

การควบคุมอัตราเร็วของต้นกำลังสำหรับการเชื่อมต่อโครงข่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
ซิงโครนัส

Prime Mover's Speed Control for Synchronization of Synchronous  
Generator System

โดย

นายธีรวัฒน์	พูลบุญ
นายสันฐวุฒิ	มาทา
นายอาหะมะ	บากา

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมอัตราเร็วของต้นกำลังสำหรับการเชื่อมต่อโครงข่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
ซิงโครนัส

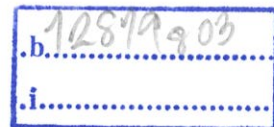
Prime Mover's Speed Control for Synchronization of Synchronous  
Generator System



โดย

นาย ธีรวัฒน์	พูลบุญ
นาย สันฐวุฒิ	มาทา
นาย อาหะมะ	บากา

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 144375  
วันเดือนปี 24 มี.ย. 2559



ปฏิญานีพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

# Prime Mover's Speed Control for Synchronization of Synchronous Generator System

TIRAWAT

POONBOON

SANTAWUT

MATA

AHAMAT

BAKA

THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2015

การควบคุมอัตราเร็วของต้นกำลังสำหรับการเชื่อมต่อโครงข่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า  
ซิงโครนัส

Prime Mover's Speed Control for Synchronization of Synchronous Generator  
System

โดย

นาย ถิรวัฒน์	พุลบุญ
นาย สันฐวุฒิ	มาทา
นาย อาหะมะ	บากา

อาจารย์ที่ปรึกษา  
ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2558

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การควบคุมอัตราเร็วของต้นกำลังสำหรับการเชื่อมต่อโครงข่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส

ผู้จัดทำ

1. นายถิรวัฒน์ พูลบุญ
2. นายสันฐวุฒิ มาทา
3. นายอาหะมะ บากา



( ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม )

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

# การควบคุมอัตราเร็วของต้นกำลังสำหรับการเชื่อมต่อโครงข่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

นาย    ฉิรวัดณ์                    พุลบุญ  
นาย    สันฐวุฒิ                    มาทา  
นาย    อาหะมะ                    บากา  
ผศ.ดร. วรชาติ                    สุวรรณงาม            อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2558

## บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอโครงงานการควบคุมอัตราเร็วของต้นกำลังสำหรับการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า โดยวัตถุประสงค์ของโครงงานคือเพื่อสร้างสัญญาณอ้างอิงสำหรับชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้เป็นต้นกำลังสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการของเฟสล็อกคัลป์ ในการประมาณค่าความถี่ของระบบไฟฟ้า ในโครงงานนี้ สัญญาณขาเข้าของเฟสล็อกคัลป์จะเป็นสัญญาณแรงดันไลน์ของระบบไฟฟ้าซึ่งจะถูกป้อนเข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น STM32F4DISCOVERY ของบริษัท STMicroelectronics เพื่อทำการประมาณความถี่ และส่งสัญญาณอ้างอิงออกมาในพอร์ต PWM และทำการกรองด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ก่อนที่จะป้อนเข้าสู่ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ให้ทำการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้หมุนด้วยความเร็วรอบที่ทำให้ สัญญาณแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส มีความถี่เท่ากับความถี่ของระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า ซึ่งผลที่ได้จะถูกนำมาใช้สำหรับการพัฒนาวิชาปฏิบัติการในหัวข้อการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า โดยเป็นการควบคุมแบบอัตโนมัติ

# Prime Mover's Speed Control for Synchronization of Synchronous Generator System

Mr. Tirawat Poonboon

Mr. Santawut Mata

Mr. Ahamat Baka

Asst.Prof.Dr.Warachart Suwan-ngam Supervisor

Academic Year 2015

## ABSTRACT

This thesis presents the idea of the project about control of the prime mover speed for grid synchronization of the synchronous generator. The objective of this project is to generate the reference signal for the commercial AC drive for drive an induction motor as a prime mover for the generator. The programmed phase-locked loop (PLL) is applied to estimate the grid frequency by feeding the line voltage of the grid to the STM32F4DISCOVERY board from STMicroelectronics. The frequency output is converted to the speed reference and sent to the analog input of the AC drive via PWM port and the analog low-pass filter circuit. This process results in the controlled generator speed which can generate the electromotive force having the same frequency as the grid. The results of the project will then be used to develop to practically teach the students about how to automatically synchronize the synchronous generator to the grid.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงการนี้รู้สึกขอบพระคุณอย่างยิ่งเป็นอย่างสูงต่อความกรุณาที่ ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำรวมถึงความรู้ในการทำโครงการในครั้งนี้ ถ้าปราศจากท่านแล้วโครงการนี้คงไม่สำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบคุณ ดร.ธีรพล โพธิ์พงษ์วิวัฒน์ ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณนครศักดิ์ แสงศรี เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้บริการยืมอุปกรณ์เครื่องมือ และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่อำนวยความสะดวกในการเบิกเงิน

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณผู้มีพระคุณทุกท่าน บิดา มารดา และครอบครัว ซึ่งให้การสนับสนุนด้านการศึกษา การเงินและกำลังใจ รวมทั้งเพื่อนในห้องแล็บ เพื่อนในสาขาวิชาพลังงานไฟฟ้า ที่อยู่ร่วมกันและให้คำปรึกษากันตลอดจนผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในโครงการนี้ทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึง ขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการที่ใช้ในโครงการ	2
1.5 แผนการที่ใช้ในการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการนี้	4
1.7 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปริญญานิพนธ์	4
บทที่ 2 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า	5
2.1 บทนำ	5
2.2 ทฤษฎีของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส (Theory of synchronous machine) [2]	5
2.2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	5
2.2.2 มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส	8
2.3 การขนานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า (Parallel Operation of a Synchronous Generator with Grid System)	11
2.3.1 เงื่อนไขการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า	11
2.3.2 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าแบบปรับด้วยมือ	13
2.3.3 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าแบบกึ่งอัตโนมัติ	14
2.4 บทสรุป	14
บทที่ 3 การควบคุมความถี่ของต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	15
3.1 บทนำ	15
3.2 ทฤษฎีกรอบอ้างอิง	15
3.2.1 การแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง	16
3.2.2 การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงใดๆ	17
3.2.3 การแปลงจากกรอบอ้างอิงใดๆไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง	17
3.2.4 การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงสามเฟส	18
3.2.5 การแปลงกำลังไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงใดๆ	18

## สารบัญ(ต่อ)

3.3. เฟสล็อกลูป	19
3.4 ออปแอมป์	22
3.4.1. วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส	23
3.4.2 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส	23
3.5. สัญญาณ Pulse width modulation (PWM)	25
3.6. บทสรุป	26
<b>บทที่ 4 การจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดลอง</b>	<b>27</b>
4.1 บทนำ	27
4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	27
4.3 วิธีการทดลอง	27
4.4 การจำลองทางคอมพิวเตอร์	31
4.5 ระบบควบคุมความเร็วของต้นกำลังของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัส	34
4.6 บทสรุป	35
<b>บทที่ 5 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลอง</b>	<b>36</b>
5.1 บทนำ	36
5.2 ผลการทดลองความถี่	36
5.3 ผลการทดลองมุมเฟสของแรงดัน	37
5.4 บทสรุป	40
<b>บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ</b>	<b>41</b>
6.1 สรุป	41
6.2 ข้อเสนอแนะ	42
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>43</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>44</b>
ภาคผนวก ก. รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง	45
ภาคผนวก ข. การสร้างสัญญาณอ้างอิง	49
ภาคผนวก ค. การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าเสมือน	53
ภาคผนวก ง. บทความทางวิชาการ	75
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	<b>81</b>

## สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	7
2.2 แผนภาพเฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	8
2.3 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส	9
2.4 แผนภาพเฟสเซอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส	9
2.5 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์ซิงโครนัสแบบไม่คิดความต้านทานที่ขดลวดอาร์มาเจอร์	10
2.6 การต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า	12
2.7 การตรวจสอบเงื่อนไขโดยใช้หลอดไฟสามดวง	12
2.8 ลักษณะการสว่าง-ดับของหลอดไฟสามดวง	13
3.1 โรเตอร์แบบขั้วยื่น (Salient pole) ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส	15
3.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมเฟสบล็อกคู่	19
3.3 บล็อกไดอะแกรม ส่วนแปลงแกนจากกรอบอ้างอิงสามเฟสสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง	20
3.4 บล็อกไดอะแกรม ส่วนแปลงแกนจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งกรอบอ้างอิงใดๆ หรือกรอบอ้างอิงซิงโครนัส	21
3.5 สัญลักษณ์ของออปแอมป์	22
3.6 แสดงวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส	23
3.7 แสดงวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส	24
3.8 สัญญาณ Pulse width modulation (PWM)	25
4.1 กระบวนการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า	29
4.2 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของการควบคุมต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	30
4.3 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์การแปลงไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง	31
4.4 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์การแปลงแรงดันของระบบไฟฟ้าไปสู่กรอบอ้างอิงหมุนเทียบกับระบบไฟฟ้า	32
4.5 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์การแปลงแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปสู่กรอบอ้างอิงหมุนเทียบกับระบบไฟฟ้า	32
4.6 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เฟสบล็อกคู่ของระบบไฟฟ้า	32
4.7 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เฟสบล็อกคู่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	33
4.8 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ส่วนชดเชยความเร็วเชิงมุมไฟฟ้า	33
4.9 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์การสร้างPWM	33
4.10 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์การกรองสัญญาณ	34
4.11 ไดอะแกรมการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส	34
4.12 ไดอะแกรมการควบคุมความเร็วของต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	35

## สารบัญรูปร่างภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 แสดงผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์(บน)และผลการทดลองจริง(ล่าง) ของความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับระบบไฟฟ้าขณะเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	36
5.2 แสดงผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์(บน)และผลการทดลองจริง(ล่าง) ของความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับระบบไฟฟ้าขณะสภาวะคงตัว	37
5.3 แสดงผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์(บน)และผลการทดลองจริง(ล่าง) ของความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับระบบไฟฟ้าขณะขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	37
5.4 แสดงผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์(บน)และผลการทดลองจริง(ล่าง) ของมุมของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้า ขณะสภาวะคงตัว	38
5.5 แสดงผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์(บน)และผลการทดลองจริง(ล่าง) ของมุมของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้า ขณะขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	38
5.6 แสดงผลการจำลองแรงดันไลน์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับระบบไฟฟ้าขณะเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	38
5.7 แสดงผลการทดลองแรงดันไลน์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับระบบไฟฟ้าขณะเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	39
5.8 แสดงผลการจำลองแรงดันไลน์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับระบบไฟฟ้าก่อนและหลังขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้า	39
5.9 แสดงผลการทดลองแรงดันไลน์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับระบบไฟฟ้าก่อนและหลังขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้า	39
ข.1 ไดอะแกรมการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	50
ข.2 วงจร Low pass filter และ Voltage Divider	51
ข.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM Cortex M4 STM32F407VG	51
ข.4 อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า (ก) วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า (ข) รูปชิ้นงานวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า	52

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในการผลิตกำลังไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้านั้นจะต้องทำการปรับเงื่อนไขการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ถูกต้องเสียก่อน ซึ่งทำการปรับได้ยากลำบาก ในวิชาปฏิบัติการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็น ต้นกำลังทางกล ซึ่งในการดำเนินการจะทำการปรับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้หม้อแปลง ออโต้ชนิดปรับค่าได้ใน การปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และปรับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากการปรับความเร็วของต้นกำลัง ซึ่งปรับได้โดยปรับความต้านทานของขดลวดสนามของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จะเห็นได้ว่าการดำเนินการจะเป็นไปได้ยากลำบาก ต้องใช้ผู้ที่มีความชำนาญในการปรับและในวิชาปฏิบัติการทางวิศวกรรมไฟฟ้า เครื่องมือและอุปกรณ์ในการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส มีอายุการใช้งานที่มาก ในโครงการนี้จึงได้ทำชุดการทดลองขึ้นมาใหม่โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นต้นกำลังทางกล โดยจะใช้เอซี ไดรฟ์ในการขับเคลื่อน ซึ่งจะมีสัญญาณอ้างอิงไปควบคุมเอซี ไดรฟ์ และทำการควบคุมกระแสสนามที่ขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสโดยใช้วงจรเปลี่ยนแรงดันกระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC-DC Converter) หรือวงจรทอนระดับแรงดัน (Chopper Circuit) ซึ่งจะถูกรักษาโดยการควบคุมแบบวงรอบปิด (Close Loop Control) เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์มาเจอร์ (Armature Winding) ให้เท่ากับแรงดันของระบบไฟฟ้า

ด้วยเหตุนี้ผู้จัดทำจึงได้ทำการศึกษาวิธีการควบคุมความเร็วของต้นกำลังโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำควบคุมเพื่อกำหนดความถี่ของต้นกำลังให้เท่ากับความถี่ของระบบไฟฟ้า โดยไมโครคอนโทรลเลอร์สร้างสัญญาณสัญญาณอ้างอิง เพื่อนำไปควบคุมเอซี ไดรฟ์เพื่อให้เอาต์พุตที่ออกมาเป็นความถี่ที่ต้องการ และสามารถขนานเข้าสู่ระบบไฟฟ้าได้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ควบคุมความถี่ที่ต้นกำลังของเครื่องจักรกลไฟฟ้าให้เปลี่ยนแปลงตามความถี่ของระบบไฟฟ้าได้
2. เพื่อควบคุมมุมของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เท่ากับระบบไฟฟ้า
3. สร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมความถี่
4. สามารถเข้าใจการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ได้
5. เพื่อใช้สำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการในอนาคต

### 1.3 ขอบเขตของโครงการงาน

1. การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบวงปิดของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยตัวแปรที่ถูกป้อนกลับ คือ ความเร็วรอบ
2. การควบคุมการขับเคลื่อนของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยอาศัยอินเวอร์เตอร์ ABB
3. ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ ARM CortexM4 STM32F4 DISCOVERY
4. อุปกรณ์ที่ใช้ในการจับแรงดันไลน์ของระบบไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซิงโครนัส คือ Voltage Transducer

### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการที่ใช้ในโครงการงาน

1. ทำการศึกษาหลักการของการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส การใช้งานของ AC Drives ABB ACS550-01 ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ หลักการของเฟสล็อกกลุป การใช้งานของ Voltage Transducer LV 25-P และการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM CortexM4 STM32F4 DISCOVERY
2. จัดเตรียมอุปกรณ์ และศึกษาวิธีการใช้งานอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับโครงการงาน
3. สร้างแบบจำลองการทำงานด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink
4. สร้างวงจรทดสอบตามที่ได้ออกแบบไว้
5. ทำการเขียนโปรแกรมการควบคุมความเร็วของต้นกำลังให้เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของระบบไฟฟ้า
6. ทำการทดสอบและบันทึกผลการทดสอบ
7. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์และเตรียมการนำเสนอ
8. สรุปและนำเสนอโครงการงาน

### 1.5 แผนการดำเนินงาน

ระยะเวลาในการดำเนินงาน 10 เดือน ตั้งแต่เดือนสิงหาคม พ.ศ.2558 ถึง เดือน พฤษภาคม พ.ศ.2559

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

ดำเนินงาน	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	ม.ย.	พ.ค.
1. ทำการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงการ										
2. จัดเตรียมอุปกรณ์และศึกษาวิธีการใช้งานอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับโครงการ										
3. สร้างแบบจำลองการทำงานด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink										
4. สร้างวงจรทดสอบ										
5. การเขียนโปรแกรมการควบคุมความถี่ของต้นกำลังให้เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของระบบไฟฟ้า										
6. ทำการทดสอบและบันทึกผลการทดสอบ										
7. จัดทำรูปเล่มปริยญาณิพนธ์										
8. สรุปและนำเสนอโครงการ										

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการนี้

1. โครงการวิจัยนี้ทำให้เกิดความรู้ ความเข้าใจในหลักการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์
2. โครงการวิจัยนี้ทำให้เกิดความรู้ ความเข้าใจในหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
3. โครงการวิจัยนี้เป็นการนำองค์ความรู้ในวิชาต่างๆ มาประยุกต์ใช้เข้าด้วยกันให้เกิดประโยชน์ เช่น อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เครื่องจักรไฟฟ้า ระบบควบคุม และทฤษฎีไมโครคอนโทรลเลอร์

## 1.7 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญญาพันธ

1. บทที่ 1 บทนำ
2. บทที่ 2 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า
3. บทที่ 3 การควบคุมต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
4. บทที่ 4 การจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดลอง
5. บทที่ 5 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดลอง
6. บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

### การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า

#### 2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการทำงานพื้นฐานของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส เงื่อนไขในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้า การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าแบบปรับด้วยมือและแบบกึ่งอัตโนมัติ

#### 2.2 ทฤษฎีของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส (Theory of synchronous machine) [2]

##### 2.2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Generator)

เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสเป็นเครื่องจักรกลที่นิยมใช้ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งนิยมใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยเครื่องจักรประเภทนี้โรเตอร์จะหมุนที่ความเร็วทางกลเท่ากับความเร็วซิงโครนัสและผลิตกระแสไฟฟ้าที่ความเร็วซิงโครนัสโดยจะผลิตไฟฟ้ากระแสสลับจ่ายให้ภาระทางไฟฟ้าหรือระบบไฟฟ้าต่อไป

##### 2.2.1.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส คือ เครื่องจักรไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า จะมีขดลวดอยู่ 2 ส่วน คือ ขดลวดอาร์มาเจอร์ที่สเตเตอร์ (Stator Armature Winding) และขดลวดสนามที่โรเตอร์ (Field Winding) ขดลวดสนามจะอยู่ในส่วนแกนหมุนโรเตอร์ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อโรเตอร์หมุนสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์ก็จะหมุนตามไปด้วยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ขดลวดที่สเตเตอร์ หากมีการต่อภาระทางไฟฟ้าที่ขั้วก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมีโครงสร้างหลัก 2 ส่วน

2.2.1.1.1 สเตเตอร์ (Stator) จะเป็นที่ยึดติดกับส่วนโครงภายนอกของเครื่องจักรกลไฟฟ้าลักษณะจะเป็นแผ่นเหล็กบางๆที่เคลือบฉนวนประกบกันอัดรวมกันเป็นทรงกระบอกโดยปกติจะเป็นที่ตั้งของขดลวดอาร์มาเจอร์ ซึ่งทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กจะมีเส้นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กจะมีเส้นทางตามร่อง สเตเตอร์นั้นแผ่นเหล็กที่นำมาทำเป็นส่วนสเตเตอร์นั้นเป็นเหล็กอ่อนผสมซิลิกอน เพื่อให้มีค่ากำลังการสูญเสียจากฮิสเตอรีซิส (Hysteresis Loss) ต่ำ เหตุที่ต้องประกอบด้วยแผ่นเหล็กบางซ้อนทับกันก็เพื่อที่จะลดกำลังสูญเสียจากกระแสไหลวน (Eddy Current Loss)

2.2.1.1.2 โรเตอร์ (Rotor) จะเป็นส่วนหมุนที่มีแกนหมุนโดยปกติจะเป็นที่ตั้งของขดลวดสนาม (Field Winding) ซึ่งมีขั้วแม่เหล็กที่สร้างจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงหรือเรียกว่า กระแสกระตุ้น (Excitation Current) โดยความเข้มของสนามแม่เหล็กสามารถปรับได้จากการปรับกระแสกระตุ้น ขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์จะมี 2 แบบ คือ

1.) แบบขั้วทรงกระบอก (Cylindrical Pole) จะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกยาว โดยจะมีช่องว่างอากาศระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์จะสม่ำเสมอมีจำนวนขั้วน้อย และจะนิยมใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีความเร็วรอบสูงจึงต้องใช้ต้นกำลังความเร็วรอบสูง เช่น กังหันแก๊ส เป็นต้น

2.) แบบขั้วยื่น (Salient Pole) จะมีลักษณะมีขั้วยื่นออกมาจากตัวโรเตอร์มีช่วงความยาวที่สั้น เนื่องจากขั้วยื่นออกมาทำให้ช่องว่างอากาศระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ไม่สม่ำเสมอ โดยนิยมใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีต้นกำลังความเร็วรอบต่ำๆ เช่น กังหันน้ำในเขื่อน เป็นต้น

### 2.2.1.2 ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โรเตอร์จะหมุนที่ความเร็วซิงโครนัส ซึ่งจะเป็นความเร็วเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุนที่ขดลวดอาร์มาเจอร์สร้างขึ้น สนามแม่เหล็กหมุนจากโรเตอร์และสนามแม่เหล็กหมุนจากกระแสในขดลวดอาร์มาเจอร์จะหมุนด้วยความเร็วเดียวกับความเร็วซิงโครนัสและมีมุมเฟสที่ต่างกัน โดยขนาดมุมเฟสที่ต่างกันจะขึ้นอยู่กับภาระทางไฟฟ้า สามารถคำนวณความเร็วและความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสได้ดังนี้

$$\text{ความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่หมุนไป 1 รอบ} = \frac{P}{2} \text{ วัฏจักร (Cycle)}$$

$$\text{ใน 1 วินาที เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะหมุน} = \frac{n_s}{60} \text{ รอบ}$$

$$\text{จะได้ความถี่ของสัญญาณ} \quad f_e = \left(\frac{P}{2}\right)\left(\frac{n_s}{60}\right) \quad (2.1)$$

$$f_e = \frac{P n_s}{120} \quad (2.2)$$

$$n_s = \frac{120 f_e}{P} \quad (2.3)$$

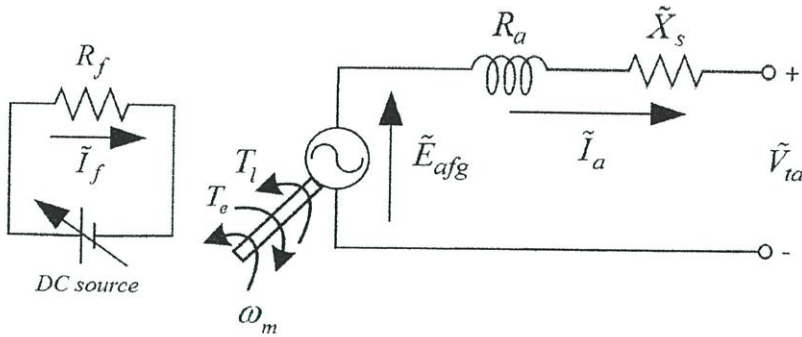
เมื่อ  $n_s$  คือ ความเร็วซิงโครนัสหน่วยเป็นรอบต่อนาที (rpm)

$f_e$  คือ ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้าหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz)

$P$  คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก

จะเห็นได้ว่า ถ้าต้องการให้ความเร็วซิงโครนัสต่ำๆ จะสามารถทำได้โดยการลดความถี่และเพิ่มจำนวนขั้วแม่เหล็กถ้าต้องการให้ความถี่ที่ต้องกำหนดให้ความเร็วซิงโครนัสคงที่ด้วย

2.2.1.3 วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Per-phase equivalent circuit of a synchronous generator)



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

- เมื่อ  $\tilde{E}_{afg}$  แทน แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขั้วขดลวดอาร์มาเจอร์ ( $V$ )  
 $\tilde{X}_s$  คือ ความต้านทานเสมือนซิงโครนัส (Synchronous Reactance) ( $\Omega$ )  
 $R_a$  คือ ความต้านทานของขดลวดอาร์มาเจอร์ ( $\Omega$ )  
 $R_f$  คือ ความต้านทานของขดลวดสนาม ( $\Omega$ )  
 $\tilde{V}_{ta}$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขดลวดอาร์มาเจอร์ ( $V$ )  
 $\tilde{I}_a$  คือ กระแสที่ไหลในขดลวดอาร์มาเจอร์ ( $A$ )  
 $\tilde{I}_f$  คือ กระแสที่ไหลในขดลวดสนาม ( $A$ )

จากรูปที่ 2.1 จะได้สมการวงจรสมมูลต่อเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ดังสมการที่ 2.4 และกำหนดให้  $X_s = \omega_e L_s$

$$\tilde{V}_{ta} = \tilde{E}_{afg} - j\tilde{X}_s\tilde{I}_a - R_a\tilde{I}_a \quad (2.4)$$

ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขั้วขดลวดอาร์มาเจอร์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

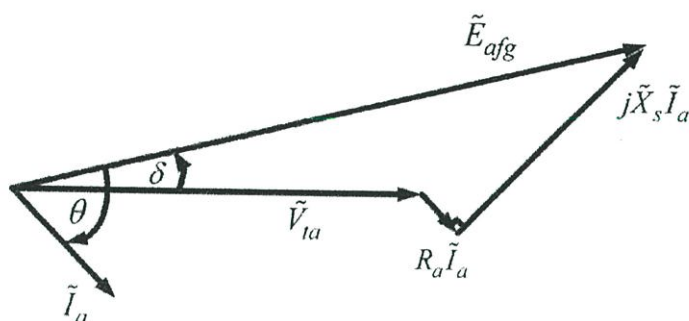
$$E_{afg} = K\phi\omega_m \quad (2.5)$$

- เมื่อ  $K$  คือ ค่าคงที่

$\omega_m$  คือ ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์ ( $rad / s$ )

$\phi$  คือ เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดสนาม ( $Wb / m^2$ )

จะเห็นได้ว่า ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $E_{afg}$  จะแปรผันตรงกับความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์  $\omega_m$  และเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดสนาม  $\phi$  ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสกระตุ้น  $I_f$  ส่งผลให้การปรับขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $E_{afg}$  ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์มาเจอร์  $V_{ta}$  มีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังสมการที่ 2.4

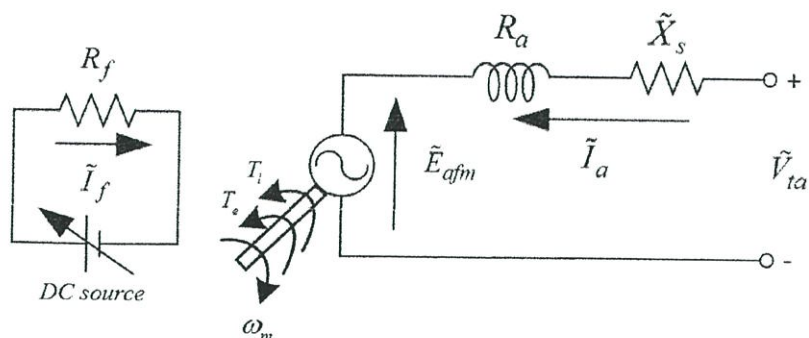


รูปที่ 2.2 ไดอะแกรมเฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

จากรูปที่ 2.2 แสดงแผนภาพเฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $E_{afg}$  จะขึ้นอยู่กับกระแสกระตุ้น  $I_f$

### 2.2.2 มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous Motor)

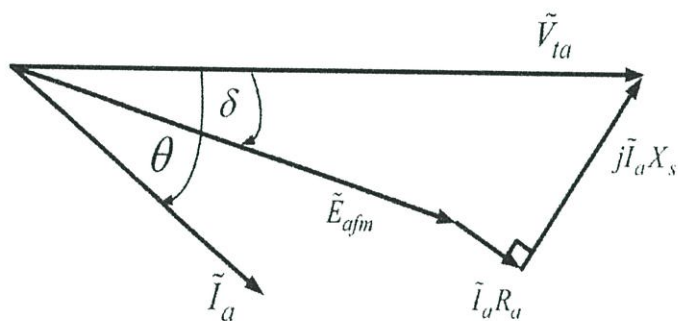
มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล โดยป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสามเฟสที่ขดลวดอาร์มาเจอร์เกิดกระแสไฟฟ้าสามเฟสที่ขดลวดอาร์มาเจอร์ไปสร้างสนามแม่เหล็กหมุนที่หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส ที่โรเตอร์จะมีขดลวดสนาม ซึ่งมีสนามแม่เหล็กจากไฟฟ้ากระแสตรง ทำให้สนามแม่เหล็กที่โรเตอร์หมุนเกาะกันไปกับสนามแม่เหล็กหมุนจากขดลวดอาร์มาเจอร์ ทำให้โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส หากมีภาระทางกลเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงบิดทางกลมากขึ้นไปด้วย ซึ่งแรงบิดทางกลต้องไม่สูงกว่าแรงบิดสูงสุดของแรงบิดแม่เหล็กที่มอเตอร์สร้างได้ ถ้าแรงบิดทางกลสูงเกินจะทำให้เกิดการหลุดจากการยึดเกาะของสนามแม่เหล็ก (Loss of synchronise) การเดินเริ่มเครื่องมอเตอร์ซิงโครนัสนั้นจะต้องมีต้นกำลังช่วยในการเริ่มหมุนเพื่อเอาชนะความเฉื่อยของโรเตอร์ ทำให้สนามแม่เหล็กยึดเกาะกันได้ แรงบิดแม่เหล็กจะมีทิศทางเดียวกับการหมุนของโรเตอร์



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ซิวอาร์มาเจอร์ และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยจะเป็นไปตามกฎแรงดันของเคอร์ซอพท์

$$\tilde{V}_{ta} = \tilde{E}_{afm} + j\tilde{I}_a X_s + \tilde{I}_a R_a \quad (2.6)$$



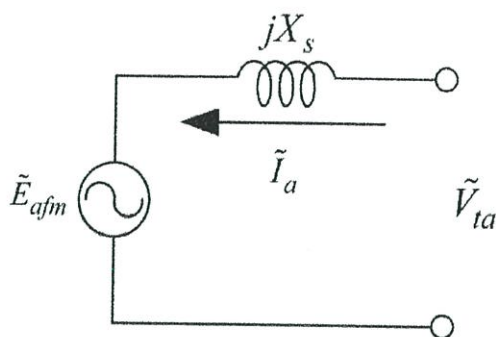
รูปที่ 2.4 แผนภาพเฟสเซอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัส

รูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพเฟสเซอร์ของมอเตอร์ซิงโครนัส โดยขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $E_{afm}$  จะขึ้นอยู่กับกระแสกระตุ้น  $I_f$

#### 2.2.2.1 เครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสคอนเดนเซอร์ (Synchronous Condenser)

เครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสคอนเดนเซอร์เป็นมอเตอร์ซิงโครนัสที่สามารถควบคุมกระแสอาร์มาเจอร์ให้นำหน้าแรงดันไฟฟ้าอาร์มาเจอร์ได้ โดยทำการป้อนกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็กให้

มากเกินไป (Over Excited) ส่งผลให้มอเตอร์กลายเป็นภาระฟ้าชนิดตัวเก็บประจุสามารถชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนได้



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลต่อเฟสของมอเตอร์ซิงโครนัสแบบไม่คิดความต้านทานที่ขดลวดอาร์มาเจอร์

กำหนดให้มอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสต่ออยู่กับบัสอนันต์  $V_{ta}$  โดยไม่คิดค่าความต้านทานที่ขดลวดอาร์มาเจอร์  $R_a$  ดังรูปที่ 2.5

$$P_{input} = 3V_{ta}I_a \cos \phi \quad (2.7)$$

$$P_{transfer} = 3 \frac{V_{ta}E_{afm}}{X_{sm}} \sin \delta \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\phi$  คือ มุมระหว่างกระแสที่ขดลวดอาร์มาเจอร์  $\tilde{I}_a$  กับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์มาเจอร์  $\tilde{V}_{ta}$   
 $\delta$  คือ มุมระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $\tilde{E}_{afm}$  กับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์มาเจอร์  $\tilde{V}_{ta}$   
 เรียกว่ามุมกำลัง (Power Angle)

ถ้าภาระทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสมีค่าคงที่ จะได้ว่า  $P_{input}$  และ  $P_{transfer}$  มีค่าคงที่ เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขดลวดอาร์มาเจอร์  $V_{ta}$  มีค่าคงที่ด้วย จะได้ว่า

จากสมการที่ 2.7	ค่า $I_a \cos \phi$	มีค่าคงที่
จากสมการที่ 2.8	ค่า $E_{afm} \sin \delta$	มีค่าคงที่

จะได้ว่าขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $E_{afm}$  จะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสกระตุ้น  $I_f$  และเมื่อ  $E_{afm}$  มีขนาดต่างๆขึ้นจะส่งผลกระทบต่อมุมกำลัง  $\delta$  เนื่องจากสมการที่ 2.8 จะทำให้แนวของกระแสอาร์มาเจอร์  $I_a$  เปลี่ยนไปด้วย ดังสมการที่ 2.6 ส่งผลให้ค่าตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าซิงโครนัสเปลี่ยนไปด้วย

## 2.3 การขนานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า (Parallel Operation of a Synchronous Generator with Grid System)

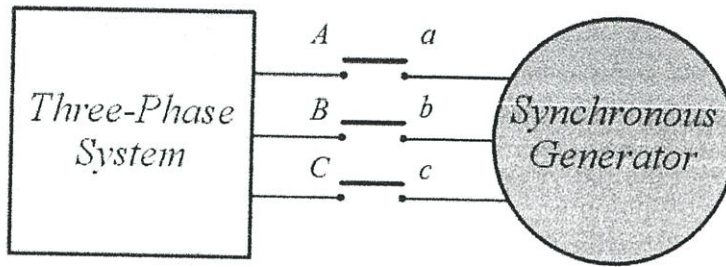
ระบบไฟฟ้ากำลังจะไม่นิยมใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ (มากกว่าหรือเท่ากับความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงสุดของภาระไฟฟ้า) เพียงตัวเดียวในการผลิตพลังงานไฟฟ้าแต่ในระบบไฟฟ้ากำลังไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ต่อขนานกันอยู่เป็นจำนวนมาก โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหล่านี้จะเชื่อมต่ออยู่กับภาระไฟฟ้าขนาดใหญ่ซึ่งกระจายอยู่ ณ ที่ต่างๆ เหตุผลที่ต้องให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสต่อขนานกันหลายตัว คือ

- 1.) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสหลายๆตัว สามารถเพิ่มเสถียรภาพในระบบกำลังไฟฟ้าได้ เนื่องจากภาระไฟฟ้าที่ใช้ในชีวิตประจำวันมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาไม่สามารถคาดเดาได้ ถ้ามีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสตัวใดตัวหนึ่งเกิดเสียหายขึ้น จะไม่ส่งผลกระทบต่อระบบกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับภาระไฟฟ้า
- 2.) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสหลายๆตัว ที่ทำงานขนานกันอยู่สามารถหยุดซ่อมหรือปรับปรุงเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสตัวใดตัวหนึ่งได้ โดยยังให้เครื่องจักรอื่นๆยังผลิตพลังงานไฟฟ้าจ่ายให้กับภาระไฟฟ้าต่อไปได้
- 3.) ถ้ามีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสตัวเดียว จะไม่สามารถทำงานใกล้ภาระโหลดเต็มพิกัดได้ (Full Load) ทำให้ไม่สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ แต่ถ้ามีเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสหลายๆตัวจะสามารถทำงานที่ภาระไฟฟ้าเต็มพิกัดได้ ทำให้สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

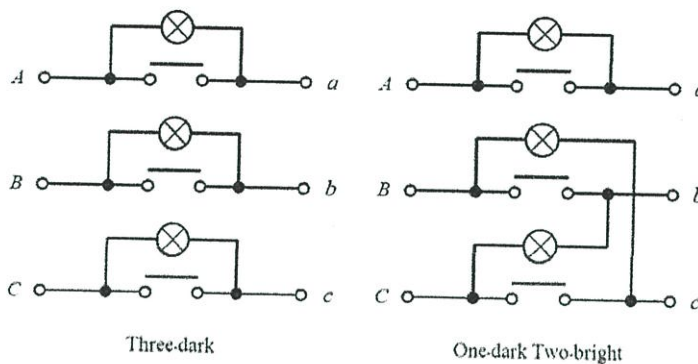
### 2.3.1 เงื่อนไขการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า

พื้นฐานการต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้าจะมีเงื่อนไขอยู่ 4 ข้อ ดังนี้

- 1.) ลำดับเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าจะต้องตรงกัน
- 2.) มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าจะต้องเท่ากัน
- 3.) ความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าจะต้องเท่ากัน
- 4.) แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าจะต้องเท่ากัน



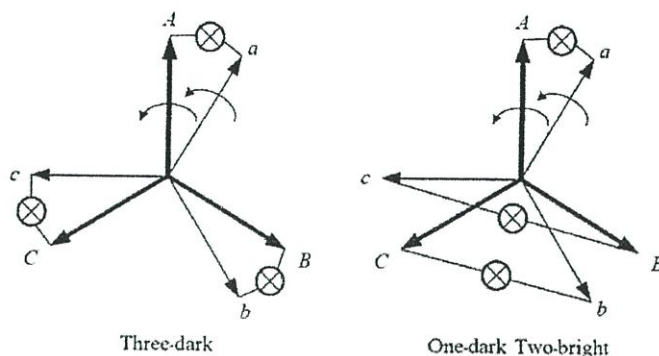
รูปที่ 2.6 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า



รูปที่ 2.7 การตรวจสอบเงื่อนไขลำดับเฟสโดยใช้หลอดไฟสามดวง

ในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสามเฟสกับระบบไฟฟ้า ขั้นแรกจะต้องตรวจสอบลำดับเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสตรงกับระบบไฟฟ้าหรือไม่ ซึ่งลำดับเฟสมีโอกาสที่จะตรงกันข้ามได้ ในการตรวจสอบนั้นมีอยู่สองกรณี โดยกรณีแรกจะใช้หลอดไฟสามดวงต่อกับเฟสของระบบไฟฟ้าแต่ละเฟส ซึ่งจะต่อขนานกับสวิตช์สามเฟส ในกรณีนี้เป็นการต่อหลอดไฟแบบหลอดไฟดับสนิทสามดวง (Three dark method) ดังรูปที่ 2.7 ถ้าลำดับเฟสตรงกันแรงดันไฟฟ้าเท่ากันแต่ความถี่ไม่เท่ากัน หลอดไฟทั้งสามดวงจะสว่างพร้อมกันและดับสนิทพร้อมกัน

กรณีที่สองจะเป็นการต่อหลอดไฟแบบดับสนิทหนึ่งดวง และสว่างสองดวง (One dark two bright) หลอดไฟหนึ่งหลอดจะต่ออยู่เฟสเดียวกัน ส่วนอีกสองหลอดที่เหลือจะต่อสลับเฟสกัน ดังรูปที่ 2.8b เฟส A ต่อ เฟส a ส่วนที่เหลือจะต่อสลับกันคือ เฟส B ต่อ เฟส c และ เฟส C ต่อ เฟส b โดยถ้าหลอดไฟทั้งสามดวงจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ไม่เป็นไปตามแบบที่ต่ออยู่แสดงว่าลำดับเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้าไม่ตรงกัน ซึ่งต้องแก้ไขโดยการสลับเฟสคู่ใดคู่หนึ่ง



รูปที่ 2.8 ลักษณะการสว่าง-ดับของหลอดไฟสามดวง

เมื่อตรงตามเงื่อนไขการต่อขนานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้าทั้งสามข้อแล้วพิจารณาได้จากการต่อหลอดไฟแบบดับสนิทสามดวง (Three dark Method) โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรือ ต่อแบบหลอดไฟดับสนิทหนึ่งดวงและสว่างสองดวง (One dark Two bright Method) โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 2.8 หมายความว่า จะสามารถต่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง

### 2.3.2 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าแบบปรับด้วยมือ

(Manual Parallel Operation of a Synchronous Generator with Grid System)

การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อช่วยในการทำงานร่วมกันนั้นต้องทำให้เงื่อนไขการขนานทั้ง 4 ข้อที่กล่าวมาข้างต้นเป็นจริง ซึ่งการปรับให้เงื่อนไขทั้ง 4 ข้อเป็นจริง มีวิธีดังนี้

- 1) ลำดับเฟสของแรงดันที่ขั้วอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ต้องตรงกับลำดับเฟสของระบบไฟฟ้า การเปลี่ยนลำดับเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำได้โดยสลับเฟสคู่ใดคู่หนึ่งของขั้วอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
- 2) มุมเฟสของแรงดันที่ขั้วอาร์มาเจอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องทับหรือเท่ากับมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าพอดี การปรับมุมเฟสนั้นจะทำได้โดยการปรับความถี่ของแรงดันที่ขั้วอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยจะใช้ความถี่ของระบบไฟฟ้ามาอ้างอิง
- 3) ในการปรับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์มาเจอร์  $f_e$  ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซิงโครนัสต้องทำการปรับความเร็วซิงโครนัสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยการปรับความเร็วของต้นกำลังของต้นกำลังที่ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส  $n_s$  โดยจะมีความสัมพันธ์สมการ (2-3) ในโครงงานนี้จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นต้นกำลัง

ทางกลโดยใช้ AC Drive ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยปรับความเร็วรอบได้

- 4) ระดับแรงดันที่ขั้วอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่ากับระดับแรงดันของระบบไฟฟ้า การปรับระดับแรงดันที่ขั้วอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถปรับได้จากการปรับกระแสสนามที่ขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการ 2.4 และ 2.5

ซึ่งการจะปรับทุกอย่างให้ตรงเงื่อนไขทั้ง 4 นั้นทำได้ลำบาก เนื่องจากต้องดูมาตรฐานหลายอย่างพร้อมๆกัน เช่น ระดับแรงดันไฟฟ้า ความถี่ของไฟฟ้าและเฟสของแรงดันไฟฟ้า

### 2.3.3 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าแบบกึ่งอัตโนมัติ (Semi-Automatic Parallel Operation of a Synchronous Generator with Grid System)

จากหัวข้อที่ 2.3.2 ต้องใช้ทักษะและความชำนาญในการปรับค่าต่างๆ เพื่อให้ตรงเงื่อนไขการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าทั้ง 4 ข้อที่กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งทำได้ยากและใช้เวลานาน ในโครงการนี้จึงใช้การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยจะทำการปรับค่าทุกอย่างให้ตรงเงื่อนไขการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระดับแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อเงื่อนไขทั้งหมดของการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกต้องทุกข้อ ก็สามารถเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าได้โดยผู้ทดลองจะเป็นคนกดสวิตช์เพื่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าเอง

## 2.4 บทสรุป

บทนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับความรู้และทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในโครงการนี้ เช่น ในส่วนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส การต่อขนานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าและการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าแบบกึ่งอัตโนมัติและกึ่งอัตโนมัติ ในบทต่อไปจะกล่าวถึงวิธีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

### บทที่ 3

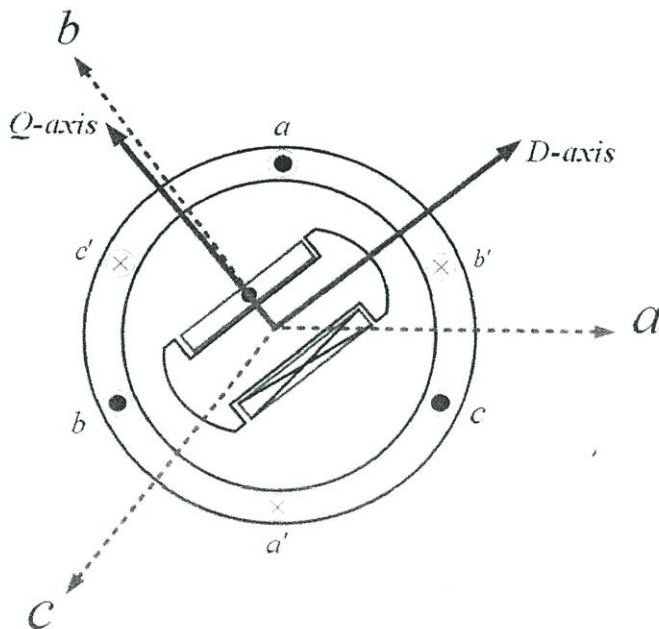
## การควบคุมความถี่ของต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์

### 3.1 บทนำ

เนื้อหาบทนี้นำเสนอทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมความเร็วของต้นกำลังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์ เพื่อการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์กับระบบไฟฟ้าซึ่งในโครงการเรื่องนี้จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นต้นกำลัง โดยเนื้อหาบทนี้ประกอบไปด้วย ทฤษฎีกรอบอ้างอิง เฟสล็อก ลูป ออปแอมป์

### 3.2 ทฤษฎีกรอบอ้างอิง

พิจารณาเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโรตอร์แบบขั้วยื่น (Salient pole rotor) ดังรูปที่ 3.1 ด้านที่มีช่องว่างอากาศน้อยหรือด้านมีขั้วยื่นออกมาจะกำหนดให้เป็นแกนตรง (Direct-axis, d-axis) หรือแกนจริง และด้านที่มีช่องว่างอากาศมากจะกำหนดให้เป็นแกนตั้งฉาก (Quadrature-axis, q-axis) หรือแกนจินตภาพ โดยแนวแกนจะทำมุมกันต่างกันอยู่  $90^\circ$



รูปที่ 3.1 โรเตอร์แบบขั้วยื่น (Salient pole) ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโรตอร์

ควบคุมตัวแปรของเครื่องจักรกลไฟฟ้าสามเฟส เป็นเรื่องยากและเป็นไปไม่ได้เนื่องจากการคัปปลิงกันระหว่างตัวแปรระหว่างเฟสในสเตเตอร์ ระหว่างเฟสของโรเตอร์และระหว่างเฟสสเตเตอร์กับ โรเตอร์ ซึ่งจะส่งผลให้การควบคุมตัวแปรหนึ่งจะส่งผลกับตัวแปรอื่นๆ เหตุนี้เพื่อความสะดวกรวดเร็วและง่ายในการวิเคราะห์ตัวแปรของเครื่องจักรกลไฟฟ้าสามเฟส จำเป็นต้องอาศัยทฤษฎีกรอบอ้างอิงเพื่อใช้ในการลดรูปตัวแปรลงและทำการแปลง (Transformation) ตัวแปรที่มีลักษณะเป็นสัญญาณไซน์นูซอยด์ (Sinusoid Signal) สามเฟสให้อยู่ในรูปของตัวแปรที่มีลักษณะเป็นสัญญาณกระแสตรง และถ้าต้องการแปลงสัญญาณกระแสตรงกลับไปสู่สัญญาณไซน์นูซอยด์สามเฟสจะต้องใช้วิธีการแปลงกลับ (Inverse Transformation)

วิธีการแปลง (Transformation) พารามิเตอร์จากสัญญาณไซน์นูซอยด์สามเฟสให้อยู่ในรูปของสัญญาณกระแสตรง จะแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน

- การแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง
- การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงใดๆ หรือกรอบอ้างอิงซิงโครนัส

### 3.2.1 การแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

วิธีการแปลงแบบนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การแปลงของคลาร์ก (Clarke's Transform) เป็นการแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่งสองเฟสเทียบกับกรอบอ้างอิงสามเฟส การแปลงต้องอาศัยสมการที่ (3.1)

$$\begin{bmatrix} f_{sd}^s \\ f_{sq}^s \\ f_{s0}^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

โดยที่  $f$  แทนตัวแปรใดๆในกรอบอ้างอิง

วิธีนี้จะช่วยลดรูปของตัวแปรให้น้อยลง เมื่อถูกแปลงไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่งแล้ว สัญญาณที่ได้จะมีค่าแอมพลิจูดและความถี่เท่ากัน ตัวแปรในแนวแกน d และแนวแกน q จะทำมุมกันเป็น  $90^\circ$

### 3.2.2 การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงใดๆหรือกรอบอ้างอิงซิงโครนัส

วิธีการนี้จะเป็นการแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงหมุนที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$  หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การแปลงของปาร์ค (Park's transform) ซึ่งใช้สมการที่ (3.2) ในการแปลง

$$\begin{bmatrix} f_{sd} \\ f_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sd}^s \\ f_{sq}^s \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

โดยที่  $\theta$  แทนมุมระหว่างกรอบอ้างอิงหมุนกับกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

เมื่อแปลงมาอยู่ในกรอบอ้างอิงใดๆแล้ว ถ้าความเร็วเชิงมุมของกรอบอ้างอิงใดๆมีค่าเท่ากับความเร็วเชิงมุมของตัวแปรในกรอบอ้างอิงนั้นมิต่างที่ ถ้ามุมระหว่างกรอบอ้างอิงใดๆและมุมระหว่างตัวแปรเป็นศูนย์แล้ว จะได้ตัวแปรในกรอบอ้างอิงใดๆเป็นเส้นตรง

วิธีการแปลงกลับ (Inverse Transformation) พารามิเตอร์จากสัญญาณกระแสตรงให้อยู่ในรูปของสัญญาณไซน์คอสายอดสามเฟส จะแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน

- การแปลงจากกรอบอ้างอิงใดๆหรือกรอบอ้างอิงซิงโครนัสไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง
- การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงสามเฟส

### 3.2.3 การแปลงจากกรอบอ้างอิงใดๆหรือกรอบอ้างอิงซิงโครนัสไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

วิธีการนี้จะใช้สมการที่ (3.3) ในการแปลงจากกรอบอ้างอิงใดๆหรือกรอบอ้างอิงซิงโครนัสไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

$$\begin{bmatrix} f_{sd}^s \\ f_{sq}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & -\cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sd} \\ f_{sq} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

### 3.2.4 การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงสามเฟส

วิธีการนี้จะใช้สมการที่ (3.4) ในการแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงสามเฟส

$$\begin{bmatrix} f_{sa} \\ f_{sb} \\ f_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{sd}^s \\ f_{sq}^s \\ f_{s0}^s \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

### 3.2.5 สมการการแปลงกำลังไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงใดๆ

การกำลังไฟฟ้าจริงขณะใดๆในระบบไฟฟ้าสามเฟสสามารถได้จากสมการที่ (3.5) และกำลังไฟฟ้าเสมือนขณะใดๆในระบบสามเฟสสามารถหาได้จากสมการที่ (3.6)

$$P_{abc} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (3.5)$$

$$Q_{abc} = \frac{1}{\sqrt{3}} (v_{bc} i_a + v_{ca} i_b + v_{ab} i_c) \quad (3.6)$$

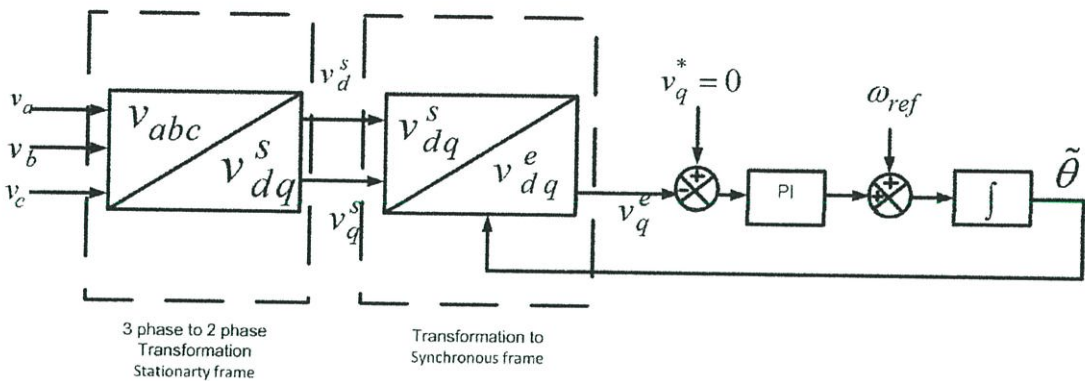
เมื่อทำการแปลงองค์ประกอบของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าทั้งหมดเข้าสู่กรอบอ้างอิงใดๆแล้วจะสามารถหาค่ากำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าเสมือนขณะใดๆได้จากสมการที่ (3.7) และ (3.8)

$$P_{dq} = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q + v_0 i_0) \quad (3.7)$$

$$Q_{abc} = \frac{1}{\sqrt{3}} (v_{bc} i_a + v_{ca} i_b + v_{ab} i_c) \quad (3.8)$$

### 3.3. เฟสล็อกกลุ๊ป

เนื่องจากโครงงานนี้ต้องการความถี่ของระบบไฟฟ้ามาเป็นความเร็วอ้างอิงเพื่อให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า จึงได้วัดค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า แล้วใช้ทฤษฎีเฟสล็อกกลุ๊ปเพื่อใช้ในการประมาณค่าความถี่ของระบบไฟฟ้าและนำมาใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



รูปที่ 3.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมเฟสล็อกกลุ๊ป

#### หลักการทํางานของเฟสล็อกกลุ๊ป

หลักการพื้นฐานของระบบเฟสล็อกกลุ๊ป คือ ระบบที่มีการป้องกันโดยใช้การควบคุมแบบฟีดแบ็กในการควบคุมและติดตามมุมเฟส ข้อมูลขาเข้า คือ แรงดันไฟฟ้าสามเฟสของระบบไฟฟ้าในขณะที่ข้อมูลขาออกคือมุมเฟส โดยเริ่มต้นจากแปลงแรงดันทั้งสามเฟสที่วัดจากแหล่งจ่าย  $v_a, v_b, v_c$  ให้อยู่ในรูปแบบแรงดันกระแสตรงบนแกน d-q ที่หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส ( $v_d, v_q$ ) โดยเฟสล็อกกลุ๊ปจะเป็นการควบคุมแบบปิด (Closed-loop) ผ่านค่า  $v_q$  โดยกำหนดให้  $v_q$  มีค่าเป็นศูนย์ เมื่อกำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดันชนิดสามเฟสเป็นแบบสมดุลจึงสามารถหาได้จากการแปลงดังต่อไปนี้

$$v_a = v_m \cos \theta \quad (3.9)$$

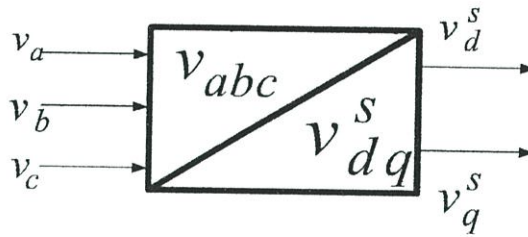
$$v_b = v_m \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.10)$$

$$v_c = v_m \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.11)$$

โดยที่  $\theta$  คือฟังก์ชันเป็นเชิงเส้นกับเวลา ( $\theta = \omega t$ )

### การแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

ในขั้นตอนนี้เป็นการแปลงแรงดันไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงสามเฟสไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่งสองเฟสเทียบกับกรอบอ้างอิงสามเฟส ซึ่งผลของการแปลงแกนจะส่งผลให้เกิดการลดรูปของแรงดันไฟฟ้าจากสัญญาณสามเฟส ( $v_a, v_b, v_c$ ) เป็นสัญญาณสองเฟส ( $v_d^s, v_q^s$ ) ในการแปลงนั้นจะต้องอาศัยสมการการแปลงดังแสดงสมการที่ 3.12 และ 3.13



3 phase to 2 phase  
Transformation  
Stationary frame

รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรม ส่วนแปลงแกนจากกรอบอ้างอิงสามเฟสสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

d-axis 
$$v_d^s = \frac{2}{3}v_a - \frac{1}{3}v_b - \frac{1}{3}v_c \quad (3.12)$$

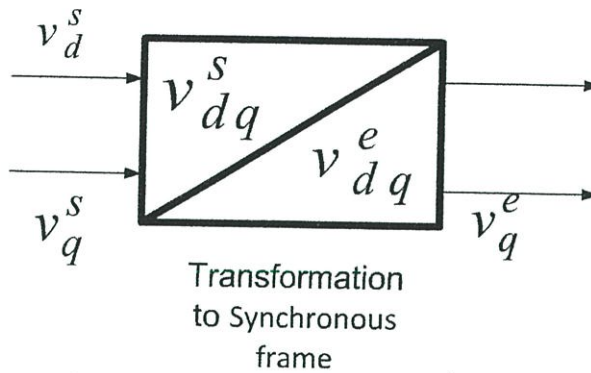
q-axis 
$$v_q^s = \frac{1}{\sqrt{3}}v_b - \frac{1}{\sqrt{3}}v_c \quad (3.13)$$

เนื่องจากสมการที่ 3.12 และ 3.13 เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าเฟสจึงจำเป็นต้องแปลงเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าไลน์ ดังสมการที่ 3.14 และ 3.15

d-axis 
$$v_d^s = \frac{2}{3}v_{ab} + \frac{1}{3}v_{bc} \quad (3.14)$$

q-axis 
$$v_q^s = \frac{1}{\sqrt{3}} v_{bc} \quad (3.15)$$

การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงใดๆ หรือกรอบอ้างอิงซิงโครนัส



รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรม ส่วนแปลงแกนจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งกรอบอ้างอิงใดๆ หรือกรอบอ้างอิงซิงโครนัส

ในขั้นตอนนี้แปลงจากสัญญาณในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส(Synchronous frame)  $dq$  โดยใช้มุมเอาต์พุตเฟสล็อกกลูป  $\tilde{\theta}$  จะแสดงดังสมการที่ 3.16 และ 3.17

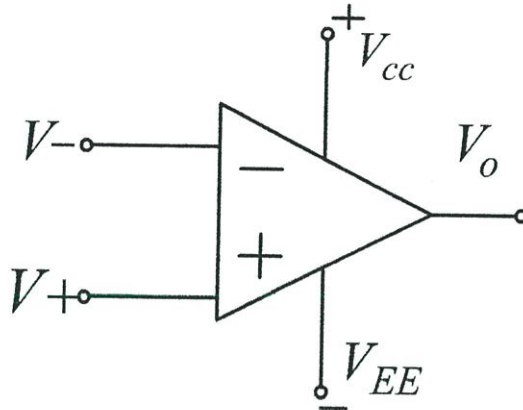
d-axis 
$$v_d^e = v_d^s \cos(\tilde{\theta}) + v_q^s \sin(\tilde{\theta}) \quad (3.16)$$

q-axis 
$$v_q^e = -v_d^s \sin(\tilde{\theta}) + v_q^s \cos(\tilde{\theta}) \quad (3.17)$$

นำแกน  $V_q$  ไปเข้า PI controller จะได้ค่าอัตราเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า ( $\omega$ ) แล้วนำมา อินทิเกรต จะได้มุม ( $\tilde{\theta}$ ) นำมุมที่ได้ไปสร้างเวกเตอร์หนึ่งหน่วย  $\cos(\tilde{\theta})$  และ  $\sin(\tilde{\theta})$  เวกเตอร์หนึ่ง หน่วยจะถูกป้อนกลับไปยังกรอบอ้างอิง ทำการประมาณความถี่ของระบบไฟฟ้าจากมุมที่เปลี่ยนไป

### 3.4 ออปแอมป์

สัญลักษณ์ ของออปแอมป์ เป็นรูปสามเหลี่ยมมี 2 อินพุต คือ อินพุตลบ ( inverting input  $V_-$  ) และ อินพุตบวก (non-inverting input ,  $V_+$  ) มี 1 เอาต์พุต คือ  $V_o$  โดย  $V_{CC}$  คือ แรงดันไบแอสบวกและ  $V_{EE}$  คือ แรงดันไบแอสลบ



รูปที่ 3.5 สัญลักษณ์ของออปแอมป์

สำหรับแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่จ่ายไบแอสให้กับตัวไอซี ออปแอมป์ ปกติจะใช้ไบแอสแบบคู่คือ  $V_{CC}$  และ  $V_{EE}$  ค่าแรงดันบวกและลบปกติไม่เกิน 15 V และต้องไบแอสทั้งสองขั้วด้วยแรงดันเท่ากันเสมอ

ความสัมพันธ์ของสัญญาณเข้าและสัญญาณออกแสดงดังนี้

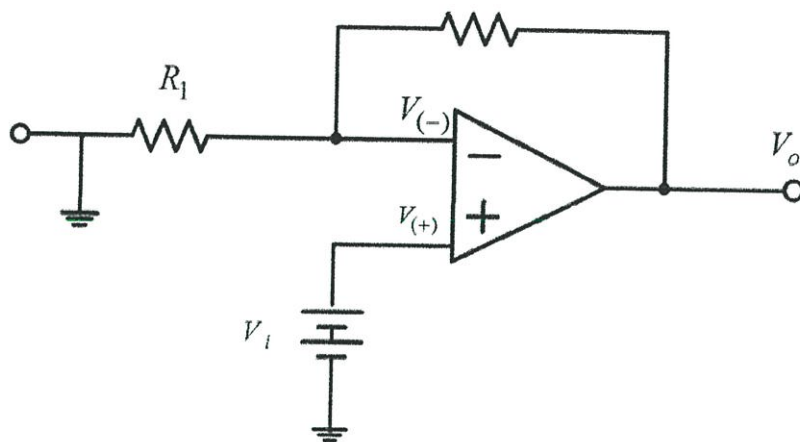
$$V_o = A(V_{(+)} - V_{(-)}) \quad (3.19)$$

โดยที่ A เท่ากับ อัตราการขยาย

สำหรับในโครงการนี้ จะใช้วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส(inverting Amplifier) เนื่องจากต้องการแรงดันขาออกมีค่าเป็นบวก เพื่อนำไปควบคุมความถี่แรงอินเวอร์เตอร์

### 3.4.1. วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส คือ วงจรออปแอมป์ที่ออกแบบมาเพื่อ  $V_{(-)}$  มีค่าเป็นบวกหรือให้ค่าเอาต์พุตคงค่าเครื่องหมายเหมือนเดิมโดยสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้าจะเข้าที่ขาอินพุตบวก ( non-inverting input ,  $V_{(+)}$  )



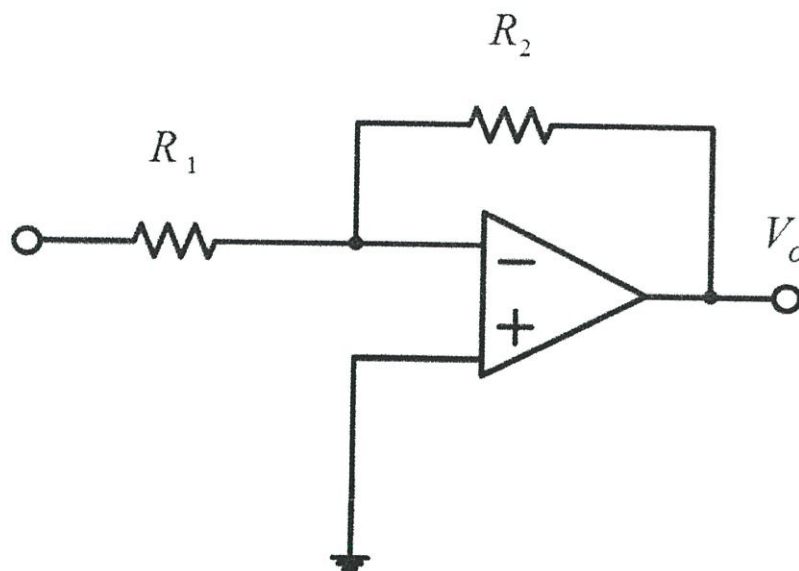
รูปที่ 3.6 แสดงวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส

โดยพิจารณาจากรูปจะถึงความสัมพันธ์ดังนี้

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)V_i \quad (3.20)$$

### 3.4.2 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (inverting Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส คือ วงจรออปแอมป์ที่กลับสัญญาณอินพุตให้มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกับของเดิม



รูปที่ 3.7 แสดงวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

พิจารณาจากรูปด้านบนเราจะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุต คือ

$$V_{(+)} = 0 = V_{(-)} \quad (3.21)$$

(ขั้วบวกของออปแอมป์ต่อลงกราวด์ แรงดันที่ขั้วมันจึงมีค่าเท่ากับศูนย์)

พิจารณาที่โหนด - จาก KCL;  $\frac{V_{(-)} - V_i}{R_1} + \frac{V_{(-)} - V_o}{R_f} = 0$

เมื่อแทนค่า  $V_{(-)} = 0$  ในสมการข้างต้น จะได้สมการความสัมพันธ์ คือ  $\frac{-V_i}{R_1} - \frac{V_o}{R_f} = 0$

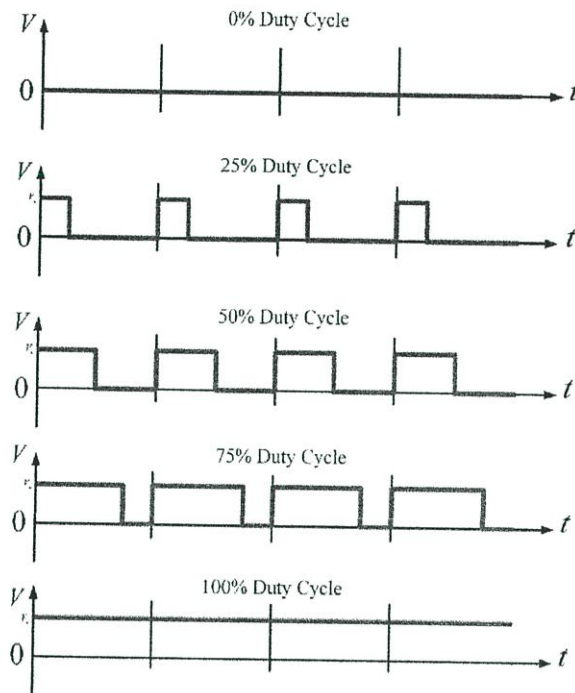
$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_i \quad (3.22)$$

ซึ่ง  $-\frac{R_2}{R_1}$  คือ ค่า voltage gain จะเห็นได้ว่าค่า voltage gain มีค่าติดลบซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงวงจรดังกล่าว

ทำหน้าที่กลับสัญญาณ

### 3.5. สัญญาณ Pulse width modulation (PWM)

สัญญาณ PWM เป็นสัญญาณที่นำมาใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อควบคุมการทำงานของ สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ โดยสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ได้จะนำไปควบคุมการเปิด - ปิดสวิตช์ของวงจร DC-DC converter ดังรูปที่ 3.8 โดยจะเป็นสัญญาณเปิด - ปิดสวิตช์ที่มีความถี่สูง สามารถปรับเวลาที่สวิตช์ นำกระแส ( $t_{on}$ ) และเวลาที่สวิตช์ไม่ทำกระแส ( $t_{off}$ ) ได้โดยปรับ Duty cycle เมื่อมีค่ามาก เวลาที่ สวิตช์นำกระแสจะมาก ถ้ามีค่าน้อยเวลาที่สวิตช์นำกระแสจะน้อย



รูปที่ 3.8 สัญญาณ Pulse width modulation (PWM)

ถ้านำสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงมาคือสัญญาณควบคุม ( $v_{control}$ ) มาเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยม ( $v_{tri}$ ) ดังรูปที่ 3.9 หากสัญญาณควบคุมมากกว่าสัญญาณสามเหลี่ยมจะเป็นลอจิกสูง (Logic High) และ หากสัญญาณควบคุมน้อยกว่าสัญญาณสามเหลี่ยมจะเป็นลอจิกต่ำ (Logic Low) โดยความถี่ 1 Hz หมายถึง Pulse 1 ลูก ในเวลา 1 วินาที ซึ่งจะสามารถปรับค่า Duty cycle ได้จากระดับสัญญาณควบคุม

### 3.6. บทสรุป

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆที่จะนำมาใช้ในการควบคุมความเร็วของต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโครงการวิจัย ทั้งในเรื่องของทฤษฎีและหลักการพื้นฐานทฤษฎีกรอบอ้างอิง ทฤษฎีเฟสล็อกกลุ๊ป, หลักการทำงานของออปแอมป์,และการสร้างสัญญาณ PWM ซึ่งจะนำไปใช้ใน เรื่องของการออกแบบในการสร้างสัญญาณอ้างอิงเพื่อนำไปควบคุมความเร็วของ AC Drives ซึ่งจะมีรายละเอียดดังในบทต่อไป

## บทที่ 4

### การจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดลอง

#### 4.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำเสนอขั้นตอนและวิธีการทดลอง การควบคุมอัตราเร็วของต้นกำลัง สำหรับการเชื่อมต่อโครงข่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยทำการสร้างสัญญาณอ้างอิงเพื่อไปควบคุมเอซีไดรฟ์เพื่อไปควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และใช้ข้อของขดลวดอาามาเจอร์ที่สเตเตอร์ต่อกับระบบไฟฟ้าผ่านแมกเนติกคอนแทคเตอร์และมีโหลดไฟต่อขนานอยู่

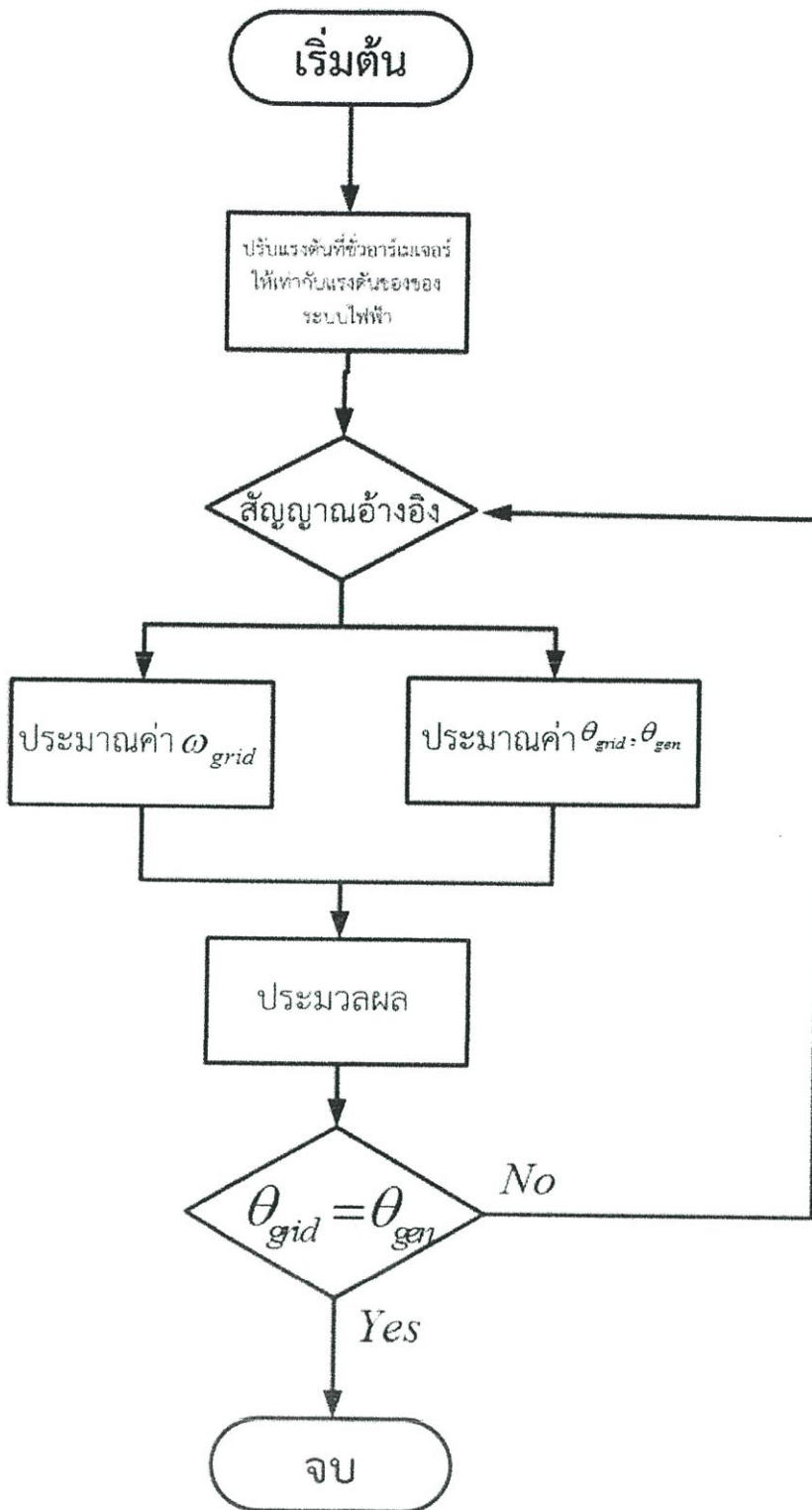
#### 4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. Multimeter : Fluke 115
2. Digital Oscilloscope : RIGOL DS1104Z 4 Channel 100MHz 2GSa/s
3. Digital Clamp Meter : KYORITSU KT203
4. Voltage Sensor : LEM LV25-P79344
5. Magnetic Contractor : SCHNEIDER ELECTRIC 1NO/1NC 24VAC
6. Commercial-AC Drive : ABB VSD ACS550-01-03A3-4 1.1kW

#### 4.3 วิธีการทดลอง

เริ่มต้นเครื่องมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำผ่านอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ซึ่งเป็นต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส จากนั้นปรับแรงดันไฟฟ้าเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เท่ากับแรงดันไฟฟ้าระบบไฟฟ้าซึ่งในปริภูมียนิพจน์เล่มนี้จะไม่พูดถึงในเกี่ยวกับหัวข้อนี้ ซึ่งควบคุมต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะควบคุมโดยการสร้างสัญญาณอ้างอิงเพื่อไปควบคุมเอซีไดรฟ์ เริ่มจากทำการแปลงแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ของระบบไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง จากนั้นนำค่าทั้งสองเข้ากระบวนการเฟสล็อกกลุ๊ป เพื่อประมาณอัตราเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า โดยอัตราเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้านั้นยังไม่สามารถนำไปใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงได้ เนื่องจากค่ามุมเฟสของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ยังไม่เท่ากับระบบไฟฟ้า ดังนั้นเราจึงต้องประมาณค่ามุมของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้า เพื่อไปผ่านการควบคุมแบบพีไอ โดยให้มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าเป็นสัญญาณอ้างอิงและมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นสัญญาณขาเข้า ซึ่งผลที่ได้จากการควบคุมแบบพีไอ คืออัตราเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าชดเชยออกมา จากนั้นก็นำไป

บวกกับอัตราเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า ก็จะได้สัญญาณอ้างอิงออกมา แล้วนำสัญญาณอ้างอิงไปกรองให้สัญญาณที่มีความถี่สูงออกไปแล้วจะได้สัญญาณที่เรียบ จึงนำสัญญาณป้อนเข้าสู่เอซีไดร์ฟ เพื่อขับเครื่องมอเตอร์เหนี่ยวนำ แล้วจึงสามารถทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า ซึ่งขั้นตอนการทดลองแสดงในแผนผังตั้งรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กระบวนการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโคโรนัสกับระบบไฟฟ้า

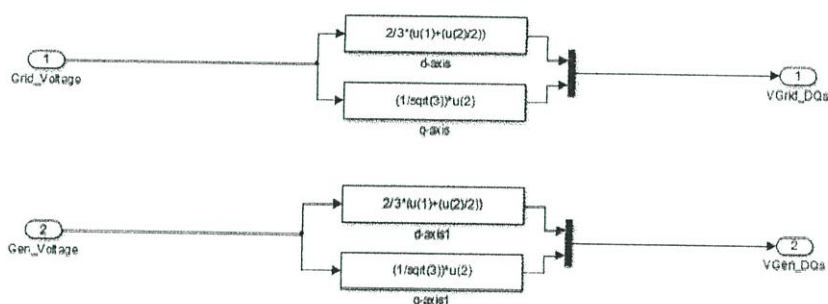


#### 4.4 การจำลองทางคอมพิวเตอร์

การจำลองทางคอมพิวเตอร์ของวงจรขอปเปอร์จะทำการจำลองระบบควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วตลวดอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสให้มีขนาดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของระบบการไฟฟ้าเพื่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบการไฟฟ้า ซึ่งโครงการวิจัยนี้จะทำการจำลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับบล็อกไดอะแกรมการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบการไฟฟ้าจะแสดงดังรูปที่ 4.2

##### 4.4.1 ในการควบคุมความเร็วนั้นจะต้องแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟสให้เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง (Stationary frame)

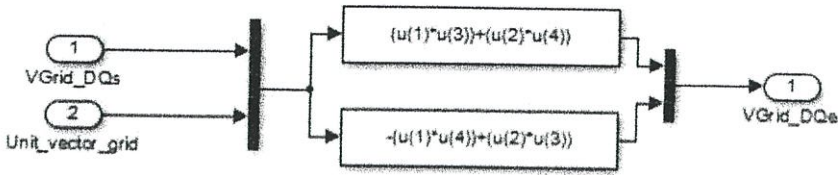
ขั้นตอนนี้ทำการแปลงทั้งแรงดันของระบบไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสส่งผลให้เกิดการลดรูปของตัวแปรนอกจากนี้สัญญาณที่ได้จะมีค่าแอมพลิจูดและความถี่เท่ากับแอมพลิจูดและความถี่สัญญาณแรงดันไฟฟ้าสามเฟส โดยใช้สมการที่ 3.12 และ 3.13 ดังบล็อกไดอะแกรมจะแสดงดังรูปที่ 4.3



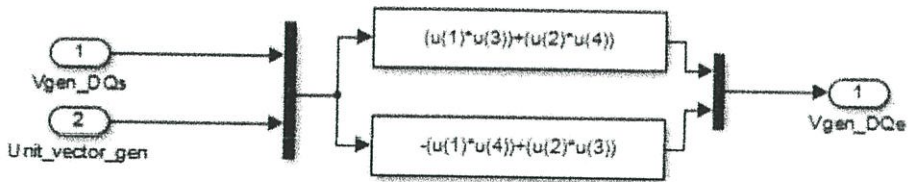
รูปที่ 4.3 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์การแปลงไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

##### 4.4.2 เมื่อได้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง (Stationary frame)

ทำการแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากรอบอ้างอิงหมุน (Synchronous frame) เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ง่าย โดยใช้สมการที่ 3.17 และ 3.18



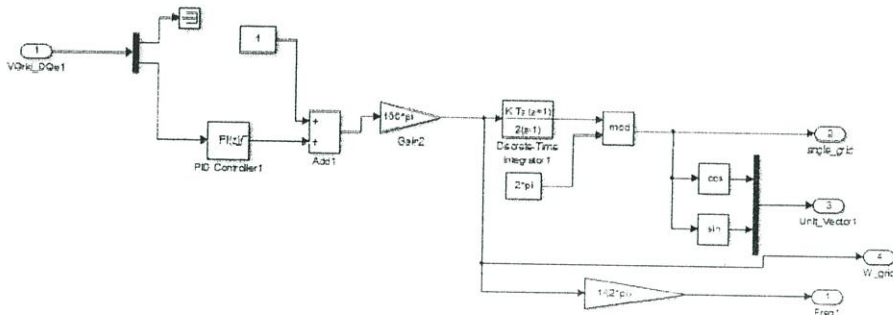
รูปที่ 4.4 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์การแปลงแรงดันของระบบไฟฟ้าไปสู่กรอบอ้างอิงหมุนเทียบกับระบบไฟฟ้า



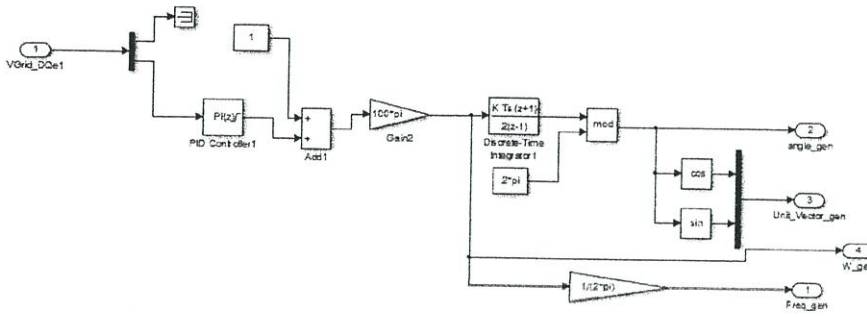
รูปที่ 4.5 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์การแปลงแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไปสู่กรอบอ้างอิงหมุนเทียบกับระบบไฟฟ้า

#### 4.4.3 วงจรเฟสล็อกกลูป (Phase Lock loop)

วงจรเฟสล็อกกลูปมีหน้าที่ในการประมาณค่าความถี่หรือมุมของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงเพื่อสร้างความเร็วอ้างอิงที่ใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังไดอะแกรมแสดงดังรูป 4.6 และ 4.7



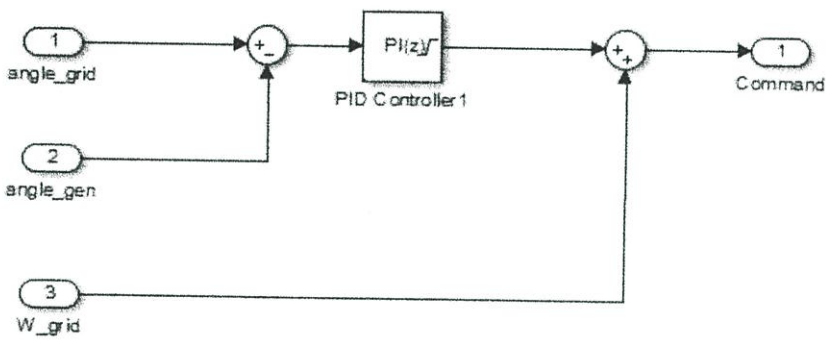
รูปที่ 4.6 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เฟสล็อกกลูปของระบบไฟฟ้า



รูปที่ 4.7 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เฟสล็อกกลุ่มของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

#### 4.4.4 ส่วนชดเชยความเร็วเชิงมุมไฟฟ้า

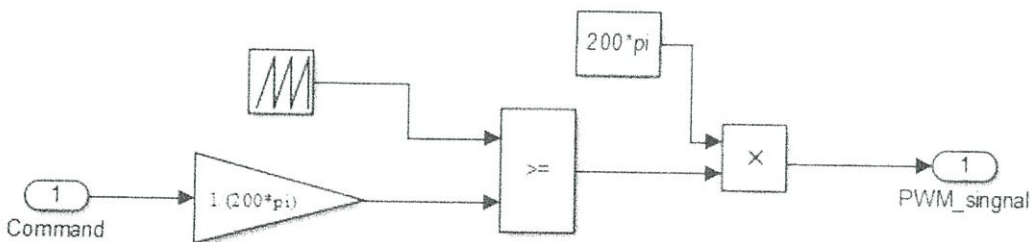
เนื่องจากค่าความเร็วเชิงมุมที่ได้จากระบบไฟฟ้ายังไม่ถูกต้องเราจึงจำเป็นต้องนำส่วนนำมุมของระบบไฟฟ้ากับมุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มาคำนวณความเร็วเชิงมุมไฟฟ้าชดเชย ดังรูปที่



รูปที่ 4.8 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ส่วนชดเชยความเร็วเชิงมุมไฟฟ้า

#### 4.4.5 ส่วนที่สร้างพีดับลิวเอ็ม

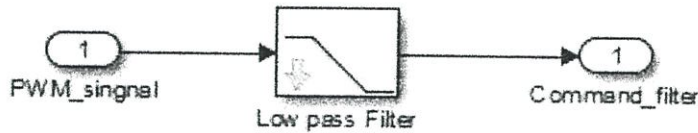
เนื่องจากใช้สร้างสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งสัญญาณที่ออกมาจึงใช้จากเป็นPWM เราจึงจำลองการสร้างPWM ออกมา



รูปที่ 4.9 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์การสร้างPWM

#### 4.4.6 ส่วนที่กรองสัญญาณ

เนื่องจากเราต้องการป้อนสัญญาณที่เรียบเราจึงจำลองส่วนกรองสัญญาณให้เรียบ

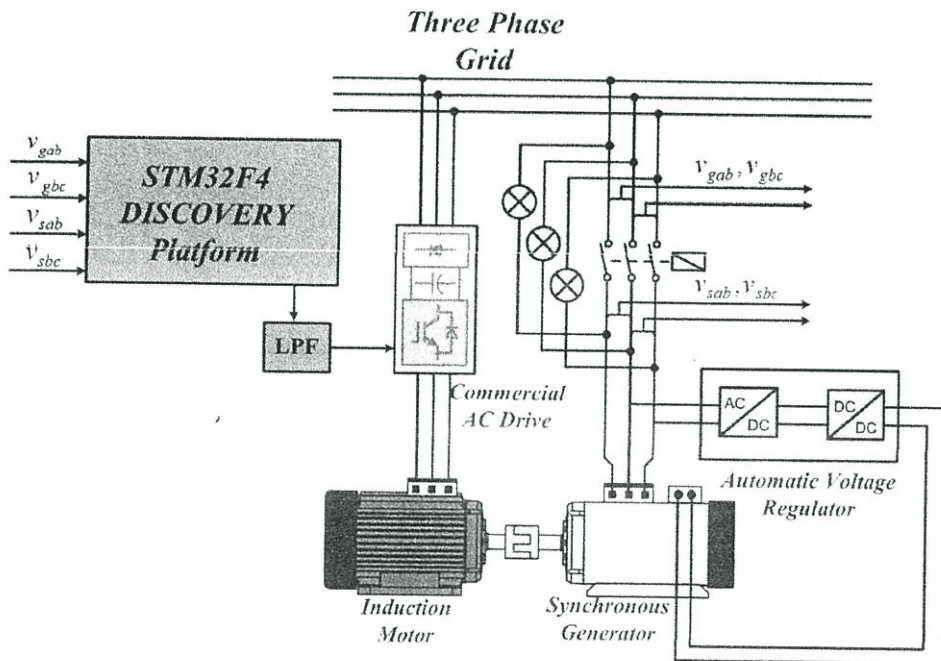


รูปที่ 4.10 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์การกรองสัญญาณ

#### 4.5 ระบบควบคุมความเร็วของต้นกำลังของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

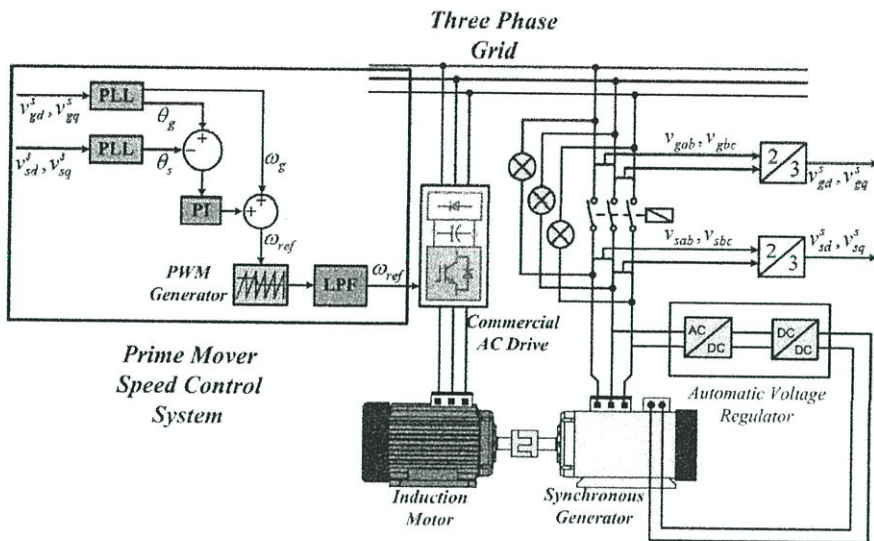
ระบบควบคุมความเร็วของต้นกำลังของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสในโครงการวิจัยนี้ประกอบไปด้วย มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกโดยมีเอซีไดร์ฟในการขับเคลื่อน เชื่อมต่อแกนเฟลาเข้ากับเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส โดยเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสนี้ โดยมีวงจรถอปเปอร์ ควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าขดลวดสนามเพื่อควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าสำหรับการขนานเข้ากับระบบการไฟฟ้า

จากเมื่อพิจารณาในส่วนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส ซึ่งในการควบคุมความเร็วของต้นกำลังเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสสำหรับโครงการวิจัยนี้โดยจะสร้างสัญญาณอ้างอิงโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 4.11 ไดอะแกรมการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส

โดยแตรมการควบคุมความเร็วของต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส จะอาศัยกระบวนการเฟสล็อกคูลูป ซึ่งจะทำกรรับค่าแรงดันไฟฟ้าไลน์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และค่าแรงดันไฟฟ้าไลน์ของระบบการไฟฟ้า แล้วจึงจะป้อนเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสร้างสัญญาณอ้างอิงเพื่อให้สามารถขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้าสู่ระบบการไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 โดยแตรมการควบคุมความเร็วของต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

#### 4.6 บทสรุป

เนื้อหาในบทนี้เป็นการใช้หลักการพื้นฐานจากบทที่ 2 และ 3 มาประยุกต์ใช้ในการจำลองการทำงานทางคอมพิวเตอร์ในสภาวะต่างๆ เพื่อออกกรสร้างสัญญาณอ้างอิงเพื่อไปควบคุมเอซีไดรฟ์ เพื่อทำการทดสอบระบบซึ่งผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองจะแสดงรายละเอียดในบทที่ 5

## บทที่ 5

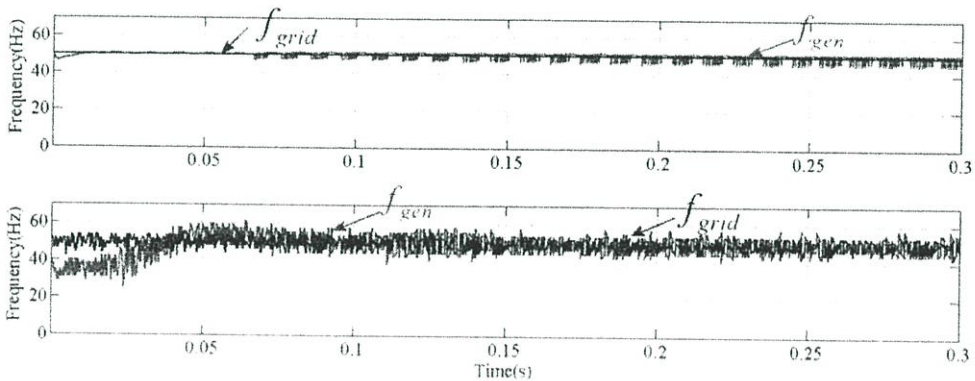
### ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลอง

#### 5.1 บทนำ

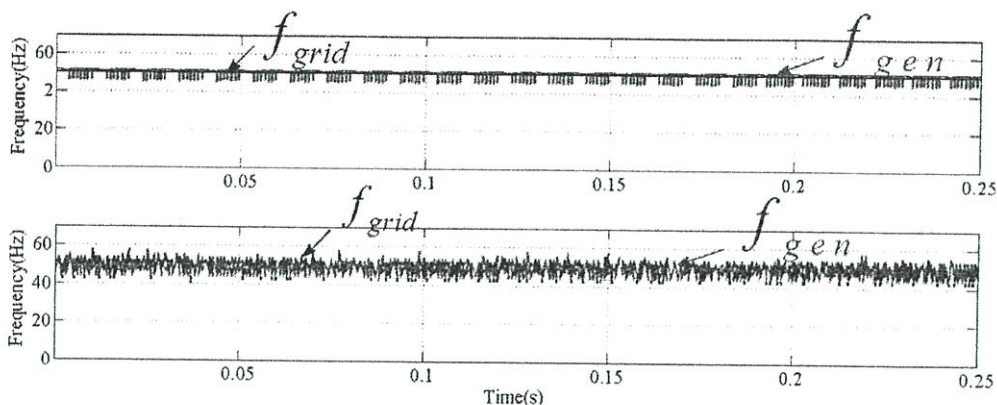
ในบทนี้จะนำเสนอผลจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลจากการทดลองการควบคุมความเร็วของต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เพื่อขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า โดยนำผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์มาเทียบกับผลการทดลองจริงซึ่งในที่นี่จะพูดถึงผลของความถี่ ของมุมของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ดังนี้

#### 5.2 ผลการทดลองความถี่

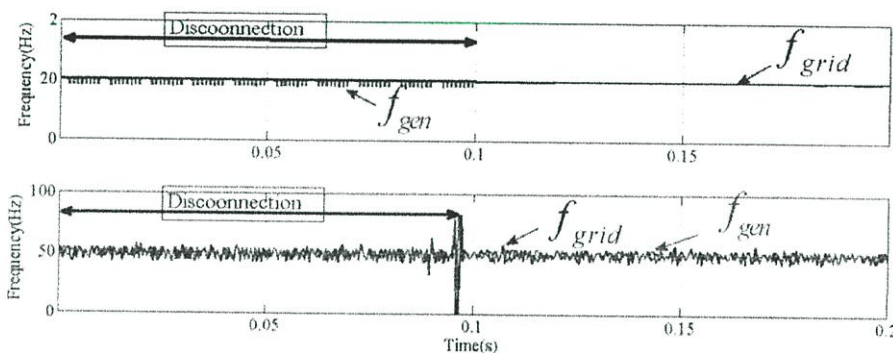
ในหัวข้อนี้จะเป็นกรณีปกติคือแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าคงที่ ในการทดลองจะใช้ต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าโดยตรง จะนำเสนอผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองโดยแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าและค่าแรงดันไฟฟ้าในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง ของระบบไฟฟ้าเปรียบเทียบกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในขณะที่เริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แสดงตามรูปที่ 5.1 ในสภาวะคงตัว แสดงตามรูปที่ 5.2 และในขณะที่ขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้า แสดงตามรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.1 แสดงผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์(บน)และผลการทดลองจริง(ล่าง) ของความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับระบบไฟฟ้าขณะเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 5.2 แสดงผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์(บน)และผลการทดลองจริง(ล่าง) ของความถี่ของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับระบบไฟฟ้าขณะสภาวะคงตัว

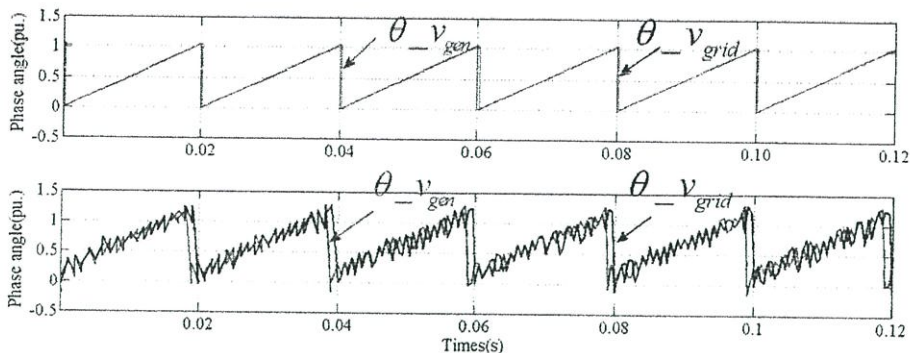


รูปที่ 5.3 แสดงผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์(บน)และผลการทดลองจริง(ล่าง) ของความถี่ของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับระบบไฟฟ้าขณะขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

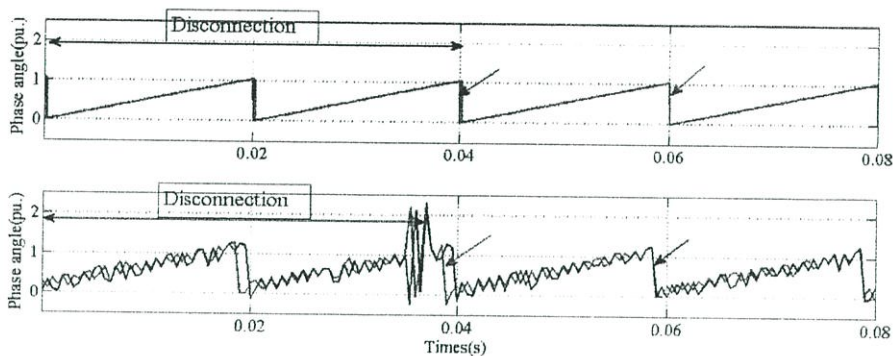
จากรูป 5.1 5.2 และ 5.3 จะสังเกตได้ว่าเมื่อเราเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เมื่อเราเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ของเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าเท่ากับความถี่ระบบไฟฟ้า ความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเข้าสู่ช่วง steady state และเมื่อเรา ขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำให้เกิดการกระเพื่อมเล็กน้อย แล้วความถี่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเท่ากับ ความถี่ของระบบไฟฟ้า

### 5.3 ผลการทดลองมุมเฟสของแรงดัน

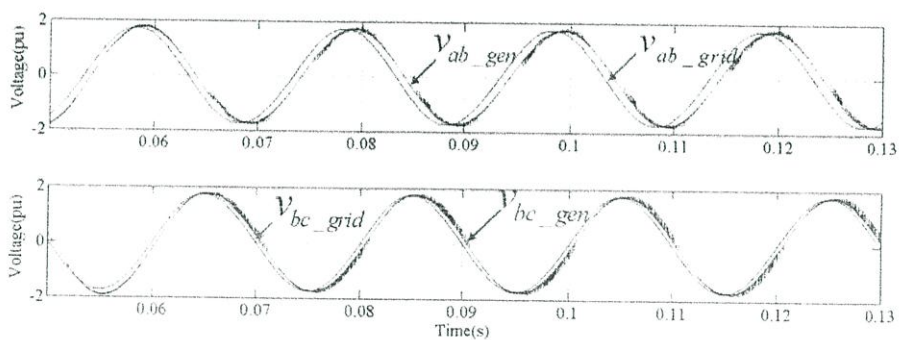
ในกรณีนี้เป็นการทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้ามี จุดประสงค์เพื่อสังเกตผลตอบสนองของมุมของแรงดันไฟฟ้าต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดย ผลการทดลองได้ดังรูป



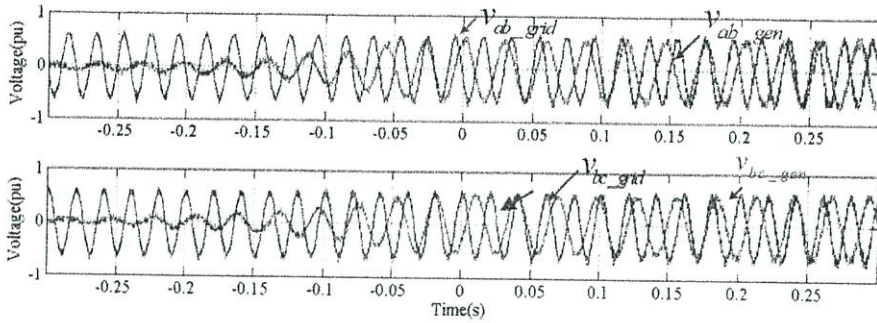
รูปที่ 5.4 แสดงผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์(บน)และผลการทดลองจริง(ล่าง) ของมุมของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้า ขณะสภาวะคงตัว



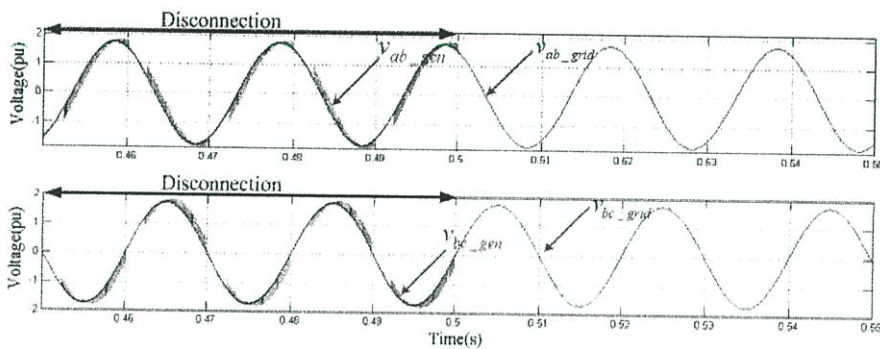
รูปที่ 5.5 แสดงผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์(บน)และผลการทดลองจริง(ล่าง) ของมุมของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้า ขณะขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



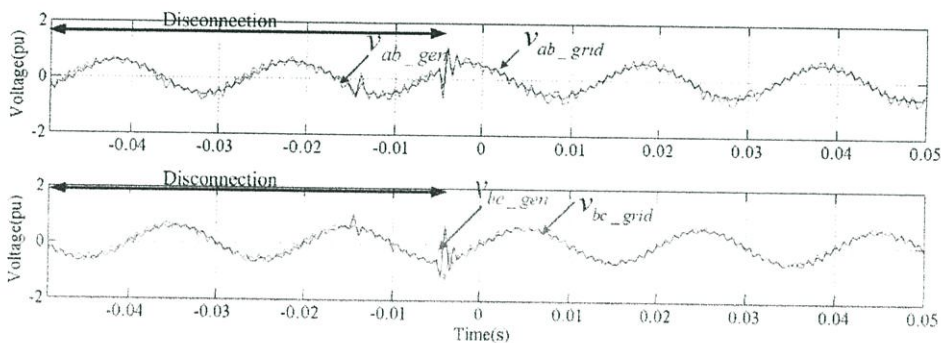
รูปที่ 5.6 แสดงผลการจำลองแรงดันไลน์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับระบบไฟฟ้าขณะเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 5.7 แสดงผลการทดลองแรงดันไลน์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับระบบไฟฟ้าขณะเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 5.8 แสดงผลการจำลองแรงดันไลน์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับระบบไฟฟ้าก่อนและหลังขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้า



รูปที่ 5.9 แสดงผลการทดลองแรงดันไลน์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับระบบไฟฟ้าก่อนและหลังขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้า

จากรูปที่ 5.4 และ 5.5 แสดงรูปความต่างของมุมของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนิสและระบบไฟฟ้าโดยขณะเริ่มเดินเครื่อง มุมของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังไม่เท่ากับระบบไฟฟ้า แลหลังจากเดินเครื่องซ้กพัก มุมของแรงดันจะเริ่มใกล้เคียงกันมาก และเมื่อเราขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามุมของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าจะทับกันสนิท ซึ่ง

สังเกตได้จากสัญญาณของแรงดันไลน์ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้า ดังรูปที่ 5.6 5.7 5.8 และ 5.9

#### 5.4 บทสรุป

ในการทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า เมื่อใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมความเร็วต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะพบว่า ความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงระบบไฟฟ้า และมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงระบบไฟฟ้า ระดับที่มาตรฐานกำหนด โดยที่ความถี่และมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของระบบไฟฟ้า

## บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุป

ปริญญานิพนธ์ได้นำเสนอการควบคุมความเร็วรอบสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำให้มีค่าเท่ากับความเร็วรอบรอบซึ่งโครนิสของระบบไฟฟ้าโดยใช้เฟสล็อกูปเพื่อไปสร้างอ้างอิง เพื่อไปควบคุม AC Drives เพื่อให้ความถี่ของต้นกำลังและและความต่างของมุมของแรงดันระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับแรงดันของระบบไฟฟ้า เพื่อให้สามารถขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้า จากการทดลองซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- การควบคุมความถี่ของต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนิส ถ้าความถี่ของของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่ากับความถี่ของระบบไฟฟ้าแต่มุมเฟสของแรงดันต้นต้นต่างกันก็ไม่สามารถขนานกับระบบไฟฟ้าได้ ดังนั้นเราต้องควบคุมมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าให้ตรงกันด้วย จึงสามารถขนานระบบไฟฟ้าได้ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าขนาดความถี่และมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าก่อนทำการขนาน และหลังทำการขนานเข้าสู่ระบบไฟฟ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองสอดคล้องกัน
- หลังจากเริ่มสตาร์ทเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประมาณ 15 วินาทีก็สามารถขนานกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าได้
- สามารถขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าแบบกึ่งอัตโนมัติได้

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้จะอธิบายเพียงการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งเป็นต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและการควบคุมมุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่านั้น ส่วนการการควบคุมขนาดของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนการควบคุมระดับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะอธิบายในปริญญานิพนธ์ที่มีชื่อว่า “การควบคุมการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนิสเพื่อเชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า” ส่วนการจำลองควบคุมการจ่ายกำลังไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้า จะอธิบายในปริญญานิพนธ์ที่มีชื่อว่า “การจำลองเพื่อศึกษาการไหลของกำลังไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าขนาดเล็กมาก”

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 เพื่อให้ได้ผลตอบสนองต่อความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ดีขึ้นจึงควรมีการปรับแก้ไขค่า  $K_p$  และ  $K_i$  ของตัวควบคุม

6.2.2 เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนในระบบ จึงควรทำการแก้ไขและออกแบบอุปกรณ์เพื่อลดสัญญาณรบกวน

6.2.3 ควรมีการออกแบบระบบเพื่อลดกระบวนการทำงานและขั้นตอนการเริ่มให้มีความง่ายต่อการใช้งานมากขึ้น

## เอกสารอ้างอิง


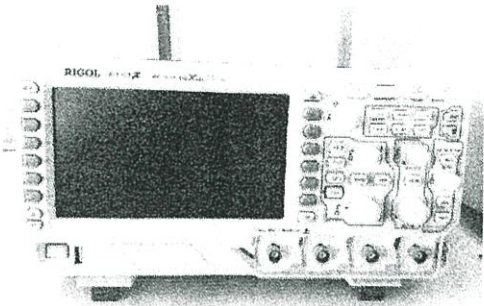
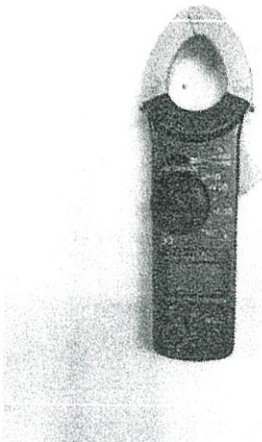
- [1] [1] Warachart Suwan-ngam “Lecture note of the 01026404, Electrical Machine Drive and System” Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, KMUTL; 2015. (in Thai)
- [2] ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย, “เอกสารประกอบการสอนเรื่อง เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส”, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง; ภาคการศึกษาที่ 2/2556.
- [3] สมยศ เกียรติวนิชวิไล, ระบบควบคุม, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ: สนพ.มีน เซอร์วิส ชัพพราย; ตุลาคม 2555.
- [4] IEEE Standard 115-2009, IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines.
- [5] Michael J. Thompson, Fundamentals and Advancements in Generator Synchronizing Systems, Protective Relay Engineering 65<sup>th</sup> Annual Conference; 2012, pp203-214.
- [6] Ned Mohan, Power Electronics - A First Course: 1<sup>st</sup> edition. United States of America: John Wiley & Sons, Inc. Publication; 2012.
- [7] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr. Staphen D.Umans. Electrical Machinery: 6<sup>th</sup> edition. Singapore: McGraw-Hill Companies; 2003.
- [8] Gene F. Franklin, J. David Powell, Michael Workman. Digital Control of Dynamic System: 3<sup>rd</sup> edition. Addison Wesley Longman, Inc; 1998.
- [9] Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scoot D. Sudhoff, Analysis of electric machinery and drive system: 2<sup>nd</sup> edition. United States of America: John Wiley & Sons, Inc. Publication; 2002.
- [10]

ภาคผนวก



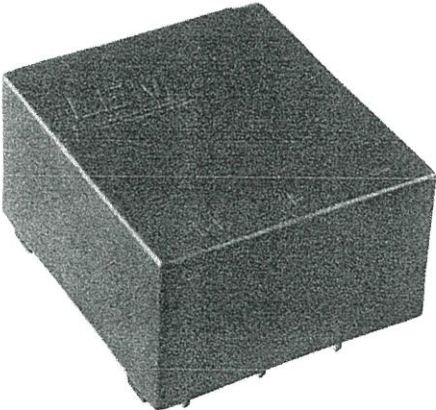
ภาคผนวก ก.  
รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

## ภาคผนวก ก.

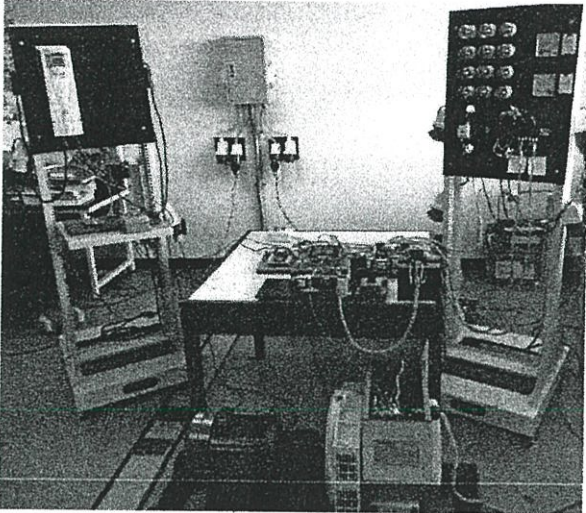
## รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>มัลติมิเตอร์ FLUKE 110 และ 115</p>
	<p>ดิจิตอลออสซิลอสโคปรุ่น DS 1104 RIGOL</p>
	<p>เครื่องมือวัดกระแส (Clamp ammeter) KYORISU KT203</p>

ภาคผนวก ก.(ต่อ)  
รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>เครื่องวัดความเร็วรอบ (Tachometer)</p>
	<p>Commercial-AC Drive ABB VSD ACS550-01-03A3-4 1.1</p>
	<p>รูปถ่าย Voltage Transducers</p>

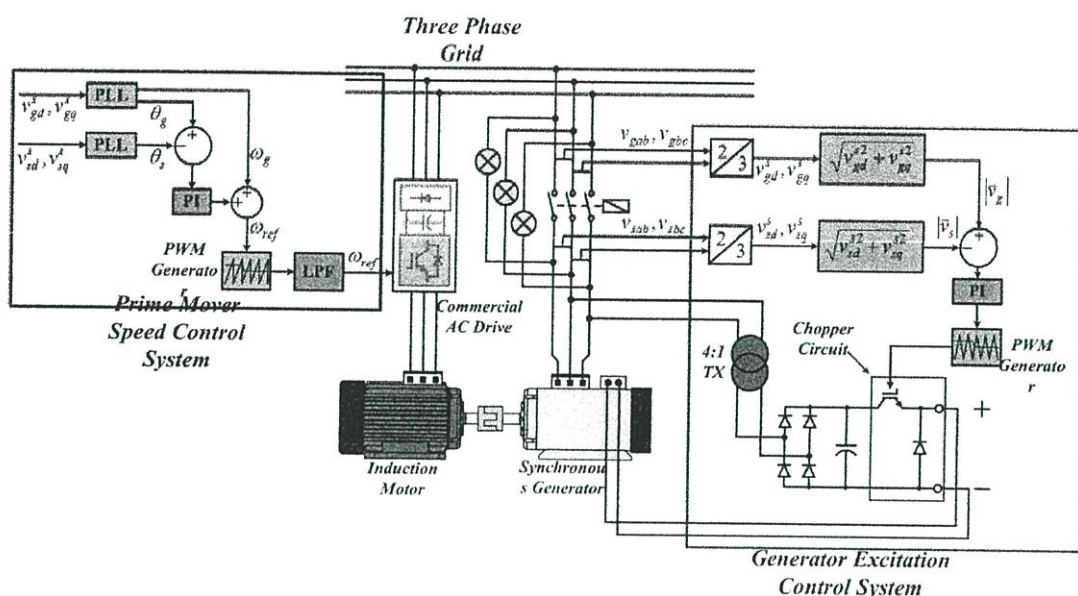
ภาคผนวก ก.(ต่อ)  
รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

รูปถ่าย	รายละเอียด
	รูปถ่ายชิ้นงาน และอุปกรณ์โดยภาพรวม

ภาคผนวก ข.  
การสร้างการสร้างความสร้างสัญญาอ้างอิง

ภาคผนวก ข.  
การสร้งการสร้งสัญญาณอ้างอิง

ข.1 การสร้งสัญญาณอ้างอิง

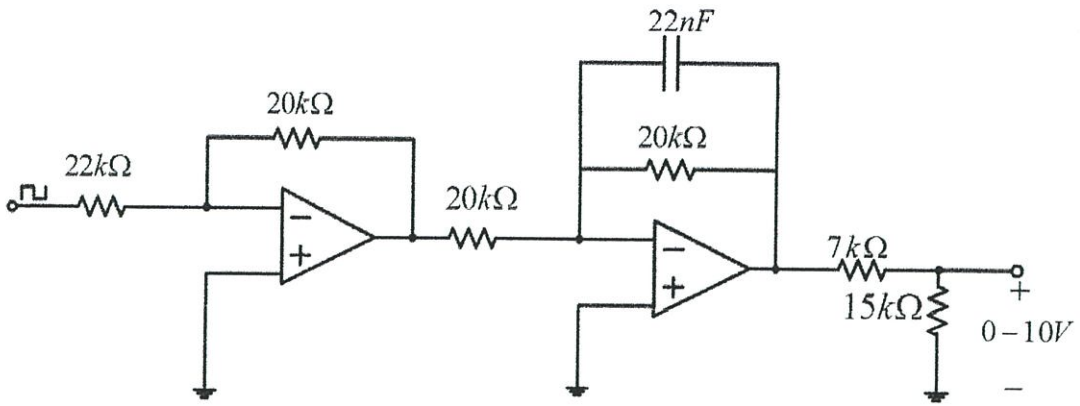


รูปที่ ข.1 ไดอะแกรมการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

จากรูปที่ ข.1 จะใช้เซนเซอร์วัดแรงดันไลน์ AB และ BC ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและของระบบไฟฟ้าจากนั้นนำมาแปลงแกนจากกรอบอ้างอิงสามเฟสเป็นอ้างอิงสองเฟส กระแสตรงแล้วนำไปผ่านกระบวนการ Phase Locked Loop (PLL) เพื่อประมาณค่าความถี่ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้า และ มุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้า จากนั้นนำค่ามุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าผ่าน PI Controller โดยใช้มุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นอินพุต และมุมของระบบไฟฟ้าเป็นสัญญาณอ้างอิง ทำให้ได้ความเร็วเชิงมุมชดเชยแล้วนำ ความเร็วเชิงมุมชดเชย แล้วนำไปบวกกับความเร็วเชิงมุมของระบบไฟฟ้า ก็จะได้สัญญาณอ้างอิงออกมา

ข.2 วงจรกรองความถี่ และวงจรแบ่งแรงดัน (Low pass filter and Voltage Divider)

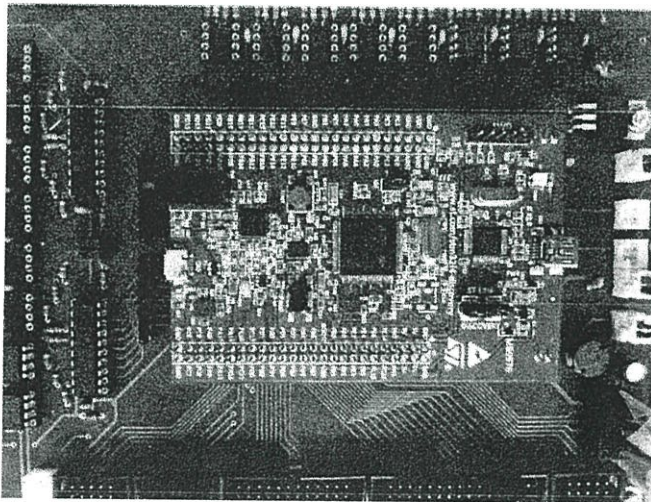
เนื่องจากเอาท์พุทไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นสัญญาณ PWM และออกมามากกว่า 10 โวลต์ แต่ อะนาล็อกอินพุทของ AC Drives ตัวที่รับแรงดันสูงสุด 10 โวลต์ ดังนั้น เราจึงต้องนำสัญญาณผ่านวงจร Low pass filter และ Voltage Divider ดังรูป 4.11 เพื่อกรองให้สัญญาณให้เรียบ และแบ่งแรงดันให้ได้ไม่เกิน 10 โวลต์



รูปที่ ข.2 วงจร Low pass filter และ Voltage Divider

### ข.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM CortexM4 STM32F407VG

ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่ประมวลผลในการสร้างสัญญาณอ้างอิงเพื่อป้อนเข้าไปควบคุม AC Drives โดยประมาณค่าความถี่ และสร้างสัญญาณ PWM แบบยูนิโพลาร์ ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้จะเป็น ARM Cortex M4 STM32F4DISCOVERYบอร์ด STM32F407VG แสดงดังรูป 4.12

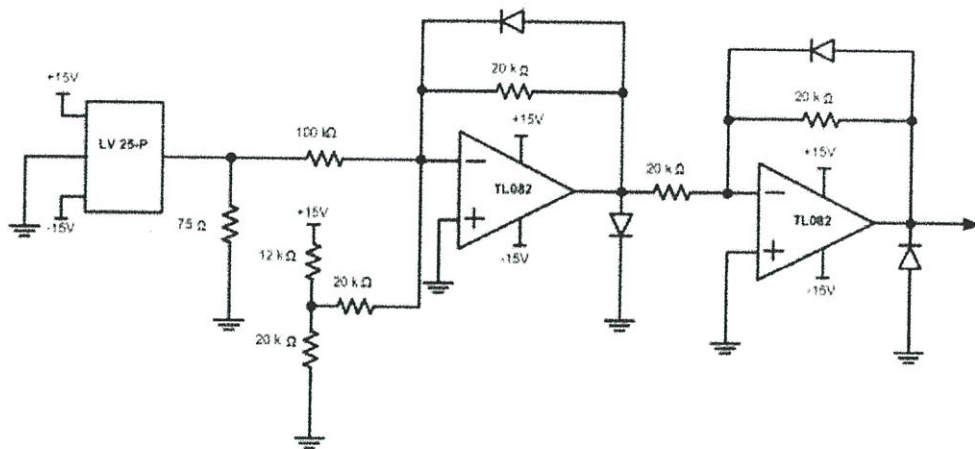


รูปที่ ข.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM Cortex M4 STM32F407VG

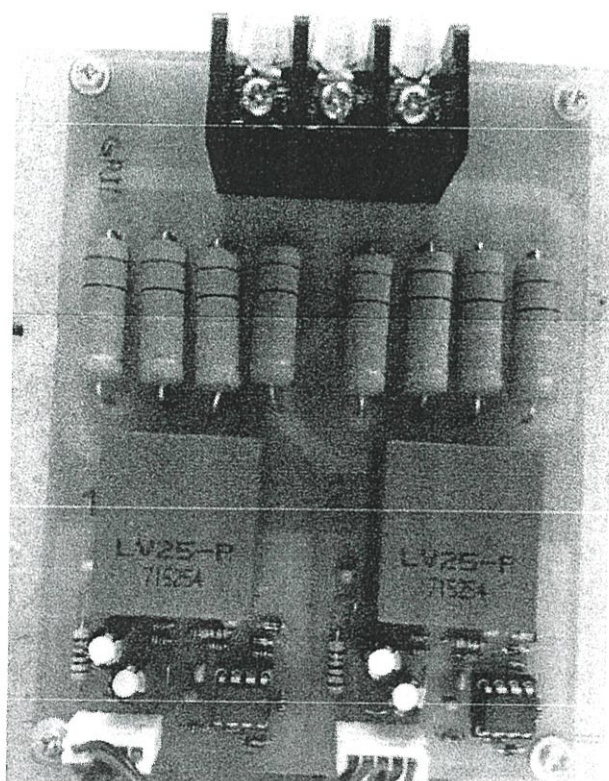
### ข.4 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า

อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วขณะลดอาร์มาเจอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสและวัดแรงดันของระบบไฟฟ้าจะใช้อุปกรณ์ในการวัดคือ Voltage Transducer บอร์ด LV 25-P ของบริษัท Liaisons Electroniques-Mécaniques หรือมีชื่อย่อว่า LEM มีพิกัดแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่วัดได้อยู่ที่ 500 โวลต์ สามารถวัดได้ทั้งกระแสตรง และกระแสสลับ เอาต์พุตที่วัดได้จะอยู่ในรูปของกระแสซึ่งแปรผันตรงกับอัตราส่วนของแรงดันที่วัดได้ และเมื่อนำเอาต์พุตต่อผ่าน

ความต้านทาน 150 โอห์ม กับกราวด์ เพื่อเปลี่ยนจากสัญญาณกระแสให้อยู่ในรูปของสัญญาณแรงดัน เพื่อป้องกันเข้ากลับไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งสามารถรับแรงดันสูงสุดได้ 3.3 โวลต์ และเป็นแรงดันไฟฟ้า ด้านบวกเท่านั้น ดังนั้นแรงดันที่ตรวจวัดต้องผ่านวงจรปรับสภาพสัญญาณ (signal conditioning circuit) แสดงในรูป 3.21 เพื่อปรับสภาพแรงดันให้เหมาะสมกับไมโครคอนโทรลเลอร์



(ก)



(ข)

รูปที่ ข.4 อุปกรณ์ตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า (ก) วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า  
(ข) รูปชิ้นงานวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า

ภาคผนวก ค  
ข้อมูลอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการ

Arm Cortex M4 STM32F407VG



## STM32F4DISCOVERY

### STM32F4 high-performance discovery board

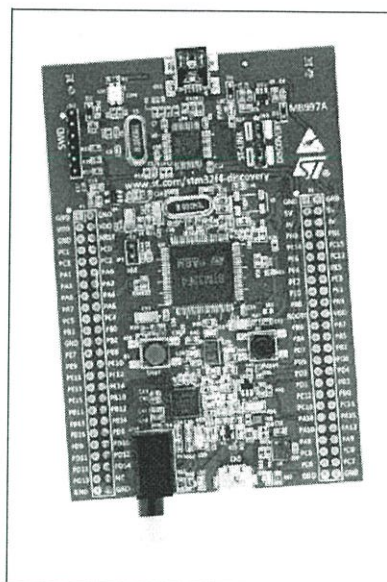
Data brief

#### Features

- STM32F407VGT6 microcontroller featuring 32-bit ARM Cortex-M4F core, 1 MB Flash, 192 KB RAM in an LQFP100 package
- On-board ST-LINK/V2 with selection mode switch to use the kit as a standalone ST-LINK/V2 (with SWD connector for programming and debugging)
- Board power supply: through USB bus or from an external 5 V supply voltage
- External application power supply: 3 V and 5 V
- LIS302DL, ST MEMS motion sensor, 3-axis digital output accelerometer
- MP45DT02, ST MEMS audio sensor, omnidirectional digital microphone
- CS43L22, audio DAC with integrated class D speaker driver
- Eight LEDs:
  - LD1 (red/green) for USB communication
  - LD2 (red) for 3.3 V power on
  - Four user LEDs, LD3 (orange), LD4 (green), LD5 (red) and LD6 (blue)
  - 2 USB OTG LEDs LD7 (green) VBus and LD8 (red) over-current
- Two push buttons (user and reset)
- USB OTG FS with micro-AB connector
- Extension header for all LQFP100 I/Os for quick connection to prototyping board and easy probing

#### Description

The STM32F4DISCOVERY helps you to discover the STM32F4 high-performance features and to develop your applications easily. It includes everything required for beginners and experienced users to get started quickly.



Based on the STM32F407VGT6, it includes an ST-LINK/V2 embedded debug tool, two ST MEMS, digital accelerometer and digital microphone, one audio DAC with integrated class D speaker driver, LEDs and push buttons and an USB OTG micro-AB connector.

A large number of free ready-to-run application firmware examples are available on [www.st.com/stm32f4-discovery](http://www.st.com/stm32f4-discovery) to support quick evaluation and development.

Table 1. Device summary

Order code	Reference
STM32F4DISCOVERY	STM32F4 high-performance discovery board

## 1 System requirements

- Windows PC (2000, XP, Vista, 7)
- USB type A to Mini-B cable

## 2 Development toolchains

- Altium TASKING™ VX-Toolset
- Atollic TrueSTUDIO®
- IAR, Embedded Workbench® for ARM
- Keil, MDK-ARM™

## 3 Demonstration software

The demonstration software is preloaded in the board's Flash memory. It uses the MEMS motion sensor to blink the four LEDs according to the motion direction and speed. Connecting the board to a PC with a second USB 'type A to micro-B' cable converts it into a standard mouse, and board motion controls the PC cursor.

The latest versions of the demonstration source code and associated documentation can be downloaded from [www.st.com/stm32f4-discovery](http://www.st.com/stm32f4-discovery).

## 4 Revision history

Table 2. Document revision history

Date	Revision	Changes
15-Sept-2011	1	Initial version.

## STM32F4DISCOVERY

---

### Please Read Carefully:

Information in this document is provided solely in connection with ST products. STMicroelectronics NV and its subsidiaries ("ST") reserve the right to make changes, corrections, modifications or improvements, to this document, and the products and services described herein at any time, without notice.

All ST products are sold pursuant to ST's terms and conditions of sale.

Purchasers are solely responsible for the choice, selection and use of the ST products and services described herein, and ST assumes no liability whatsoever relating to the choice, selection or use of the ST products and services described herein.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted under this document. If any part of this document refers to any third party products or services it shall not be deemed a license grant by ST for the use of such third party products or services, or any intellectual property contained therein or considered as a warranty covering the use in any manner whatsoever of such third party products or services or any intellectual property contained therein.

**UNLESS OTHERWISE SET FORTH IN ST'S TERMS AND CONDITIONS OF SALE ST DISCLAIMS ANY EXPRESS OR IMPLIED WARRANTY WITH RESPECT TO THE USE AND/OR SALE OF ST PRODUCTS INCLUDING WITHOUT LIMITATION IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE (AND THEIR EQUIVALENTS UNDER THE LAWS OF ANY JURISDICTION), OR INFRINGEMENT OF ANY PATENT, COPYRIGHT OR OTHER INTELLECTUAL PROPERTY RIGHT.**

**UNLESS EXPRESSLY APPROVED IN WRITING BY TWO AUTHORIZED ST REPRESENTATIVES, ST PRODUCTS ARE NOT RECOMMENDED, AUTHORIZED OR WARRANTED FOR USE IN MILITARY, AIR CRAFT, SPACE, LIFE SAVING, OR LIFE SUSTAINING APPLICATIONS, NOR IN PRODUCTS OR SYSTEMS WHERE FAILURE OR MALFUNCTION MAY RESULT IN PERSONAL INJURY, DEATH, OR SEVERE PROPERTY OR ENVIRONMENTAL DAMAGE. ST PRODUCTS WHICH ARE NOT SPECIFIED AS "AUTOMOTIVE GRADE" MAY ONLY BE USED IN AUTOMOTIVE APPLICATIONS AT USER'S OWN RISK.**

Resale of ST products with provisions different from the statements and/or technical features set forth in this document shall immediately void any warranty granted by ST for the ST product or service described herein and shall not create or extend in any manner whatsoever, any liability of ST.

ST and the ST logo are trademarks or registered trademarks of ST in various countries.

Information in this document supersedes and replaces all information previously supplied.

The ST logo is a registered trademark of STMicroelectronics. All other names are the property of their respective owners.

© 2011 STMicroelectronics - All rights reserved

STMicroelectronics group of companies

Australia - Belgium - Brazil - Canada - China - Czech Republic - Finland - France - Germany - Hong Kong - India - Israel - Italy - Japan - Malaysia - Malta - Morocco - Philippines - Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - United Kingdom - United States of America

[www.st.com](http://www.st.com)



Voltage Transducer LV 25-P



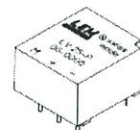
## Voltage Transducer LV 25-P

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).

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

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





### Electrical data

$I_{DN}$	Primary nominal r.m.s. current	10	mA		
$I_D$	Primary current, measuring range	0 .. $\pm 14$	mA		
$R_M$	Measuring resistance	$R_{Mmin}$	$R_{Mmax}$		
		with $\pm 12 \text{ V}$	@ $\pm 10 \text{ mA}_{max}$	30	190 $\Omega$
			@ $\pm 14 \text{ mA}_{max}$	30	100 $\Omega$
with $\pm 15 \text{ V}$	@ $\pm 10 \text{ mA}_{max}$	100	350 $\Omega$		
	@ $\pm 14 \text{ mA}_{max}$	100	190 $\Omega$		
$I_{SN}$	Secondary nominal r.m.s. current	25	mA		
$K_N$	Conversion ratio	2500 : 1000			
$V_C$	Supply voltage ( $\pm 5\%$ )	$\pm 12 \dots 15$	V		
$I_C$	Current consumption	$10 @ \pm 15 \text{ V} + I_C$	mA		
$V_d$	R.m.s. voltage for AC isolation test <sup>1</sup> , 50 Hz, 1 mn	2.5	kV		

### 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  $R_M$ , which is selected by the user and installed in series with the primary circuit of the transducer.

### Accuracy - Dynamic performance data

$X_D$	Overall Accuracy @ $I_{SN}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$	@ $\pm 12 \dots 15 \text{ V}$	$\pm 0.9$	%
		@ $\pm 15 \text{ V} (\pm 5\%)$	$\pm 0.8$	%
$E_L$	Linearity		$< 0.2$	%
$I_0$	Offset current @ $I_D = 0$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$	Typ	Max	
$I_{DT}$	Thermal drift of $I_0$		$\pm 0.15$	mA
		0 $^\circ\text{C}$ .. +25 $^\circ\text{C}$	$\pm 0.06$	$\pm 0.25$
		+25 $^\circ\text{C}$ .. +70 $^\circ\text{C}$	$\pm 0.10$	$\pm 0.35$
$t_r$	Response time <sup>2</sup> @ 90 % of $V_{Dmax}$		40	$\mu\text{s}$

### Advantages

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

### General data

$T_A$	Ambient operating temperature	0 .. +70	$^\circ\text{C}$
$T_C$	Ambient storage temperature	-25 .. +85	$^\circ\text{C}$
$R_p$	Primary coil resistance @ $T_A = 70^\circ\text{C}$	250	$\Omega$
$R_s$	Secondary coil resistance @ $T_A = 70^\circ\text{C}$	110	$\Omega$
$m$	Mass	22	g
	Standards <sup>3</sup>	EN 50178	

### Applications

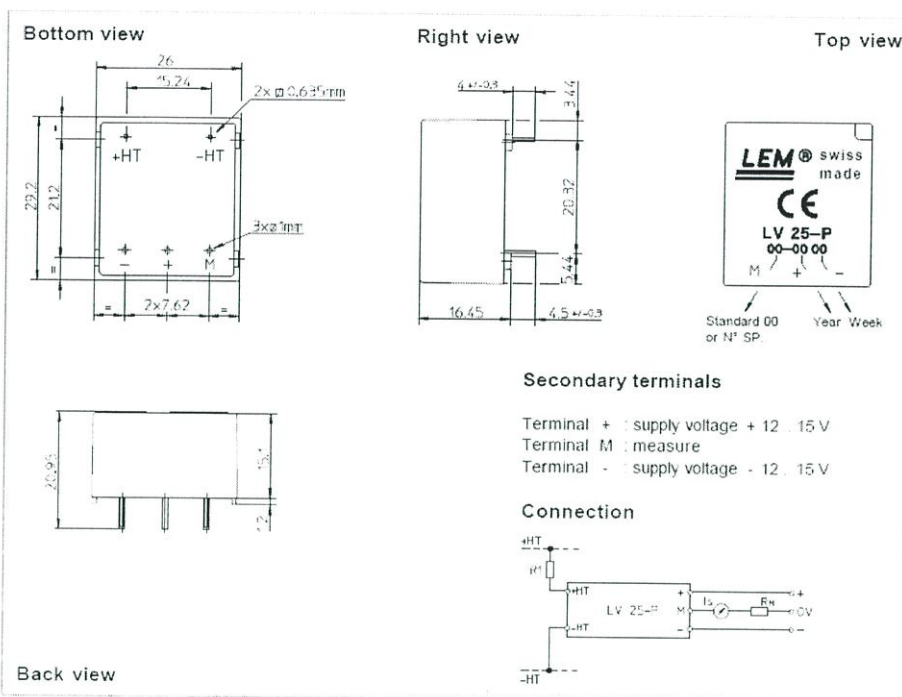
- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Power supplies for welding applications

Notes : <sup>1</sup> Between primary and secondary  
<sup>2</sup>  $R_M = 25 \text{ k}\Omega$  (L/R constant, produced by the resistance and inductance of the primary circuit);  
<sup>3</sup> A list of corresponding tests is available

981125/14

### LEM Components

Topo Co., Ltd. Tel: (02) 8228-0658 Fax: (02) 8228-0659 <http://www.sensor.com.tw> [www.lem.com](http://www.lem.com)  
 e-mail: [topo@ms1.hinet.net](mailto:topo@ms1.hinet.net)

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

**Mechanical characteristics**

- General tolerance  $\pm 0.2$  mm
- Fastening & connection of primary 2 pins  
0.635 x 0.635 mm
- Fastening & connection of secondary 3 pins  $\varnothing 1$  mm
- Recommended PCB hole 1.2 mm

**Remarks**

- $I_2$  is positive when  $V_s$  is applied on terminal +HT.
- This is a standard model. For different versions (supply voltages, turns ratios, unidirectional measurements...), please contact us.

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

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

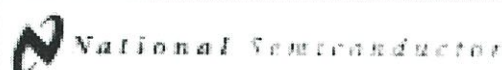
Example: Voltage to be measured  $V_{pn} = 250$  V

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

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

LEM reserves the right to carry out modifications on its transducers, in order to improve them, without previous notice.

Op-amp TL-082



April 1992

## TL082 Wide Bandwidth Dual JFET Input Operational Amplifier

### General Description

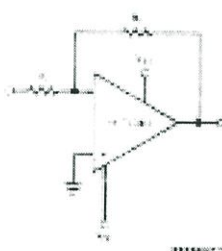
These devices are low cost, high speed, dual JFET input operational amplifiers with an internally trimmed input offset voltage (BJFET I<sup>2</sup> technology). They require low supply current, yet maintain a large gain bandwidth product and fast slew rate. In addition, well-matched high voltage JFET input devices provide very low input bias and offset currents. The TL082 is pin compatible with the standard LM1558 allowing designers to immediately upgrade the overall performance of existing LM1558 and most LM2558 designs.

These amplifiers may be used in applications such as high speed integrators, fast D/A converters, sample and hold circuits and many other circuits requiring low input offset voltage, low input bias current, high input impedance, high slew rate and wide bandwidth. The devices also exhibit low noise and offset voltage drift.

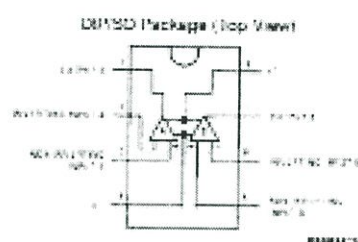
### Features

- Internally trimmed offset voltage:  $\pm 15$  mV
- Low input bias current:  $\pm 50$  pA
- Low input noise voltage:  $18$  nV/√Hz
- Low input noise current:  $0.01$  pA/√Hz
- Wide gain bandwidth:  $4$  MHz
- High slew rate:  $13$  V/μs
- Low supply current:  $3.8$  mA
- High input impedance:  $>10^{12}$  Ω
- Low total harmonic distortion  $A_{v} = 10$ :  $<0.02\%$   
 $R_L = 10k$ ,  $V_o = 20$  Vp p.p.  
 $BW = 20$  Hz to  $20$  kHz
- Low 1/f noise corner:  $50$  Hz
- Fast settling time to 0.01%:  $2$  μs

### Typical Connection

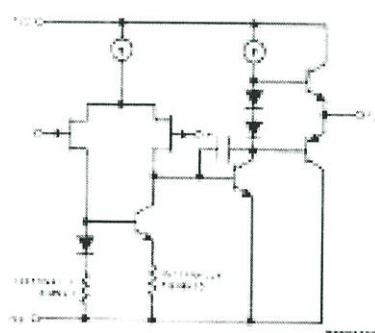


### Connection Diagram



Order Number TL082DM or TL082DM\*  
See NS Package Number M06A or M06B

### Simplified Schematic



©1992 National Semiconductor Corporation

©1992 National Semiconductor Corporation DS000087

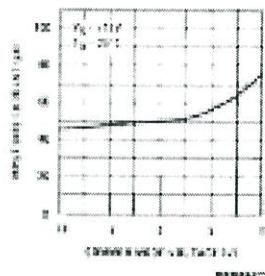
www.national.com

TL082 Wide Bandwidth Dual JFET Input Operational Amplifier

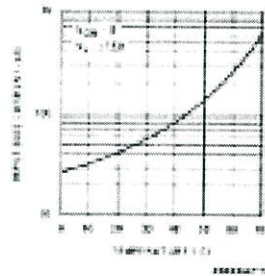


## Typical Performance Characteristics

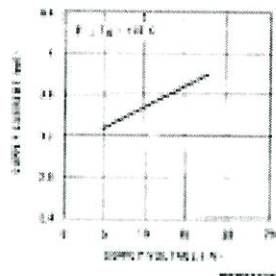
Input Bias Current



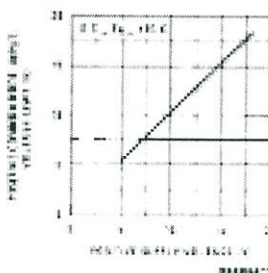
Input Bias Current



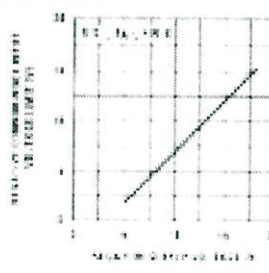
Supply Current



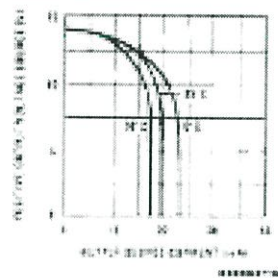
Positive Common-Mode Input Voltage Limit



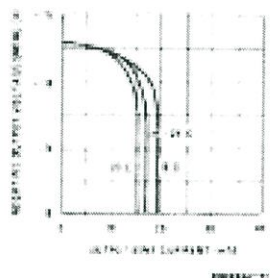
Negative Common-Mode Input Voltage Limit



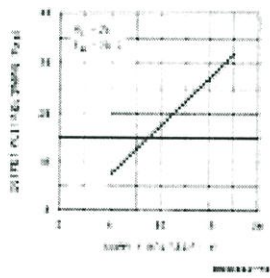
Positive Current Limit



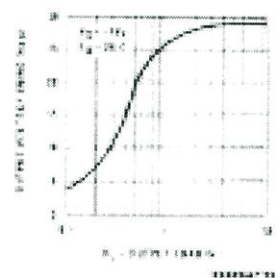
Negative Current Limit



Voltage Swing

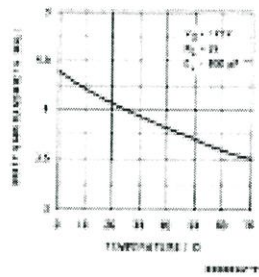


Output Voltage Swing

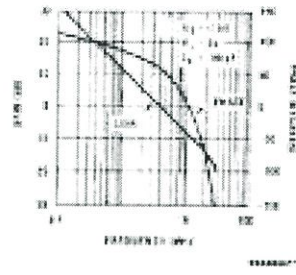


## Typical Performance Characteristics (Continued)

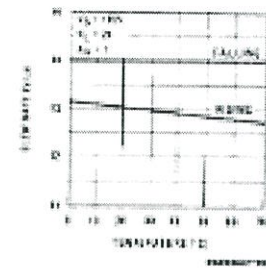
### Gain Bandwidth



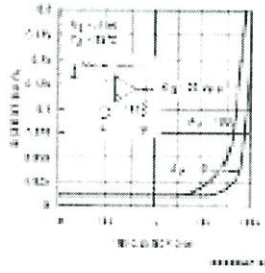
### Bode Plot



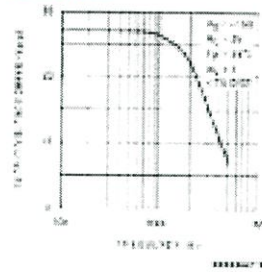
### Slew Rate



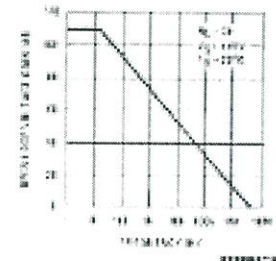
### Distortion vs Frequency



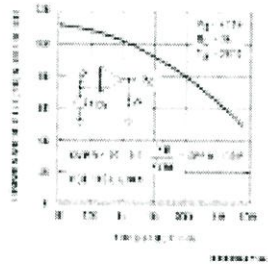
### Undistorted Output Voltage Swing



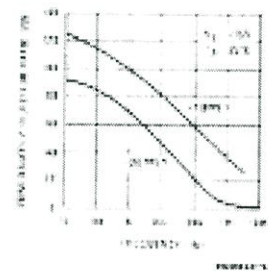
### Open Loop Frequency Response



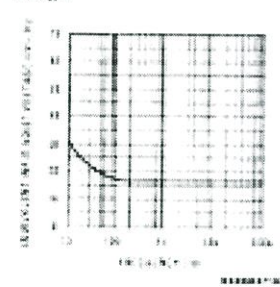
### Common-Mode Rejection Ratio



### Power Supply Rejection Ratio

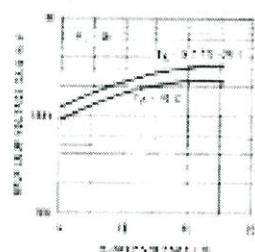


### Equivalent Input Noise Voltage

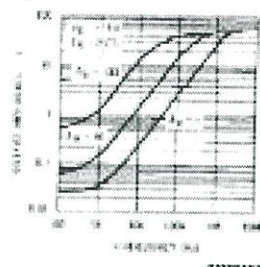


## Typical Performance Characteristics (Continued)

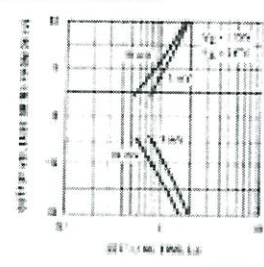
Open Loop Voltage Gain (V/V)



Output Impedance

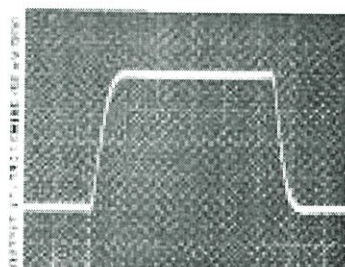


Inverter Settling Time



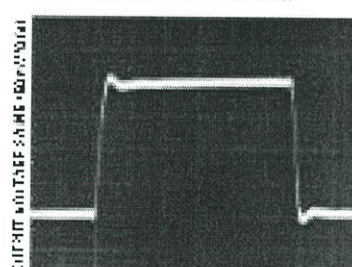
## Pulse Response

Small Signal Inverting



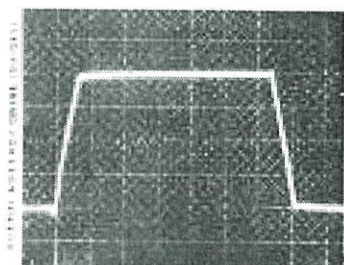
TIME 2.000ns

Small Signal Non-Inverting



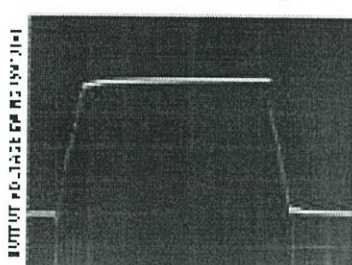
TIME 2.000ns

Large Signal Inverting



TIME 2.000ns

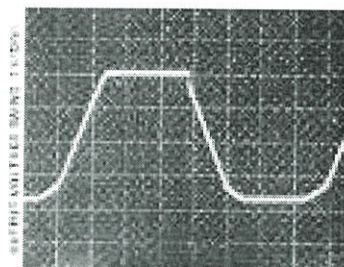
Large Signal Non-Inverting



TIME 2.000ns

## Pulse Response (Continued)

Current Limit (A) = 1000



## Application Hints

These devices are op amps with an internally trimmed input offset voltage and JFET input devices (BJFET II). These JFETs have large reverse breakdown voltages from gate to source and drain eliminating the need for clamps across the inputs. Therefore, large differential input voltages can easily be accommodated without a large increase in input current. The maximum differential input voltage is independent of the supply voltages. However, neither of the input voltages should be allowed to exceed the negative supply as this will cause large currents to flow which can result in a destroyed unit.

Exceeding the negative common-mode limit on either input will cause a reversal of the phase to the output and force the amplifier output to the corresponding high or low state. Exceeding the negative common-mode limit on both inputs will force the amplifier output to a high state. In neither case does a latch occur since raising the input back within the common-mode range again puts the input stage and thus the amplifier in a normal operating mode.

Exceeding the positive common-mode limit on a single input will not change the phase of the output; however, if both inputs exceed the limit, the output of the amplifier will be forced to a high state.

The amplifier will operate with a common-mode input voltage equal to the positive supply; however, the gain bandwidth and slew rate may be decreased in this condition. When the negative common-mode voltage swings to within 2V of the negative supply, an increase in input offset voltage may occur.

Each amplifier is individually biased by a center reference which allows normal circuit operation on +5V power supplies. Supply voltages less than these may result in lower gain bandwidth and slew rate.

The amplifier will drive a 2 k $\Omega$  load resistance to a 10V over the full temperature range of 0°C to 40°C. If the amplifier is forced to drive heavier load currents, however, an increase in input offset voltage may occur on the negative voltage swing and finally reach an active current limit on both positive and negative swings.

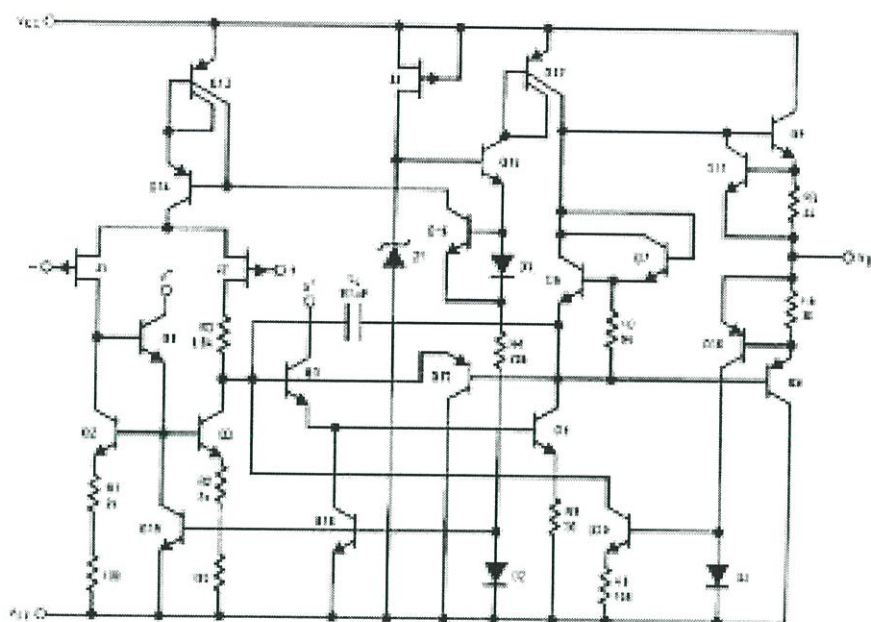
Precautions should be taken to ensure that the power supply for the integrated circuit never becomes reversed in polarity or that the unit is not inadvertently installed backwards in a socket as an unlimited current surge through the resulting forward diode within the IC could cause fusing of the internal conductors and result in a destroyed unit.

Because these amplifiers are JFET rather than MOSFET input op amps they do not require special handling.

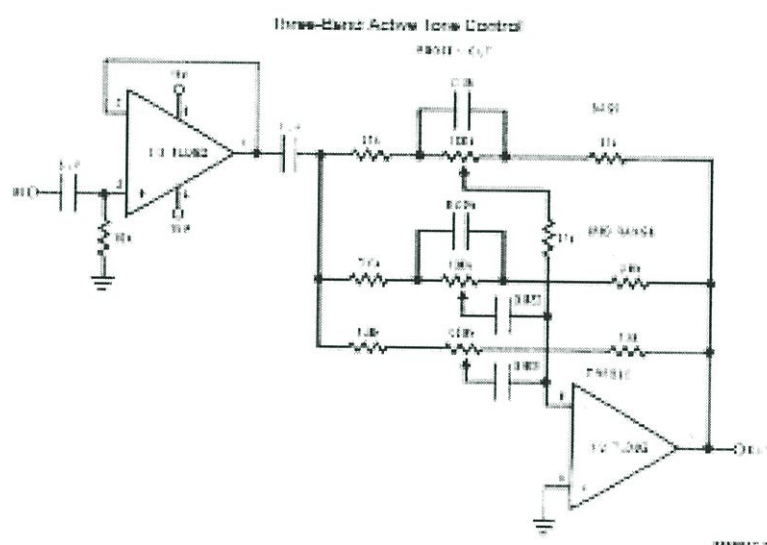
As with most amplifiers, care should be taken with lead dress, component placement and supply decoupling in order to ensure stability. For example, resistors from the output to an input should be placed with the body close to the input to minimize "pick-up" and maximize the frequency of the feedback pole by minimizing the capacitance from the input to ground.

A feedback pole is created when the feedback around any amplifier is resistive. The parallel resistance and capacitance from the input of the device (usually the inverting input) to AC ground set the frequency of the pole. In many instances the frequency of this pole is much greater than the expected 3 dB frequency of the closed loop gain and consequently there is negligible effect on stability margin. However, if the feedback pole is less than approximately 5 times the expected 3 dB frequency a lead capacitor should be placed from the output to the input of the op amp. The value of the added capacitor should be such that the RC time constant of this capacitor and the resistance it parallels is greater than or equal to the original feedback pole time constant.

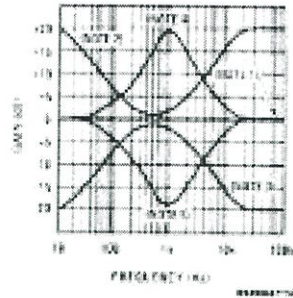
## Detailed Schematic



## Typical Applications

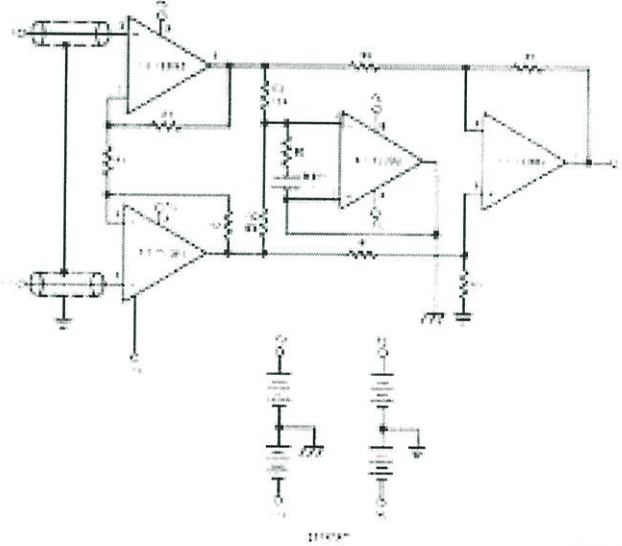


## Typical Applications (Continued)



- 50 pole/zero pairs are shown (open)
- Use the +PZT Curve for some applications
- Note 9. 50 zero/pole pair.
- Note 10. Zero and pole cancel, 40 dB/dec.
- Note 11. Zero and pole cancel, 40 dB/dec.
- Note 12. 10 zero/pole pairs and 40 dB/dec.

### Improved CMRR Instrumentation Amplifier

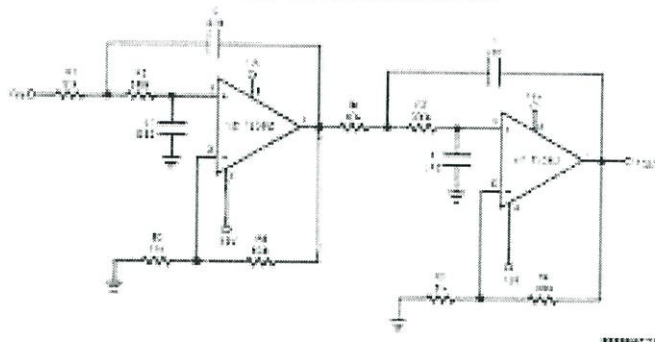


$$A_{CMR} = \frac{1 + \frac{R_1}{R_2}}{1 + \frac{R_3}{R_4}}$$

- A new 3 op amp precision common mode rejection circuit
- Operating at 100k, 100k and 100k common mode CMRR
- CMRR = 100dB (100k/100k/100k) = 100dB, CMRR = 100dB
- 100dB high input impedance
- 100dB high CMRR

## Typical Applications (Continued)

### Fourth-Order Low-Pass Butterworth Filter



$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{10k \cdot 10k \cdot 10n \cdot 10n}} = 100 \text{ Hz}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_3 R_4 C_3 C_4}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{10k \cdot 10k \cdot 10n \cdot 10n}} = 100 \text{ Hz}$$

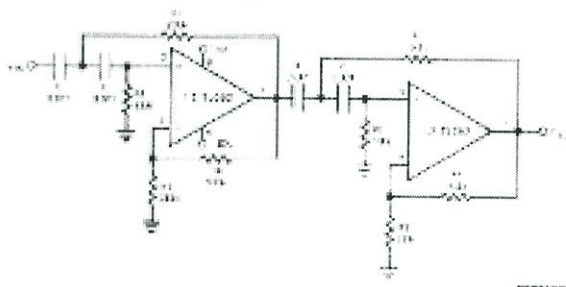
$$f_c = 100 \text{ Hz}$$

$$f_c = 100 \text{ Hz}$$

Component values are given in the table below. All resistors are 1% tolerance. All capacitors are 5% tolerance.

Design values are given in the table below. All resistors are 1% tolerance.

### Fourth-Order High-Pass Butterworth Filter



$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{10k \cdot 10k \cdot 10n \cdot 10n}} = 100 \text{ Hz}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_3 R_4 C_3 C_4}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{10k \cdot 10k \cdot 10n \cdot 10n}} = 100 \text{ Hz}$$

$$f_c = 100 \text{ Hz}$$

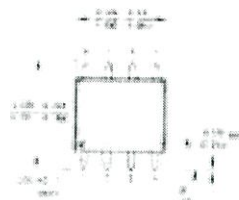
$$f_c = 100 \text{ Hz}$$

Component values are given in the table below. All resistors are 1% tolerance. All capacitors are 5% tolerance.

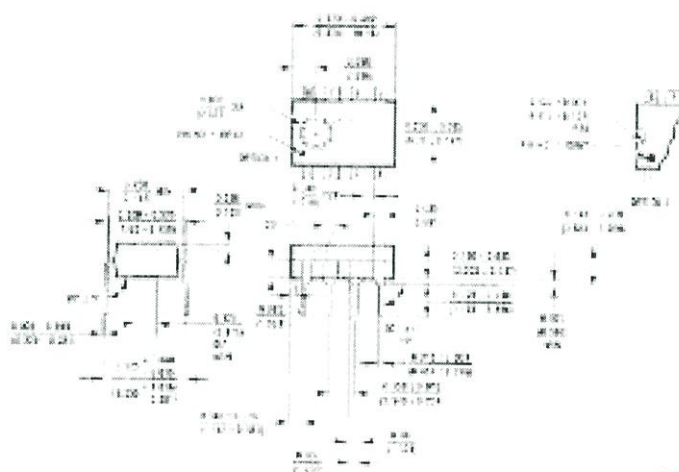
Design values are given in the table below. All resistors are 1% tolerance.



**Physical Dimensions** inches (millimeters) unless otherwise noted



Order Number 148820W  
NS Package MUSA



Order Number 148820T  
NS Package NUSC

## Notes

## LIFE SUPPORT POLICY

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which: (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

2  
National Semiconductor  
Corporate  
Offices  
Tel: 408/737-0000  
Fax: 408/737-0002  
Email: support@ns.com

National Semiconductor  
Americas  
Tel: 408/737-0000  
Email: support@ns.com  
Dallas Tel: 972/992-3000  
Denver Tel: 303/733-1700  
Houston Tel: 281/750-3000  
Phoenix Tel: 602/972-3000  
Seattle Tel: 206/765-1000

National Semiconductor  
Asia Pacific Division  
Regional Office  
Tel: 65/434-1000  
Fax: 65/434-1002  
Email: support@ns.com

National Semiconductor  
Europe Office  
Tel: 31/20/512000  
Fax: 31/20/512001

©1998 National Semiconductor

ภาคผนวก ง.  
บทความทางวิชาการ

# การควบคุมอัตราเร็วของต้นกำลังสำหรับการเชื่อมต่อโครงข่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

## Prime Mover's Speed Control for Synchronization of Synchronous Generator System

กิตติคุณ พูลบุญ สันฐวุฒิ มาทา และอาหะมะ บากา

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซ.ฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร: โทรสาร 0-2739-2478

### บทคัดย่อ

ปัญหานี้พินิจฉบับนี้นำเสนอโครงการควบคุมอัตราเร็วของต้นกำลังสำหรับการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า โดยวัตถุประสงค์ของโครงการคือเพื่อสร้างสัญญาณอ้างอิงสำหรับชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้เป็นต้นกำลังสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการของเฟสล็อกคัลป์ ในการประมาณค่าความถี่ของระบบไฟฟ้า ในโครงการนี้ สัญญาณขาเข้าของเฟสล็อกคัลป์จะเป็นสัญญาณแรงดันไลน์ของระบบไฟฟ้าซึ่งจะถูกป้อนเข้าสู่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น STM32F4DISCOVERY ของบริษัท STMicroelectronics เพื่อทำการประมาณความถี่ และส่งสัญญาณอ้างอิงออกมาในพอร์ต PWM และทำการกรองด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ก่อนที่จะป้อนเข้าสู่ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ให้ทำการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้หมุนด้วยความเร็วรอบที่ทำให้สัญญาณแรงดันจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส มีความถี่เท่ากับความถี่ของระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า ซึ่งผลที่ได้จะถูกนำมาใช้สำหรับการพัฒนาวิชาปฏิบัติการในหัวข้อการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า โดยเป็นการควบคุมแบบอัตโนมัติ

คำสำคัญ: เฟสล็อกคัลป์, เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส, เอซีไดรฟ์, การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, ความถี่ของระบบไฟฟ้า

### Abstract

The aim of this project is to generate the speed command for the prime-mover for grid synchronization of a synchronous generator. Two requirements must be achieved, grid frequency and voltage phase angle. The prime-mover used in this project is a three-phase induction motor controlled

the commercial AC drive. The speed command for the AC drive is generated by using the Three-Phase Phase Locked Loop (PLL) to estimate the grid frequency. The voltage phase angle compensation is processed to meet the requirements for grid synchronization of the synchronous generator. Grid and generator line-to-line voltage signals are fed to the STM32F4DISCOVERY board to estimate the grid frequency. The speed command is sent out of the microcontroller in the form of PWM signal. Such signal is filtered by an analog low-pass filter circuit before feeding to the analog input channel of the AC drive circuit. The outcome of this project will be developed for teaching the student in the laboratory for grid synchronization process.

Keyword: Phase locked loop, Synchronous generator, AC Drives, Synchronization of a synchronous generator, Grid frequency

### บทนำ

ปัจจุบันในการสอนวิชาปฏิบัติการเรื่องการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้านั้น วิธีการดั้งเดิมจะใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงในการควบคุมความเร็วของต้นกำลังทางกล โดยจะปรับความเร็วของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสเพื่อควบคุมความถี่ แต่เนื่องจากความถี่ระบบไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลงที่จึงทำให้ต้องปรับความถี่ตลอดเวลาเพื่อให้ตรงกับระบบไฟฟ้า

ด้วยเหตุนี้ผู้จัดทำจึงได้ทำการศึกษาวิธีการควบคุมความเร็วของต้นกำลังโดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำควบคุมเพื่อกำหนดความถี่ของต้นกำลังให้เท่ากับความถี่ของระบบไฟฟ้า โดยไมโครคอนโทรลเลอร์สร้างสัญญาณที่

ดับเบิ้ลยูเอ็ม (Pulse Width Modulation, PWM) ไปควบคุมอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้เอาท์พุทจากอินเวอร์เตอร์ออกไปเป็นความถี่ที่ต้องการ และสามารถขนานเข้าสู่ระบบไฟฟ้าได้

2. การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าคือกระบวนการทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีความเร็วและลำดับเฟสเท่ากับระบบไฟฟ้าโดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะไม่สามารถส่งถ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้าได้ถ้าไม่ทำงานที่ความเร็วเดียวกับระบบไฟฟ้า หลังจากที่ทำการขนาน ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะขึ้นอยู่กับความถี่ของระบบซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามภาระทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป

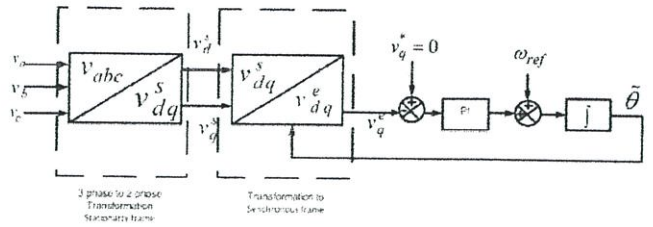
เงื่อนไขการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

1. ลำดับเฟส (Phase Sequence) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าต้องมีลำดับเฟสเหมือนกัน
2. มุมเฟส (Phase Angle) มุมเฟสตรงกันอีกด้วย จากมาตรฐาน IEEE 67[1] สามารถต่างกันได้ไม่เกิน  $\pm 10^\circ$
3. ความถี่ (Frequency) ความถี่ไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องเท่ากับ ความถี่แรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า จากมาตรฐาน IEEE 67[1] พบว่า ความถี่สามารถต่างกันได้ไม่เกิน  $\pm 0.067$  Hz
4. แรงดันไฟฟ้า (Voltage Magnitude) แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า จากมาตรฐาน IEEE 67 [1] โดยแรงดันไฟฟ้าสามารถมากกว่าแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าได้ 0 ถึง 5 %

3. การควบคุมความถี่ของต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

3.1 เฟสล็อกกลูป

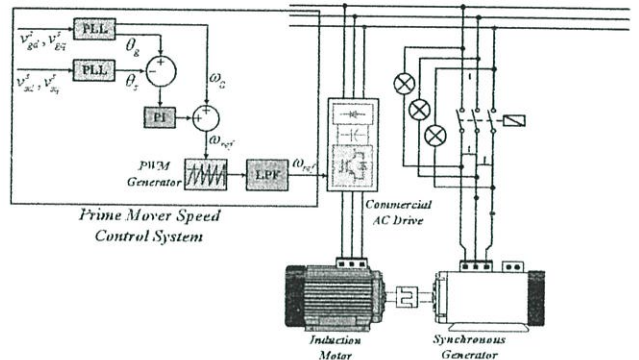
เนื่องจากโครงงานนี้ต้องการความถี่ของระบบไฟฟ้ามาเป็นความถี่อ้างอิงเพื่อให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำสำหรับการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า จึงได้วัดค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า แล้วใช้ทฤษฎีเฟสล็อกกลูปเพื่อใช้ในการประมาณค่าความถี่ของระบบไฟฟ้าและนำมาใช้ในการควบคุมความถี่ของต้นกำลังดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงบล็อกไดอะแกรมเฟสล็อกกลูป

4. การควบคุมความเร็วของต้นกำลังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ระบบขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสในโครงการนี้ประกอบด้วย มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งต่อคัปปลิงอยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะถูกควบคุมโดยอินเวอร์เตอร์ ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสถูกป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงด้านขดลวดสนามในโรเตอร์และถูกป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในขดลวด



รูปที่ 2 ไดอะแกรมการควบคุมเฟสล็อกกลูปสำหรับควบคุม ต้นกำลังเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

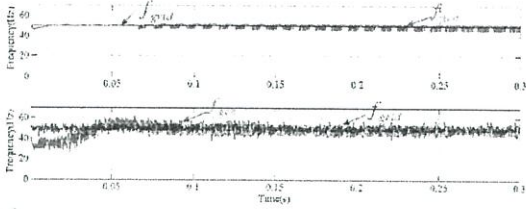
จากรูปที่ 2 การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยนำค่าความถี่อ้างอิงจากกระบวนการเฟสล็อกกลูป มาทำการคำนวณด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสร้างสัญญาณ PWM เพื่อปรับความถี่ใน AC Drive หรือ อินเวอร์เตอร์

5. การจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดสอบจริง

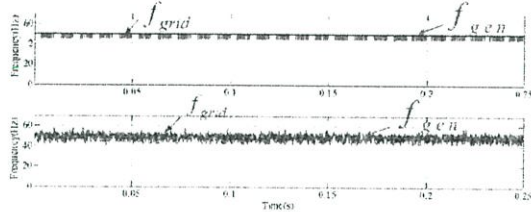
สมการจำลองการทำงานในการควบคุมความถี่ทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink แบ่งเป็น 2 ส่วนได้แก่ ส่วนวงจรกำลังจะประกอบด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส กับระบบไฟฟ้า และส่วนควบคุมประกอบด้วย วงจรเฟสล็อกกลูป และวงจรกรองสัญญาณ

5.1 ผลการทดลองทางความถี่

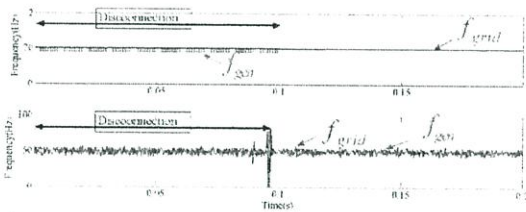
การทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตกับระบบไฟฟ้าที่มีจุดประสงค์เพื่อสังเกตผลตอบสนองความถี่ของต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรต โดยผลการทดลองได้ดังรูป



รูปที่ 3 แสดงผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์(บน)และผลการทดลองจริง(ล่าง) ของความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับระบบไฟฟ้าขณะเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 4 แสดงผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์(บน)และผลการทดลองจริง(ล่าง) ของความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับระบบไฟฟ้าขณะสภาวะคงตัว

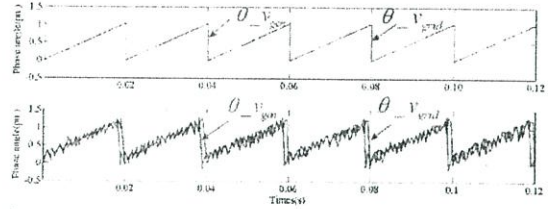


รูปที่ 5 แสดงผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์(บน)และผลการทดลองจริง(ล่าง) ของความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับระบบไฟฟ้าขณะขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

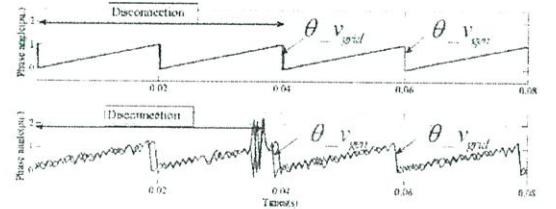
จากรูปที่ 3 4 และ 5 จะสังเกตได้ว่าเมื่อเราเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตเมื่อเราเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่ากับความถี่ระบบไฟฟ้า ความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเข้าสู่ช่วง steady state และเมื่อเราขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำให้เกิดการกระเพื่อมเล็กน้อย แล้วความถี่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเท่ากับความถี่ของระบบไฟฟ้า

5.2 การทดลองมุมเฟสของแรงดัน

การทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตกับระบบไฟฟ้าที่มีจุดประสงค์เพื่อสังเกตผลตอบสนองมุมของแรงดันไฟฟ้าต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรต โดยผลการทดลองได้ดังรูป

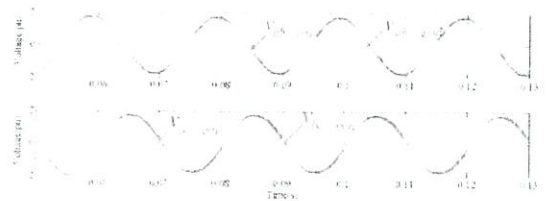


รูปที่ 6 แสดงผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์(บน)และผลการทดลองจริง(ล่าง) ของมุมของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้า ขณะสภาวะคงตัว

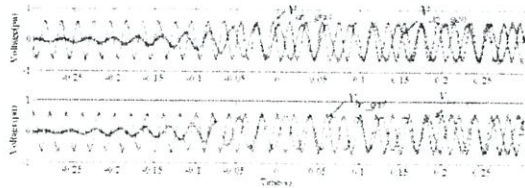


รูปที่ 7 แสดงผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์(บน)และผลการทดลองจริง(ล่าง) ของมุมของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้า ขณะขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

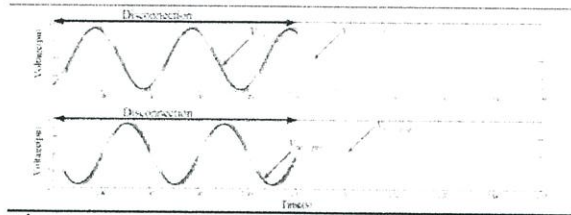
จากรูปที่ 6 และ 7 แสดงรูปความต่างของมุมของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตและระบบไฟฟ้าโดยขณะเริ่มเดินเครื่อง มุมของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังไม่เท่ากับระบบไฟฟ้า และหลังจากเดินเครื่องซึกหัก มุมของแรงดันจะเริ่มใกล้เคียงกัน และเมื่อเราขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามุมของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าจะทับกัน สังเกตได้จากกราฟของแรงดันไฟฟ้าดังรูป



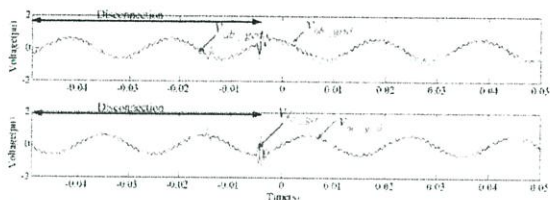
รูปที่ 8 แสดงผลการจำลองแรงดันไลน์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับระบบไฟฟ้าขณะเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 9 แสดงผลการทดลองแรงดันไลน์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับระบบไฟฟ้าขณะเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 10 แสดงผลการจำลองแรงดันไลน์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับระบบไฟฟ้าก่อนและหลังขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้า



รูปที่ 11 แสดงผลการทดลองแรงดันไลน์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทียบกับระบบไฟฟ้าก่อนและหลังขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้า

6. สรุป

บทความได้นำเสนอการควบคุมความเร็วรอบสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำให้มีความเร็วรอบรอบเชิงโคจรของระบบไฟฟ้าโดยใช้เฟสล็อกเพื่อไปสร้างสัญญาณ เพื่อไปควบคุม AC Drives เพื่อให้ความถี่ของต้นกำลังและแอมพลิจูดของมุมของแรงดันระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับแรงดันของระบบไฟฟ้า เพื่อให้สามารถขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้า จากการทดลองซึ่งสามารถเมื่อความถี่และมุมเฟสเท่ากับ ความถี่และมุมเฟสระบบไฟฟ้า จะสามารถขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าแบบกึ่งอัตโนมัติได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงการนี้รู้สึกขอบพระคุณอย่างยิ่งเป็นอย่างสูงต่อความกรุณาที่ ศส.ดร. วรชาติ สุวรรณงาม อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำ

รวมถึงความรู้ในการทำโครงการในครั้งนี้ ถ้าปราศจากท่านแล้วโครงการนี้คงไม่สำเร็จล่วงไปได้

นอกจากนั้นแล้วผู้จัดทำโครงการต้องขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ได้ช่วยอำนวยความสะดวกในการยืมใช้เครื่องมือและผู้จัดทำโครงการนี้ต้องขอบคุณเพื่อนร่วมห้องปฏิบัติการ (PEDEC) ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจเป็นอย่างดีตลอดมา

จัดทำโครงการนี้ต้องขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยส่งเสียเงินทองให้ผู้จัดทำเรียนจนจบในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Gene F. Franklin, J. David Powell, Michael Workman, "Digital Control of Dynamic Systems" Third edition. Addison-Wesley, 1997
- [2] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr. Stephen D. Umans. "Electrical Machinery": 6<sup>th</sup> edition. Singapore: McGraw-Hill Companies; 2003.

ประวัติผู้เขียน



นาย ทิรวัดน์ พุฒบุญ  
 รหัสนักศึกษา 55010449  
 เกิดวันที่ 26 ตุลาคม 2536  
 โทรศัพท์ 09-8269-7767  
 E-mail : Tirawat\_art@hotmail.co.th



นาย สัตินัฐวิ มาทา  
 รหัสนักศึกษา 55011285  
 เกิดวันที่ 22 พฤศจิกายน 2536  
 โทรศัพท์ 09-0645-8112  
 E-mail : mata.stw@gmail.com



นาย อาหะมะ บากา  
 รหัสนักศึกษา 55011496  
 เกิดวันที่ 12 มิถุนายน 2536  
 โทรศัพท์ 08-2264-4570  
 E-mail : mad2536@gmail.com

## ประวัติผู้เขียน



นาย ถิรวัดณ์ พูลบุญ  
รหัสนักศึกษา 55010449  
เกิดวันที่ 26 ตุลาคม 2536  
โทรศัพท์ 09-8269-7767  
E-mail : Tirawat\_art@hotmail.co.th



นาย สัตินรุฒมิ มาทา  
รหัสนักศึกษา 55011285  
เกิดวันที่ 22 พฤศจิกายน 2536  
โทรศัพท์ 09-0645-8112  
E-mail : mata.stw@gmail.com



นาย อาหะมะ บากา  
รหัสนักศึกษา 55011496  
เกิดวันที่ 12 มิถุนายน 2536  
โทรศัพท์ 08-2264-4570  
E-mail : mad2536@gmail.com