

เครื่องรักษาระดับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

AN AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR FOR A SYNCHRONOUS  
GENERATOR

โดย

นายกลวัชร กิจกาญจนกุล

นายเทพธาดา ทรงผาสุข

นายธีรพล ชวาลวิวัฒน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เครื่องรักษาระดับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

AN AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR FOR A SYNCHRONOUS  
GENERATOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# AN AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR FOR A SYNCHRONOUS GENERATOR



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

2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2561

เครื่องรักษาระดับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

AN AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR FOR A SYNCHRONOUS GENERATOR



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2561

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องรักษาระดับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

ผู้จัดทำ



1. นายกลวัชร กิจกาญจน์กุล
2. นายเทพธาดา ทรงผาสุข
3. นายธีรพล ชวาลวิวัฒน์

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องรักษาระดับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

นาย กลวัชร กิจกาญจนกุล

นาย เทพธาดา ทรงผาสุข

นาย อธิพล ขวาลวิวัฒน์

ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2561

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอการออกแบบเครื่องรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยทำการควบคุมผ่านวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าให้แก่ วงจรกระตุ้นสำหรับขดลวดสนาม โดยในการควบคุมวงจรทอนระดับจะกระทำโดยการวัดค่าแรงดันไลน์ของระบบไฟฟ้าเป็นแรงดันอ้างอิงและเปรียบเทียบกับค่าแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบควบคุมชนิดพี-ไอ เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมและถูกแปลงเป็นสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม เพื่อขับสวิทช์ของวงจรทอนระดับ ในโครงการนี้จะทำการทดลองโดยอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ TMS320F2812

# AN AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR FOR A SYNCHRONOUS GENERATOR

Mr.Kollawat Kitkannukul

Mr.Theptada Songphasuk

Mr.Theerapon Chawanviwat

Asst.Prof.Dr.Warachart Suwan-ngam Supervisor

Year 2018

## Abstract

This thesis presents the design of an automatic voltage regulator for a synchronous generator. The chopper circuit is used to control the voltage supplied to an excitor of the generator. In this project, the two grid line voltages and the generator terminal voltages are measured for calculating the amplitude of the grid and terminal voltage vectors. The amplitudes are then compared, and the error is fed to the PI controller. The output signal is converted to a PWM signal to drive the power switch of the chopper circuit. In this project, the designed is implemented by using the TI TMS320F2812 digital signal controller.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการสนับสนุนของผู้มีพระคุณหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ให้ประสบการณ์และความรู้ในการดำเนินโครงการนี้ ทั้งในเรื่องแนวทางการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงาน รวมถึงดูแล และให้คำแนะนำเกี่ยวกับการทำการทดลอง อีกทั้งยังเอื้ออำนวยห้องปฏิบัติการ ECC-406 และอุปกรณ์ต่างๆที่จำเป็นอย่างมากในโครงการขั้นนี้

อนึ่งขอขอบพระคุณกำลังใจจากครอบครัวที่ช่วยสนับสนุนในการทำงานในครั้งนี้ ไม่ว่าจะเป็นการให้คำแนะนำ รวมไปถึงการให้คำปรึกษา และเป็นที่พึ่งทางใจซึ่งทำให้การทำปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณนางสาวกัลยกร ประภารัตน์ที่ช่วยให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาทั้งในด้านการทฤษฎี และการปฏิบัติ รวมไปถึงการให้กำลังใจอันเป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้ในการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	2
1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	4
1.7 การจัดการโครงสร้างของเนื้อหาภายในปริญญานิพนธ์	4
บทที่ 2 ทฤษฎีการขนานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส และการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์ผ่านการกระตุ้นขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส	5
2.1 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า	5
2.1.1 เงื่อนไขการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า	5
2.1.2 ขั้นตอนการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า	5
2.1.3 ขั้นตอนการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า	6
2.1.4 การทดสอบการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าด้วยหลอดไฟ	6
2.2 วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า หรือชอปเปอร์	7
2.3 การสวิตชิงแบบพีดับเบิลยูเอ็ม	9
2.4 การปรับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของขดลวดอาร์เมเจอร์ผ่านการกระตุ้นขดลวดสนาม	11
2.5 ระบบควบคุม	12
2.5.1 การควบคุมแบบพี	13
2.5.2 การควบคุมแบบไอ	13
2.6 บทสรุป	13
บทที่ 3 ทฤษฎีกรอบอ้างอิง อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ และการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส	14
3.1 บทนำ	14
3.2 ทฤษฎีกรอบอ้างอิง	14
3.2.1 การแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสเป็นกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง	15
3.2.2 การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเป็นกรอบอ้างอิงหมุน	17
3.2.3 การแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสเป็นกรอบอ้างอิงหมุน	18

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	19
3.3.1 การกระตุ้นตัวเอง (Self-excited (shunt))	19
3.3.2 การกระตุ้นโดยอาศัยระบบเสริมการกระตุ้น (Excitation boost system (EBS))	19
3.3.3 การกระตุ้นโดยอาศัยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet generator (PMG))	20
3.3.4 การกระตุ้นโดยอาศัยขดลวดช่วย (Auxiliary winding (AUX))	21
3.4 วิธีการกระตุ้นที่ใช้ในการทดลอง	21
3.5 บทสรุป	22
<b>บทที่ 4 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์</b>	<b>23</b>
4.1 บทนำ	23
4.2 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์	23
4.3 บทสรุป	28
<b>บทที่ 5 การจัดเตรียมอุปกรณ์การทดสอบ</b>	<b>29</b>
5.1 บทนำ	29
5.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นที่ขั้วขดลวดสนามกับ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขดลวดอาร์เมเจอร์	29
5.3 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นที่ขั้วขดลวดสนามกับ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขดลวดอาร์เมเจอร์	29
5.4 วิธีการทดลองการควบคุมการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	31
5.5 การทดสอบการควบคุมการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	36
5.6 สรุปวิธีการทดลองการควบคุมการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	38
5.7 บทสรุป	39
<b>บทที่ 6 ผลการทดลอง</b>	<b>40</b>
6.1 ผลการทดลองช่วงก่อนการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า	40
6.2 ผลการทดลองช่วงการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า	42
6.3 บทสรุป	43
<b>บทที่ 7 สรุปและข้อเสนอแนะ</b>	<b>44</b>
7.1 สรุปผล	44
7.2 ข้อเสนอแนะ	45
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>46</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>47</b>
ภาคผนวก ก. รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	48
ภาคผนวก ข. วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า, ส่วนวงจรกำลัง และส่วนวงจรควบคุม	53
<b>ประวัติผู้เขียน</b>	<b>66</b>

## สารบัญญรภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเมื่ออยู่ในระบบไฟฟ้า	5
2.2 การทดสอบการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าด้วยหลอดไฟ	6
2.3 วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า	7
2.4 วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าในสภาวะปิดสวิตช์	8
2.5 วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าในสภาวะเปิดสวิตช์	8
2.6 สัญญาณ PWM โดยการเปรียบเทียบสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง $v_{control}$ กับสัญญาณพาหะ $v_{st}$	10
2.7 การกระตุ้นขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	11
2.8 (ก) ไดอะแกรมระบบควบคุมแบบวงปิด (ข) ไดอะแกรมระบบควบคุมแบบแอนตี้-ไวנדอัป	12
3.1 เครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดโรเตอร์ขั้วยื่น (Salient Pole Rotor)	14
3.2 ไดอะแกรมการแปลงกรอบอ้างอิงสามเฟสไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่งและการแปลงกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงหมุน	15
3.3 สัญญาณในกรอบอ้างอิงสามเฟส (ก) รูปคลื่นสัญญาณสามเฟส a-b-c (ข) ไดอะแกรมเวกเตอร์ a-b-c	15
3.4 สัญญาณในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง (ก) รูปคลื่นสัญญาณหยุดนิ่ง $dq^s$ (ข) ไดอะแกรมเวกเตอร์ $dq^s$	16
3.5 สัญญาณในกรอบอ้างอิงหมุน (ก) รูปคลื่นสัญญาณกรอบอ้างอิงหมุน $dq^r$ (ข) ไดอะแกรมเฟสเซอร์ $dq^r$	17
3.6 ไดอะแกรมเฟสเซอร์ของกรอบอ้างอิงสามเฟส a-b-c, กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง $dq^s$ และกรอบอ้างอิงหมุน $dq^r$	18
3.7 แผนผังแสดงการกระตุ้นแบบ Self-excited (shunt)	19
3.8 แผนผังแสดงการกระตุ้นแบบ Excitation boost system (EBS)	20
3.9 แผนผังแสดงการกระตุ้นแบบ Permanent magnet generator (PMG)	20
3.10 แผนผังแสดงการกระตุ้นแบบ Auxiliary winding (AUX)	21
3.11 แผนผังแสดงการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ใช้ในโครงการงานนี้	22
4.1 ไดอะแกรมการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขดลวดอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	23
4.2 ขั้นตอนการวัดขนาดแรงดันไฟฟ้าของทั้งระบบไฟฟ้า และขั้วอาร์เมเจอร์	24
4.3 ขั้นตอนการส่งสัญญาณขนาดแรงดันไฟฟ้าของทั้งระบบไฟฟ้า และขั้วอาร์เมเจอร์ที่วัดได้ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการคำนวณ	25
4.4 ขั้นตอนการส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ผ่านการแปลงกรอบอ้างอิง และหาขนาดแล้วผ่านการคำนวณสมการของวงจรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อองความถี่	26

## สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ขั้นตอนการส่งสัญญาณที่ผ่านการกรองความถี่แล้วไปเปรียบเทียบกับผ่านระบบควบคุมแบบแอนตี้-ไวบรเคชั่นเพื่อนำไปสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม	27
4.6 ขั้นตอนการส่งสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มไปยังมอสเฟตที่อยู่ภายในวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อควบคุมการทำงานของวงจรถ่วง	28
5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นกับแรงดันไลน์	30
5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นกับแรงดันไลน์	30
5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้น	30
5.4 บอร์ด TMS320F2812 DSP	31
5.5 อุปกรณ์ Emulator ที่ใช้ในการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับไมโครคอนโทรลเลอร์	32
5.6 สวิตช์ Circuit Breaker ที่ต่ออยู่กับอุปกรณ์ Relay และ Sensors	32
5.7 สวิตช์ Circuit Breaker ที่ใช้ควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าจาก (ก) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ข) ระบบไฟฟ้า	33
5.8 อุปกรณ์ไดรฟ์ที่ใช้ในการควบคุมต้นกำลังทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	33
5.9 สถานะการเปิดการทำงานสวิตช์ B10 เพื่อเปิดใช้สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่ตั้งไว้	34
5.10 สถานะการเปิดการทำงานสวิตช์ B8 เพื่อเปิดใช้ตัวควบคุมแบบพีโอ	34
5.11 (ก) มัลติมิเตอร์ที่ใช้วัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบไฟฟ้า (ข) อุปกรณ์ Magnetic Contactor ที่ใช้ในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า	35
5.12 แผนผังแสดงช่วงการเปิดการทำงานค่าตั้งต้นที่ตั้งไว้ของพีดับเบิลยูเอ็ม	36
5.13 แผนผังแสดงช่วงการเปิดการทำงานการเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบพีโอ	37
5.14 แผนผังแสดงการควบคุมการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	38
6.1 ผลการทดลองแสดง (ก) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า (ข) แอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าในแนวแกน d ของระบบกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งช่วงการเปิดการทำงานสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม	41
6.2 ผลการทดลองแสดง (ก) สัญญาณแรงดันไฟฟ้า (ข) แอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าในแนวแกน d ของระบบกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งในช่วงการเปิดการทำงานการเปรียบเทียบ PI	42
6.3 ผลการทดลองแสดง (ก) สัญญาณแรงดันไฟฟ้า (ข) มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าในแนวแกน d ของระบบกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง ในช่วงการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า-ซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า	43
ข.1 วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า (ก) ไดอะแกรมวงจรถ่วงระดับแรงดันไฟฟ้า, (ข) รูปขั้วงานวงจรถ่วงระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบจริง	54

## สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
ข.2	อุปกรณ์ป้องกันวงจรกำลัง	55
ข.3	วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง	56
	(ก) ไตอะแกรมวงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด+15 V -5 V,	
	(ข) รูปวงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด +5 V,	
	(ค) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (switching power supply) ขนาด +5 V,	
	(ง) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (switching power supply) ขนาด +15 V	
ข.4	วงจรขั้วเกต (ก) ไตแกรมวงจรขั้วเกต, (ข) รูปชิ้นงานวงจรขั้วเกต	57
ข.5	บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMS320F2812	58
ข.6	วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า (ก) ไตอะแกรมวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า,	59
	(ข) รูปชิ้นงานวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า	



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินโครงการ	3
5.1 ผลการกระตุ้นที่ชั่วของขดลวดสนามที่สเตเตอร์และค่าแรงดันไฟฟ้าจาก ขดลวดอาร์เมเจอร์	29
ก.1 รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	49



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าในทางปฏิบัติพบปัญหาการเชื่อมต่อที่มีความซับซ้อน เนื่องจากการที่จะเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าได้นั้น จำเป็นต้องปรับเงื่อนไข ดังต่อไปนี้ ขนาดของแรงดันไฟฟ้า ลำดับเฟสของแรงดันไฟฟ้า มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้า และความถี่ของแรงดันไฟฟ้า โดยที่ให้ครบทุกเงื่อนไขของทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าที่กล่าวมาข้างต้นเสียก่อน

ในวิชาปฏิบัติการทางวิศวกรรมไฟฟ้าของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นต้นกำลังทางกล ในการดำเนินการจะใช้หม้อแปลงอัตโนมัติชนิดปรับค่าได้ในการปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้กระตุ้นขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และมีการปรับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสด้วยการปรับความเร็วของต้นกำลังทางกลซึ่งปรับจากความต้านทานของขดลวดสนามของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จะเห็นได้ว่าการดำเนินการต้องอาศัยผู้ที่มีความชำนาญในการปรับค่าเนื่องจากทำได้ค่อนข้างยาก

โดยในโครงงานนี้จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ(Induction motor) เป็นต้นกำลังทางกล เพื่อทำการขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส(Synchronous generator) และช่วยปรับความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสให้เท่ากับความถี่ของระบบไฟฟ้า แล้วใช้อุปกรณ์พาวเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ในการลดทอนระดับของแรงดันไฟฟ้า

จากที่กล่าวมาข้างต้น จึงมีการศึกษาวิธีการทดสอบเงื่อนไขในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และระบบไฟฟ้าทั้ง 4 เงื่อนไข รวมไปถึงลักษณะของวงจรปรับทอนระดับแรงดันไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ในโครงงาน ซึ่งจะมีการนำขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และระบบไฟฟ้ามาเปรียบเทียบกันโดยใช้อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อสร้างสัญญาณพีดีบีเอสเอ็ม ซึ่งจะนำไปใช้ควบคุมการเปิด-ปิดของสวิตช์กำลังในวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า จากนั้นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ผ่านการลดทอนแรงดันจะถูกนำไปกระตุ้นขดลวดสนามในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ทั้งนี้เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และระบบไฟฟ้าให้มีขนาดเท่ากัน ซึ่งจะสามารถทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วขณะลดอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสผ่านอุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ
2. เพื่อศึกษาการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า
3. เพื่อศึกษาการทำงานของวงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้าหรือชอปเปอร์
4. เพื่อศึกษาการทำงาน และการควบคุมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

## 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการงาน

โครงการงานนี้มีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังได้แก่ มอสเฟต(Mosfet) เพื่อเป็นสวิตช์สำหรับวงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะทำการปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้กระตุ้นขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โครงการงานนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสร้างสัญญาณพีดีบีเบิลยูเอ็มเพื่อควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าผ่านสวิตช์กำลังในวงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้า

## 1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการงาน

1. ศึกษาและค้นคว้าความรู้ที่เกี่ยวข้องกับโครงการงาน อาทิเช่น ทฤษฎีการแปลงกรุปอ้างอิง , ทฤษฎีการขนานกันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า, วงจรถอนแรงดันไฟฟ้า(Chopper circuit) , การกระตุ้นขดลวดสนาม และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่จำเป็นสำหรับโครงการงาน
2. ทำการจำลองการทดลองด้วยการปฏิบัติจริงแบบควบคุมด้วยมือ อาทิเช่น การปรับกระแสกระตุ้นขดลวดสนามเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ซัวร์เมเจอร์
3. จัดเตรียมอุปกรณ์ที่จำเป็นสำหรับทำโครงการงาน พร้อมทั้งศึกษาวิธีการใช้งาน

## 1.5 แผนการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงการ

การดำเนินงาน	เดือน									
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
ทำความเข้าใจในส่วน ของหัวข้อโครงการ	■									
ศึกษาและค้นคว้า ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับ โครงการ		■	■	■						
วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ จากการค้นคว้า		■	■	■						
ทำการจำลองผลทาง คอมพิวเตอร์					■	■				
จัดเตรียมอุปกรณ์ และลงมือสร้างวงจรที่ ใช้ในโครงการ						■	■			
เขียนโปรแกรมที่ใช้ ควบคุมการทำงาน						■	■	■		
ทดสอบ บันทึกผล และแก้ไข								■	■	
จัดทำรูปเล่มปริญา นิพนธ์									■	
สรุปผลการทำ โครงการ									■	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ความรู้เกี่ยวกับเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า
2. ความรู้ในเรื่องของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัส อาทิเช่น การทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และหลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงโครนัส
3. การทบทวนความรู้จากบทเรียนต่างๆ พร้อมทั้งมีการประยุกต์ใช้ความรู้ดังกล่าวเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อโครงการ
4. ความรู้เกี่ยวกับวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า อาทิเช่น ลักษณะของวงจร , อุปกรณ์ต่างๆ ที่อยู่ภายใน รวมถึงหลักการทำงานของวงจร

## 1.7 การจัดการโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญญานิพนธ์

1. บทที่ 1 บทนำ
2. บทที่ 2 ทฤษฎีการขนานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส และการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์ผ่านการกระตุ้นขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส
3. บทที่ 3 ทฤษฎีกรอบอ้างอิง อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ และการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส
4. บทที่ 4 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์
5. บทที่ 5 การเตรียมอุปกรณ์การทดสอบ
6. บทที่ 6 ผลการทดลอง
7. บทที่ 7 สรุปและข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

### ทฤษฎีการขนานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์ผ่านการกระตุ้นขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

#### 2.1 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า [1]

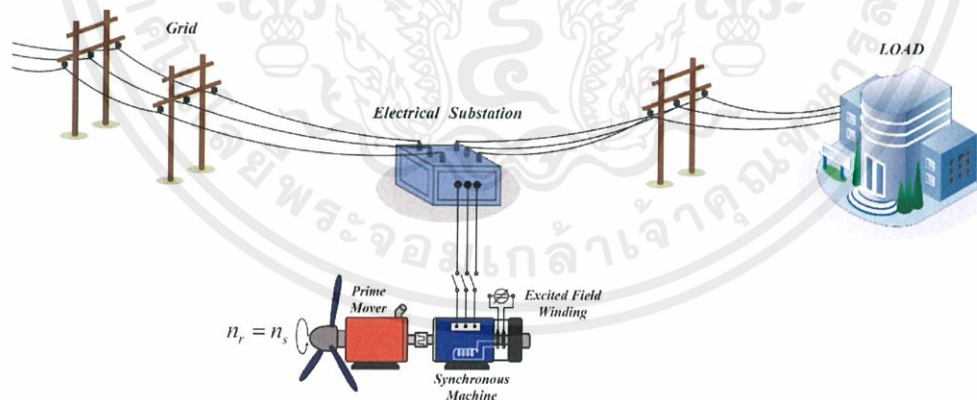
การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าหรือการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า สาเหตุที่ต้องทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า เพราะต้องการรองรับการจ่ายโหลดที่เพิ่มมากขึ้น และช่วงเวลาที่ทำการซ่อมบำรุงหรือเกิดเหตุขัดข้อง ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถทำงานได้ก็จำเป็นต้องขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าไปเพื่อทดแทนการจ่ายโหลดปกติ

##### 2.1.1 เงื่อนไขการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า

- 1) ขนาดของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องเท่ากับระบบไฟฟ้า
- 2) ลำดับเฟสของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องตรงกับระบบไฟฟ้า
- 3) มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องตรงกับระบบไฟฟ้า
- 4) ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องเท่ากับระบบไฟฟ้า

##### 2.1.2 ขั้นตอนการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า

การทดสอบการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า โดยมีต้นกำลังทางกลเป็นตัวขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายไฟฟ้าให้แก่ระบบไฟฟ้า ตามรูปที่ 2.1



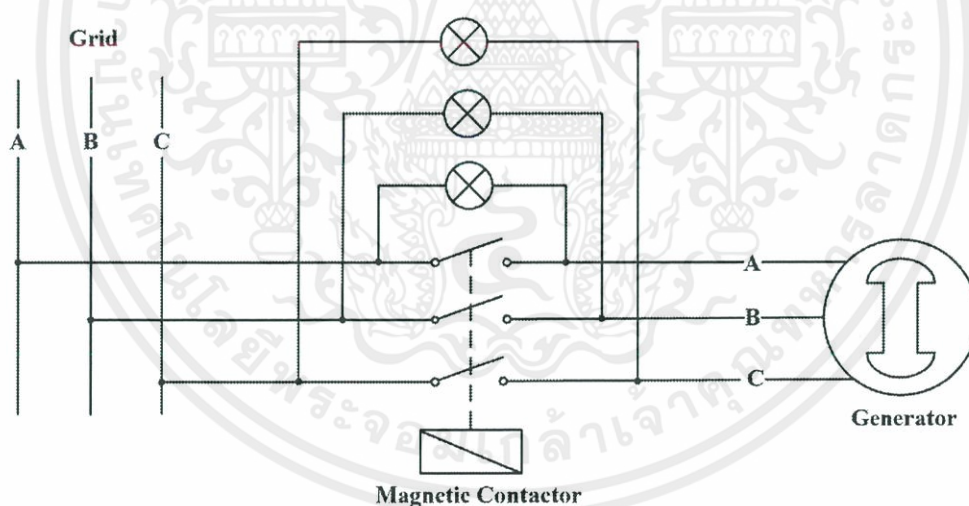
รูปที่ 2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเมื่ออยู่ในระบบไฟฟ้า

### 2.1.3 ขั้นตอนการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า

- 1) ปรับความเร็วของต้นกำลังไฟฟ้า (Prime mover) และวัดความถี่ที่ขั้วขดลวดสเตเตอร์ (stator winding) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีค่าเท่ากับความถี่ของระบบไฟฟ้า
- 2) ตรวจสอบลำดับแต่ละเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องตรงกับระบบไฟฟ้า
- 3) ปรับกระแสสนาม (Field current) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยให้ขนาดแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่ากับขนาดแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า
- 4) ตรวจสอบมุมเฟสแต่ละเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องตรงกับระบบไฟฟ้า
- 5) ตรวจสอบเงื่อนไขการไขการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าจนตรงกันทุกเงื่อนไข หรือสามารถทดสอบด้วยหลอดไฟ เมื่อทุกเงื่อนไขตรงกันจึงทำการปิดสวิตช์ให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายไฟฟ้าให้แก่ระบบไฟฟ้า

### 2.1.4 การทดสอบการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าด้วยหลอดไฟ

การทดสอบการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าด้วยหลอดไฟ โดยต่อหลอดไฟक्रमแมกเนติก คอนแทคเตอร์ ตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การทดสอบการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าด้วยหลอดไฟ

กรณีที่ 1 ถ้าขนาดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าไม่เท่ากันหรือ กรณีนี้ให้ลำดับเฟส มุมเฟสและความถี่เท่ากัน ผลที่แรงดันไฟฟ้าไม่เท่ากันจะทำให้หลอดไฟทั้งสามดวงสว่าง ความสว่างขึ้นอยู่กับผลต่างแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้า จึงต้องปรับขนาดแรงดันให้เท่ากัน

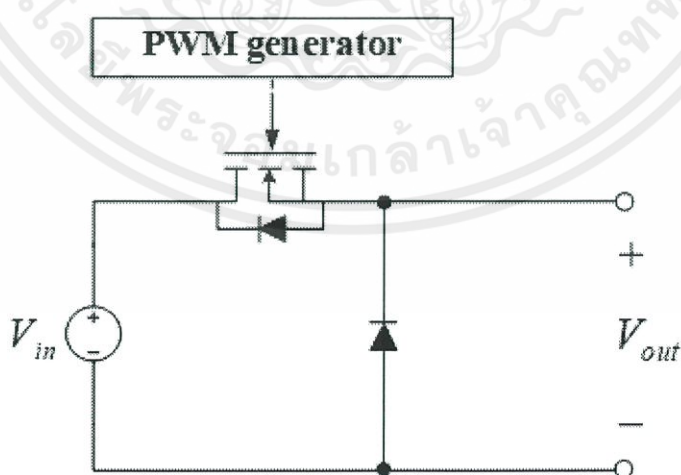
กรณีที่ 2 ถ้าลำดับเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าไม่ตรงกัน สมมติให้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีลำดับเฟสเป็น ACB ส่วนระบบไฟฟ้ามีลำดับเฟสเป็น ABC ในกรณีนี้ให้ขนาดแรงดัน มุมเฟสและความถี่เท่ากัน ผลที่ลำดับเฟสไม่ตรงกัน ทำให้มีหลอดไฟสว่างหนึ่งดวงและหลอดไฟดับสองดวง จึงต้องทำการสลับลำดับเฟสให้ตรงกัน

กรณีที่ 3 ถ้ามุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าไม่ตรงกัน ในกรณีนี้ให้ขนาดแรงดัน ลำดับเฟสและความถี่เท่ากัน ผลที่มุมเฟสไม่ตรงกัน ทำให้หลอดไฟทั้งสามดวง ติดๆ ดับๆ สลับกันไปเรื่อยๆ

กรณี 4 ถ้าความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าไม่เท่ากัน ในกรณีนี้ให้ขนาดแรงดัน ลำดับเฟสและมุมเฟสเท่ากัน ผลจากการที่ความถี่ไม่เท่ากัน ทำให้หลอดไฟทั้งสามดวงกระพริบพร้อมกัน เพราะจังหวะที่เวกเตอร์แรงดันทับกันนั้นหลอดไฟดับ แต่จังหวะที่เวกเตอร์แรงดันไม่ทับกัน หลอดไฟก็จะสว่าง ดังนั้นจังหวะการกระพริบขึ้นกับผลต่างของความถี่ของเครื่องกำเนิดกับระบบไฟฟ้า

## 2.2 วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า หรือชอปเปอร์ [2]

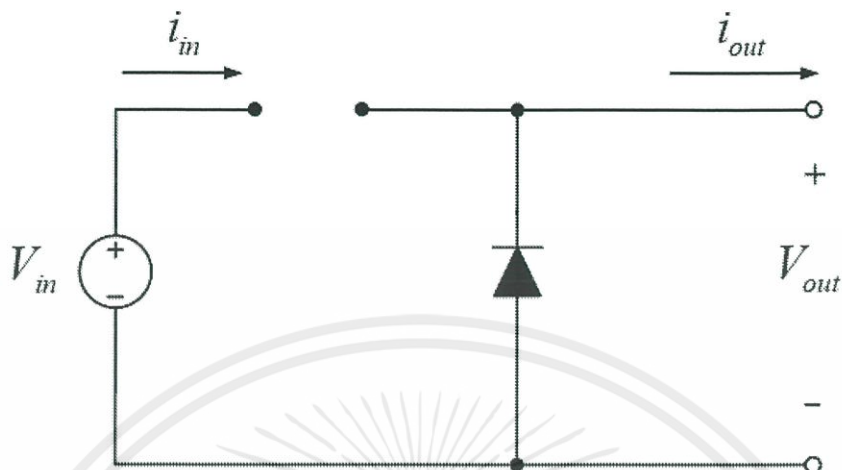
วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า หรือวงจรชอปเปอร์ อาศัยหลักการเปิดและปิดของสวิตซ์ในการลดทอนแรงดันไฟฟ้าให้ต่ำลง โดยมีแหล่งจ่ายเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และมีมอสเฟต หรือสามารถใช้ไอจีบีที(IGBT)แทนได้ ทำหน้าที่เป็นสวิตซ์ ซึ่งจะถูควบคุมด้วยสัญญาณพีดีบีเอสเอ็มดังจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป โดยรูปคลื่นแรงดันขาออกของวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นพัลส์



รูปที่ 2.3 วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า

เมื่อปิดสวิตช์ เวลาที่ใช้เป็นดังสมการที่ (2.1)

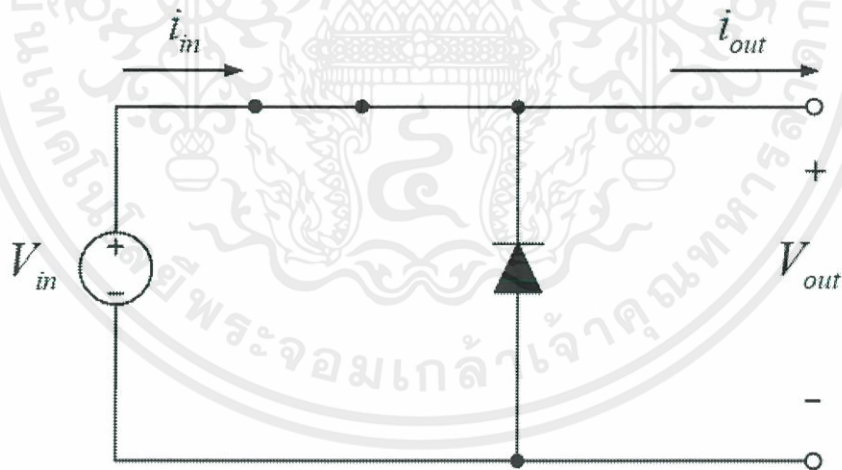
$$t_{off} = (1-D)T \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.4 วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าในสภาวะปิดสวิตช์

เมื่อเปิดสวิตช์ เวลาที่ใช้เป็นดังสมการที่ (2.2)

$$t_{on} = DT \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.5 วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าในสภาวะเปิดสวิตช์

หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าขาเข้าและขาออก ได้ดังสมการที่ (2.3)

$$D = \frac{V_{out}}{V_m} \quad (2.3)$$

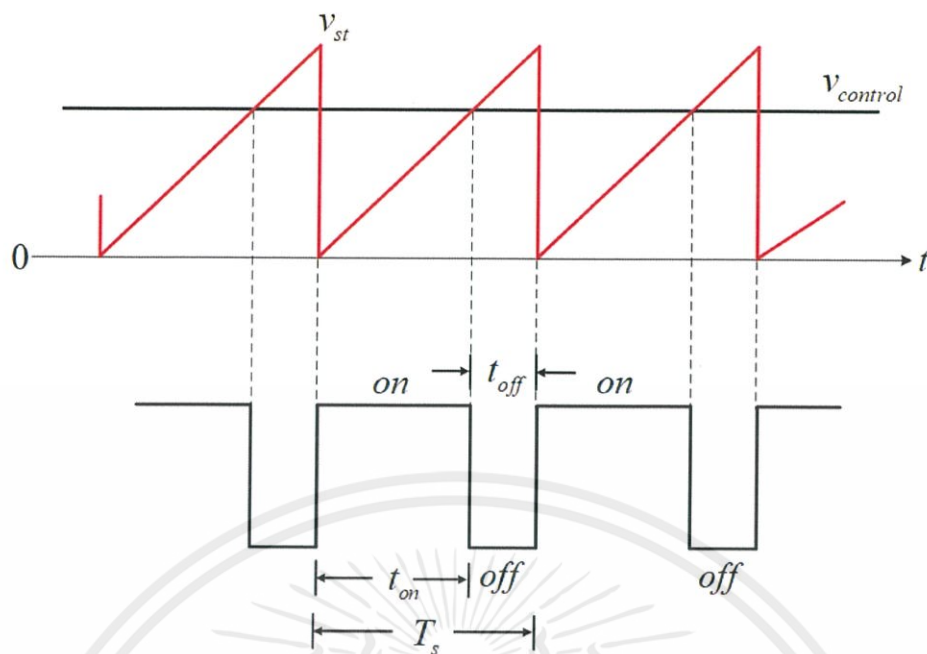
และสมการค่าเฉลี่ยของแรงดันขาออกในหนึ่งคาบเวลา ได้ดังสมการที่ (2.4)

$$V_{out} = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_m dt = DV_m \quad (2.4)$$

### 2.3 การสวิตซ์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม (Pulse Width Modulation) [2]

สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม เป็นการสร้างสัญญาณควบคุม เพื่อไปควบคุมสวิตซ์ โดยการสร้างสัญญาณสี่เหลี่ยม โดยจะเป็นสัญญาณเปิด-ปิดสวิตซ์ที่มีความถี่สูง ซึ่งสามารถปรับ Duty Cycle ได้เพื่อกำหนดช่วงเวลาที่สวิตซ์จะนำกระแสและช่วงเวลาที่สวิตซ์ไม่นำกระแส หาก Duty Cycle มีค่ามาก ช่วงเวลาในการนำกระแสก็จะมีค่ามากเช่นกัน และหาก Duty Cycle มีค่าน้อย ช่วงเวลาในการนำกระแสก็จะมีค่าน้อยตาม กล่าวคือหาก Duty Cycle เป็น 100% หมายความว่า สวิตซ์จะอยู่ในสภาวะนำกระแสตลอดการทำงาน และหาก Duty Cycle เป็น 0% สวิตซ์จะไม่มีช่วงเวลาใดเลยที่สวิตซ์จะนำกระแส

การสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม สร้างได้โดย การนำสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง  $v_{control}$  มาเปรียบเทียบกับสัญญาณฟันเลื่อย  $v_{st}$  (Sawtooth Voltage) ซึ่งหากขนาดของสัญญาณควบคุมมากกว่าสัญญาณฟันเลื่อยจะได้ลอจิกสูง (Logic High) และหากขนาดของสัญญาณควบคุมน้อยกว่าสัญญาณฟันเลื่อยจะได้ลอจิกต่ำ (Logic Low) ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งสามารถปรับค่า Duty Cycle ได้จากการปรับระดับขนาดของสัญญาณควบคุม  $v_{control}$  โดยความถี่ 1 Hz คือการที่คลื่นใช้เวลา 1 วินาที ในการเคลื่อนให้ครบ 1 รอบ



รูปที่ 2.6 สัญญาณ PWM โดยการเปรียบเทียบสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง  $v_{control}$  กับสัญญาณ  
พหุระ  $v_{st}$

ซึ่งค่า Duty Cycle คืออัตราส่วนระหว่างเวลาที่สวิตช์อยู่ในสภานำกระแสและคาบเวลาที่ใช้ในการสวิตช์ซึ่งทั้งหมด (เวลาที่คลื่นใช้ในการเคลื่อนให้ครบ 1 ลูก) ดังสมการที่ (2.5)

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (2.5)$$

จากสมการที่ (2.5) จะได้

$$t_{on} = DT_s \quad (2.6)$$

$$t_{off} = T_s(1-D) \quad (2.7)$$

โดย  $T_s$  แทน คาบเวลาในการสวิตช์

$t_{on}$  แทน ช่วงเวลาที่สวิตช์อยู่ในสภานำกระแส

$t_{off}$  แทน ช่วงเวลาที่สวิตช์อยู่ในสภานำกระแส

และสามารถหาความถี่ของการสวิตช์ (Switching frequency) ได้จากสมการที่ (2.8)

$$f_s = \frac{1}{T_s} \quad (2.8)$$

โดย  $f_s$  แทน ความถี่ของการสวิตช์

$T_s$  แทน คาบเวลาในการสวิตช์

#### 2.4 การปรับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของขดลวดอาร์เมเจอร์ผ่านการกระตุ้นขดลวดสนาม

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะสามารถทำงานเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่อมีการกระตุ้นขดลวดสนามเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก และจำเป็นต้องมีกำลังทางกลเพื่อที่จะขับให้โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบเท่ากับความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed) ดังสมการที่ (2.9)

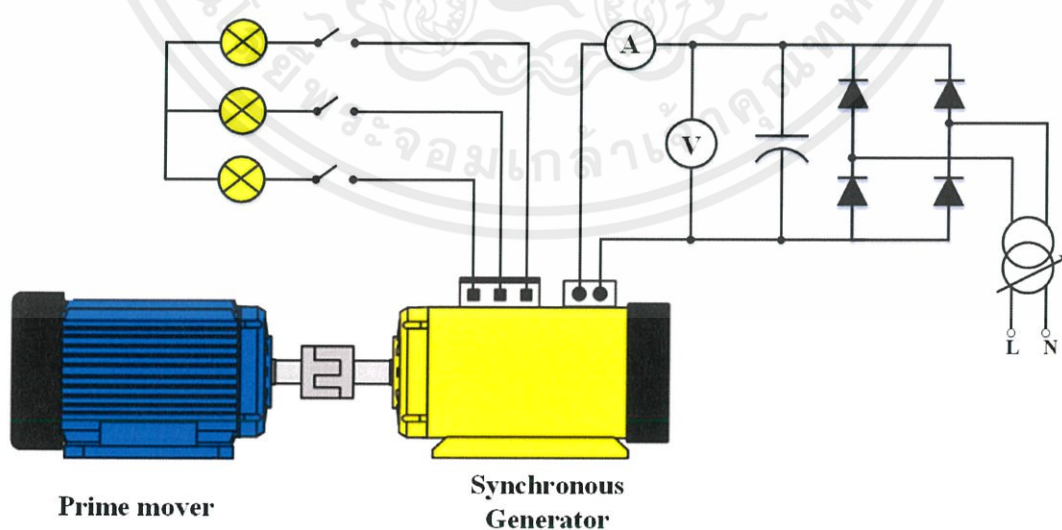
$$n_s = \frac{120f}{P} \quad (2.9)$$

โดย  $n_s$  แทน ความเร็วซิงโครนัส ; รอบต่อนาที (rpm)

$f$  แทน ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า (Hz)

$P$  แทน จำนวนขั้วแม่เหล็ก

ในส่วนของขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากขดลวดอาร์เมเจอร์อันเป็นหนึ่งในเงื่อนไขของการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้านั้นสามารถควบคุมผ่านกระแสกระตุ้นที่จ่ายให้กับขดลวดสนาม ดังรูปที่ 2.7

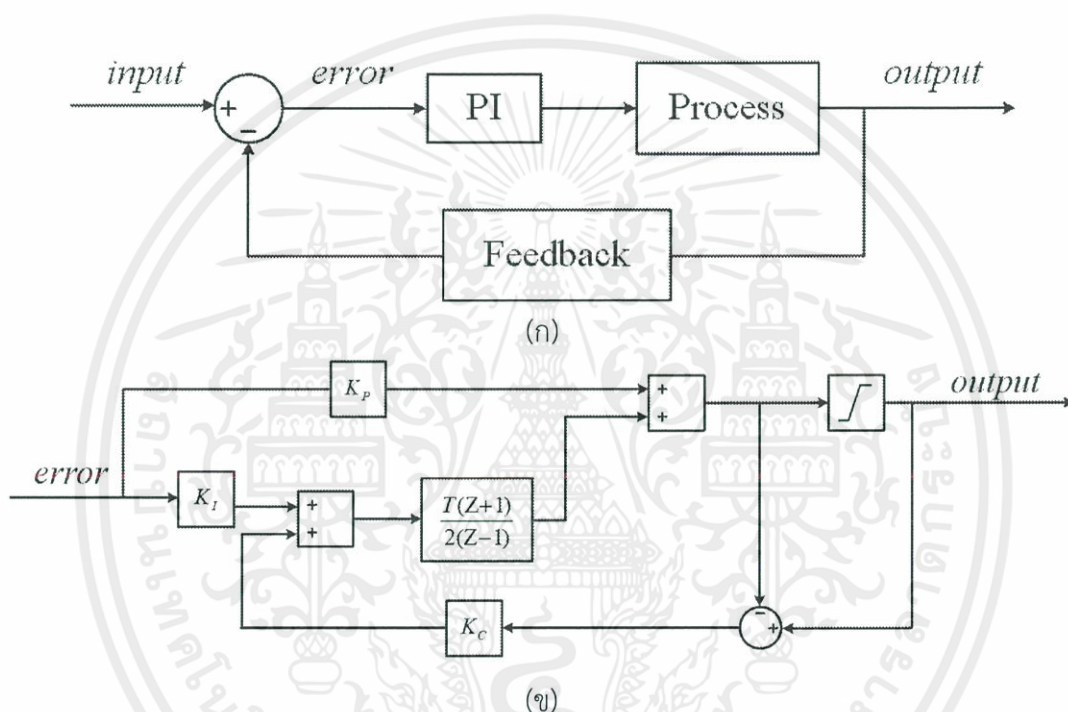


รูปที่ 2.7 การกระตุ้นขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

## 2.5 ระบบควบคุม [3]

ระบบควบคุม คือ ระบบที่ทำการจัดองค์ประกอบส่วนต่างๆ ให้มีการทำงานสัมพันธ์กันเพื่อให้ระบบทำงานตามที่ต้องการ และถูกนำมาใช้ในระบบต่างๆ เช่น การควบคุมการผลิตในโรงงาน เป็นต้น โดยสามารถแบ่งระบบควบคุมออกได้ 2 แบบ คือ ระบบควบคุมแบบวงเปิด และระบบควบคุมแบบวงปิด

ระบบควบคุมแบบปิด(Feedback Control System) คือ ระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับสัญญาณเอาต์พุต(Output) เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับค่าอ้างอิง โดยผลต่างระหว่างสองค่านี้เองเรียกว่า ความผิดพลาด(Error) ตัวควบคุมจะทำการแก้ไขความผิดพลาดนั้นให้มีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 2.8 (ก) ไดอะแกรมระบบควบคุมแบบวงปิด  
(ข) ไดอะแกรมระบบควบคุมแบบแอนตี้-ไวנדอัป

จากรูปที่ 2.8 (ข) จะพบว่ามีการใช้ตัวควบคุมแบบพี และตัวควบคุมแบบไอเข้ามาในระบบควบคุมด้วย อีกทั้งในระบบควบคุมนี้ยังมีการป้องกันการอิมิตัวของระบบ หรือกล่าวได้ว่าระบบนี้จะทำงานเป็นเชิงเส้นตลอด ระบบควบคุมชนิดนี้ เรียกว่า แอนตี้-ไวנדอัป (Anti-windup)

ระบบควบคุมแบบแอนตี้-ไวנדอัป เป็นระบบควบคุมที่ถูกใช้เพื่อป้องกันการอิมิตัวของสัญญาณขาเข้า หรือก็คือช่วยให้ระบบทำงานในช่วงเชิงเส้น โดยจะมีการจำกัดค่าสูงสุดและต่ำสุดของสัญญาณเอาต์พุต เนื่องจากหากเกิดการอิมิตัวของสัญญาณขาเข้าแล้วนั้น ระบบจะทำงานในช่วงไม่เป็นเชิงเส้นส่งผลให้ไม่สามารถทำการควบคุมค่าสัญญาณขาออกได้

### 2.5.1 การควบคุมแบบพี (Proportional Control, P-controller)

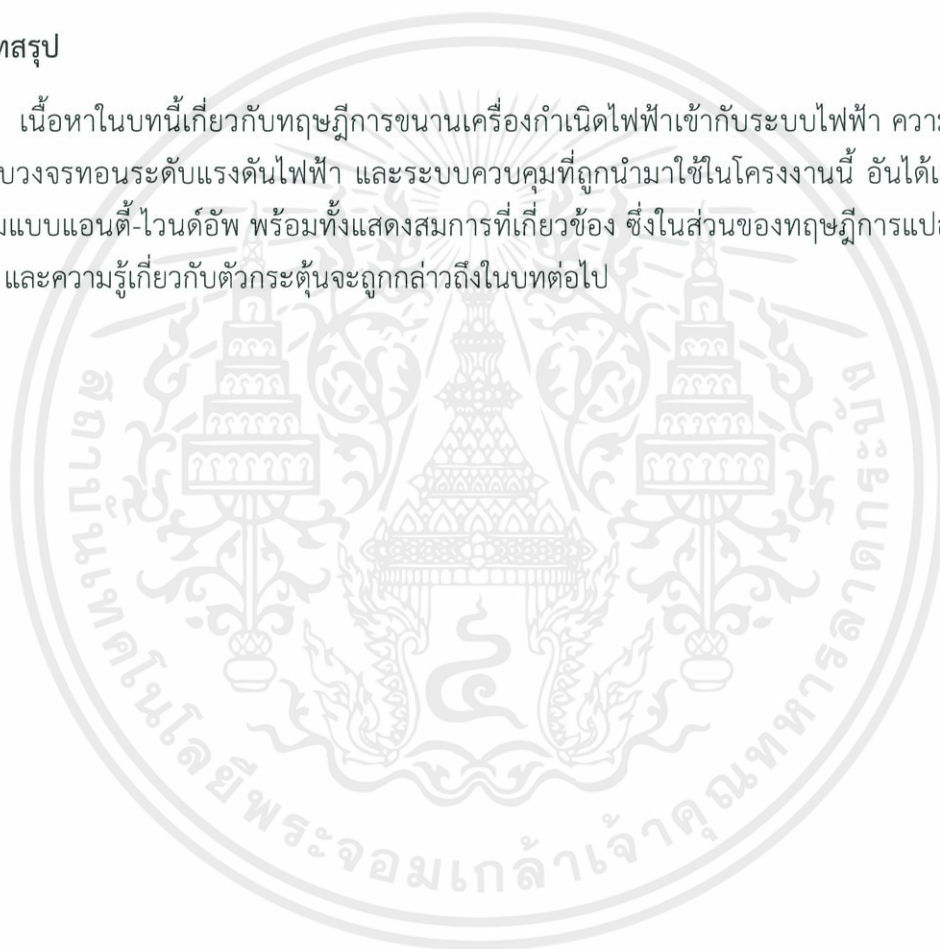
ตัวควบคุมแบบพี หรืออาจเรียกว่า “อัตราขยาย” โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบสัญญาณเอาต์พุตที่ได้กับสัญญาณอ้างอิง จะได้สัญญาณความผิดพลาดมาผ่านตัวควบคุมแบบพีซึ่งจะถูกคูณด้วยค่าคงที่  $K_p$  ดังนั้นสัญญาณที่ออกมาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสัญญาณความผิดพลาด

### 2.5.2 การควบคุมแบบไอ (Integral Control, I-controller)

ตัวควบคุมแบบไอ จะรวมสัญญาณความผิดพลาดในทุกช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนกลายเป็นความผิดพลาดรวม จากนั้นจะถูกคูณด้วยอัตราขยายแบบไอ

## 2.6 บทสรุป

เนื้อหาในบทนี้เกี่ยวกับทฤษฎีการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า และระบบควบคุมที่ถูกนำมาใช้ในโครงการนี้ อันได้แก่ระบบควบคุมแบบแอนตี้-ไวנדอัป พร้อมทั้งแสดงสมการที่เกี่ยวข้อง ซึ่งในส่วนของทฤษฎีการแปลงกรอบอ้างอิง และความรู้เกี่ยวกับตัวกระตุ้นจะถูกกล่าวถึงในบทต่อไป



### บทที่ 3

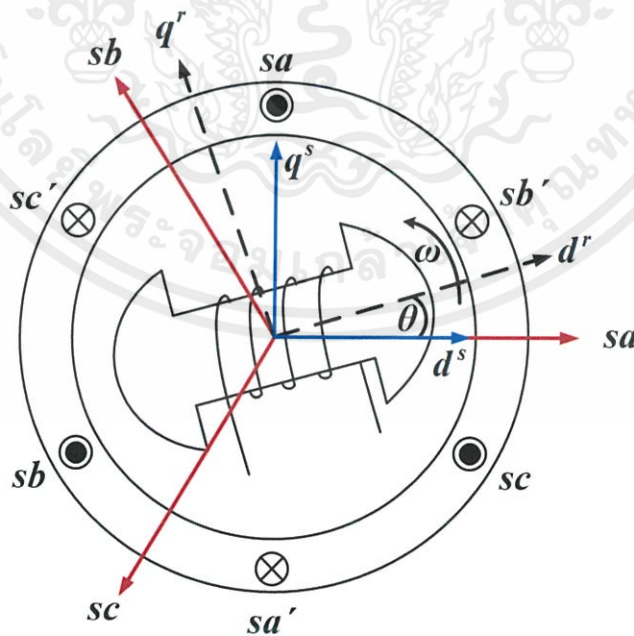
## ทฤษฎีกรอบอ้างอิง อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ และการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

### 3.1 บทนำ

บทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีกรอบอ้างอิง เช่น การแปลงกรอบอ้างอิงสามเฟสไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง และ การแปลงกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงหมุน สัญญาณพัลส์เบิกลูเอ็่ม (PWM) ระบบควบคุม และการกระตุ้นขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยปริยญา นินพธ์เล่มนี้มีใจความมุ่งเน้นไปที่การควบคุมการกระตุ้นขดลวดสนาม ซึ่งการควบคุมดังกล่าวจะ ควบคุมผ่านระบบควบคุมแบบวงปิดพีไอ

### 3.2 ทฤษฎีกรอบอ้างอิง

การควบคุมการทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส แบบขั้วยื่น (Salient Pole Rotor) ดัง รูปที่ 3.1 ต้องอาศัยหลักการของทฤษฎีกรอบอ้างอิง โดยจะต้องแปลงกรอบอ้างอิงสามเฟส เป็นกรอบ อ้างอิงหยุดนิ่ง และกรอบอ้างอิงหมุน ในการควบคุมตัวแปรของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส โดยด้านที่มี ช่องว่างอากาศน้อยหรือด้านมีขั้วยื่นออกมา กำหนดให้เป็นแกนตรง (Direct-axis or d-axis) และด้าน ที่มีช่องว่างอากาศมากจะกำหนดให้เป็นแกนตั้งฉาก (Quadrature-axis or q-axis) โดยแนวแกนจะ ตั้งฉากกับแกนตรงหรือทำมุมห่างกัน 90 องศา

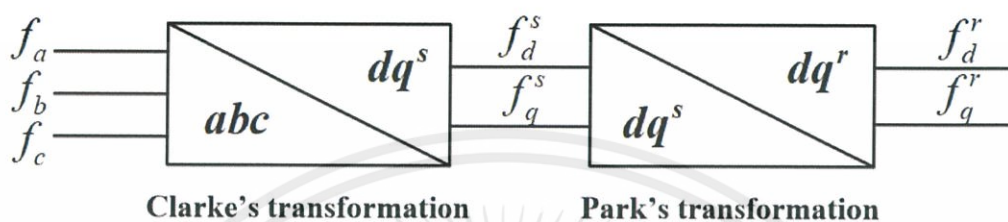


รูปที่ 3.1 เครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดโรเตอร์ขั้วยื่น (Salient Pole Rotor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการแปลงกรอบอ้างอิง (Reference frame transformation) โดยเป้าหมายในการเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณคลื่นให้เป็นสัญญาณเส้นตรงหรือสัญญาณที่มีค่าคงตัว มีขั้นตอนดังนี้

- 1) การแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสเป็นกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง
- 2) การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเป็นกรอบอ้างอิงหมุน
- 3) การแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสเป็นกรอบอ้างอิงหมุน

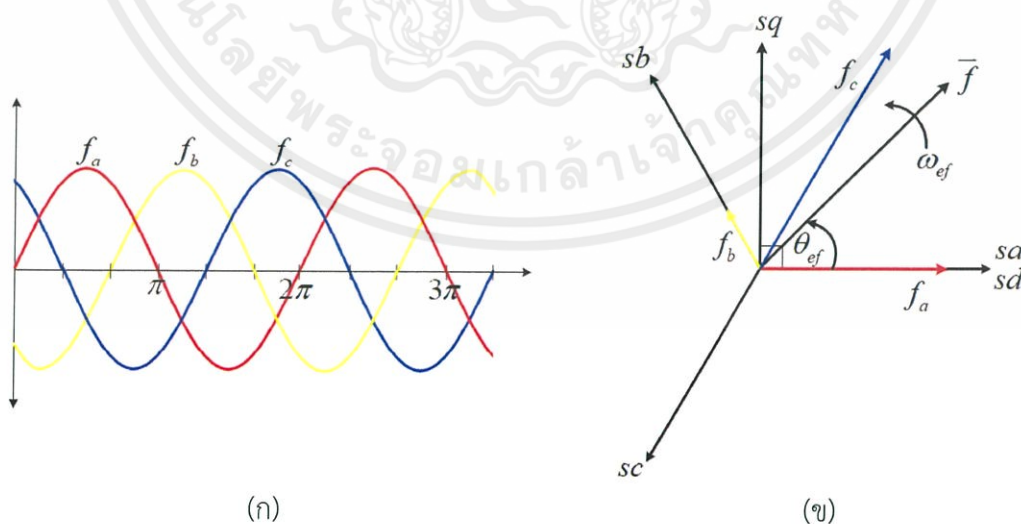


รูปที่ 3.2 ไดอะแกรมการแปลงกรอบอ้างอิงสามเฟสไปสู่กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง และการแปลงกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งไปสู่กรอบอ้างอิงหมุน

### 3.2.1 การแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสเป็นกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง

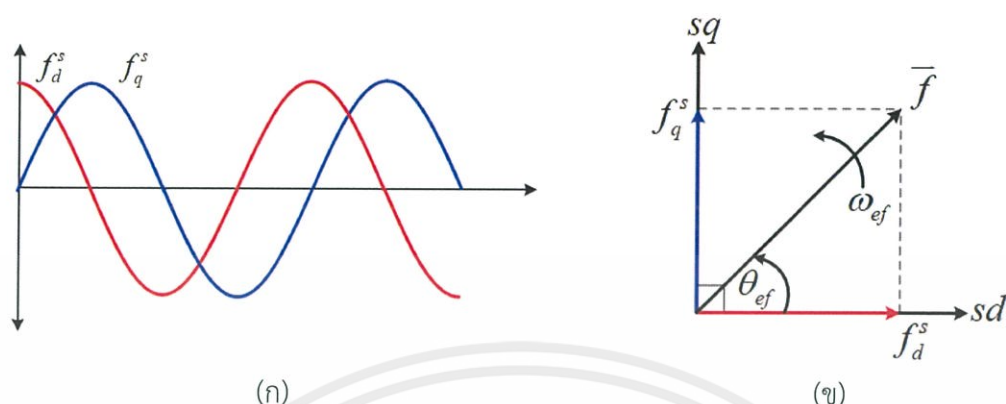
การแปลงกรอบอ้างอิงนี้จะแปลงรูปแบบสัญญาณคลื่นสามเฟสเป็นสองเฟส โดยสัญญาณสามเฟส a-b-c จะแปลงเป็น  $dq^s$  โดยสัญญาณที่แปลงได้  $dq^s$  จะมีมุมห่างกัน 90 องศาหรือตั้งฉากกัน แอมพลิจูดเท่ากัน และความถี่เท่ากัน

กรอบอ้างอิงสามเฟส ในรูปแบบของคลื่นสามเฟส



รูปที่ 3.3 สัญญาณในกรอบอ้างอิงสามเฟส (ก) รูปคลื่นสัญญาณสามเฟส a-b-c (ข) ไดอะแกรมเวกเตอร์ a-b-c

กรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง ในรูปแบบของคลื่นสองเฟส



รูปที่ 3.4 สัญญาณในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง (ก) รูปคลื่นสัญญาณหยุดนิ่ง  $dq^s$   
(ข) ไดอะแกรมเวกเตอร์  $dq^s$

การแปลงกรอบอ้างอิงสามเฟสเป็นกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง หรืออีกนัยหนึ่งเรียกว่าการแปลงของคลาร์ก (Clarke's transformation) โดยจะแปลงกรอบอ้างอิงสามเฟสเป็นกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งสองเฟสหรือกรอบอ้างอิงแบบสองแกนหยุดนิ่ง ตามสมการที่ (3.1)

$$\begin{bmatrix} f_d^s \\ f_q^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

โดย  $f$  เป็นค่าตัวแปรในกรอบอ้างอิง

การแปลงกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเป็นกรอบอ้างอิงสามเฟส เป็นการแปลงย้อนกลับของคลาร์ก (Inverse Clarke's transformation) โดยจะแปลงกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งสองเฟสเป็นกรอบอ้างอิงสามเฟส ตามสมการที่ (3.2)

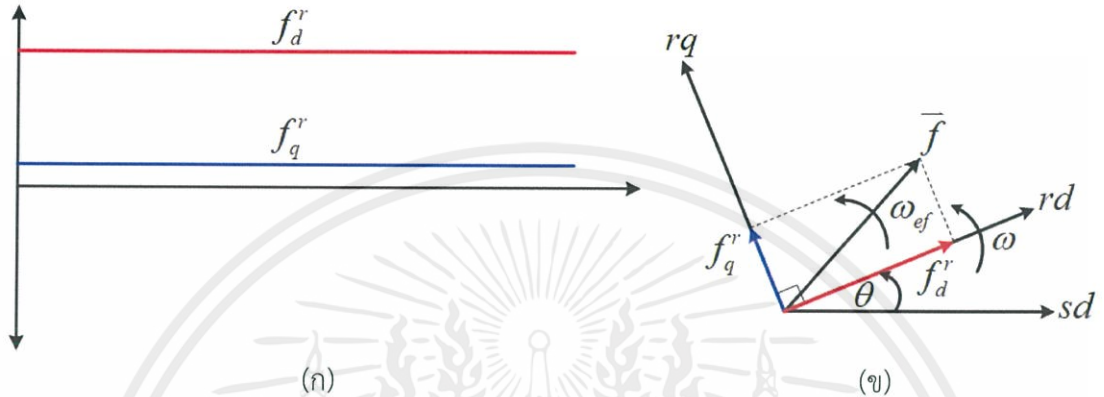
$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d^s \\ f_q^s \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

โดย  $f$  เป็นค่าตัวแปรในกรอบอ้างอิง

### 3.2.2 การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเป็นกรอบอ้างอิงหมุน

การแปลงกรอบอ้างอิงนี้จะแปลงรูปแบบสัญญาณสองเฟสเป็นสัญญาณเส้นตรงหรือสัญญาณที่มีค่าคงตัว โดยสัญญาณสองเฟส  $dq^s$  จะแปลงเป็น  $dq^r$  โดยสัญญาณที่แปลงได้  $dq^r$  จะเป็นสัญญาณเส้นตรงและมีค่าคงตัว

กรอบอ้างอิงหมุน ในรูปแบบสัญญาณเส้นตรง



รูปที่ 3.5 สัญญาณในกรอบอ้างอิงหมุน (ก) รูปคลื่นสัญญาณกรอบอ้างอิงหมุน  $dq^r$  (ข) ไดอะแกรมเฟสเซอร์  $dq^r$

การแปลงกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเป็นกรอบอ้างอิงหมุน เป็นหลักการแปลงของปาร์ค (Park's transformation) กรอบอ้างอิงหมุนที่ความเร็วเชิงมุม  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$  ซึ่ง  $\theta$  เป็นมุมระหว่างกรอบอ้างอิงหมุนกับกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง โดยการแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเป็นกรอบอ้างอิงหมุน ตามสมการที่ (3.3)

$$\begin{bmatrix} f_d^r \\ f_q^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d^s \\ f_q^s \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

โดย  $f$  เป็นค่าตัวแปรในกรอบอ้างอิง

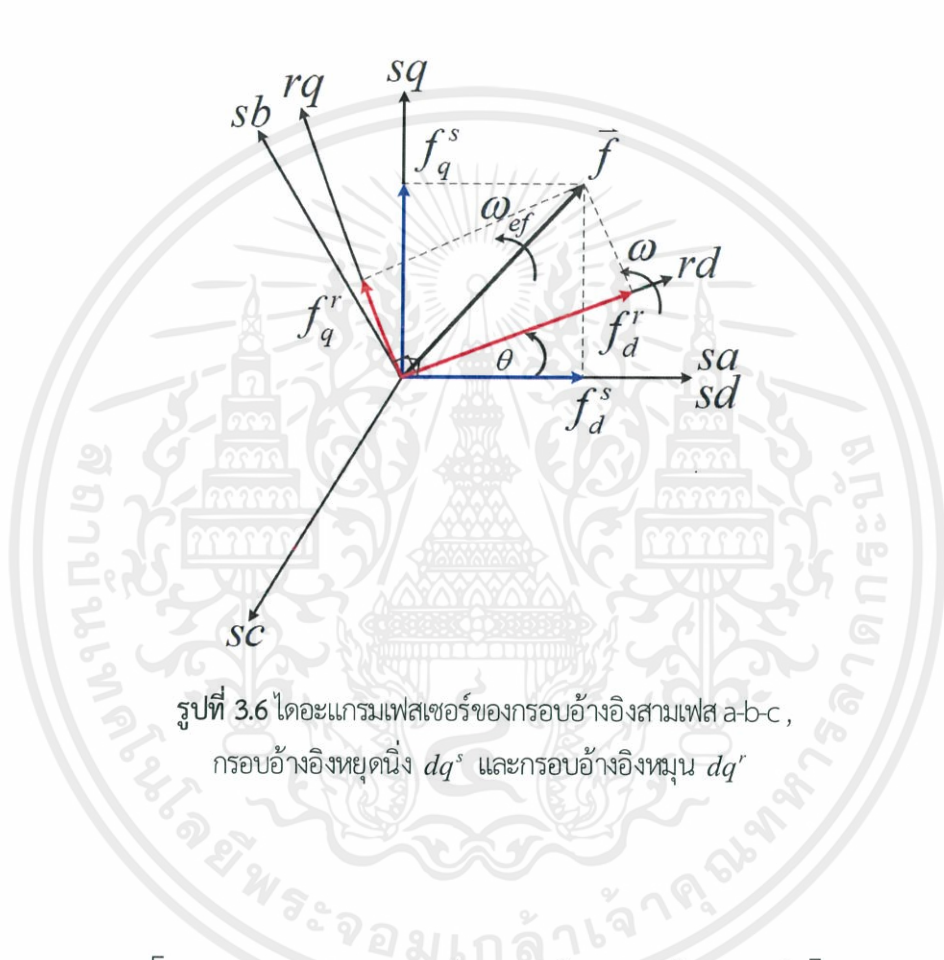
การแปลงกรอบอ้างอิงหมุนเป็นกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง เป็นการแปลงย้อนกลับของปาร์ค (Inverse Park's transformation) โดยจะแปลงกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งสองเฟสเป็นกรอบอ้างอิงสามเฟส ตามสมการที่ (3.4)

$$\begin{bmatrix} f_d^s \\ f_q^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d^r \\ f_q^r \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

โดย  $f$  เป็นค่าตัวแปรในกรอบอ้างอิง

### 3.2.3 การแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสเป็นกรอบอ้างอิงหมุน

การแปลงกรอบอ้างอิงนี้จะแปลงรูปแบบสัญญาณคลื่นสามเฟสเป็นสัญญาณเส้นตรง โดยสัญญาณสามเฟส  $abc$  จะแปลงเป็น  $dq^r$  ซึ่งเป็นกรอบอ้างอิงหมุนที่มีความเร็วเชิงมุม  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$  โดยที่  $\theta$  เป็นมุมระหว่างกรอบอ้างอิงหมุนกับกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง ในการแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเป็นกรอบอ้างอิงหมุน ใช้สมการที่ (3.1) และ (3.3) จะได้สมการที่ (3.5)



$$\begin{bmatrix} f_d^r \\ f_q^r \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta_r & -\sin \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

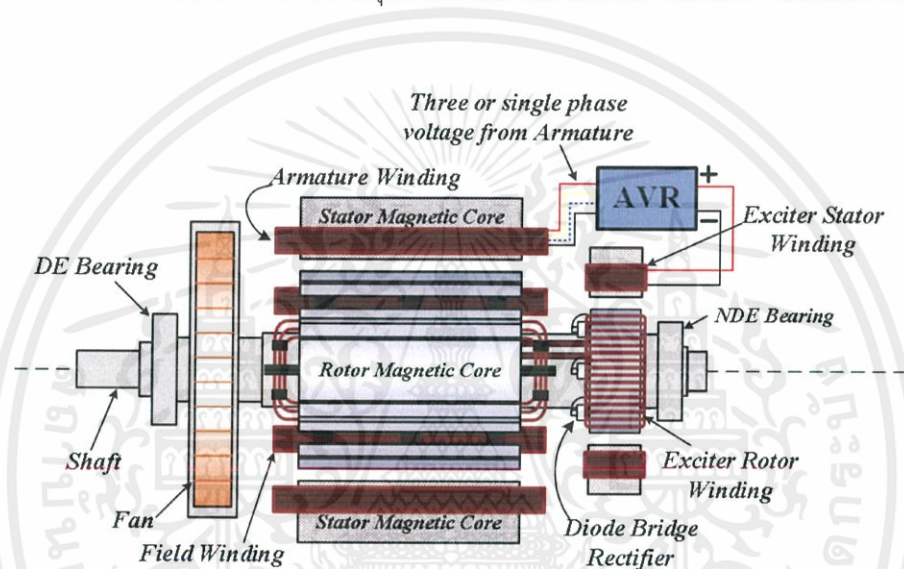
โดยที่

$f$  แทน ตัวแปรใดๆ

### 3.3 การกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

#### 3.3.1 การกระตุ้นตัวเอง (Self-excited (shunt))

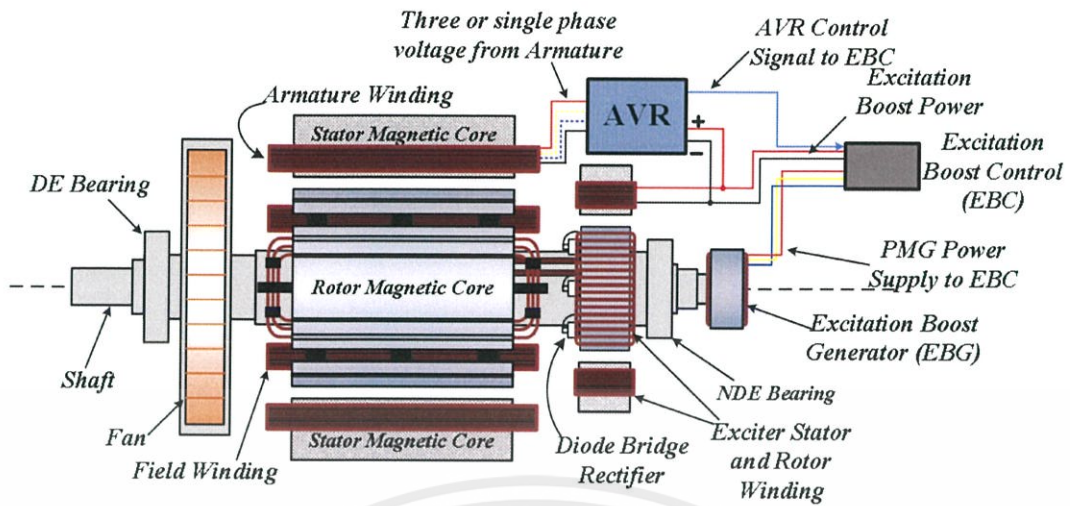
วิธีการกระตุ้นแบบกระตุ้นตัวเอง มีวิธีการกระตุ้นโดยอาศัยสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของขั้วอาร์เมเจอร์ในการกระตุ้นขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะทำการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับและทำการควบคุมด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่า AVR หรือ Automatic Voltage Regulator ดังแสดงในรูปที่ 3.7 การกระตุ้นด้วยวิธีนี้สามารถทำได้ง่ายและมีความปลอดภัย แต่ยังมีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เนื่องด้วยกรณีที่มีโหลดต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเกิดกระแสลัดวงจรหรือเกิดความผิดปกติของโหลดนั้นจะทำให้การใช้แรงดันไฟฟ้าจากขั้วอาร์เมเจอร์ในการกระตุ้นขดลวดสนามส่งผลเสียต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้



รูปที่ 3.7 แผนผังแสดงการกระตุ้นแบบ Self-excited (shunt) [4]

#### 3.3.2 การกระตุ้นโดยอาศัยระบบเสริมการกระตุ้น (Excitation boost system (EBS))

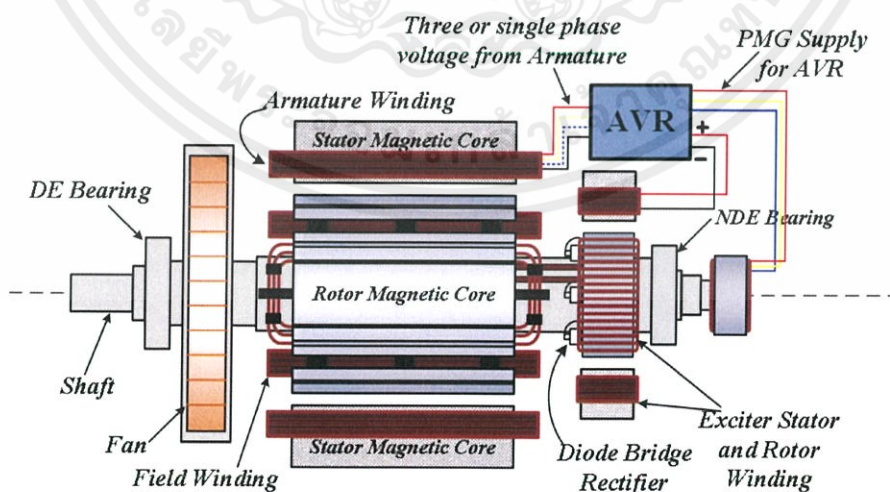
วิธีการกระตุ้นโดยอาศัยระบบเสริมการกระตุ้น มีวิธีการกระตุ้นคล้ายกับแบบการกระตุ้นตัวเอง แต่เพิ่มอุปกรณ์การทำงานที่ช่วยในการเพิ่มความเร็วที่เพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วและตัวที่ทำหน้าที่เพิ่มความเร็วของเพลลา ตามรูป 3.8 เมื่อกรณีที่มีโหลดเกิดกระแสลัดวงจรหรือความผิดปกติของโหลดก็จะทำการเพิ่มความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จึงสามารถป้องกันการลัดวงจรได้ดีกว่าการกระตุ้นแบบกระตุ้นตัวเอง



รูปที่ 3.8 แผนผังแสดงการกระตุ้นแบบ Excitation boost system (EBS) [4]

### 3.3.3 การกระตุ้นโดยอาศัยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet generator (PMG))

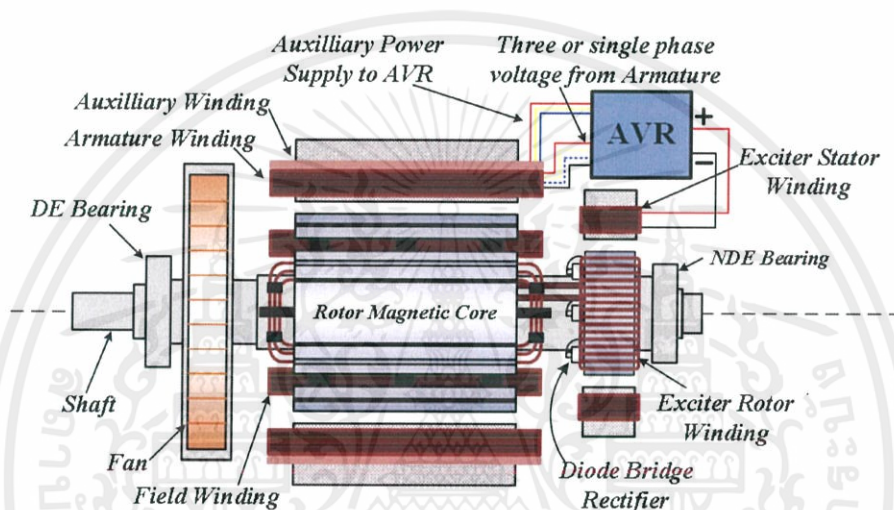
วิธีการกระตุ้นโดยอาศัยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดแม่เหล็กถาวร มีการกระตุ้นที่คล้ายแบบการกระตุ้นตัวเอง โดยจะเปลี่ยนจากการใช้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นการใช้แรงดันไฟฟ้าจากแม่เหล็กถาวรในการกระตุ้นขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามรูป 3.9 เมื่อกรณีที่โหลดเกิดกระแสลัดวงจรหรือความผิดปกติของโหลด จึงไม่มีผลต่อการกระตุ้นขดลวดสนาม ข้อดีของวิธีการกระตุ้นนี้ คือ จะไม่มีการรบกวนการกระตุ้นที่ขดลวดสนามจึงทำให้เกิดความต่อเนื่องในการกระตุ้น แต่จะต้องไม่มีการรบกวนที่เพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จึงทำให้วิธีการกระตุ้นแบบนี้มีความสามารถเพิ่มแรงบิดและประสิทธิภาพสูงสำหรับการเดินเครื่องมอเตอร์



รูปที่ 3.9 แผนผังแสดงการกระตุ้นแบบ Permanent magnet generator (PMG) [4]

### 3.3.4 การกระตุ้นโดยอาศัยขดลวดช่วย (Auxiliary winding (AUX))

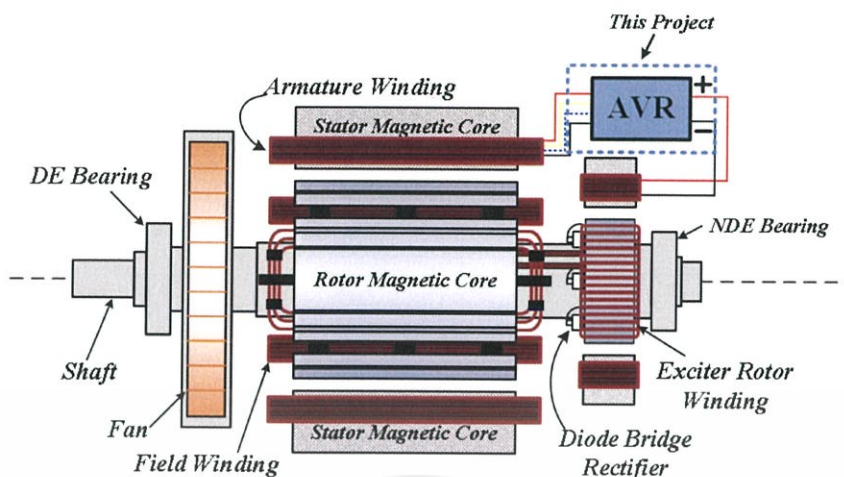
วิธีการกระตุ้นโดยอาศัยขดลวดช่วย มีวิธีการกระตุ้นคล้ายแบบการกระตุ้นตัวเอง โดยจะเปลี่ยนจากการใช้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นการใช้แรงดันไฟฟ้าจากขดลวดเสริมในการกระตุ้นขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตามรูป 3.10 จะเห็นได้ว่าหน้าที่การทำงานของขดลวดเสริมคล้ายกับแม่เหล็กถาวรที่ทำหน้าเป็นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าในการกระตุ้นที่ขดลวดสนาม ซึ่งจะลดปัญหาจากกรณีที่เกิดการต่อโหลดเข้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้วเกิดกระแสลัดวงจรหรือความผิดปกติของโหลด วิธีการกระตุ้นแบบนี้ดีกว่าแม่เหล็กถาวรคือระบบนี้จะมีขนาดของแกนเพลลาที่สั้นกว่าและมีราคาที่ถูกกว่าการใช้แม่เหล็กถาวร



รูปที่ 3.10 แผนผังแสดงการกระตุ้นแบบ Auxiliary winding (AUX) [4]

### 3.4 วิธีการกระตุ้นที่ใช้ในการทดลอง

โครงการนี้มุ่งเน้นไปที่การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขดลวดอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า วิธีการกระตุ้นในการทดลองจะเป็นแบบการกระตุ้นตัวเอง จะทำการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ขั้วอาร์เมเจอร์ไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แล้วจะใช้วงจรชอปเปอร์ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ไปกระตุ้นขดลวดสนาม แต่เนื่องด้วยที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ที่โรเตอร์จะสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ แล้วผ่านวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จะไปกระตุ้นขดลวดสนามที่โรเตอร์ ตามรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แผนผังแสดงการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ใช้ในโครงการนี้ [4]

### 3.5 บทสรุป

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงความรู้และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงการนี้ เช่น การแปลงแกนเพื่อเปลี่ยนกรอบอ้างอิง และการกระตุ้นขดลวดสนาม รวมไปถึงลักษณะการกระตุ้นในแบบต่างๆ เป็นต้น ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็น และถูกนำมาใช้ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์ตั้งจะกล่าวถึงในบทที่ 4

## บทที่ 4

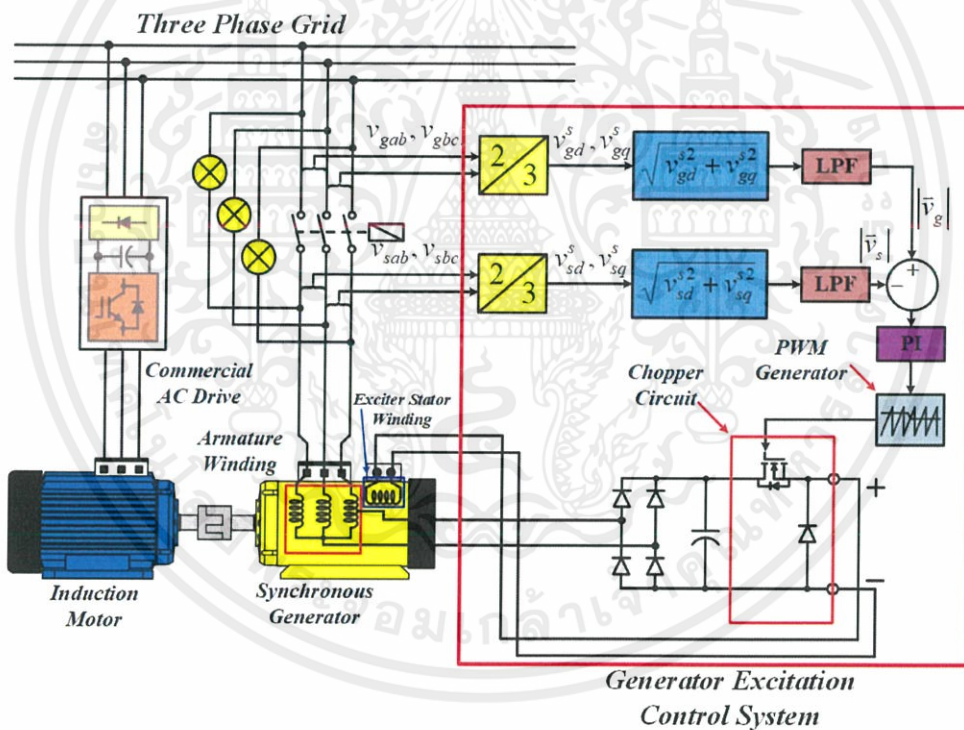
### การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์

#### 4.1 บทนำ

บทนี้จะเป็นการกล่าวถึงหลักการทำงานของอุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ หรือ AVR และวิธีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์ผ่านอุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ พร้อมทั้งสมการต่างๆที่ใช้อธิบายขั้นตอนการทำงาน

#### 4.2 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์

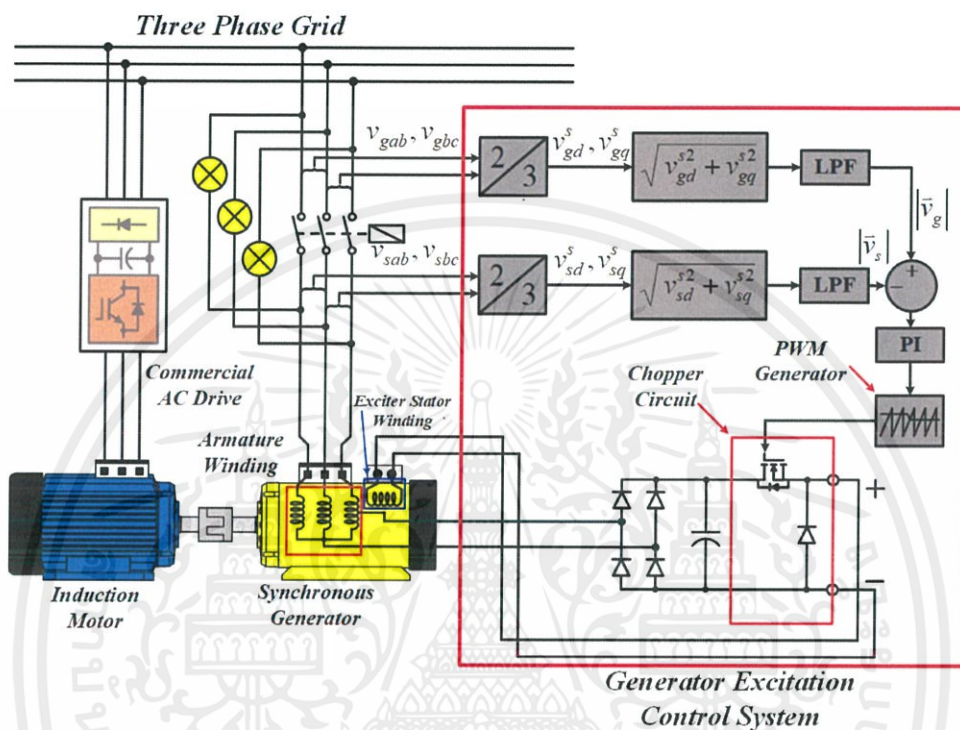
ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส สามารถควบคุมได้โดยผ่านการควบคุมขนาดของกระแสกระตุ้นที่ขดลวดสนาม ซึ่งในปริยญาณิพนธ์เล่มนี้จะเน้นไปที่การควบคุมกระแสกระตุ้นขดลวดสนามผ่านอุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ไดอะแกรมการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขดลวดอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส [4]

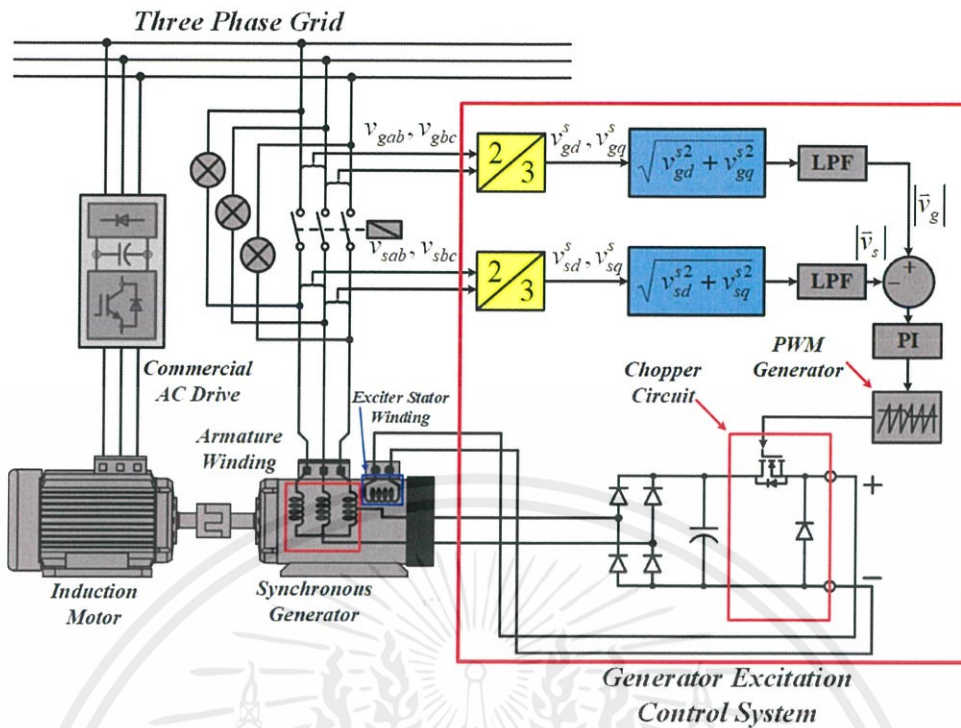
จากรูปที่ 4.1 สามารถอธิบายหลักการทำงานของระบบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์ ได้ดังขั้นตอนนี้

1. ทำการวัดค่าขนาดแรงดันไฟฟ้าของทั้งระบบไฟฟ้า และขั้วอาร์เมเจอร์ โดยจะทำการวัดค่าแรงดันไลน์



รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการวัดขนาดแรงดันไฟฟ้าของทั้งระบบไฟฟ้า และขั้วอาร์เมเจอร์ [4]

2. ส่งสัญญาณค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการคำนวณ และแปลงกรอบอ้างอิงให้อยู่ในกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง พร้อมทั้งหาขนาดของสัญญาณแรงดันที่วัดได้ ซึ่งกระบวนการที่กล่าวมานั้นล้วนแต่เกิดขึ้นภายในไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 4.3 ขั้นตอนการส่งสัญญาณขนาดแรงดันไฟฟ้าของทั้งระบบไฟฟ้า และขั้วอาร์เมเจอร์ที่วัดได้ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการคำนวณ [4]

3. ทำการกรองสัญญาณที่ผ่านการแปลงกรอบอ้างอิง และหาขนาดแล้วด้วยการคำนวณผ่านสมการของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน(Low pass filter)เพื่อลดทอนความถี่ของสัญญาณลง ซึ่งส่งผลต่อการควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์ โดยสามารถเขียนสมการของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านในรูปแบบ discrete ได้ดังสมการที่ (4.1)-(4.4)

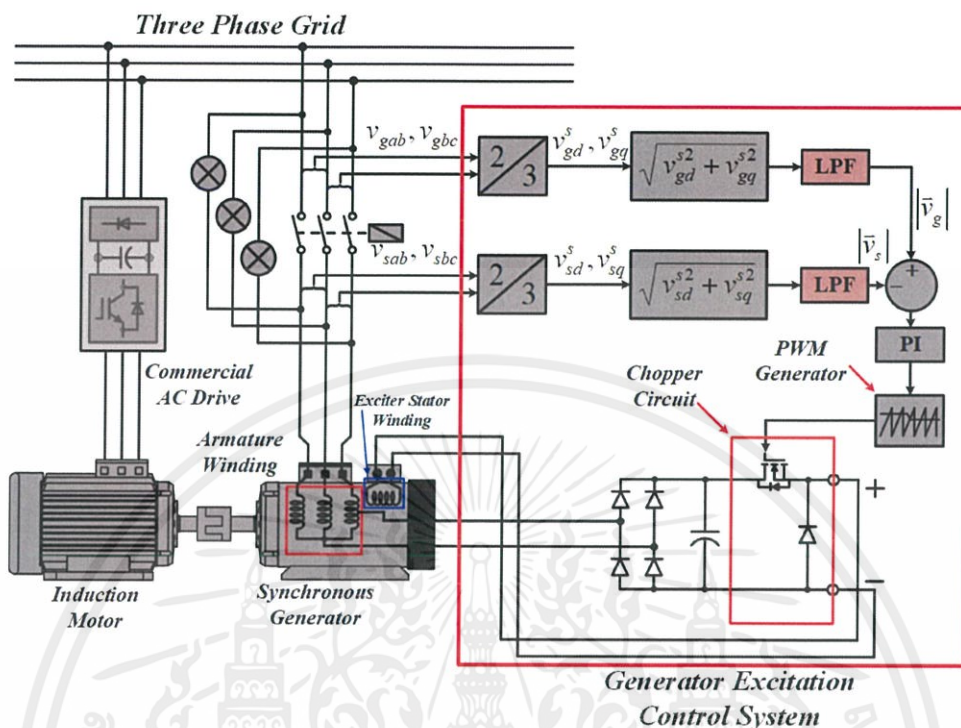
$$\text{Time domain} \quad v_o(t) = v_i(t) - \tau \frac{\partial v_o(t)}{\partial t} \quad (4.1)$$

$$\text{S domain} \quad v_o(s) = \frac{v_i(s)}{1 + \tau s} \quad (4.2)$$

$$\text{Z domain} \quad \left( z - \frac{\tau}{\tau + T} \right) v_o(z) = \left( \frac{T}{\tau + T} \right) z v_i(z) \quad (4.3)$$

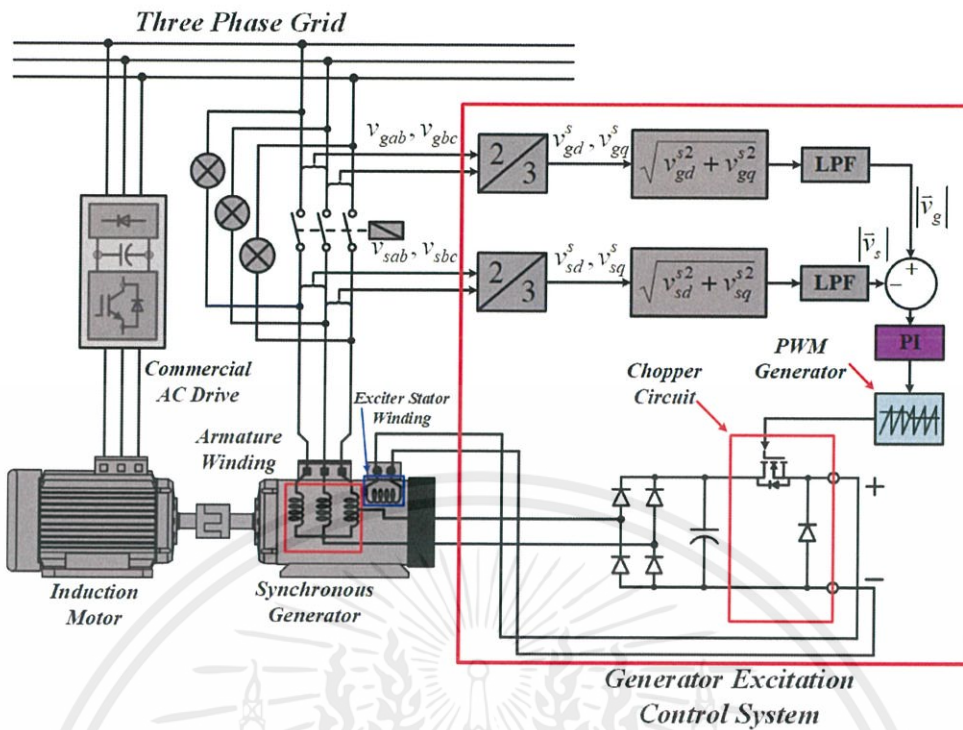
$$\text{Discrete form} \quad v_o[k] = \left( \frac{T}{\tau + T} \right) v_i[k] + \left( \frac{\tau}{\tau + T} \right) v_o[k-1] \quad (4.4)$$

โดย  $T$  แทน Sampling time



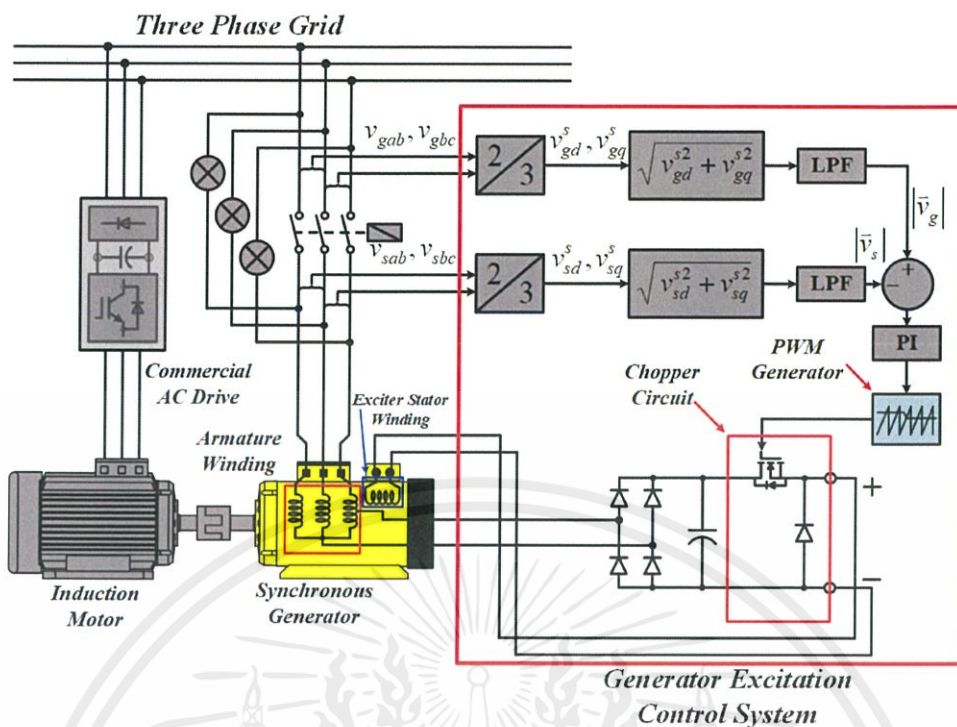
รูปที่ 4.4 ขั้นตอนการส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ผ่านการแปลงกรอบอ้างอิง และหาขนาดแล้วผ่านการคำนวณสมการของวงจรรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อรองความถี่ [4]

4. นำสัญญาณที่ผ่านการรองความถี่แล้วไปเปรียบเทียบกับโดยให้สัญญาณที่วัดจากระบบไฟฟ้าเป็นสัญญาณอ้างอิง จากนั้นจะส่งเอาต์พุตของการเปรียบเทียบ หรือค่าความผิดพลาดผ่านระบบควบคุมเพื่อปรับค่าความผิดพลาด โดยในโครงงานนี้จะใช้ระบบควบคุมแบบแอนตี้-ไวנדอัป ซึ่งภายในจะประกอบไปด้วยตัวควบคุมแบบพี และแบบไอ สัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุมนั้นจะถูกนำไปสร้างเป็นสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มเพื่อใช้ในการควบคุมสวิตช์มอสเฟตของวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4.5 ขั้นตอนการส่งสัญญาณที่ผ่านการกรองความถี่แล้วไปเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบแอนตตี-ไวנדอัฟเพื่อนำไปสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม [4]

5. สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่ถูกสร้างขึ้นนั้นจะถูกส่งไปยังขาเกตของมอสเฟตที่อยู่ภายในวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อควบคุมการทำงานของวงจร โดยแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้านั้นจะถูกจ่ายให้กับตัวกระตุ้น ซึ่งอยู่ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในโครงการนี้จะใช้เครื่องหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามาเป็นแหล่งจ่ายให้กับวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4.6 ขั้นตอนการส่งสัญญาณพีดีบีเบิลยูเอ็มไปยังมอสเฟตที่อยู่ในวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อควบคุมการทำงานของวงจร [4]

6. เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าออกจากวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวกระตุ้น ซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยถ้าต้องการควบคุมให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์ลดลงก็สามารถทำได้โดยลดขนาดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวกระตุ้น และเพิ่มขนาดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายหากต้องการเพิ่มขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์

#### 4.3 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์ให้มีขนาดตามที่ต้องการ โดยทำการควบคุมผ่านการกระตุ้นขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ พร้อมทั้งแสดงให้เห็นถึงขั้นตอนการควบคุม และสมการในรูปแบบ discrete ของ Low Pass Filter ที่ใช้เพื่อเพิ่มความเข้าใจ ในส่วนของบทที่ 5 จะกล่าวถึงการเตรียมอุปกรณ์การทดลอง และวิธีการทดลอง

## บทที่ 5

### การจัดเตรียมอุปกรณ์การทดสอบ

#### 5.1 บทนำ

บทนี้จะเป็นการแสดงการจัดเตรียมอุปกรณ์การทดสอบที่จะทำการควบคุมการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้า โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในการทดลองนี้จะทำการควบคุมกระตุ้นขั้วของขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยที่เพลลาของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต่อกับต้นกำลังทางกลในการทดลองนี้จะใช้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

#### 5.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นที่ขั้วขดลวดสนามกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขดลวดอาร์เมเจอร์

หัวข้อนี้จะเป็นการทดลองด้วยการปรับค่าแรงดันไฟฟ้า เพื่อดูขอบเขตการทำงานของ การกระตุ้นขั้วขดลวดสนาม จึงต้องทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่จ่ายเพื่อกระตุ้นขดลวดสนามว่าส่งผลอย่างไรต่อแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากขั้วของขดลวดอาร์เมเจอร์ที่อยู่บนสเตเตอร์

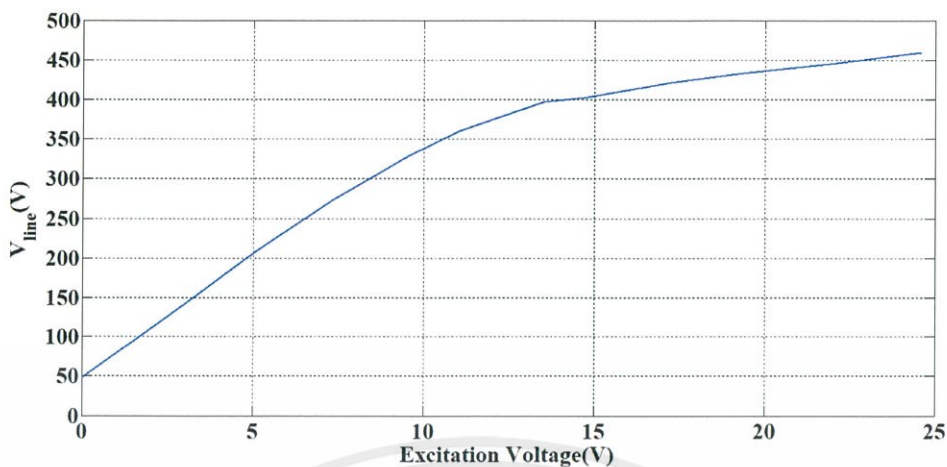
#### 5.3 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นที่ขั้วขดลวดสนามกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขดลวดอาร์เมเจอร์

ตารางแสดงผลการทดลองการกระตุ้นที่ขั้วของขดลวดสนามที่สเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้าและบันทึกผลค่าแรงดันไฟฟ้าจากขดลวดอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

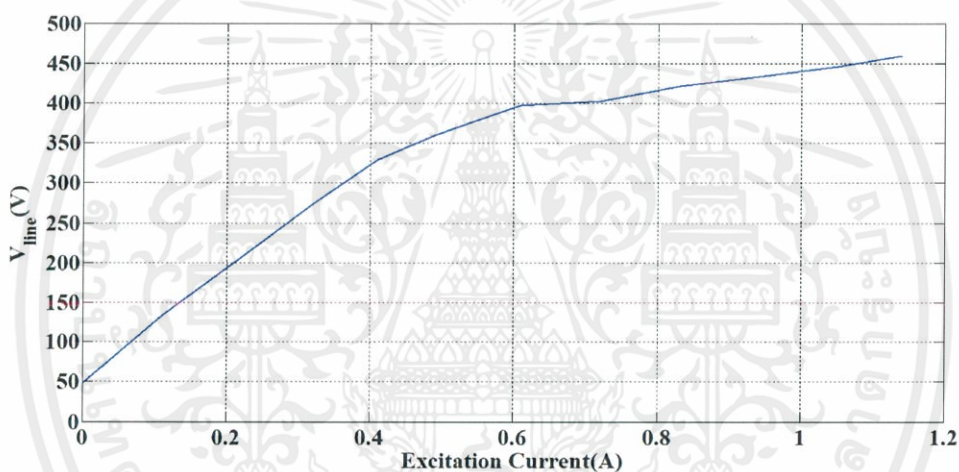
ตารางที่ 5.1 ผลการกระตุ้นที่ขั้วของขดลวดสนามที่สเตเตอร์และค่าแรงดันไฟฟ้าจากขดลวดอาร์เมเจอร์

Field Winding		Armature Winding		
V (V)	I (A)	Vab (V)	Vac (V)	Vbc (V)
0	0	48.04	48.08	48.05
2.741	0.11	133.9	133.8	133.7
5.025	0.22	206.8	206.6	206.6
7.36	0.32	274.2	274.2	274
9.57	0.41	329.6	329.8	329.8
11.05	0.49	359.7	359.6	360
13.54	0.61	397.2	396.3	397.4
14.72	0.72	403	403	403.7
17.24	0.83	422.1	422.4	422.5
19.36	0.94	433.2	433.4	434.5
22.09	1.05	446.2	447.3	447.6
24.59	1.14	459.3	459.2	461.3

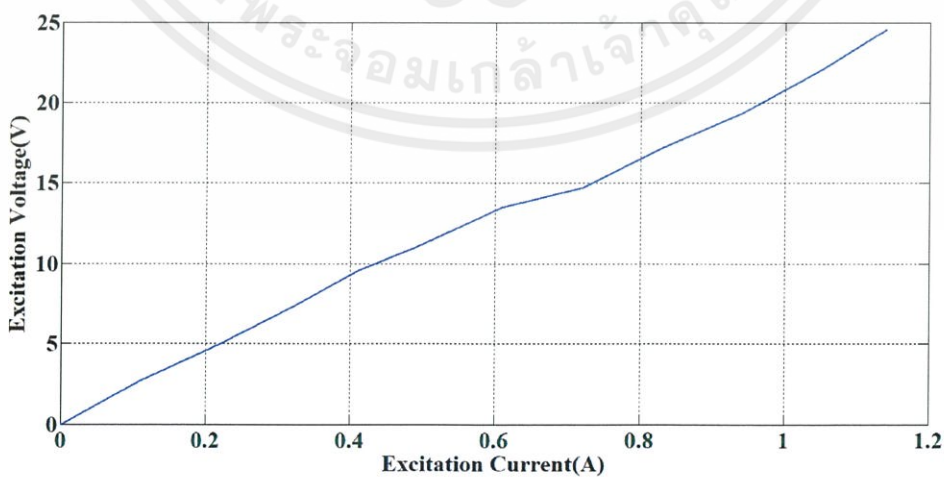
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นกับแรงดันไลน์



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นกับแรงดันไลน์



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นที่ชั่วขณะลดสนามกับแรงดันไลน์ที่ชั่วขณะลดอาร์เมเจอร์ที่สเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เมื่อทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่าไม่ได้มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นและค่าแรงดันไลน์ที่ชั่วขณะลดอาร์เมเจอร์มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนเมื่อทำการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการกระตุ้นมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น โดยที่ค่าความชันของกราฟแสดงให้เห็นค่าความต้านทานของขดลวดสนามที่โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

#### 5.4 วิธีการทดลองการควบคุมการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

การทดลองการควบคุมการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่เชื่อมต่อกับระบบไฟฟ้ามียุทธศาสตร์การทดลอง ดังนี้

ช่วงก่อนการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

1. เปิดสวิตซ์การทำงานบนบอร์ด DSP ของไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F2812



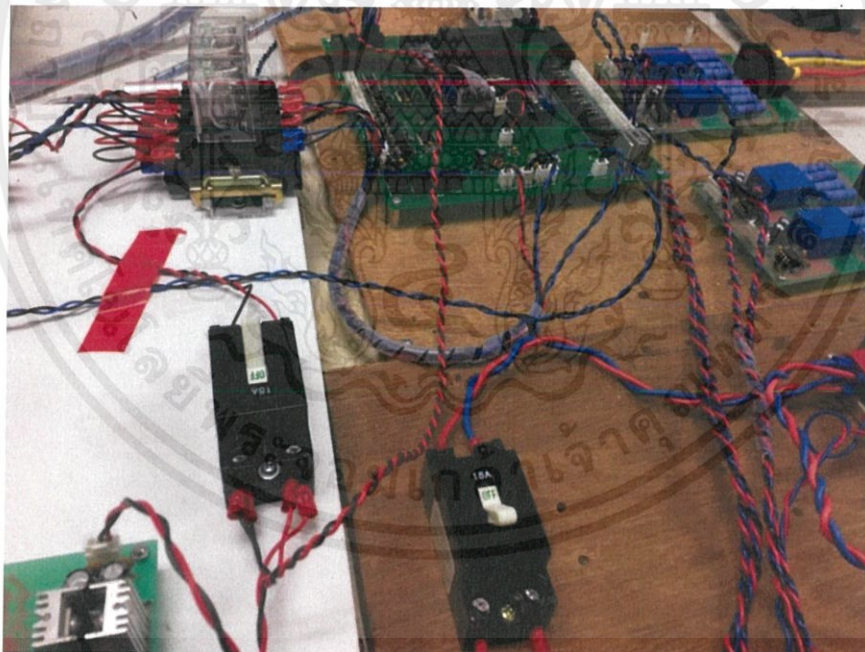
รูปที่ 5.4 บอร์ด TMS320F2812 DSP

2. ทำการเชื่อมต่อ Emulator เข้ากับคอมพิวเตอร์ ส่งข้อมูลลงไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยวิธีการ Flash



รูปที่ 5.5 อุปกรณ์ Emulator ที่ใช้ในการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับไมโครคอนโทรลเลอร์

3. เปิดสวิตซ์การทำงาน Circuit Breaker ทำงานเป็นแหล่งจ่ายให้แก่ Relay และ Sensor

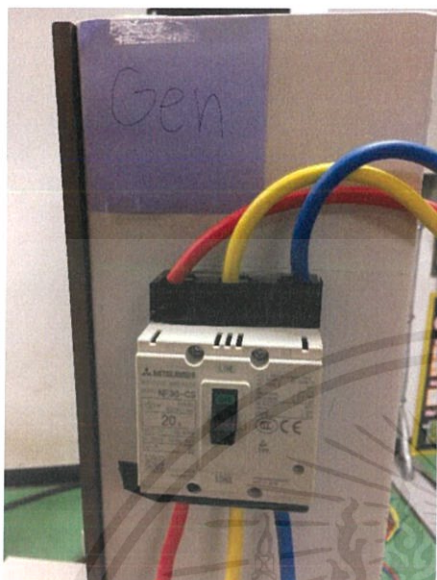


รูปที่ 5.6 สวิตซ์ Circuit Breaker ที่ต่ออยู่กับอุปกรณ์ Relay และ Sensors

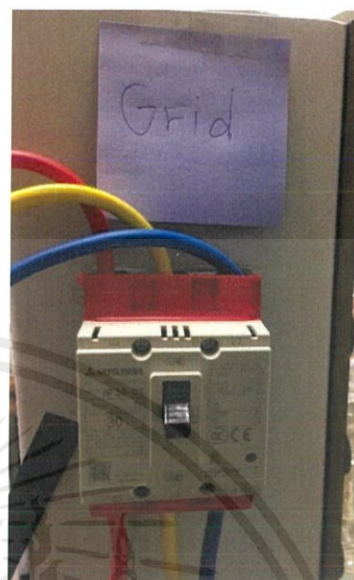
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

- เปิดสวิตช์การทำงาน Circuit Breaker ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและระบบไฟฟ้า



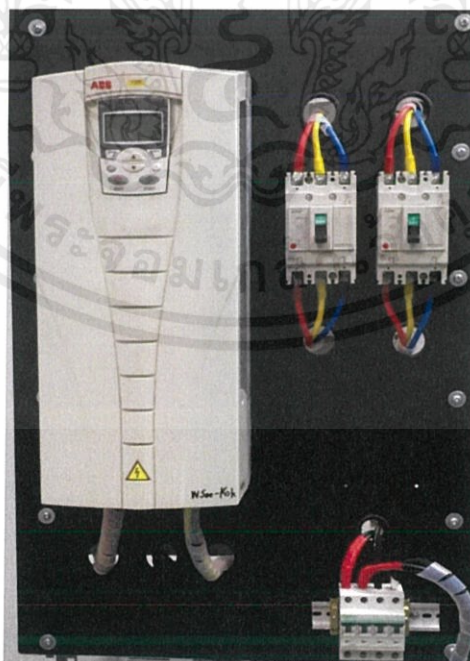
(ก)



(ข)

รูปที่ 5.7 สวิตช์ Circuit Breaker ที่ใช้ควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าจาก (ก) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ข) ระบบไฟฟ้า

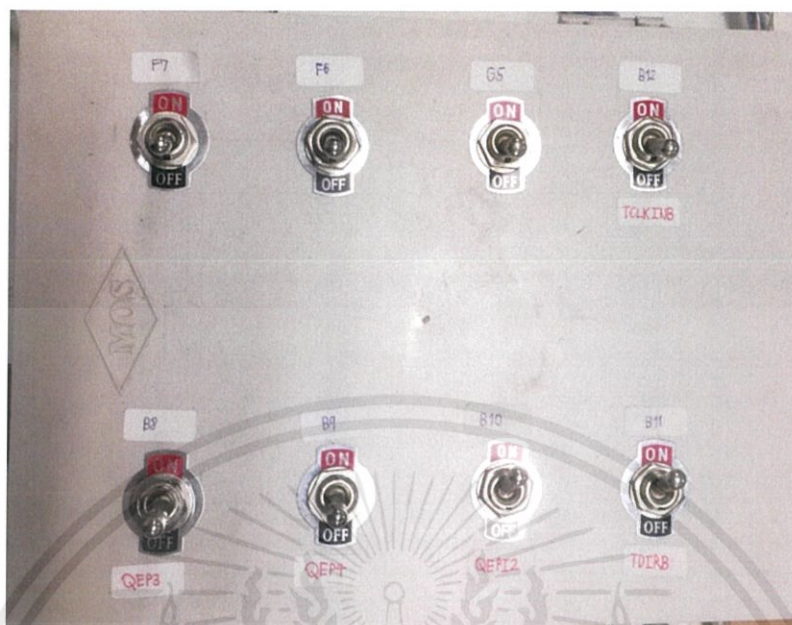
- เริ่มต้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยมีต้นกำลังทางกลเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำผ่านอุปกรณ์ไดรฟ์



รูปที่ 5.8 อุปกรณ์ไดรฟ์ที่ใช้ในการควบคุมต้นกำลังทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เปิดสวิตช์ B10 เป็นการเปิดการทำงานค่าตั้งต้นที่ตั้งไว้ของพีดับเบิลยูเอ็ม



รูปที่ 5.9 สถานะการเปิดการทำงานสวิตช์ B10 เพื่อเปิดใช้สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่ตั้งไว้

7. เปิดสวิตช์ B8 เป็นการเปิดการทำงานการเปรียบเทียบ PI เป็นการอัปเดตค่าของค่าพีดับเบิลยูเอ็ม



รูปที่ 5.10 สถานะการเปิดการทำงานสวิตช์ B8 เพื่อเปิดใช้ตัวควบคุมแบบพีโอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ควบคุมความเร็วของเครื่องมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยอุปกรณ์ไดร์ฟ
9. วัดค่าแรงดันไฟฟ้าระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า ถ้าผลต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0 หรืออยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ก็จะทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า



(ก)

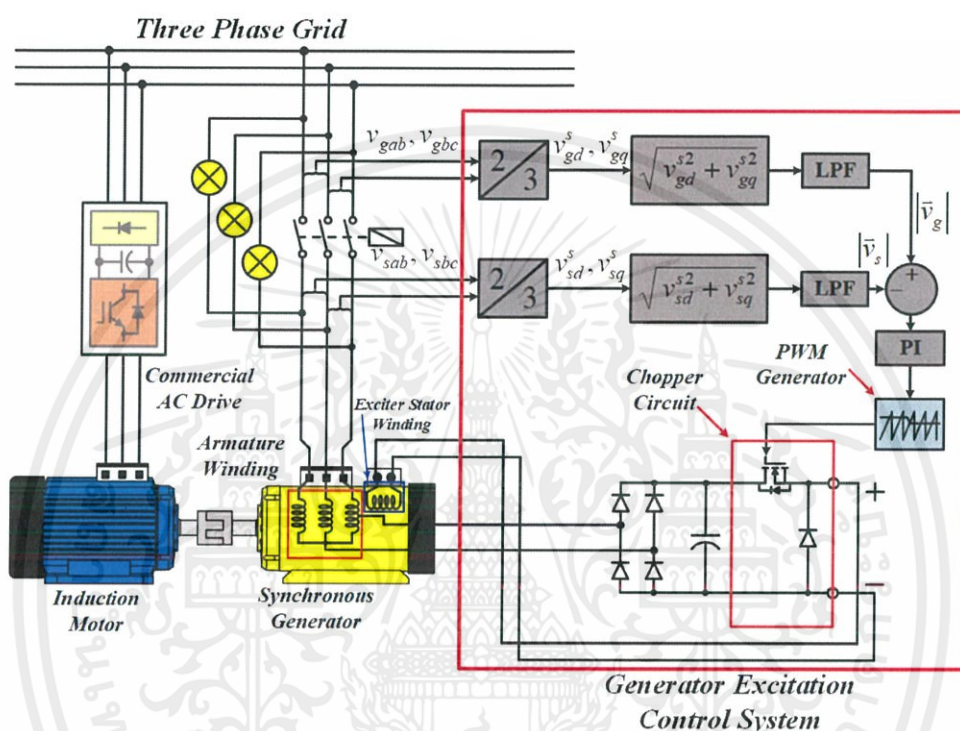


(ข)

รูปที่ 5.11 (ก) มัลติมิเตอร์ที่ใช้วัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และระบบไฟฟ้า  
 (ข) อุปกรณ์ Magnetic Contactor ที่ใช้ในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า

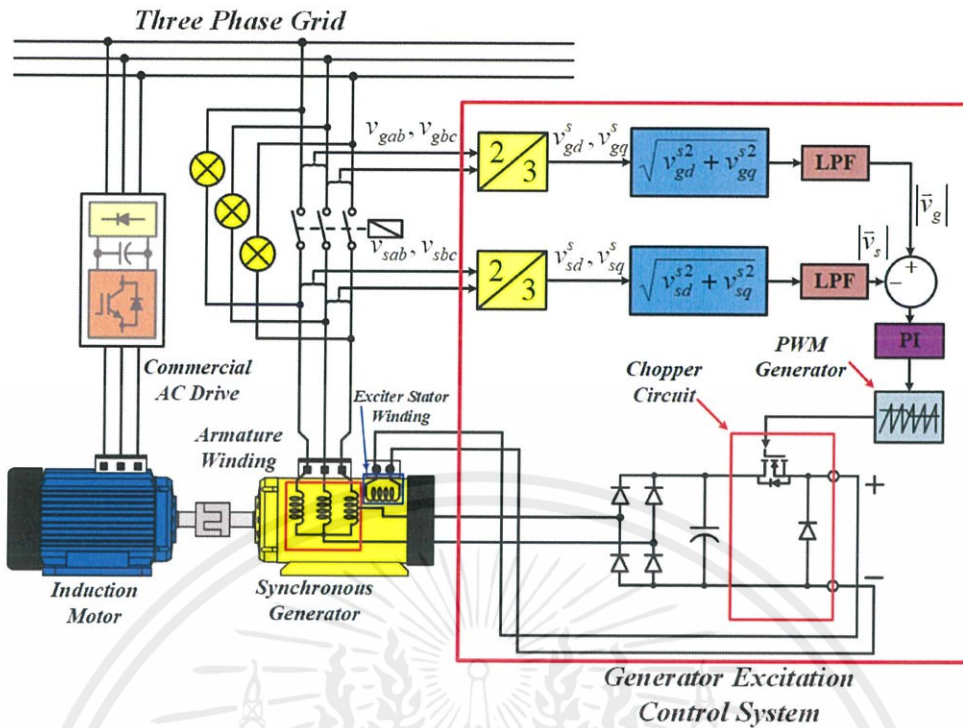
## 5.5 การทดสอบการควบคุมการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

การทดสอบการควบคุมการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส จากรูปที่ 5.12 เป็นการเปิดสวิตช์ B10 หรือการเปิดการทำงานค่าตั้งต้นที่ตั้งไว้ของพีดับเบิลยูเอ็ม ในส่วนนี้ค่าพีดับเบิลยูเอ็มที่ตั้งต้นไว้จากไมโครคอนโทรลเลอร์จะถูกใช้เพื่อทำการเปิดการทำงานวงจรชอปเปอร์ให้มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของขั้วขดลวดสนาม ส่งผลให้เพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



รูปที่ 5.12 แผนผังแสดงช่วงการเปิดการทำงานค่าตั้งต้นที่ตั้งไว้ของพีดับเบิลยูเอ็ม [4]

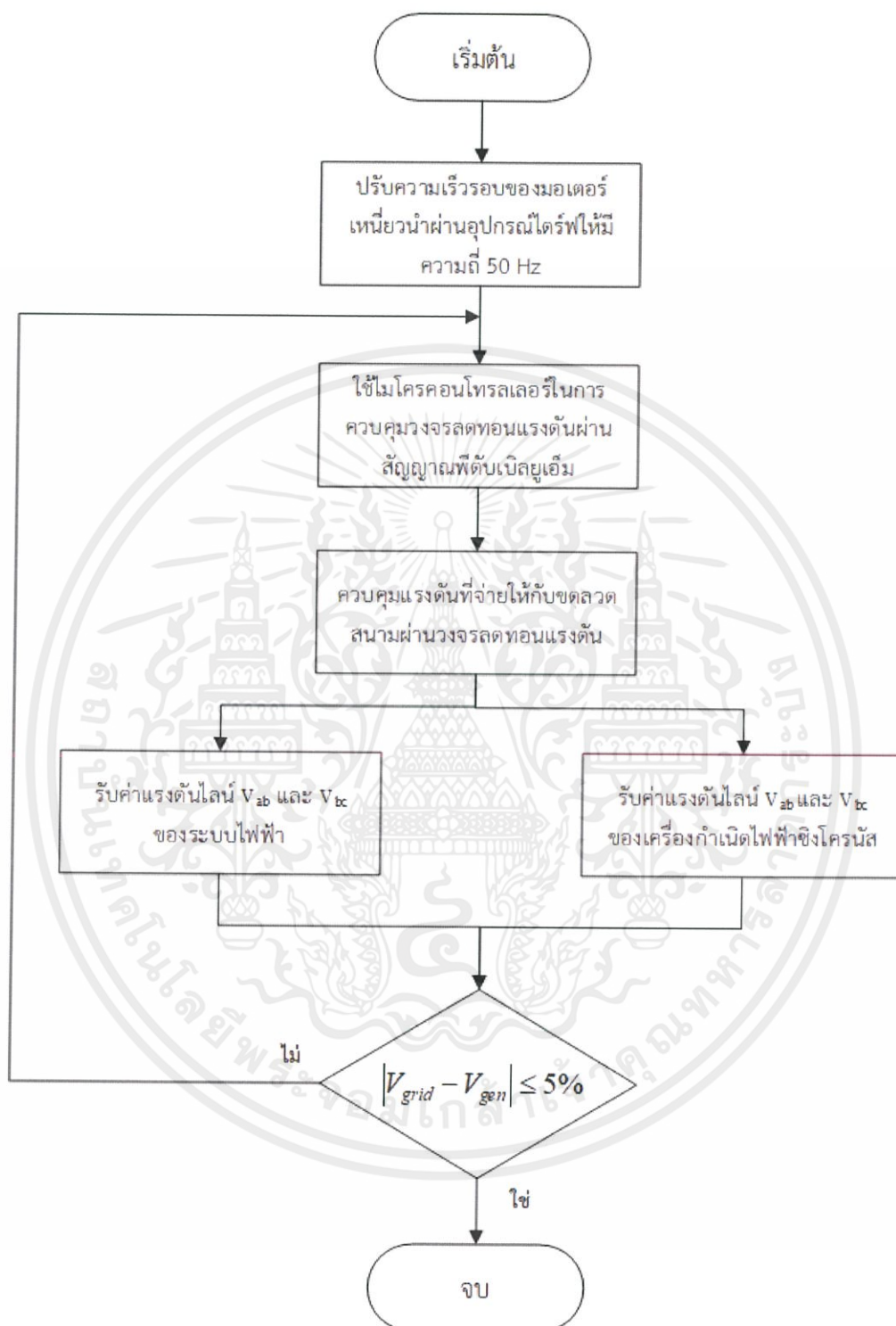
การทำงานส่วนสุดท้ายก่อนจะทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า จากรูป 5.13 การทำงานสวิตช์ B8 หรือการเปิดการทำงานการเปรียบเทียบ PI เป็นการอัปเดตค่าของค่าพีดับเบิลยูเอ็มที่ควบคุมการทำงานวงจรชอปเปอร์ให้มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของขั้วขดลวดสนาม ให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เท่ากับหรือใกล้เคียงกับแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า หลังจากนั้นดูจากผลต่างของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า ให้มีผลต่างขนาดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0 V จึงทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า



รูปที่ 5.13 แผนผังแสดงช่วงการเปิดการทำงานการเปรียบเทียบตัวควบคุมแบบพีไอ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.6 สรุปวิธีการทดลองการควบคุมการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

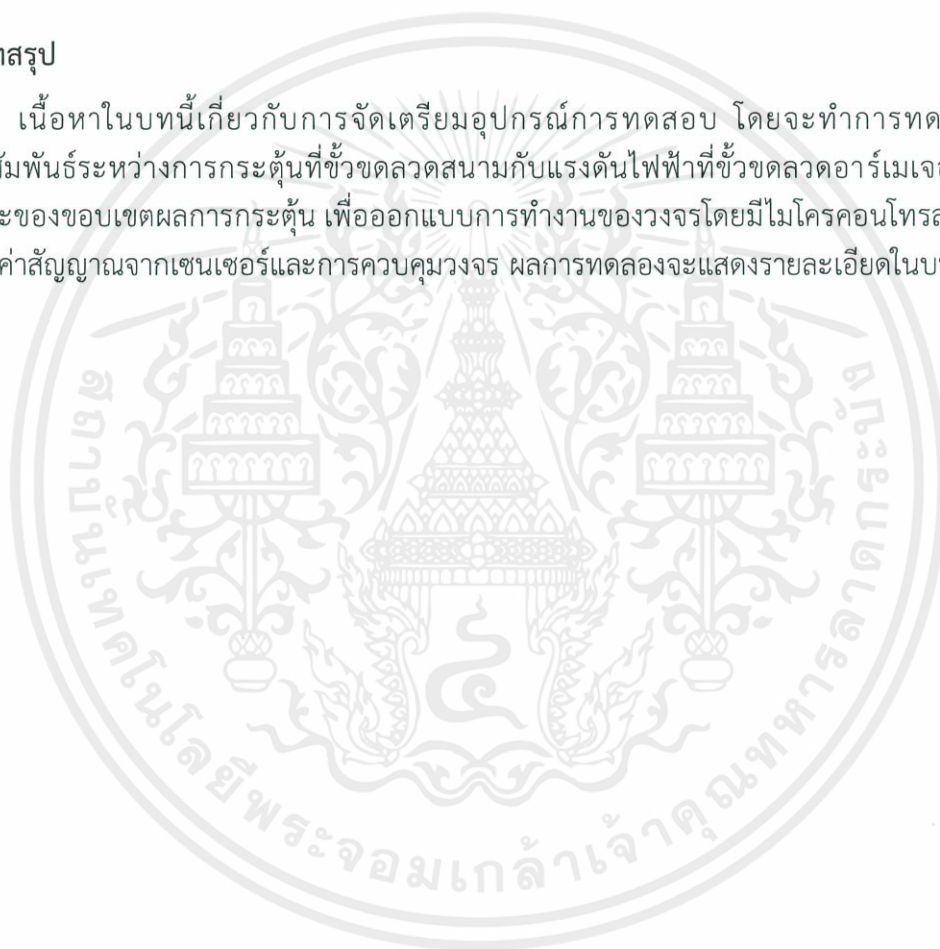


รูปที่ 5.14 แผนผังแสดงการควบคุมการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

แผนผังแสดงการควบคุมการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะเริ่มต้นด้วยการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำผ่านวงจรถูกปรับให้มีค่าที่ 50 Hz โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ TMS320F2812 รับคำสั่งและทำการควบคุมวงจรถูกปรับแรงดันผ่านสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม สัญญาณที่ออกมาจากวงจรถูกปรับแรงดันไฟฟ้าไปควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดสนาม จากนั้นรับค่า  $V_{ab}$  และ  $V_{bc}$  ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสและระบบไฟฟ้าผ่านเซนเซอร์ โดยที่การทำงานจะกำหนดผลต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าไม่เกิน 5% ถ้าเกินกว่าที่กำหนด ไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะทำหน้าที่รับค่าแล้วทำการปรับค่าสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม โดยทำให้ผลต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าไม่เกิน 5%

## 5.7 บทสรุป

เนื้อหาในบทนี้เกี่ยวกับการจัดเตรียมอุปกรณ์การทดสอบ โดยจะทำการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นที่ขั้วขดลวดสนามกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขดลวดอาร์เมเจอร์เพื่อดูลักษณะของขอบเขตผลการกระตุ้น เพื่อออกแบบการทำงานของวงจรมีไมโครคอนโทรลเลอร์ในการรับค่าสัญญาณจากเซนเซอร์และการควบคุมวงจรถูกปรับ ผลการทดลองจะแสดงรายละเอียดในบทที่ 6



## บทที่ 6

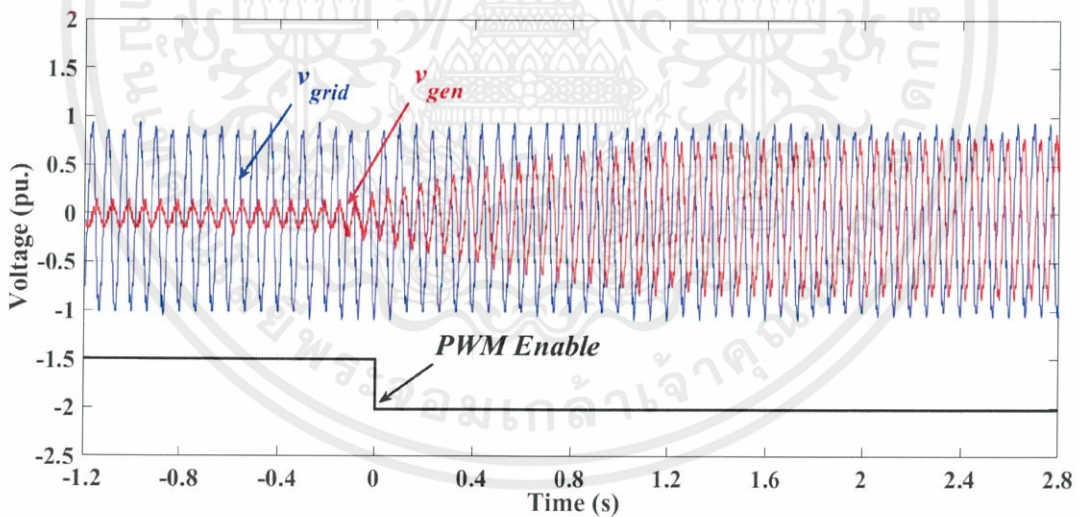
### ผลการทดลอง

บทนี้จะอธิบายผลการทดลองการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ซัวอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส เพื่อการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า และทำการบันทึกผลการทดลองช่วงการขนานกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า

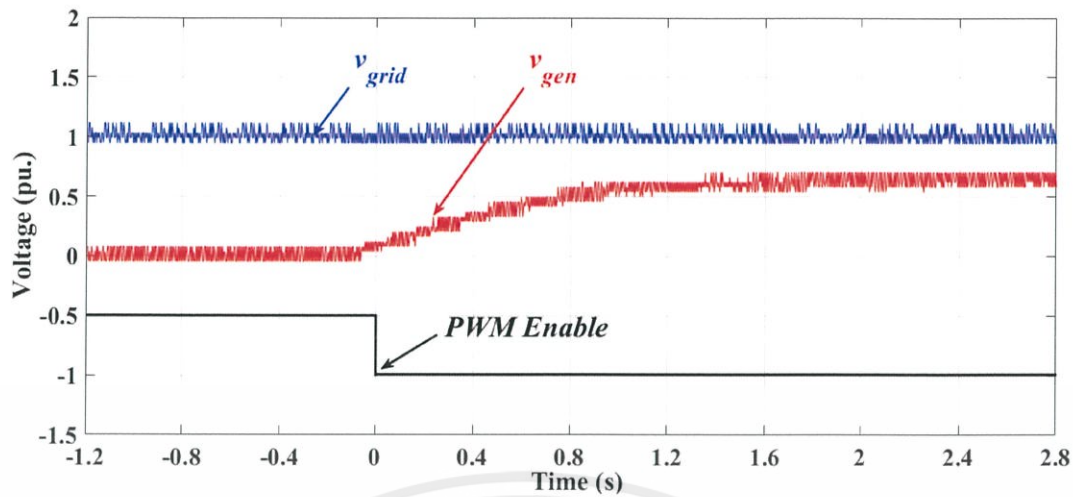
การทดลองนี้จะทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า จากนั้นทำการบันทึกผลค่าขนาดแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าที่ได้ในแต่ละช่วงและผลต่างของขนาดแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

#### 6.1 ผลการทดลองช่วงก่อนการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า

ช่วงก่อนการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า เป็นช่วงที่ทำการปรับเงื่อนไขการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า ต้องอาศัยการปรับจากรังจรไดร์ฟที่ใช้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และวงจรถอบเปอร์ต้องอาศัยการควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ในการส่งสัญญาณพีดีบีเบิลยูเอ็มในการปรับแรงดันไฟฟ้าให้การกระตุ้นขดลวดสนาม เพื่อให้ทุกเงื่อนไขของการขนานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับเงื่อนไขของระบบไฟฟ้า โดยมีผลการทดลองดังนี้



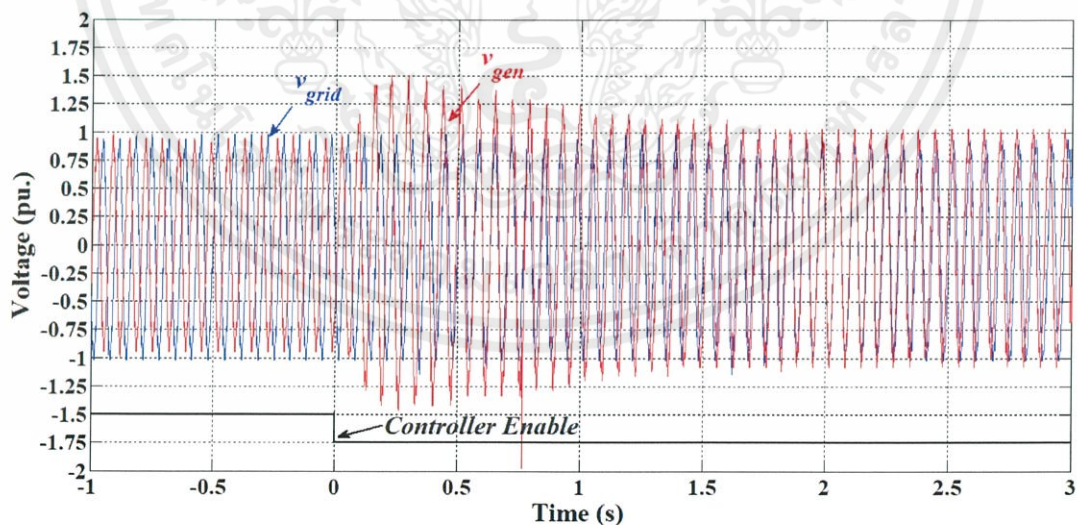
(ก)



(ข)

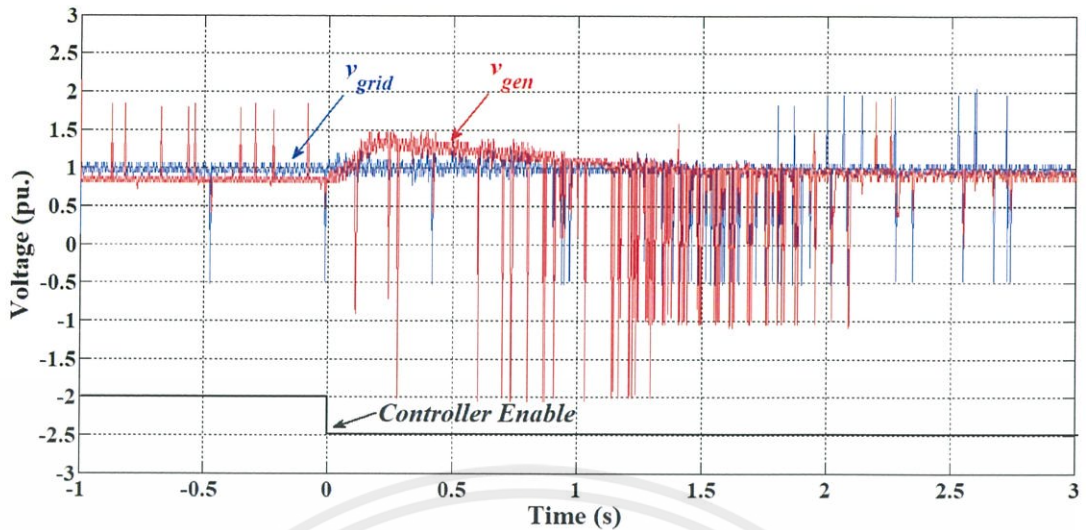
รูปที่ 6.1 ผลการทดลองแสดง (ก) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า (ข) แอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าในแนวแกน d ของระบบรอบอ้างอิงหยุดนิ่งช่วงการเปิดการทำงานสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม

จากรูปที่ 6.1 แสดงให้เห็นการทำงานช่วงการเปิดทำงานของสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มที่เป็นค่าตั้งต้นไว้ ผลที่ได้จะแสดงถึงแรงดันไฟฟ้าที่ชั่วขณะดาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมีขนาดที่เพิ่มขึ้น แต่ก็ยังไม่เท่ากับแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า



(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



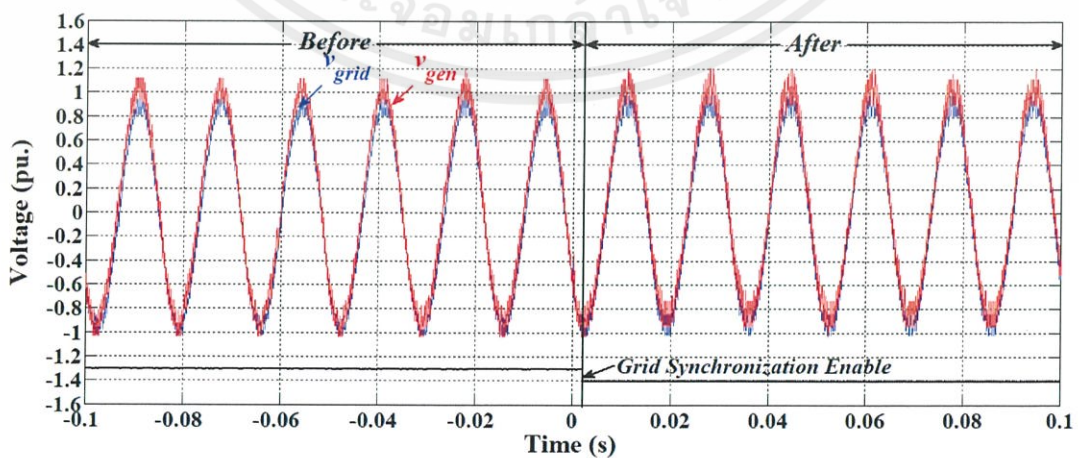
(ข)

รูปที่ 6.2 ผลการทดลองแสดง (ก) สัญญาณแรงดันไฟฟ้า (ข) แอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้า ในแนวแกน d ของระบบกริดอ้างอิงหยุดนิ่งในช่วงการเปิดการทำงานการเปรียบเทียบ PI

จากรูป 6.2 แสดงให้เห็นการทำงานการเปรียบเทียบ PI เป็นการอัปเดตค่าของค่าพีดับเบิลยูเอ็มที่ควบคุมการทำงานวงจรชอปเปอร์ให้มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของขั้วขดลวดสนาม ให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า ผลที่ได้จะแสดงถึงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขดลวดอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสมีค่าใกล้เคียงแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า ก่อนที่จะทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า

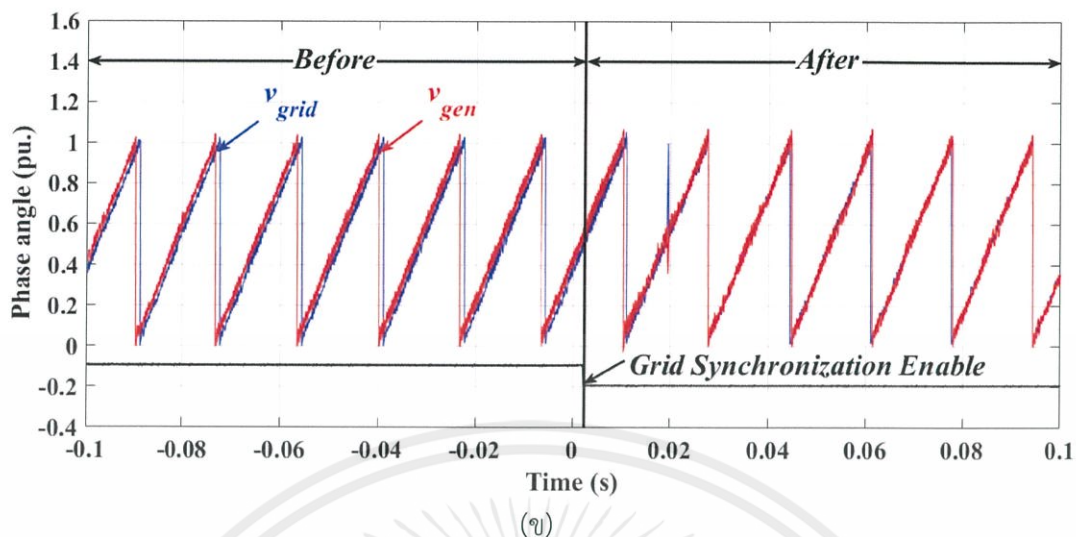
## 6.2 ผลการทดลองช่วงการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า

ผลการทดลองช่วงการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า ได้ผลการทดลองดังนี้



(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 ผลการทดลองแสดง (ก) สัญญาณแรงดันไฟฟ้า (ข) มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้า ในแนวแกน d ของระบบรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง ในช่วงการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า

จากรูปที่ 6.3 แสดงผลทดลองในช่วงการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า พบว่าสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า โดยสังเกตได้จากกราฟที่กราฟสีน้ำเงินจะเป็นแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้า ส่วนกราฟสีแดงจะเป็นแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะแสดงให้เห็นถึงเงื่อนไขในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า โดยมีขนาดแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน ความถี่เท่ากัน ลำดับเฟสตรงกันและมีมุมเฟสที่ตรงกัน โดยค่าที่กล่าวอ้างมาข้างต้นอาจจะมีค่าเท่ากัน ตรงกันหรือใกล้เคียงกัน ส่วนกราฟเส้นสีดำแสดงเห็นการทำงานในช่วงก่อนและหลังการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าระบบไฟฟ้า ฝั่งซ้ายของกราฟสีดำเป็นการแสดงการทำงานก่อนการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า ส่วนฝั่งขวาของกราฟสีดำเป็นการแสดงการทำงานหลังการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าระบบไฟฟ้า

### 6.3 บทสรุป

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอผลการทดลองในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า โดยนำเสนอรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าก่อนการขนานและช่วงการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า และแสดงค่าในแนวแกน d ของระบบรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง โดยผลที่ได้พบว่าแรงดันไฟฟ้าก่อนการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้ามีผลต่างของแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 5% และแสดงเงื่อนไขของการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ต้องมีขนาดแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่ตรงกัน ลำดับเฟสของแรงดันไฟฟ้าที่ตรงกันและความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่เท่ากัน

## บทที่ 7

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุปผล

จากการออกแบบเครื่องรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยสามารถทำการควบคุมผ่านวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าให้แก่วงจรกระตุ้นสำหรับขดลวดสนาม เพื่อทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า ซึ่งจะออกแบบให้การควบคุมเป็นแบบวงปิดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ TMS320F2812 โดยทำการวัดค่าแรงดันไลน์ของระบบไฟฟ้าเป็นแรงดันอ้างอิงและเปรียบเทียบกับค่าแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบควบคุมชนิดพีโอ เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมและถูกแปลงเป็นสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มเพื่อขับสวิตช์ของวงจรทอนระดับ ซึ่งวิธีการควบคุมดังกล่าวถูกอธิบายไว้ในบทที่ 4

จากผลการทดลองการกระตุ้นขดลวดสนามในบทที่ 5 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสกระตุ้นกับแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้ทราบถึงค่าความต้านทานของขดลวดสนาม เพื่อใช้ในการออกแบบวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า และผลการทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าในบทที่ 6 แสดงให้เห็นว่า สามารถควบคุมแรงดันไลน์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้เท่ากับระบบไฟฟ้าได้ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- เมื่อทำการควบคุมขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบวงปิดด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถควบคุมให้มีขนาดเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าได้
- สามารถขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าแบบกึ่งอัตโนมัติได้ เนื่องจากไม่สามารถปรับเงื่อนไขของมูฟเฟส และความถี่ของแรงดันไฟฟ้าได้โดยอัตโนมัติ จึงจำเป็นต้องทำการปรับเงื่อนไขดังกล่าวโดยตัวผู้ทดลองเอง

ปัญญานิพนธ์เล่มนี้จะอธิบายในส่วนของการออกแบบเครื่องรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส อันเป็นเพียงหนึ่งในเงื่อนไขของการขนานเข้ากับระบบไฟฟ้า ทำให้การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้านั้นไม่สามารถทำได้โดยอัตโนมัติ ซึ่งหากสามารถทำการควบคุมในส่วนของเงื่อนไขที่เหลือ ได้แก่ มูฟเฟส และความถี่ของแรงดันไฟฟ้าโดยอัตโนมัติได้ ก็จะทำให้สามารถทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าได้โดยอัตโนมัติ

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

1. เพื่อพัฒนาโครงการนี้ให้มีประโยชน์มากขึ้น ผู้พัฒนาควรเพิ่มฟังก์ชันการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน ให้กับโครงการชิ้นนี้ด้วย

2. เนื่องจากในโครงการนี้ เราจะควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นหนึ่งในเงื่อนไขการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า และใน ส่วนเงื่อนไขที่เหลือจะเป็นการควบคุมผ่านผู้ทดลองเอง ทำให้การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้ายังไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้นจึงควรพัฒนาโครงการนี้ให้สามารถควบคุมทั้ง 4 เงื่อนไขการขนานและทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าได้เองอัตโนมัติ



## เอกสารอ้างอิง

- [1] ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย, “เอกสารประกอบการสอนเรื่อง เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส”, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง; ภาคการศึกษาที่ 2/2559
- [2] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, **Power Electronics Converter, Application and Design: 3<sup>th</sup> Ed.**, United States of America: John Wiley & Sons, Inc.,
- [3] สมยศ เกียรติวนิชวิไล, **ระบบควบคุม**, พิมพ์ครั้งที่ 2, กรุงเทพฯ: สนพ.มีน เซอร์วิสเซ็พพลาย; ตุลาคม 2555
- [4] วรชาติ สุวรรณงาม, "เอกสารประกอบการสอนเรื่อง การขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้า", ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง; ปีการศึกษาที่ 2/2561





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

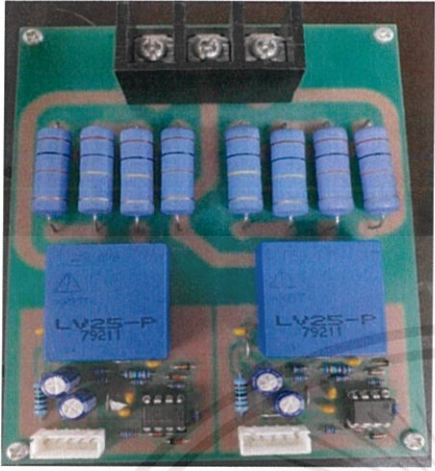

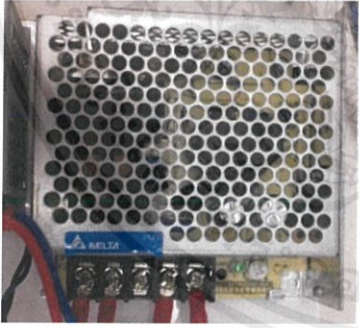
## รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ก.1 รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>FLUKE 110 TRUE RMS MULTIMETER</p>
	<p>Commercial-Drive ABB VSD ACS550-01-038A-4</p>
	<p>RIGOL DS1104Z DIGITAL OSCILLOSCOPE LXI 4 Channel 100MHz 2GSa/s</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง(ต่อ)

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>Voltage Sensor LEM LV25-P79211 &amp; Signal Conditioning Circuit</p>
	<p>Magnetic Contactor TELEMECANIQUE 1NO/1NC 24VAC</p>
	<p>Switching Power Supply DELTA 15VDC</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง(ต่อ)

รูปถ่าย	รายละเอียด
	<p>Switching Power Supply DELTA 5VDC</p>
	<p>BK PRECISION 878 UNIVERSAL LCR METER</p>
	<p>รูปถ่ายภาพรวมของชิ้นงาน และอุปกรณ์</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## An Automatic Voltage Regulator for a Synchronous Generator

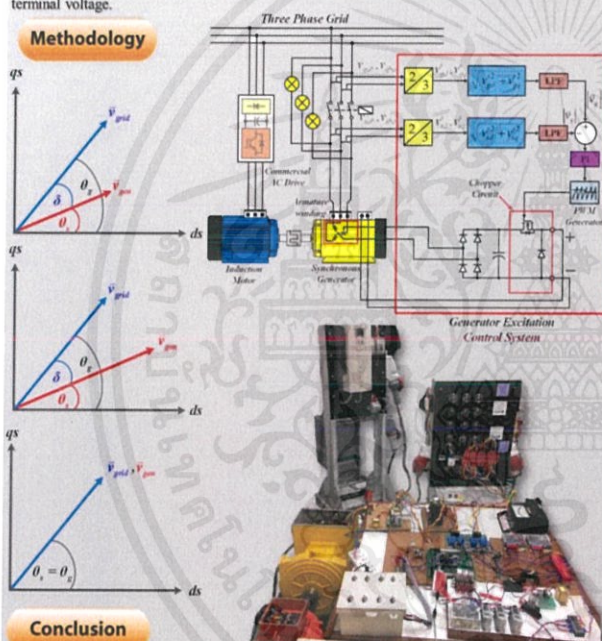
Kollawat Kitkannukul<sup>1</sup>, Theptada Songphasuk<sup>2</sup>, Theerapon Chawanviwat<sup>3</sup>  
Project Advisor: Asst.Prof.Dr.Warachart Suwan-ngam

Department of Electrical Engineering

### Abstract

The aim of this project is to construct the automatic voltage regulator for controlling the terminal voltage of a synchronous generator using a chopper circuit. Terminal voltage control is applicable to both stand-alone operation and grid synchronization, but for this project, only grid synchronization is focused. The amplitude of the grid voltage vector is used as a reference for controlling the generator terminal voltage. The reference frame theory and PI controller is applied to this project. The PLECS software is applied to simulate the operation of the chopper circuit. The system is implemented by using the TMS320F2812 DSC for control of the generator terminal voltage.

### Methodology



### Conclusion

The experimental results shows that the amplitude of the generator terminal voltage vector is controlled to meet the amplitude of the amplitude of the grid voltage vector. With the manual control of the prime-mover speed, the grid synchronization is achieved as shown in the experimental results. The future work for this project is to automatically control the prime-mover speed and reactive power of the generator.

### References

- [1] Stephen D. Umans, "Fitzgerald & Kingsley's Electric Machinery," 7th Edition
- [2] Warachart Suwan-ngam, "lecture note of the 01026404 Electrical Machine Drive and System, Faculty of Engineering, KMITL, 2016 (in Thai)

### Results

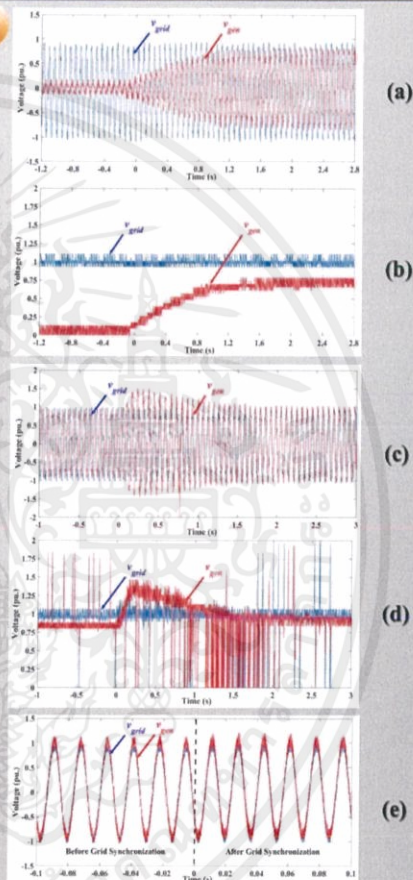


Figure 1 (a) D-axis stationary component waveforms and (b) amplitude of the Terminal and grid voltage vector during enable PWM (c) D-axis stationary component waveforms and (d) amplitude of the Terminal and grid voltage vector during enable controller (e) D-axis stationary component waveforms During grid synchronization

ENGINEERS  
LADKRABANG

Advisor Email: warachart.su@kmitl.ac.th



ภาคผนวก ข.

วงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้า, ส่วนวงจรกำลัง และส่วนวงจรถวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

## วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า, ส่วนวงจรกำลัง และส่วนวงจรควบคุม

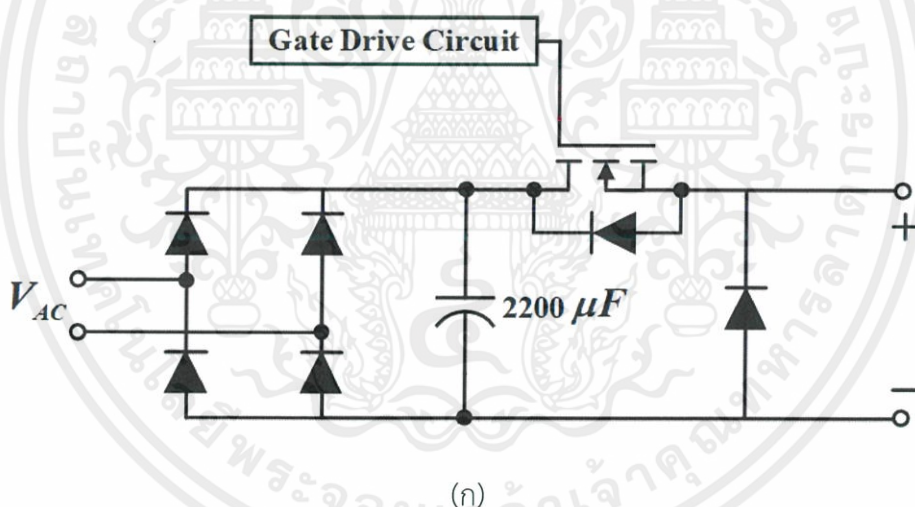
## ข.1 วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า

ในการสร้างวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าที่จะใช้ควบคุมการกระตุ้นขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสนั้นจำเป็นต้องมีส่วนควบคุม ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนวงจรกำลัง และส่วนวงจรควบคุม ซึ่งจะอธิบายดังต่อไปนี้

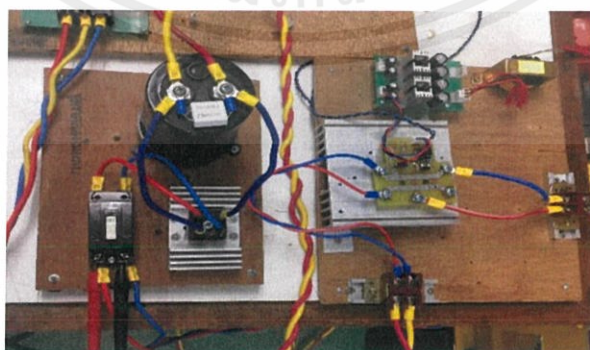
## ข.1.1 ส่วนวงจรกำลัง (Power Circuit)

## ข.1.1.1 วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าหรือวงจรชอปเปอร์

วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ ข.1(ก) ประกอบไปด้วย บริดจ์ เรกติไฟร์ จำนวน 1 ตัว, ตัวเก็บประจุขนาด 2200 ไมโครฟารัด 450 VDC จำนวน 1 ตัว, มอสเฟต เบอร์ IRFP460 ซึ่งมีพิกัดแรงดัน 500 V พิกัดกระแส 20 A จำนวน 1 ตัว และไดโอด ชนิด Ultrafast Recovery MUR460 ซึ่งมีพิกัดแรงดัน 600 V พิกัดกระแส 4 A จำนวน 1 ตัว ดังต่อวงจรจริงตามรูปที่ ข.1(ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ ข.1 วงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า (ก) ไดอะแกรมวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า

(ข) รูปชิ้นงานวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข.1.1.2 ส่วนอุปกรณ์ป้องกันวงจรกำลัง

อุปกรณ์ป้องกันวงจรกำลัง Circuit Breaker 2 ขั้ว ขนาด 220 V, 50 Hz, 20 A,  $I_c = 1.5$  kA ถูกติดตั้งเพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากผู้ทดลอง หรือความผิดพลาดของระบบ เช่น อุปกรณ์ที่ใช้ชำรุด หรือเกิดการลัดวงจรเนื่องจากสาเหตุต่างๆ เป็นต้น



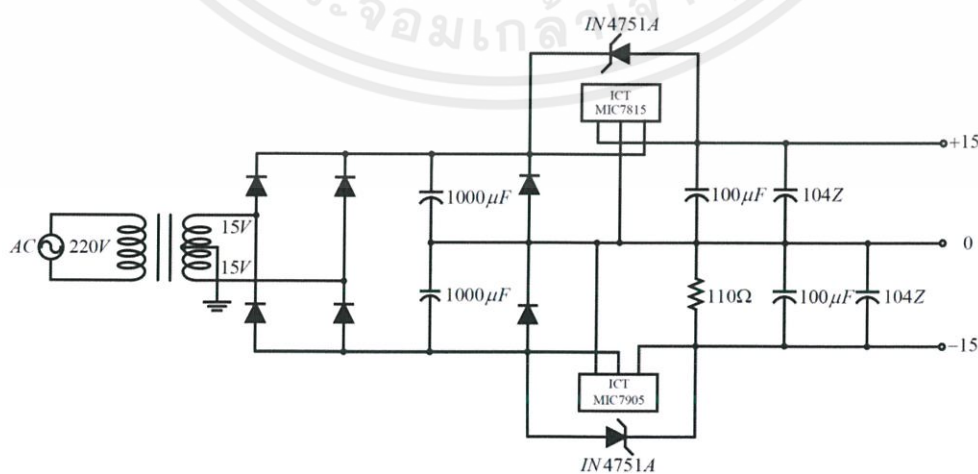
รูปที่ ข.2 อุปกรณ์ป้องกันวงจรกำลัง

### ข.1.2 ส่วนวงจรควบคุม (Control Circuit)

วงจรควบคุมนั้นถูกใช้เพื่อควบคุมการทำงานของวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสผ่านการกระตุ้นขดลวดสนาม ในส่วนวงจรควบคุมนั้นจะสร้างสัญญาณพีดีบีลยูเอ็มขึ้นมาเพื่อใช้ควบคุมมอเตอร์ที่อยู่ในวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า โดยสามารถแบ่งส่วนประกอบของวงจรควบคุมได้ดังต่อไปนี้

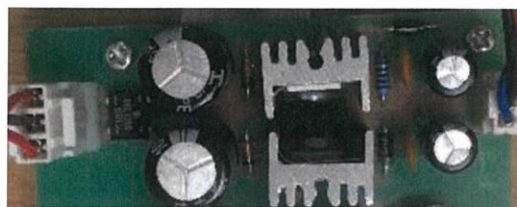
#### ข.1.2.1 วงจรแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง

ในการทำงานวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า จำเป็นที่ต้องใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด +15 V และ -5 V จำนวน 1 ชุด ดังรูปที่ ข.2(ก) และ ข.2(ข) อีกทั้งยังมีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (Switching power supply) ขนาด +5 V เพื่อนำไปจ่ายให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังรูปที่ ข.2(ค) จำนวน 3 ชุด และขนาด +15 V เพื่อนำไปจ่ายให้กับวงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า และไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังรูปที่ ข.2(ง) จำนวน 3 ชุด



(ก)

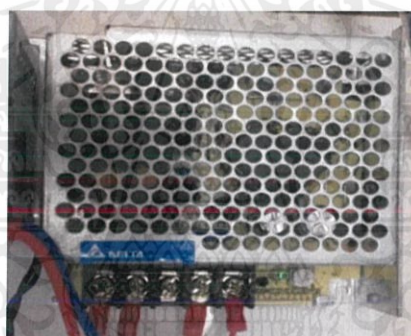
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)



(ค)



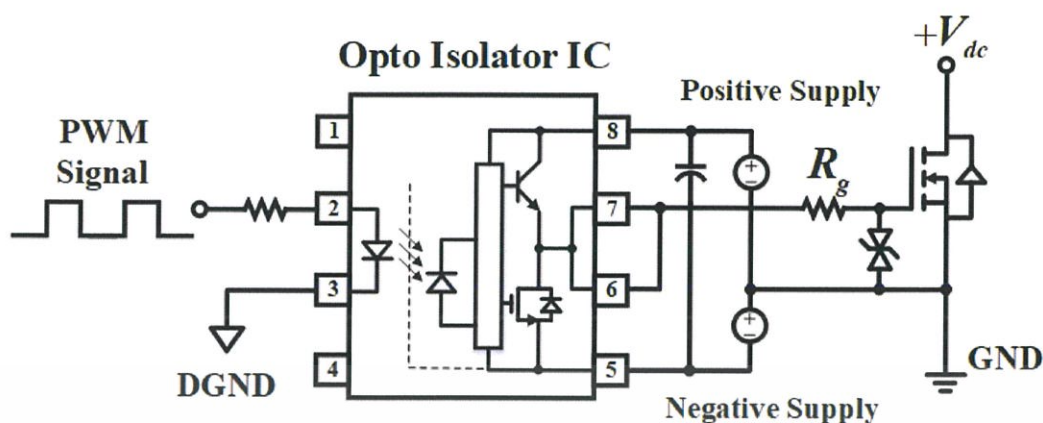
(ง)

รูปที่ ข.3 วงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (ก) ไดโอดแกรมวงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด +15 V -5 V, (ข) รูปวงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด +5 V, (ค) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด +5 V, (ง) แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด +15 V

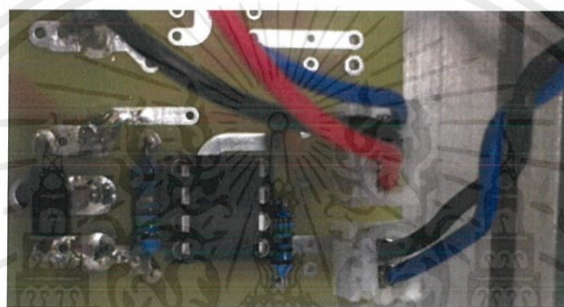
#### ข.1.2.2 วงจรขับเคลื่อน (Gate Drive Circuit)

วงจรขับเคลื่อนถูกใช้สำหรับวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อเพิ่มระดับสัญญาณควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ควบคุมสวิตช์ในวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งในการควบคุมวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้านั้นวงจรควบคุมจะสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม แล้วจึงจ่ายให้กับวงจรขับเคลื่อนซึ่งต่ออยู่กับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด+15 V และ -5 V โดยวงจรขับเคลื่อนจะเพิ่มระดับสัญญาณควบคุม แล้วจึงจ่ายให้กับสวิตช์ในวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า ในส่วนของวงจรขับเคลื่อนนั้นจะประกอบไปด้วยตัวต้านทาน ขนาด 1.5 กิโลโอห์ม, ตัวต้านทาน ขนาด 15 โอห์ม, ซีโอกี้ ไดโอด (Schottky Diode) เบอร์ P6KE15CA, ตัวเก็บประจุเซรามิก เบอร์ 104Z และไอซี HCPL3120 ดังรูปที่ ข.4(ก) และ ข.4(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

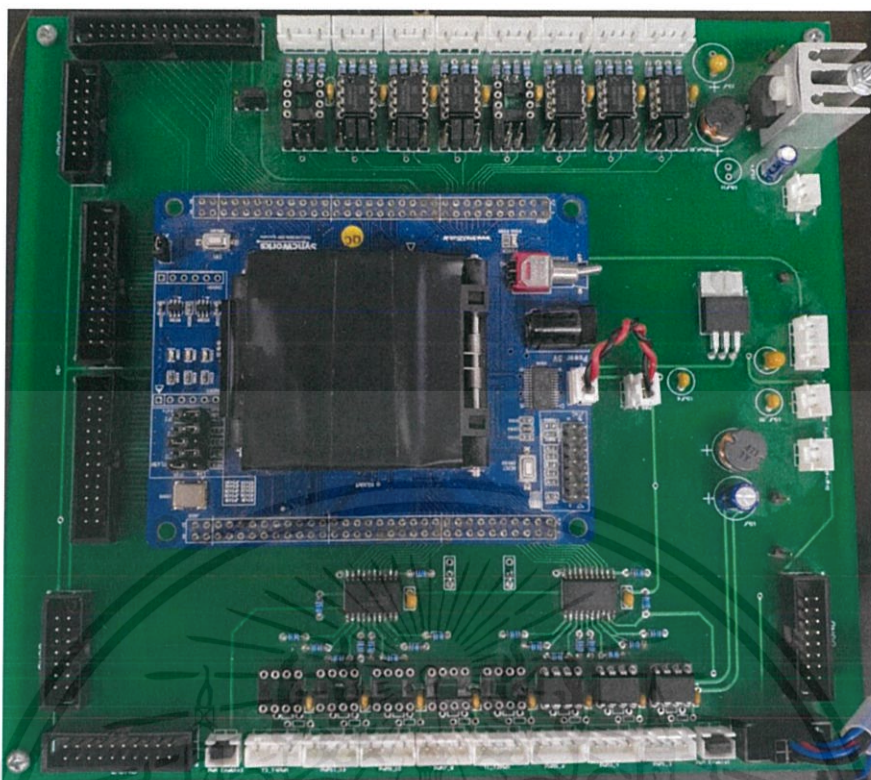


(ข)

รูปที่ ข.4 วงจรขับเกต (ก) ไดรเวอร์วงจรขับเกต (ข) รูปชิ้นงานวงจรขับเกต

### ข.1.2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

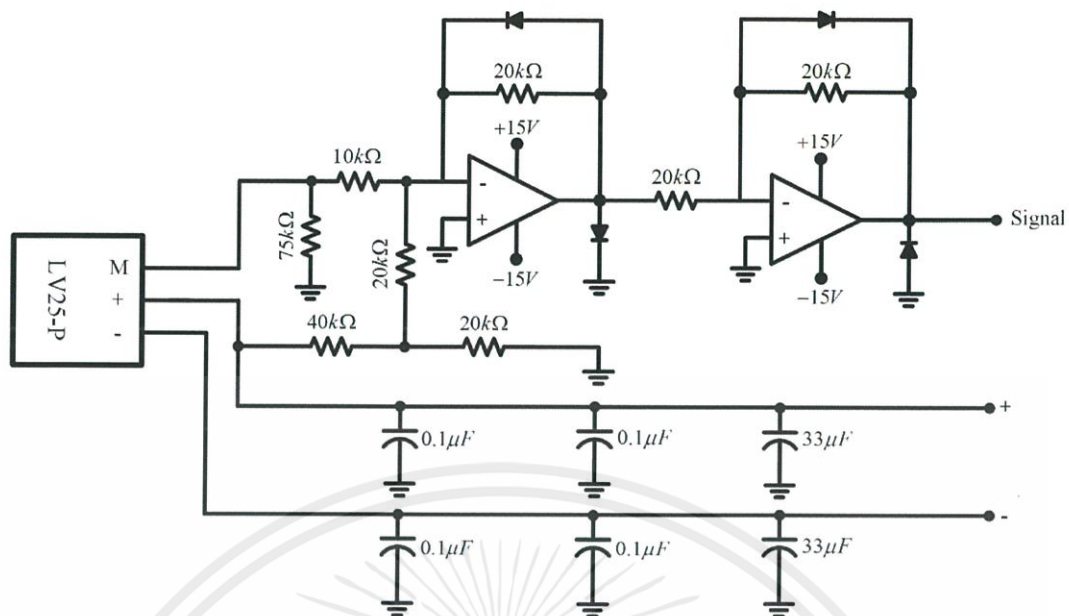
ในวงจรควบคุมนั้น จะใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMS320F2812 ในการควบคุม ดังรูปที่ ข.5 ซึ่งจะใช้ภาษาซี(C language)ในการเขียนชุดคำสั่งเพื่อรับคำสั่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แล้วจึงทำการประมวลผลและเปรียบเทียบ จากนั้นจึงสร้างสัญญาณพีดีบีแอลยูเอ็มเพื่อส่งไปใช้ในการควบคุมวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า ในการเขียนชุดคำสั่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นใช้โปรแกรม Code Composer Studio 8.3.0



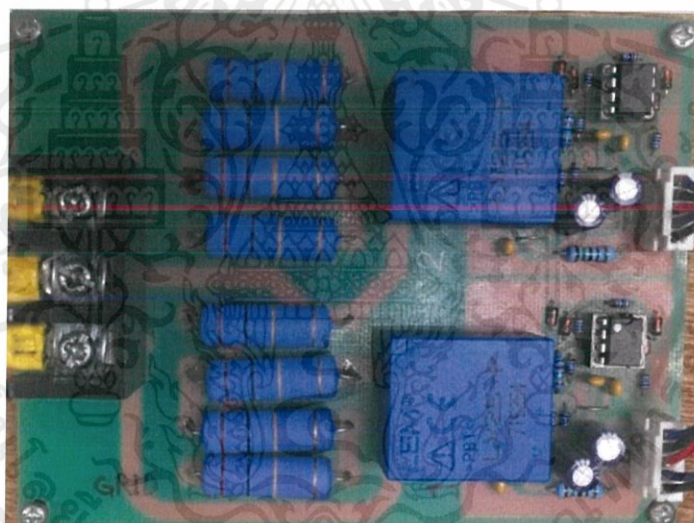
รูปที่ ข.5 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น TMS320F2812

#### ข.1.2.4 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า

วงจรตรวจวัดระดับแรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ ข.6(ก) และ ข.6(ข) ถูกใช้เพื่อทำหน้าที่วัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส จากนั้นจึงส่งสัญญาณที่วัดได้ไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มต่อไป อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าคือ Voltage Transducer เบอร์ LV25-P ซึ่งมีพิกัดแรงดันสูงสุดที่สามารถวัดได้ 500 V และสามารถวัดได้ทั้งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสสลับ โดยสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้นั้นจะต้องผ่านวงจรปรับสภาพสัญญาณ(Signal Conditioning Circuit) เพื่อปรับสภาพสัญญาณให้เหมาะสมก่อนที่จะส่งไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์



(ก)



(ข)

รูปที่ ข.6 วงจรตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า (ก) โต๊ะแกมวงจรถวายวัดแรงดันไฟฟ้า  
(ข) รูปชิ้นงานวงจรถวายวัดแรงดันไฟฟ้า

## เครื่องรักษาระดับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

### AN AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR FOR A SYNCHRONOUS GENERATOR

กมลวีร กิจกาญจน์กุล เทพราดา ทรงผาสุข และธีรพล ขวาลวิวัฒน์

สาขาวิศวกรรมพลังงานไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซ.ฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร/โทรสาร. 02-7392478

#### บทคัดย่อ

ปริญาานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอการออกแบบเครื่องรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยทำการควบคุมผ่านวงจรถอนระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้แก่วงจรกระตุ้นสำหรับขดลวดสนาม โดยในการควบคุมวงจรถอนระดับจะกระทำโดยการวัดค่าแรงดันไลน์ของระบบไฟฟ้าเป็นแรงดันอ้างอิงและเปรียบเทียบกับค่าแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจะถูกป้อนเข้าสู่ระบบควบคุมชนิดพี-ไอ เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมและถูกแปลงเป็นสัญญาณพัลส์เบรียเอมเพื่อขับสวิตช์ของวงจรถอนระดับ ในโครงการนี้จะทำการทดลองโดยอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ TMS320F2812

#### Abstract

This thesis presents the design of an automatic voltage regulator for a synchronous generator. The chopper circuit is used to control the voltage supplied to an excitor of the generator. In this project, the two grid line voltages and the generator terminal voltages are measured for calculating the amplitude of the grid and terminal voltage vectors. The amplitudes are then compared, and the error is fed to the PI controller. The output signal is converted to a PWM signal to drive the power switch of the chopper circuit. In this project, the designed is implemented by using the TI TMS320F2812 digital signal controller.

#### 1. บทนำ

การเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าในทางปฏิบัติพบปัญหาการเชื่อมต่อที่มีความซับซ้อน เนื่องจากการที่จะเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าได้นั้นจำเป็นต้องปรับเงื่อนไข ดังต่อไปนี้ ขนาดของแรงดันไฟฟ้า ลำดับเฟสของแรงดันไฟฟ้า มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้า และความถี่ของแรงดันไฟฟ้า โดยที่ให้ครบทุกเงื่อนไขของทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าที่กล่าวมาข้างต้นเสียก่อน

ในวิชาปฏิบัติการทางวิศวกรรมไฟฟ้าของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นต้นกำลังทางกล ในการดำเนินการจะใช้หม้อแปลงอัตโนมัติปรับค่าได้ในการปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้กระตุ้นขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และมีการปรับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสด้วยการปรับความเร็วของต้นกำลังทางกล ซึ่งปรับจากความต้านทานของขดลวดสนามของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จะเห็นได้ว่าการดำเนินการต้องอาศัยผู้ที่มีความชำนาญในการปรับค่า เนื่องจากทำได้ค่อนข้างยาก

โดยในโครงการนี้จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ(Induction motor) เป็นต้นกำลังทางกล เพื่อทำการขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส (Synchronous generator) และช่วยปรับความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสให้เท่ากับความถี่ของระบบไฟฟ้า แล้วใช้อุปกรณ์พาวเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ในการลดทอนระดับของแรงดันไฟฟ้า (Chopper circuit)

จากที่กล่าวมาข้างต้น จึงมีการศึกษาวิธีการทดสอบเงื่อนไขในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซิงโครนัส และระบบไฟฟ้าทั้ง 4 เงื่อนไข รวมไปถึงลักษณะของวงจรปรับทอนระดับแรงดันไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ในโครงการงาน ซึ่งจะมีการนำขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซิงโครนัส และระบบไฟฟ้ามาเปรียบเทียบกับโดยใช้อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม ซึ่งจะนำไปใช้ควบคุมการเปิด-ปิดของสวิตช์กำลังในวงจรทอนระดับแรงดันไฟฟ้า จากนั้นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ผ่านการลดทอนแรงดันจะถูกนำไปกระตุ้นขดลวดสนามในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซิงโครนัส ทั้งนี้เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส และระบบไฟฟ้าให้มีขนาดเท่ากัน ซึ่งจะสามารถทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์

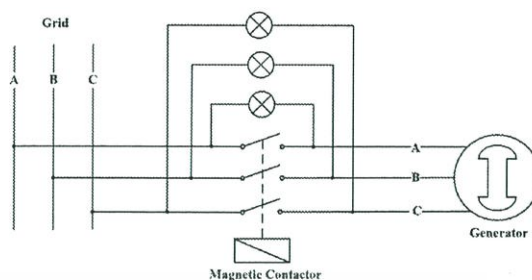
## 2. การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า

การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าหรือการเชื่อมต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า สาเหตุที่ต้องทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า เพราะต้องการรองรับการจ่ายโหลดที่เพิ่มมากขึ้น และช่วงเวลาที่ทำกรซ่อมบำรุงหรือเกิดเหตุขัดข้อง ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถทำงานได้ก็จำเป็นต้องขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้าไปเพื่อทดแทนการจ่ายโหลดปกติ

## 3. เงื่อนไขการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า

ขนาดของแรงดันไฟฟ้า ความถี่ของแรงดันไฟฟ้า ลำดับเฟสของแรงดันไฟฟ้า และมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องเท่ากับระบบไฟฟ้า

## 3.1 การทดสอบเงื่อนไขการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าด้วยหลอดไฟ



รูปที่ 1 การทดสอบเงื่อนไขการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าด้วยหลอดไฟ

กรณีที่ 1 ถ้าขนาดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าไม่เท่ากันหรือ กรณีนี้ให้ลำดับเฟส มุมเฟสและความถี่เท่ากัน ผลที่แรงดันไฟฟ้าไม่เท่ากันจะทำให้หลอดไฟทั้งสามดวงสว่าง ความสว่างขึ้นอยู่กับผลต่างแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้า จึงต้องปรับขนาดแรงดันให้เท่ากัน

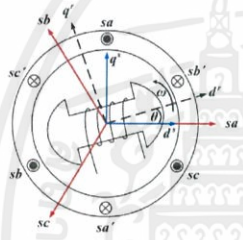
กรณีที่ 2 ถ้าลำดับเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าไม่ตรงกัน สมมติให้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีลำดับเฟสเป็น CBA ส่วนระบบไฟฟ้ามีลำดับเฟสเป็น ABC ในกรณีนี้ให้ขนาดแรงดัน มุมเฟสและความถี่เท่ากัน ผลที่ลำดับเฟสไม่ตรงกัน ทำให้มีหลอดไฟสว่างหนึ่งดวงและหลอดไฟดับสองดวง จึงต้องทำการสลับลำดับเฟสให้ตรงกัน

กรณีที่ 3 ถ้ามุมเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าไม่ตรงกัน ในกรณีนี้ให้ขนาดแรงดันลำดับเฟสและความถี่เท่ากัน ผลที่มุมเฟสไม่ตรงกัน ทำให้หลอดไฟทั้งสามดวง ติดๆ ดับๆ สลับกันไปเรื่อยๆ

กรณี 4 ถ้าความถี่ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าไม่เท่ากัน ในกรณีนี้ให้ขนาดแรงดันลำดับเฟสและมุมเฟสเท่ากัน ผลจากการที่ความถี่ไม่เท่ากัน ทำให้หลอดไฟทั้งสามดวงกะพริบพร้อมกัน เพราะจังหวะที่เวกเตอร์แรงดันทับกันนั้นหลอดไฟดับ แต่จังหวะที่เวกเตอร์แรงดันไม่ทับกันหลอดไฟก็จะสว่าง ดังนั้นจังหวะการกะพริบขึ้นกับผลต่างของความถี่ของเครื่องกำเนิดกับระบบไฟฟ้า

#### 4. ทฤษฎีกรอบอ้างอิง อุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ และการกระตุ้นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

การควบคุมการทำงานของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส แบบขั้วยื่น (Salient Pole Rotor) ดังรูปที่ 2. ต้องอาศัยหลักการของทฤษฎีกรอบอ้างอิง โดยจะต้องแปลงกรอบอ้างอิงสามเฟส เป็นกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง และกรอบอ้างอิงหมุน ในการควบคุมตัวแปรของเครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัส โดยด้านที่มีช่องว่างอากาศน้อยหรือด้านมีขั้วยื่นออกมา กำหนดให้เป็นแกนตรง (Direct-axis or d-axis) และด้านที่มีช่องว่างอากาศมากจะกำหนดให้เป็นแกนตั้งฉาก (Quadrature-axis or q-axis) โดยแนวแกนจะตั้งฉากกับแกนตรงหรือทำมุมห่างกัน 90 องศา



รูปที่ 2 เครื่องจักรไฟฟ้าซิงโครนัสชนิดโรเตอร์ขั้วยื่น (Salient Pole Rotor)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะสามารถทำงานเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่อมีการกระตุ้นขดลวดสนามเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก และจำเป็นต้องมีกำลังทางกลเพื่อที่จะขับให้โรเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบเท่ากับความเร็วซิงโครนัส (synchronous speed) ดังสมการ ดังนี้

$$n_s = \frac{120f}{P}$$

โดย  $n_s$  แทน ความเร็วซิงโครนัส (rpm)

$f$  แทน ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้า (Hz)

$P$  แทน จำนวนขั้วแม่เหล็ก

วิธีการแปลงกรอบอ้างอิง (Reference frame transformation) โดยเป้าหมายในการเปลี่ยนรูปแบบสัญญาณคลื่นให้เป็นสัญญาณเส้นตรงหรือสัญญาณที่มีค่าคงตัว มีขั้นตอนดังนี้ การแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสเป็นกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง การแปลงจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งเป็นกรอบอ้างอิงหมุน และการแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสเป็นกรอบอ้างอิงหมุน

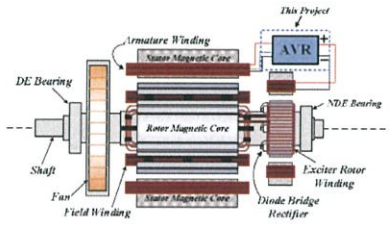
#### 4.1 การแปลงจากกรอบอ้างอิงสามเฟสเป็นกรอบอ้างอิงหมุน

การแปลงกรอบอ้างอิงนี้จะแปลงรูปแบบสัญญาณคลื่นสามเฟสเป็นสัญญาณเส้นตรง โดยสัญญาณสามเฟส  $abc$  จะแปลงเป็น  $dq'$  ซึ่งเป็นกรอบอ้างอิงหมุนที่มีความเร็วเชิงมุม  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$  โดยที่  $\theta$  เป็นมุมระหว่างกรอบอ้างอิงหมุนกับกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง จะได้ตามสมการ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} f_d' \\ f_q' \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta_r & -\sin \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}$$

#### 4.2 วิธีการกระตุ้นที่ใช้ในการทดลอง

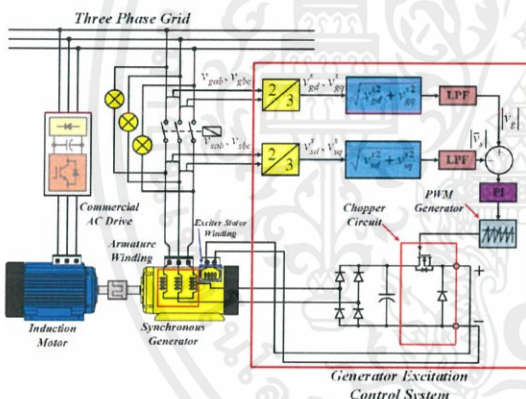
โครงงานนี้มุ่งเน้นไปที่การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขดลวดอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า วิธีการกระตุ้นในการทดลองจะเป็นแบบ Self-excited (shunt) จะทำการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ขั้วอาร์เมเจอร์ไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง แล้วจะใช้วงจรชอปเปอร์ในการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ไปกระตุ้นขดลวดสนาม แต่เนื่องด้วยที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ที่โรเตอร์จะสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ แล้วผ่านวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จะไปกระตุ้นขดลวดสนามที่โรเตอร์ ตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนผังแสดงการกระตุ้นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ใช้ในโครงงานนี้ [4]

5. การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์

ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส สามารถควบคุมได้ผ่านการควบคุมขนาดของกระแสกระตุ้นที่ขดลวดสนาม ซึ่งในปริภูมิพอร์เลนนี้จะเน้นไปที่การควบคุมกระแสกระตุ้นขดลวดสนามผ่านอุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ ตามรูปที่ 4.

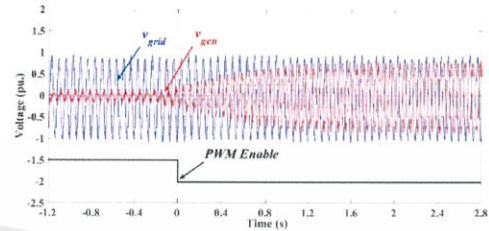


รูปที่ 4 ไดอะแกรมการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขดลวดอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส [4]

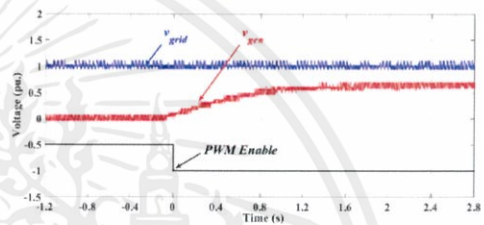
6. ผลการทดลองช่วงก่อนการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า

ช่วงก่อนการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า เป็นช่วงที่ทำการปรับเงื่อนไขการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า ต้องอาศัยการปรับจางจรไดร์ฟปรับด้วยมือที่ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และวงจรชอปเปอร์ต้องอาศัยการควบคุมจากไมโครคอนโทรลเลอร์ในส่งสัญญาณ

พีดีบีเบิลยูเอเอ็มในการปรับแรงดันไฟฟ้าให้การกระตุ้นขดลวดสนาม ให้ทุกเงื่อนไขของการขนานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับเงื่อนไขของระบบไฟฟ้า โดยมีผลการทดลองดังนี้

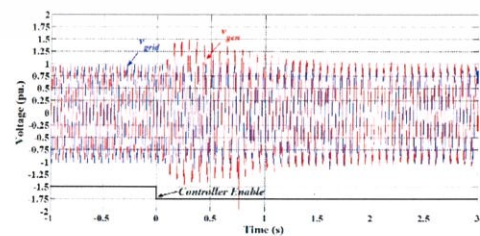


(ก)

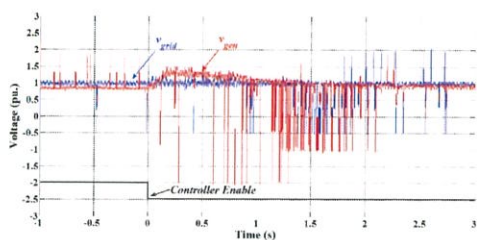


(ข)

รูปที่ 5 ผลการทดลองแสดง (ก) รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า (ข) แอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้าในแนวแกน d ของระบบกริดอ้างอิงหยุดนิ่งช่วงการเปิดการทำงานสัญญาณพีดีบีเบิลยูเอเอ็ม จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นการทำงานช่วงการเปิดทำงานของสัญญาณพีดีบีเบิลยูเอเอ็มที่เป็นค่าตั้งต้นไว้ ผลที่ได้จะแสดงถึงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขดลวดอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสขนาดที่เพิ่มขึ้น แต่ก็ยังไม่เท่ากับแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า



(ก)

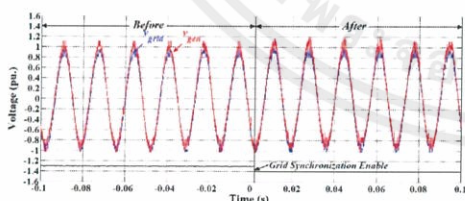


(ข)

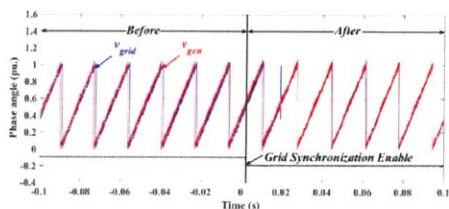
รูปที่ 6 ผลการทดลองแสดง (ก) สัญญาณแรงดันไฟฟ้า (ข) แอมพลิจูดของแรงดันไฟฟ้า ในแนวแกน d ของระบบรอบอ้างอิงหยุดนิ่งในช่วงการเปิดการทำงานการเปรียบเทียบ PI

จากรูป 6 แสดงให้เห็นการทำงานการเปรียบเทียบ PI เป็นการอัปเดตค่าของค่าที่ดับเบิลยูเอ็มที่ควบคุมการทำงานวงจรชอปเปอร์ให้มีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าของขั้วขดลวดสนาม ให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า ผลที่ได้จะแสดงถึงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วขดลวดอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมีค่าใกล้เคียงแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า ก่อนที่จะทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า

ผลการทดลองช่วงการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า ได้ผลการทดลองดังนี้



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 ผลการทดลองแสดง (ก) สัญญาณแรงดันไฟฟ้า (ข) มุมเฟสของแรงดันไฟฟ้า ในแนวแกน d ของระบบรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง ในช่วงการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า

จากรูปที่ 7 แสดงผลทดลองในช่วงการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า พบว่าสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า โดยสังเกตได้จากกราฟที่กราฟสีน้ำเงินจะเป็นแรงดันไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้า ส่วนกราฟสีแดงจะเป็นแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะแสดงให้เห็นถึงเงื่อนไขในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า โดยมีขนาดแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน ความถี่เท่ากัน ลำดับเฟสตรงกัน และมีมุมเฟสที่ตรงกัน โดยค่าที่กล่าวอ้างมาข้างต้น อาจจะมีค่าเท่ากัน ตรงกันหรือใกล้เคียงกัน ส่วนกราฟเส้นสีดำแสดงเห็นการทำงานในช่วงก่อนและหลังการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า ฝั่งซ้ายของกราฟสีดำเป็นการแสดงการทำงานก่อนการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า ส่วนฝั่งซ้ายของกราฟสีดำเป็นการแสดงการทำงานหลังการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า

## 7. สรุปผลการทดลอง

การทดสอบการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า โดยทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าของทั้งระบบไฟฟ้าและเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จากนั้นนำสัญญาณที่ได้มาแปลงรอบอ้างอิงแล้วคำนวณหาขนาด เพื่อนำขนาดสัญญาณที่ได้มาเปรียบเทียบผ่านตัวควบคุมแบบพีไอ แล้วสร้างสัญญาณที่ดับเบิลยูเอ็มเพื่อใช้ควบคุมวงจรทอนระดับแรงดัน หรือวงจรชอปเปอร์ ซึ่งวงจรดังกล่าวจะถูกใช้เพื่อควบคุมค่าแรงดันกระตุ้นที่จ่ายให้กับขดลวดสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

จากผลการทดลอง จะแสดงให้เห็นว่าในขณะที่ช่วงก่อนการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้านั้น สัญญาณแรงดันที่วัดได้จะมีขนาดที่แตกต่างกัน อีกทั้งยังมีมุมเฟสของสัญญาณที่ไม่ทับกัน ในช่วงนี้เองจึงยังไม่สามารถที่จะทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าได้ เนื่องจากปัญหาด้านเงื่อนไขในการขนานกันดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 1 เมื่อทำการเปิดใช้งานฟังก์ชันที่ดับเบิลยูเอ็ม และตัวควบคุมแบบพีไอ ผลที่ได้คือ ค่า

ให้กราฟค่าแอมพลิจูดของสัญญาณแรงดันที่วัดจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า มีค่าใกล้เคียง หรือเท่ากับสัญญาณแรงดันที่วัดจากระบบไฟฟ้า

หลังจากทำการปรับขนาดแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มีค่าใกล้เคียง หรือเท่ากับระบบไฟฟ้าได้แล้วนั้น ในช่วงนี้ยังไม่สามารถทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าได้ เนื่องจากกราฟสัญญาณแรงดันทั้งสองยังไม่ทับกันจึงต้องทำการปรับเงื่อนไขความถี่และมุมเฟสของสัญญาณแรงดันทั้งสองให้เท่ากัน ซึ่งทำได้โดยการปรับเพิ่มความเร็วของต้นกำลังทางกลโดยใช้อุปกรณ์ AC Drive หลังจากทำการปรับความเร็วของต้นกำลังทางกลแล้วนั้น กราฟสัญญาณแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าจะทับกัน ซึ่งในช่วงนี้เองที่สามารถทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าได้ หลังจากขนานกันแล้วสัญญาณแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและระบบไฟฟ้าจะทับกัน

#### 8. ข้อเสนอแนะ

1. เพื่อพัฒนาโครงการนี้ให้มีประโยชน์มากขึ้น ผู้พัฒนาควรเพิ่มฟังก์ชันการควบคุมกำลังไฟฟ้าเสมือน ให้กับโครงการชิ้นนี้ด้วย

2. เนื่องจากในโครงการนี้ เราจะควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นหนึ่งในเงื่อนไขการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้า และในส่วนเงื่อนไขที่เหลือจะเป็นการควบคุมผ่านผู้ทดลองเอง ทำให้การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้ายังไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้นจึงควรพัฒนาโครงการนี้ให้สามารถควบคุมทั้ง 4 เงื่อนไขการขนานและทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเข้ากับระบบไฟฟ้าได้เองอัตโนมัติ

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย, “เอกสารประกอบการสอนเรื่อง เครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัส”, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง; ภาคการศึกษาที่ 2/2559
- [2] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, **Power Electronics Converter, Application and Design: 3<sup>th</sup> Ed.**, United States of America: John Wiley & Sons, Inc.,

- [3] สมยศ เกียรติวนิชวิไล, **ระบบควบคุม, พิมพ์ครั้งที่ 2**, กรุงเทพฯ: สนพ.มีน เซอร์วิสเซ็พพลาย; ตุลาคม 2555
- [4] วรชาติ สุวรรณงาม, “เอกสารประกอบการสอนเรื่อง การขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้า”, ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง; ปีการศึกษาที่ 2/2561

#### ประวัติผู้เขียน



นายกลวัชร กิจกาญจนกุล  
เกิดวันที่ 21 เมษายน 2540  
โทรศัพท์ 095-4413811  
E-mail: Jeanjong\_carter@hotmail.com



นายเทพธาดา ทรงผาสุข  
เกิดวันที่ 13 พฤษภาคม 2540  
โทรศัพท์ 098-6560030  
E-mail: theptada53@gmail.com



นายธีรพล ขวาลวิวัฒน์  
เกิดวันที่ 30 ตุลาคม 2539  
โทรศัพท์ 097-1790085  
E-mail: 58010597@kmitl.ac.th

## ประวัติผู้เขียน



นายกลวัชร กิจกาญจนกุล  
 เกิดวันที่ 21 เมษายน 2540  
 โทรศัพท์ 095-4413811  
 E-mail: Jeanjong\_carter@hotmail.com



นายเทพธาดา ทรงผาสุข  
 เกิดวันที่ 13 พฤษภาคม 2540  
 โทรศัพท์ 098-6560030  
 E-mail: theptada53@gmail.com



นายธีรพล ชวาลวิวัฒน์  
 เกิดวันที่ 30 ตุลาคม 2539  
 โทรศัพท์ 097-1790085  
 E-mail: 58010597@kmitl.ac.th