิธีการควบคุมสามารถควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ทั้งแอกทีฟและรีแอกทีฟ แต่อย่างไรก็ตามระบบขั้วนี้มีข้อจำกัดในเรื่องของการบำรุงรักษาวงแหวนและแปรงถ่านของวงจรรอเตอร์

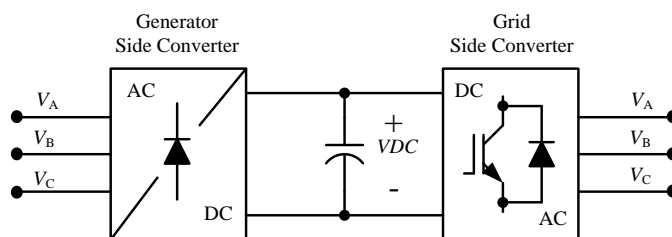
สุดท้าย R. Datta and V. T. Ranganathan. [7], R. Cardenas, R. Pena, M. Perez, J. Clare, G. Asher, and F. Vargas. [8] และ W. Leonhard. [9] ได้นำเสนอระบบขับเคลื่อนกังหันลมโดยใช้เครื่องกำเนิดแบบซิงโครนัสทั้งเป็นแบบกระตุ้นสนามแม่เหล็กด้วยไฟฟ้ากระแสตรงหรือแบบแม่เหล็กถาวร ที่สามารถทำงานในโหมดปรับความเร็วรอบได้ โดยไม่จำเป็นต้องใช้ชุดเกียร์ทดความเร็วและใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์กำลัง B2B แบบพิกัดเต็มกำลังต่ออยู่ระหว่างด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและด้านกริดระบบตามลำดับ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการนำกังหันน้ำมาเป็นตัวขับเคลื่อนกำลังแทนกังหันลมนั้น จะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจลน์จากพลังงานน้ำที่ไหลผ่านตัวกังหันน้ำ เพื่อทำให้เป็นพลังงานกลใช้สำหรับขับเคลื่อนเพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG โดยตรงในส่วนคอนเวอร์เตอร์กำลัง B2B ใช้วิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector Control) โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ภาค คือทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และภาคควบคุมทางด้านกริดระบบ โดยจะควบคุมค่าแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา ดังแสดงไดอะแกรมของระบบควบคุมที่นำเสนอตามภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ไดอะแกรมของระบบขับเคลื่อนกังหันไฟฟ้า PMSG ด้วยกังหันน้ำ

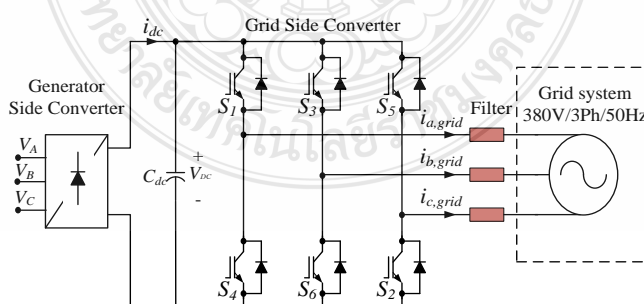
ในปัจจุบันภาคคอนเวอร์เตอร์กำลัง B2B ได้รับความนิยมนำมาประยุกต์ใช้กับระบบขับเคลื่อนกังหันลมอย่างแพร่หลาย ในวิทยานิพนธ์นี้ได้แนะนำนำมาใช้กับระบบขับเคลื่อนกังหันน้ำโดยที่คอนเวอร์เตอร์กำลัง B2B ต่างแยกกันทำงานหรือแยกการควบคุมกันอย่างอิสระต่อกัน แต่จะเชื่อมโยงต่อวงจรถึงกันด้านบัสไฟตรง และใช้ตัวเก็บประจุทำหน้าที่กรองการกระเพื่อมของแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงที่ต่อขนานอยู่กับคอนเวอร์เตอร์ B2B ทั้ง 2 ข้าง ไดอะแกรมโครงสร้างของคอนเวอร์เตอร์กำลัง B2B แสดงไว้ในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ไคอะแกรมของคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบ B2B

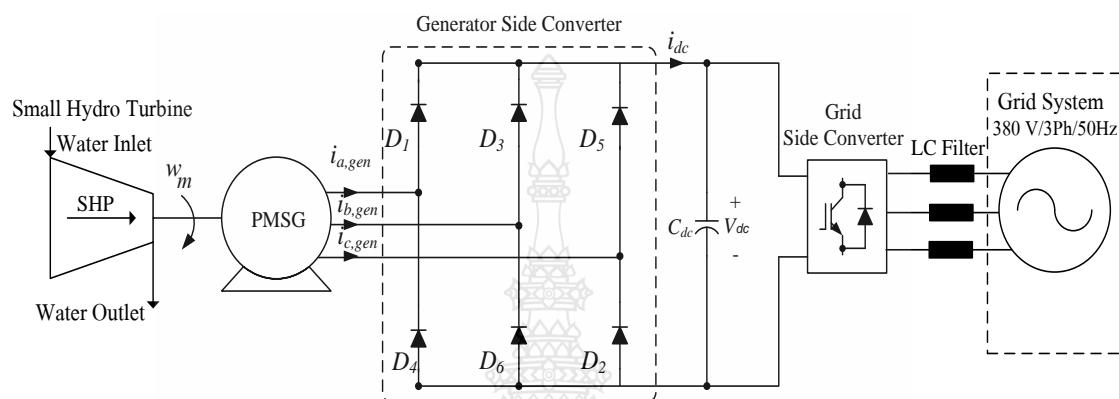
จากภาพที่ 2.2 จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าจะไหลได้ในทิศทางเดียว (Uni-Polar Directional) กล่าวคือคอนเวอร์เตอร์กำลังสามารถทำงานเป็นเรกติไฟเออร์ (Rectifier) และอินเวอร์เตอร์ (Inverter) โดยในอันดับแรกแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Voltage) จะถูกแปลงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC Voltage) โดยผ่านชุดคอนเวอร์เตอร์กำลังทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะทำงานในโหมดเรกติไฟเออร์ (AC-to-DC) เพื่อเป็นวงจรเรียงกระแส สำหรับคอนเวอร์เตอร์กำลังที่ต่ออยู่ด้านกริดระบบก็จะทำงานในโหมดอินเวอร์เตอร์ (DC-to-AC) โดยจะแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากบัสเชื่อมโยงไฟตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับเชื่อมต่อเข้าสู่กริดระบบ โดยภาคควบคุมคอนเวอร์เตอร์ ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา และต้องมีค่าแรงดันที่สูงกว่าค่าแรงดันสูงสุด (Peak Voltage) ของทางด้านกริดระบบ ข้อเด่นของวิธีการควบคุมนี้คือ จะให้ผลการตอบสนองที่รวดเร็วและสามารถควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าได้

ระบบควบคุมจะใช้วิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟตรงเชื่อมโยงของบัสไฟตรงให้มีค่าคงที่ตลอดเวลา ดังแสดงได้ตามภาพที่ 2.3 และภาพที่ 2.4 ตามลำดับ



ภาพที่ 2.3 ไคอะแกรมของคอนเวอร์เตอร์กำลังทางด้านกริดระบบ

ภาพที่ 2.3 วงจรสมมูลของคอนเวอร์เตอร์กำลังทางด้านกริดระบบต่ออยู่กับแรงดันเชื่อมโยงไฟตรง ในวงจรกำลังประกอบด้วยวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ (Full Bridge Converter) ซึ่งใช้สวิตช์กำลัง ไอจีบีที จำนวน 6 ตัว โดยต่อกันอยู่แบบบริดจ์ และจะถูกควบคุมการสวิตช์ด้วยเทคนิค SVPWM (Space Vector Modulation) โดยวิธีการควบคุมจะกล่าวรายละเอียดในหัวข้อวิธีการดำเนินโครงการ



ภาพที่ 2.4 โดอะแกรมของคอนเวอร์เตอร์กำลังทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ภาพที่ 2.4 วงจรสมมูลของคอนเวอร์เตอร์กำลังทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โครงสร้างของภาคกำลังจะประกอบไปด้วยไดโอดกำลังจำนวน 6 ตัว โดยต่อกันอยู่แบบบริดจ์ ทำงานเป็นวงจรเรียงกระแส 3 เฟส เต็มคลื่นแบบไดโอดบริดจ์ ไม่มีการควบคุมโดยการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าไปทิศทางเดียว

## 2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำขนาดเล็ก

สำหรับพลังงานกลที่จะใช้เป็นต้นกำลังในการขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรนั้น จะมาจากกังหันน้ำ ซึ่งมีสองตัวแปรที่สำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของกำลังที่จะได้รับจากน้ำตก คือ อัตราการไหลของน้ำผ่านกังหันและความสูงระหว่างน้ำเข้ากังหันกับทางออกของกังหันน้ำ ในการออกแบบเลือกกังหัน สามารถที่จะปรับตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งเพื่อเลือกใช้ตัวต้นกำลังกังหันน้ำชนิดใดได้เหมาะสมกับพื้นที่ใช้งานและขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้าที่ต้องการใช้ ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$P = gdQH \quad (2.1)$$

โดยที่ P คือกำลังที่ได้จากน้ำตก (วัตต์)



Q คืออัตราการไหลของน้ำผ่านเครื่องกังหันน้ำ (ลูกบาศก์-เมตรต่อวินาที)

g คือค่าความเร่งของน้ำเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.807 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup>)

d คือความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

H คือความสูงของน้ำตกหรือศักย์น้ำ (เมตร)

และการคำนวณหาปริมาณไฟฟ้าที่ต้องการผลิตเป็นดังสมการที่ 2.2

$$W = Ptnf \quad (2.2)$$

โดยที่ W คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง)

P คือ กำลังน้ำตก (กิโลวัตต์)

t คือ ระยะเวลาการผลิต (ชั่วโมง)

n คือ ประสิทธิภาพของกังหันน้ำ-เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0.5 - 0.9

f คือ สัมประสิทธิ์สำหรับความผันผวนของการไหลของน้ำในลำธาร

### 2.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส [10 - 15]

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวรเป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่ไม่ต้องการกระแสช่วยในการสร้างสนามแม่เหล็ก โดยจะใช้แม่เหล็กถาวรในการสร้างสนามแม่เหล็กส่วนนี้แทน ซึ่งทำให้เครื่องกำเนิดชนิดนี้ไม่ต้องมีแปรงถ่านและสลีปรังรวมไปถึงขนาดก็จะเล็กลงไปด้วย สามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ Interior Magnet Type (IPMSG) และ Surface Mounted Magnet Type (SPMSG)

2.3.1 Interior Magnet Type จะมีค่าอินดักแตนซ์ในแนวแกน d น้อยกว่าแกน q ในช่องว่างของอากาศ ( $L_d < L_q$ ) ผลจะทำให้ต้องเพิ่มรีลักแตนซ์ในการหาค่าแรงบิดของเครื่องกำเนิดชนิดนี้ด้วย

2.3.2 Surface Mounted Magnet Type เครื่องกำเนิดชนิดนี้จะมีค่าของสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นบนผิวหน้าของโรเตอร์ ซึ่งมีค่าความซึมซาบของสนามแม่เหล็กประมาณเท่ากับ 1 ซึ่งหมายความว่าช่องว่างของอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ใหญ่มาก ทำให้ค่ารีลักแตนซ์ไม่มีผลกระทบต่อแรงบิดของเครื่องกำเนิด สมการเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร

โดยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบ SPMSG ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อแทนในแบบจำลองในกรณีที่ต้องการควบคุมแรงบิด จากสมการที่ 2.3 จะเห็นได้ว่าแรงบิดทางไฟฟ้าจะเท่ากับผลรวมของแรงบิดของโหลดทางกล, แรงต้านจากความฝืด, แรงต้านขณะไม่มี

โหลด และแรงเฉื่อยของทางกล กล่าวคือเมื่อต้องการแรงบิดทางไฟฟ้าให้มากขึ้นจะต้องเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนทางกลให้มากขึ้น หรือต้องการให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนได้ตามความเร็วที่กำหนด ก็จะต้องป้อนแรงบิดไฟฟ้าให้กับเครื่องกลไฟฟ้าเท่ากับผลรวมของโหลดทั้งหมดนั่นเอง โดยในห้องทดลองของวิทยานิพนธ์นี้ใช้มือในการปรับปุ่มควบคุมความถี่ของอินเวอร์เตอร์ เพื่อควบคุมความเร็วรอบของซิงโครนัสมอเตอร์ซึ่งใช้เป็นต้นกำลังทางกลแทนกังหันน้ำให้มีความเร็วรอบเพิ่มขึ้นหรือลดลง เพื่อใช้ขับแกนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วแม่เหล็กถาวรให้จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้กับวงจรเรียงกระแส 3 เฟส แบบไดโอดบริดจ์ จะเห็นได้ว่าเมื่อปรับความถี่มากขึ้นความเร็ว  $\omega_m$  เพิ่มขึ้นก็จะได้แรงบิดทางไฟฟ้ามากขึ้นตามสมการทางกลทั่วไปของเครื่องจักรกล (The General Mechanical Equation of the Machine)

$$T_e = T_l + B\omega_m + T_d + J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.3)$$

โดยที่  $T_l$  คือแรงบิดของโหลด (Load Torque)  
 $B$  คือแรงต้านทานจากความหนืด (Viscous Friction)  
 $T_d$  คือแรงบิดของแรงต้านทานแห้ง (Dry Friction Torque)  
 $J$  คือแรงเฉื่อย (Moment of Inertia)

การหาค่ากำลังของเครื่องกลไฟฟ้าค่า สามารถเขียนแสดงในรูปแบบของสมการที่ 2.4 จะเห็นได้ว่ามาจากความเร็วทางกลคูณอยู่กับแรงบิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

$$P_{em} = \omega_m T_e = \frac{3}{2} \omega_e (\psi_d i_{sq} - \psi_q i_{sd}) \quad (2.4)$$

โดยที่  $\omega_m$  เป็นความเร็วทางกลของโรเตอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วทางไฟฟ้าและความเร็วทางกล คือ

$$\omega_e = \frac{p}{2} \omega_m \quad (2.5)$$

โดยที่  $p$  เป็นจำนวนของขั้วแม่เหล็ก

ดังนั้นจึงสามารถแทนค่าลงในสมการทำให้ได้สมการแรงบิดที่มีอยู่ในระบบคู่อันดับ  $d, q$  ด้านล่างนี้

$$T_e = \frac{3}{2} \times \frac{P}{2} (\psi_d i_{sq} - \psi_q i_{sd}) \quad (2.6)$$

และเมื่อนำสมการ Flux Equations จาก

$$\psi_d = L_d i_{sd} + \psi_m \quad (2.7)$$

$$\psi_q = L_q i_{sq} \quad (2.8)$$

มาแทนค่าในสมการแรงบิดก็จะได้สมการแรงบิดที่นำไปใช้สร้างแบบจำลองดังนี้

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} (\psi_m i_{sq} + (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}) \quad (2.9)$$

และเมื่อไม่คำนึงถึงค่าความเหนี่ยวนำในเทอมที่สองของสมการ 2.9 จะได้สมการที่จะนำมาสร้างแบบจำลองอีกสมการหนึ่งคือ

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \psi_m i_{sq} \quad (2.10)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.11 - 2.14 จะเห็นได้ว่ากำลังแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนั้นเปลี่ยนแปลงได้ตามความเร็วในการหมุนทางกลและจำนวนขั้วแม่เหล็ก ซึ่งได้ถูกออกแบบมาก่อนแล้วและยากต่อการปรับเปลี่ยนในการใช้งาน แต่ยังมีตัวแปรที่สามารถจะนำมาควบคุมได้อีกคือการควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กและกระแสบนแกนหมุน  $i_{sq}, i_{sd}$  โดยหลังจากที่แทนสมการฟลักซ์แม่เหล็กด้วยสมการที่ 2.7 และ 2.8 ก็จะได้สมการที่ 2.9 ซึ่งมีการแยกจากกันของฟลักซ์ ก็จะได้สมการที่ 2.10 ได้แสดงถึงการควบคุมแรงบิดทางไฟฟ้าด้วยกระแส  $i_{sq}$  โดยจัดรูปสมการได้ใหม่ดังแสดงในสมการที่ 2.14 แต่ในการสร้างบล็อกของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในที่นี้จะต้องใช้อินพุตของบล็อกเป็นแรงบิดและเอาต์พุตเป็น  $i_{sd}$  และ  $i_{sq}$  ดังนั้นจึงต้องทำการปรับปรุงสมการใหม่ดังนี้

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} (\psi_m i_{sq} + (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}) \quad (2.11)$$

$$\frac{4T_e}{3p} = i_{sq} (\psi_m + (L_d - L_q) i_{sd}) \quad (2.12)$$

$$\frac{4T_e}{3p \cdot i_{sq}} = (\psi_m + (L_d - L_q) i_{sd}) \quad (2.13)$$

$$i_{sd} = \frac{4T_e - \psi_m (3p \cdot i_{sq})}{(L_d - L_q) (3p \cdot i_{sq})} \quad (2.14)$$

และปรับปรุงสมการแรงบิดอีกสมการหนึ่งได้ดังนี้

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} \psi_m i_{sq} \quad (2.15)$$

$$i_{sq} = \frac{4T_e}{3p \cdot \psi_m} \quad (2.16)$$

สมการเส้นแรงแม่เหล็กในระบบแกน  $d, q$  (Flux Equations in  $d, q$  system) สมการเส้นแรงแม่เหล็กสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\psi_d = L_d i_{sd} + \psi_m \quad (2.17)$$

$$\psi_q = L_q i_{sq} \quad (2.18)$$

โดยที่  $L_d, L_q$  คือค่าความเหนี่ยวนำ  
 $\psi_m$  คือค่าเส้นแรงแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวร

สมการแรงดันในระบบ  $d, q$  สามารถหาค่าแรงดันในระบบโดยมีอินพุตเป็นกระแสในระบบ  $d, q$  เช่นกัน และใช้ค่าฟลักซ์จากสมการเส้นแรงแม่เหล็ก โดยเขียนได้ดังนี้

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q \quad (2.19)$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_q}{dt} - \omega_e \psi_d \quad (2.20)$$

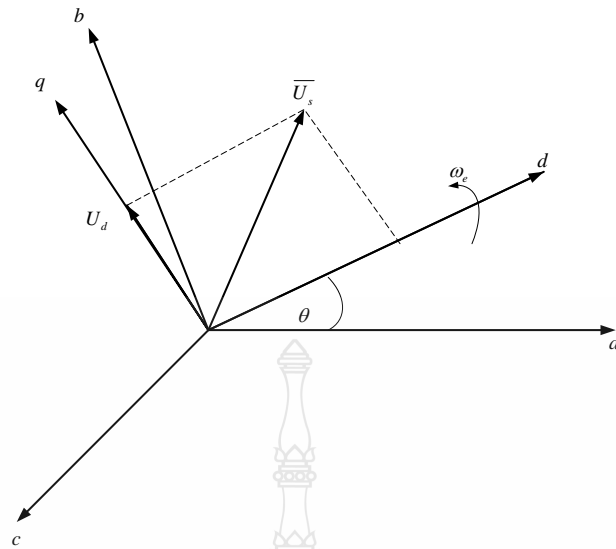
- โดยที่  $u_{sd}, u_{sq}$  คือแรงดันสเตเตอร์ในแกน  $d, q$  ( $d, q$  Axis Stator Voltages)  
 $i_{sd}, i_{sq}$  คือกระแสสเตเตอร์ในแกน  $d, q$  ( $d, q$  Axis Stator Currents)  
 $R_s$  คือความต้านทานสเตเตอร์ (Stator Resistance)  
 $\psi_d, \psi_q$  คือเส้นแรงแม่เหล็กสเตเตอร์ในแกน  $d, q$  ( $d, q$  Axis Stator Flux Linkage)  
 $\omega_e$  คือความเร็วทางไฟฟ้าในหน่วย เรเดียนต่อวินาที (rad/sec)

### 3.2.5 สมการการแปลงแรงดันปาร์ก (Park's Transformation)

จากสมการการแปลงที่อยู่ในรูปเมตริกซ์ซึ่งแปลงแรงดันปกติและมีจำนวนเฟสเป็น 3 เฟส โดยจะแปลงเป็นแรงดันระบบ  $d, q$  ดังสมการสมการที่ 2.21 ใช้สำหรับการแปลงแรงดันโคออร์ดิเนต จากแกนนิ่ง 3 เฟส ไปสู่แกนหมุน 2 เฟส เพื่อง่ายต่อการสร้างสัญญาณควบคุม โดยที่สมการนี้สามารถใช้ได้ในด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และด้านกริระบบ

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

โดยที่  $u_{sd}, u_{sq}$  เป็นองค์ประกอบของ  $d, q$  ของเวกเตอร์แรงดันของสเตเตอร์ และ  $\theta$  เป็นมุมระหว่างแกนคงที่ของสเตเตอร์ และแกน  $d$  เป็นแกนหมุนของโรเตอร์ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การแปลงเวกเตอร์  $a, b, c$  เป็น  $d, q$

แต่ในการเขียนแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าส่วนของบล็อกนี้นั้นจำเป็นต้องใช้อินพุตเป็น  $u_{sd}, u_{sq}$  จึงต้องทำการปรับปรุงสมการใหม่โดยใช้กฎของ Clark ดังนี้

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} \cdot \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

ดังนั้นจะสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$u_a = u_{sd} \cos \theta - u_{sq} \sin \theta \quad (2.24)$$

$$u_b = u_{sd} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) - u_{sq} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.25)$$

$$u_c = u_{sd} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) - u_{sq} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.26)$$

ในการแปลงแกนหมุนไปสู่แกนนิ่งเพื่อใช้ในการแสดงผลหรือสร้างสัญญาณควบคุมโดยกฎของปาร์ก ตามสมการที่ 2.21 และถ้าต้องการแปลงจากแกนสองเฟสโคออร์ดิเนตให้กลับไปสู่สามเฟสโคออร์ดิเนต โดยใช้สมการของ คล้าค ดังสมการที่ 2.22 - 2.23 นำสมการที่ได้ไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรมแมทแล็บซิมมูลิ่งค์โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบแบบขั้วแม่เหล็กถาวรที่หาได้จาก [10] เพื่อจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อหาค่าที่จำเป็นต่อการสร้างสัญญาณควบคุม หรือทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดลองก่อนที่จะนำไปทดลองใช้งานจริงกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการต่อไป

## 2.4 วงจรแปลงผันกำลัง (Power Converter) [17,18]

วงจรแปลงผันกำลังประกอบไปด้วยแหล่งพลังงาน สวิตช์ และองค์ประกอบของการสะสมพลังงานซึ่งประกอบไปด้วย อินдукแตนซ์ (Inductance) ค่าคาปาซิแตนซ์ (Capacitance) และค่าความต้านทาน (Resistance) ซึ่งวงจรแปลงผันเกิดจากการนำอุปกรณ์ดังกล่าวมาต่อกัน

### 2.4.1 วงจรเรียงกระแสสามเฟส

ทำหน้าที่แปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง ซึ่งเป็นที่นิยมมากในวงการอุตสาหกรรมสำหรับโหลดขนาดใหญ่

#### ก) วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไดโอด

วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไดโอดเป็นวงจรที่มีโครงสร้างง่ายๆ ไม่ซับซ้อน กระแสไฟฟ้าไดโอดจะเท่ากับกระแสไฟฟ้าโหลด เพื่อหากระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสของแหล่งจ่ายจะพิจารณาจากกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ที่โหนด  $abc$

$$\begin{aligned} i_a &= i_{D1} - i_{D4} \\ i_b &= i_{D3} - i_{D6} \\ i_c &= i_{D5} - i_{D2} \end{aligned} \quad (2.27)$$

โดยไดโอดแต่ละตัวจะนำกระแสเพียงหนึ่งในสามของคาบเวลา ดังนั้นจะได้

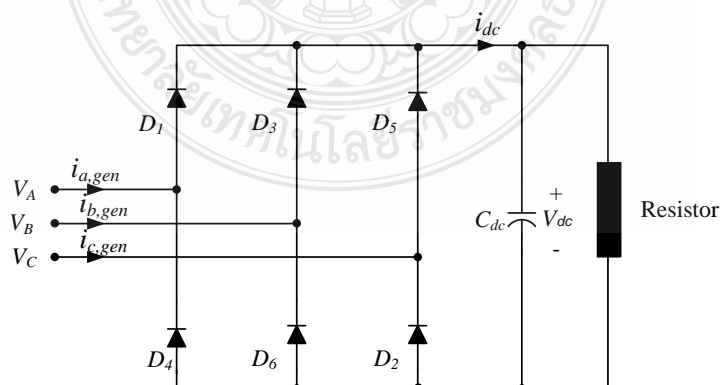
$$\begin{aligned} i_{D,av} &= \frac{1}{3} I_{o,av} \\ i_{D,rms} &= \frac{1}{\sqrt{3}} I_{o,rms} \\ i_{s,rms} &= \sqrt{\frac{2}{3}} I_{o,rms} \end{aligned} \quad (2.28)$$

โดยที่	$i_{D,av}$	คือกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของไดโอด
	$i_{D,rms}$	คือรากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสไดโอด
	$i_{s,rms}$	คือรากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสแหล่งจ่าย
	$i_{o,av}$	คือกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่โหลด
	$i_{o,rms}$	คือรากของกำลังสองเฉลี่ยของกระแสโหลด

ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยด้านออกหรือค่าองค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าเท่ากับ

$$V_o = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} V_{m,L-L} \sin(\omega t) d(\omega t) = 0.955 V_{m,L-L} \quad (2.29)$$

$V_{m,L-L}$  คือค่าแรงดันไฟฟ้าขั้วต่อระหว่างสายซึ่งจะมีค่าเท่ากับ  $\sqrt{2} V_{L-L,rms}$



ภาพที่ 2.6 วงจรเรียงกระแสไดโอดแบบบริดจ์

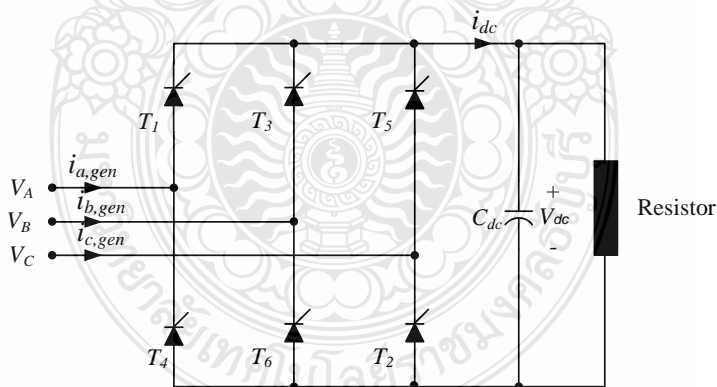


ข) วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมเฟส

วงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบควบคุมเฟสโดยใช้ไคริสเตอร์แทนไดโอด ดังแสดงในภาพที่ 2.6 เป็นแบบหกพัลส์ จะยังไม่นำกระแสจนกว่าไคริสเตอร์จะถูกไบอัสไปข้างหน้าและมีกระแสเกตจ่ายเข้าที่ขาเกตของไคริสเตอร์ ดังนั้นการแปลงแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟสของแหล่งจ่ายสามารถถูกหน่วงเวลาได้ ค่ามุมหน่วงนำกระแสไฟฟ้าที่ถูกหน่วงไป  $\alpha$  จะถูกอ้างอิงเมื่อไดโอดเริ่มนำกระแสไฟฟ้าในวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดมุมหน่วงนำกระแสไฟฟ้าคือ ช่วงเวลาระหว่างไคริสเตอร์ถูกไบอัสไปข้างหน้า ค่าแรงดันเฉลี่ยด้านออกมีความสัมพันธ์กับมุมหน่วงนำกระแสไฟฟ้าและค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส ดังสมการ

$$V_o = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} V_{m,L-L} \sin(\omega t) d(\omega t) = 0.955 V_{m,L-L} \cos \alpha \quad (2.30)$$

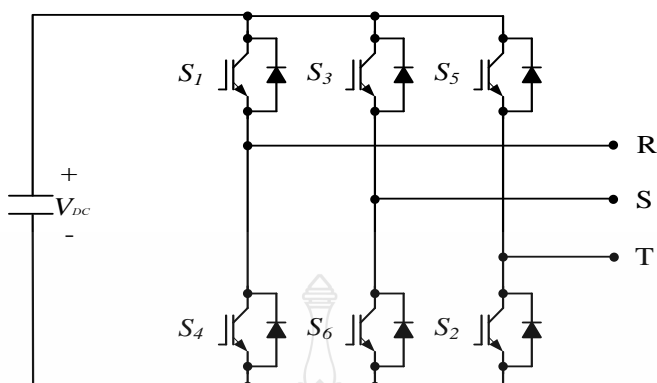
ค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยด้านออกมีค่าสูงสุดเท่ากับกรณีไดโอดเมื่อ  $\alpha = 0$  และมีค่าต่ำสุดเมื่อ  $\alpha = 180$  องศา



ภาพที่ 2.7 วงจรเรียงกระแสควบคุมได้แบบบริดจ์

#### 2.4.2 วงจรอินเวอร์เตอร์สามเฟส

เป็นวงจรแปลงผันไฟตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบควบคุมได้ โดยสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าได้ทั้งขนาดและความถี่



ภาพที่ 2.8 วงจรอินเวอร์เตอร์

จากสมการ 2.31 สามารถที่จะคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้จากค่าแรงดันไฟตรง และค่าความถี่ในการสวิตช์  $D_a$ ,  $D_b$  และ  $D_c$

$$\begin{aligned} u_{a0} &= \frac{U_{DC}}{3} (2D_a - D_b - D_c) \\ u_{b0} &= \frac{U_{DC}}{3} (2D_b - D_a - D_c) \\ u_{c0} &= \frac{U_{DC}}{3} (2D_c - D_b - D_a) \end{aligned} \quad (2.31)$$

โดยที่  $u_a, u_b$  และ  $u_c$  คือค่าแรงดันเฟส  
 $U_{DC}$  คือค่าแรงดันไฟตรง

และสามารถหากระแสของแรงดันเชื่อมโยงไฟตรง ตามสมการที่ 2.32

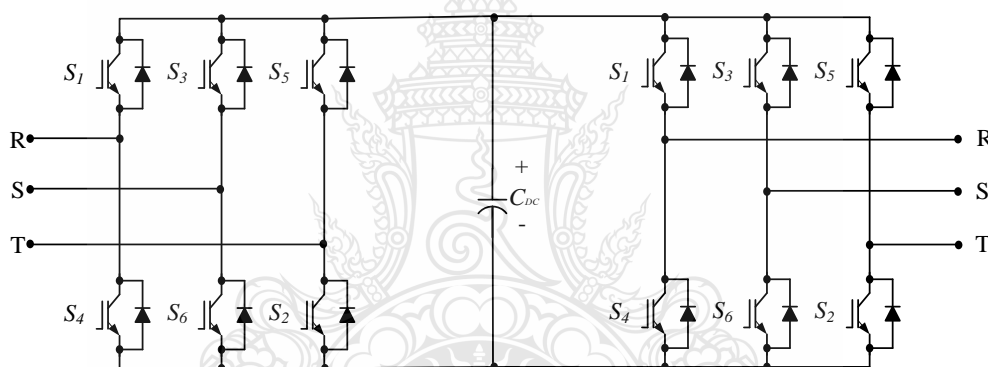
$$i_{DC} = [D_a \quad D_b \quad D_c] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

โดยที่  $i_a, i_b, i_c$  คือ กระแสในสาย

ก) อินเวอร์เตอร์แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสามเฟสแบบพีคดับเบิลยูเอ็ม

เพื่อที่จะให้ได้แรงดันที่สามารถควบคุมได้ทั้งขนาดและความถี่และมีความสมดุลสามเฟส จึงต้องมีเฟสห่างกัน 120 องศา ของความถี่หลักมูล จึงต้องใช้ภาพลูกคลื่นสามเหลี่ยมเปรียบเทียบกับแรงดันควบคุมภาพไซน์สามภาพคลื่นที่เฟสต่างกัน 120 องศา

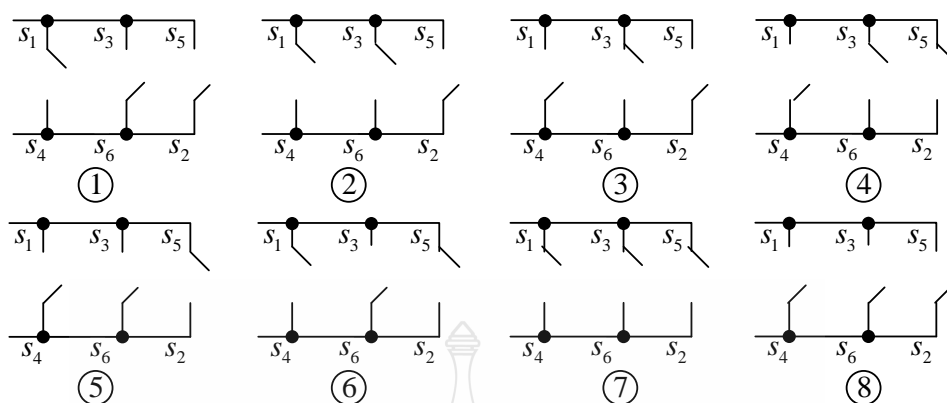
ข) วงจรแปลงผันแรงดันไบโพลาร์แบบหลังชนหลัง (Back to Back Bi-Polar Converter) จะประกอบไปด้วยคอนเวอร์เตอร์กำลังสองตัวต่อเรียงกันแบบคอมมอนร่วม โดยมีคาปาซิเตอร์ เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและด้านกริดระบบ นอกจากนี้จะเป็นตัวกรองความถี่ของคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะทำหน้าที่อยู่ในโหมดเรียงกระแส และทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบขณะทำหน้าที่เป็นอินเวอร์เตอร์เพื่อส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟเข้าสู่กริดระบบ



ภาพที่ 2.9 วงจรแปลงผันแรงดันแบบ B2B

#### 2.4.3 เทคนิคการควบคุมแบบเวกเตอร์

หลักการของเทคนิคการมอดูเลตโดยทั่วไปนั้นจะเป็นการปรับแรงดันไฟฟ้าด้านออกให้มีความถี่ประกอบของความถี่หลักมูลมีค่ามากที่สุดและมีฮาร์โมนิกส์ น้อยที่สุดซึ่งเทคนิคการควบคุมแบบ SVPWM จะทำให้ได้แรงดันด้านออกเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 15 จากการสวิตซ์ซึ่งแบบ SPWM และสามารถที่จะควบคุมได้ทั้งขนาดและความถี่ ซึ่งเหมาะสำหรับโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงง่ายหรือมีขนาดใหญ่ๆ ในการทำงานของไอจีบีทีทั้งหกตัวสามารถที่จะสร้างแรงดันออกได้ถึง 8 สถานะ โดยมีทั้งสถานะที่ไม่เป็น 0 และสถานะที่เป็น 0 และอีกสถานะหนึ่งจะเกิดขึ้นในปริภูมิว่าง (Space Vector) สัญญาณอ้างอิงที่เกิดจากการทำงานของสวิตซ์เป็นแปดสถานะ เพื่อให้ง่ายต่อการจัดลำดับการสวิตซ์ กำหนดให้  $T_{A+} = T_1, T_{B+} = T_3, T_{C+} = T_5, T_{A-} = T_4, T_{B-} = T_6, T_{C-} = T_2,$



ภาพที่ 2.10 สถานะของสวิตช์เมื่อเชื่อมต่อับัส

วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสเมื่อแต่ละเฟสเชื่อมต่อกับบัสบวกหรือบัสลบ โดยที่เฟสใดเชื่อมต่อกับบัสบวกจะแสดงสถานะเป็น 1 โดยในทางกลับกันเฟสใดที่ต่อกับบัสลบจะเป็น 0 โดยจะแสดงสถานะดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สถานะสวิตช์เมื่อเชื่อมต่อกับบัสบวกและบัสลบ

สถานะลำดับที่	เฟส A	เฟส B	เฟส C
1	1	0	0
2	1	1	0
3	0	1	0
4	0	1	1
5	0	0	1
6	1	0	1
7	1	1	1
8	0	0	0

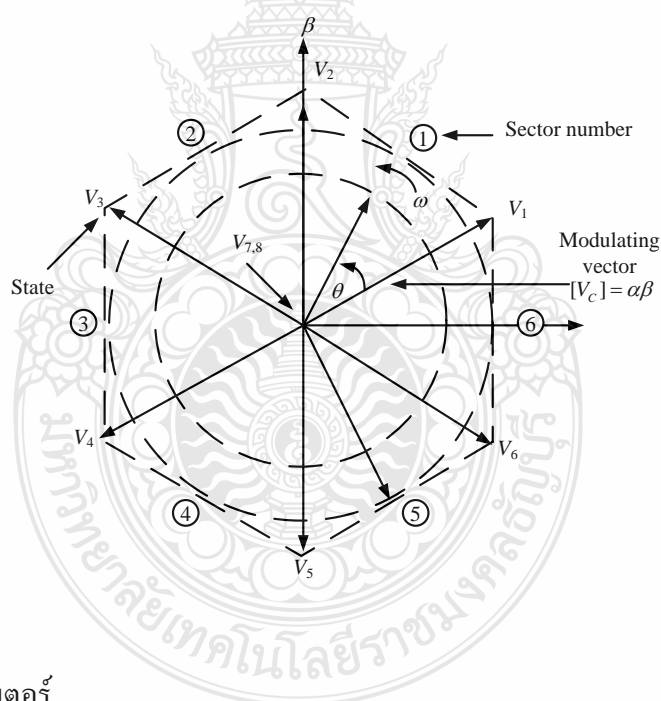
จากนั้นแปลงจากสามเฟส  $a, b, c$  ไปสู่นิวแกนสองแกนคือ  $x, y$  โดยเขียนเป็นตารางแมตริกซ์ได้ดังสมการที่ 2.33

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ 0 & 0.866 & -0.866 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

โดยมีสัญญาณนำมอดูเลต ดังสมการที่ 2.34

$$v_{control,a} = \sin(\omega t) + \frac{1}{\sqrt{3}\pi} \sum_{r=0}^{\infty} \frac{(-1)^r}{\left[(2r+1) - \left(\frac{1}{3}\right)\right] \left[(2r+1) + \left(\frac{1}{3}\right)\right]} \sin((2r+1)3\omega t) \quad (2.34)$$

ภาพคลื่นโดยประมาณของเทคนิค SVPWM ซึ่งแสดงสำหรับเฟส A ซึ่งหากต้องการหาเฟส B ต้องทำการเลื่อนเฟสไปอีก 120 องศา



ภาพที่ 2.11 สเปซเวกเตอร์

แรงดันอ้างอิง  $\vec{V}^*$  สามารถที่จะหาได้จากสมการที่ 2.35

$$\vec{V}^* = v_\alpha + jv_\beta = \frac{2}{3} \left( v_{aref} + e^{j\frac{2\pi}{3}} v_{bref} + e^{-j\frac{2\pi}{3}} v_{cref} \right) \quad (2.35)$$

โดย  $v_{aref}, v_{bref}, v_{cref}$  เป็นแรงดันอ้างอิง

ความยาวสูงสุดของ  $\bar{V}^*$  ของแต่ละมุม  $\alpha$  จะหาได้จาก

$$\bar{V}^* = \frac{V_{DC}}{\sqrt{3}} \quad (2.36)$$



## บทที่ 3

### รายละเอียดเกี่ยวกับวิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการทำวิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ทางด้านฮาร์ดแวร์ (Hardware) เช่น การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วแม่เหล็กถาวร เพื่อที่สามารถใช้ในการหาค่าควบคุมการทำงานต่างๆ และการออกแบบคอนเวอร์เตอร์กำลังเพื่อใช้ในการปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้ากับกริดระบบของการไฟฟ้าเป็นต้น ส่วนทางด้านซอฟต์แวร์ (Software) นั้นเป็นการใช้โปรแกรมแมทแล็บซิมมูลิงค์ ในการจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบควบคุมก่อนที่จะใช้โปรแกรม dSPACE ร่วมกับบอร์ด DS1104 รับสัญญาณเข้าและออกกับเครื่องมือวัดต่างๆ เพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

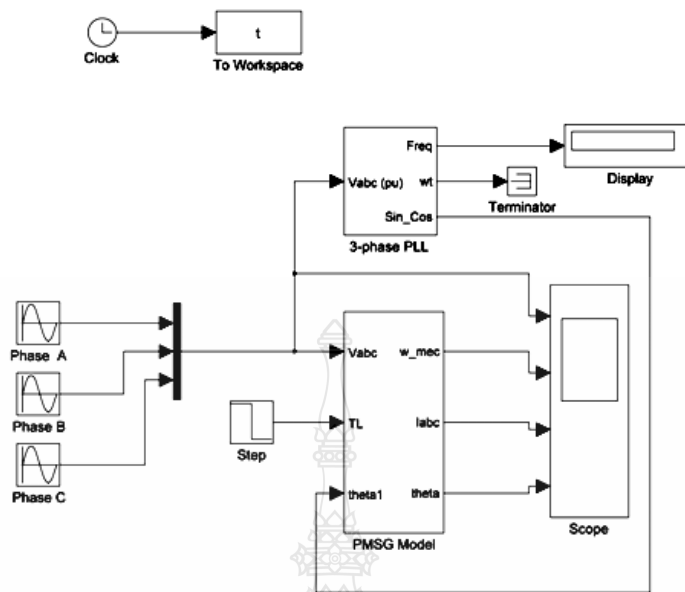
การสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมแมทแล็บซิมมูลิงค์ ในการจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส ในส่วนนี้กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัส

#### 3.1 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนได้แก่ ขั้นการศึกษาทฤษฎี ขั้นที่สองการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และขั้นสุดท้ายการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยมีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมแมทแล็บซิมมูลิงค์ จากนั้นจึงได้ทำการทดสอบแบบจำลองที่ได้และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบและวิเคราะห์การใช้งานว่ามีความสัมพันธ์ตรงกันหรือไม่อย่างไร แล้วจึงนำผลจากการออกแบบที่เสร็จแล้วนั้นไปใช้เพื่อวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสต่อไป

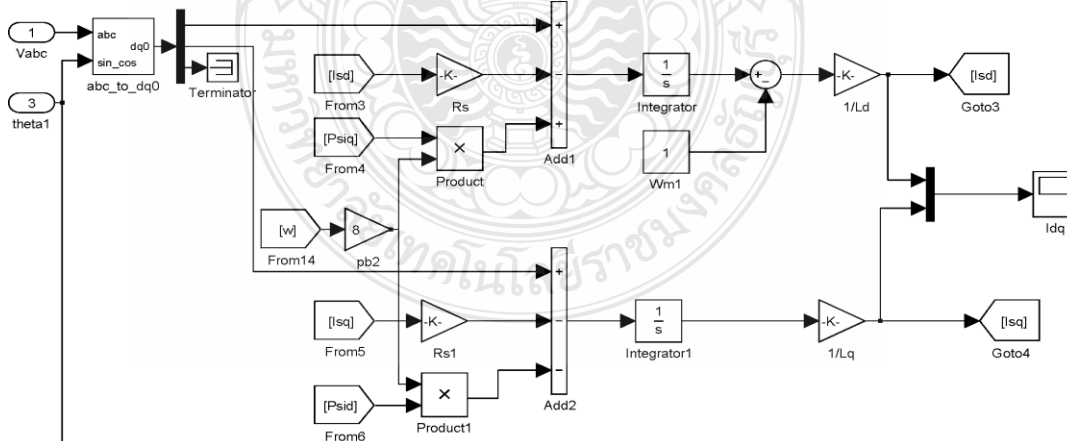
#### 3.2 การออกแบบ / เครื่องมือ

การจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วแม่เหล็กถาวรด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆจากคู่มือของผู้ผลิตและค่าที่ได้จากการทดสอบแทนค่าในแบบจำลองเพื่อให้ทราบค่าและลักษณะการทำงานเพื่อลดขั้นตอนและปัญหายุ่งยากในการสร้างต้นแบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากึ่งหันน้ำ โดยนำสมการที่ 2.3 - 2.26 ในบทที่ 2 มาเขียนเป็นบล็อกจำลองการทำงานของเครื่องกล



ภาพที่ 3.1 จำลองแรงบิด

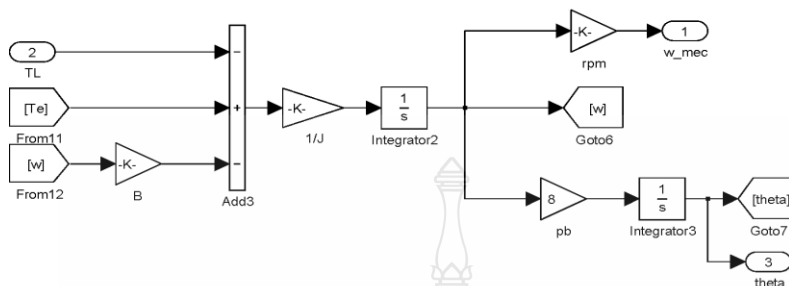
ภาพที่ 3.1 จำลองแรงบิดของเครื่องกลจากสมการที่ 2.3 - 2.26 ในบทที่ 2 โดยทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ให้กับแบบบล็อกจำลองภายใน PMSG จะแสดงผลความเร็วทางกล, กระแสไฟฟ้า และมุม Theta สำหรับบล็อกย่อยๆ จะแสดงถัดไปตามลำดับ



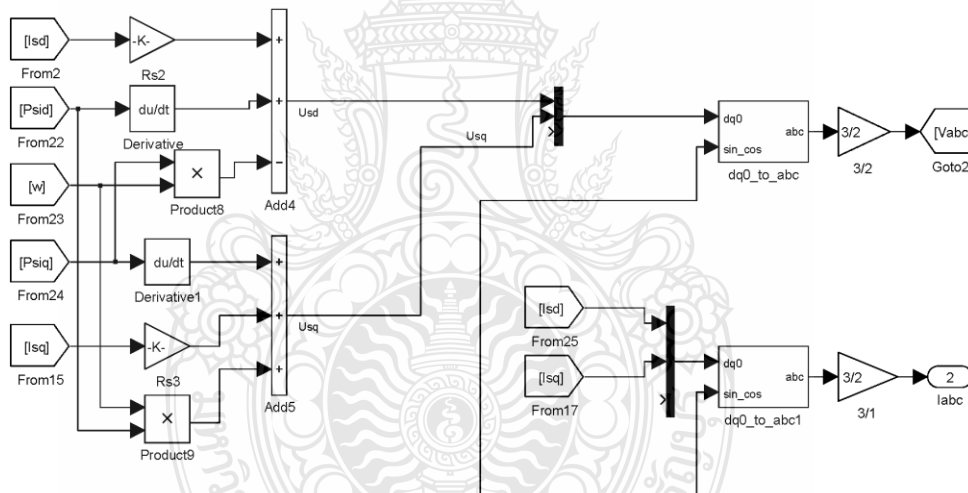
ภาพที่ 3.2 บล็อกย่อย  $i_{sd}, i_{sq}$  ภายในบล็อก PMSG



ภาพที่ 3.2 บล็อกย่อย  $i_{sd}, i_{sq}$  ภายในบล็อก PMSG โดยนำค่าจากสมการที่ 2.3 - 2.26 มาสร้างเป็นบล็อกเพื่อจำลองการทำงานของ PMSG โดยบล็อกนี้จะเป็นการหากระแสบนแกน  $d, q$

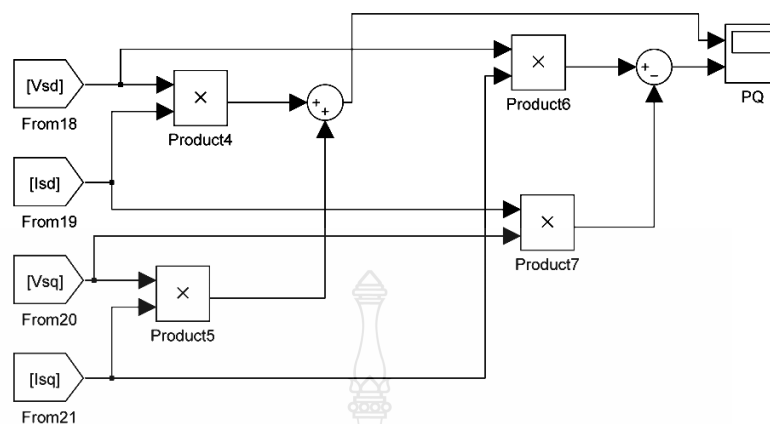


ภาพที่ 3.3 บล็อกย่อยหาค่า  $w_{mc}, \theta$  ภายในบล็อก PMSG



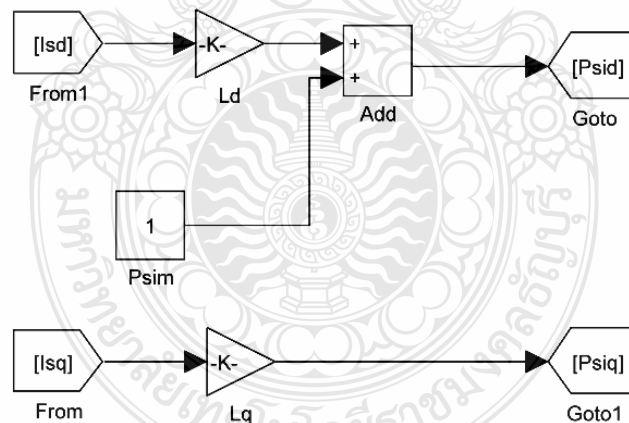
ภาพที่ 3.4 บล็อกย่อยหาค่าแรงดันบนแกนหมุน  $u_{sd}, u_{sq}$  ภายในบล็อก PMSG

ภาพที่ 3.4 บล็อกย่อยหาค่าแรงดัน  $u_{sd}, u_{sq}$  บนแกนหมุนภายในบล็อก PMSG โดยนำค่าจากสมการที่ 2.3 - 2.26 ในบทที่ 2 มาสร้างเป็นบล็อกเพื่อจำลองการทำงานของ PMSG โดยบล็อกนี้จะเป็นการหาแรงดันบนแกน  $d, q$  นอกจากนั้นแล้วยังทำการแปลงกลับไปอยู่ในรูปกระแสและแรงดันบนแกนนิ่ง 3 เฟส อีกครั้ง



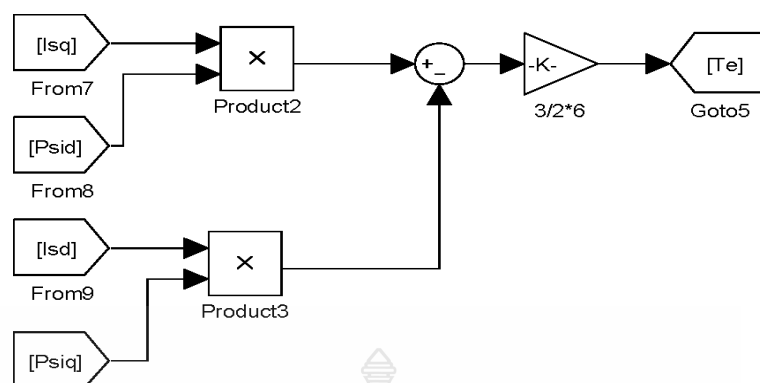
ภาพที่ 3.5 บล็อกย่อยจำลองการหาค่ากำลังแอกทีฟและรีแอกทีฟภายในบล็อก PMSG

ภาพที่ 3.5 บล็อกย่อยจำลองการหาค่ากำลังแอกทีฟและรีแอกทีฟภายในบล็อก PMSG โดยสร้างเป็นบล็อกเพื่อจำลองการทำงานของ PMSG



ภาพที่ 3.6 บล็อกย่อยจำลองการหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กภายในบล็อก PMSG

ภาพที่ 3.6 บล็อกย่อยจำลองการหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กภายในบล็อก PMSG โดยนำค่าจากสมการที่ 2.3 - 2.26 ในบทที่ 2 มาสร้างเป็นบล็อกเพื่อจำลองการทำงานของ PMSG



ภาพที่ 3.7 บล็อกย่อยจำลองการหาค่าแรงบิดภายในบล็อก PMSG

ภาพที่ 3.7 บล็อกย่อยจำลองการหาค่าแรงบิดภายในบล็อก PMSG โดยนำค่าจากสมการที่ 2.3 - 2.26 ในบทที่ 2 มาสร้างเป็นบล็อกเพื่อจำลองการทำงานของ PMSG

ในการจำลองการทำงานของเครื่องกลสามารถนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องกล ไม่ว่าจะเป็นมอเตอร์หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าก็ตามมาได้ ในแบบจำลอง เพื่อทดสอบการทำงานก่อนนำไปปฏิบัติในห้องปฏิบัติการก็จะลดเวลาและความสูญเสียของอุปกรณ์ได้ โดยที่ค่าที่ได้จะมาจากกราฟ, คู่มือเครื่องจักร, การอ่านจากป้ายชื่อ และการคำนวณ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสแบบขั้วแม่เหล็กถาวรที่หาได้จาก [10] เพื่อจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อหาสิ่งที่จำเป็นต่อการสร้างสัญญาณควบคุม หรือทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดลองก่อนที่จะนำไปทดลองในห้องปฏิบัติการต่อไป

### 3.3 การหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสแบบขั้วแม่เหล็กถาวร

ในการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสแม่เหล็กถาวรนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสแม่เหล็กถาวรที่ต้องการจะนำมาทำเป็นต้นแบบของแบบจำลองเสียก่อน การหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเชิงโรนัสแม่เหล็กถาวรเราสามารถหาค่าพารามิเตอร์บางส่วนได้จากการทดลอง และบางส่วนจะมาจากกราฟค่าโดยเครื่องมือวัดเนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองได้ โดยค่าที่ต้องทำการหาได้แก่

#### 3.3.1 การทดลองเพื่อหาค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Test)

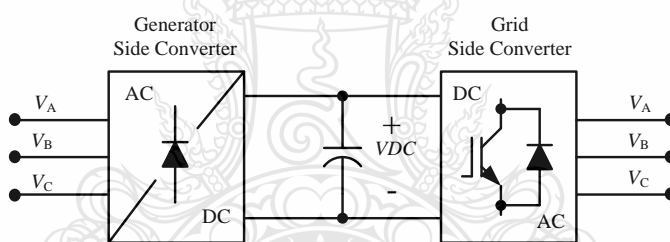
3.3.2 การวัดค่าความเหนี่ยวนำและค่าอิมพีแดนซ์ของขดลวดอามเมอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร

3.3.3 การคำนวณ

3.3.4 การอ่านค่าจากป้ายชื่อ (Name Plate) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

### 3.4 การออกแบบคอนเวอร์เตอร์กำลัง

การออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์กำลังทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใช้โมดูลไดโอดกำลังยี่ห้อฟูจิอิเล็กทริกส์ (FUJI ELECTRIC) ขนาดแรงดัน 1,600 โวลต์ 100 แอมแปร์ เพื่อเป็นวงจรเรียงกระแสแบบสามเฟส และใช้ไอจีบีทีโมดูลสำหรับการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับโดยใช้ชุดคอนเวอร์เตอร์กำลังยี่ห้อเซมิครอน (SEMIKRON) รุ่น SKiiP942GB120-3DL ในการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ ผ่านวงจรกรองแบบความถี่ต่ำผ่าน LC Filter ก่อนเชื่อมต่อเข้ากับกริดระบบขนาดแรงดัน 3 เฟส 380 โวลต์ 50 เฮิร์ต

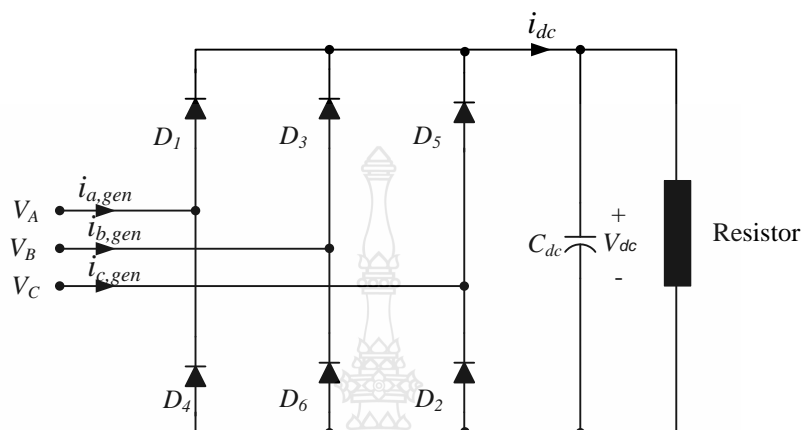


ภาพที่ 3.8 ไดอะแกรมของคอนเวอร์เตอร์กำลัง

ภาพที่ 3.8 ไดอะแกรมของคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบยูนิโพลาร์ (Uni Polar) โดยทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต่ออยู่กับไดโอดกำลังทำหน้าที่เป็นวงจรเรียงกระแสชนิดควบคุมไม่ได้ ส่วนคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบจะต่ออยู่กับด้านแรงดันเชื่อมโยงไฟตรง ก่อนที่จะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่กริดระบบ โดยต้องสามารถควบคุมได้ทั้งขนาดและความถี่ และเพื่อให้ง่ายต่อการเชื่อมต่อเข้าสู่กริดระบบที่ต้องมีความตรงกันทั้งขนาดและความถี่ โดยใช้เทคนิคการเชื่อมต่อด้วยเฟสล็อกกลูป

3.4.1 การออกแบบวงจรเรียงกระแส 3 เฟส เต็มคลื่นด้วยไดโอดแบบบริดจ์ (3 Phase Full Bridge Diode Rectify) ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้วงจรเรียงกระแส 3 เฟส เต็มคลื่นแบบไดโอดบริดจ์ต่ออยู่กับแหล่ง

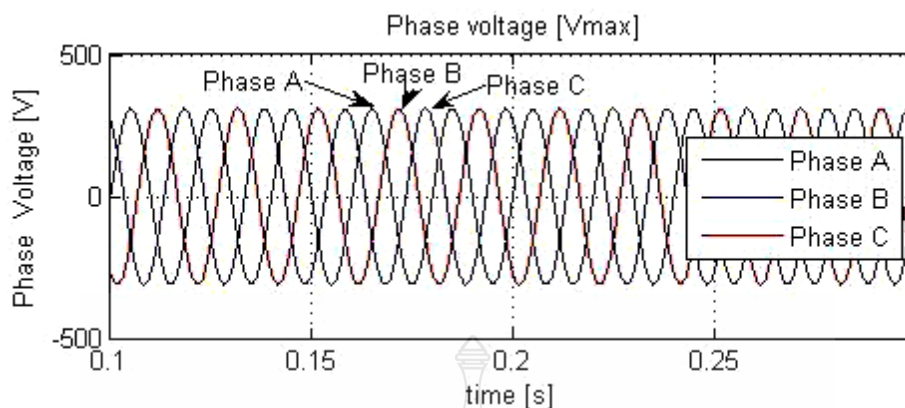
จ่ายเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วแม่เหล็กถาวร เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ในการคำนวณนี้กำหนดให้ต่อกับโหลดความต้านทาน



ภาพที่ 3.9 ไดอะแกรมการต่อคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

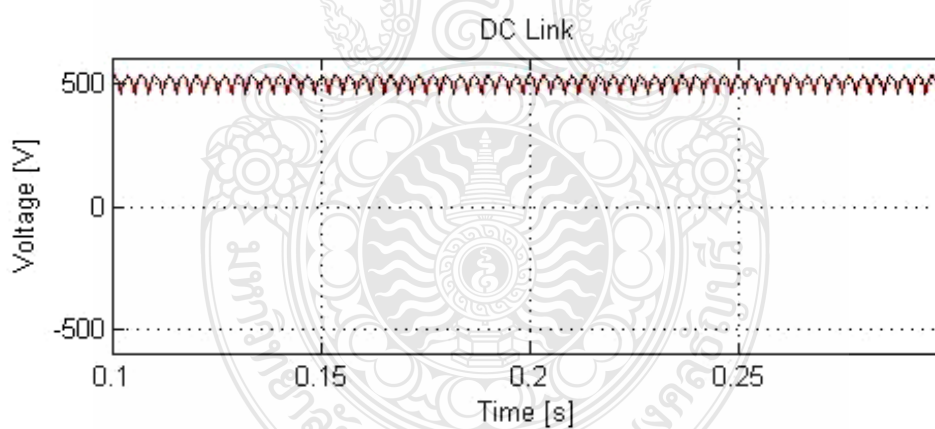
การคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 3 เฟส เต็มคลื่นแบบไดโอดบริดจ์ [17]

$$\begin{aligned}
 V_{o,av} &= \frac{6}{2} \int_{60^\circ}^{120^\circ} V_{m,Line} \cdot \sin(\omega t) \cdot d(\omega t) \\
 &= \frac{6 \cdot V_{m,Line}}{2\pi} [-\cos(\omega t)]_{60^\circ}^{120^\circ} \\
 &= \frac{\pi}{3} \cdot V_{m,Line} \cdot [-\cos 120 + \cos 60] \\
 &= \frac{3 \cdot V_{m,Line}}{\pi} \\
 &= 0.95 V_{m,Line} \\
 &= 0.95 \times \sqrt{2} \times 380 \\
 &\cong 510 \text{ Volt}
 \end{aligned}$$



ภาพที่ 3.10 แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับด้านเข้าวงจรเรียงกระแส

ภาพที่ 3.10 การจำลองแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส 50 เฮิร์ต ของแหล่งจ่ายจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วแม่เหล็กถาวรก่อนเข้าวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบไดโอดบริดจ์ โดยวัดค่าเป็นแรงดันสูงสุดแต่ละเฟสเทียบกับกราวด์



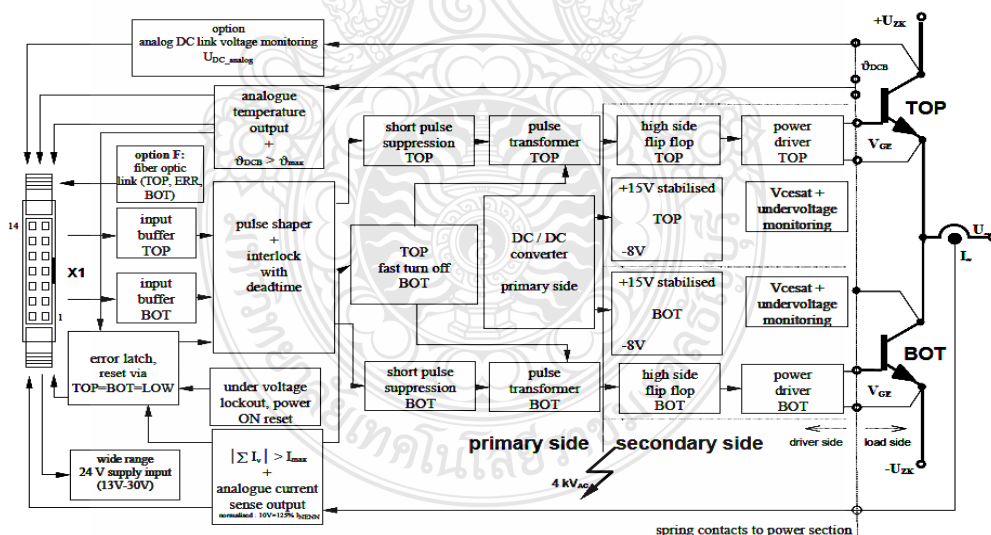
ภาพที่ 3.11 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อผ่านวงจรเรียงกระแส

ภาพที่ 3.11 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมแมทแล็บซิมูเลชั่น เมื่อผ่านวงจรเรียงกระแส 3 เฟส เต็มคลื่นแบบไดโอดบริดจ์ โดยกำหนดให้เป็นโหลดความต้านทาน



ภาพที่ 3.12 วงจรเรียงกระแส 3 เฟส เต็มคลื่นแบบไดโอดบริดจ์

ภาพที่ 3.12 การต่อโมดูลไดโอดบริดจ์ FUJI ELECTRIC ซึ่งเป็นคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบ โดยด้านที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำหน้าที่เป็นวงจรเรียงกระแสแบบ 3 เฟส



ภาพที่ 3.13 ไดอะแกรมวงจรควบคุมในคอนเวอร์เตอร์เซมิคอน [19]

ภาพที่ 3.13 เป็นไดอะแกรมวงจรควบคุมคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบ ซึ่งเป็นชุดคอนเวอร์เตอร์สำเร็จรูปของ SEMIKRON รุ่น SKiiP942GB120-3DL



ภาพที่ 3.14 ชุดคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบ

ภาพที่ 3.14 การต่อโมดูลคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบเข้ากับวงจรเรียงกระแส 3 เฟส แบบไดโอดบริดจ์ SEMIKRON รุ่น SKiiP942GB120-3DL



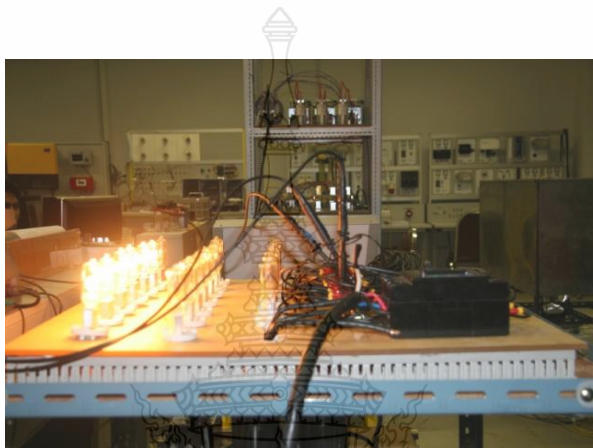
ภาพที่ 3.15 ตัวเก็บประจุของแรงดันเชื่อมโยงไฟตรง

ภาพที่ 3.15 การต่อตัวเก็บประจุของแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงใช้ตัวเก็บประจุ ยี่ห้อ SCG ความจุ 6,500 ไมโครฟารัด ขนาดพิกัดแรงดัน 450 โวลต์ จำนวน 2 ชุด ต่อลำดับกัน (Series) เพื่อเพิ่มขนาดพิกัดแรงดันไฟฟ้าตามที่ออกแบบไว้คือ 650 โวลต์ จากการต่อตัวเก็บประจุเรียงกันทำให้สามารถรับแรงดันได้ถึง 900 โวลต์



### 3.5 การออกแบบโหลดทางไฟฟ้าเพื่อทดสอบการทำงานของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เพื่อทดสอบการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดความต้านทานวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้หลอดไฟแบบฮาโลเจนขนาด 1,000 วัตต์ 230 โวลต์ 50 เฮิร์ต จำนวน 20 หลอดต่อการใช้งานแบบสตาร์ (Y) เพื่อทดสอบการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดพิกัดแรงดัน 380 โวลต์ 3 เฟส 50 เฮิร์ต ที่โหลดต่างๆ กัน โดยเริ่มตั้งแต่ 3 - 15 kW หากค่ามากกว่านี้จะทำให้มอเตอร์ที่ถูกกำหนดแทนต้นกำลังกั้นน้ำ จะไม่สามารถขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อจ่ายกำลังไฟฟ้าได้



ภาพที่ 3.16 โหลดความต้านทานขนาด 20 kW

### 3.6 การใช้มอเตอร์จำลองแทนต้นกำลังกั้นน้ำ

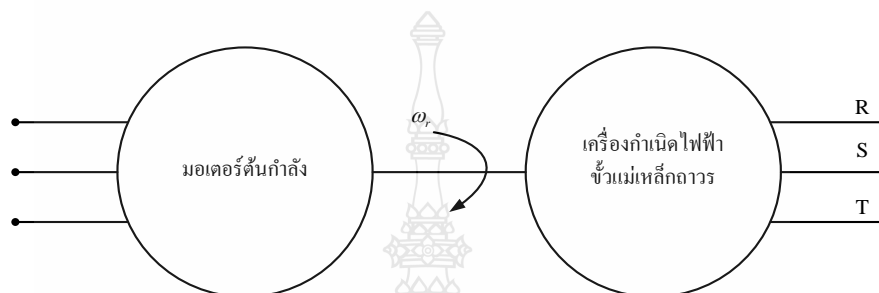
ใช้ซิงโครนัสมอเตอร์ยี่ห้อซีเมนส์ (SIEMENS) รุ่น UD0812 ขนาดกำลังไฟฟ้า 20 กิโลวัตต์ แรงดันไฟฟ้า 380 โวลต์ 3 เฟส 50 เฮิร์ต เพื่อเป็นต้นกำลังจำลองการหมุนของกั้นน้ำโดยควบคุมความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์ยี่ห้อซีเมนส์ รุ่น Micromaster 440 ควบคุมการทำงานด้วยการตั้งค่าเริ่มต้นการทำงานให้กับบอร์ดควบคุมการปรับความเร็วรอบด้วยปุ่มปรับด้วยมือ



ภาพที่ 3.17 มอเตอร์ต้นกำลังขนาด 20 kW

### 3.7 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสแม่เหล็กถาวร

ในการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสแม่เหล็กถาวรเพื่อทำการทดสอบการทำงานเข้ากับมอเตอร์ที่ใช้เป็นตัวขับเคลื่อนจำลองการทำงานของกังหันน้ำ โดยติดตั้งมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนกับอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ได้แก่ เซอร์คิตเบรกเกอร์ อินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมความเร็วได้ด้วยการปรับความถี่ขณะเริ่มเดินเครื่องตามไดอะแกรมดังภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 การต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับมอเตอร์



ภาพที่ 3.19 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับมอเตอร์ต้นกำลัง

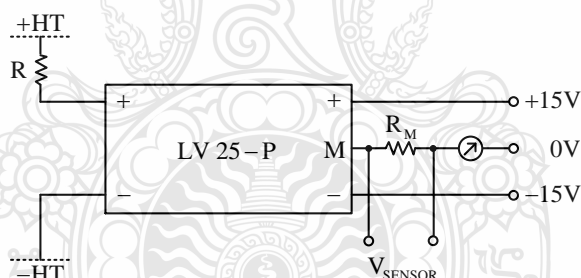
### 3.8 ออกแบบเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้า [18]

3.8.1 เครื่องมือวัดค่าทางไฟฟ้าด้วยฮอลล์เอฟเฟกต์โวลเตจเซ็นเซอร์ทรานสดิวเซอร์ (Hall Effect voltage Sensor Transducer) ยี่ห้อ LEM รุ่น LV25-P ตรวจวัดแรงดันด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงดันด้านไฟตรงและแรงดันด้านกริดระบบโดยป้อนกลับไปยัง dSPACE บอร์ด DS1104 โดยใช้หลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (Hall Effect) การวัดแรงดันจะวัดจากกระแสที่มีสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันผ่านความต้านทานภายนอก ที่ต่ออนุกรมกับแรงดันเข้าวงจรทางด้านปฐมภูมิของ LV25-P ดังภาพที่

3.14 โดยกระแสที่ไหลผ่านวงจรปฐมภูมิควรมีค่าเท่ากับ 10 มิลลิแอมแปร์ เพื่อความแม่นยำในการวัดของ LV25-P อัตราส่วนของกระแสทางด้านทุติยภูมิต่อกระแสทางด้านปฐมภูมิมีค่าเท่ากับ 2.5 ในวิทยานิพนธ์นี้จะนำ LV25-P มาวัดแรงดันด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แรงดันเชื่อมต่อไฟตรงและแรงดันด้านกริดระบบ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต โดยวัดเทียบกับกราวด์ แต่เนื่องจากแรงดันที่กริดมีการกระเพื่อม ดังนั้นจึงออกแบบให้ LV25-P สามารถอ่านแรงดันได้ 250 โวลต์ ซึ่งความต้านทาน  $R$  สามารถหาได้จากสมการ 3.1

$$R = \frac{V_{gen,grid}}{10mA} \quad (3.1)$$

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

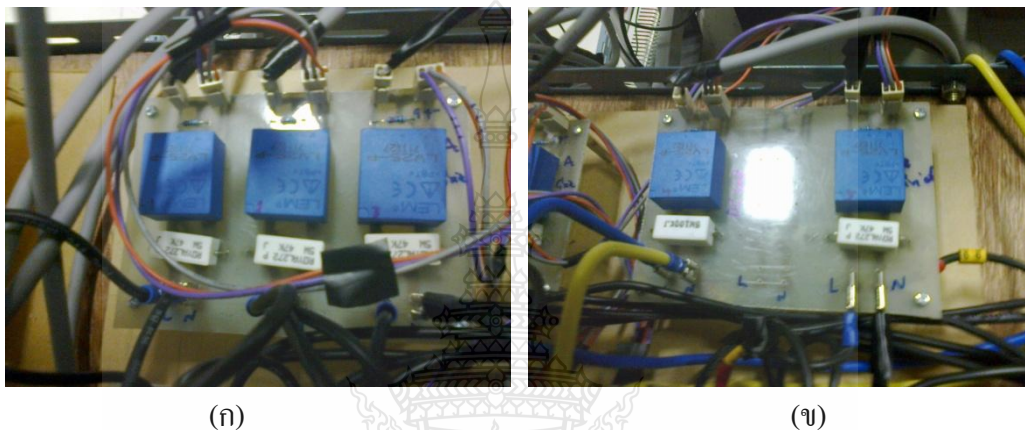


ภาพที่ 3.20 การต่อวงจรวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของ LV25-P

สำหรับการวัดแรงดันที่บัสไฟตรงนั้นสามารถใช้ตัววัดสัญญาณ LV25-P ได้เหมือนกัน ดังนั้นสามารถหาความต้านทาน  $R$  ที่แรงดันบัสไฟตรงขนาด 650 โวลต์ ได้ดังนี้

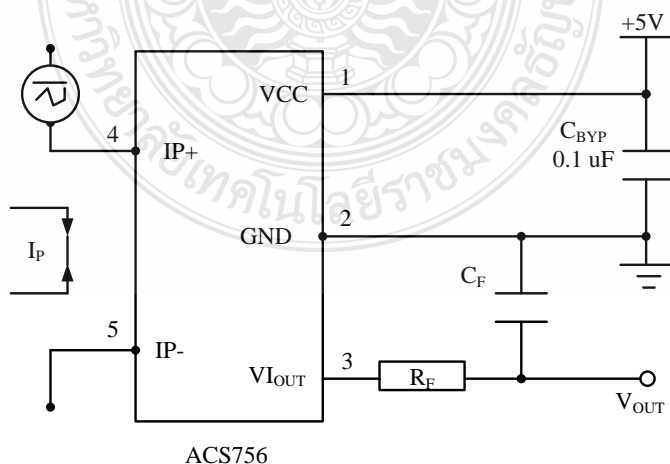
$$R = \frac{V_{dc}}{10mA} = \frac{650}{10mA} = 65k\Omega$$

ดังนั้นจะได้ค่าความต้านทาน  $R$  เป็น 65 กิโลโอห์ม และสามารถทนกำลังสูญเสียได้ 2.5 วัตต์ จากอัตราส่วนของกระแสทางด้านทุติยภูมิต่อกระแสทางด้านปฐมภูมิจะใช้ตัวต้านทานสำหรับอ่านค่าแรงดัน ( $R_M$ ) เท่ากับ 200 โอห์ม ซึ่งจะให้ค่าแรงดันด้านออกเท่ากับ  $\pm 5$  โวลต์ เช่นกันโดยสัญญาณแรงดันที่ได้นี้จะนำไปใช้เป็นสัญญาณแทนแรงดันของบัสไฟตรงเพื่อใช้สร้างสัญญาณในการควบคุมการสวิตช์ไอจีบีที

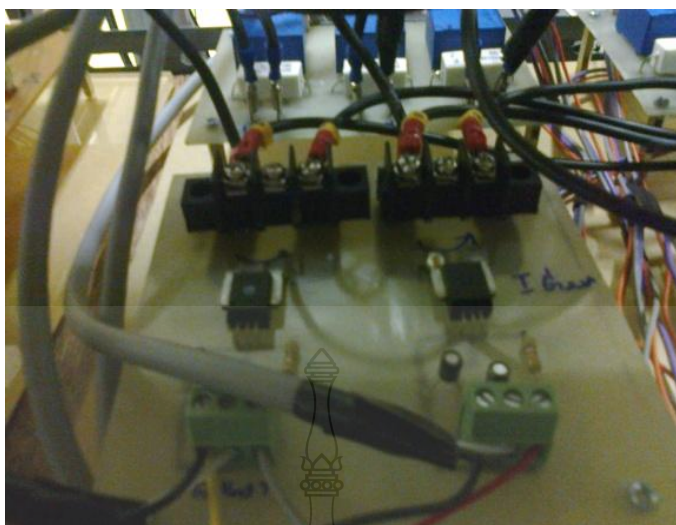


ภาพที่ 3.21 ชุดเครื่องมือวัด LV25-P

3.8.2 สำหรับการวัดกระแสด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและด้านกริกระบบ เพื่อป้อนกลับไปยัง dSPACE บอร์ด DS1104 ด้วยฮอลล์เอฟเฟกต์เซ็นเซอร์เช่น เซอร์ทรานสดิวเซอร์ (Hall Effect Current Sensor Transducer) ยี่ห้อ ALLEGRO MICROSYSTEMS รุ่น ACS758LCB-100B-PFF-T



ภาพที่ 3.22 วงจรชุดเครื่องมือวัดกระแส



ภาพที่ 3.23 ชุดเครื่องมือวัดกระแส

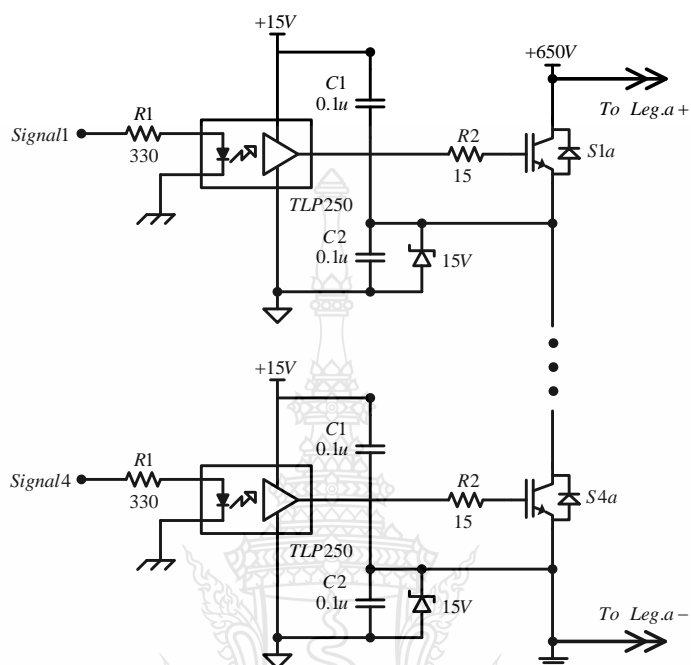
### 3.9 ภาควงจรควบคุม

ในการออกแบบวงจรถวลคุมการทำงานของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใช้ดีสเปซ ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด (dSPACE Micro Controller Board) เชื่อมต่อเพื่อควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบ และมีการวัดข้อมูลป้อนกลับมายังบอร์ดควบคุมผ่านทางจุดต่อ ADC จำนวน 5 สัญญาณ ได้แก่ แรงดันและกระแสด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แรงดันด้านไฟตรง แรงดันและกระแสด้านกริดระบบ สำหรับการควบคุมการทำงานของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใช้โปรแกรมแมทแล็บซิมูลิ้งค์ ซึ่งใช้สร้างโปรแกรมจำลองการควบคุมร่วมกับ dSPACE

#### 3.9.1 การออกแบบวงจรถวลคุมสวิทช์ไอจีบีที [18]

ในการขับเกท ไอจีบีทีในวิทยานพจน์นี้ออกแบบระดับแรงดันพัลส์ประมาณ  $\pm 15$  โวลต์ แต่บอร์ด DS1104 สามารถจ่ายแรงดันได้เพียง 0 - 5 โวลต์ เท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้สัญญาณขับเกทมีแรงดันสูงขึ้น จึงต้องยกระดับแรงดันขึ้นโดยผ่านไอซีเชื่อมต่อทางแสง เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการแยกระดับแรงดันไฟฟ้าให้ออกจากกัน ดังแสดงในภาพที่ 3.24 การออกแบบวงจรถวลคุมสวิทช์ไอจีบีทีที่ใช้การแยกสัญญาณทางแสง (Opto Isolate) เบอร์ TLP250 เพื่อแยกแรงดันไฟต่ำกับแรงดันไฟสูงออกจากกัน โดย  $R_2$  ในภาพที่ 3.24 จะใช้ค่าอยู่ระหว่าง 10 - 100 โอห์ม เพื่อป้องกันการเกิดการแกว่งของสัญญาณขับที่ขาเกทของไอจีบีที ซึ่งในวิทยานพจน์นี้ได้เลือกใช้ค่า  $R_2$  เท่ากับ 15 โอห์ม เนื่องจากสัญญาณที่ด้านทางออกของ Opto Isolate เป็นสัญญาณพัลส์ PWM ซึ่งจะประกอบด้วยฮาร์มอนิกส์ของ

สัญญาณไซน์หลายความถี่ซึ่งอาจทำให้เกิดการออสซิลเลตได้ จึงจำเป็นต้องใส่ตัวต้านทาน  $R_2$  เพื่อควบคุมไม่ให้เกิดการแกว่งของสัญญาณ

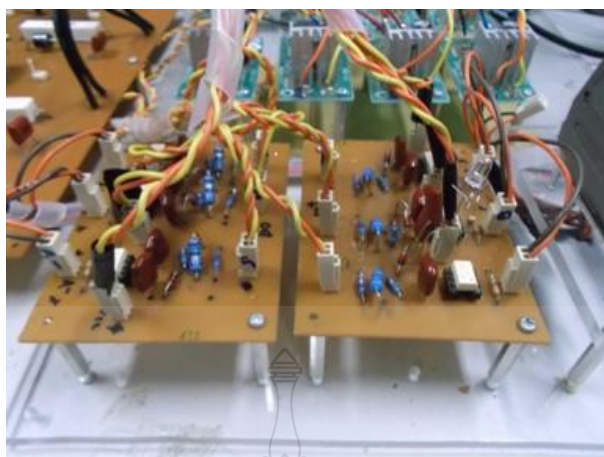


ภาพที่ 3.24 ภาควงจรขับสวิตช์ไอจีบีที [18]

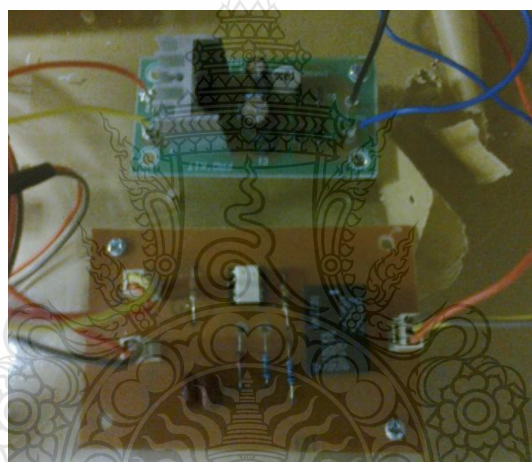
การออกแบบ  $R_1$  โดยกำหนดให้กระแส ( $I_F$ ) ที่จะไหลผ่าน TLP250 มีค่าเท่ากับ 10 มิลลิแอมแปร์ และแรงดัน  $V_F$  เท่ากับ 1.6 โวลต์ โดยที่  $V_{CC}$  มีค่าเท่ากับ 5 โวลต์ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{V_{CC} - V_F}{I_F} & (3.2) \\
 &= \frac{5V - 1.6V}{10mA} \\
 &= 340\Omega
 \end{aligned}$$

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้ค่าความต้าน 330 โอห์ม โดยจะได้กระแสทางเข้า TLP250 ประมาณ 10.3 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งวงจรยังสามารถทำงานได้



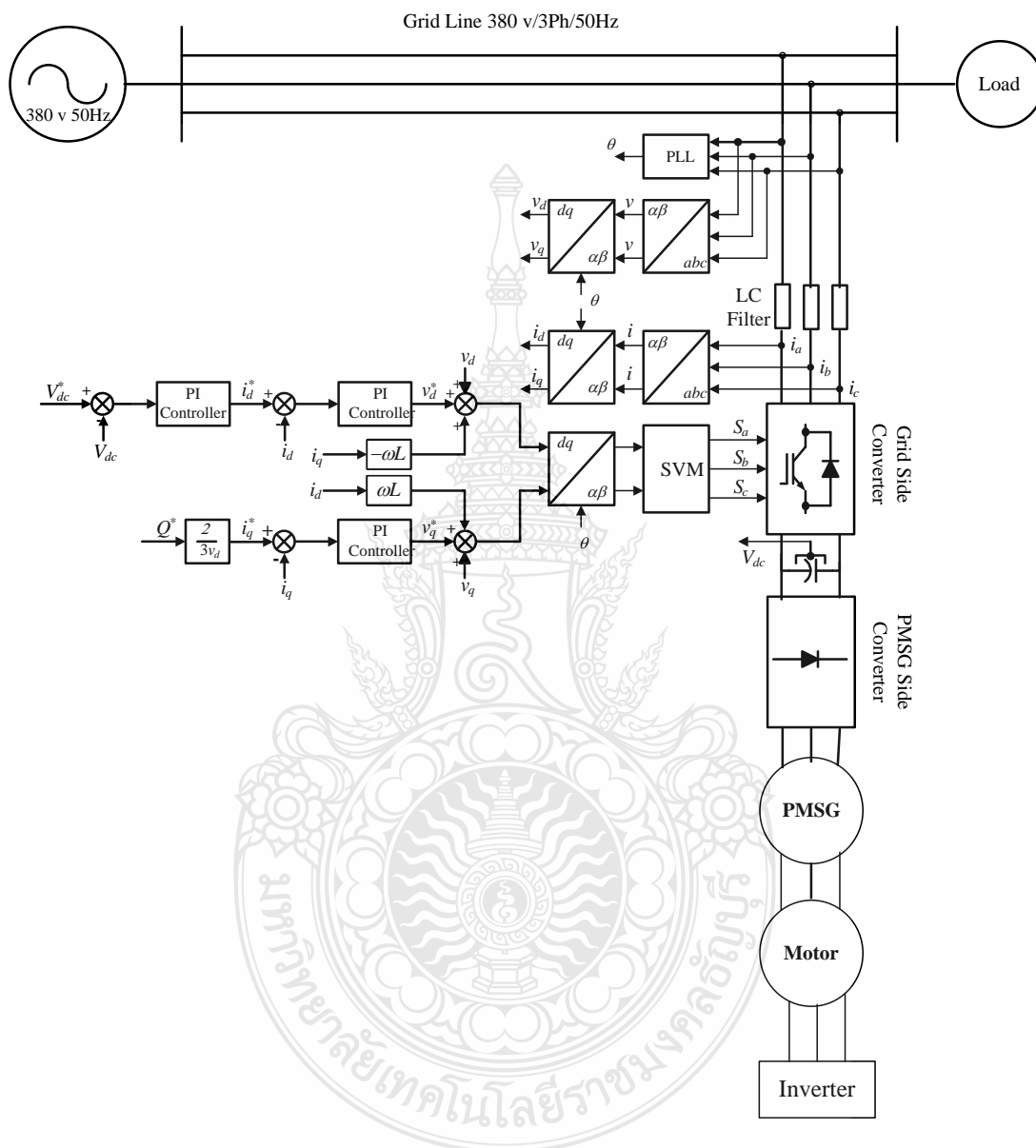
ภาพที่ 3.25 ชุดขับสวิทช์ไอจีบีทีโดยใช้ไอซีเบอร์ TLP250



ภาพที่ 3.26 ชุดขับสวิทช์เชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากริดระบบ

ภาพที่ 3.26 ชุดขับสวิทช์เชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากริดระบบ โดยจะทำงานตามเวลาที่ตั้งไว้ในโปรแกรมคิสเปซ เพื่อส่งสัญญาณควบคุมให้รีเลย์ M4N ทำงานเพื่อเป็นสัญญาณการต่อวงจรให้หน้าสัมผัสไฟฟ้าทำงาน (Magnetic Contactor) ผ่านทางบอร์ด DS1104 พอร์ต Digital I/O ซึ่งตั้งเวลาการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริดไว้ที่เวลา 100 วินาที หลังจากการสั่งให้ระบบทำงานแล้วระบบควบคุมการทำงานจะสั่งปลดวงจรจากการเชื่อมต่อกับกริด ในวิทยานิพนธ์นี้ออกแบบใช้ TLP250 เพื่อขับคอล์ยรีเลย์แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ ยี่ห้อ OMRON รุ่น G5LE สำหรับคอล์ยไฟฟ้าหน้าสัมผัสสามารถใช้ได้กับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต เพื่อส่งสัญญาณขับคอล์ยแมกเนติกที่หน้าสัมผัสรับแรงดันไฟฟ้าที่กริดระบบได้

3.9.2 วงจรสำหรับควบคุมการป้อนกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟเข้าสู่กริดระบบ จะใช้วิธีการควบคุมแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงให้คงที่ตลอดเวลา โดยแสดงไดอะแกรมดังภาพที่ 3.27



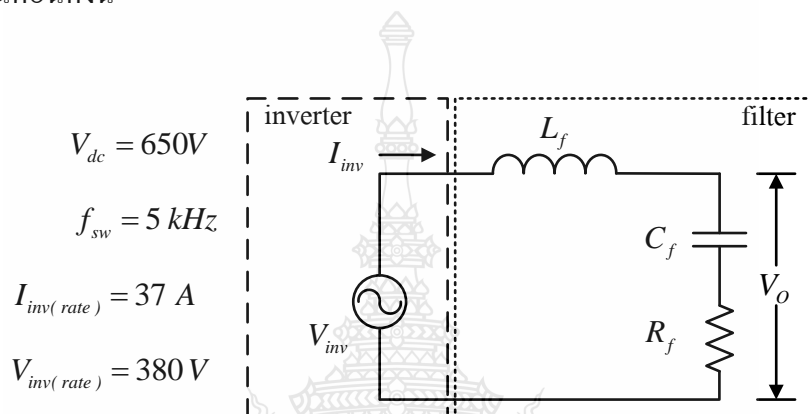
ภาพที่ 3.27 ไดอะแกรมของระบบควบคุมคอนเวอร์เตอร์กำลังทางด้านกริดระบบ

ภาพที่ 3.27 ไดอะแกรมสำหรับควบคุมการป้อนกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟเข้าสู่กริดระบบ จะใช้วิธีการควบคุมแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงให้คงที่ตลอดเวลาบนพื้นฐานของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมบนแกนหมุน



### 3.10 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ LC (LC Filter) [17-18]

เนื่องจากแรงดันค่านอกของวงจรคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริกระบบสร้างไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องต่อวงจรกรองที่ค่านอกของวงจรเพื่อกรองความถี่ที่ไม่ต้องการไม่ให้เข้าไปในระบบไฟฟ้ามากเกินไป โดยในการออกแบบจะไม่คำนึงถึงผลกระทบของโหลดและแรงดันในระบบไฟฟ้าเพื่อให้ง่ายในการออกแบบและสามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังภาพที่ 3.28 ซึ่งการออกแบบมีขั้นตอนดังนี้



ภาพที่ 3.28 วงจรสมมูลของวงจรกรองที่ใช้ในการออกแบบ

3.10.1 กำหนดให้แรงดันความถี่หลักมูลที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านมีค่าไม่เกินร้อยละ 5 ของแรงดันในระบบไฟฟ้าปกติ ซึ่งเป็นข้อกำหนดในการเลือกตัวเหนี่ยวนำค่ามากที่สุดที่สามารถใช้งานได้ สามารถหาได้จากสมการที่ 3.3

$$L_f \leq \frac{0.05V_{normal}}{2\pi f(i_{inv(rate)})} \quad (3.3)$$

$$L_f \leq \frac{0.05 \times 380}{2\pi \times 50 \times 37} = 1.64 \text{ มิลลิเฮนรี}$$

3.10.2 กำหนดให้ค่ายอดของกระแสกระแสที่เพิ่มสูงสุดที่ผ่านวงจรกรองมีค่าไม่เกินร้อยละ 15 ของกระแสพิคคของวงจรแปลงผัน ซึ่งเป็นข้อกำหนดในการเลือกตัวเหนี่ยวนำค่าน้อยที่สุดที่สามารถใช้งานได้ สามารถหาได้จากสมการที่ 3.4 โดยพิจารณาจากแรงดันขณะตัววัฏจักรงาน (Duty Cycle) ร้อยละ 50 ซึ่งจะมีค่ายอดของกระแสกระแสที่เพิ่มสูงสุด

$$L_f \geq \frac{V_{L_f}}{2\Delta i_{inv} f_h} \quad (3.4)$$

$$L_f \geq \frac{380}{2 \times 0.15 \times 37 \sqrt{2} \times 40 \times 10^3} = 60 \text{ มิลลิเฮนรี่}$$

3.10.3 กำหนดค่ากระแสแฉกระเพื่อมที่ไหลดไม่ให้เกินร้อยละ 5 ของกระแสแฉกระเพื่อมที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุวงจรกรองความถี่ ซึ่งเป็นข้อกำหนดในการเลือกตัวเก็บประจุค่าน้อยที่สุดที่สามารถใช้งานได้ โดยพิจารณาการแบ่งไหลของกระแสแฉกระเพื่อมจากอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุกับโหลด โดยโหลดจะคิดที่กรณีที่ย่ำที่สุดคือมีเพียงตัวต้านทานที่พิกัดเพียงอย่างเดียว สามารถหาได้จากสมการที่ 3.5

$$C_f \geq \frac{20}{2\pi f_h R_{rate}} \quad (3.5)$$

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

3.10.4 กำหนดค่า Damping Factor เท่ากับ 1 เขียนอัตราส่วนระหว่างแรงดันด้านออกกับแรงดันที่วงจรแปลงผันสร้างได้ดังสมการที่ 3.6

$$\frac{V_o}{V_{inv}} = \frac{C_f R_f s + 1}{C_f L_f s^2 + C_f R_f s + 1} \quad (3.6)$$

จากสมการที่ 3.6 สามารถหาค่า Damping Factor ได้ดังสมการ 3.7

$$\xi_f = \frac{R_f}{2} \sqrt{\frac{C_f}{L_f}} \quad (3.7)$$

และที่ค่า Damping Factor เท่ากับ 1 จะได้ว่า

$$R_f = 2\sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \quad (3.8)$$

เมื่อแทนค่า  $R_f$  สมการที่ 3.7 ลงในสมการที่ 3.8 จะได้สมการที่ 3.9

$$\frac{V_o}{V_{inv}} = \frac{2\sqrt{C_f L_f} s + 1}{C_f L_f s^2 + 2\sqrt{C_f L_f} s + 1} \quad (3.9)$$

จากสมการที่ 3.9 สามารถหาค่าผลคูณระหว่างตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองได้เท่ากับ

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

แต่เพื่อให้ง่ายในการออกแบบจะประมาณค่าเป็น

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

จากข้อกำหนดที่ 1 และ 2 สามารถเลือกค่าตัวเหนี่ยวนำของวงจรกรองเท่ากับ

$$L_f = 2 \text{ มิลลิเฮนรี่}$$

ดังนั้นจะได้ค่าตัวเก็บประจุของวงจรกรองเท่ากับ

$$C_f = 8 \text{ ไมโครฟารัด}$$

และจากสมการที่ 3.8 แทนค่าตัวเหนี่ยวนำ  $L_f$  และตัวเก็บประจุ  $C_f$

3.10.5 การคำนวณหาค่าความถี่คัทออฟ (Cut off) ได้ดังสมการที่ 3.10

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.10)$$

โดยที่  $f_0$  คือค่าความถี่คัทออฟ  
 $L$  คือค่าความเหนี่ยวนำ  
 $C$  คือค่าตัวเก็บประจุ

3.10.6 การคำนวณหาค่าแรงดันตกคร่อมอินดักเตอร์ดังสมการที่ 3.11 และ 3.12

$$V_{la} = \frac{2}{3}V_{DC}, V_{ga} = \frac{1}{2}V_{DC} \quad (3.11)$$

$$V_L = \frac{2}{3}V_{DC} - \frac{1}{2}V_{DC} = \frac{1}{6}V_{DC} \quad (3.12)$$

โดยที่  $V_L$  คือแรงดันตกคร่อมอินดักเตอร์  
 $V_{DC}$  คือแรงดันเชื่อมโยงไฟตรง

3.10.7 การคำนวณหาค่าอินดักแตนซ์โดยค่าแรงดันกระแสเพื่อมร้อยละ 15-20 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.13

$$V_L = L \frac{\Delta \hat{I}_L}{\delta T_s}, \Delta \hat{I}_L = \delta T_s \frac{V_L}{L} \quad (3.13)$$

$$\Delta \hat{I}_L = \delta \frac{V_L}{Lf_s} = \frac{1}{6} \frac{\delta V_{DC}}{Lf_s}$$

$$\delta = 1 - \frac{1}{4} = \frac{3}{4}$$

$$\Delta \hat{I}_L = \frac{1}{8} \frac{V_{DC}}{Lf_s}$$

$$L = \frac{1}{8} \frac{V_{DC}}{\Delta I_L f_s}$$

- โดยที่  $V_L$  คือค่าแรงดันตกคร่อมความเหนี่ยวนำ  
 $f_s$  คือความถี่ในการสวิตช์  
 $V_{DC}$  คือแรงดันเชื่อมโยงไฟตรง  
 $\hat{\delta}$  คือค่าตัวดีไซเคิลในการสวิตช์สูงสุด  
 $L$  คือค่าความเหนี่ยวนำกรองความถี่

3.10.8 การคำนวณหาค่าการพันขดลวดอินดักเตอร์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.14

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l} \quad (3.14)$$

- โดยที่  $L$  คือค่าความเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็นเฮนรี  
 $N$  คือจำนวนรอบของขดลวดมีหน่วยเป็นรอบ  
 $\mu$  คือค่าซึมซาบของวัสดุที่นำมาทำเป็นแกน  
 $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของแกนมีหน่วยเป็นตารางเมตร  
 $l$  คือความยาวของแกนมีหน่วยเป็นเมตร



ภาพที่ 3.29 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

ภาพที่ 3.29 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อป้องกันความถี่ที่ไม่ต้องการจากการสวิตช์ซึ่งของ ไอจีบีทีเข้าไปกวนในกริกระบบที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องเชื่อมต่อเข้าไปไฟฟ้า ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ ค่าตัวเก็บประจุขนาด 12.5 ไมโครฟารัด พิกัดแรงดันไฟฟ้า 450 โวลต์ (12.5  $\mu\text{F}$  450 VAC) ต่อขนาน อยู่กับตัวเหนี่ยวนำขนาด 2.2 มิลลิเฮนรี โดยใช้ลวดอบน้ำยาเบอร์ AWG#32 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.27 มิลลิเมตร พันบนแกนเหล็กเฟอร์ไรต์อี (E-Shape Ferrite Core) เบอร์ 55 ที่มีขายในท้องตลาด สำหรับการใช้งานเป็นแกนเหล็กในวงจรความถี่สวิตช์สูงๆ และใช้ลวดพันบนแกนจำนวน 40 รอบ

3.10.9 การคำนวณหาการพันขดลวดอินดักเตอร์ [17] อีกวิธีหนึ่งซึ่งสามารถใช้คำนวณหา ค่าอินดักเตอร์ได้จากสมการที่ 3.15

$$L = \frac{V_o(1 - D_{min})}{\Delta I \cdot f_s} \quad (3.15)$$

โดยที่  $L$  คือค่าความเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็นเฮนรี

$V_o$  คือแรงดันเอาต์พุท

$D_{min}$  คือดีวตีไซเคิล

$\Delta I$  คือค่าระลอกคลื่นผ่านตัวเหนี่ยวนำมีค่าร้อยละ 10 - 25 ของกระแสโหลด

$f_s$  คือความถี่สวิตช์

หาค่าระลอกคลื่นแรงดันที่ร้อยละ 10 ของแรงดัน ไฟฟ้าด้านเข้า จะได้

$$D_{min} = \frac{V_o}{V_{in,max}} = \frac{380}{650 + 65} = 0.531 \quad (3.16)$$

จะได้ค่าตัวเหนี่ยวนำ

$$L = \frac{380(1 - 0.531)}{3.7 \times 2,000} = 0.317 \text{mH} \quad (3.17)$$

ก) คำนวณหาผลคูณพื้นที่ ( $A_p$ ) โดยเริ่มจากคำนวณหาพลังงานสะสมในตัวเหนี่ยวนำจะได้

$$w = \frac{1}{2}(LI_{max}^2) \quad (3.18)$$

โดยที่  $w$  คือค่าพลังงานสะสมในตัวเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็น จูล (Joules)  
 $L$  คือค่าความเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็น เฮนรี (Henry)  
 $I_{max}$  คือค่ากระแสสูงสุดมีหน่วยเป็น แอมแปร์ (A)

จาก  $I_{max} = I_0 + (\Delta I / 2) = 37 + (3.7 / 2) = 38.85A$ . แทนลงในสมการ 3.19 จะได้

$$w = \frac{1}{2}(0.317 \times 10^{-3}) \times (38.85)^2 = 0.239 \text{ Jule}$$

จาก

$$A_p = A_w A_c = \frac{2w}{K_w K_c B} \quad (3.19)$$

โดยที่  $A_p$  คือค่าตัวคูณพื้นที่ของหม้อแปลงไฟฟ้า  
 $L$  คือค่าความเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็น เฮนรี  
 $A_c$  คือพื้นที่หน้าตัดของแกนหม้อแปลง  
 $A_w$  คือพื้นที่ส่วนว่างเฉพาะส่วนกรอบว่างของแกนหม้อแปลง  
 $K_c$  คือมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อสัญญาณเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม  
 $K_w$  คือมีค่าเท่ากับ 0.6 เมื่อสัญญาณเป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยม  
 $B$  คือสูงสุดของเส้นแรงแม่เหล็กในแกน

ดังนั้นจะได้

$$A_p = \frac{2(0.239)}{0.6 \times 0.8 \times (3 \times 10^6) \times 0.2} = 1.66 \text{ mm}^2$$

ข) กำหนดหาจำนวนรอบขดลวด

$$N = \frac{\hat{L}\hat{I}}{\hat{A}_c\hat{B}} \quad (3.20)$$

โดยที่  $N$  คือจำนวนรอบ  
 $L$  คือค่าความเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็น เฮนรี  
 $I$  คือค่ากระแสสูงสุดมีหน่วยเป็น แอมแปร์

แทนค่าจะได้

$$N = \frac{(0.317 \times 10^{-3}) \times (38.85)}{(201 \times 10^{-6}) \times (0.2)} = 12.25$$

ดังนั้นใช้การพันขดลวด 13 รอบ

ก) คำนวนหาขนาดของขดลวด โดยกำหนดให้  $J = 3 \text{ A/mm}^2$  หรือ  $3 \times 10^6 / \text{m}^2$  จะได้

$$a = \frac{I}{J} = \frac{37}{3 \text{ A/mm}^2} = 12.33 \text{ mm}^2 \quad (3.21)$$

โดยที่  $a$  คือพื้นที่หน้าตัดของขดลวดมีหน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร  
 $I$  คือพิกัดกระแสมีหน่วยเป็นแอมแปร์  
 $J$  คือค่าความหนาแน่นของกระแสต่อหน่วยพื้นที่ ( $\text{A/mm}^2$ ) โดยทั่วไปใช้ 2-5  $\text{A/mm}^2$

ดังนั้นนำค่าที่ได้ไปเปิดเทียบตารางขดลวดมาตรฐานจะได้เบอร์ AWG#8

ง) คำนวนหาช่องว่างอากาศของหม้อแปลง  
 จะได้

$$i_{gap} = \frac{I}{J} = \frac{u_o N^2 A_c}{L} \quad (3.22)$$



โดยที่  $i_{gap}$  คือระยะห่างช่องว่างอากาศ  
 $u_o$  คือค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็ก

แทนค่า 3.17 - 3.22 ลงใน 3.23 จะได้

$$i_{gap} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} [H/m]) \times (13^2) \times (201 \times 10^{-6} [m^2])}{(0.371 \times 10^{-3} [H])} = 0.0001 \text{ mm} \quad (3.23)$$

### 3.11 ชุดควบคุมและแสดงผล dSPACE

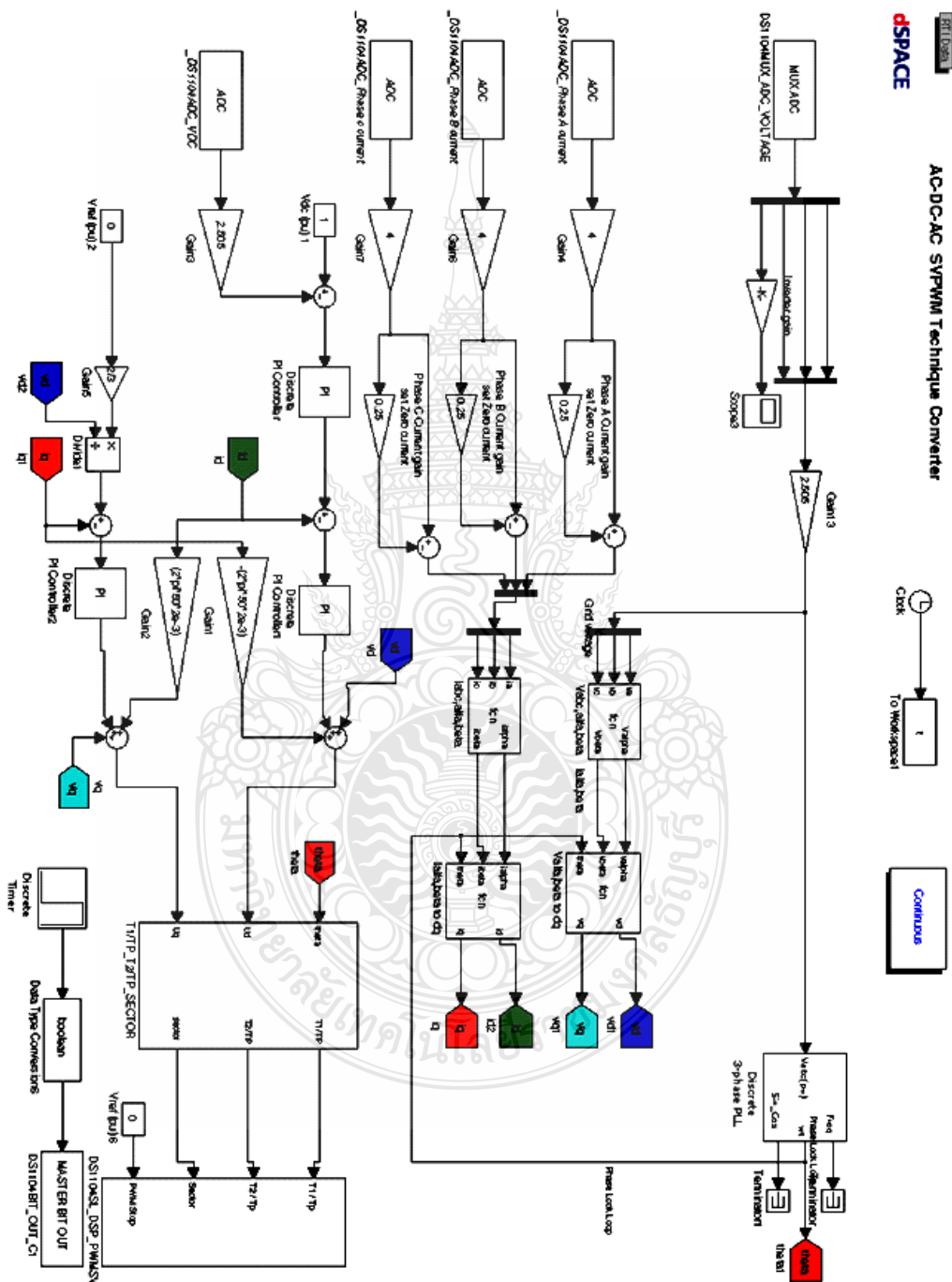
วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการควบคุมการสวิตช์ไอจีบีทีด้วยโปรแกรมแม่เหล็กซึมมูลิงค์ และ ดิสเปซ โดยแสดงผลการตรวจวัดสัญญาณการทำงานผ่านทางโปรแกรม ControlDesk สำหรับ สัญญาณนำเข้าและส่งออกเพื่อการควบคุมจะผ่านทางบอร์ด DS1104



ภาพที่ 3.30 ควบคุมการทำงานของวงจรผ่านโปรแกรมดิสเปซ และบอร์ด DS1104

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการควบคุมการสวิตช์ไอจีบีทีด้วยโปรแกรมแม่เหล็กซึมมูลิงค์ และ ดิสเปซ รับส่งข้อมูลในการสร้างสัญญาณควบคุมผ่านบอร์ด DS1104 โดยรับค่าแรงดันกริตระบบและ ด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านช่องสัญญาณ DS1104MUX\_ADC\_VOLTAGE พร้อมปรับเกนการขยาย ก่อนต่อเข้าบล็อกควบคุม ช่องสัญญาณ DS1104\_ADC\_Phase A Current, DS1104\_ADC\_Phase B Current, DS1104\_ADC\_Phase C Current นำเข้าสัญญาณจากเครื่องวัดกระแสตามลำดับเฟส พร้อมปรับค่าเกนให้เหมาะสม สำหรับพอร์ตวัดกระแสในวิทยานิพนธ์นี้ ต้องต่อสัญญาณชดเชยระดับ กระแส เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่จะแสดงค่ากระแสเป็น 0 ที่แรงดัน 2.5 โวลต์ ดังนั้นจึงต้องมี

การปรับค่าก่อนใช้งาน ชุดท้ายสำหรับพอร์ต DS1104\_ADC\_VDC สำหรับนำเข้าสู่สัญญาณแรงดัน  
 เชื่อมโยงไฟตรงที่วัดได้จริง เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมการ  
 ทำงานของการสวิตช์อุปกรณ์ไอจีบีที ดังแสดงในภาพที่ 3.31



ภาพที่ 3.31 วงจรควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านโปรแกรมคัสเปชและบอร์ด DS1104

## บทที่ 4

### ผลการจำลองและการทดสอบ

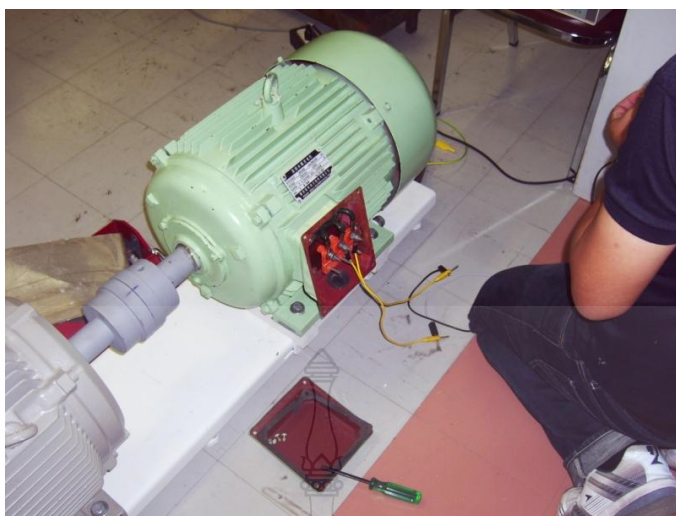
การออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร และทำการทดสอบการทำงานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมแมทแล็บซิมูลิงก์ช่วยในการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สร้างขึ้นมา เพื่อใช้เป็นแบบจำลองของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรขนาด 20 kW

#### 4.1 การหาค่าจากจำลองการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบขั้วแม่เหล็กถาวร

การสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรที่ต้องการจะนำมาทำเป็นต้นแบบของแบบจำลองเสียก่อน การหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรเราสามารถหาค่าพารามิเตอร์บางส่วนได้จากการทดลอง การวัดค่าโดยเครื่องมือวัดและการอ่านค่าพารามิเตอร์จากแผ่นป้ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรโดยตรง โดยค่าที่ได้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบขั้วแม่เหล็กถาวร [10]

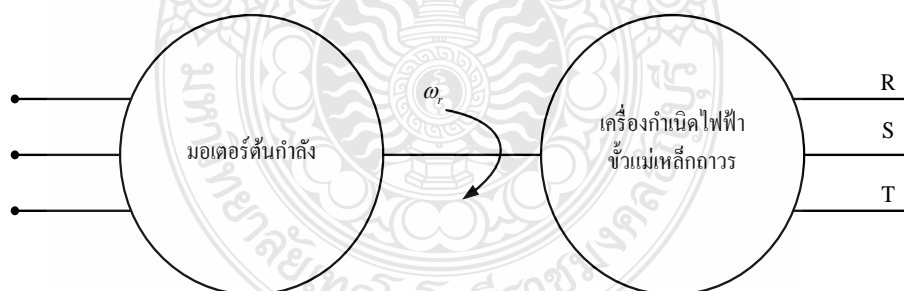
รายละเอียด	พิกัด	หน่วยวัด
ขนาดกำลังไฟฟ้า	20	kW
ความถี่	60 Hz	Hz
ระดับการป้องกัน	IP 54	-
ความเร็วรอบ	900	rpm
ค่าความต้านทาน	1.3972	Ohm
ค่าอินดักแตนซ์	21.885	mH
จำนวนขั้วแม่เหล็ก (Pole)	8	Pole



ภาพที่ 4.1 การทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัมแม่เหล็กถาวรแบบ D.C. Test [10]

#### 4.2 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัมแม่เหล็กถาวร

ในการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัมแม่เหล็กถาวรเพื่อทำการทดสอบหาค่าต่างๆนั้น จะติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัมแม่เหล็กถาวรกับมอเตอร์ที่ใช้เป็นตัวขับเคลื่อน โดยติดตั้งมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนกับอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ได้แก่ เซอร์คิตเบรกเกอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ และ อุปกรณ์แผงควบคุมการหมุนของมอเตอร์ โดยจะต่อตามไดอะแกรมดังภาพที่ 4.1



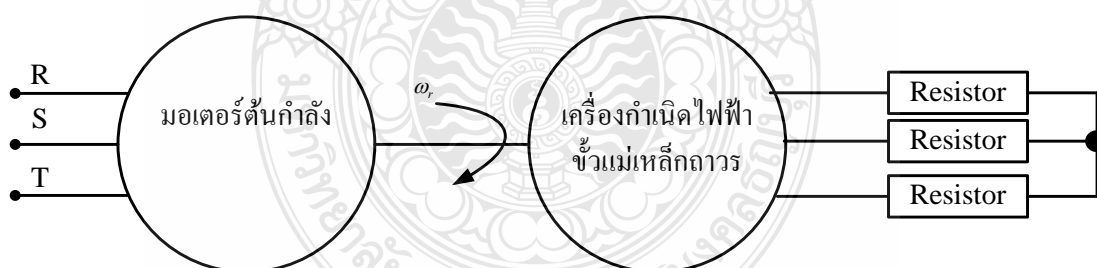
ภาพที่ 4.2 การต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับมอเตอร์



ภาพที่ 4.3 การติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับมอเตอร์ต้นกำลัง

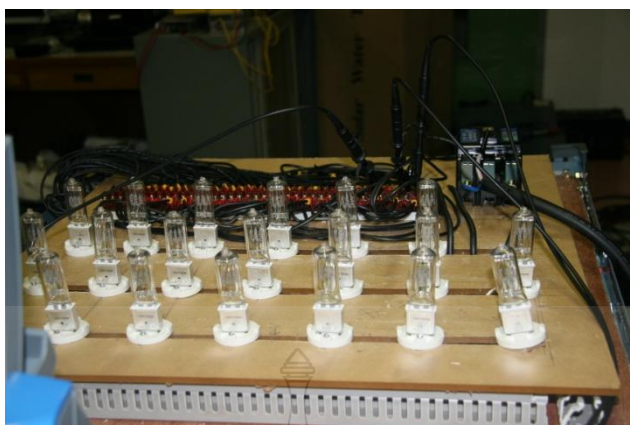
#### 4.3 ติดตั้งและทดสอบโหลดความต้านทานกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร

ในการทดสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยโหลดฮาโลเจนซึ่งถือว่าเป็นโหลดความต้านทานขนาด 1 kW แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ ต่อรวมกันแบบสตาร์เพื่อให้สามารถรับแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายพิกัดแรงดัน 380 โวลต์ ได้ โดยโหลดที่จะนำมาใช้ทดสอบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้ นั้นใช้โหลดขนาด 3, 6, 12 kW



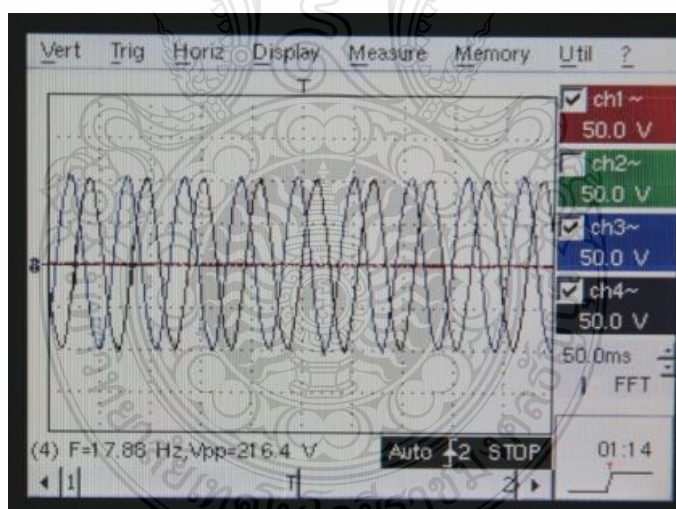
ภาพที่ 4.4 การต่อโหลดความต้านทานเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร

ภาพที่ 4.44 ไดอะแกรมการต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับมอเตอร์ต้นกำลังและโหลดความต้านทาน ในการทดสอบความสามารถในการผลิตไฟฟ้า และทดสอบโหลดความต้านทาน โดยในวิทยานิพนธ์นี้ใช้เป็นโหลดไฟฮาโลเจน ขนาดพิกัดกำลังไฟฟ้า 1 kW แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต ต่อกันแบบสตาร์



ภาพที่ 4.5 โหลดความต้านทาน

ภาพที่ 4.45 ทดสอบกับโหลดความต้านทานขนาด 6 kW, 12 kW และ 18 kW ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าโหลดที่เหมาะสมต่อการทดลองอยู่ระหว่าง 3 kW - 15 kW เนื่องจากมอเตอร์ขับเคลื่อนกำลังไม่สามารถขับโหลดได้ ในกรณีที่ต่อโหลดเต็มพิกัด

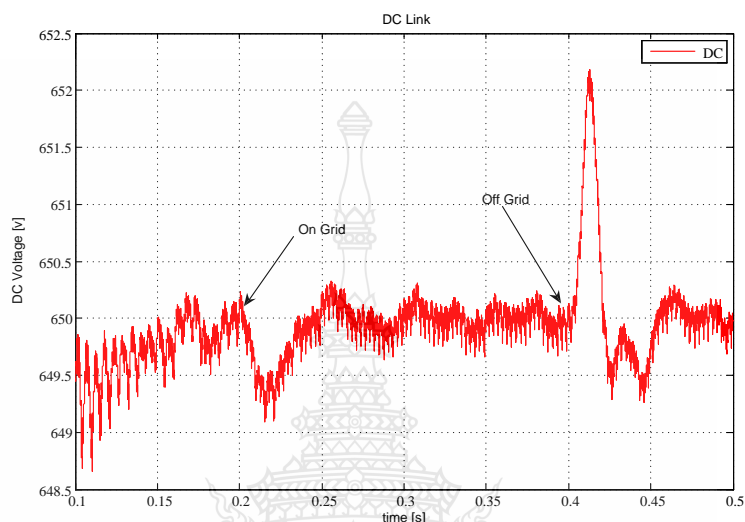


ภาพที่ 4.6 กราฟแรงดันค่ายอด  $V_{pp}$

ภาพที่ 4.46 กราฟแรงดันไฟฟ้าทดสอบกับโหลดความต้านทานขนาด 6 kW, 12 kW และ 18 kW ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าโหลดที่เหมาะสมต่อการทดลองอยู่ระหว่าง 3 kW - 15 kW เนื่องจากมอเตอร์ขับเคลื่อนกำลังไม่สามารถขับโหลดได้ ในกรณีที่ต่อโหลดเต็มพิกัด

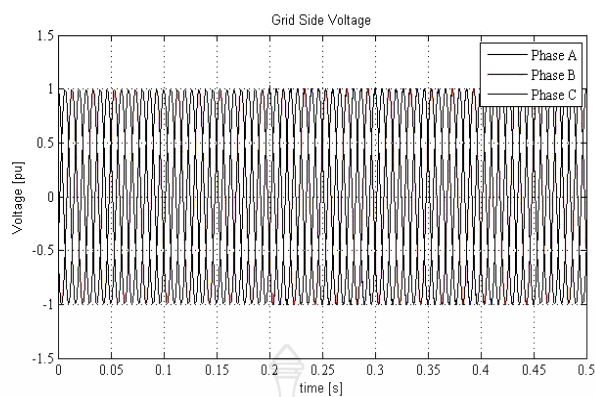
#### 4.4 ผลการจำลองการทำงานด้านคอนเวอร์เตอร์กำลัง

การจำลองการทำงานของอุปกรณ์คอนเวอร์เตอร์กำลัง ด้วยโปรแกรมแมทแล็บซิมมูลิงค์ ก่อนนำผลที่ได้ไปทำการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ ซึ่งผลการจำลองเป็นดังต่อไปนี้

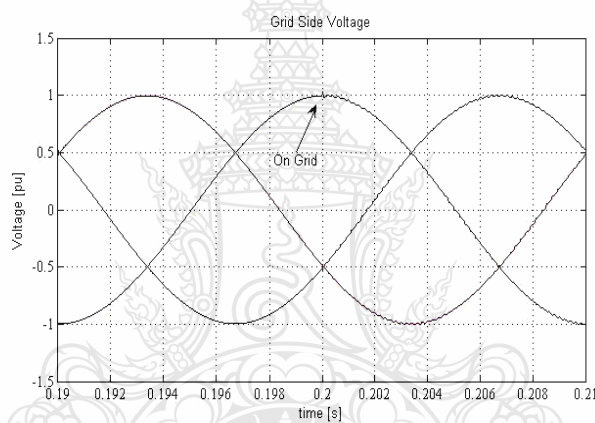


ภาพที่ 4.7 แรงดันเชื่อมต่อไฟตรง (DC LINK)

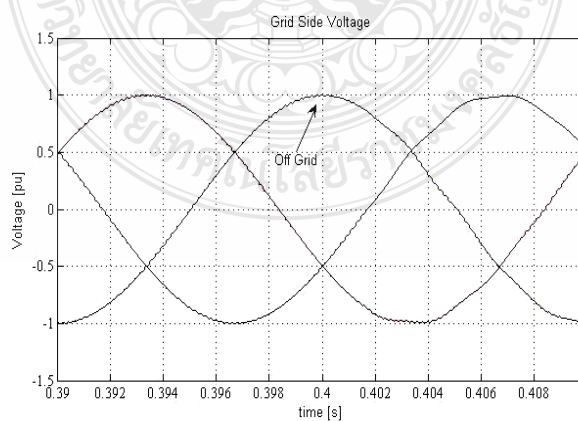
ภาพที่ 4.7 แรงดันเชื่อมต่อไฟตรงของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านคอนเวอร์เตอร์กำลัง ด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คอนเวอร์เตอร์กำลังจะแปลงผันแรงดันจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรเรียงกระแส 3 เฟส แบบไดโอดบริดจ์ เมื่อมีการเชื่อมต่อระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริดระบบ (On Grid) เมื่อเวลา 0.2 วินาที จะสังเกตเห็นได้ว่าแรงดันเชื่อมต่อไฟตรงตกลงประมาณ 0.7 โวลต์ โดยใช้เวลาประมาณ 0.02 วินาที ซึ่งจะเห็นได้จากในภาพที่ 4.7 ที่เวลาประมาณ 0.22 วินาที และระบบควบคุมจะใช้เวลา 0.02 วินาที ในการปรับระดับแรงดันให้กลับมาอยู่ในพิสัยแรงดันที่ต้องการควบคุมที่ 650 โวลต์ ในเวลา 0.24 วินาที และแรงดันมีการกระเพื่อมขึ้นถึง 652 โวลต์ เมื่อมีการปลดโหลดออกจากกริดระบบทันทีทันใด (Off Grid) ที่เวลา 0.4 วินาที แรงดันที่เพิ่มขึ้นเกิดจากระบบควบคุมพยายามที่จะรักษาแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงให้คงที่แต่โหลดปลายทางถูกปลดกระทันหันทำให้แรงดันเชื่อมโยงไฟตรงสูงขึ้น และถูกควบคุมได้เมื่อเวลาผ่านไป 0.05 วินาที



ภาพที่ 4.8 แรงดันด้านกริดระบบ (หน่วยเปอร์ยูนิต)



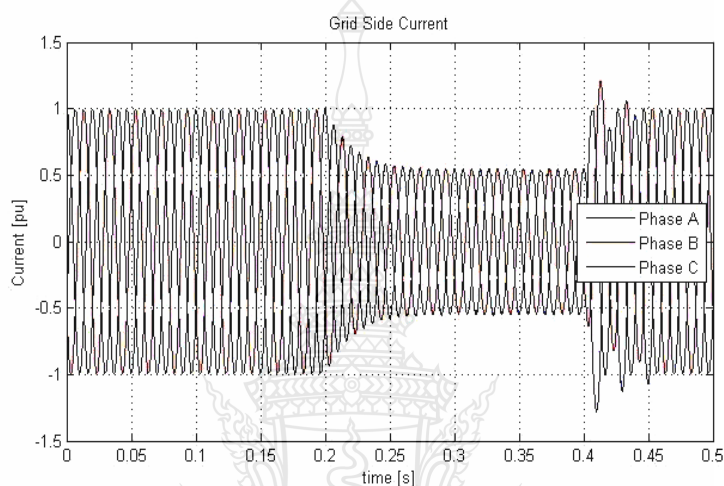
ภาพที่ 4.9 ขยายช่วง On Grid แรงดันด้านกริดระบบ (ขยายจากภาพที่ 4.8)



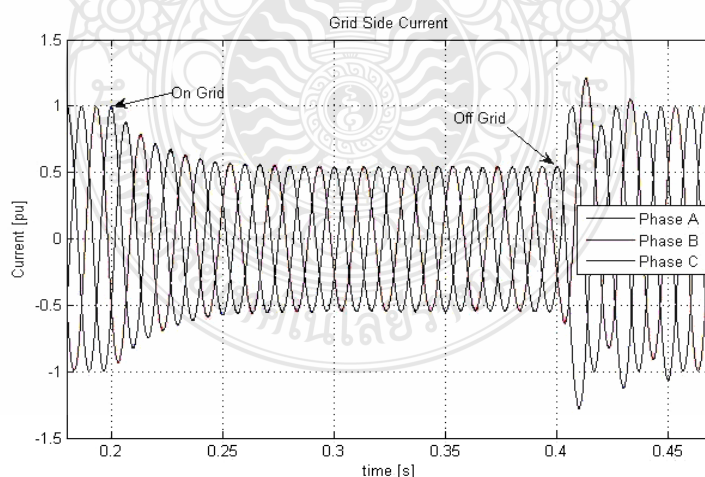
ภาพที่ 4.10 ขยายช่วง Off Grid แรงดันด้านกริดระบบ (ขยายจากภาพที่ 4.8)



ภาพที่ 4.8 ภาพที่ 4.9 และภาพที่ 4.10 แรงดันด้านกริดระบบ เมื่อมีการเชื่อมต่อระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริดระบบ ที่เวลา 0.2 วินาที จะสังเกตเห็นได้ว่าจะมีการกระเพื่อมของแรงดันและรูปคลื่นไซน์จะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย (ภาพที่ 4.9) หลังจากนั้นที่เวลา 0.4 วินาที ขณะปลดโหลดออกจากกริดระบบ แรงดันก็จะมีอาการกระเพื่อมเล็กน้อยเช่นเดียวกับช่วงเชื่อมต่อกริดระบบต่างกันว่าสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ขณะปลดโหลดจะมีการผิดรูปมากกว่าเล็กน้อย

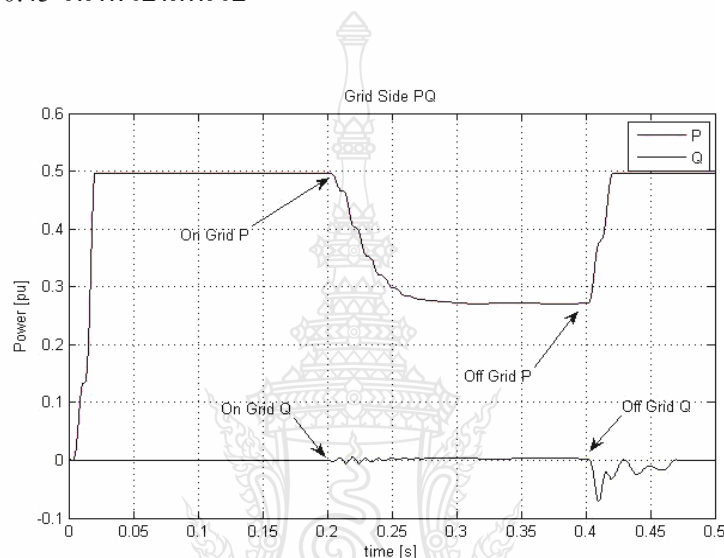


ภาพที่ 4.11 กระแสด้านกริดระบบ (หน่วยเปอร์เซ็นต์)



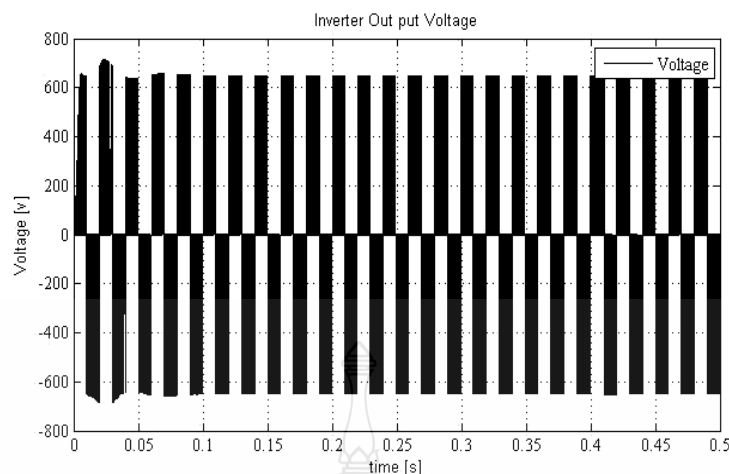
ภาพที่ 4.12 ขยายกระแสด้านกริดระบบ (ขยายภาพที่ 4.11)

ภาพที่ 4.11 และภาพที่ 4.12 กระแสด้านกริดระบบ เมื่อมีการเชื่อมต่อระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริดระบบ เมื่อเวลา 0.2 วินาที พบว่าการจ่ายกระแสของกริดระบบให้กับโหลดจะค่อยๆ ลดลงและคงที่เมื่อเวลา 0.3 วินาที ไปอย่างต่อเนื่อง หลังจากนั้นที่เวลา 0.4 วินาที ขณะปลดโหลดออกจากกริดระบบ กระแสก็จะมีการกระเพื่อมเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากการต้องจ่ายโหลดเต็มพิกัดอย่างทันทีทันใดที่มีการปลดเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกจากระบบ และมีการแกว่งตัวอยู่ประมาณ 0.05 วินาที ก่อนคงตัวที่เวลา 0.45 วินาที เป็นต้นไป



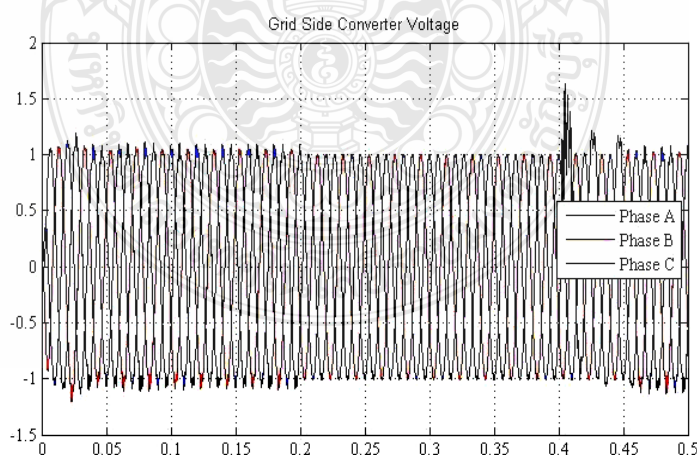
ภาพที่ 4.13 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดด้านกริดระบบ

ภาพที่ 4.13 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟารีแอกทีฟ (Active and Reactive Power) ด้านกริดระบบให้กับโหลด เมื่อมีการเชื่อมต่อระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริดระบบ เมื่อเวลา 0.2 วินาที พบว่าการจ่ายกำลังของด้านกริดระบบให้กับโหลดจะค่อยๆ ลดลงและคงที่เมื่อเวลา 0.3 วินาที ไปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งก็หมายความว่า การเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริดระบบได้อย่างสมบูรณ์ จนกระทั่งที่เวลา 0.4 วินาที ที่ได้ทำการตั้งค่าเวลาการปลดโหลดออกจากกริดระบบ กำลังไฟฟ้าก็จะมีการกระเพื่อมเล็กน้อย และจะดึงกำลังรีแอกทีฟจากกริดระบบซึ่งเป็นผลจากค่าโหลดความเหนี่ยวนำในระบบ จากการปลดโหลดออกอย่างทันทีทันใดและมีการแกว่งตัวอยู่ก่อนคงตัวที่เวลา 0.4728 วินาที

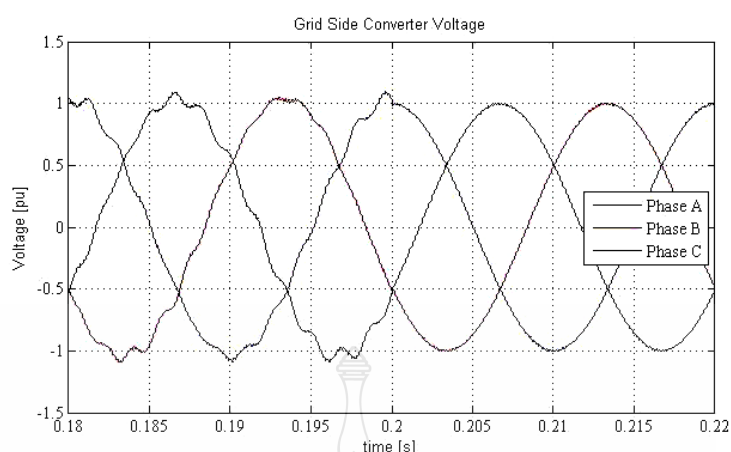


ภาพที่ 4.14 แรงดันด้านออกจากคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบ

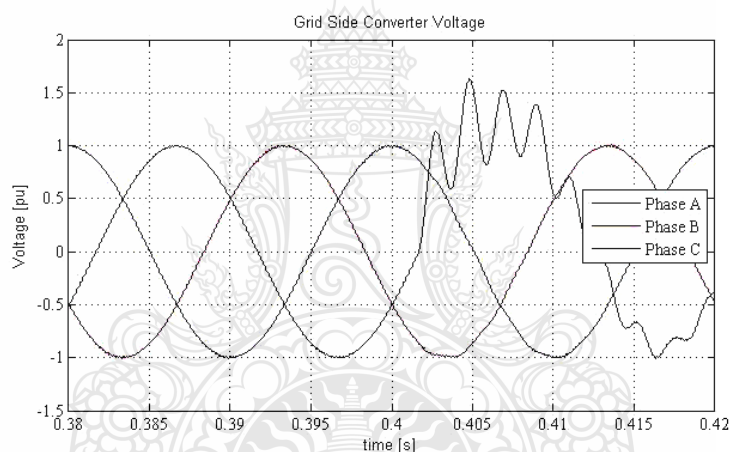
ภาพที่ 4.14 แรงดันด้านออกจากคอนเวอร์เตอร์กำลังก่อนเข้าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อลดสัญญาณรบกวนจากความถี่ที่เกิดจากการสวิตช์ซึ่ง หลุดรอดเข้าไปรบกวนระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าในกริดระบบ จะเห็นได้ว่าในช่วงเวลา 0 - 0.075 วินาที ของการทำงานระดับแรงดันยังมีการแกว่งตัวอยู่เนื่องจากระบบควบคุมกำลังปรับสัญญาณการสวิตช์ให้ได้ตามค่าควบคุมที่ใช้แรงดันไฟฟ้าจากกริดระบบเป็นสัญญาณอ้างอิงในการสร้างสัญญาณควบคุมการสวิตช์ให้ระดับแรงดันเหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อเข้ากริดระบบ โดยแสดงผลเป็นแรงดันสูงสุด



ภาพที่ 4.15 แรงดันด้านออกจากคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบเมื่อผ่านวงจรกรองความถี่

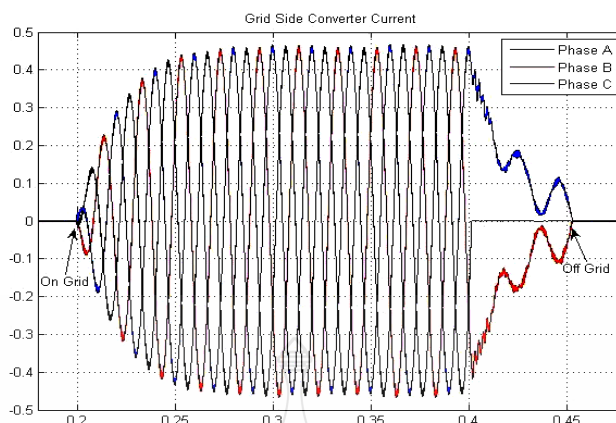


ภาพที่ 4.16 ขยายแรงดันด้านออกคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบ (ขยายภาพที่ 4.15)



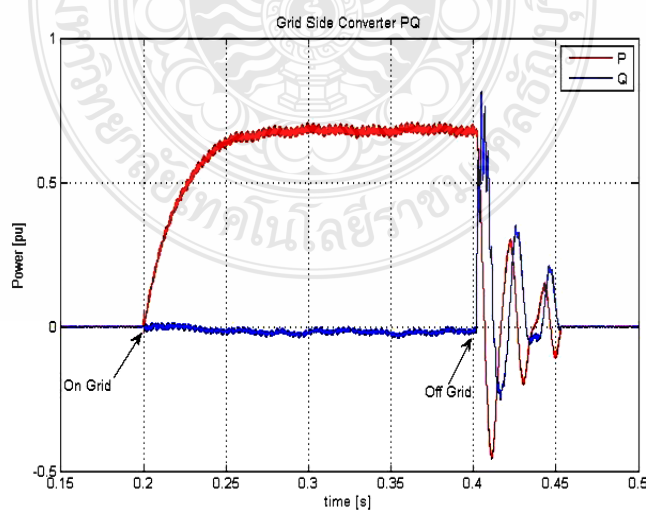
ภาพที่ 4.17 ขยายแรงดันด้านออกคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบ (ขยายภาพที่ 4.15)

ภาพที่ 4.15 แรงดันด้านออกจากคอนเวอร์เตอร์กำลังกริดระบบโดยผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแสดงเป็นเปอร์ยูนิต โดยเมื่อมีการเชื่อมต่อระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริดระบบ เมื่อเวลา 0.2 วินาที จะเห็นได้ว่า Phase C จะมีการกระเพื่อมของแรงดัน และรูปคลื่นไซน์มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย (ภาพที่ 4.16) แต่รูปคลื่นสัญญาณจะอินเฟสกัน หลังจากนั้นที่เวลา 0.4 วินาที ขณะปลดโหลดออกจากกริดระบบ (ภาพที่ 4.17) แรงดัน Phase C จะมีการกระเพื่อมเช่นเดียวกับช่วงเชื่อมต่อกริดระบบ แต่จะต่างกันที่สัญญาณรูปคลื่น ไซน์ขณะปลดโหลดจะมีการผิดรูปมากกว่าเนื่องจากการทำงานกำลังอยู่ในช่วงรูปคลื่นเป็นบวกละกำลังจ่ายโหลดเต็มพิกัดอยู่ และระบบควบคุมพยายามที่จะรักษาเสถียรภาพของระบบให้ปกติได้เมื่อเวลาผ่านไป



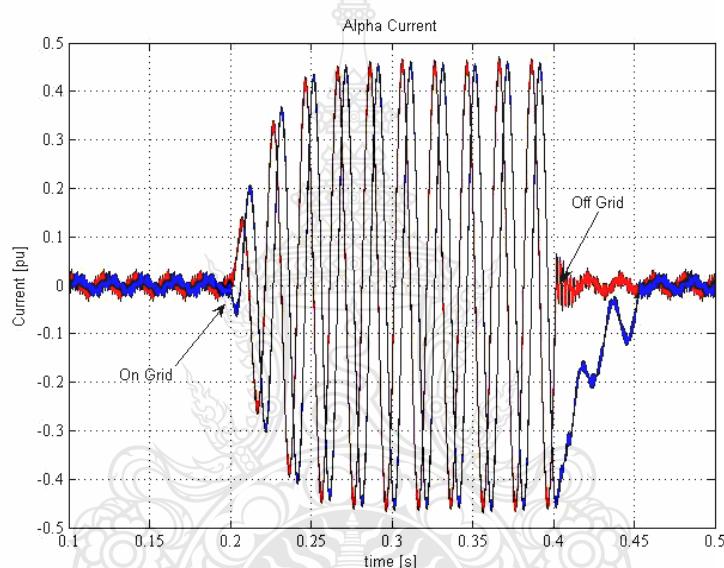
ภาพที่ 4.18 กระแสคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบ

ภาพที่ 4.18 กระแสของคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบ ก่อนถึงเวลาการเชื่อมต่อเข้ากริดระบบจะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังไม่มีการจ่ายกระแสเข้ากริดระบบ และมีการเชื่อมต่อบนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริดระบบ เมื่อเวลา 0.2 วินาที พบว่าการจ่ายกระแสของคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบให้กับโหลดจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น และคงที่เมื่อเวลา 0.3 วินาที ไปอย่างต่อเนื่อง หลังจากนั้นที่เวลา 0.4 วินาที ขณะปลดโหลดออกจากกริดระบบอย่างทันทีทันใด กระแสก็จะมีการลดลงทันทีจากการปลดโหลดออกอย่างทันทีทันใด และเป็น 0 ที่เวลา 0.4528 วินาที ในขณะเดียวกันจะเห็นได้ว่า Phase A นั้นอยู่ขณะรูปคลื่นเป็น 0 พอดี แต่ Phase B และ Phase C อยู่ในช่วงจ่ายกระแสสูงสุดพอดี ขณะปลดวงจรตัวเหนี่ยวนำของวงจรรองความถี่จึงค่อยๆ คายประจุและลดระดับลงมาเป็นศูนย์ในที่สุด



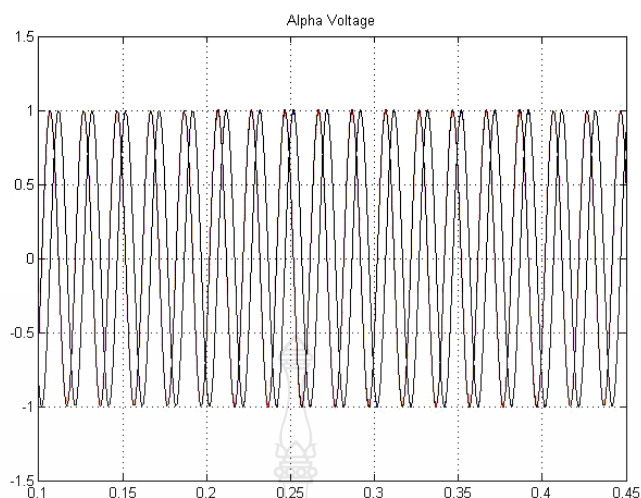
ภาพที่ 4.19 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าให้กับโหลดของคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบ

ภาพที่ 4.19 การส่งผ่านกำลังไฟฟ้าแอกติฟและกำลังไฟฟ้ารีแอกติฟ ของคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบให้กับโหลด เมื่อมีการเชื่อมต่อระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริดระบบ เมื่อเวลา 0.2 วินาที พบว่าการจ่ายกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริดระบบให้กับโหลดจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น และคงที่เมื่อเวลา 0.3 วินาที ไปอย่างต่อเนื่อง หลังจากนั้นที่เวลา 0.4 วินาที ขณะปลดโหลดออกจากกริดระบบ กำลังไฟฟ้าก็จะมีภาระเพื่อเล็กน้อยจากการปลดโหลดออกอย่างทันทีทันใดและมีการแกว่งตัวอยู่เนื่องจากในระบบมีค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุอยู่ จึงค่อยๆ คายประจุออกมาจนเป็น 0 ที่เวลา 0.4528 วินาที



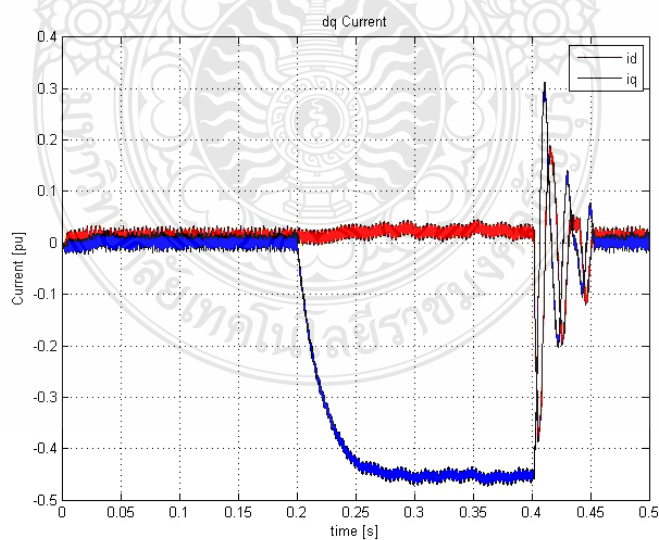
ภาพที่ 4.20 การแปลงแกนกระแสจากแกนนิ่ง 3 เฟส สู่แกนนิ่ง 2 เฟส

ภาพที่ 4.20 การแปลงแกนกระแสจากแกนนิ่ง 3 เฟส สู่แกนนิ่ง 2 เฟส  $abc$  to  $\alpha\beta$  เพื่อการสร้างสัญญาณการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบ โดยจุดวัดสัญญาณจะต่ออันดับอยู่ระหว่างคอนเวอร์เตอร์กำลังกับสวิตช์ตัดตอนอัตโนมัติก่อนเชื่อมต่อกริดระบบ เมื่อมีการเชื่อมต่อระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริดระบบ เมื่อเวลา 0.2 วินาที พบว่ากระแสจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป และคงที่เมื่อเวลา 0.3 วินาที ไปอย่างต่อเนื่อง หลังจากนั้นที่เวลา 0.4 วินาที ขณะปลดโหลดออกจากกริดระบบอย่างทันทีทันใด กระแสก็จะมีภาระลดลงทันทีจากการปลดโหลดออกอย่างทันทีทันใดกระแสในแกน  $\beta$  ซึ่งกำลังอยู่ในพิกัดสูงสุดจะค่อยๆ ตกลงมาเนื่องจากค่าเหนี่ยวนำในวงจร และเป็น 0 ที่เวลา 0.4528 วินาที ซึ่งจะสัมพันธ์กับการจ่ายกระแสให้กับโหลดในภาควงจรกำลัง



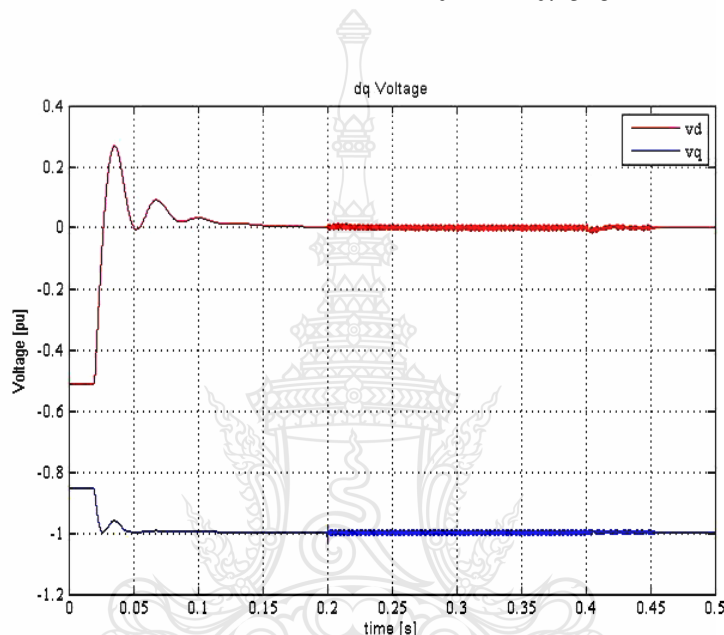
ภาพที่ 4.21 การแปลงแแกนแรงดันจากแแกนนิ่ง 3 เฟส สู่แแกนนิ่ง 2 เฟส

ภาพที่ 4.21 การแปลงแแกนแรงดัน  $abc$  to  $\alpha\beta$  เพื่อนำไปสร้างสัญญาณการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบ โดยจุดวัดสัญญาณจะอยู่ทางด้านกริดระบบเพื่อนำมาสร้างสัญญาณอ้างอิง และแยกมุมเฟสสำหรับสร้างสัญญาณการทริกเกทไอจีบีที ขณะมีการเชื่อมต่อระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริดระบบ



ภาพที่ 4.22 การแปลงแแกนกระแสจากแแกนนิ่ง 2 เฟส สู่ แแกนหมุน 2 เฟส

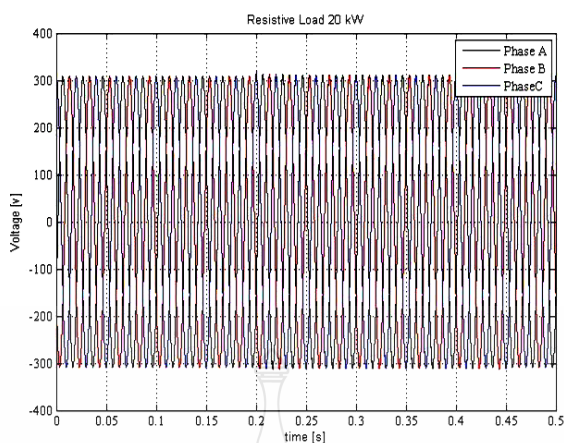
ภาพที่ 4.22 การแปลงแกนกระแสจากแกนนิ่ง 2 เฟส สู่ แกนหมุน 2 เฟส  $\alpha\beta$  to  $dq$  เพื่อการสร้างสัญญาณการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบ เมื่อมีการเชื่อมต่อระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริดระบบ เมื่อเวลา 0.2 วินาที พบว่ากระแส  $i_q$  จะค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป และคงที่ เมื่อเวลา 0.3 วินาที ไปอย่างต่อเนื่อง จากนั้นที่เวลา 0.4 วินาที ขณะปลดโหลดออกจากกริดระบบอย่างทันทีทันใด กระแสก็จะมีการปรับตัวเพื่อเข้าสู่ 0 โดยจะมีระยะเวลาการปรับตามการคายตัวของอุปกรณ์สะสมพลังงานในวงจร และมีค่าเป็น 0 ที่เวลา 0.4528 วินาที



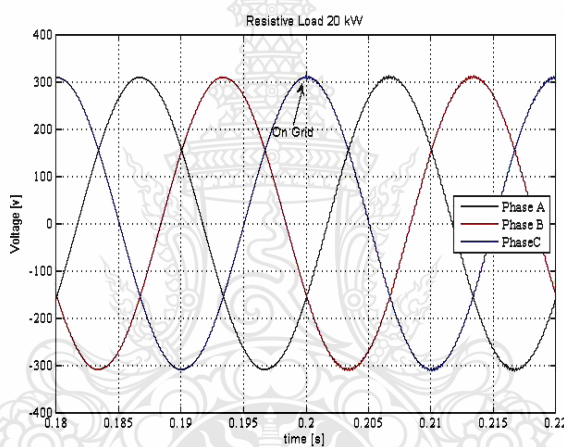
ภาพที่ 4.23 การแปลงแกนแรงดันจากแกนนิ่งสู่แกนหมุน

ภาพที่ 4.23 การแปลงแกนแรงดันจากแกนนิ่งสู่แกนหมุน  $\alpha\beta$  to  $dq$  เพื่อการสร้างสัญญาณการควบคุมการทำงานของคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบจะเห็นได้ว่าในช่วงเวลา 0 - 0.075 วินาที ของการทำงานระดับแรงดันยังมีการแกว่งตัวอยู่ เนื่องจากระบบควบคุมกำลังปรับสัญญาณการสวิตช์ให้ได้ตามค่าควบคุมที่ใช้แรงดันไฟฟ้าจากกริดระบบเป็นสัญญาณอ้างอิงในการสร้างสัญญาณควบคุมการสวิตช์ให้ระดับแรงดันเหมาะสมสำหรับการเชื่อมต่อเข้ากับกริดระบบ เมื่อมีการเชื่อมต่อระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริดระบบ เมื่อเวลา 0.2 วินาที พบว่าแรงดันในแกนนิ่ง  $v_d, v_q$  มีค่าปรับเปลี่ยนน้อยมาก ซึ่งไม่มีผลกระทบต่อการสร้างสัญญาณควบคุมการสวิตช์ไอจีบีที

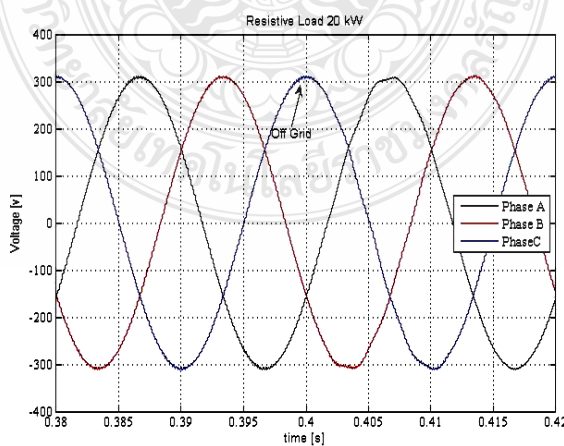




ภาพที่ 4.24 แรงดันที่โหลดความต้านทานขนาด 20 kW

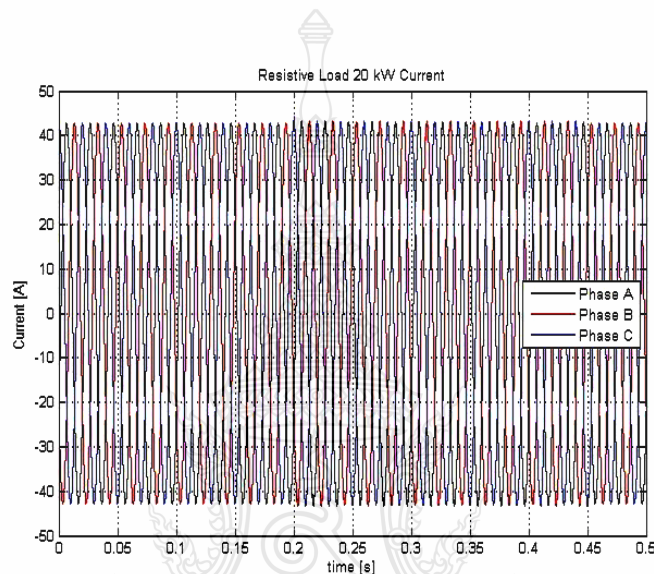


ภาพที่ 4.25 ขยายแรงดันที่โหลดความต้านทานขนาด 20 kW (ขยายภาพที่ 4.24)

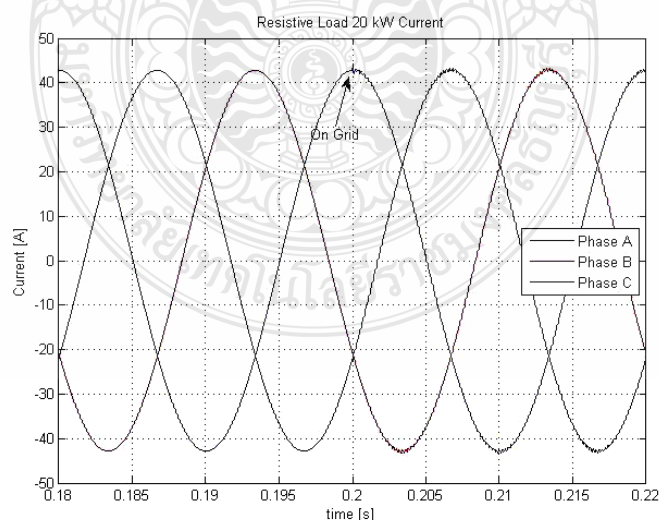


ภาพที่ 4.26 ขยายแรงดันที่โหลดความต้านทานขนาด 20 kW (ขยายภาพที่ 4.24)

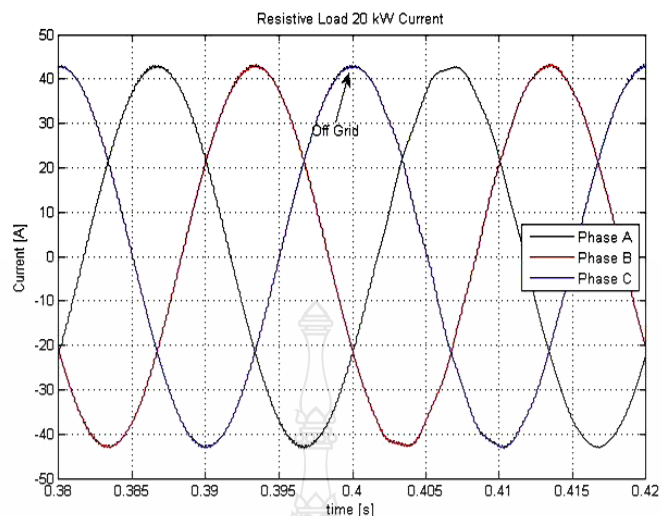
ภาพที่ 4.24 ภาพที่ 4.25 และภาพที่ 4.26 แรงดันโหลดความต้านทานขนาด 20 kW โดยแรงดันที่ถูกวัดเป็นเฟสเทียบกับกราวด์ (Phase to Ground) ค่าที่วัดได้เป็น  $v_{\max}$  เมื่อมีการเชื่อมต่อระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริดระบบ เมื่อเวลา 0.2 วินาที พบว่าแรงดันมีการกระเพื่อมเล็กน้อย หลังจากนั้นที่เวลา 0.4 วินาที ขณะปลดโหลดออกจากกริดระบบอย่างทันทีทันใดพบว่า แรงดันมีการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นไซน์เล็กน้อยและเป็นปกติเมื่อเวลา 0.417 วินาที



ภาพที่ 4.27 กระแสที่โหลดความต้านทานขนาด 20 kW

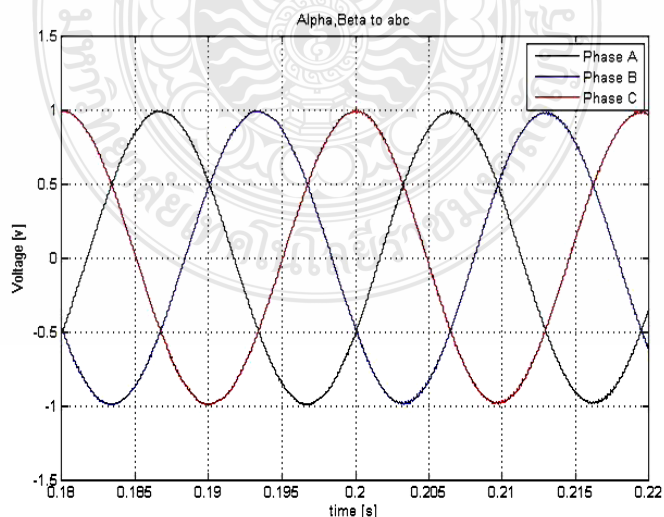


ภาพที่ 4.28 ขยายกระแสที่โหลดความต้านทานขนาด 20 kW (ขยายภาพที่ 4.27)



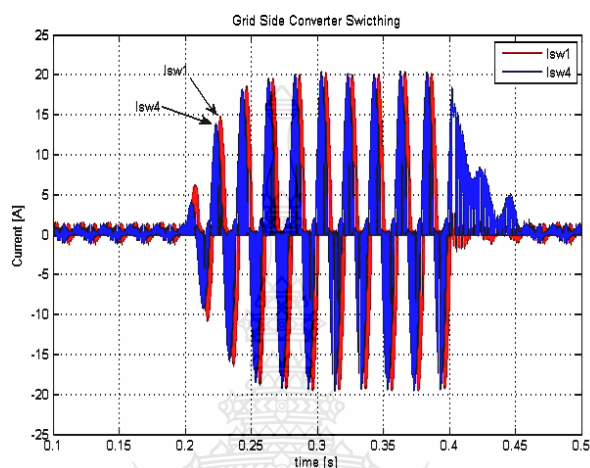
ภาพที่ 4.29 ขยายกระแสที่โหลดความต้านทานขนาด 20 kW (ขยายภาพที่ 4.27)

ภาพที่ 4.27 ภาพที่ 4.28 และภาพที่ 4.29 กระแสที่โหลดความต้านทานขนาด 20 kW โดยวัดกระแสเฟสเทียบกับกราวด์ (Phase to Ground) ค่าที่วัดได้เป็น  $i_{\max}$  เมื่อมีการเชื่อมต่อบรรยากาศกำหนดไฟฟ้าเข้ากับกริดระบบ เมื่อเวลา 0.2 วินาที พบว่ากระแสมีการกระเพื่อมเล็กน้อย หลังจากนั้นที่เวลา 0.4 วินาที ขณะปลดโหลดออกจากกริดระบบอย่างทันทีทันใดพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นไซน์ของกระแสเล็กน้อยและเป็นปกติเมื่อเวลา 0.417 วินาที



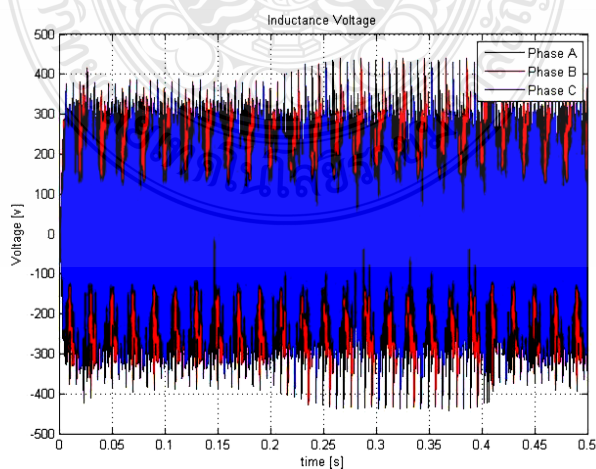
ภาพที่ 4.30 การแปลงแกนแรงดัน  $\alpha\beta$  to  $abc$  เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมคอนเวอร์เตอร์กำลัง

ภาพที่ 4.30 การแปลงแกนแรงดัน  $\alpha\beta$  to  $abc$  เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ในการควบคุมคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบ ให้สามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่กริดระบบ ซึ่งกำลังจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดความต้านทานขนาด 20 kW โดยค่าเป็นหน่วยเปอร์เซ็นต์



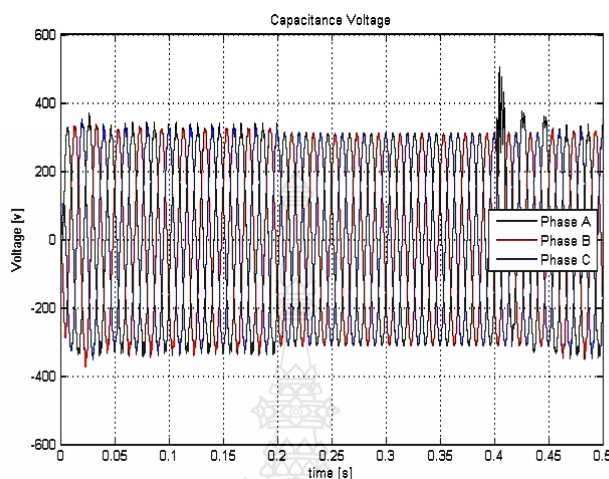
ภาพที่ 4.31 กระแสสวิตช์ซึ่งในอุปกรณ์คอนเวอร์เตอร์กำลัง

ภาพที่ 4.31 กระแสในการสวิตช์ซึ่งของอุปกรณ์คอนเวอร์เตอร์กำลัง เมื่อมีการเชื่อมต่อระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริดระบบ เมื่อเวลา 0.2 วินาที และปลดวงจรหลังจากเวลา 0.4 วินาที จะเห็นได้ว่าการจ่ายกระแสของอุปกรณ์จะยังสวิตช์อย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นผลจากสัญญาณควบคุมการสวิตช์ถูกส่งเข้ามาตามสัญญาณรูปคลื่นที่วัดได้ และจะหมดไปเมื่อสัญญาณแรงดันและกระแสที่ถูกวัดมาควบคุมหมดไปซึ่งเป็นผลต่อกันโดยตรง



ภาพที่ 4.32 แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ

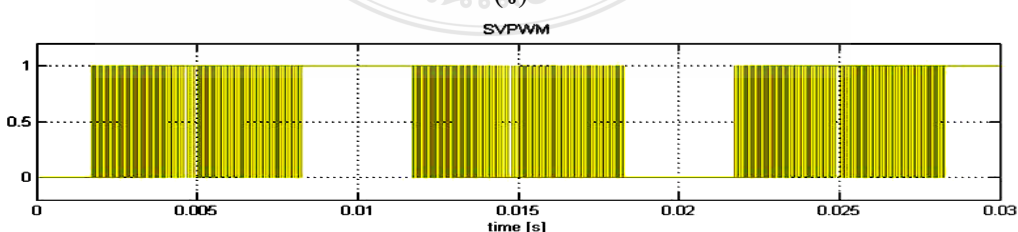
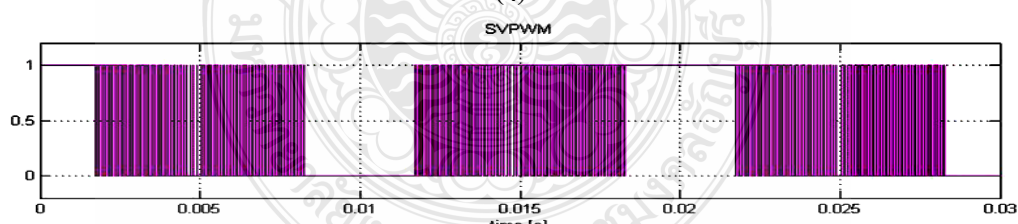
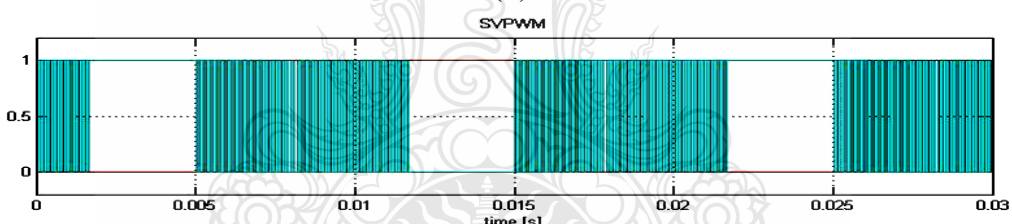
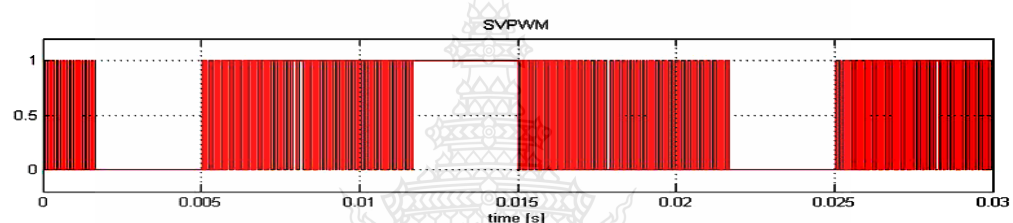
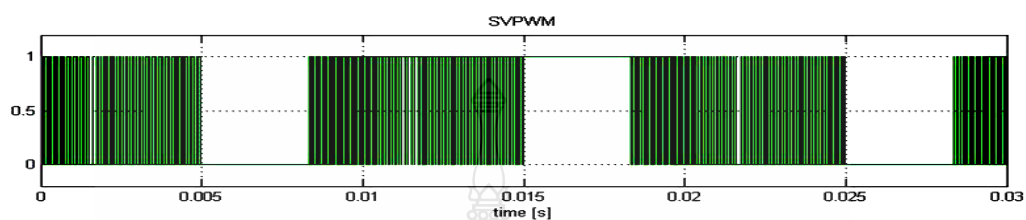
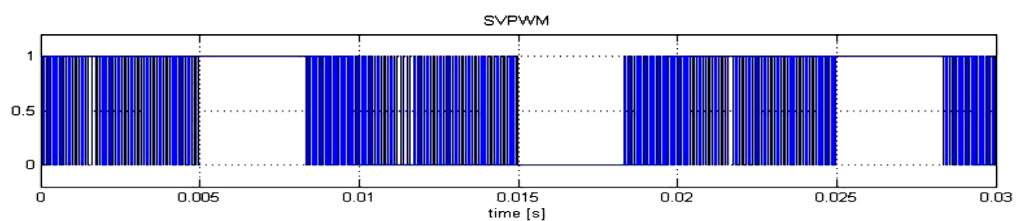
ภาพที่ 4.32 แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำในวงจรองความถี่ต่ำผ่าน โดยแรงดันที่ถูกวัดเป็นเฟสเทียบกับกราวด์ ค่าที่วัดได้เป็น  $v_{\max}$



ภาพที่ 4.33 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุ

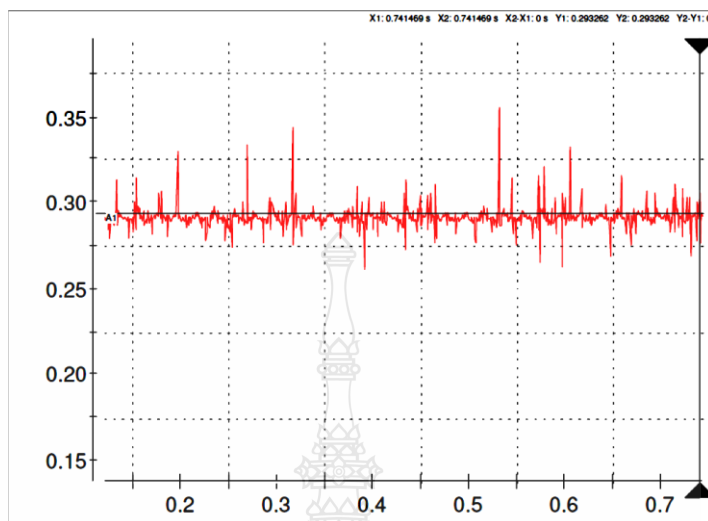
ภาพที่ 4.33 แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุในวงจรองความถี่ต่ำผ่าน โดยแรงดันที่ถูกวัดเป็นเฟสเทียบกับกราวด์ ค่าที่วัดได้เป็น  $v_{\max}$  เมื่อมีการเชื่อมต่อระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับ กริดระบบ เมื่อเวลา 0.2 วินาที พบว่าแรงดันมีการกระเพื่อมเล็กน้อย หลังจากนั้นที่เวลา 0.4 วินาที ขณะปลดโหลดออกจากกริดระบบอย่างทันทีทันใด พบว่าแรงดันใน Phase A จะมีการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นไซน์มากกว่า Phase B, C เล็กน้อย

การจำลองสัญญาณการทริกเกทไอจีบีทีด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์ ดังแสดงในภาพที่ 4.34 โดยใช้บล็อกเครื่องมือในโปรแกรมเมทเล็ปซิมมูลิ่งค์ Discrete SV PWM Generator ต่ออยู่กับบล็อกควบคุม ซึ่งต้องคุมแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงให้คงที่ขณะเชื่อมต่อแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้ากับกริดระบบ โดยใช้ความถี่สวิตซ์ซึ่งที่ 10 กิโลเฮิร์ต และความถี่พื้นฐาน 50 เฮิร์ต ค่ามอดูเลชันอินเด็กซ์ 0.8 (Modulation Index) โดยภาพที่ 4.34 (ก-จ) เป็นสัญญาณเกท 1 - 6 ตามลำดับ



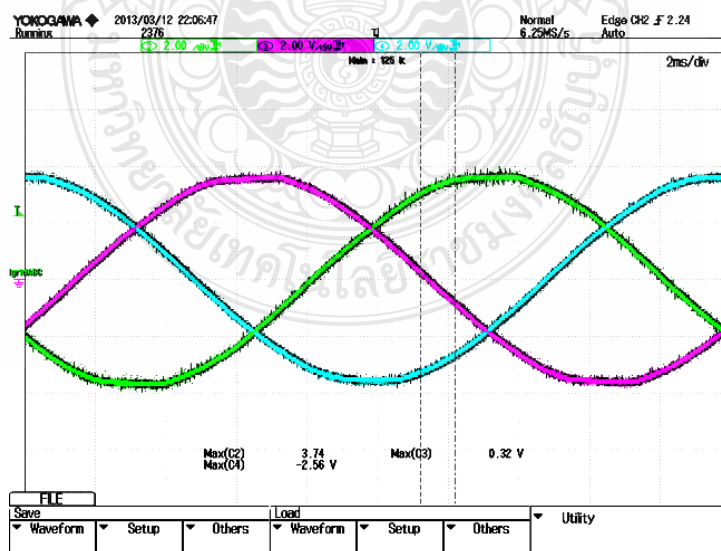
ภาพที่ 4.34 จำลองสัญญาณขับเคลื่อนด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์

#### 4.5 ผลการทดลองการทำงานด้านคอนเวอร์เตอร์กำลัง

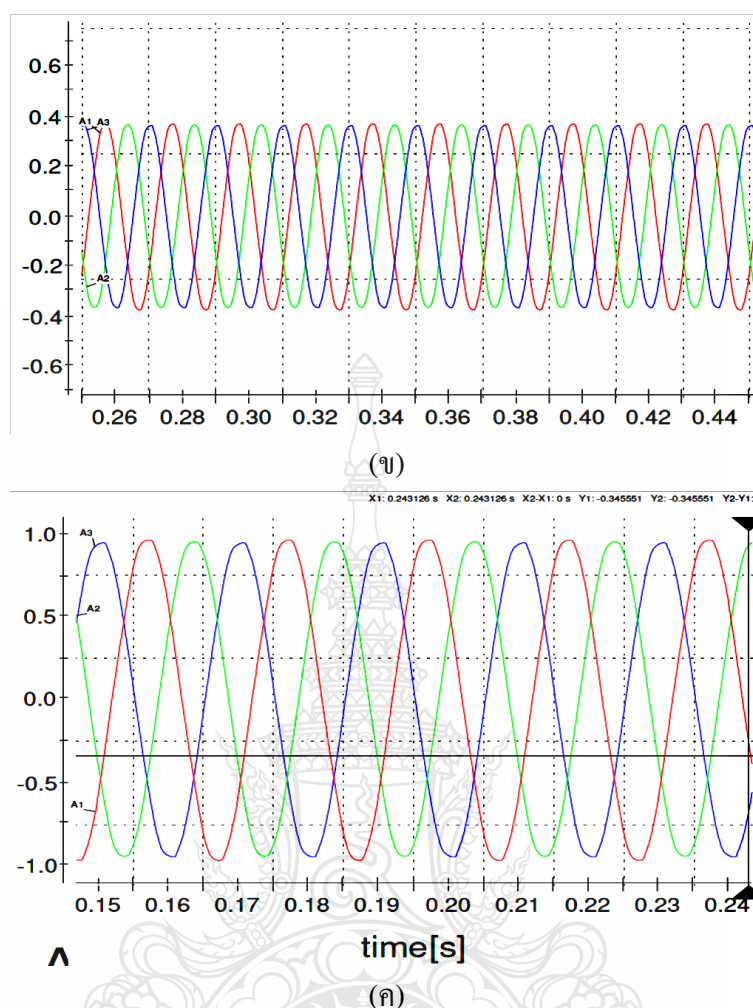


ภาพที่ 4.35 แรงดันเชื่อมต่อไฟตรงที่ได้จากการทดลอง

ภาพที่ 4.35 แรงดันเชื่อมต่อไฟตรงของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่านคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าคอนเวอร์เตอร์กำลังจะแปลงผันแรงดันจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรเรียงกระแส 3 เฟส แบบไดโอดบริดจ์ ขณะเชื่อมต่อกับคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบ วัดค่าโดย LV-25P และแสดงผลผ่าน โปรแกรม ControlDesk หน่วยเป็นเปอร์ยูนิต



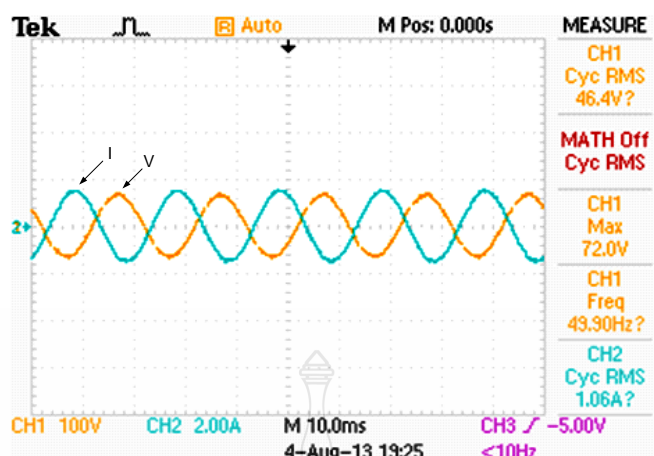
(ก)



ภาพที่ 4.36 แรงดันด้านกริดระบบที่ได้จากการทดลอง

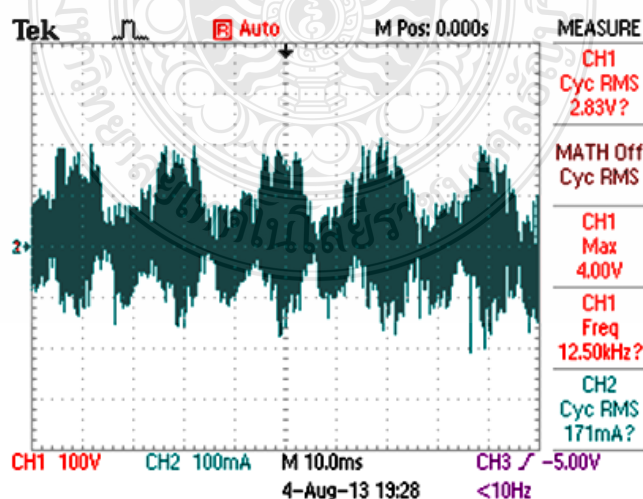
ภาพที่ 4.36 แรงดันด้านกริดระบบ โดยวัดค่าด้วยเครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้าแบบติดตั้งบนแผ่นปริ้นท์เซอร์กิตบอร์ด (Print Circuit Board: PCB) ยี่ห้อ “LEM” รุ่น LV-25P และแสดงผลในโปรแกรม ControlDesk ซึ่งเชื่อมต่อผ่านพอร์ต ACD (Analog to Digital) ด้วยบอร์ดควบคุม dSPACE DS1104 โดยในภาพ (ก) แสดงแรงดันด้านกริดระบบโดยวัดผ่านเครื่องมือวัด LV-25P ก่อนเข้าบอร์ด DS1104 ซึ่งยังไม่สามารถนำมาควบคุมได้ สำหรับภาพ (ข) แสดงผลการวัดสัญญาณแรงดันกริดด้านเข้าผ่าน DS1104 บอร์ดและยังไม่มีกรปรับเกน สุดท้ายภาพ (ค) สัญญาณวัดแรงดันด้านกริดผ่านบอร์ด DS1104 และผ่านการปรับเกนเพื่อให้ได้สัญญาณที่ถูกต้องสำหรับการนำไปสร้างสัญญาณควบคุมและเป็นแรงดันอ้างอิงกริดที่วัดก่อนถึงเวลาเชื่อมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากริดระบบ





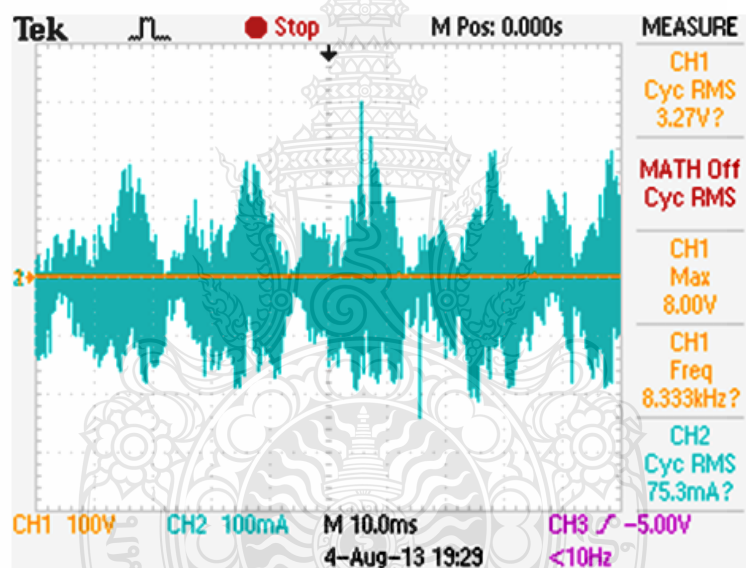
ภาพที่ 4.37 กระแสและแรงดันด้านกริดระบบก่อนการเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ภาพที่ 4.37 กระแสและแรงดันด้านกริดระบบ ขณะเริ่มทำการทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้า กระแสสลับแรงดันต่ำๆ ให้กับโหลดหลอดไฟฟ้านขนาด 1,000 วัตต์ ต่อกันอยู่แบบสตาร์ ก่อนที่จะมีการเชื่อมต่อเข้ากับกริด โดยในการทดลองได้ใช้แวนิแอล แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบปรับค่าได้ เป็นอุปกรณ์จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับต่ำๆ แทนแรงดันกริดระบบ เพื่อความปลอดภัยในการทดลอง โดยใช้โพรบวัดกระแส CHAUVTN ARNOUX รุ่น EN3 ย่านการวัด 100 mV/A ต่อเข้ากับเครื่องมือวัด TEKTRONIC รุ่น TPS2024 โดยตั้งย่านวัดกระแส 1,000 mV/A ที่ช่องวัดสัญญาณ CH2 และวัดแรงดันด้วย ดิฟเฟอเรนเชียลโพรบ (Differential Probe) TEKTRONIC รุ่น P5200 สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบ Line to Line โดยตั้งย่านวัด 1/500 ที่ช่องวัด CH1



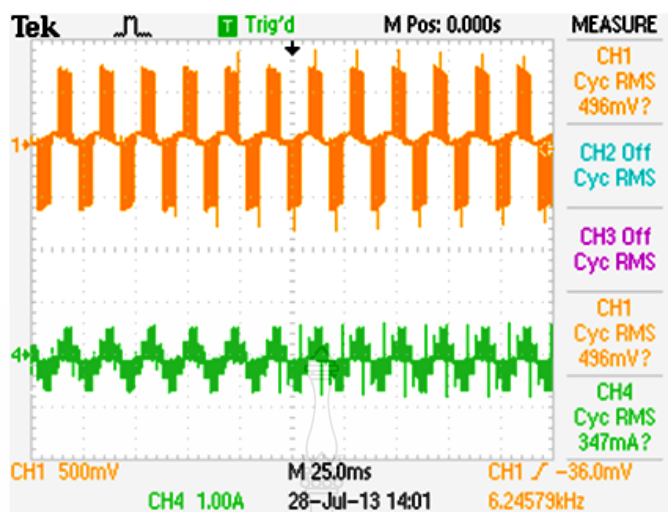
ภาพที่ 4.38 กระแสด้านกริดระบบเมื่อมีการเชื่อมโยงเข้ากับกริด เมื่อเวลา 100 วินาที

ภาพที่ 4.38 กระแสด้านกริดระบบ ขณะทำการทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำๆ ให้กับโหลดหลอดไฟฟ้าขนาด 1,000 วัตต์ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต จำนวน 3 หลอด ต่อกันอยู่แบบสตาร์ ขณะทำการทดลองได้กำหนดให้มีการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริดที่เวลา 100 วินาที พบว่าแรงดันและกระแสของระบบได้ตกลง ซึ่งสาเหตุอันเนื่องมาจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้านั้นมีขนาดเล็ก เมื่อมีการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าอย่างทันทีทันใด ทำให้แหล่งจ่ายไม่สามารถรักษาเสถียรภาพในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ แต่จากการทดลองจะเห็นได้ว่าระบบควบคุมสามารถสร้างสัญญาณควบคุมการขับเคลื่อนไอจีบี ในการสวิตช์สร้างแรงดันไฟฟ้าจ่ายให้กับโหลดได้โดยไม่มีการช้อตเซอร์กิต ทำให้แน่ใจว่าระบบสามารถที่จะเชื่อมต่อได้อย่างปลอดภัย เมื่อต้องทดลองกับแรงดันพิกัดของกริดระบบ



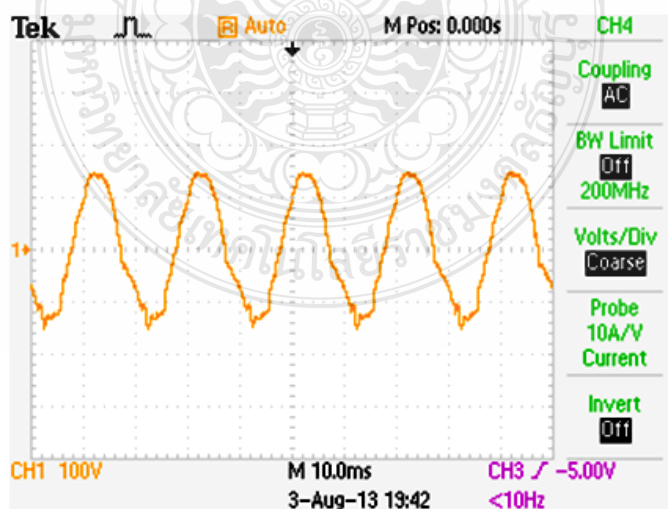
ภาพที่ 4.39 กระแสและแรงดันด้านกริดระบบเมื่อมีการเชื่อมโยงเข้ากับกริด เมื่อเวลา 100 วินาที

ภาพที่ 4.39 กระแสและแรงดันด้านกริดระบบ ขณะทำการทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำๆ ให้กับโหลดหลอดไฟฟ้าขนาด 1,000 วัตต์ 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต จำนวน 3 หลอด ต่อกันอยู่แบบสตาร์ ขณะทำการทดลองได้กำหนดให้มีการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับ กริดที่เวลา 100 วินาที พบว่าแรงดันและกระแสของระบบได้ตกลง ซึ่งสาเหตุอันเนื่องมาจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้านั้นมีขนาดเล็ก เมื่อมีการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าอย่างทันทีทันใด ทำให้แหล่งจ่ายไม่สามารถรักษาเสถียรภาพในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ ทำให้แรงดันไฟฟ้าในระบบตกลง

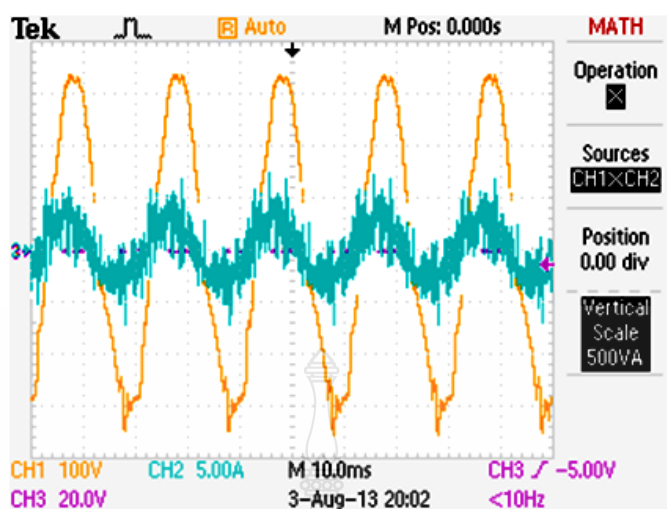


ภาพที่ 4.40 แรงดันและกระแสด้านกริดระบบก่อนผ่านวงจรกรองความถี่

ภาพที่ 4.40 แรงดันและกระแสด้านกริดระบบก่อนผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เมื่อมีการจ่ายให้กับโหลดความต้านทาน ก่อนที่จะถึงเวลาการเชื่อมต่อระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริดระบบ โดยใช้โพรบวัดกระแส CHAUVTN ARNOUX รุ่น EN3 ย่านการวัด 100 mV/A ต่อเข้ากับเครื่องมือวัด TEKTRONIC รุ่น TPS2024 โดยใช้ช่องวัดกระแสที่ CH4 และดิฟเฟอเรนเชียลโพรบ TEKTRONIC รุ่น P5200 โดยใช้ช่องวัดที่ CH1 สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบ Line to Line โดยตั้งย่านวัด 1/500

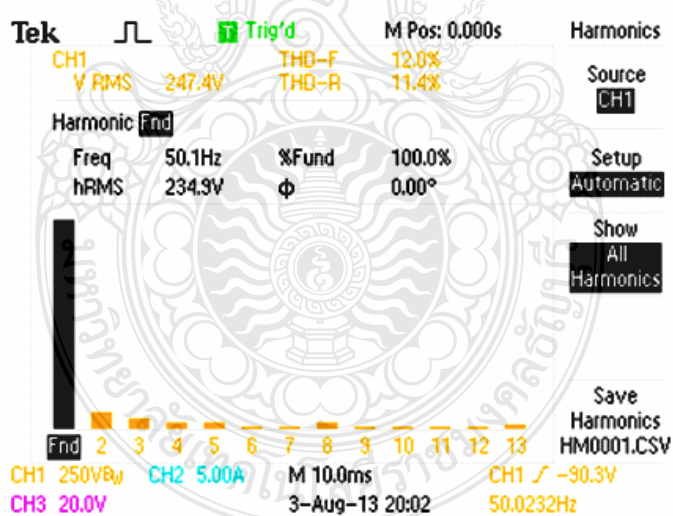


ภาพที่ 4.41 แรงดันด้านออกของคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบจากการทดลอง



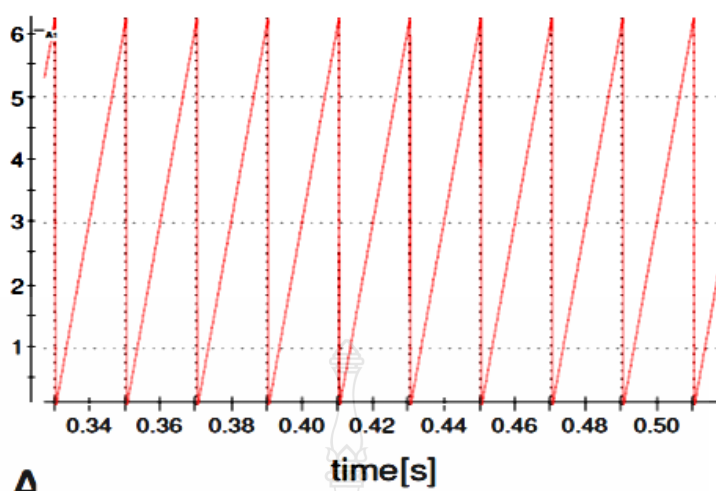
ภาพที่ 4.42 แรงดันและกระแสด้านออกของคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดผ่านวงจรกรองความถี่

ภาพที่ 4.41 - 4.42 แรงดันด้านออกจากคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบโดยผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำ จะเห็นได้ว่าลักษณะรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจะเป็นรูปไซน์



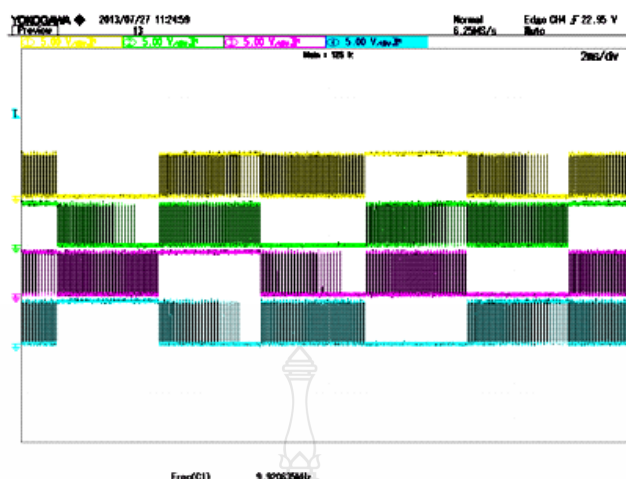
ภาพที่ 4.43 ฮาร์โมนิกของคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบ

ภาพที่ 4.43 ฮาร์โมนิกที่เกิดจากการสวิตซ์ของคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบโดยผ่านผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



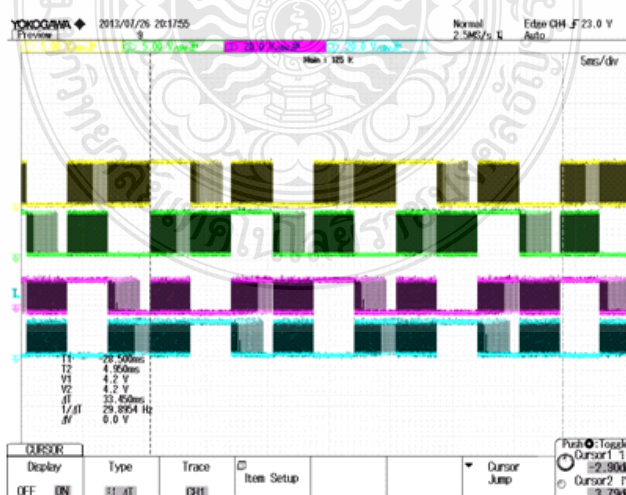
ภาพที่ 4.44 สัญญาณเฟสล็อกคูล

ภาพที่ 4.44 สัญญาณเฟสล็อกคูลแสดงผลโดยโปรแกรม ControlDesk ที่ได้จากการวัดแรงดันด้านกริกระบบ มาคำนวณมุมเฟสของแรงดันด้านกริกระบบ เพื่อนำไปสร้างสัญญาณการสวิตช์ ไอจีบีทีของคอนเวอร์เตอร์กำลัง เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้าให้สามารถที่จะเชื่อมโยงเข้าสู่กริกระบบได้ ซึ่งในการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริดนั้น สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือขนาดและความถี่ของแรงดันไฟฟ้า ดังนั้นการสร้างสัญญาณการควบคุมการทริกขาเกตของ IGBT ให้สร้างแรงดันไฟฟ้าให้ได้ทั้งขนาดและความถี่ก่อนเชื่อมโยงนั้นต้องนำค่าตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในระบบทั้งทางด้านกริกระบบและแรงดันเชื่อมโยงไฟตรง มาสร้างสัญญาณควบคุมในแกนหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส  $d, q$  ซึ่งง่ายกว่าจึงต้องมีการแปลงแกนของสัญญาณจากแกนนิ่ง  $a, b, c$  มาอยู่ในแกนหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส  $d, q$  โดยในวิทยานิพนธ์นี้ใช้เทคนิคเฟสล็อกคูลช่วยในการเช็ค และหาค่ามุมจากกริกระบบโดยจะนำค่าของแรงดันเฟส  $V_A, V_B$  และ  $V_C$  ผ่านเครื่องวัด LV-25P เข้ามาทาง ADC อินพุตพอร์ตของบอร์ด DS1104 เพื่อนำเข้าบล็อกเฟสล็อกคูลในเครื่องมือของ แมทแล็บซิมมูลิ่งค์ ก็จะได้ค่ามุมในการนำไปร่วมสร้างสัญญาณการควบคุมค่าแรงดัน  $v_q$  ให้มีค่าเท่ากับศูนย์โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI โดยที่การแปลงแรงดันไฟฟ้า  $V_A, V_B$  และ  $V_C$  จากแกนนิ่ง 3 เฟส มาอยู่ในแกนนิ่ง  $\alpha, \beta$  และจากนั้นจะถูกแปลงไปอยู่ในแกนหมุน  $d, q$  ซึ่งใช้ค่ามุม  $\theta$  ของแรงดันไฟฟ้าที่ได้มาจากบล็อกเฟสล็อกคูล มาใช้ในการแปลงแกน ถ้าค่าแรงดันไฟฟ้า  $v_q$  ยังไม่เท่ากับศูนย์แสดงว่าค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าที่ได้นั้นยังมีค่าที่ไม่ถูกต้อง ระบบจะทำการปรับค่าจนกว่าจะทำให้ค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงจนได้ค่ามุมที่ถูกต้อง



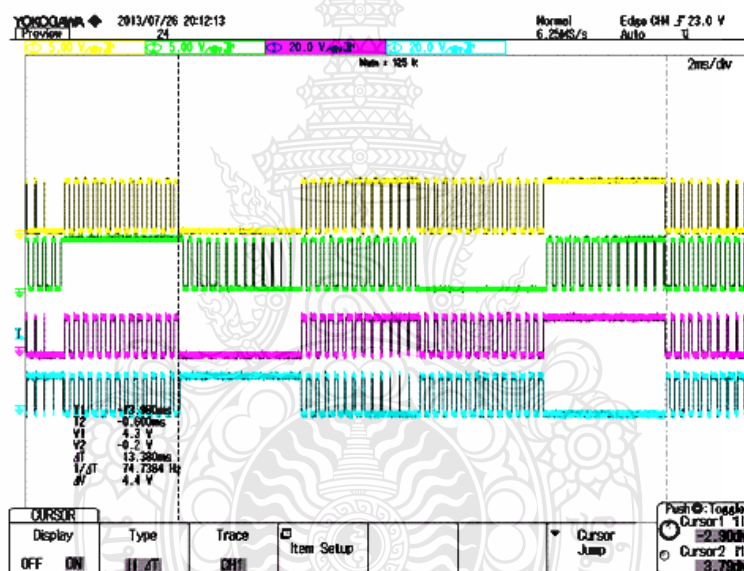
ภาพที่ 4.45 สัญญาณขั้วเกทจากบอร์ด DS1104

ภาพที่ 4.45 สัญญาณพัลส์ที่จะใช้ขับเกท IGBT โดยโปรแกรมแมทแล็บซิมมูลิ่งค์ เชื่อมต่อกับบอร์ด DS1104 โดยใช้เทคนิคการสวิตช์แบบสเปซเวกเตอร์พัลส์วิซมอดูเลชัน จะมีระดับแรงดันต่ำเพียง 0 - 5 โวลต์ ไม่สามารถขับเกท IGBT เบอร์ HGTC 30 N 60 C 3 ที่ต้องการแรงดันสูงถึง  $\pm 20$  โวลต์ จึงต้องนำไปผ่านวงจรเพิ่มระดับแรงดัน โดยวิทยานิพนธ์นี้ใช้ สวิตช์เชื่อมต่อทางแสงเบอร์ TLP250 และแสดงผลโดยใช้เครื่องมือวัด ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DLM2040 ในภาพแสดงสัญญาณพัลส์สำหรับขั้วเกทไอจีบีที 1, 3, 5 และ 2 ตามลำดับจากบนลงล่าง โดยสัญญาณที่ได้ยังไม่ผ่าน TLP250 ซึ่งจะได้นำเสนอในภาพที่ 4.46



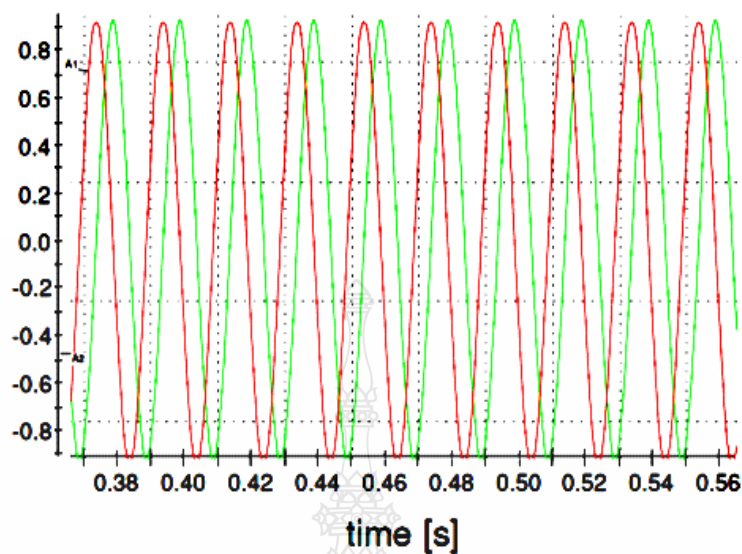
ภาพที่ 4.46 สัญญาณขั้วเกทจากบอร์ด DS1104 ที่ผ่านวงจรขั้วเกทเบอร์ TLP250

ภาพที่ 4.46 สัญญาณพัลส์ที่สร้างด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์ผ่านบอร์ด DS1104 ไปยังตัวต่อแบบตัวดี 37 พิน ( 37 Pin D Subminiature Connector ) โดยทำการวัดที่ขา 7, 8 และ 9 เทียบกับกราวด์ ซึ่งการต่อกราวด์ที่ใช้จากบอร์ด DS1104 นั้นสามารถที่จะต่อรวมกันหรือแยกกันได้ แต่ต้องแยกกราวด์กันแต่ละชุดเมื่อผ่านชุด TLP250 แล้ว โดยสัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณขับเคลื่อนไอจีบีทีด้านกึ่งบน ตำแหน่ง 1, 3 และ 5 สำหรับสัญญาณด้านกึ่งล่างนั้นจะวัดได้จากพิน 26, 27 และ 28 (สัญญาณเรียงลำดับเป็น 2, 4, 6 ) พินที่เทียบกับกราวด์จากบอร์ด DS1104 ซึ่งตำแหน่งของไอจีบีทีด้านกึ่งล่างนั้นจะเป็นขา 4, 6 และ 2 ซึ่งในการต่อวงจรนั้นต้องระมัดระวังในการเลือกต่อขาเกทของไอจีบีทีที่สัญญาณพัลส์ที่ออกจากบอร์ด Slave I/O PWM ของ DS1104 นั้นมีขนาด 0 - 5 โวลต์ โดยมีความถี่สวิตซ์ และค่าเวลาวิกฤต (Dead Time) ตามที่ตั้งค่าในบล็อก DS1104 SL\_CP\_PWMV



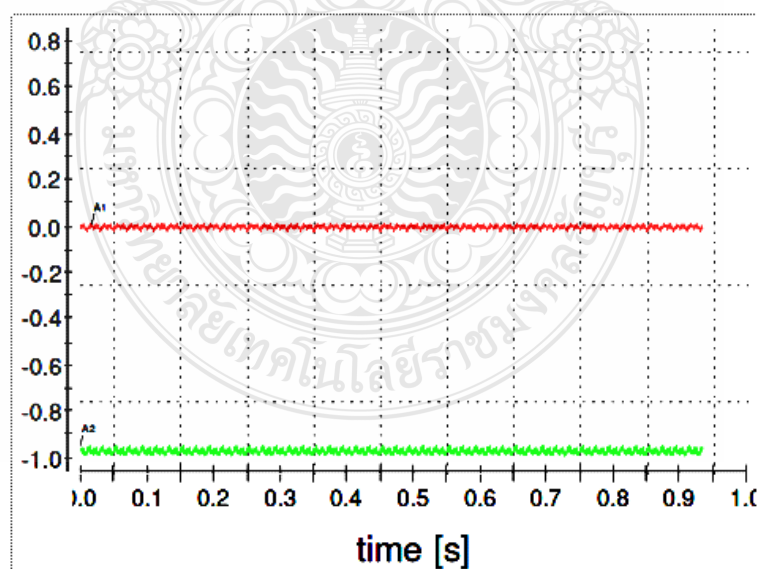
ภาพที่ 4.47 สัญญาณขับเคลื่อนจากบอร์ด DS1104 ที่ผ่านวงจรขับเคลื่อนเบอร์ TLP250 (ภาพขยาย)

ภาพที่ 4.47 สัญญาณพัลส์ที่สร้างด้วยเทคนิค SVPWM ผ่านบอร์ด DS1104 ไปยังตัวต่อแบบตัวดี 37 พิน ( 37 Pin D Subminiature Connector ) และชุด TLP250 เพื่อเพิ่มระดับแรงดันขับเคลื่อน แล้ว โดยสัญญาณด้านบนสุดจะเป็นเกท 1 สัญญาณลำดับที่ 2 คือเกท 3 โดยระดับแรงดันเป็น 0 - 5 โวลต์ และสัญญาณที่ 3 คือสัญญาณขับเคลื่อน 1 ที่ผ่านวงจรขับเคลื่อน TLP250 มาแล้วจะเห็นได้ว่าสัญญาณจะเหมือนกันต่างกันเพียงระดับแรงดันเท่านั้น และสัญญาณด้านล่างสุดคือสัญญาณที่เป็นส่วนกลับของสัญญาณเกท 1 จะเห็นได้ว่าสัญญาณนี้จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับเกท 1 ทุกประการ



ภาพที่ 4.48 การแปลงกระแสรอบบ  $abc$  เป็น  $\alpha, \beta$

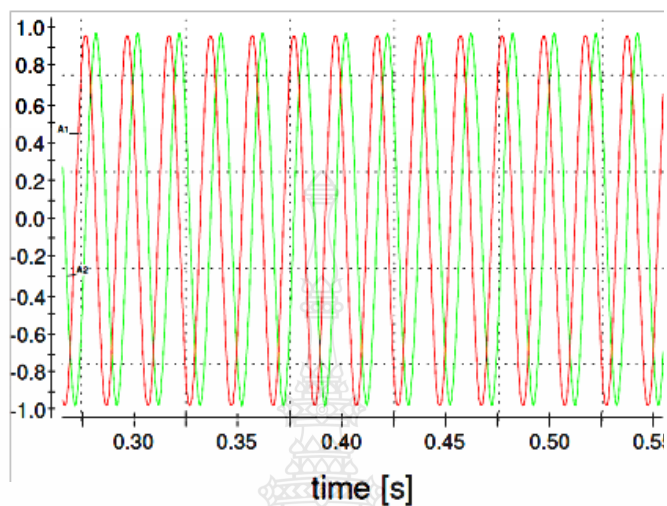
ภาพที่ 4.48 การแปลงแรงดันสเปซเวกเตอร์ในแกนนิ่ง  $a, b, c$  สู่แกนนิ่ง  $\alpha, \beta$  ก่อนถูกแปลงเป็นแกนหมุน  $d, q$  ที่ความถี่มูลฐาน ก่อนถูกนำไปสร้างสัญญาณการควบคุมการสวิตช์ไอจีบีที



ภาพที่ 4.49 การแปลงกระแสแกนนิ่ง  $\alpha, \beta$  เป็น  $d, q$  จากการทดลอง

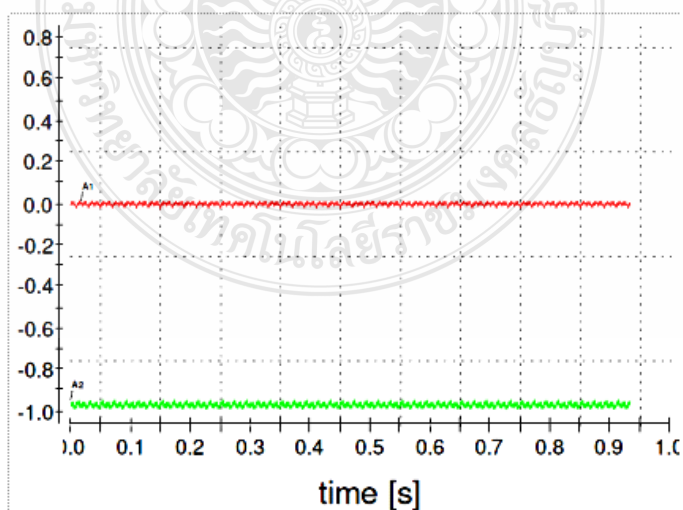


ภาพที่ 4.49 การแปลงกระแสแกนนิ่ง  $\alpha, \beta$  เป็นแกนหมุน  $d, q$  ที่ความถี่มูลฐาน ก่อนถูกนำไปสร้างสัญญาณการควบคุมการสวิตช์ไอจีบีทีที่แสดงผลโดยโปรแกรม ControlDesk



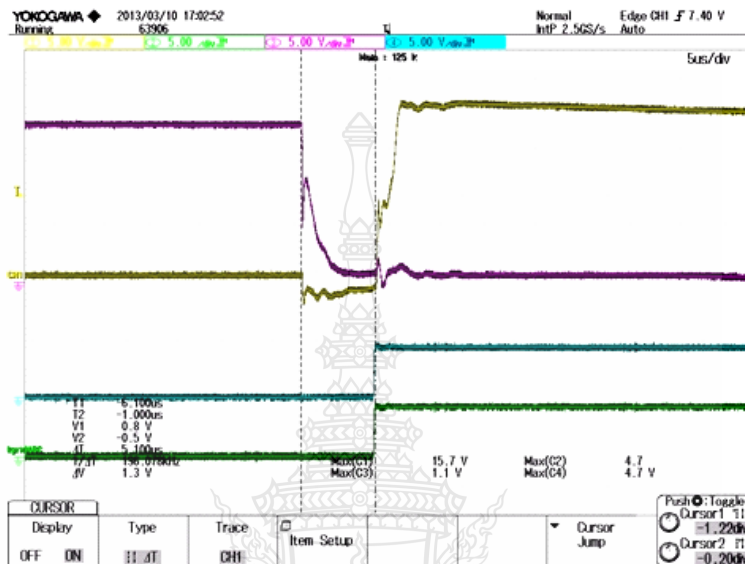
ภาพที่ 4.50 การแปลงแรงดันระบบ abc เป็น  $\alpha, \beta$

ภาพที่ 4.50 การแปลงแรงดันสเปซเวกเตอร์ในแกนนิ่ง a, b, c เป็นแกนนิ่ง  $\alpha, \beta$  ก่อนถูกแปลงเป็นแกนหมุน  $d, q$  เพื่อสร้างสัญญาณการควบคุมการสวิตช์ที่ความถี่มูลฐาน ก่อนถูกนำไปสร้างสัญญาณการควบคุมการสวิตช์ไอจีบีทีที่แสดงผลโดยโปรแกรม ControlDesk



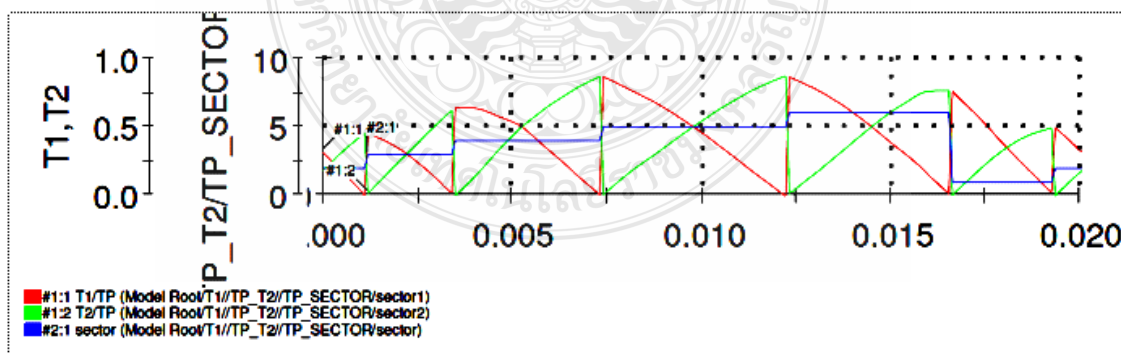
ภาพที่ 4.51 การแปลงแรงดันแกนนิ่ง  $\alpha, \beta$  เป็นแกนหมุน  $dq$

ภาพที่ 4.51 การแปลงแรงดันสเปซเวกเตอร์ในแกนนิ่ง  $\alpha, \beta$  เป็นแกนหมุน  $d, q$  ที่ความถี่มูลฐาน ก่อนที่สัญญาณแรงดันจะถูกนำไปสร้างสัญญาณการควบคุมการสวิตช์ไอจีบีที แสดงผลโดยโปรแกรม ControlDesk



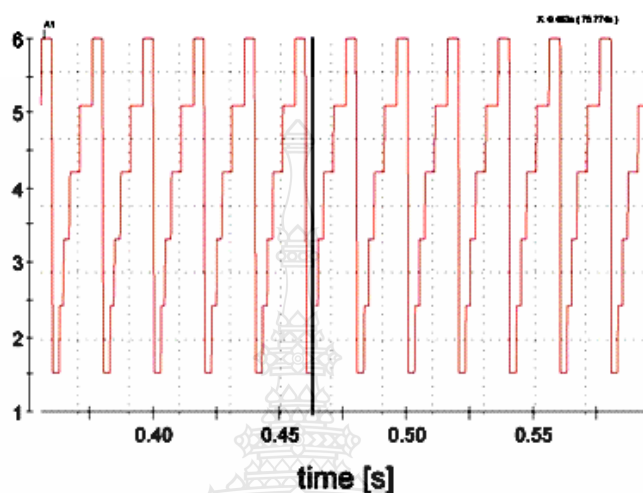
ภาพที่ 4.52 ค่าเดดไทม์ของสวิตช์ไอจีบีทีทั้งบนและทั้งล่าง

ภาพที่ 4.52 ค่าเดดไทม์ของการสวิตช์ซึ่งไอจีบีทีแต่ละคู่ของแต่ละเฟสโดยให้เห็นถึงเวลาต่างกันขณะสวิตช์ เพื่อไม่ให้เกิดการช็อตขณะแต่ละกึ่งทำงาน ในภาพแสดงเกท 1 และเกท 4



ภาพที่ 4.53 สัญญาณ T1/TP และ T2/TP เชื่อมต่อกับบล็อก DS1104 SL\_CP\_PWMSV

ภาพที่ 4.53 สัญญาณเวลา  $T_1$ ,  $T_2$  และ Sector ที่ถูกสร้างจากบล็อกสัญญาณควบคุมด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์ เพื่อเข้าบล็อกสร้างสัญญาณขับเกทของโปรแกรมคัสเปช ผ่านบอร์ด DS1104 ไปยังวงจรถับเกท



ภาพที่ 4.54 สัญญาณ Sector สำหรับเชื่อมต่อกับบล็อก DS1104 SL\_CP\_PWMSV

ภาพที่ 4.54 สัญญาณ Sector ที่ถูกสร้างจากบล็อกสัญญาณควบคุมด้วยเทคนิคสเปซเวกเตอร์ เพื่อเข้าบล็อกสร้างสัญญาณขับเกทของโปรแกรมคัสเปช ก่อนผ่านบอร์ด DS1104 ไปยังวงจรถับเกท

#### 4.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองหาค่าตัวแปรในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบจุ่มแม่เหล็กถาวร และเปรียบเทียบค่าที่วัดได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ และการจำลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ พบว่าค่าทั้งสองมีความใกล้เคียงกัน แต่จะมีบางจุดที่ต้องแก้ไขในส่วนของฮาร์ดแวร์ เพราะบางอุปกรณ์ไม่สามารถหาค่าได้ตรงกับค่าคำนวณ และในบางส่วนต้องสร้างขึ้นทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบในภาพรวม ดังนั้นจึงสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ออกแบบและสร้างชุดต้นแบบขึ้นมาไปใช้วิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสแม่เหล็กถาวรขนาด 20 kW ได้

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

ในส่วนของแนวทางในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรในการเชื่อมต่อเข้ากับระบบกริดไฟฟ้า พอที่จะเป็นแนวทางสำหรับผู้สนใจ เพื่อที่จะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในลักษณะนี้ไปใช้ หรือประยุกต์ใช้งาน กับแหล่งต้นกำเนิดพลังงานต่างๆที่ต้องการแปลงพลังงานต้นกำลังเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือเป็น แนวทางในการนำงานวิจัยนี้ไปพัฒนาให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น นอกจากนี้แล้วการจำลองระบบด้วย โปรแกรมทางคณิตศาสตร์ จะทำให้สามารถที่จะทราบปัญหาและอุปสรรค เพื่อลดความผิดพลาดในการ ออกแบบเลือกอุปกรณ์ไฟฟ้ามาใช้งานได้ ซึ่งจะลดความเสียหายอันอาจจะเกิดขึ้นและระยะเวลาใน การทำงานลงได้ และจะช่วยให้ผู้ที่สนใจนำหลักการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้งานได้ทันที อันจะเป็นการสร้างประโยชน์ให้กับการพัฒนาแนวความคิด ด้านการพัฒนาและวิเคราะห์เครื่อง ก่อเกิดไฟฟ้าหรืองานด้านอื่นด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ต่อไป

#### 5.1 สรุป

จากการที่ได้ทำการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส แม่เหล็กถาวรขนาด 20 kW โดยที่ใช้โปรแกรมแมทแล็บซิมมูลิ่งค่านั้น มีผลการทดลองพบว่าค่าที่ได้ จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใกล้เคียงและสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการทดลองจากเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าซิงโครนัสแม่เหล็กถาวรขนาด 20 kW ซึ่งอาจจะคลาดเคลื่อนจากอุปกรณ์ที่มีขายอยู่ในท้องตลาด มีค่าไม่เท่ากับการคำนวณอาจจะต้องใช้ค่ามากกว่าหรือใกล้เคียงที่สุด แต่ในการจำลองหาค่าของ กระแสจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย โปรแกรมแมทแล็บซิมมูลิ่งค่านั้น ไม่มีปัจจัยจากภายนอกที่ เข้ามา ซึ่งต่างจากการทดลองกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจริงที่มีปัจจัยอื่นๆที่ทำให้ค่าที่ได้มีความ คลาดเคลื่อนอยู่บ้าง แต่จากการทดลองพบว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแม่เหล็กถาวรสามารถที่จะเชื่อมต่อเข้า กับกริดได้ โดยใช้เทคนิคเฟสล็อกในการคำนวณค่าแรงดัน ความถี่ และมุมเฟสในการสร้าง สัญญาณการทริกเกทไอจีบีทีได้อย่างถูกต้อง แต่เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ทำให้การดำเนินการ ทดลองไม่สามารถทดสอบได้ถึงพิกัดแรงดันได้ เนื่องจากไม่สามารถตัดแปลงอุปกรณ์คอนเวอร์กัลลิ่ง ด้านกริดระบบของ เซมิคอน ใ้รับสัญญาณขับเคลื่อนตรงๆได้เพราะอุปกรณ์มีระบบควบคุมต้องใช้ สัญญาณที่ผ่านพอร์ตสื่อสาร โดยของเซมิคอนเท่านั้น จึงต้องทดลองตามพิกัดของไอจีบีที เบอร์ HGTH30N60C3D ซึ่งสามารถใช้งานได้ดี และการเชื่อมต่อเข้ากับกริดสามารถทำได้ตามโปรแกรมการ

ควบคุมที่ตั้งค่าไว้โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายขณะทำการทดลอง โดยภาพรวมระบบการควบคุมสามารถทำงานได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อเข้ากับกริดระบบ ทำให้เราสามารถจำลองการทำงานของระบบได้อย่างแม่นยำ แต่สิ่งที่ควรต้องคำนึงถึงด้วยอย่างที่เราไม่ได้คือข้อจำกัดของอุปกรณ์จริงที่มีจำหน่ายอยู่ในท้องตลาด ดังนั้นถ้าเป็นการลดขั้นตอนในการสร้างงานของนักวิจัยหรือผู้สนใจควรมีคู่มืออุปกรณ์ที่ต้องใช้จำหน่ายจริงในท้องตลาดเพื่ออ้างอิงจะทำให้สามารถเลือกใช้อุปกรณ์เป็นไปอย่างแม่นยำ และทราบปัญหาอันอาจจะเกิดจากการใช้อุปกรณ์เทียบเคียงหรือดัดแปลงและหาทางแก้ไขก่อนการสร้างชิ้นงานจริงได้

- 5.2.1 ในงานวิจัยในอนาคตควรเพิ่มชุดตรวจจับสัญญาณป้องกันความเสียหายให้กับอุปกรณ์ เช่น อุปกรณ์ป้องกันการลัดวงจร, อุปกรณ์ป้องกันกระแสเกิน และอื่นๆ ที่จำเป็น
- 5.2.2 ในการทดลองควรมีอุปกรณ์ป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์ในระบบ เช่น ฟิวส์, เซอร์คิตเบรกเกอร์ เป็นต้น เพราะจากการทดลองนี้มีความเสียหายของไอจีบีทีมากเนื่องจากลัดวงจร
- 5.2.3 ควรศึกษาการใช้งานของเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ให้แน่ใจก่อนใช้งาน ไม่เช่นนั้นแล้วอาจทำให้การวิเคราะห์การทำงานของระบบผิดพลาดได้ ในกรณีที่เครื่องมือมีค่าตลาดเคลื่อนสูง
- 5.2.4 การใช้โปรแกรมแมทแล็บซิมมูลิ่งค์ในการจำลองการทำงานควรเลือกใช้รุ่นให้ตรงกับรุ่นของโปรแกรมที่ใช้ติดตั้งกับบอร์ด dSPACE เพราะจะทำให้โปรแกรมสามารถที่จะทำงานด้วยกันได้ แต่ถ้าใช้ต่างรุ่นอาจมีบางจุดที่ทำให้โปรแกรมไม่สามารถทำงานได้
- 5.2.5 ควรมีคู่มือในการเลือกอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประกอบการออกแบบ จะทำให้การจัดวางอุปกรณ์หรือ ทำลายแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างแม่นยำ ทั้งนี้ควรเช็คยี่ห้อผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่ในท้องตลาดเพื่อง่ายต่อการหาอุปกรณ์
- 5.2.6 การลอกลายแผ่นวงจรไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ต้องดำเนินการอย่างระมัดระวัง เพื่อให้ได้แผ่นวงจรที่สมบูรณ์ที่สุด เพราะไม่อย่างนั้นแล้วอาจทำให้สัญญาณเดินไม่สะดวกระบบไม่สามารถทำงานได้ และอาจต้องเสียเวลาในการค้นหา
- 5.2.7 กรณีใช้ปากกาเคมีในการเขียนลายปริ้นท์ เมื่อผ่านทำลายแผ่นปริ้นท์ด้วยน้ำยากัดแผ่นปริ้นท์แล้ว ควรทำความสะอาดสีเคมีออกให้หมด เพราะถ้าไม่สะอาดจะทำให้ตอนบัดกรี สีของปากกาเคมีจะผสมกับตะกั่วบัดกรีทำให้เกิดค่าความต้านทานการไหลของสัญญาณไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้

- 5.2.8 การย้ายสายสัญญาณด้วยคีมย้ายสายควรทำด้วยความปราณีต เพราะถ้าไม่ระมัดระวังแล้วขณะทำงานทดลองอาจพบปัญหาจากสัญญาณควบคุมขาดหายไปอันเนื่องมาจากสายขาดจากจุดย้ายสายและหางปลาต่างๆ
- 5.2.9 ควรทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ที่จะนำมาประกอบกันเป็นระบบทีละส่วนก่อนเพื่อให้แน่ใจว่าการทำงานของส่วนประกอบนั้นๆ สามารถทำงานได้ปกติ แล้วค่อยนำไปประกอบเข้ากับวงจร เพราะไม่เช่นนั้นแล้วหากมีส่วนหนึ่งส่วนใดทำงานผิดพลาด จะทำให้หาสาเหตุได้ยาก หากไม่ทำการทดสอบให้แน่ใจก่อน
- 5.2.10 กรณีพบปัญหาการทำงานของระบบและได้พยายามหาทางแก้ไขแล้วแต่ยังไม่สำเร็จ ให้นำตัวออกจากปัญหาก่อน เพื่อให้สมองได้ผ่อนคลายแล้วค่อยทบทวนหาสาเหตุ บางทีอาจจะเป็นจุดเล็กๆ ที่ถูกมองข้ามไป



## รายการอ้างอิง

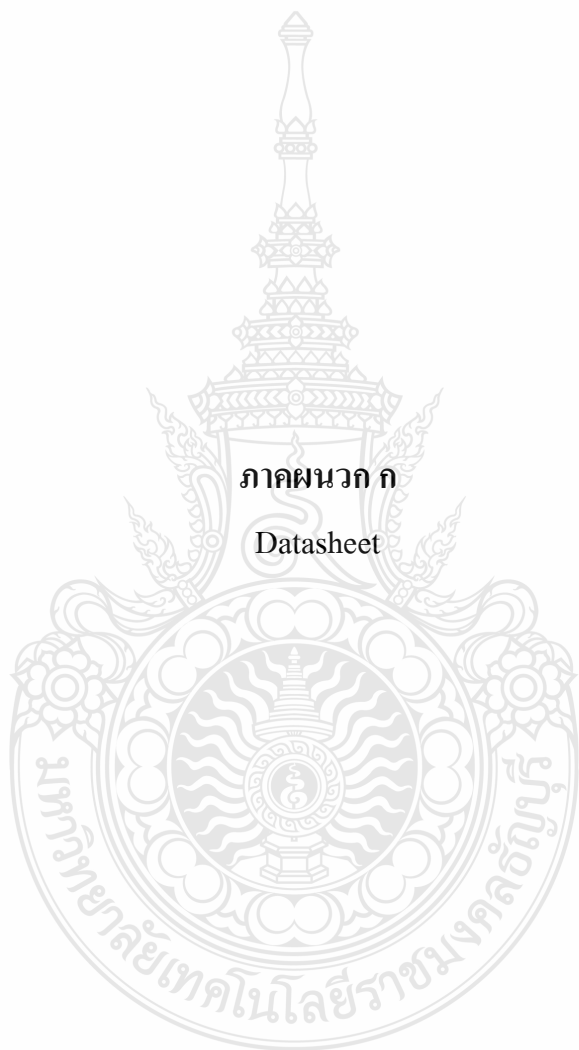
- [1] F.D. Bianchi, H. D. Battista and R. J. Mantz. “**Wind Turbine Control System**”. Springer, 2007. ISBN 1-8462-8492-9.
- [2] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre and A. Timbus. “Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems”. **IEEE Trans. Ind. Electron**, 2006.
- [3] R. S. Pena, R. J. Cardenas, G. M. Asher and J. C. Clare. “Vector Controlled Induction Machines for Stand-alone Wind Energy Applications”. **Proc. IEEE Ind. Applicat. Annu. Meeting**, vol. 3, Rome, Italy, 2000, pp. 1409-1415.
- [4] B. Bose. “Energy, Environment, and Advances in Power Electronics”. **IEEE Trans. Power Electron**, 2003, vol. 15, pp. 688-701.
- [5] R. Teodorescu and F. Blaabjerg. “Flexible Control of Small Wind Turbine with Grid Failure Detection Operation in Stand-alone and Grid Connected Mode”. **IEEE Trans. Power Electron**, vol. 19, 2004, pp. 1323-1332.
- [6] G. Poddar and V.T. Ranganathan. “Sensorless Double-inverter-fed Wound Rotor Induction-Machine Drive”. **IEEE Trans. Ind. Electron**, 2008, vol. 53, pp. 86-95.
- [7] R. Pena, J. C. Clare and G. M. Asher. “Doubly Fed Induction Generator using Back-to-Back PWM Converters and its Application to Variable-speed Wind-energy Generation”. **Proc. Inst. Electr. Eng. Electrical Power Applications**, 1996, vol. 143, pp. 231-241.
- [8] R. Datta and V. T. Ranganathan. “A Simple Position-sensorless Algorithm for Rotor-side Field-oriented Control of Wound Rotor Induction Machine”. **IEEE Trans. Ind. Electron**, 2001, vol. 48, pp. 786-793.
- [9] W. Leonhard. **Control of Electric Drives**, 3<sup>rd</sup> ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2003.
- [10] อัครพงษ์ คำแพงทอง. **แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 20 kW โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink**. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.
- [11] Spoljaric, Zeljko; Miklšević, Kresimir & Jerković and Vedrana. **Synchronous Generator Modeling Using Matlab**. Department of Electromechanical Engineering, University of Osijek, Croatia.

- [12] Andy Howard. **Delta-Sigma Modulator PLLs with Dithered Divide-Ratio**. 2001, Agilent EEs of EDA.
- [13] Yaser N. Anagreh and Imadden M. Al-Refae'e. **Teaching the Self-excited Induction Generator using Matlab**. Department of Electrical Power Engineering, Yarmouk University, Irbid, Jordan.
- [14] Ong, Chee-mun. **Dynamic Simulation of Electric Machinery**. 1997, U.S.A., A Simon & Schuster Company.
- [15] N.Mohan, T.M.Undeland and W.P.Robbins. **Power Electronics**, Third edition, pp. 730-743, USA.
- [16] รศ.ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน, ดร. วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์. “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (POWER ELECTRONICS)”. คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [17] ผศ.ดร. วันชัย ทรัพย์สิงห์. “เอกสารคำสอนอิเล็กทรอนิกส์กำลัง”. คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2553.
- [18] วุฒิไกร จันทร์ขามเรียน. การพัฒนาการชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรมโดยใช้โครงสร้างวงจรแปลงผัน 3 ระดับแบบไดโอดแคสึม. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.
- [19] SEMIKRON Application Manual. **SKiP 942 GB 120-3D**, available:  
<http://www.datasheetarchive.com/semikron%20skiiip%20942-datasheet.html> (13 November 2009)



ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

Datasheet

## ๓.1 Datasheet dSPACE DS1104

### Data Sheets

### DS1104 Data Sheet

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

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

## 0.2 Datasheet LEM LV25-P



### Voltage Transducer LV 25-P

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



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

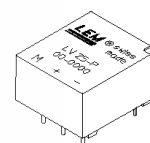
Accuracy - Dynamic performance data			
$X_G$	Overall Accuracy @ $I_{PN}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$	@ ± 12 .. 15 V	± 0.9 %
		@ ± 15 V (± 5 %)	± 0.8 %
$\epsilon_L$	Linearity error		< 0.2 %
$I_D$	Offset current @ $I_P = 0$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$		Typ   Maxi ± 0.15 mA
$I_{DT}$	Temperature variation of $I_D$	0°C .. + 25°C	± 0.06 ± 0.25 mA
		+ 25°C .. + 70°C	± 0.10 ± 0.35 mA
$t_r$	Response time <sup>1)</sup> to 90 % of $I_{PN}$ step	40	µs

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

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

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

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



#### Features

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

#### Principle of use

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

#### Advantages

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

#### Applications

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

#### Application domain

- Industrial.

๓.3 Datasheet TLP250

**TOSHIBA**

TLP250

TOSHIBA Photocoupler GaAlAs Ired & Photo-IC

**TLP250**

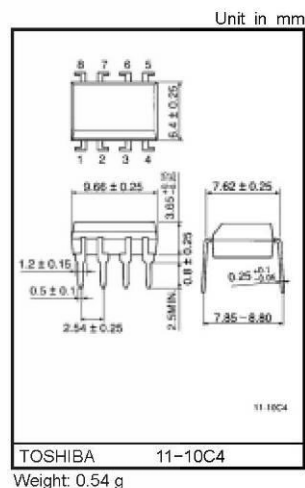
Transistor Inverter  
 Inverter For Air Conditionor  
 IGBT Gate Drive  
 Power MOS FET Gate Drive

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

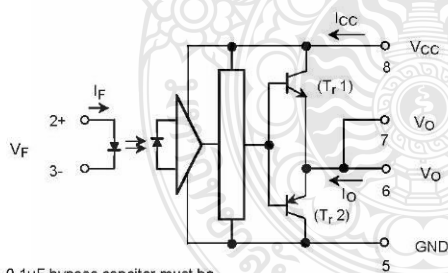
- Input threshold current:  $I_F=5\text{mA}(\text{max.})$
- Supply current ( $I_{CC}$ ):  $11\text{mA}(\text{max.})$
- Supply voltage ( $V_{CC}$ ):  $10\text{--}35\text{V}$
- Output current ( $I_O$ ):  $\pm 1.5\text{A}(\text{max.})$
- Switching time ( $t_{pLH}/t_{pHL}$ ):  $1.5\mu\text{s}(\text{max.})$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

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

- Creepage distance:  $6.4\text{mm}(\text{min.})$
- Clearance:  $6.4\text{mm}(\text{min.})$

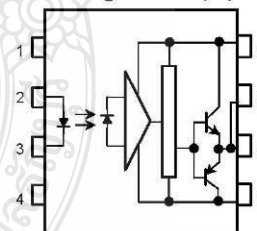


**Schematic**



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

**Pin Configuration (top view)**



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

**Truth Table**

		Tr1	Tr2
Input LED	On	On	Off
	Off	Off	On

## 0.4 Datasheet Hall Effect Current Sensor ACS756



# ACS756

## Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 3 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor

### Features and Benefits

- Industry-leading noise performance through proprietary amplifier and filter design techniques
- Total output error 0.8% at  $T_A = 25^\circ\text{C}$
- Small package size, with easy mounting capability
- Monolithic Hall IC for high reliability
- Ultra-low power loss: 130  $\mu\Omega$  internal conductor resistance
- 3 kV<sub>RMS</sub> minimum isolation voltage from pins 1-3 to pins 4-5
- 3.0 to 5.0 V, single supply operation
- 3  $\mu\text{s}$  output rise time in response to step input current
- 20 or 40 mV/A output sensitivity
- Output voltage proportional to AC or DC currents
- Factory-trimmed for accuracy
- Extremely stable output offset voltage
- Nearly zero magnetic hysteresis



TUV America  
Certificate Number:  
U8V 09 05 54214 021



### Package: 5 pin package (suffix PFF)



Additional leadforms available for qualifying volumes

### Description

The Allegro ACS756 family of current sensor ICs provides economical and precise solutions for AC or DC current sensing in industrial, automotive, commercial, and communications systems. The device package allows for easy implementation by the customer. Typical applications include motor control, load detection and management, power supplies, and overcurrent fault protection.

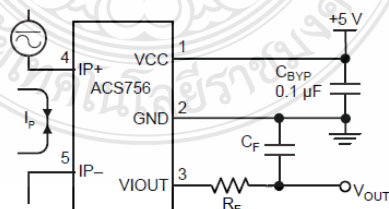
The device consists of a precision, low-offset linear Hall circuit with a copper conduction path located near the die. Applied current flowing through this copper conduction path generates a magnetic field which the Hall IC converts into a proportional voltage. Device accuracy is optimized through the close proximity of the magnetic signal to the Hall transducer. A precise, proportional voltage is provided by the low-offset, chopper-stabilized BiCMOS Hall IC, which is programmed for accuracy at the factory.

The output of the device has a positive slope ( $>V_{CC}/2$ ) when an increasing current flows through the primary copper conduction path (from terminal 4 to terminal 5), which is the path used for current sampling. The internal resistance of this conductive path is 130  $\mu\Omega$  typical, providing low power loss.

The thickness of the copper conductor allows survival of the device at up to 5 $\times$  overcurrent conditions. The terminals of the

*Continued on the next page...*

### Typical Application



Application 1. The ACS756 outputs an analog signal,  $V_{OUT}$ , that varies linearly with the uni- or bi-directional AC or DC primary sampled current,  $I_p$ , within the range specified.  $C_F$  is for optimal noise management, with values that depend on the application.

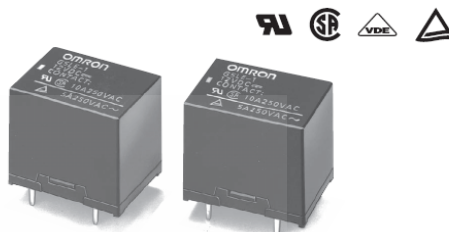
n.5 Relay Omron

# G5LE

PCB Power Relay

## Cubic, Single-pole 10A Power Relay

- Ideal for a wide variety of applications such as home appliances, OA equipments, vending machines, etc.
- Ambient Operating Temperature 85°C
- UL class-B coil insulation for standard model.
- UL, CSA, EN standards approved and conforms to Electrical Appliance and Material Safety Law (300 V max.).



RoHS Compliant

### Model Number Legend

G5LE-□□□  
1 2 3

- Number of Poles**  
1: 1-pole
- Contact Form**  
None: SPDT (1c)  
A: SPST-NO (1a)
- Enclosure rating**  
None: Flux protection  
4: Fully sealed

### Application Examples

- Home appliances
- OA equipments
- Vending machines

### Ordering Information

Terminal Shape	Enclosure rating		Flux protection		Fully sealed		Minimum packing unit
	Classification	Contact form	Model	Rated coil voltage	Model	Rated coil voltage	
PCB terminals	Standard	SPDT (1c)	G5LE-1	5 VDC	G5LE-14	5 VDC	100 pcs/tray
				12 VDC		12 VDC	
		SPST-NO (1a)	G5LE-1A	5 VDC	G5LE-1A4	5 VDC	
				12 VDC		12 VDC	

Note. When ordering, add the rated coil voltage to the model number.  
Example: G5LE-1 5 VDC  
□□□ Rated coil voltage

### Ratings

#### Coil

Rated voltage	Rated current (mA)	Coil resistance (Ω)	Must operate voltage (V)	Must release voltage (V)	Max. voltage (V)	Power consumption (mW)
5 VDC	79.4	63	75% max.	10% min.	170% at 23°C	Approx. 400
12 VDC	33.3	360				
24 VDC	16.7	1,440				

Note 1. The rated current and coil resistance are measured at a coil temperature of 23°C with a tolerance of ±10%.  
2. The operating characteristics are measured at a coil temperature of 23°C.  
3. The "Max. voltage" is the maximum voltage that can be applied to the relay coil.

#### Contacts

Item	Load	Resistive load	Inductive load (cosφ = 0.4)
Contact type		Single	
Contact material		Ag-alloy (Cd free)	
Rated load		10 A at 120 VAC; 8 A at 30 VDC	5 A at 120 VAC; 4 A at 30 VDC
Rated carry current		10 A	
Max. switching voltage		250 VAC, 125 VDC (30 VDC when UL/CSA standard is applied)	
Max. switching current		10 A	5 A

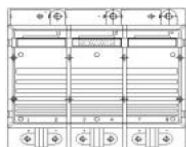
### Characteristics

Contact resistance *1		100 mΩ max.
Operate time		10 ms max.
Release time		5 ms max.
Insulation resistance *2		100 MΩ min.
Dielectric strength	Between coil and contacts	2,000 VAC, 50/60 Hz for 1 min
	Between contacts of the same polarity	750 VAC, 50/60 Hz for 1 min
Impulse withstand voltage	between coil and contacts	4,500 V (1.2×50 μs)
Vibration resistance	Destruction	10 to 55 to 10 Hz, 0.75 mm single amplitude (1.5 mm double amplitude)
	Malfunction	10 to 55 to 10 Hz, 0.75 mm single amplitude (1.5 mm double amplitude)
Shock resistance	Destruction	1,000 m/s <sup>2</sup>
	Malfunction	100 m/s <sup>2</sup>
Durability	Mechanical	10,000,000 operations min. (at 18,000 operations/hr)
	Electrical	100,000 operations min. (at 1,800 operations/hr)
Failure rate (P level) (reference value) *3		100 mA at 5 VDC
Ambient operating temperature		-25°C to 85°C (with no icing or condensation)
Ambient operating humidity		35% to 85%
Weight		Approx. 12 g

Note. The data given above are initial values  
\*1. Measurement conditions: 5 VDC, 1 A, voltage drop method.  
\*2. Measurement conditions: The insulation resistance was measured with a 500 VDC megohmmeter at the same locations as the dielectric strength was measured.  
\*3. This value was measured at a switching frequency of 120 operations/min.

## 0.6 SEMIKRON IGBT module SKiiP942GB120-3D

### SKiiP 942GB120-3D



SKiiP® 2

2-pack - integrated intelligent Power System

Power section

SKiiP 942GB120-3D

#### Features

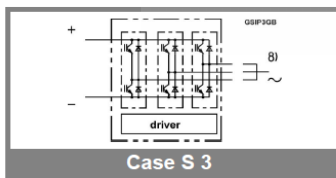
- SKiiP technology inside
- CAL diode technology
- Integrated current sensor
- Integrated temperature sensor
- Integrated heat sink
- IEC 60721-3-3 (humidity) class 3K3/IE32 (SKiiP® 2 System)
- IEC 60068-1 (climate) 40/125/56
- UL recognized file no. E63532

1) with assembly of suitable MKP capacitor per terminal (SEMIKRON type is recommended)

2) AC connection busbars must be connected by the user; copper busbars available on request

Absolute Maximum Ratings		$T_s = 25\text{ °C}$ unless otherwise specified	
Symbol	Conditions	Values	Units
<b>IGBT</b>			
$V_{CES}$	Operating DC link voltage	1200	V
$V_{CC}^{(1)}$		900	V
$V_{GES}$		$\pm 20$	V
$I_C$	$T_s = 25\text{ (70) °C}$	900 (675)	A
<b>Inverse diode</b>			
$I_F = -I_C$	$T_s = 25\text{ (70) °C}$	900 (675)	A
$I_{FSM}$	$T_j = 150\text{ °C}$ , $t_p = 10\text{ ms}$ ; sin.	6480	A
$I^2t$ (Diode)	Diode, $T_j = 150\text{ °C}$ , 10 ms	210	kA <sup>2</sup> s
$T_j$ , ( $T_{stg}$ )		-40 (-25) ... +150 (125)	°C
$V_{isol}$	AC, 1 min. (mainterminals to heat sink)	3000	V

Characteristics		$T_s = 25\text{ °C}$ unless otherwise specified			
Symbol	Conditions	min.	typ.	max.	Units
<b>IGBT</b>					
$V_{CEsat}$	$I_C = 750\text{ A}$ , $T_j = 25\text{ (125) °C}$		2,6 (3,1)	3,1	V
$V_{CEO}$	$T_j = 25\text{ (125) °C}$		1,2 (1,3)	1,5 (1,6)	V
$r_{CE}$	$T_j = 25\text{ (125) °C}$		1,8 (2,3)	2,1 (2,7)	mΩ
$I_{CES}$	$V_{GE} = 0\text{ V}$ , $V_{CE} = V_{CES}$ , $T_j = 25\text{ (125) °C}$		(45)	1,2	mA
$E_{on} + E_{off}$	$I_C = 750\text{ A}$ , $V_{CC} = 600\text{ V}$ $T_j = 125\text{ °C}$ , $V_{CC} = 900\text{ V}$			225 397	mJ
$R_{CC} + EE$	terminal chip, $T_j = 125\text{ °C}$		0,17		mΩ
$L_{CE}$	top, bottom		5		nH
$C_{CHC}$	per phase, AC-side		4,2		nF
<b>Inverse diode</b>					
$V_F = V_{EC}$	$I_F = 750\text{ A}$ , $T_j = 25\text{ (125) °C}$		2,1 (2)	2,6	V
$V_{TO}$	$T_j = 25\text{ (125) °C}$		1,3 (1)	1,4 (1,1)	V
$r_r$	$T_j = 25\text{ (125) °C}$		1,1 (1,3)	1,5 (1,7)	mΩ
$E_{rr}$	$I_C = 750\text{ A}$ , $V_{CC} = 600\text{ V}$ $T_j = 125\text{ °C}$ , $V_{CC} = 900\text{ V}$			29 37	mJ
<b>Mechanical data</b>					
$M_{dc}$	DC terminals, SI Units		6	8	Nm
$M_{ac}$	AC terminals, SI Units		13	15	Nm
w	SKiiP® 2 System w/o heat sink		2,7		kg
w	heat sink		6,6		kg
<b>Thermal characteristics (P16 heat sink; 295 m<sup>3</sup>/h); "r" reference to temperature sensor</b>					
$R_{th(f-e)I}$	per IGBT			0,03	K/W
$R_{th(f-e)D}$	per diode			0,083	K/W
$R_{th(e-a)}$	per module			0,036	K/W
$Z_{th}$	$R_l$ (mK/W) (max. values)			tau(s)	
	1	2	3	4	
$Z_{th(f-r)I}$	3	23	4	0	1
$Z_{th(f-r)D}$	9	64	10	0	1
$Z_{th(r-a)}$	11,1	18,3	3,5	3,1	204
					60
					6
					0,02

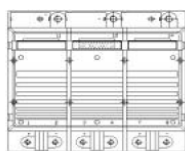


Case S 3

This technical information specifies semiconductor devices but promises no characteristics. No warranty or guarantee, expressed or implied is made regarding delivery, performance or suitability.



## SKiiP 942GB120-3D



SKiiP® 2

### 2-pack - integrated intelligent Power System

#### 2-pack integrated gate driver

#### SKiiP 942GB120-3D

#### Gate driver features

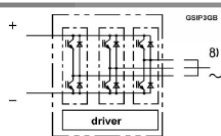
- CMOS compatible inputs
- Wide range power supply
- Integrated circuitry to sense phase current, heat sink temperature and DC-bus voltage (option)
- Short circuit protection
- Over current protection
- Over voltage protection (option)
- Power supply protected against under voltage
- Interlock of top/bottom switch
- Isolation by transformers
- Fibre optic interface (option for GB-types only)
- IEC 60068-1 (climate) 25/85/56

Absolute Maximum Ratings		$T_a = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified	
Symbol	Conditions	Values	Units
$V_{S1}$	stabilized 15 V power supply	18	V
$V_{S2}$	unstabilized 24 V power supply	30	V
$V_{IH}$	input signal voltage (high)	15 + 0,3	V
dv/dt	secondary to primary side	75	kV/ $\mu\text{s}$
$V_{\text{isollO}}$	input / output (AC, r.m.s., 2s )	3000	Vac
$V_{\text{isoll2}}$	output 1 / output 2 (AC, r.m.s., 2s )	1500	Vac
$f_{\text{sw}}$	switching frequency	16	kHz
$f_{\text{out}}$	output frequency for $I=I_C$ ; sin.	1	kHz
$T_{\text{op}}$ ( $T_{\text{stg}}$ )	operating / storage temperature	- 40 ... + 85	$^\circ\text{C}$

Characteristics		$(T_a = 25^\circ\text{C})$			
Symbol	Conditions	min.	typ.	max.	Units
$V_{S1}$	supply voltage stabilized	14,4	15	15,6	V
$V_{S2}$	supply voltage non stabilized	20	24	30	V
$I_{S1}$	$V_{S1} = 15\text{ V}$	$260+490 \cdot f/f_{\text{max}}+1,2 \cdot (I_{AC}/A)$			mA
$I_{S2}$	$V_{S2} = 24\text{ V}$	$200+360 \cdot f/f_{\text{max}}+0,85 \cdot (I_{AC}/A)$			mA
$V_{IT+}$	input threshold voltage (High)			12,3	V
$V_{IT-}$	input threshold voltage (Low)	4,6			V
$R_{\text{IN}}$	input resistance	10			k $\Omega$
$t_{\text{d(on)IO}}$	input-output turn-on propagation time			1,5	$\mu\text{s}$
$t_{\text{d(off)IO}}$	input-output turn-off propagation time			1,4	$\mu\text{s}$
$t_{\text{PERRRESET}}$	error memory reset time	9			$\mu\text{s}$
$t_{\text{TD}}$	top / bottom switch : interlock time	3,3			$\mu\text{s}$
$I_{\text{analogOUT}}$	8 V corresponds to max. current of 15 V supply voltage (available when supplied with 24 V)	900			A
$I_{V_{S1}\text{outmax}}$	output current at pin 12/14			50	mA
$I_{A0\text{max}}$	logic low output voltage			5	mA
$V_{\text{OL}}$	logic low output voltage			0,6	V
$V_{\text{OH}}$	logic high output voltage			30	V
$I_{\text{TRIPSC}}$	over current trip level ( $I_{\text{analog OUT}} = 10\text{ V}$ )	1125			A
$I_{\text{TRIPLG}}$	ground fault protection				A
$T_{\text{tp}}$	over temperature protection	110		120	$^\circ\text{C}$
$U_{\text{DCTRIP}}$	trip level of $U_{\text{DC}}$ -protection ( $U_{\text{analog OUT}} = 9\text{ V}$ ); (option)	900			V

For electrical and thermal design support please use SEMISEL.  
Access to SEMISEL is via SEMIKRON website <http://www.semikron.com>.

This technical information specifies semiconductor devices but promises no characteristics. No warranty or guarantee, expressed or implied is made regarding delivery, performance or suitability.



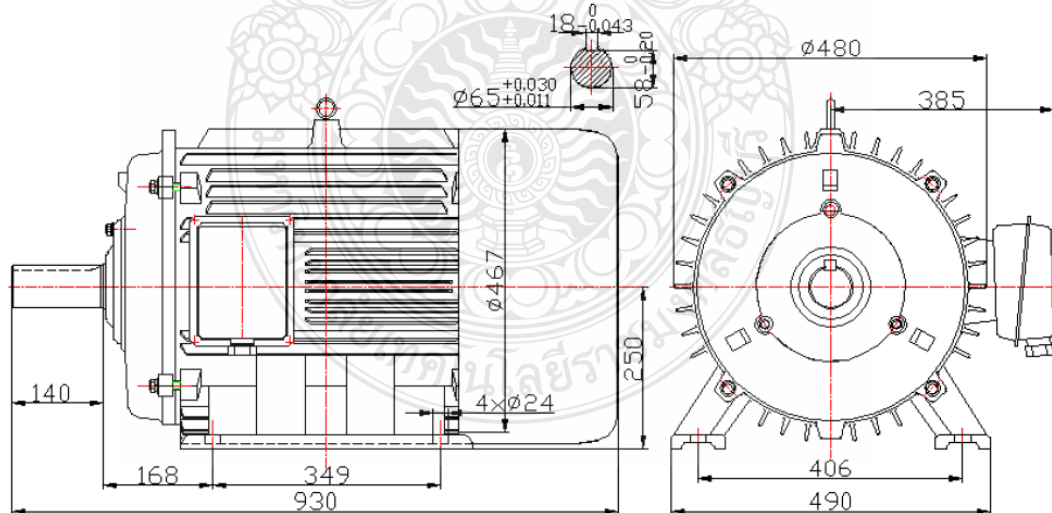
Case S 3

n.7 Permanent Magnet Synchronous Generator

Permanent Magnet Water Power Generators



Drawings and parameters of 20kw water power generators



Power	AC Voltage	Speed	Poles	Frequency	Rated Torque	Current	Efficiency	Weight
20 kw	400V	187.5rpm	32	50Hz	1020Nm	31A	92.2%	420kg
40 kw	400V	375rpm	16	50Hz	1020Nm	61.4A	92.8%	420kg



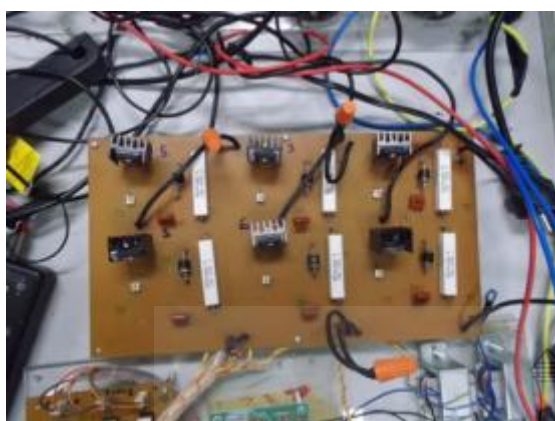
ภาคผนวก ข  
อุปกรณ์การทดลอง

### ข.1 โครงสร้างอุปกรณ์การทดลองชุดคอนเวอร์เตอร์กำลัง



ภาพที่ ข.1 ชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำ

ภาพที่ ข.1 ชุดทดลองเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำเชื่อมโยงเข้ากับกริดระบบ โดยชั้นบนสุดจะเป็นแผงโหลดความต้านทานขนาด 20 กิโลวัตต์ โดยแบ่งสายป้อนจากเซอร์กิตเบรกเกอร์เป็น 4 ชุด ชุดละ 6 กิโลวัตต์ ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการแบ่งโหลดเพื่อทำการทดสอบ โดยด้านเข้าของเซอร์กิตเบรกเกอร์จะเป็นแรงดันที่ผ่านวงจรรองความถี่ของคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดมาแล้ว หลังจากนั้นการต่อสายด้านออกของเซอร์กิตเบรกเกอร์จะถูกต่อไปยังแมคนิคัลคอนแทคเตอร์เพื่อรอสัญญาณการสั่งการเชื่อมต่อเข้ากับกริดระบบของการไฟฟ้าตามค่าที่ได้ตั้งไว้ในวงจรควบคุม สำหรับชั้นที่ 2 ของชุดทดลองจะเป็นที่ติดตั้งแผ่นต้นแบบวงจรกำลังของคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบต่ออยู่กับวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน ก่อนต่อสายไปยังทางเข้าของเซอร์กิตเบรกเกอร์บนชั้นบน โดยทางเข้าของแผ่นต้นแบบจะเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ผ่านมาจากวงจรเรียงกระแสไดโอด 3 เฟส เต็มคลื่นจากชั้นล่างสุด นอกจากภาควงจรกำลังแล้วบนชั้นสองของชุดทดลองยังประกอบไปด้วยชุดเครื่องมือวัดแรงดันและวัดกระแสรวมไปถึงบอร์ดแหล่งจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงสำหรับชุดควบคุมและเครื่องมือวัดต่างๆ อีกด้วย และท้ายที่สุดคืออุปกรณ์กำลังที่อยู่ยังชั้นล่างสุดของชุดทดลองคือ วงจรเรียงกระแส 3 เฟส เต็มคลื่นแบบไดโอด บริดจ์ซึ่งทางออกจะต่ออยู่กับตัวคาปาซิเตอร์เพื่อกรองแรงดันไฟตรงให้เรียบขึ้นและด้านเข้าของวงจรเรียงกระแสจะต่ออยู่เซอร์กิตเบรกเกอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบสนามแม่เหล็กถาวรตามลำดับ



(ก)



(ข)



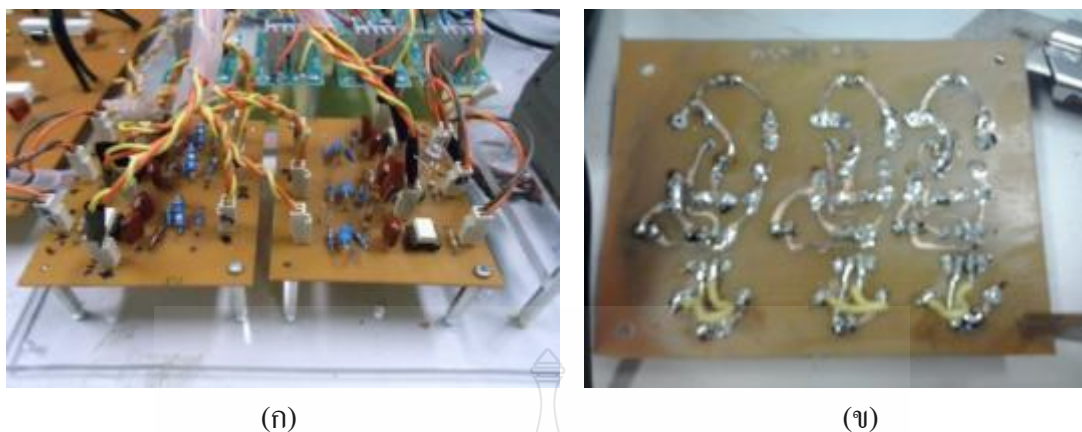
(ค)



(ง)

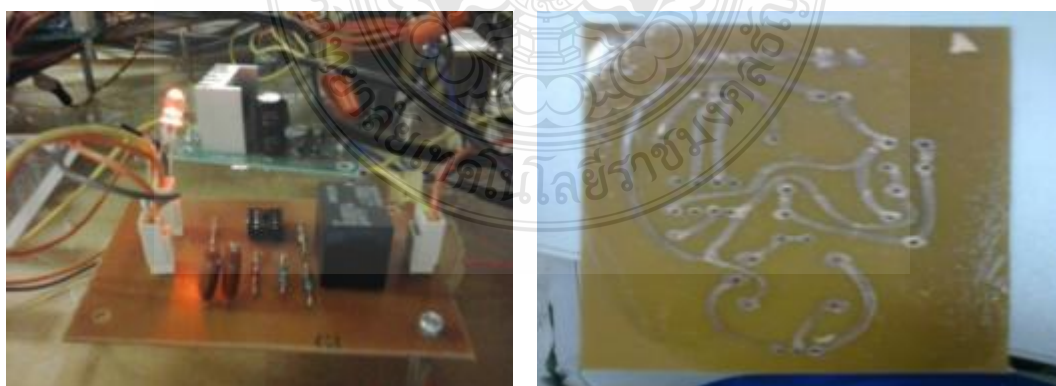
## ภาพที่ ข.2 ต้นแบบคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริระบบ

ภาพที่ ข.2 ต้นแบบของคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริระบบใช้สำหรับแปลงแรงดันเชื่อมโยงไฟฟ้ากระแสตรงจากวงจรเรียงกระแส 3 เฟส เต็มคลื่นแบบไดโอดบริดจ์ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อป้อนเข้าสู่กริระบบ การใช้แผงทดลองนี้เพื่อทดสอบสัญญาณขั้วเกตุว่าทำงานถูกต้องหรือไม่อย่างไรเพื่อลดความเสียหายอันอาจจะเกิดกับคอนเวอร์เตอร์ตัวหลักในกรณีที่มีความผิดพลาดขึ้นได้ โดยแผงวงจรประกอบไปด้วยไอจีบีที เบอร์ HGTG30N60C3D พิกัดแรงดัน 600 โวลต์ พิกัดกระแส 64 แอมแปร์ ใช้สัญญาณขั้วเกตุ  $\pm 20$  โวลต์ นอกจากนั้นยังมีวงจรสับเบอร์ต้อยอยู่กับขา C (Collector) และขา E (Emitter) ของไอจีบีทีแต่ละตัวอีกด้วย การต่อวงจรสับเบอร์ต้อยตามค่าที่คำนวณได้อย่างถูกต้องนั้นจะทำให้การปิดสวิทช์ของไอจีบีทีเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว และลดกำลังสูญเสียที่ตกคร่อม ไอจีบีที [17]



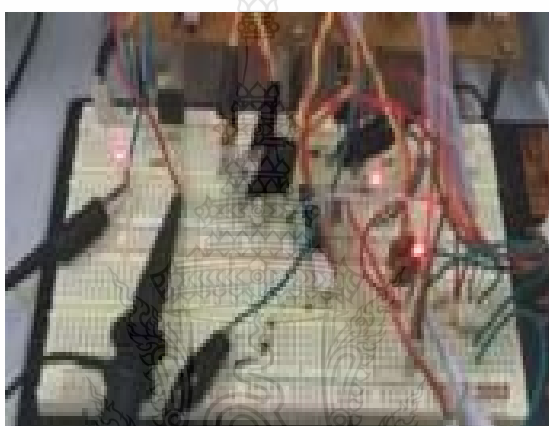
ภาพที่ ข.3 บอร์ดสัญญาณขับเคลื่อนโดยใช้ไอซีแบบเชื่อมต่อทางแสง

ภาพที่ ข.3 บอร์ดสัญญาณขับเคลื่อนไอซีบีทีโดยใช้ไอซีแบบเชื่อมต่อทางแสงของโตชิบา รุ่น TLP250 โดยในภาพจะแสดงทั้งด้านบนและด้านล่างของบอร์ดที่ทำการประกอบอุปกรณ์แล้ว หากสังเกตดีๆ จะเห็นว่าภาพทางด้านขวามือซึ่งเป็นภาพด้านล่างของแผ่นวงจรมีการเชื่อมสายไฟและการเพิ่มความหนาของลายวงจรด้วยตะกั่วบัดกรี เนื่องจากลายวงจรบางจุดมีการขาดในจุดที่เล็กมากๆ เช่น รูเสียบขาอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งมีขนาดเล็กและถ้าในการลอกลายก่อนทำแผ่นวงจรไม่ดีพออาจทำให้เกิดการไม่ต่อเนื่องทางไฟฟ้าทำให้วงจรขับเคลื่อนทำงานผิดพลาดได้ ซึ่งจะส่งผลให้ไอซีบีทีพังเสียหาย ซึ่งในวิทยานิพนธ์ก็พบปัญหาการขาดและแตกของลายวงจรนี้เช่นเดียวกันทั้งๆ ที่ได้ทำการทดสอบสัญญาณก่อนการขับเคลื่อนแล้วก็ตาม ดังนั้นจึงควรให้ความสำคัญในส่วนนี้มากๆ เพื่อป้องกันปัญหาที่อาจจะเกิดและทำให้ลดตัวแปรของปัญหาในการวิเคราะห์วงจร



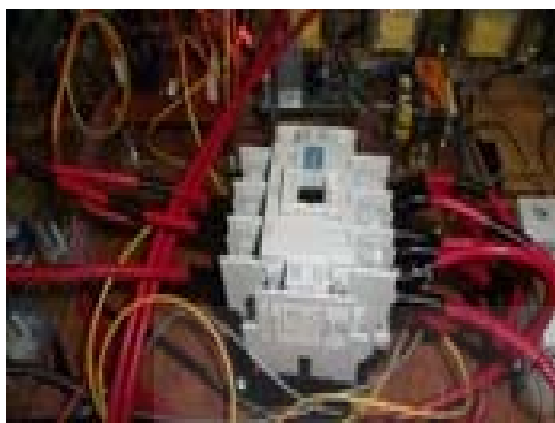
ภาพที่ ข.4 บอร์ดสัญญาณขับรีเลย์ไฟฟ้าเชื่อมต่อกริตระบบ

ภาพที่ ข.4 บอร์ดสัญญาณขั้วรีเลย์ไฟฟ้าเชื่อมต่อกับระบบ ซึ่งจะใช้สัญญาณจากเวลาที่ต้องไว้ในวงจรควบคุมจาก โปรแกรมแมทแล็บซิมูเลชั่น ก่อนส่งผ่านบอร์ดควบคุม DS1104 โดยในวิทยานิพนธ์นี้ใช้สัญญาณขั้วผ่าน Slave Digital I/O Board โดยในบอร์ดสัญญาณขั้วรีเลย์ประกอบไปด้วยไอซีเชื่อมต่อทางแสง TLP250 รับสัญญาณขั้วจาก DS1104 ผ่าน TLP250 เพื่อขั้วรีเลย์ M4N ยี่ห้อ OMRON เพื่อเป็นทางผ่านของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับพิกัด 220 โวลต์ เพื่อขั้วขดลวดไฟฟ้าของแมคนิก ซึ่งมียกััดแรงดัน 220 โวลต์ ให้เชื่อมต่อแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่กริระบบตามเวลาที่กำหนด



ภาพที่ ข.5 บอร์ดทดลองสัญญาณขั้วเกทก่อนลงแผ่นวงจร

ภาพที่ ข.5 บอร์ดทดลองสัญญาณขั้วเกทก่อนลงแผ่นวงจรจะทำให้ทราบถึงการทำงานที่ถูกต้องของสัญญาณ เพื่อลดการสูญเสียของอุปกรณ์ที่ต้องใช้งานจริง ซึ่งมีราคาแพงลงได้โดยในบอร์ดทดลองนี้ไอจีบีทีเบอร์ IRG4BC20WPBF ทดสอบการทำงานร่วมกับหลอดแอลอีดี (LED) และแรงดันไฟตรงที่ 15 โวลต์ เพื่อสังเกตสัญญาณการทริกเกทที่ความถี่ต่ำๆ จะทำให้เห็นหลอดแอลอีดีกระพริบตามสัญญาณพัลส์ตามรูปแบบสัญญาณการทริกที่ได้อจากการจำลองวงจรด้วยโปรแกรมแมทแล็บซิมูเลชั่น



(ก)



(ข)

ภาพที่ ข.6 แมคนิติกสวิตช์เพื่อเชื่อม โยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับเข้ากับกริดระบบ

ภาพที่ ข.6 แมคนิติกสวิตช์ใช้สำหรับเชื่อม โยงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับกริดระบบ โดยวิทยานิพนธ์นี้กำหนดสัญญาณับคอล์ยไฟฟ้าของแมคนิติกที่เวลา 100 วินาที และตัดสัญญาณับออกที่เวลา 600 วินาที ใช้แมคนิติกสวิตช์ สำหรับแรงดันสามเฟส พิกัดกระแส 50 แอมป์แปร์ ใช้คอล์ยไฟฟ้า 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต

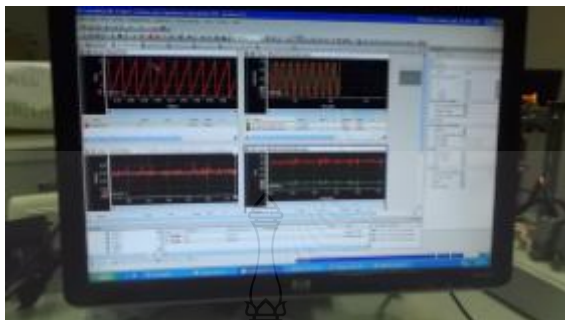


ภาพที่ ข.7 ชุดกรองแรงดันความถี่ต่ำผ่านแบบ LC

ภาพที่ ข.7 ชุดกรองแรงดันแบบความถี่ต่ำผ่านของชุดคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบ โดยใช้คาปาซิเตอร์พิกัดแรงดัน 450 โวลต์ 12.5 ไมโครฟารัด สำหรับค่าอินดักแตนซ์ใช้ขดลวดเบอร์ AWG#32 พันบนแกนเหล็กเฟอร์ไรต์แบบตัวอี (E Type Ferrite Core) จำนวน 40 รอบ จะได้ความถี่



ประมาณ 2 มิลลิเฮนรี ซึ่งในการใช้กับพิกัดกระแสที่สูงขึ้นต้องคำนึงถึงขนาดของเส้นลวดที่จะนำมาพันด้วย



ภาพที่ ข.8 สัญญาณการควบคุมแสดงผลผ่าน โปรแกรม ControlDesk

ภาพที่ ข.8 สัญญาณการควบคุมแสดงผลผ่าน โปรแกรม ControlDesk สามารถแสดงผลตามจุดต่อต่างๆ ของสัญญาณที่ต้องการวัด ซึ่งจะคล้ายกับการจำลองสัญญาณด้วยโปรแกรมเมทเล็ปซิมมูลิ่งค์ แต่เป็นการรับสัญญาณเข้าจากเครื่องวัดที่ใช้วัดสัญญาณจริงเข้ามาทำการควบคุม และส่งการควบคุมออกไปทางพอร์ตด้านททางออก ซึ่งมีทั้งปีนแบบอะนาล็อก และดิจิทัลผู้ออกแบบสามารถเลือกใช้ได้



(ก)

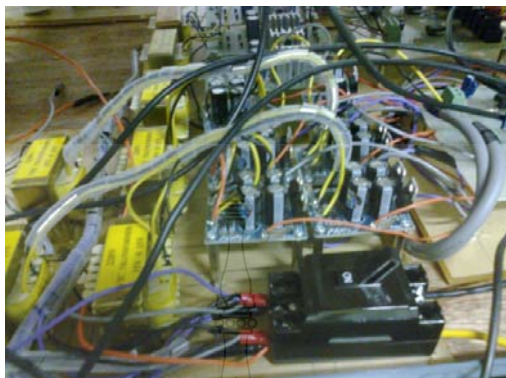


(ข)

ภาพที่ ข.9 ชุดโมดูลไอจีบีทีที่จะนำมาใช้งาน

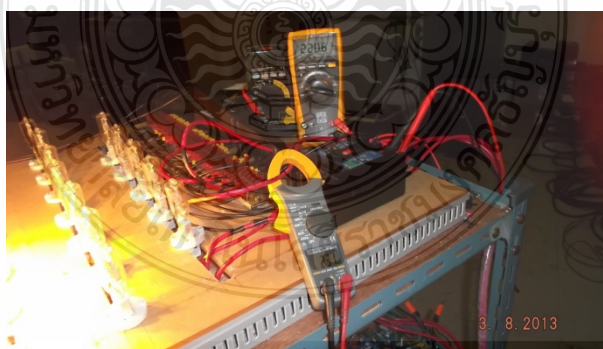
ภาพที่ ข.9 ชุดไอจีบีทีหลักที่จะนำมาใช้งานจริงในการทดลอง แต่หลังจากทำการทดลองแล้วพบว่าสัญญาณขับจาก TLP250 ไม่สามารถที่จะใช้ขับเกทได้ตรงเพราะว่าในชุดไอจีบีทีโมดูลเองได้ถูกออกแบบไว้ให้ใช้ต่อร่วมชุดขับเกทของตัวเองเท่านั้น (ตามภาพ ข) จึงทำให้ไม่สามารถใช้อุปกรณ์ตัว

หลักเพื่อทดสอบการทำงานที่แรงดันพิกัดได้ โดยภาพ ก แสดงให้เห็นถึงไอจีบีทีโมดูลที่แยกออกจากชุดควบคุม และภาพ ข คือบอร์ดชุดควบคุมไอจีบีทีโมดูลสำเร็จรูป



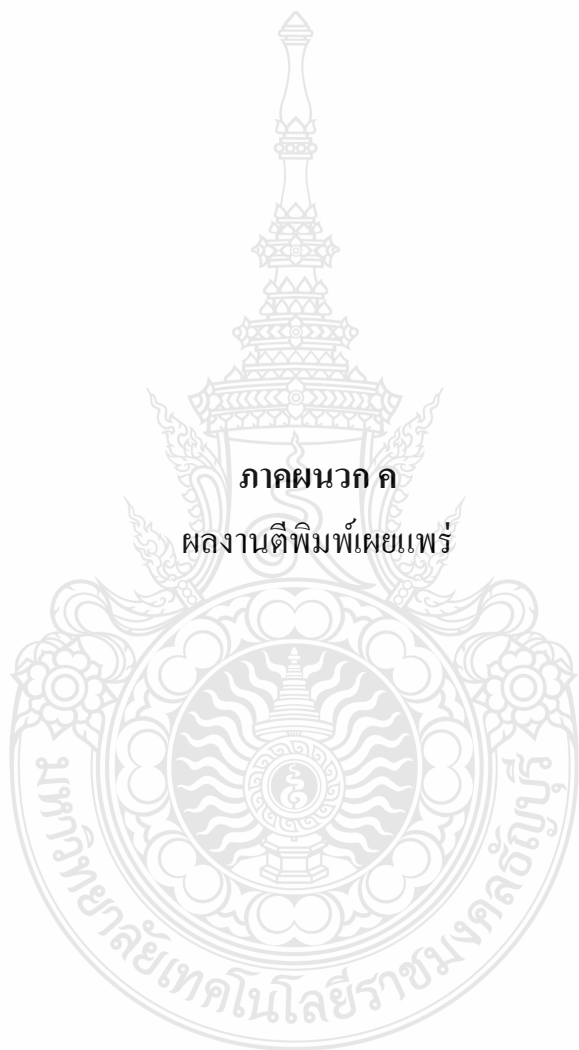
ภาพที่ ข.10 ชุดจ่ายแรงดันไฟตรงเลี้ยงอุปกรณ์เครื่องวัด

ภาพที่ ข.10 ชุดจ่ายแรงดันไฟตรงสำหรับเลี้ยงอุปกรณ์เครื่องมือวัด โดยเลือกใช้ชุดสำเร็จรูปปรับระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับพิกัด 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต เป็นแรงดันไฟ 18 โวลต์, 15 โวลต์ และ 5 โวลต์ และทั้งหมดจะถูกรักษาระดับแรงดันโดยชุดแหล่งจ่ายรักษาระดับแรงดัน 15 โวลต์, 12 โวลต์ และ 5 โวลต์ ตามลำดับ โดยแรงดัน 15 โวลต์ จ่ายเลี้ยงสัญญาณขับเคลื่อนขั้วเกทไอจีบีที, เครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้า สำหรับแรงดัน 12 โวลต์ จ่ายให้กับรีเลย์เชื่อมต่อกริด ชุดท้ายแรงดัน 5 โวลต์ จ่ายให้กับอุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ ข.11 เครื่องมือวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ

ภาพที่ ข.11 เครื่องมือวัดแรงดันและกระแสไฟฟ้ากระแสสลับของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หลังผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน



# **Electrical Engineering Network 2012**

of Rajamangala University of Technology (EENET 2012)



ดอกแคแสด ดอกโมมเบะ จันทราภิรมย์

## CONFERENCE TOPICS

### GROUP 1 (PE)

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

### GROUP 2 (PW)

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

### GROUP 3 (RE)

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

### GROUP 4 (TE)

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

### GROUP 5 (CP)

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

### GROUP 6 (GN)

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



**EENET 2012**

**GRAND PARADISE HOTEL**

*Nong Khai, THAILAND*

*April 3-5, 2012*

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

รายชื่อผู้พิจารณาบทความการประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4

รศ. ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน

รศ. ดร. วิจิตร กิณเรศ

รศ. ดร. มนตรี สิริปรัชญานันท์

รศ. ดร. เวทิน ปิยะรัตน์

รศ. ดร. เดชา พวงดาวเรือง

รศ. ดร. วิบูลย์ ชื่นแขก

รศ. ดร. เสถียร ธัญญศรีรัตน์

ผศ. ดร. แนบบุญ หุนเจริญ

ผศ. ดร. อภินันท์ อูร์โสภณ

ผศ. ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล

ผศ. ดร. อาทิตย์ โสตรโยม

ผศ. ดร. เมธีจ เผ่าละออ

ผศ. ดร. กองพล อารีรักษ์

ดร. ยุทธนา ขำสุวรรณ

ดร. นิวัตร อังควศิษฐพันธ์

รศ. ดร. โกศล โอฬารไพโรจน์

ดร. อุเทน คำน่าน

นายณรงค์ นันทกุล

ผศ. กฤษดา ยี่งษ์ชัย

นายเอกทัศน์ พฤษวรรณ

ดร. จิตตฤทธิ ทองปรอน

ผศ. ชาญชัย เศรษฐธรรมรงค์

ดร. จักรกฤษณ์ เคลือบวัง

นายสมนึก เครือสอน

นายทัศนระ ถมทอง

นายณรงค์ฤทธิ์ พิมพ์คำวงศ์

ผศ. อภิศักดิ์ ชันแก้วหล้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

## การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

PE16	แบบจำลองการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็กเข้ากับกริด โดยใช้การควบคุมแบบเวคเตอร์	64
PE17	ออกแบบทรานส์ดิวเซอร์วัดมุมโดยใช้ฮอลล์เอฟเฟคเซ็นเซอร์	68
PE18	การวิเคราะห์วงจรเอชซีของเปอร์หนึ่งเฟส	72
PE19	การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC	76
PE20	การศึกษาคุณสมบัติแรงดันฮอลล์ของสารกึ่งตัวนำเอ็ทริทริค	80
PE21	การออกแบบและสร้างเครื่องวัดค่าฮาร์มอนิกและค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า ของระบบไฟฟ้า 1 เฟส 220 โวลต์ 50 เฮิร์ต วิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูรีเยอร์โดยใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์	84
PE22	การประมาณค่าแรงกักจากกระแสมอเตอร์แกนสำหรับเครื่องกัดซีเอ็นซี	88
PE23	การออกแบบและควบคุมเครื่องบินสี่ใบพัดแบบอัตโนมัติ	92
PE24	บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สมรรถนะสูง ค่าความเพี้ยนกระแสอินพุตรวมต่ำ ด้วยวงจรชาร์จิ้งร่วมกับวัลเลย์ฟิลล์	96
PE25	ตัวสังเกตความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ตัวกรองคาลมาน	100
PE26	การควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงด้วยสมการความกว้างพัลส์กับผลต่างกระแส	104
PE27	การออกแบบสร้างตัวชดเชยกำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟแบบสถิตย์ราคาประหยัด	108
PE28	Robust Position Control of a Synchronous Motor Using Fuzzy Logic Sliding mode Model Following Controller with Sinusoidal Command Input	112
PE29	การวัดปริมาตรไซโกด้วยวิธีลำแสงเลเซอร์แบ่งส่วน	116
PE30	การวัดค่าแรงจากการบริหารข้อเหวี่ยงแบบ Bending Stress ด้วยอุปกรณ์สเตรนเกจ	120
PE31	ตัวสังเกตสถานะของระบบด้วยเทคนิคการประมาณค่าปริภูมิสถานะ	125
PE32	การสร้างหม้อแปลงไฟฟ้า 24-เฟส จากระบบการพันขดลวดของหม้อแปลง 3-เฟส	129
PE33	แขนกล 4 แกน	135

## แบบจำลองการเชื่อมโยงเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันน้ำขนาดเล็กเข้ากับกริดโดยใช้การควบคุมแบบเวกเตอร์

### Modeling of Grid-connected Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) by Using Vector Control

สนธยา มั่นหมาย กฤษณ์ชนม์ ภูมิภคพิชญ์ อนุภัทร พันธุ์คง และทูลเกียรติ นาคะวิวัฒน์  
ศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

โทร: 0-2549-3571 โทรสาร: 0-2549-3422 E-mail: krischonme.b@en.rmutt.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองของคอนเวอร์เตอร์กำลัง แบบแหล่งจ่ายแรงดัน จำนวน 2 ชุด ขนาด 20 kW ซึ่งต่อเข้ากับทางด้านสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร และทางด้านกริดระบบของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ตามลำดับ โดยทำการรักษาระดับแรงดันเชื่อมโยงไฟฟ้างานที่และเชื่อมต่อเพื่อส่งกำลังไฟฟ้าเข้ากับกริด ของระบบไฟฟ้า 3 เฟส 3 สาย (380 V 50Hz) ด้วยวิธีการควบคุมแบบเวกเตอร์ โดยจะวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของระบบที่นำเสนอด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม PSIM ร่วมกับ Matlab/Simulink ซึ่งพบว่าเมื่อเชื่อมต่อเข้ากับกริดจะมีการกระเพื่อมของกำลังไฟฟ้าก่อนจะส่งกำลังเข้าระบบได้อย่างต่อเนื่อง และในอนาคตจะทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการโดยจะสร้างเครื่องต้นแบบขนาด 20 kW เพื่อศึกษาวิเคราะห์ระบบควบคุมเพื่อเปรียบเทียบทั้งในเชิงทฤษฎีและในเชิงปฏิบัติการจริงด้วยตัวควบคุมการประมวลผลแบบดิจิทัลของ dSPACE

**คำสำคัญ** : คอนเวอร์เตอร์กำลัง, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร, กังหันน้ำ, การควบคุมแบบเวกเตอร์

#### Abstract

This research presented the model of power converter Back to Back (B2B) 2 sets that connected to the PMSG side and grid side, the unit capacity is 20 kW. The controls system must be maintain the DC link voltage to constant and connected to 380V/3/50Hz of grid side by vector control technique. Analyze the system efficiency of model by PSIM and Matlab/simulink program, the result of simulation found the power had small damping and then back to study state. The simulation result and test result in laboratory for compare the result by theory and practice in the futher work. The dSPACE controller was used for this research.

**Keywords:** Power converter, Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG, Water turbine, Vector control

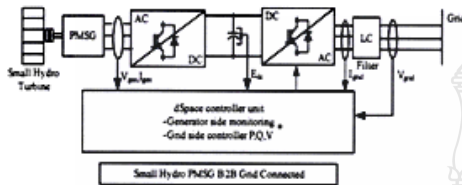
#### 1. บทนำ

เนื่องจากการความต้องการด้านพลังงานไฟฟ้าที่มากขึ้นสวนกับทิศทางของพลังงานต้นทุ่นที่ต้องป้อนเข้าสู่ระบบการผลิตไฟฟ้า และต้องเน้นถึงความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพื่อลดสภาวะโลกร้อนไปด้วยในขณะเดียวกัน กังหันลมนับเป็นอีกแหล่งหนึ่งที่มีความนิยมนำมาเป็นต้นกำลังในการผลิตกระแสไฟฟ้า แต่จุดด้อยของระบบนี้เกิดมาจากแรงลมในประเทศไทยจะมีค่าเฉลี่ยไม่คงที่และอยู่ในเกณฑ์ต่ำ แต่ก็ได้มีการหลายงานวิจัยพยายามแก้ไขเช่นการใช้ระบบเกียร์ การใช้คอนเวอร์เตอร์กำลังต่างๆเหล่านี้เพื่อต้องการรักษาระดับแรงดันจ่าย แต่ก็จะมีต้นทุนในการบำรุงรักษาเพิ่มขึ้นแตกต่างกันไปในแต่ละวิธี

ใน [1]-[5] ได้นำเสนอระบบขับเคลื่อนกังหันน้ำด้วยกังหันลม โดยใช้เครื่องกำเนิดแบบซิงโครนัส ทั้งเป็นแบบกระตุ้นสนามแม่เหล็กด้วยไฟฟ้ากระแสตรง หรือแบบแม่เหล็กถาวร (Wound Rotor Synchronous Generator: WRSG) และ PMSG ที่สามารถทำงานในโหมดปรับความเร็วรอบได้ โดยไม่จำเป็นต้องใช้ชุดเกียร์ทดความเร็ว และใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์กำลัง B2B แบบพิกัดเต็มกำลังต่อระหว่างด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและด้านกริดระบบ ตามลำดับ

สำหรับแนวความคิดในโครงการที่นำเสนอจะใช้พลังงานน้ำเพื่อขับกังหันน้ำ (Hydro turbine) โดยการเปลี่ยนพลังงานกลในการหมุนขับเคลื่อนกำลังของชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ชนิดซิงโครนัสแบบกระตุ้นด้วยแม่เหล็กถาวร (PMSG) แทนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า DFIG (Double Fed Induction Generator: DFIG) แบบดั้งเดิม พลังงานไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG จ่ายออกมาจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับกริดระบบโดยผ่านคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบ B2B โดยการศึกษาวิจัยเชิงเทคนิคในโครงการนี้จะทำการศึกษา วิเคราะห์ ระบบการทำงานทั้งหมดของระบบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่องานใน

อนาคตจะออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบของระบบ ทั้งภาควงจรกำลัง และภาควงจรควบคุม ในขนาดที่คิดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า PMSG ขนาด 20 kW ใช้ภายในห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาต่อไป



รูปที่ 1 แสดงโลโก้แกรมระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันน้ำ

**2.ระบบผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ**

**2.1 กังหันน้ำขนาดเล็ก**

สำหรับพลังงานไฟฟ้าที่จะได้รับจากพลังงานน้ำเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$P = gQH \tag{1}$$

โดย  $P$  คือกำลังที่ได้จากน้ำตก (วัตต์)  $Q$  คือ อัตราการไหลของน้ำผ่านเครื่องกังหันน้ำ (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)  $g$  คือ ค่าความเร่งของน้ำเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.807 เมตร-วินาที<sup>2</sup>)  $d$  คือ ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)  $H$  คือ ความสูงของน้ำตกหรือศักย์น้ำ (เมตร) ปริมาณไฟฟ้าที่สามารถผลิตได้เป็นดังสมการ (2)

$$W = Ptf \tag{2}$$

โดย  $W$  คือ พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)  $P$  คือ กำลังน้ำตก (กิโลวัตต์)  $t$  คือ ระยะเวลาการผลิต (ชั่วโมง)  $f$  คือ ประสิทธิภาพของกังหันน้ำ-เครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0.5-0.9  $f$  คือ สัมประสิทธิ์สำหรับความผันผวนของการไหลของน้ำในธาร

**2.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร**

PMSG เป็นเครื่องกลแบบซิงโครนัสที่ไม่ต้องการมีชุดกระแสไฟตรงเพื่อช่วยในการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก โดยจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสนามแม่เหล็กจากชุดขั้วแม่เหล็กถาวรแทน นอกจากนี้ยังไม่ต้องมีแปรงถ่านและแหวน (Slip ring) จึงง่ายต่อการบำรุงรักษา ด้วยเหตุนี้เองลักษณะทางกายภาพของ PMSG จึงมีขนาดเล็กกว่าซิงโครนัสเซนเรเตอร์ทั่วไป เราสามารถที่จะจำลองการทำงานของ PMSG ได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ (3)

$$\begin{aligned} v_a &= R_s i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \\ v_b &= R_s i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \\ v_c &= R_s i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \end{aligned} \tag{3}$$

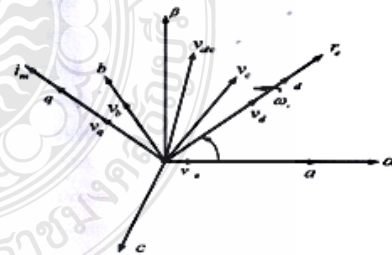
เมื่อ  $v_a, v_b$  และ  $v_c$  คือแรงดันเฟสสเตเตอร์  $R_s$  คือค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์  $\psi_a, \psi_b$  และ  $\psi_c$  คือค่าฟลักซ์แม่เหล็ก เพื่อให้เป็นการง่ายในการจำลองด้วยคณิตศาสตร์จึงต้องการเปลี่ยนรูปสมการจากระบบ 3 เฟสไปถูกระบบ 2 เฟส โดยแปลงจากระบบ  $abc$  โคออร์ดิเนต (Coordinate) ไปถูกระบบ  $dq$  ระบบ  $dq$  ซึ่งเป็นแกนหมุนจะเหมือนกับโรเตอร์ซึ่งหมุนด้วยความเร็วเชิงโรนัส (Synchronous) โดยแรงดันสเตเตอร์ในระบบ  $dq$  หาได้จากสมการ (4)

$$\begin{aligned} v_{sd} &= \frac{2}{3} (v_a \cos(\theta) + v_b \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + v_c \cos(\theta - \frac{4\pi}{3})) \\ v_{sq} &= \frac{2}{3} (-v_a \sin(\theta) - v_b \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) - v_c \sin(\theta - \frac{4\pi}{3})) \end{aligned} \tag{4}$$

เมื่อ  $v_{sd}, v_{sq}$  คือค่าแรงดันสเตเตอร์ในระบบ  $dq$  และ  $\theta$  คือค่ามุมระหว่างแกนนิ่งของสเตเตอร์และแกน  $d$

$$\begin{aligned} v_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \psi_{sd} - \omega_r \psi_{sq} \\ v_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \psi_{sq} + \omega_r \psi_{sd} \end{aligned} \tag{5}$$

เมื่อ  $v_{sd}, v_{sq}$  คือแรงดันเฟสสเตเตอร์  $R_s$  คือค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์  $\psi_{sd}, \psi_{sq}$  คือค่าฟลักซ์แม่เหล็ก  $\omega_r$  คือค่าความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า

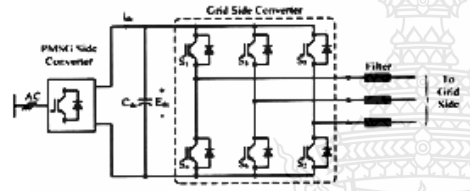


รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ของการแปลงระบบ  $abc$  ต่  $dq$



**2.3 การควบคุมคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบ B2B ด้วยเทคนิคการควบคุมแบบSVPWM**

การควบคุมคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบ สำหรับควบคุมการป้อนกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ เข้าสู่กริดระบบจะใช้วิธีการควบคุมแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงให้คงที่ตลอดเวลา บนพื้นฐานของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการควบคุมบนแกนสามแม่เหล็กหมุน และนำไปสร้างสัญญาณการพริกกะทอนเวอร์เตอร์กำลัง การมอดูเลชันทั่วไปเป็นการปรับค่าแรงดันทางค่านอกไฟที่มีลักษณะรูปคลื่นโคไซน์เชิงรูปคลื่นไซน์มากที่สุดตามความถี่พื้นฐาน และเทคนิค SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) ถูกนำมาใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมการพริกกะทอน IGBT คอนเวอร์เตอร์ เพราะสามารถเพิ่มแรงดันได้มากกว่าการมอดูเลชันรูปไซน์ทั่วไปถึง 15%



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างการต่อคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดไฟฟ้า

เพื่อจ่ายต่อการออกแบบสัญญาณควบคุมจึงต้องมีการแปลงระบบ 3 เฟสไปสู่ระบบ 2 เฟส โดยแปลงจากระบบ abc โคออร์ดิเนตไปสู่ระบบ dq เพื่อสร้างสัญญาณพริกกะทอนของ IGBT ที่ประกอบเป็นคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบบริดจ์ 2 ระดับ โดยใช้เทคนิค SVPWM ดังสมการ (6) - (8) ต่อไปนี้

$$\begin{aligned} x_\alpha &= \frac{2}{3}(x_a - 0.5x_b - 0.5x_c) \\ x_\beta &= \frac{2}{3}(0x_a + 0.866x_b - 0.866x_c) \end{aligned} \quad (6)$$

เมื่อ  $x$  คือตัวแปรแทนแรงดัน  $v$  หรือกระแส  $i$  เมื่อทำการแปลงระบบจาก  $abc$  สู่  $\alpha - \beta - 0$

$$\begin{aligned} x_\alpha &= x_a \cos(\theta) + x_\beta \sin(\theta) \\ x_\beta &= -x_a \sin(\theta) + x_\beta \cos(\theta) \end{aligned} \quad (7)$$

เมื่อ  $x$  คือตัวแปรแทนแรงดัน  $v$  หรือกระแส  $i$  เมื่อทำการแปลงระบบจาก  $\alpha - \beta - 0$  สู่ระบบ  $dq$

$$x_d = x_\alpha \cos(\theta) - x_\beta \sin(\theta)$$

$$x_q = x_\alpha \sin(\theta) + x_\beta \cos(\theta) \quad (8)$$

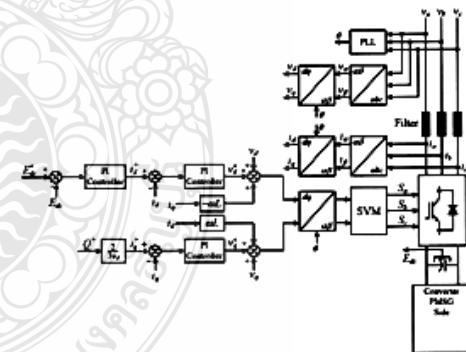
เมื่อ  $x$  คือตัวแปรแทนแรงดัน  $v$  หรือกระแส  $i$  เมื่อทำการแปลงระบบจาก  $dq$  สู่ระบบ  $\alpha - \beta - 0$

**2.4 ระบบสัญญาณควบคุม**

การควบคุมแรงดันและกำลังไฟฟ้าทางค่านกริดระบบจะใช้การสร้างสัญญาณการพริกกะทอนเวอร์เตอร์กำลังด้านกริดระบบซึ่งจะเป็นการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง DC Link ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟส 380V50Hz โดยที่ระบบจะรักษาการป้อนกำลังไฟฟ้าแอกทีฟและกำลังไฟฟ้รีแอกทีฟ เข้าสู่กริดระบบและรักษาแรงดันเชื่อมโยงไฟตรงให้คงที่ตลอดเวลา

**3. การทดลองโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์**

การจำลองการทำงานโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันน้ำขนาดเล็กเพื่อเชื่อมต่อเข้ากับกริดโดยวิธีควบคุมแบบเวกเตอร์ เมื่อนำกำลังไฟเข้าป้อนกังหันน้ำและเพลอาของกังหันน้ำจะไปจับเพลอาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 380 V 50 Hz และจะถูกแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยคอนเวอร์เตอร์กำลังด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และถูกแปลงกลับเป็นแรงดันกระแสสลับเพื่อต่อเข้ากับกริดสายส่งของการไฟฟ้าโดยต้องรักษาแรงดัน DC Link ให้คงที่โดยที่ค่าคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 10\%$  กำหนดให้อัตราการไหลของน้ำคงที่เพื่อให้ได้พลังงานน้ำในการจับกังหันน้ำคงที่ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ (1)

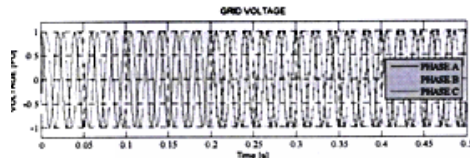


รูปที่ 3.1 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้านกริดระบบ

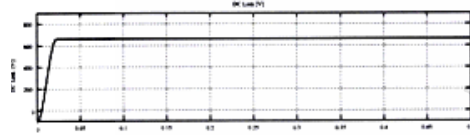
**4. ผลการทดลอง**

การจำลองระบบการควบคุมการเชื่อมต่อกำลังไฟฟ้าเข้ากับสายส่งของการไฟฟ้าที่กำลังจ่ายโหลดให้กับโหลดความต้านทานอยู่โดยให้ PMSG เป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ด้วยโปรแกรม

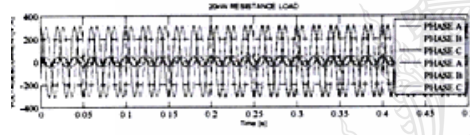
Matlab/Simulink ผลการจำลองการเชื่อมต่อระบบไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำลังนำขนาดเล็กเข้ากับกริด ของการไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ได้ผลตามลำดับดังนี้



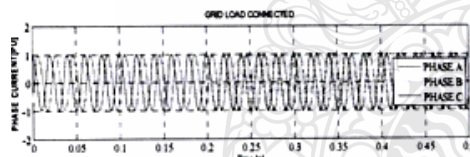
รูปที่ 4.1 แสดงแรงดันด้านกริดระบบ



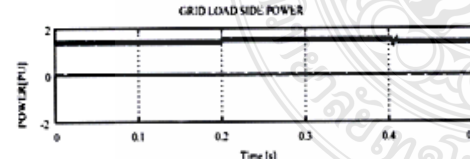
รูปที่ 4.2 กราฟแรงดัน DC Link



รูปที่ 4.3 แสดงแรงดันและกระแสโหลดความต้านทาน 20 kW

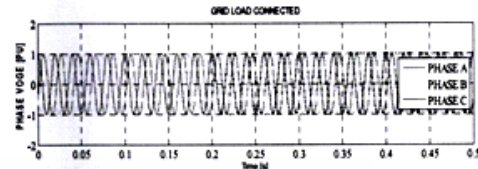


รูปที่ 4.4 แสดงกระแสกริดด้านต่อโหลด



รูปที่ 4.5 แสดงกำลังไฟฟ้ากริดระบบด้านต่อโหลด

รูปที่ 4.5 แสดงกำลังไฟฟ้าเมื่อเชื่อมต่อเข้ากับกริดระบบที่เวลา 0.2 วินาทีและปลดออกจากระบบที่เวลา 0.4 วินาที



รูปที่ 4.6 แสดงแรงดันกริดด้านต่อโหลด

รูปที่ 4.3 และ 4.4 แสดงแรงดันและกระแสโหลดความต้านทานขนาด 20 kW เมื่อเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าเมื่อเวลา 0.2 วินาที พบว่าระบบสามารถจ่ายกระแสและแรงดันให้กับโหลดได้อย่างต่อเนื่องโดยแสดงเป็นค่า  $v_m, i_m$  สำหรับค่ากระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าอื่นๆแสดงอยู่ในหน่วยเปอร์เซ็นต์

5. สรุป

การจำลองการทำงานของระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังนำขนาดเล็กชนิดแม่เหล็กถาวร เพื่อเชื่อมต่อกำลังงานไฟฟ้าเข้ากับระบบสายส่งแรงดันต่ำของการไฟฟ้าโดยใช้เทคนิค PLL (Phase Lock Loop) ร่วมกับคอนเวอร์เตอร์กำลังแบบ B2B ทำให้สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้ากับสายส่งได้อย่างต่อเนื่องและสามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าให้กับระบบของการไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] F.D. Bianchi, H. D. Battista, and R. J. Mantz, *Wind Turbine Control System*. Springer, 2007. ISBN 1-8462-8492-9.
- [2] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. Timbus, "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2006.
- [3] R. S. Pena, R. J. Cardenas, G. M. Asher, and J. C. Clare, "Vector controlled induction machines for stand-alone wind energy applications," in *Proc. IEEE Ind. Applicat. Annu. Meeting*, vol. 3, Rome, Italy, 2000, pp. 1409-1415.
- [4] B. Bose, "Energy, environment, and advances in power electronics," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 15, pp. 688-701, July 2000.
- [5] R. Teodorescu and F. Blaabjerg, "Flexible control of small wind turbine with grid failure detection operation in stand-alone and grid connected mode," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, pp. 1323-1332, September 2004.



The 3<sup>rd</sup> International Conference  
On Sustainable Energy and Green Architecture  
Chaophya Park Hotel, Bangkok, Thailand

March 14-16, 2012

## Abstracts Book



**Conference theme:** Climate Change Mitigation through Sustainable Built  
Environment development

Organized by:



**RCSEE**  
ENERGY & ENVIRONMENT

Rattanakosin College for Sustainable Energy and  
Environment, Rajamangala University of Technology  
Rattanakosin

Co-Hosted by:



Faculty of Architecture Kasetsart University

## Organizing Committees

### Chairperson

- Joseph KHEDARI

### Advisor

- Issaree HUNSACHAROONROJ

### Treasurer

- Montana WISAWABUMRUNGCHAI

### Conference Coordinator

- Pard TEEKASAP

### International Scientific Committee

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

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

#### Committee

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

### Abstract Contents (Cont.)

	Page
RE25 Modeling of Grid-connected with Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) by Using Vector Control	46
RE26 Design of an Algorithm for Faults Location on 22 kV Distribution System	47
RE27 SVPWM AC-DC Converter by Do Frame Control Technique	48
RE28 Simulation Of Three-Level Power Back-To-Back Circuit For Renewable Energy Sources	49
<b>III. TM: Energy and Environmental Engineering, Technology and Management</b>	
TM01 WITHDRAW	50
TM02 Decolorization of Cationic Yellow X-GI 200% by nano-structured titanium dioxide (TiO <sub>2</sub> ) films	51
TM03 Effect of Titanium Isopropoxide: Isopropanol Ratio and Thermal Treatment of TiO <sub>2</sub> Powder on Structural Changes and Methylene Blue Degradation	52
TM04 Thermal Efficiency of a New Stove Running with Ethanol Low Concentration without Pressuring	53
TM05 Evaluation Greenhouse Gas Emission from Small Scale Mixed Rice Husk-Glycerol Briquettes Gasified Power Plant	54
TM06 Numerical Study of the Thermal Destruction of Pollutant Components of Wastes Smoke	55
TM07 Steam Sterilization Management to Electric Energy Saving: Case Study Center Supply Nonthavej Hospital	56
TM08 Intelligent Street Lighting Control	57
TM09 Development of Photovoltaic / Generator Hybrid Energy System for Vehicle Operating Expressway	58
TM10 WITHDRAW	59
TM11 Study of Ways to Reduce Amount of Water in the Dying Process of Textile Industry	60
TM12 The Design of an Electronic Load and Measuring Technique for PEMFC Impedance Examinations	61
TM13 Integration Science Curriculum for Energy and Sustainable Environment	62
TM14 Equivalent Circuit for 1D Electrochemical Model of Lithium Ion Battery	63
TM15 Benefit Assessment after Clean Development Mechanism Implementation in Queen Tomato Processing	64
TM16 Thermal Energy Evaluation of the Incinerator Waste	65
TM17 A Study of Asphalt Recycling Process of Microwave Pre-heating	66
TM18 Biodrying Process for Small Community to Produce RDF from Municipal Solid Waste	67



**SEGA-03**  
Sustainable Energy and Green Architecture

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

RE25

**Modeling of Grid-connected with Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)  
by Using Vector Control**

Sontaya Manmai, Natthabhat Phankong, Krischonme Bhumkittipich and Poolkiat  
Nakawiwat

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology  
Thanyaburi, 39 Moo1, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani, THAILAND

\*krischonme.b@en.rmutt.ac.th

**Abstract**

This paper deals with the modeling of 20 kW permanent magnet synchronous generators (PMSG) for small hydro power (SHP) applications. In order to be able to implement the control algorithm, 20 kW PMSG is modelled based on synchronous reference frame and is designed in Matlab/Simulink. The PMSG parameters were read and tested from the nameplate and computed by using electromechanical equation. The simulation results show the electrical quality and electrical power fed in to the grid side. The DC Link voltage must be maintained by controller and can feed both of active power and reactive power to the grid system. This model can be able to use for implementation in the laboratory on future work.

**Keywords:** Permanent Magnet Synchronous Generator, Micro Hydro Power, Vector Control, and Synchronous Reference Frame

## Modeling of Grid-connected with Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) by Using Vector Control

Sontaya Manmai, Nathabhat Phankong, Krischonme Bhumkittipich\* and Poolkiat Nakawiwat

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
39 Moo1, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani, THAILAND

\*krischonme.b@en.rmutt.ac.th

### Abstract

This paper presented the modeling of 2 sets power converter capacity 20 kW, which one has connected with the permanent magnet synchronous generators (PMSG) side and the other one has connected to the grid side. This system is used for small hydro power (SHP) applications. In order to be able to implement the control algorithm, 20 kW PMSG is modelled based on synchronous reference frame and is designed in Matlab/Simulink. The simulation results show the electrical power flow from the generator system fed in to the grid side. The DC Link voltage must be keep constant value during the operation time. This model can be able to use for implementation in the laboratory on future work.

**Keywords:** Permanent Magnet Synchronous Generator, Small Hydro Power, Vector Control, and Synchronous Reference Frame

### INTRODUCTION

The climate changed of the world that affected from the people's life style it's changed from the easy lives that have very closely relation with natural to the modern life, and need the modern product to supported the new life style. The products used the resource and energy for production process. The electricity is one of energy that their need. The fossil, wind power, hydro power are primary energy that served to the power plant, wind and hydro power are cheap and clean energy. In recent year the power electronic topology has fast development and best quality more than the pass and can be applied use for the electrical wind turbine power plant, the plant used difference technic for use wind power to drive generator for generated the electricaity; example used reducer gear, direct drive and converter. The quality of wind power energy resource in Thailand have not good enough average lower than 3 m/s , but some area can be applied for windturbine example; near the sea or on high moutain.

In reference document had presented windturbine generation electricity by synchronous generator all of type of excites by direct current or permanent magnet. WRS (Wound Roter Synchronous Generator) and PMSG can be operated with variable

speed controller by out of speed reducer gear, alternate way is applied to used with power electronic, B2B (Back to Back) converter is this solution. The one side of B2B is connected to the generator side and other side is connected to grid side.

This research have present the hydro power to drive the PMSG to be generated electricity instead the original style that used wind power to drive DFIG (Double Fed Induction Generator). The electrical power from the PMSG have cascade with B2B converter for supply the power to grid system, the research show simulation result of power quality and can be fed the power to the grid system by Matlab/simulink program. The result of this paper will be compare the test result in laboratory have to refered the theory on the futher work.

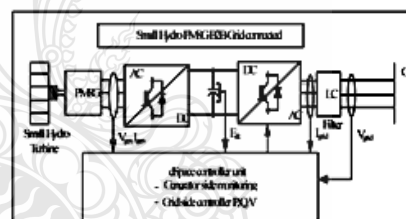


Fig. 1 Flow diagram

### HYDROELECTRIC

#### SMALL HYDRO TURBINE

Hydroelectric power plants are converting the water energy to produce the electrical energy, the hydro power increase power dependent the differential level between high side and low side, the high side is called head water and the low side call tail water. Water is flow in to the hydro turbine and generates torque to drive the PMSG shaft to produce the electricity. The water power is calculate by equation (1) as below,

$$P = \rho g Q H \quad (1)$$

Where  $P$  is water power ( watt,  $W$  ),  $Q$  is water flow rate to hydro turbine ( $m^3 / s$  ),  $g$  is gravity



$(9.81m/s^2)$ ,  $d$  is water density ( $Kg/m^3$ ),  $H$  is head water ( $m$ )

The hydroelectricity can be calculate by equation (2)

$$W = Pmf \quad (2)$$

Where  $W$  is electricity power energy ( $kWh/h$ ),  $P$  is water power( $kW$ ),  $t$  is produce time ( $h$ ),  $n$  is efficiency of hydro turbine and generator the value as 0.5 – 0.9,  $f$  is water fluctuate coefficient

#### KAPLAN HYDRO TURBINE

The hydro turbine has much type that used with the hydroelectric plant, Francis, Pelton, Kaplan and Daris. This research focus to the Kaplan hydro turbine because it's can use in the low head water, Kaplan hydro turbine has developed from the Francis hydro turbine but control the water inlet to drive turbine shaft on direct axial flow. The water flow rate can calculate by equation (3)

$$Q = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_h^2) V_{m1} = A_d V_d \quad (3)$$

Where  $Q$  is water flow rate( $m^3/s$ ),  $D_1$  is hydro turbine blade diameter ( $m$ ),  $D_h$  is hub diameter ( $m$ ),  $A_d, V_d$  is outlet area and outlet speed of hydro turbine ( $m^2, m/s$ )

#### PERMANEN MAGNET SYNCHROUSE GENERATOR: PMSG

The PMSG is a regular Synchronous Machine, where the DC excitation Circuit is replaced by permanent magnets, by this eliminating the brushes. Without the brushes and the slip rings, the PMSG has a smaller physical size, a low moment of inertia which means a higher reliability and power density per volume ratio. Also by having permanent magnets in the rotor circuit, the electrical losses in the rotor are eliminated. Due to the mentioned advantages, the PMSG are becoming an interesting solution for hydro turbine applications. The stator phase voltage is given by equation (4)

$$\begin{aligned} v_a &= R_s i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \\ v_b &= R_s i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \\ v_c &= R_s i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \end{aligned} \quad (4)$$

Where  $v_a, v_b, v_c$  is three phase voltage,  $R_s$  is stator resistance ( $\Omega$ ),  $i_a, i_b, i_c$  is three phase current ( $A$ ),  $\psi_a, \psi_b, \psi_c$  is stator flux

The  $abc$  to  $dq$  transformation is needed to simulate the small hydro power plant control in

Matlab/Simulink. The  $abc$  to  $dq$  transformation is show in Fig. 2.

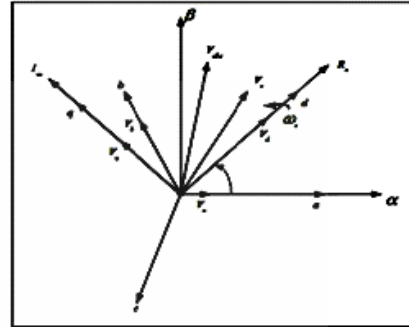


Fig. 2 Reference frame in a three phase circuit.

#### Voltage equations in d, q system

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_r \psi_q \quad (5)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_r \psi_d \quad (6)$$

#### Flux equation in d,q system

The  $dq$  fluxes equations are presented in equation (7) and equation (8)

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_m \quad (7)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (8)$$

#### Torque equation

The electromagnetic torque can be derived from the expression of electromagnetic power which is:

$$P_{em} = \omega_r T_e = \frac{3}{2} \omega_r (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (9)$$

The relation between the electrical and mechanical speed is:

$$\omega_r = \frac{p}{2} \omega_m \quad (10)$$

This means that the expression for the electromagnetic torque, in  $dq$  coordination system, is as shown below:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (11)$$

By replacing the flux expressions, from equations (7) and (8), into the torque equation, the following equation is obtained:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} (\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (12)$$

The first term is the interaction torque between the magnetic field and the  $i_q$  current and the second term is the reluctance torque. As previously said the  $dq$  inductances for the surface mounted PMSM are equal, so the torque relation for this kind of machine is:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \psi_m i_q \quad (13)$$

**Power Equations**

The expression of the active and reactive power is presented in equation (14), respectively equation (15).

$$P = u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq} \quad (14)$$

$$Q = u_{sd} i_{sq} - u_{sq} i_{sd} \quad (15)$$

The general mechanical equation of the machine is:

$$T_e = T_L + B\omega_m + T_d + J \frac{d}{dt} \omega_m \quad (16)$$

**CONVERTER FOR GRID CONNECTED**

The system has used the power converter for transfer the active and reactive power to grid system the flow diagram is show in Fig.3

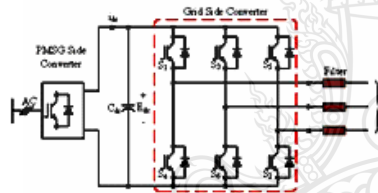


Fig.3 Grid connected flow diagram

**GRID CONNECTED CONTROL SYSTEM**

The converter control in grid connected side have cascade from the PMSG side and control the by current, the DC link voltage has maintain by the control too. For easy to control designed in Matlab/simulink, the model to be used the 3 phase to 2 phase transformation, the transformation concept are call  $abc$  to  $\alpha - \beta - 0$  to  $dq$ , the transformation equation as follow belows,

Equation (17), (18) show the  $abc$  to  $\alpha - \beta - 0$  transformation.

$$x_\alpha = \frac{2}{3}(x_a - 0.5x_b - 0.5x_c) \quad (17)$$

$$x_\beta = \frac{2}{3}(0x_a + 0.866x_b - 0.866x_c) \quad (18)$$

Where  $x$  are variable parameters can be instad by  $v, i$  if verify voltage or current.

Equation (18), (19) used for transfer  $\alpha - \beta - 0$  to  $dq$

$$x_d = x_\alpha \cos(\theta) + x_\beta \sin(\theta) \quad (19)$$

$$x_q = -x_\alpha \sin(\theta) + x_\beta \cos(\theta) \quad (20)$$

Where  $x$  are variable parameters can be instad by  $v, i$  if verify voltage or current.

**PHASE LOCK LOOP (PLL)**

PLL technique was applied to this project, because this application will generated the grid angle for the grid side control, or calculate by equation (21)

$$\theta_{grid} = \tan^{-1} \left( \frac{v_\beta}{v_\alpha} \right) \quad (21)$$

Where  $\theta_{grid}$  is grid phase angle

Grid connected control flow diagram will show in Fig.4

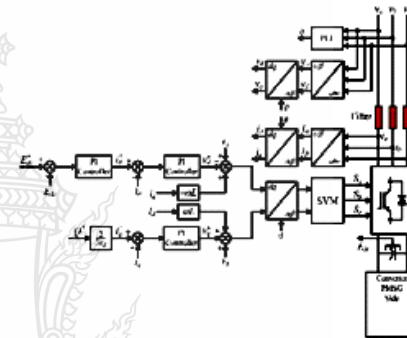


Fig.4 Grid side converter controlled diagram

**EXPERIMENTATION**

The water flow rate from the damp or the moutain river have assigned to fix volume and speed, the hydro turbine is rotating to drive the PMSG shaft in continuouse synchronous speed, the AC voltage from PMSG will supplied the constant voltage to the generator side converter. The DC link voltage has kept constant by coupling capacitor. The DC link voltage must maintain the constant value by grid side controller. The PLL (Phase Lock Loop) techniqe have used to check grid voltage and frequency for automatic fed the power from generator side in to grid system.

The first term is the interaction torque between the magnetic field and the  $i_m$  current and the second term is the reluctance torque. As previously said the  $dq$  inductances for the surface mounted PMSM are equal, so the torque relation for this kind of machine is:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \psi_m i_{sq} \quad (13)$$

**Power Equations**

The expression of the active and reactive power is presented in equation (14), respectively equation (15).

$$P = u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq} \quad (14)$$

$$Q = u_{sd} i_{sq} - u_{sq} i_{sd} \quad (15)$$

The general mechanical equation of the machine is:

$$T_e = T_L + B\omega_m + T_d + J \frac{d}{dt} \omega_m \quad (16)$$

**CONVERTER FOR GRID CONNECTED**

The system has used the power converter for transfer the active and reactive power to grid system the flow diagram is show in Fig.3

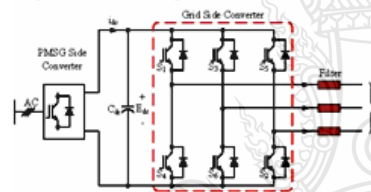


Fig.3 Grid connected flow diagram

**GRID CONNECTED CONTROL SYSTEM**

The converter control in grid connected side have cascade from the PMSG side and control the by current, the DC link voltage has maintain by the control too. For easy to control desined in Matlab/simulink, the model to be used the 3 phase to 2 phase transformation, the transformation concept are call  $abc$  to  $\alpha-\beta-0$  to  $dq$ , the transformation equation as follow belows,

Equation (17), (18) show the  $abc$  to  $\alpha-\beta-0$  transformation.

$$x_\alpha = \frac{2}{3}(x_a - 0.5x_b - 0.5x_c) \quad (17)$$

$$x_\beta = \frac{2}{3}(0x_a + 0.866x_b - 0.866x_c) \quad (18)$$

Where  $x$  are variable parameters can be instad by  $v, i$  if verify voltage or current.

Equation (18), (19) used for transfer  $\alpha-\beta-0$  to  $dq$

$$x_\beta = x_\alpha \cos(\theta) + x_\beta \sin(\theta) \quad (19)$$

$$x_q = -x_\alpha \sin(\theta) + x_\beta \cos(\theta) \quad (20)$$

Where  $x$  are variable parameters can be instad by  $v, i$  if verify voltage or current.

**PHASE LOCK LOOP (PLL)**

PLL technique was applied to this project, because this application will generated the grid angle for the grid side control, or calculate by equation (21)

$$\theta_{grid} = \tan^{-1} \left( \frac{v_\beta}{v_\alpha} \right) \quad (21)$$

Where  $\theta_{grid}$  is grid phase angle

Grid connected control flow diagram will show in Fig.4

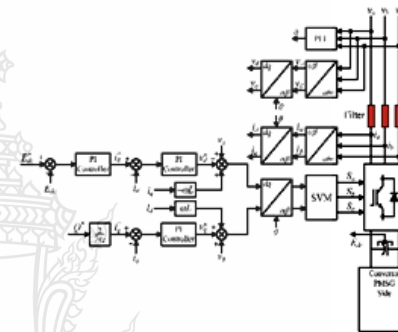


Fig.4 Grid side conveter controlled diagram

**EXPERIMENTATION**

The water flow rate from the damp or the moutain river have assigned to fix volume and speed, the hydro turbine is rotating to drive the PMSG shaft in continuose synchronous speed, the AC voltage from PMSG will supplied the constant voltage to the generator side converter. The DC link voltage has kept constant by coupling capacitor. The DC link voltage must maintain the constant value by grid side controller. The PLL (Phase Lock Loop) techniqe have used to check grid voltage and frequency for automatic fed the power from generator side in to grid system.

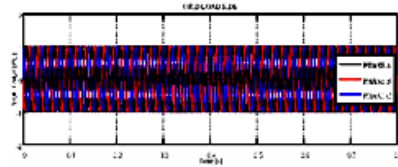


Fig. 5 Grid side load voltage

Fig. 5 show phase voltage in per unit ( $pu$ ) for grid load side that measured after grid connected point.

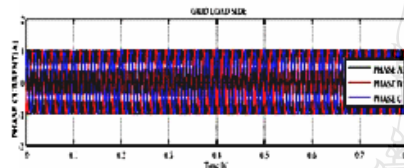


Fig. 6 Grid side load current

Fig. 6 show phase current in per unit ( $pu$ ) for grid load side that measured after grid connected point.

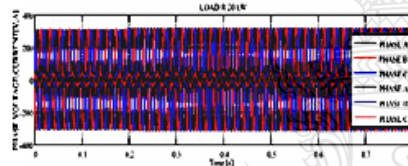


Fig. 7 Load voltage & current

Fig. 7 show phase voltage and current at resistance load  $20\text{ kW}$ , the value measured at phase to ground point the value show  $v_{\text{line}}$  &  $i_{\text{line}}$  for grid load side that measured after grid connected point. Load voltage show on out side sinewave and current show by small sinewave inside the the voltage picture.

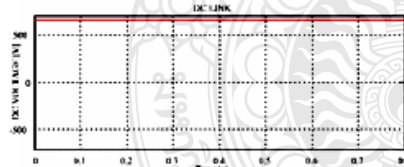


Fig. 8 DC Link voltage

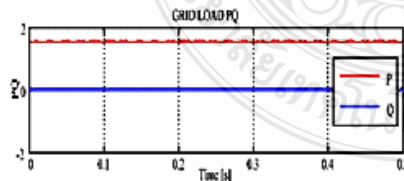


Fig. 9 Grid load side PQ

Fig. 9 show power flow at grid load side, the  $PQ$  continuous fed into the  $20\text{ kW}$  load.

## CONCLUSION

The grid connected with small hydro turbine by vector control result show in Matlab/simulink program. When the small hydro PMSG system have synchronize into the grid side at time  $0.2\text{ sec}$  the system has a little bit fluctuated and then continuous fed the power into the grid side. The result of simulation will be implementing in laboratory for compared with theory and practice result on the further work.

## REFERENCE

1. F.D. Bianchi, H. D. Battista, and R. J. Mantz, Wind Turbine Control System. Springer, 2007. ISBN 1-8462-8492-9.
2. F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. Timbus, "Overview of control and grid Synchronization for distributed power generation systems," IEEE Trans. Ind. Electron, 2006.
3. R. S. Pena, R. J. Cardenas, G. M. Asher, and J. C. Clare, "Vector controlled induction machines for Stand-alone wind energy applications," in Proc. IEEE Ind. Applicat. Annu. Meeting, vol. 3, Rome, Italy, 2000, pp. 1409-1415.
4. B. Bose, "Energy, environment, and advances in Power electronics," IEEE Trans. Power-Electron., vol. 15, pp. 688-701, July 2000.
5. R. Teodorescu and F. Blaabjerg, "Flexible control of small wind turbine with grid failure detection operation in stand-alone and grid connected mode," IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, pp. 1323-1332, September 2004.
6. B. Somkait, "Power plant engineering", 4th edition, pp. 447-472, 2007.

# 10<sup>th</sup> Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium

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

On December 5-8, 2012  
Sunee grand hotel,  
Ubon-ratchathani

Organized by



Co-organized by



## 10<sup>th</sup> EMSES 2012

### International Scientific Advisory Committee:

#### General Chair:

Assoc.Prof.Dr. Namyoot SONGTHANAPITAK RMUTT, Thailand

#### General Co-Chair:

Prof. Dr. Kiyoshi YOSHIKAWA Kyoto Uni., Japan

Asst.Prof.Dr. Panpetch CHININTORN RMUTT, Thailand

#### Organizing Chair:

Asst. Prof. Dr.Somma PIVSA-ART RMUTT, Thailand

Prof. Dr. Takeshi YAO Kyoto Uni., Japan

#### Organizing Co-Chair:

Prof. Dr. Hideaki OHGAKI Kyoto Uni., Japan

#### International Scientific Committees:

Prof. Dr. Susumu YOSHIKAWA Kyoto Uni., Japan

Prof. Dr. Phadungsak RATTANADECHO TU, Thailand

Prof. Dr. Shiro SAKA Kyoto Uni., Japan

Prof. Dr. Hitomi OHARA Kyoto Uni., Japan

Prof. Dr.-Ing. Habil Ingo STADLER FH Koeln, Germany

Prof. Dr. Young S. CHAI Korea

Prof. Dr. Nipon TANGTHAM KU, Thailand

Prof. Dr. Masayoshi OKUBO Osaka Uni, Japan

Prof. Dr. Somchai WONGWISES KMITL, Thailand

Prof. Dr. Nadarajah MITHULANANTHAN UQ, Australia

Prof. Dr. Yukio OGATA Kyoto Uni., Japan

Prof. Dr. Yuichi ANADA Hokkaido Info. Uni., Japan

Prof.Dr. Narongrit SOMBATSOMPOP KMUTT, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Bandit FUNGTAMMASAN KMUTT, Thailand

Assoc. Prof. Dr. K. Srinivas REDDY IIT-Madras, India

Assoc. Prof. Dr. David Jan COWAN IUPUI, USA

Assoc. Prof. Dr. Per B ZETTERLUND Australia

Assoc. Prof. Dr. Vijit KINNARES KMITL, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Yoshikazu SUZUKI Japan

Assoc. Prof. Dr. Thawatch KERDCHEUN RMUTI, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Wakin PIYARAT SWU, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Seiichi KAWAHARA Nakaoga Uni., Japan

Assoc.Prof.Dr. Kawee SRIKULKIT CU, Thailand

Asst. Prof. Dr. Somchai HIRANVAROMDOM RMUTT, Thailand

Asst. Prof. Dr. Wanchai SUBSINGHA RMUTT, Thailand

Asst. Prof. Dr. Thanapong SUWANNASRI KMUTNB, Thailand

Asst. Prof. Dr. Napaporn PHUANGPORNPIITAK KU, Thailand

Asst. Prof. Dr.Boonrit PRASARTKAEW RMUTT, Thailand

Asst.Prof.Dr.Supakit SUTTIUENGWONGSU, Thailand

Asst. Prof. Dr.Vallop PHUPA RMUTP, Thailand

Asst.Prof.Dr.Pramook UNAHALEKHAKA RMUTSB, Thailand

## 10<sup>th</sup> EMSES 2012

Dr.Arthit Sode-Yome	EGAT, Thailand
Dr. Sei-ichi AIBA	Japan
Dr. Wirachai ROYNARIN	RMUTT, Thailand
Dr. Yuttana KAMSUWAN	RMUTT, Thailand
Dr. Jakkree SRINONCHAT	RMUTT, Thailand
Dr. Chatchai SOPPAPITAKSAKUL	RMUTT, Thailand
Dr. Pinit SRITHORN	RMUTI, Thailand
Dr. Uthen KAMNAN	RMUTL, Thailand
Dr. Cattariya SUWANNASRI	KMUTNB, Thailand
<b>ASEAN Committee:</b>	
Prof. Dr. YoyokWahyuSubroto	UGM,Indonesia
Prof. Dr. WegaTRISUNAYANTI	UGM, Indonesia
Prof. Dr. Tumiran	UGM, Indonesia
Prof. Dr. Jun LI	NYU, Singapore
Prof. Dr. INTHAN	ITB, Indonesia
Prof. Dr. Khamphone NANTHAVONG	NOL, Laos
Prof. Dr. Kampui SOUTHISOMBHAT	NOL, Laos
Prof. Dr. Yew Wei LEONG	NYU, Singapore
Prof. Dr. Nguyen Minh TAN	HU, Vietnam
<b>General Secretary:</b>	
Asst.Prof.Dr.Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand
Dr. Sumonman NIAMLANG	RMUTT, Thailand
<b>Technical Program Chair:</b>	
Asst.Prof.Dr.Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand
<b>Area: Energy Technology(ET)</b>	
Dr. Wirachai ROYNARIN	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr.Boonrit PRASARTKAEW	RMUTT, Thailand
Dr. Sathapron THONGWIK	RMUTT, Thailand
Dr. Nathabhat PHANKONG	RMUTT, Thailand
<b>Area: Environmental and Social Impact(ES)</b>	
Dr. Nithiwat CHOOSAKUL	RMUTT, Thailand
<b>Area: Nanotechnology and Materials Science(NM)</b>	
Dr. Sorapong PAVASUPREE	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Kitipong KIMAPONG	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Sirichai TORSAKUL	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Warunee ARIYAWIRIYANANT	RMUTT, Thailand
<b>Area: Energy Economic and Management(EM)</b>	
Assoc.Prof.Dr. Natha KUPTHASTHIEN	RMUTT, Thailand
Dr. Surin NGAEMNGAM	RMUTT, Thailand
Dr. Pimnapat IEMSOMBOON	RMUTT, Thailand
<b>Area: New Energy Technology(NT)</b>	
Dr. Boonyang PLANGKLANG	RMUTT, Thailand
<b>Area: Nuclear Technology(NU)</b>	
Asst.Prof.Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand

## 10<sup>th</sup> EMSES 2012

### Exhibition Chair:

Dr. Amnoiy REUNGWAREE

RMUTT, Thailand

Dr. Winai CHANPENG

RMUTT, Thailand

### Local Arrangement Chair

Dr. Sorapong PAVASUPREE

RMUTT, Thailand

Dr. Natee SRISAWAT

RMUTT, Thailand

### Registration and Finance Chair

Dr. Sumonman NIAMLANG

RMUTT, Thailand

Dr. Supaporn THOMSORN

RMUTT, Thailand

Weeraporn PIVSA-ART

RMUTT, Thailand

### Publicity Chair

Asst.Prof.Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH

RMUTT, Thailand

Dr. Sumonman NIAMLANG

RMUTT, Thailand

Dr. Montip LASURIYONTA

RMUTT, Thailand

Somchai BLANSOONGNERN

RMUTT, Thailand

### Publication Chair:

Prof. Dr. Preecha P.YUPAPIN

KMITL, Thailand

Assoc.Prof.Dr.Takashi SAGAWA

Kyoto Uni., Japan

Dr. Boonyang PLANGKLANG

RMUTT, Thailand

Asst. Prof. Dr. Sonobe TARO

Kyoto Uni., Japan

### Website and Information System Chair:

Dr. Nathabhat PHANKONG

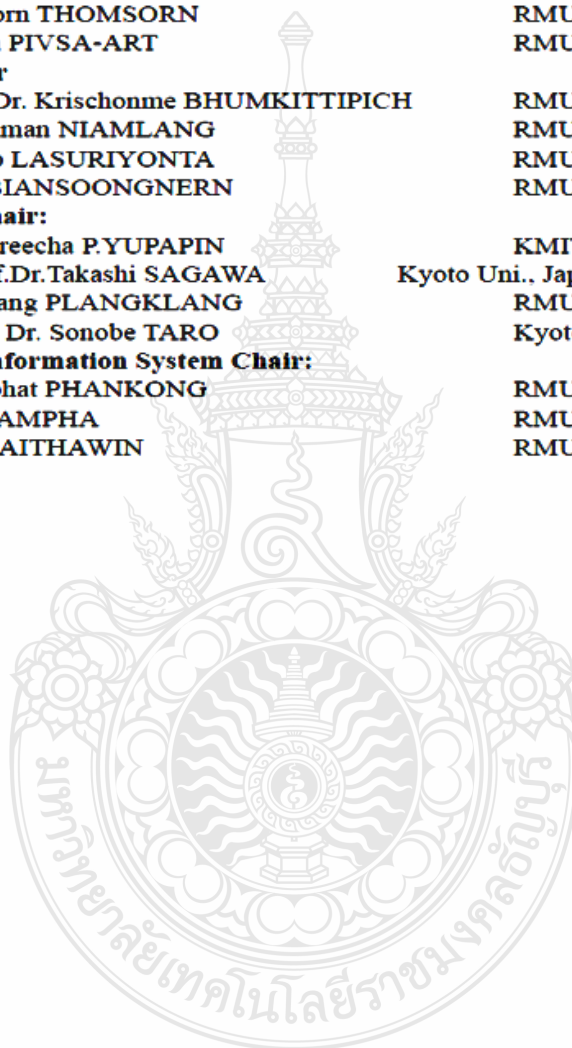
RMUTT, Thailand

Phongsuk AMPHA

RMUTT, Thailand

Deachrat JAITHAWIN

RMUTT, Thailand





---

**CONTENT**

<b>ET23</b>	Application of Artificial Neural Network in Materials Estimation of 22 kV Overhead Lines <i>K. Anukulphirom and K. Bhumkittipich</i>	42
<b>ET24</b>	Performance Study and Analysis of Micro Hydro Turbine and PV for Electricity Generator Case Study: Bunnasopit School, Nan Province <i>Trirath Pati, P. Iemsomboon, and K. Bhumkittipich</i>	43
<b>ET25</b>	Performance analysis of a combined ejector-vapour compression refrigeration system for automotive air conditioning application <i>Nutthanun Keerlatiyadatanapat, Thanarath Sriveerakul, Nat Suvarnakuta, Wirapan Seehanam, and Kulachate Pianthong</i>	44
<b>ET26</b>	The Performance Improvement of a Thick Electrode Solid Oxide Fuel Cell <i>P. Chinda</i>	45
<b>ET27</b>	Modeling of Grid-Connected with Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) using Voltage Vector Control <i>M.Sontaya, P.Nathabhat, K.Bhumkittipich and Poolkiat Nakawiwat</i>	46
<b>ET28</b>	Enhancement of Cassava Rhizome Gasification Using Mono - Metallic Cobalt Catalysts <i>Panchaluck Sornkade, Duangduen Atong and Viboon Sricharoenchaikul</i>	47
<b>ET29</b>	Gasification of Peanut Shell Waste using a Modular Fix-Bed Gasifier <i>Jurarat Nisamaneenate, Duangduen Atong and Viboon Sricharoenchaikul</i>	48
<b>ET30</b>	A Study of Integrating Renewable Energy in Smart Grid System <i>N. Phuangpornpitak and S. Tia</i>	49
<b>ET31</b>	Performance evaluation of 10 kW <sub>p</sub> photovoltaic power generator under hot climatic condition <i>Nipon Ketjoy Chatchai Sirisamphanwong and Nattawut Khaosaad</i>	50

---

**E127**

### **MODELING OF GRID-CONNECTED WITH PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR (PMSG) USING VOLTAGE VECTOR CONTROL**

S. Manmai, N. Phankong, K. Bhumkittipich\* and P. Nakawiwat  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand

#### **Abstract**

This paper presents the modelling of 2 sets power converter capacity 20 kW, which one has connected with the permanent magnet synchronous generator (PMSG) side and the other one, has connected to the grid side. This system is use for small hydropower (SHP) applications. In order to be able to implement the control algorithm, 20 kW PMSG is model based on synchronous reference frame and designed in Matlab/Simulink. The simulation results show the electrical power flow from the generator system fed in to the grid side. The DC Link voltage must be keep constant value during the operation time. This model is able to use for implementation in the laboratory on future work.

**Keywords** — Permanent Magnet Synchronous Generator, Small Hydro Power, Vector Control and Synchronous Reference Frame



## Modeling of Grid-connected with Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) Using Voltage Vector Control

M.Sontaya, P.Nathabhat, K.Bhumkittipich\* and Poolkiat Nakawiwat  
 Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,  
 Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong 6, Klong Luang, Pathumthani 12110  
 \*E-mail: krischonme.b@en.rmutt.ac.th

**Abstract**— This paper presents the modelling of 2 sets power converter capacity 20 kW, which one has connected with the permanent magnet synchronous generator (PMSG) side and the other one, has connected to the grid side. This system is use for small hydropower (SHP) applications. In order to be able to implement the control algorithm, 20 kW PMSG is model based on synchronous reference frame and designed in Matlab/Simulink. The simulation results show the electrical power flow from the generator system fed in to the grid side. The DC Link voltage must be keep constant value during the operation time. This model is able to use for implementation in the laboratory on future work.

**Keywords**— Permanent Magnet Synchronous Generator, Small Hydro Power, Vector Control and Synchronous Reference Frame.

### 1. INTRODUCTION

The power electronic trend in renewable energy industrial was growth up more than 10 years agoes,their applied for wind turbine electrical generators plant,electricity generators from solar energy plant, electricity generators from bio mass plant, electricity generators from hydro power plant etc. In [1]–[6] had presented wind turbine electricity generatoin by synchronous generator all of type of excites by direct current or permanent magnet, WRS (Wound Roter Synchronous Generator) and PMSG,thier can be operated with variable speed control whith out speed reducer gear. The alternative application is applied to connect with power electronic equipments: uni-polar directional converter, bi-directional (B2B) converter etc.The one side of B2B is connected to the generator side and other side is connected to grid system. This research is presented the applications of B2B for hydroelectricity power plants,the electricity produced from water is flowing into hydro turbine and generate torque to drive the PMSG shaft to be generated electricity instead of the original style that use wind power.The electrical power from the PMSG is connected with B2B converter for transfer the electrical power to grid system, the research showss simulation result of power quality and can be injected the power to grid system by Matlab/simmulink program. The results of this paper will be compare the laboratory test result in futher work.

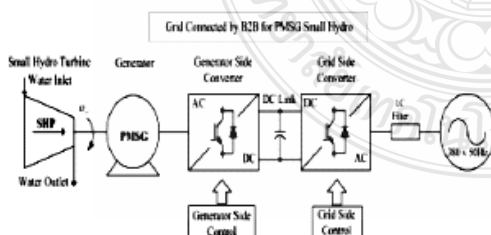


Fig.1 PMSG Grid connected diagram

The rest of this paper organize as follows,section 2 presents the small hydro turbine,section 3 the permanent magnet synchronouse generator,section 4 presents voltage source converter ,section 5 presents the simulation results, finally presnets the conclusion.

### 2. SMALL HYDRO TURBINE

#### Small Hydro Turbine

Hydroelectric power plants is converts the hydro power to produce the electrical energy, the hydro power is increased power dependent differential level of head water and tail water.The head water is higher than tail water [7].The power and head wader have relation follow the equation (1) as below.

$$P = \rho g Q H \quad (1)$$

Where  $P$  is water power (watt, $W$ ),  $Q$  is water flow rate to hydro turbine ( $m^3 / s$ ),  $g$  is gravity ( $9.81m/s^2$ ),  $d$  is water density ( $Kg / m^3$ ),  $H$  is head water ( $m$ )

The hydroelectricity can calculate by equation (2)

$$W = P t n f \quad (2)$$

Where  $W$  is electricity power energy ( $kW / h$ ),  $P$  is hypower ( $kW$ ),  $t$  is produce time ( $h$ ),  $n$  is efficiency of hydro turbine and generator the value as 0.5 – 0.9,  $f$  is water fluctuate coefficient.

#### Kaplan Hydro Turebine

This research interested the Kaplan hydro turbine type because we can used in the low head water, Kaplan hydro turbine has developed from the Francis hydro turbine but control the water inlet to drive turbine shaft on direct axial flow. The water flow rate can calculate by equation (3)

$$Q = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_h^2) V_{m1} - A_d V_d \quad (3)$$

Where  $Q$  is water flow rate ( $m^3/s$ ),  $D_1$  is hydroturbine blade diameter ( $m$ ),  $D_h$  is hub diameter ( $m$ ),  $A_d, V_d$  is outlet area and outlet speed of hydro turbine ( $m^2 \cdot m/s$ )

### 3. PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR (PMSG)

The PMSG is a regular Synchronous Machine, where the DC excitation Circuit is replaced by permanent magnets, by this eliminating the brushes. Without the brushes and the slip rings, the PMSG has a smaller physical size, a low moment of inertia which means a higher reliability and power density per volume ratio. Also by having permanent magnets in the rotor circuit, the electrical losses in the rotor are eliminated. Due to the mentioned advantages, the PMSG are becoming an interesting solution for hydro turbine applications. The stator phase voltage is given by equation (4)

$$\begin{aligned} v_a &= R_s i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \\ v_b &= R_s i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \\ v_c &= R_s i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \end{aligned} \quad (4)$$

Where  $v_a, v_b, v_c$  is three phase voltage,  $R_s$  is stator resistance ( $\Omega$ ),  $i_a, i_b, i_c$  is three phase current ( $A$ ),  $\psi_a, \psi_b, \psi_c$  is stator flux

The  $abc$  to  $dq$  transformation is needed for simulate the small hydro power plant control in Matlab/Simulink. The  $abc$  to  $dq$  transformation is shows in Fig. 2

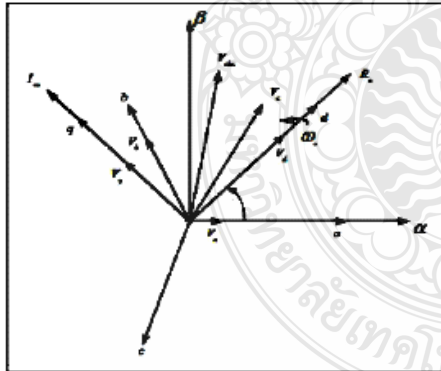


Fig. 2 Reference frame in a three phase circuit

#### Voltage Equation in $dq$ System

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \psi_d - \omega_e \psi_q \quad (5)$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \psi_q + \omega_e \psi_d \quad (6)$$

#### Flux Equation in $dq$ System

The  $dq$  fluxes equations are presented in equation (7) and equation (8)

$$\psi_d = L_d i_{sd} + \psi_m \quad (7)$$

$$\psi_q = L_q i_{sq} \quad (8)$$

#### Torque Equation

The electromagnetic torque can be derived from the expression of electromagnetic power which is:

$$P_m = \omega_m T_e = \frac{3}{2} \omega_e (\psi_d i_{sq} - \psi_q i_{sd}) \quad (9)$$

The relation between the electrical and mechanical speed is:

$$\omega_e = \frac{p}{2} \omega_m \quad (10)$$

This means that the expression for the electromagnetic torque, in  $dq$  coordination system, is as shows below:

$$T_e = \frac{3p}{2} (\psi_m i_{sq} - \psi_q i_{sd}) \quad (11)$$

By replacing the flux expressions, from equations (7) and (8), into the torque equation, the following equation is obtained:

$$T_e = \frac{3p}{2} (\psi_m i_{sq} + (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}) \quad (12)$$

The first term is the interaction torque between the magnetic field and the  $i_{sq}$  current and the second term is the reluctance torque. As previously said the  $dq$  inductances for the surface mounted PMSM are equal, so the torque relation for this kind of machine is:

$$T_e = \frac{3p}{2} \psi_m i_{sq} \quad (13)$$

#### Power equation

The expression of the active and reactive power is presented in equation (14), respectively equation (15).

$$P = u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq} \quad (14)$$

$$Q = u_{sd} i_{sq} - u_{sq} i_{sd} \quad (15)$$

The general mechanical equation of the machine is:

$$T_e = T_l + B\omega_m + T_d + J \frac{d}{dt} \omega_m \quad (16)$$

**Converter for Grid Connected**

The system has used the power converter for transfer the active and reactive power to grid system the flow diagram is shows in Fig.3

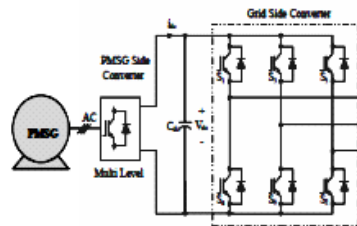


Fig.3 Grid connected flow diagram

**Grid connected control system**

The grid side converter has cascade connected from the PMSG side and control by current loop control. Clark's transformation has used for transfer 3 phase to 2 phase coordination system, the equation as follow below.

$$x_\alpha = \frac{2}{3}(x_a - 0.5x_b - 0.5x_c) \quad (17)$$

$$x_\beta = \frac{2}{3}(0x_a + 0.866x_b - 0.866x_c) \quad (18)$$

Where  $x$  are variable parameters can be instead by  $v, i$  if verify voltage or current.

Equation (18), (19) used for transfer  $\alpha-\beta-0$  to  $dq$

$$x_d = x_\alpha \cos(\theta) + x_\beta \sin(\theta) \quad (19)$$

$$x_q = -x_\alpha \sin(\theta) + x_\beta \cos(\theta) \quad (20)$$

Where  $x$  are variable parameters can be instad by  $v, i$  if verify voltage or current.

**Phase Lock Loop (PLL)**

PLL technique was apply to this project, because this application will generate the grid angle for the grid side control, or calculates by equation (21)

$$\theta_{grid} = \tan^{-1} \left( \frac{v_\beta}{v_\alpha} \right) \quad (21)$$

Where  $\theta_{grid}$  is grid phase angle

Grid connected control flow diagram will shows in Fig.4

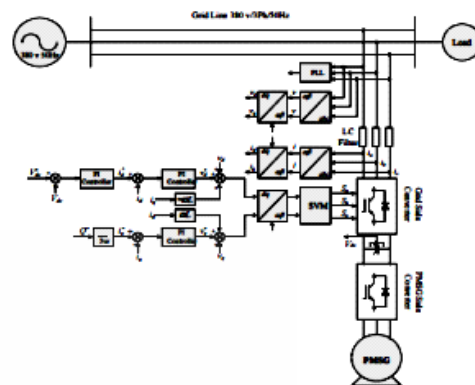


Fig.4 Grid side converter controlled diagram

**4. VOLTAGE SOURCE CONVERTER (VSC)**

The DC-link voltage must be boosted to controls level at 650 volt (around 2 time of grid line to line) higher than the grid line-line voltage. The power flow of the grid side converter is controlled in order to maintain the DC-link voltage level to constant during operation time, in the same time the PMSG side is controlled by speed. The both side of power converter is separate by capacitor and separate controls for control system. The capacitor is the DC link storage and dc filter for prepare the good DC voltage quality before convert to AC voltage by grid side converter and fed the power into grid line as follow.

**5. SIMULATION RESULTS**

The water flowing from the dam or similar location (need differential head water and tail water) has assigned to fix volume and flow rate pass into the hydro turbine, the hydro turbine shaft was rotated to drive the PMSG shaft at continuous synchronous speed, the AC voltage from PMSG will supply the constant voltage to the generator side converter the converted AC voltage to DC voltage, this voltage were call "DC link voltage". The DC link voltage from the PMSG converter side is couple by the grid side converter, between both converters has parallel connected by capacitor. On the operation time the system controller must be maintained the DC link voltage to stand still during grid side converter had fed the active and reactive power to grid line. The PLL (Phase Lock Loop) technique is the easy way for used to tracking grid voltage angle and frequency for generates the control signal to control power converter during operation time.

Table 1. Equipments parameters

Description	Parameter	Values
Electrical system	Voltage	220 $\Delta$ /380Y V
	Current	37.98 A
	Power Factor	0.8
	Frequency	50 Hz
	Resistive load	20 kW
PMSG	Pole	8
	Rated Speed	900 rpm
	Rated Power	20 kW
	Rated Voltage	400 V
	Rated Current	29 A
	Frequency	60 Hz

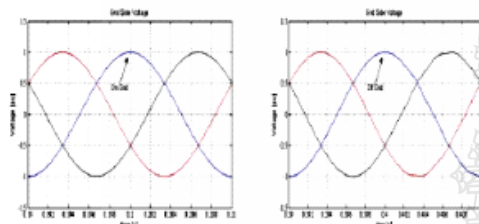


Fig.5 Grid side voltage

Fig.5 shows 3 phase voltage in per unit (pu) of grid side, during operation time till synchronize time (On grid) at 0.2s and off grid time at 0.4s, the voltage sine wave have a little bit fluctuated and then go to stand still.

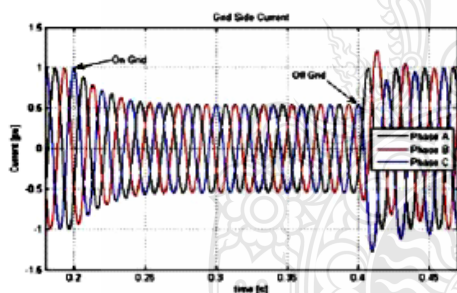


Fig.6 Grid side current

Fig.6 shows 3 phase grid side current in per unit (p.u.); during operation time till on grid at 0.2s the current sine wave had decreasing smoothly and standstill at 0.3s continuously. On the off grid time at 0.4s the current amplitude had fluctuated time around 0.05s before standstill at time 0.4728s.

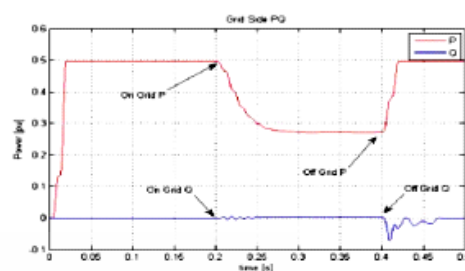


Fig.7 Grid side PQ

Fig.7 shows 3 grid side powers in per unit (p.u.), at on grid time the active power has decreasing smoothly and standstill at 0.3s in the same time the reactive power has a little bit fluctuated. On off grid time at 0.4s the reactive power had fluctuated time more than active power and then go to standstill at time around 0.4728s.

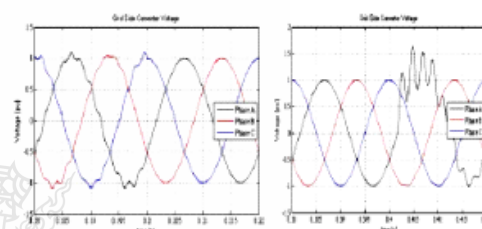


Fig.8 Grid side power converter voltage

Fig.8 shows 3 phase grid side power converter voltage in per unit (p.u.), the voltage sine wave not smoothly may be effect from switching time, when on grid period the voltage sine wave smoothly than off grid period.

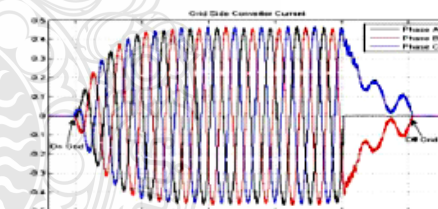


Fig.9 Grid side power converter current

Fig.9 shows 3 phase grid side power converter current in per unit (p.u.), on grid period the controller has controlled grid side power converter to build up the current fed into grid line. The current continuous increasing value since on time period till standstill at time 0.3s and then cut off immediately at off grid time.

Table 1. Equipments parameters

Description	Parameter	Values
Electrical system	Voltage	220 $\Delta$ /380Y V
	Current	37.98 A
	Power Factor	0.8
	Frequency	50 Hz
	Resistive load	20 kW
PMSG	Pole	8
	Rated Speed	900 rpm
	Rated Power	20 kW
	Rated Voltage	400 V
	Rated Current	29 A
	Frequency	60 Hz

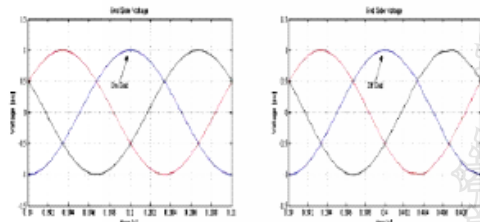


Fig.5 Grid side voltage

Fig.5 shows 3 phase voltage in per unit (pu) of grid side, during operation time till synchronize time (On grid) at 0.2s and off grid time at 0.4s, the voltage sine wave have a little bit fluctuated and then go to stand still.

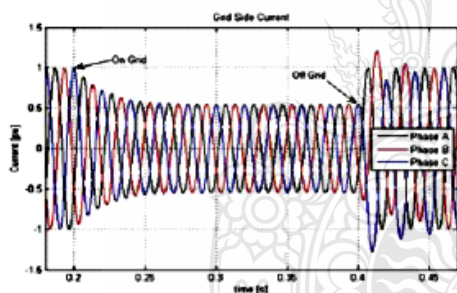


Fig.6 Grid side current

Fig.6 shows 3 phase grid side current in per unit (p.u.); during operation time till on grid at 0.2s the current sine wave had decreasing smoothly and standstill at 0.3s continuously. On the off grid time at 0.4s the current amplitude had fluctuated time around 0.05s before standstill at time 0.4728s.

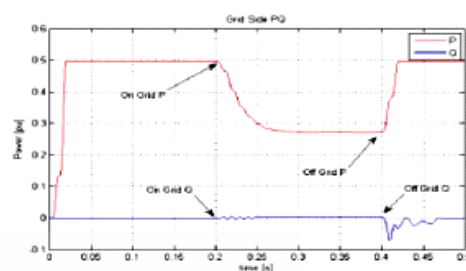


Fig.7 Grid side PQ

Fig.7 shows 3 grid side powers in per unit (p.u.), at on grid time the active power has decreasing smoothly and standstill at 0.3s in the same time the reactive power has a little bit fluctuated. On off grid time at 0.4s the reactive power had fluctuated time more than active power and then go to standstill at time around 0.4728s.

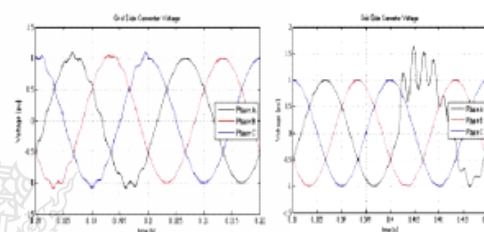


Fig.8 Grid side power converter voltage

Fig.8 shows 3 phase grid side power converter voltage in per unit (p.u.), the voltage sine wave not smoothly may be effect from switching time, when on grid period the voltage sine wave smoothly than off grid period.

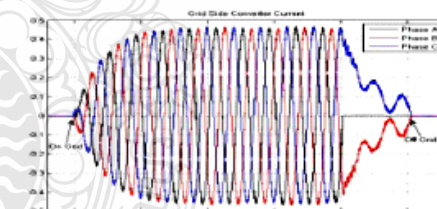


Fig.9 Grid side power converter current

Fig.9 shows 3 phase grid side power converter current in per unit (p.u.), on grid period the controller has controlled grid side power converter to build up the current fed into grid line. The current continuous increasing value since on time period till standstill at time 0.3s and then cut off immediately at off grid time.

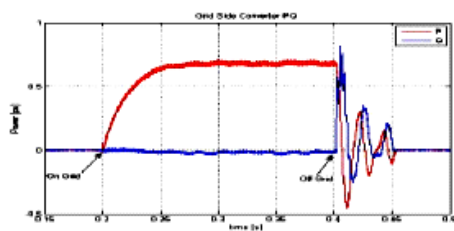


Fig.10 Grid side power converter PQ

Fig.10 shows grid side power converter active and reactive power in per unit (p.u.), the control system can be controlled the PQ transfer from the PMSG side to grid line continuously, at off grid time that we have disconnected PMSG from grid line, we found the fluctuated like Fig.5.6 and then zero at time 0.4278s.

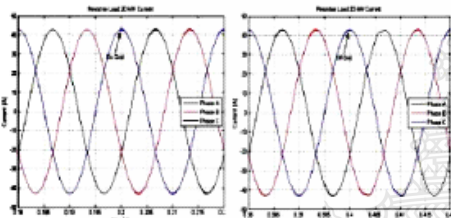


Fig.11 Resistive Load 20 kW current

Fig.11 shows 3 phase resistive load's current during operation time, the configuration measurement were measured phase to ground point, the values shows  $v_{\max}$ ,  $t_{\max}$  for grid load side. The voltage sine wave and system responsible like Fig.5

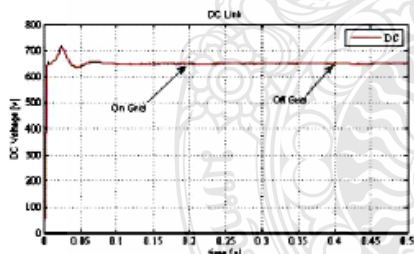


Fig.12 DC Link voltage

Fig.12 shows DC link voltage during operation time. At on grid time the voltage drop down from the target around 0.7 volt within 0.02s after that the system controller used time 0.02s for adjust the voltage increasing to maintain point at 650 volt. The designer must be careful when designed the equipment, because the damping voltage at off grid time higher than 650 volt.

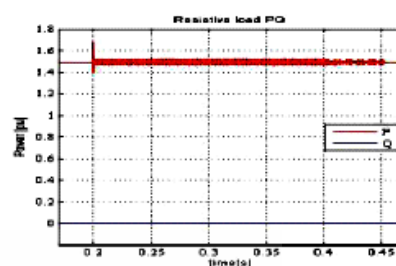


Fig.13 Resistive load side PQ

Fig.13 shows power flow at resistive load, the PQ continuous fed into the 20 kW load.

## 6. CONCLUSION

The modelling of grid connected with small hydro turbine and PMSG by using vector control technique results shows in Matlab/simulink program. When the PMSG system has synchronized into the grid side at time 0.2s the system has a little bit fluctuated and then continuous fed the power into the grid side. The result of simulation will be implemented in laboratory for compared with theory and practice result on the further work.

## ACKNOWLEDGMENT

This research is financial supported by High Vocational Research Management Department and Nation Develop Research University, High Vocational Committee Department.

## REFERENCES

- [1] F.D.Bianchi, H. D. Battista, and R. J. Mantz, Wind Turbine Control System. Springer, 2007. ISBN 1-8462-8492-9.
- [2] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. Timbus, "Overview of control and grid Synchronization for distributed power generation systems," IEEE Trans. Ind. Electron, 2006.
- [3] R. S. Pena, R. J. Cardenas, G. M. Asher, and J. C. Clare, "Vector controlled induction machines for Stand-alone wind energy applications," in Proc. IEEE Ind. Applicat. Annu. Meeting, vol. 3, Rome, Italy, 2000, pp.1409-1415.
- [4] B. Bose, "Energy, environment, and advances in Power electronics," IEEE Trans. Power- Electron., vol. 15, pp. 688-701, July 2000.
- [5] R. Teodorescu and F. Blaabjerg, "Flexible control of small wind turbine with grid failure detection operation in stand-alone and grid connected mode," IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, pp. 1323-1332, September 2004.
- [6] B. Somkait, "Power plant engineering", 4th edition, pp.447-472,2007.



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ว่าที่ร้อยตรี สนธยา มั่นหมาย
วัน เดือน ปีเกิด	1 กุมภาพันธ์ 2515
ที่อยู่	59 / 154 หมู่ 6 ต.ลาดสวาย อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี 12150
การศึกษา	
พ.ศ. 2553	สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรบัณฑิต สาขาวิชาศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พ.ศ. 2551	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาการจัดการทั่วไป มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พ.ศ. 2543	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2556 - ปัจจุบัน	ผู้จัดการฝ่ายขายเครื่องเขียนอุตสาหกรรม บริษัทแคเรียร์ ลินเคอร์ปริเจอเรชั่น (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ. 2555 - 2556	หัวหน้าฝ่ายบริหารจัดการทรัพยากรทางกายภาพและระบบบริการกลาง (วิศวกรไฟฟ้า) กองกลาง สำนักงานอธิการบดี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พ.ศ. 2553 - 2554	ผู้จัดการศูนย์บริการเครื่องปรับอากาศส่วนภาคใต้ สาขาสุราษฎร์ธานี บริษัท สยามไดกันเซลล์ จำกัด
พ.ศ. 2552 - 2553	อาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์
พ.ศ. 2548 - 2552	วิศวกรขายโครงการเครื่องทำความเย็น บริษัท จอห์นสัน คอนโทรลส์ อินเตอร์เนชั่นแนล (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ. 2545 - 2547	วิศวกรโครงการ (ไฟฟ้า) บริษัท มายคอม (ประเทศไทย) จำกัด