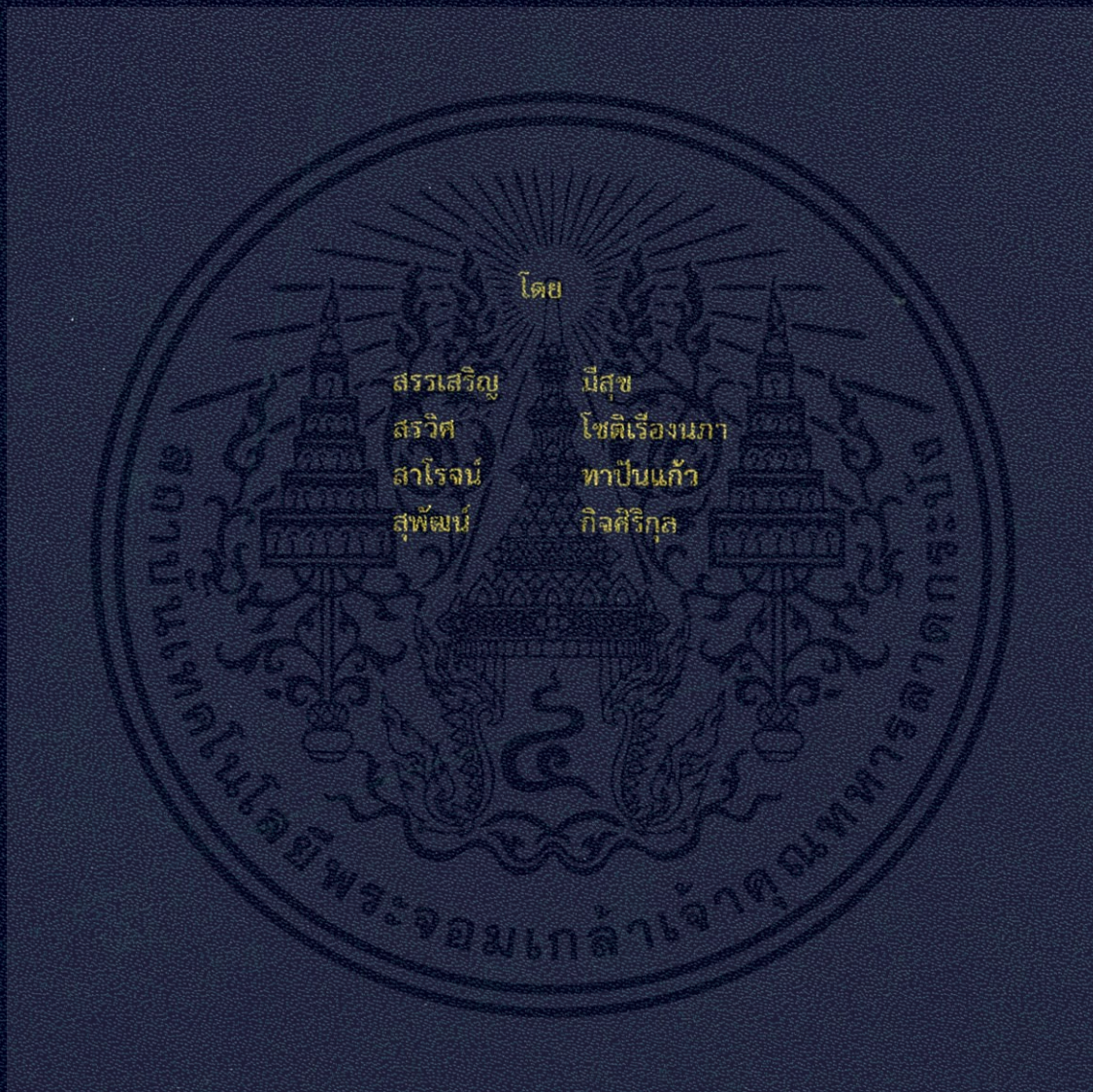


การควบคุมวงปิดสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง  
Closed loop control for a DC motor



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

การควบคุมวงปิดสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง  
Closed loop control for a DC motor



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Closed loop control for a DC motor



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

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2556

การควบคุมวงปิดสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง  
Closed loop control for a DC motor



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

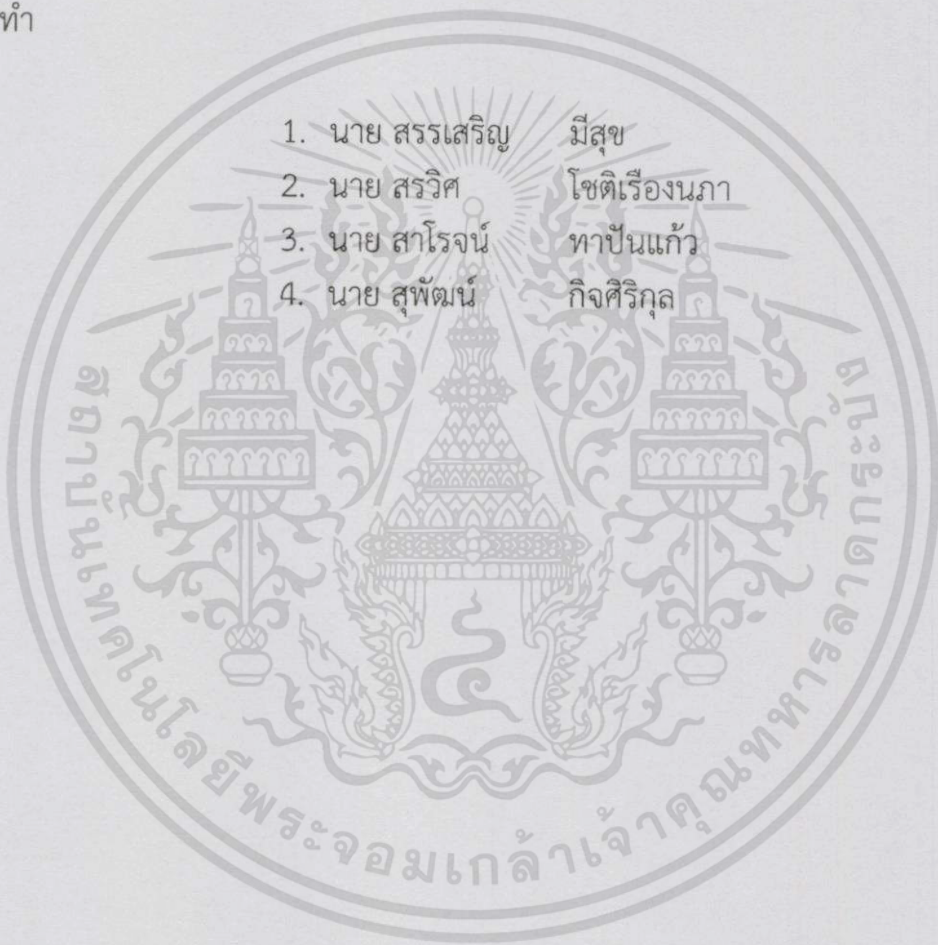
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การควบคุมวงปิดสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ผู้จัดทำ

1. นาย สรรเสริญ มีสุข
2. นาย สรวิศ โชติเรืองนภา
3. นาย สาโรจน์ ทาป็นแก้ว
4. นาย สุพัฒน์ กิจศิริกุล



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผศ.ดร.วรชาติ สุวรรณงาม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การควบคุมวงปิดสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

นาย สรรเสริญ	มีสุข	
นาย สรวิต	โชติเรืองนภา	
นาย สาโรจน์	ทาปิ่นแก้ว	
นาย สุพัฒน์	กิจศิริกุล	
ผศ.ดร. วรชาติ	สุวรรณงาม	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2556		

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการควบคุมแบบวงปิดสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อใช้งานมอเตอร์ดังกล่าวเป็นต้นกำลังสำหรับการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส สำหรับการขนานกับระบบไฟฟ้า โครงการนี้ได้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกขนาด 1 kW ซึ่งถูกขับปลั๊กกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยมอเตอร์ดังกล่าวจะถูกขับเคลื่อนด้วยคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ (Full Bridge DC-DC converter) ซึ่งถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ STM32F407VG ในการออกแบบและจำลองการทำงานของระบบควบคุม จะถูกจำลองบนโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งระเบียบวิธีการที่ได้จะถูกนำมาใช้ในการสร้างระบบจริงต่อไป ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองจริงได้ถูกนำมาเปรียบเทียบสำหรับการวิเคราะห์และปรับปรุงสมรรถนะระบบให้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Closed loop control for a DC motor

Mr. Sunsern

Meesuk

Mr. Sorawit

Chotruangnapa

Mr. Sarod

Taaunkeaw

Mr. Supath

Kitsirikul

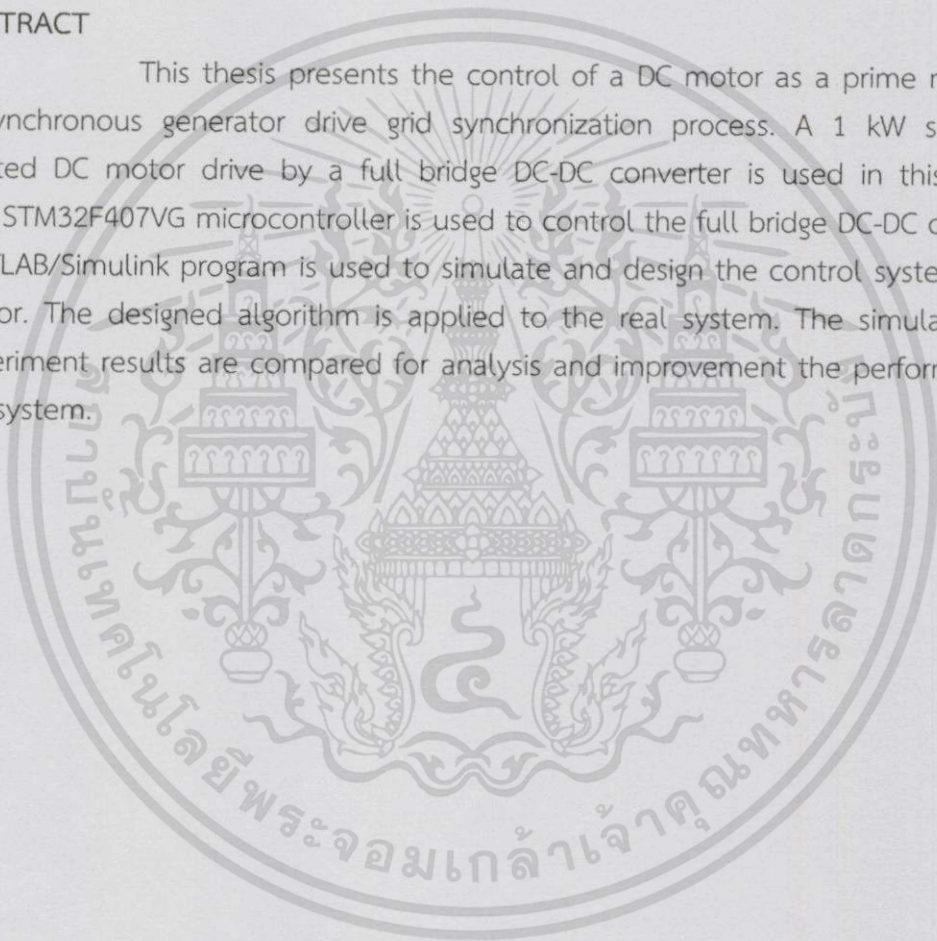
Asst.Prof.Dr.Warachart

Suwan-ngam Supervisor

Academic Year 2013

### ABSTRACT

This thesis presents the control of a DC motor as a prime mover for a synchronous generator drive grid synchronization process. A 1 kW separately excited DC motor drive by a full bridge DC-DC converter is used in this project. The STM32F407VG microcontroller is used to control the full bridge DC-DC converter. MATLAB/Simulink program is used to simulate and design the control system of the motor. The designed algorithm is applied to the real system. The simulation and experiment results are compared for analysis and improvement the performance of the system.



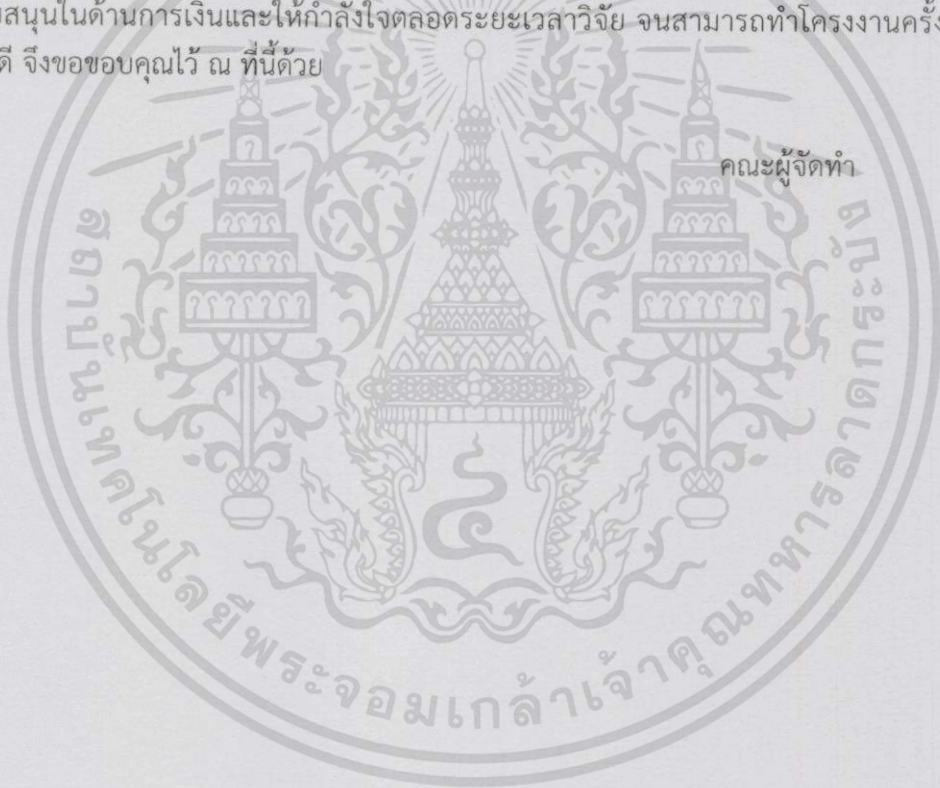
## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วราชาติ สุวรรณงาม อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้ความรู้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อปริญญาโทมาด้วยดีตลอด และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญาโทจนสำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งต่อความอนุเคราะห์เป็นอย่างมาก

ขอขอบพระคุณ อาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้ความช่วยเหลือตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณพงศธร ชูสุน และคุณพฤษภาพันธ์ มานวกุล ที่ปริญญาโทที่ให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือในการปฏิบัติงานมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ที่ให้คำแนะนำ และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัย สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัวที่ให้การสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจตลอดระยะเวลาวิจัย จนสามารถทำโครงการครั้งนี้สำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	XIV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	1
1.4 ขั้นตอนและวิธีการที่ใช้ในโครงการ	2
1.5 แผนการที่ใช้ในการดำเนินโครงการ	2
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง	4
2.2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง	4
2.2.2 การแปลงพลังงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง	5
2.2.2.1 การแปลงพลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	6
2.2.2.2 การแปลงพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	7
2.2.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	8
2.2.3.1 หลักการทำงาน	8
2.2.3.2 แรงบิด ความเร็ว และประสิทธิภาพ	10
2.3 ชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	11
2.3.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก	11
2.3.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน	12
2.3.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอนุกรม	14
2.3.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม	16
2.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	19
2.5 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง	19
2.5.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์	20
2.5.1.1 หลักการทำงาน	21
2.5.1.2 การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยเทคนิคการสวิตชิง	
แรงดันไฟฟ้าแบบไปโพลาร์	21

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.1.3 การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยเทคนิคการสวิตซ์ แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์	23
2.6 เฟสล็อกกลุ๊ป	25
2.6.1 ทฤษฎี	26
2.7 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า	27
2.7.1 เงื่อนไขการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	27
2.7.2 วิธีการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า	28
<b>บทที่ 3 หลักการทำงานและการออกแบบวงจร</b>	29
3.1 บทนำ	29
3.2 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	29
3.3 การจำลองทางคอมพิวเตอร์	31
3.3.1 การควบคุมความเร็วรอบแบบวงปิด	31
3.3.2 วงจรขับเคลื่อน	32
3.3.3 วงจรเฟสล็อกกลุ๊ป	33
3.4 การออกแบบและการสร้างวงจร	34
3.4.1 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า	34
3.4.2 วงจรกำลัง	36
3.4.2.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์	36
3.4.2.2 วงจรเฟสล็อกกลุ๊ป	37
3.4.2.3 อุปกรณ์ป้องกัน	38
3.4.3 วงจรควบคุม	39
3.4.3.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM CortexM4 STM32F407VG	39
3.4.3.2 วงจรขับเคลื่อน	39
3.4.3.3 วงจรตรวจวัดกระแส	40
3.4.3.4 วงจรเอนโคเดอร์	41
3.5 บทสรุป	43
<b>บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง</b>	44
4.1 บทนำ	44
4.2 การทดลอง	44
4.3 การทดลองความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	48
4.4 การทดลองกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	70
4.5 การทดลองแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	91
4.6 การทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า	102
4.7 การทดลองเฟสล็อกกลุ๊ป	104

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 บทสรุป	106
5.1 บทสรุป	106
5.2 ข้อเสนอแนะ	107
เอกสารอ้างอิง	108
ภาคผนวก	109
ภาคผนวก ก. รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	110
ภาคผนวก ข. รูปการทดลอง	114
ภาคผนวก ค. ตัวประกอบกำลังและความผิดพลาดของสัญญาณขาเข้า	116
ภาคผนวก ง. บทความวิชาการ	120
ประวัติผู้เขียน	125



## สารบัญญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ไดอะแกรมอย่าง่ายแสดงการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	4
2.2	วงจรสมมูลแสดงการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง	7
2.3	วงจรสมมูลแสดงการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	7
2.4	เวกเตอร์แสดงทิศทางของแรง กระแส และสนามแม่เหล็ก	9
2.5	วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก	11
2.6	กราฟคุณลักษณะระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก	12
2.7	วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน	13
2.8	กราฟคุณลักษณะระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน	14
2.9	วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม	14
2.10	กราฟคุณลักษณะระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม	15
2.11	วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนานยาว	16
2.12	วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนานสั้น	16
2.13	กราฟคุณลักษณะระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบฟลักซ์แม่เหล็กเสริมกัน	18
2.14	กราฟคุณลักษณะระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบฟลักซ์แม่เหล็กหักล้างกัน	18
2.15	ไดอะแกรมการต่อวงจรสวิตซ์กำลังของคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์	20
2.16	การสร้างสัญญาณ PWM แบบไบโพลาร์	23
2.17	การสร้างสัญญาณ PWM แบบยูนิโพลาร์	24
2.18	การทำงานของเฟสล็อกกลุ่	25
2.19	กรอบอ้างอิงซิงโครนัส	26
3.1	ไดอะแกรมการทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส	29
3.2	ไดอะแกรมการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	30
3.3	ไดอะแกรมการควบคุมวงปิดสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	30
3.4	แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	31
3.5	แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์การควบคุมความเร็วรอบแบบวงปิด	32
3.6	แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์วงจรสร้างสัญญาณ PWM	32
3.7	แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์วงจรเฟสล็อกกลุ่	33
3.8	วงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า	35
3.9	วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์	36
3.10	ชิ้นงานวงจรเฟสล็อกกลุ่	37
3.11	อุปกรณ์ป้องกัน	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปร่างภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM Cortex M4 STM32F407VG	39
3.13 วงจรขั้วเกต	40
3.14 วงจรตรวจวัดกระแส	41
3.15 วงจรเอนโคเดอร์	42
4.1 กระบวนการควบคุมความเร็วรอบแบบวงปิดสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	46
4.2 กระบวนการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงครันส์กับระบบไฟฟ้า	47
4.3 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจากการทำงาน switch 1 และ switch 2	48
4.4 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะไร้ภาระ	49
4.5 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะไร้ภาระ	49
4.6 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 179.23 วัตต์	50
4.7 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 179.23 วัตต์	51
4.8 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 387.98 วัตต์	52
4.9 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 387.98 วัตต์	53
4.10 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 595.83 วัตต์	54
4.11 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 595.83 วัตต์	55
4.12 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 784.84 วัตต์	56

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 784.84 วัตต์	57
4.14 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 1006.46 วัตต์	58
4.15 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 1006.46 วัตต์	59
4.16 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 179.23 วัตต์	60
4.17 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 179.23 วัตต์	61
4.18 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 387.98 วัตต์	62
4.19 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 387.98 วัตต์	63
4.20 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 595.83 วัตต์	64
4.21 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 595.83 วัตต์	65
4.22 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 784.84 วัตต์	66
4.23 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 784.84 วัตต์	67

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 1006.46 วัตต์	68
4.25 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 1006.46 วัตต์	69
4.26 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะไร้ภาระ	70
4.27 ผลการทดลองแสดงกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะไร้ภาระ	70
4.28 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 179.23 วัตต์	71
4.29 ผลการทดลองแสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 179.23 วัตต์	72
4.30 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 387.98 วัตต์	73
4.31 ผลการทดลองแสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 387.98 วัตต์	74
4.32 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 595.83 วัตต์	75
4.33 ผลการทดลองแสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 595.83 วัตต์	76
4.34 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 784.84 วัตต์	77

## สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.35 ผลการทดลองแสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 784.84 วัตต์	78
4.36 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 1006.46 วัตต์	79
4.37 ผลการทดลองแสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 1006.46 วัตต์	80
4.38 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 179.23 วัตต์	81
4.39 ผลการทดลองแสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 179.23 วัตต์	82
4.40 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 387.98 วัตต์	83
4.41 ผลการทดลองแสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 387.98 วัตต์	84
4.42 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 595.83 วัตต์	85
4.43 ผลการทดลองแสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 595.83 วัตต์	86
4.44 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 784.84 วัตต์	87
4.45 ผลการทดลองแสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 784.84 วัตต์	88

## สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.46 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 1006.46 วัตต์	89
4.47 ผลการทดลองแสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 1006.46 วัตต์	90
4.48 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะไร้อภาระ	91
4.49 ผลการทดลองแสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะไร้อภาระ	91
4.50 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 179.23 วัตต์	92
4.51 ผลการทดลองแสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 179.23 วัตต์	92
4.52 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 387.98 วัตต์	93
4.53 ผลการทดลองแสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 387.98 วัตต์	93
4.54 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 595.83 วัตต์	94
4.55 ผลการทดลองแสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 595.83 วัตต์	94
4.56 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 784.84 วัตต์	95
4.57 ผลการทดลองแสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 784.84 วัตต์	95
4.58 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 1006.46 วัตต์	96
4.59 ผลการทดลองแสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 1006.46 วัตต์	96
4.60 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 179.23 วัตต์	97
4.61 ผลการทดลองแสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 179.23 วัตต์	97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.62 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงขณะปลดภาระ 387.98 วัตต์	98
4.63 ผลการทดลองแสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขณะปลดภาระ 387.98 วัตต์	98
4.64 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงขณะปลดภาระ 595.83 วัตต์	99
4.65 ผลการทดลองแสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขณะปลดภาระ 595.83 วัตต์	99
4.66 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงขณะปลดภาระ 784.84 วัตต์	100
4.67 ผลการทดลองแสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขณะปลดภาระ 784.84 วัตต์	100
4.68 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงขณะปลดภาระ 1006.46 วัตต์	101
4.69 ผลการทดลองแสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขณะปลดภาระ 1006.46 วัตต์	101
4.70 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบ กระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรง แรงดันอาร์มาเจอร์ กระแสอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซิงโครนัส	104
4.71 ผลการทดลองแสดงสัญญาณเฟสลือกูลู	104
4.72 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรง	105
ข1 การทดลองการควบคุมแบบวงปิดสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	115
ข2 การทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า	115
ค1 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้า	117
ค2 สเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของรูปคลื่นแรงดันขาเข้า	118
ค3 สเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของรูปคลื่นกระแสขาเข้า	118
ค4 ตัวประกอบกำลังและกำลังไฟฟ้าขาเข้า	119

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	19
2.2	ตารางเปรียบเทียบระหว่าง สัญญาณแบบไบโพลาร์ และยูนิโพลาร์	25
4.1	สภาวะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ภาระค่าต่างๆ ขณะความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าคงที่	105
4.2	แรงดันและกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ทำการจ่ายภาระทางไฟฟ้า ค่าต่างๆขณะความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าคงที่	105
ค1	ประสิทธิภาพของระบบขับเคลื่อน	121



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการ โดยมีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นต้นกำลังนั้นจำเป็นต้องอาศัยการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งต้องใช้ความชำนาญในการควบคุมให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีความเร็วรอบเท่ากับความเร็วซึ่งโครนัสของระบบไฟฟ้า โดยงานที่ต้องการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนิยมใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก เนื่องจากมอเตอร์ชนิดนี้มีคุณสมบัติในการรักษาความเร็วรอบแม้ว่าภาระทางกลมีการเปลี่ยนแปลงไป อีกทั้งยังมีคุณสมบัติในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ขดลวดอาร์มาเจอร์และแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ขดลวดสนามที่อิสระจากกัน ทำให้สามารถควบคุมความเร็วรอบได้อย่างอิสระ โดยช่วงที่ความเร็วรอบต่ำกว่าความเร็วพิกัดจะใช้แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ขดลวดอาร์มาเจอร์ในการควบคุม ส่วนช่วงที่ความเร็วรอบสูงกว่าความเร็วพิกัดจะใช้แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ขดลวดสนามในการควบคุม

ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้นำคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีข้อดีคือ สามารถประยุกต์ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในสี่จตุภาค (4 quadrant) สามารถควบคุมความเร็วรอบ และสามารถควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์กระแสตรงได้อย่างอิสระ ด้วยการควบคุมแบบวงปิดที่มีการป้อนกลับค่าความเร็วรอบ และค่ากระแสอาร์มาเจอร์ เพื่อรองรับการทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโครนัสเข้าสู่ระบบไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการโดยควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้เท่ากับความเร็วซึ่งโครนัสของระบบไฟฟ้า ขณะที่ภาระทางกลมีการเปลี่ยนแปลงไปได้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อมุ่งเน้นไปที่การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงปิด
2. เพื่อรักษาความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้มีความเร็วรอบเท่ากับความเร็วซึ่งโครนัสแม้ว่าภาระทางกลมีการเปลี่ยนแปลง
3. เพื่อใช้สำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการในอนาคต

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. การควบคุมความเร็วรอบแบบวงปิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ตัวแปรที่ถูกป้อนกลับ ได้แก่ ความเร็วรอบ และกระแสอาร์มาเจอร์
2. วงจรที่ใช้ในการควบคุมการขับเคลื่อนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ได้แก่ วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์
3. ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการควบคุมคือ ARM Cortex M4 STM32F4DISCOVERY
4. เอนโคเดอร์ที่ใช้ในการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์เป็นชนิด incremental encoder
5. โครงการนี้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกพิกัดแรงดัน 220 โวลต์ 4.5/5.5 แอมแปร์ 1 กิโลวัตต์ 1500 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการที่ใช้ในโครงการงาน

1. ทำการศึกษาการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง คอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรง ชนิดฟูลบริดจ์ การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงปิด การทำงานของเอนโคเดอร์แบบ incremental encoder และการใช้งาน ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM CortexM4 STM32F4DISCOVERY
2. ทดสอบค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
3. ทำการออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ วงจรควบคุม และจำลองการทำงานด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink
4. สร้างวงจรทดสอบตามที่ได้ออกแบบไว้
5. ทำการเขียนโปรแกรมการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงปิด
6. ทำการทดสอบและบันทึกผลการทดสอบ
7. จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์และเตรียมการนำเสนอ
8. สรุปและนำเสนอโครงการงาน

#### 1.5 แผนการที่ใช้ในการดำเนินโครงการงาน

ดำเนินงาน	มี.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1.ศึกษาการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การควบคุมความเร็วรอบ การทำงานของเอนโคเดอร์ และการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์										
2.ทดสอบค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง										
3.ทำการออกแบบวงจร และจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink										
4.สร้างวงจรทดสอบ										
5.เขียนโปรแกรมควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์แบบวงปิด										
6.ทำการทดสอบและบันทึกผลการทดสอบ										
7.จัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์										
8.สรุปและนำเสนอโครงการงาน										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถออกแบบและเข้าใจการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
2. สามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงปิดได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางกล เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพตลอดเวลา
3. สามารถนำไมโครคอนโทรลเลอร์ไปประยุกต์ใช้งานกับการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้
4. สามารถทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรนัสกับระบบไฟฟ้าได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

เนื้อหาบทนี้นำเสนอทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงสำหรับเป็นต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า โดยเนื้อหาบทนี้ประกอบไปด้วยคุณลักษณะกับการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง หลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ เฟสล็อกกลู๊ป และการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า

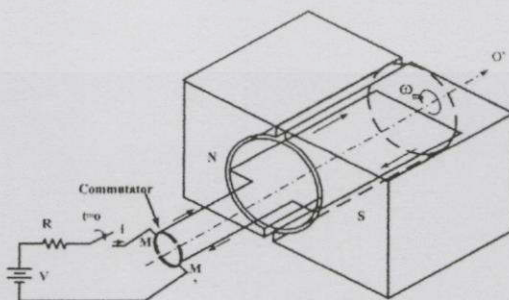
#### 2.2 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง เป็นเครื่องจักรกลที่ทำหน้าที่แปลงรูปพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลหรือแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยที่เครื่องจักรจะทำงานด้วยการหมุนของโรเตอร์ เมื่อเครื่องจักรกลแปลงรูปพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลเรียกว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor) ในขณะที่เครื่องจักรกลแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าเรียกว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC generator)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีแรงบิดในขณะหมุนสูง เพราะมีตำแหน่งมุมระหว่างสนามแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็กกับสนามแม่เหล็กจากขดลวดอาร์มาเจอร์ทำมุมเท่ากับ 90 องศาทางไฟฟ้าซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับทั่วไปไม่สามารถทำได้ ณ ตำแหน่งนี้

ในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงมีซีคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่าน ทำหน้าที่ในการจัดเรียงกระแสจากไฟฟ้ากระแสสลับในขดลวดอาร์มาเจอร์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วมีค่าสูงกว่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายใน จะทำให้กระแสไหลจากภายนอกเข้าตัวเครื่องจักร ซึ่งซีคอมมิวเตเตอร์จะทำหน้าที่จัดเรียงกระแสที่อยู่ภายใต้ขั้วแม่เหล็กที่แตกต่างกัน จึงทำให้กระแสที่ไหลในทิศทางตรงกันข้ามกันทำให้เกิดแรงบิดเสริมกัน จะเห็นได้ว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงตัวหนึ่งนั้นสามารถเป็นได้ทั้งมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งส่วนประกอบต่างๆนี้จะแสดงในโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

##### 2.2.1 โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 2.1 ไดอะแกรมอย่างง่ายแสดงการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาในรูปที่ 2.1 พบว่าส่วนประกอบหลักๆของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงประกอบไปด้วย

1.ขดลวดสนามแม่เหล็ก (field coil) คือ ขดลวดที่ถูกพันอยู่กับขั้วแม่เหล็กซึ่งยึดติดกับโครงมอเตอร์ ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กขั้วเหนือ (N) และขั้วใต้ (S) แทนแม่เหล็กถาวร สนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้มอเตอร์

2.ขั้วแม่เหล็ก (Pole Pieces) คือ แกนสำหรับรองรับขดลวดสนามแม่เหล็ก ถูกยึดติดกับโครงมอเตอร์ด้านใน ขั้วแม่เหล็กทำมาจากแผ่นเหล็กอ่อนบางๆอัดซ้อนกัน (Lamination Sheet Steel) เพื่อลดการเกิดกระแสไหลวน (Eddy Current)[1] ที่จะทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กลดลง ขั้วแม่เหล็กทำหน้าที่กำเนิดขั้วสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงสุด แทนขั้วแม่เหล็กถาวร

3.โครงมอเตอร์ (Motor Frame) คือ ส่วนเปลือกหุ้มภายนอกของมอเตอร์ และยึดส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) ของมอเตอร์ไว้ภายในร่วมกับฝาปิดท้ายของมอเตอร์ โครงมอเตอร์ทำหน้าที่เป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กระหว่างขั้วแม่เหล็กให้เกิดสนามแม่เหล็กครบวงจร

4.ขดลวดอาร์มาเจอร์ (Armature) คือ ส่วนที่โรเตอร์ (Rotor) ถูกยึดติดกับเพลลา (Shaft) และรองรับการหมุนด้วยแบริ่ง (Bearing) โรเตอร์ทำจากเหล็กแผ่นบางๆอัดซ้อนกันถูกเซาะร่องออกเป็นส่วนๆเพื่อไว้พันขดลวดอาร์มาเจอร์ (Armature Winding) ร่องขดลวดอาร์มาเจอร์จะมีขดลวดพันอยู่และมีลิมไฟเบอร์อัดแน่นยึดขดลวดอาร์มาเจอร์ไว้ ปลายขดลวดอาร์มาเจอร์ต่อกับซี่คอมมิวเตเตอร์เพื่อผลัดต้นสนามแม่เหล็กทั้งสอง ทำให้อาร์มาเจอร์หมุนได้

5.คอมมิวเตเตอร์ (Commutator) คือส่วนเคลื่อนที่อีกส่วนหนึ่ง ถูกยึดติดเข้ากับขดลวดอาร์มาเจอร์และเพลลา คอมมิวเตเตอร์ทำจากแท่งทองแดงแข็งประกอบเป็นรูปทรงกระบอก แต่ละแท่งทองแดงของคอมมิวเตเตอร์ถูกแยกออกจากกันด้วยฉนวนไมก้า (Mica) คอมมิวเตเตอร์ทำหน้าที่เป็นขั้วแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายมาจากแปรงถ่าน เพื่อส่งไปให้ขดลวดอาร์มาเจอร์

6.แปรงถ่าน (Brush) คือ ตัวสัมผัสกับคอมมิวเตเตอร์ ทำเป็นแท่งสี่เหลี่ยมผลิตมาจากคาร์บอนหรือแกรไฟต์ผสมผงทองแดง เพื่อให้มีคุณสมบัติแข็งและนำไฟฟ้าได้ดี มีสายตัวนำต่อร่วมกับแปรงถ่านเพื่อไปรับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายเข้ามา แปรงถ่านทำหน้าที่รับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าจ่ายผ่านไปให้คอมมิวเตเตอร์

เนื่องจากหน้าที่สำคัญของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง คือการแปลงพลังงานหนึ่งไปสู่อีกพลังงานหนึ่ง ดังนั้นจะกล่าวถึงหลักการแปลงพลังงาน ดังหัวข้อต่อไปนี้

## 2.2.2 การแปลงพลังงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง คืออุปกรณ์อย่างหนึ่งที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงพลังงานไปมาระหว่างพลังงานกลและพลังงานไฟฟ้า โดยเมื่อเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลจะทำหน้าที่เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในขณะที่เปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจะทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง โดยจะมีหลักการดังต่อไปนี้

$$T_e = T_{sh} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $T_e$  คือ แรงบิดทางไฟฟ้า

$T_{sh}$  คือ แรงบิดทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นกำลังทางกลของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงสามารถหาได้จาก

$$P_m = T_{sh}\omega \quad (2.2)$$

$$= T_e\omega \quad (2.3)$$

$$K_T\phi_p\omega I_a \quad (2.4)$$

เมื่อ  $P_m$  คือ กำลังทางกล  
 $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุม  
 $\phi_p$  คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก  
 $I_a$  คือ กระแสอาร์มาเจอร์

และกำลังทางไฟฟ้าของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงหาได้จาก

$$P_e = E_a I_a \quad (2.5)$$

$$K_T\phi_p\omega I_a \quad (2.6)$$

เมื่อ  $E_a$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์มาเจอร์

$$K_T = \frac{Z_a P}{2\pi a}$$

หากเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงในอุดมคติทำให้กำลังทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับกำลังทางกลแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$P_{in} = P_{out} \quad (2.7)$$

$$P_e = P_m \quad (2.8)$$

$$T_{sh}\omega = E_a I_a \quad (2.9)$$

เมื่อมีการสูญเสียทางกลและทางไฟฟ้าจะทำให้พลังงานขาเข้ามากกว่าพลังงานขาออก โดยพลังงานขาออกนั้นจะต้องมีพลังงานที่สูญเสียรวมเข้าไปด้วยซึ่งจะเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

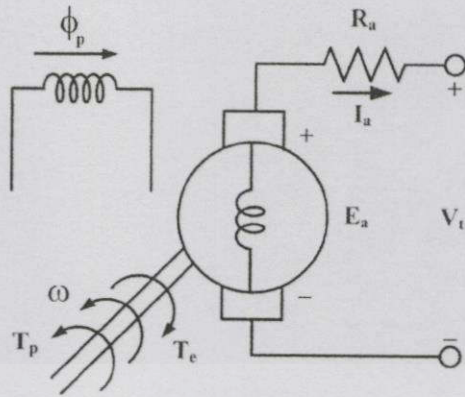
$$P_{out} = P_{in} - P_{loss} \quad (2.10)$$

### 2.2.2.1 การแปลงพลังงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

แรงบิดทางกลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจะมีค่ามากกว่าแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กเพื่อชดเชยการสูญเสียทางกล แรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กทางไฟฟ้าจะมีทิศทางการหมุนตรงข้ามกับแรงบิดทางกล หรือมีลักษณะเหมือนด้านการหมุนแสดงดังรูปที่ 2.2

$$T_{sh} = T_e + T_{loss} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลแสดงการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

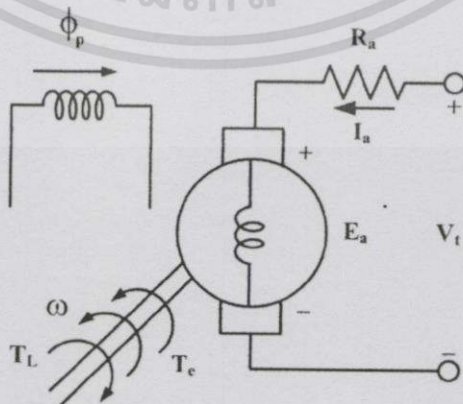
เนื่องจากขาเข้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงนั้นคือแรงบิด และขาออกคือกระแส เมื่อทำการพิจารณาวงจรไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงพบว่ากระแสจะไหลจากขั้วบวกของขดลวดอาร์มาเจอร์ ( $E_a$ ) ไปสู่ภาระทางไฟฟ้า (load) โดยแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว ( $V_t$ ) นั้นจะมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์มาเจอร์สร้างได้ ( $E_a$ ) เนื่องจากเกิดความสูญเสียจากความต้านทานของขดลวด ( $I_a R_a$ ) ดังนั้นสามารถสรุปออกมาเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$V_t = E_a - I_a R \quad (2.12)$$

#### 2.2.2.2 การแปลงพลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ในกรณีนี้แรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นจะมีค่ามากกว่าแรงบิดที่ขั้วภาระทางกลเพื่อชดเชยการสูญเสียทางกลเช่นเดียวกับกรณีของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง โดยแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีทิศทางตรงข้ามกับแรงบิดที่ขั้วภาระทางกลเช่นกัน

$$T_e = T_{sh} + T_{loss} \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลแสดงการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากพลังงานขาเข้าของมอเตอร์จะเป็นพลังงานไฟฟ้าและขาออกของมอเตอร์จะเป็นพลังงานกล เมื่อพิจารณาในกรณีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงพบว่ากระแสไหลจากแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว ( $V$ ) ผ่านขดลวดอาร์มาเจอร์สร้างแรงดันไฟฟ้าที่ตัวมอเตอร์ ( $E_a$ ) เพื่อสร้างแรงบิดสำหรับขับภาระทางกล ดังนั้นจะเกิดการสูญเสียทางไฟฟ้าเกิดขึ้นทำให้  $V_t$  นั้นมีค่ามากกว่า  $E_a$  เพื่อชดเชยการสูญเสียจากความต้านทานของขดลวด ( $I_a R_a$ ) เช่นเดียวกับกรณีเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังสมการที่ 2.14

$$V_t = E_a + I_a R_a \quad (2.14)$$

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าการแปลงรูปพลังงานยังคงเดิมแม้จะมีการสูญเสียทางกลและทางไฟฟ้าภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้า คือ พลังงานทางกลเท่ากับพลังงานไฟฟ้า ดังสมการที่ 2.15

$$T_{sh} \omega = E_a I_a \quad (2.15)$$

### 2.2.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีโครงสร้างเช่นเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง แต่จะทำหน้าที่ต่างจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงในการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลโดยขาออกที่ได้จากมอเตอร์นั้นคือแรงบิดและความเร็วรอบ ปัจจุบันนิยมนำเอามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไปใช้งานในด้านอุตสาหกรรมเพราะควบคุมความเร็วรอบกับแรงบิดของมอเตอร์ได้ง่าย ดังนั้นในหัวข้อนี้จะทำการพิจารณาเกี่ยวกับความเร็วรอบและแรงบิด

จากหัวข้อโครงสร้างเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้จะทำให้ทราบว่าโครงสร้างภายในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงนั้นประกอบด้วยอะไรบ้าง และแต่ละตัวมีหน้าที่อย่างไร เมื่อนำส่วนประกอบต่างๆมารวมกัน จะสามารถประเมินหลักการการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงได้

#### 2.2.3.1 หลักการทำงาน

การทำงานเบื้องต้นของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มีโครงสร้างหลักสำคัญแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) จะเป็นส่วนที่ติดตั้งขดลวดสนาม ทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก และส่วนที่หมุน (Rotor) ซึ่งเป็นส่วนที่ติดตั้งขดลวดอาร์มาเจอร์จะเป็นส่วนที่มีการแปลงพลังงาน เมื่อพิจารณาโครงสร้างของมอเตอร์ พบว่าส่วนที่ทำให้มอเตอร์เกิดการหมุนจะประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด โดยชุดแรกเรียกว่าขดลวดสนาม (Field winding) มีหน้าที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็ก และชุดที่สองเป็นขดลวดอาร์มาเจอร์ (Armature winding) ทำหน้าที่สร้างแรงบิด

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับมอเตอร์สู่อุปกรณ์มอเตอร์ ผ่านแปรงถ่าน และจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ขดลวดสนามจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นที่สเตเตอร์ แล้วส่งเส้นแรงแม่เหล็กผ่านขดลวดตัวนำที่โรเตอร์ เมื่อพิจารณาขดลวดอาร์มาเจอร์ขณะจ่ายกระแสไฟฟ้าจะเกิดแรงกระทำกับขดลวดอาร์มาเจอร์ ในการทิศทางการหมุนตามกฎมือขวาของเฟรมมิ่งซึ่งแสดงได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาทิศทางการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้มือขวา จากรูป กำหนดให้ นิ้วหัวแม่มือเป็นทิศทางของแรง ( $F$ ) นิ้วชี้แทนทิศทางของกระแสไฟฟ้า ( $I$ ) และนิ้วกลางแทนทิศทางของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B$ ) หรือสามารถใช้กฎมือขวาโดยหัวแม่มือเป็นทิศทางของแรง ( $F$ ) นิ้วมือทั้งสี่แทนทิศทางกระแสไหลของกระแส ในขณะที่การกำมือแทนทิศทางของความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก ( $B$ ) และขนาดของแรงนั้นเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

แรงลอเรนซ์ (Lorentz Force)

เมื่อพิจารณาให้มีกระแสไหลในขดลวดตัดผ่านสนามแม่เหล็ก

จากสมการ

$$\vec{F} = q(\vec{V} \times \vec{B}) \quad (2.16)$$

และ

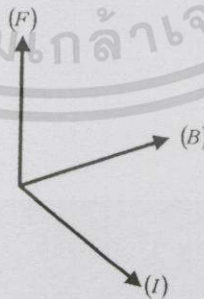
$$\vec{I} = \frac{q}{t}, I = \vec{V}t \quad (2.17)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ 2.17 ในสมการที่ 2.16 จะได้

$$\vec{F} = I(\vec{I} \times \vec{B}) \quad (2.18)$$

$$F = I B \sin \theta \quad (2.19)$$

เมื่อ  $F$  = แรงลอเรนซ์ที่เกิดขึ้น  $L$  = ความยาวของแท่งตัวนำหรือขดลวด  
 $I$  = กระแสที่ไหลในขดลวด  $B$  = ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก



รูปที่ 2.4 เวกเตอร์แสดงทิศทางของแรง กระแส และสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำกฎดังกล่าวมาพิจารณาการไหลของกระแสในขดลวดอาร์มาเจอร์พบว่าเกิดแรงขึ้นในทิศทางตรงข้ามกันของกระแสขาเข้าและกระแสขาออกทำให้แรงที่เกิดขึ้นทั้งสองเสริมกันจนทำให้โรเตอร์สามารถหมุนได้และเมื่อกลับทิศการจ่ายกระแสจะทำให้โรเตอร์หมุนในทิศทางกลับกัน

ตั้งที่กล่าวข้างต้น เนื่องจากขาออกจากมอเตอร์นั้นคือแรงบิดและความเร็วรอบ เมื่อเรามาพิจารณาเกี่ยวกับความเร็วรอบจะสามารถหาได้ดังนี้

### 2.2.3.2 ความเร็ว (Speed) และประสิทธิภาพ (Efficiency)

ความเร็วรอบมอเตอร์

เมื่อกำลังไฟฟ้ามีค่าตามสมการที่ 2.20

$$P_o = E_a I_a \quad (2.20)$$

เมื่อ  $P_o$  = กำลังไฟฟ้าออก (W)  
 $E_a$  = แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์มาเจอร์ (V)  
 $I_a$  = กระแสอาร์มาเจอร์ (A)

และความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถหาได้จากสมการที่ 2.21

$$N_m = K_N \frac{E_a}{\phi} \quad (2.21)$$

เมื่อ  $N_m$  = ความเร็วรอบมอเตอร์ (rpm)

ประสิทธิภาพ ( $\eta$ )

ประสิทธิภาพของมอเตอร์สามารถหาได้จากสมการที่ 2.22

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \times 100\% \quad (2.22)$$

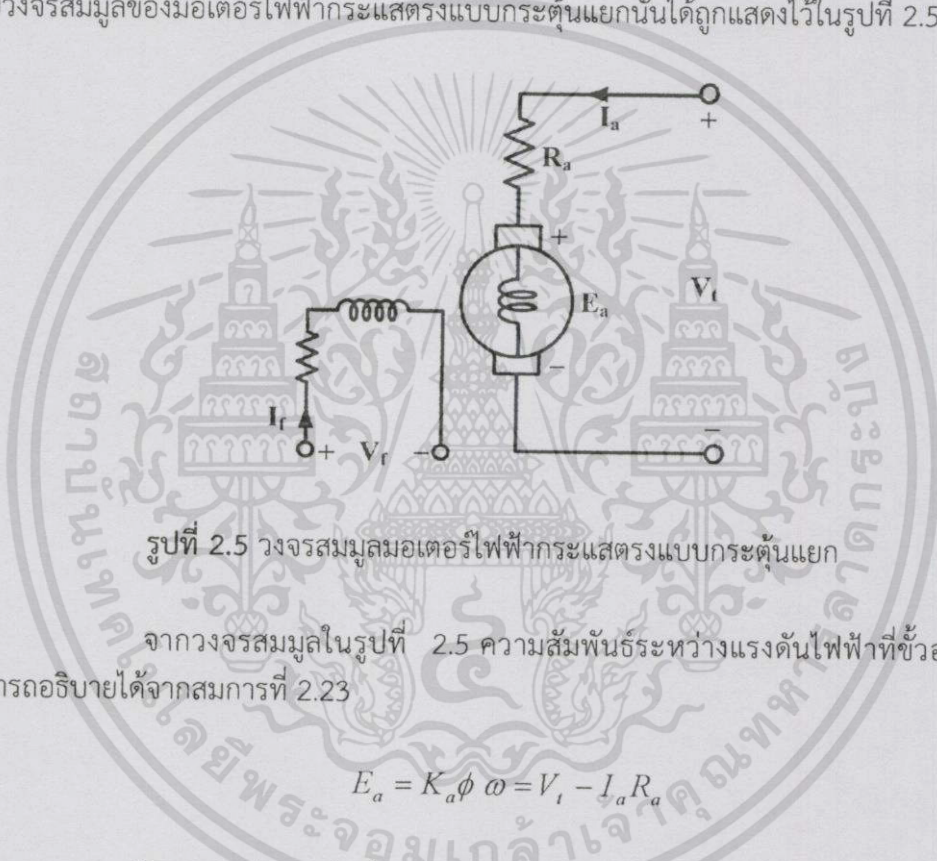
จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นเพียงหลักการเบื้องต้นของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ถ้าพิจารณาในส่วนลึกลงไปแล้วจะพบว่ามอเตอร์นั้นมีหลายชนิดซึ่งแต่ละชนิดจะมีวงจร ลักษณะการทำงาน โครงสร้าง และคุณลักษณะแตกต่างกันออกไป ดังหัวข้อที่กล่าวในต่อไป

## 2.3 ชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถเลือกรูปแบบการเชื่อมต่อระหว่างขดลวดเพื่อให้ได้คุณลักษณะของความเร็วรอบกับแรงบิดที่หลากหลายเพื่อที่จะตอบสนองต่อรูปแบบของภาระทางกลต่างๆได้ โดยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่

### 2.3.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ขดลวดอาร์มาเจอร์และขดลวดสนามจะถูกกระตุ้นด้วยแหล่งจ่ายแยกชุดกัน ซึ่งมีข้อดีคือสามารถควบคุมสนามแม่เหล็กและแรงบิดได้อิสระออกจากกัน[2] ผลคือสามารถทำการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ในวงกว้าง โดยวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกนั้นได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วอาร์มาเจอร์สามารถอธิบายได้จากสมการที่ 2.23

$$E_a = K_a \phi \omega = V_t - I_a R_a \quad (2.23)$$

โดยฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดสนามจะถูกกระตุ้นผ่านแหล่งจ่ายแยกชุดกับขดลวดอาร์มาเจอร์ซึ่งฟลักซ์แม่เหล็กจะแปรผันตรงกับกระแสสนามซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการที่ 2.24 และ 2.25

$$\phi \propto I_f \quad (2.24)$$

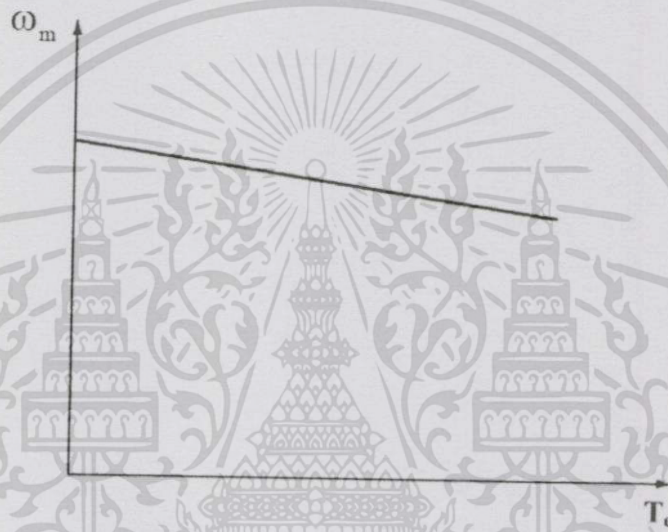
$$\phi \propto \frac{V_f}{R_f} \quad (2.25)$$

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วรอบกับแรงบิดจะเป็นไปตามสมการที่ 2.26 2.27 และ 2.28

$$T_e = K_a \phi I_a \quad (2.26)$$

$$\omega_m = \frac{V_t - I_a R_a}{K_a \phi} \quad (2.27)$$

$$\omega_m = \frac{v_t}{K_a \phi} - \frac{R_a}{(K_a \phi)^2} T_e \quad (2.28)$$



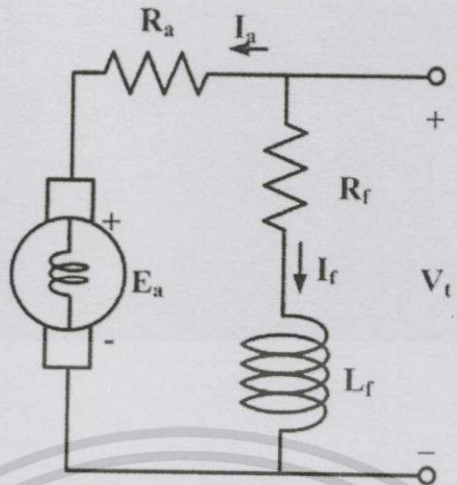
รูปที่ 2.6 กราฟคุณลักษณะระหว่างความเร็วรอบ และแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

คุณลักษณะความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกจะเป็นไปตามรูปที่ 2.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าขณะที่แรงบิดเปลี่ยนไปจะส่งผลให้ความเร็วเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยซึ่งเป็นข้อดีในการรักษาความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

### 2.3.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนานจะมีการต่อขดลวดสนามเข้ากับขั้วของขดลวดอาร์มาเจอร์โดยตรง ดังนั้นในสภาวะแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วคงที่จะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กคงที่ด้วยซึ่งมีกราฟคุณลักษณะความเร็วรอบและแรงบิดเช่นเดียวกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก แต่หากมีการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วจะส่งผลให้ฟลักซ์แม่เหล็กแปรเปลี่ยนตามไปด้วย เมื่อปรับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมากขึ้นทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กและแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำมากขึ้น ส่งผลให้ค่ากระแสอาร์มาเจอร์และแรงบิดทางไฟฟ้าที่ได้จากมอเตอร์เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ผลลัพธ์คือค่าความเร็วรอบใหม่จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อย โดยพฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายจากสมการที่ได้จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.7 และมีกราฟคุณลักษณะความเร็วรอบแรงบิดในรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว กระแสอาร์มาเจอร์สามารถอธิบายได้จากสมการที่ 2.29

$$E_a = K_a \phi T_e = K_a \omega_m = V_t - I_a R_a \tag{2.29}$$

โดยฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดสนามจะถูกกระตุ้นผ่านแหล่งจ่ายเดียวกับขดลวดอาร์มาเจอร์ซึ่งฟลักซ์แม่เหล็กจะแปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการที่ 2.30 และ 2.31

$$\phi \propto I_f \tag{2.30}$$

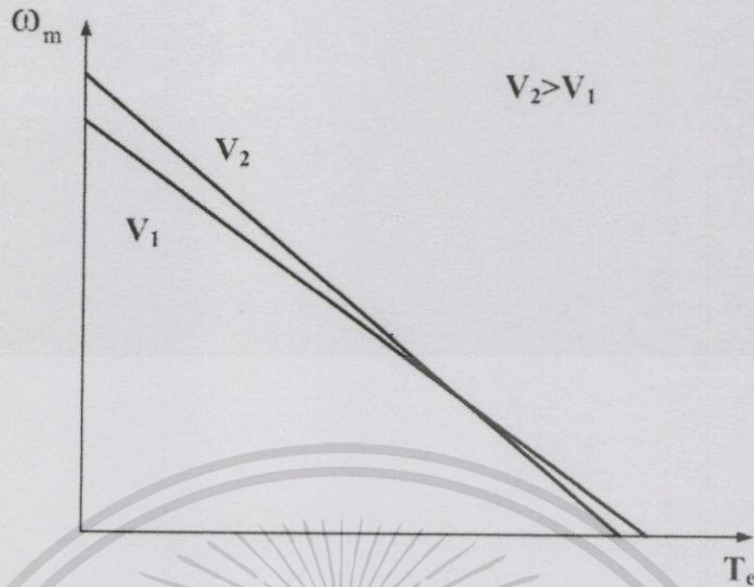
$$\phi \propto \frac{V_t}{R_f} \tag{2.31}$$

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วรอบกับแรงบิดจะเป็นไปตามสมการที่ 2.32 2.33 และ 2.34

$$T_e = K_a \phi \omega_m \tag{2.32}$$

$$\omega_m = \frac{V_t - I_a R_a}{K_a \phi} \tag{2.33}$$

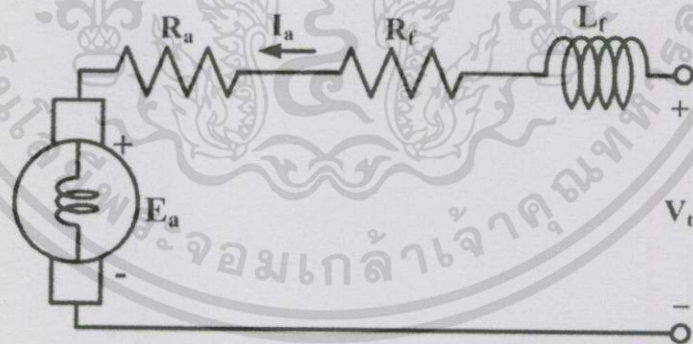
$$\omega_m = \frac{V_t}{K_a \phi} - \frac{R_a}{(K_a \phi)^2} T_e \tag{2.34}$$



รูปที่ 2.8 กราฟคุณลักษณะระหว่างความเร็วรอบ และแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขานาน

### 2.3.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมจะมีการต่อขดลวดสนามอนุกรมเข้ากับขดลวดอาร์มาเจอร์ทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กแปรผันตรงกับกระแสที่ขั้วของอาร์มาเจอร์ ด้วยเหตุนี้เมื่อมอเตอร์รับภาระทางกลมากขึ้นจะส่งผลให้ฟลักซ์แม่เหล็กเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งอาจเกินจุดอิ่มตัวของแกนเหล็กที่เป็นโครงสร้างของตัวมอเตอร์ส่งผลให้สภาวะการทำงานของมอเตอร์ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งไม่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ได้จากวงจรสมมูลในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม

เมื่อพิจารณาว่าไม่เกิดการอิ่มตัวของแกนเหล็กความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกับกระแส จะเป็นไปดังสมการที่ 2.35

$$V_t = E_a + I_a(R_a + R_f) \quad (2.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.9 พบว่ากระแสที่ไหลผ่านขดลวดสนามกับขดลวดอาร์มาเจอร์นั้นจะเป็นกระแสเดียวกัน ส่งผลให้ฟลักซ์แม่เหล็กจะแปรผันตรงกับกระแสอาร์มาเจอร์ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการที่ 2.36 และ 2.37

$$\phi \propto I_a \quad (2.36)$$

$$\phi = K_f I_a \quad (2.37)$$

ดังนั้นสมการของแรงบิดและกระแสจะสามารถแสดงได้จากสมการที่ 2.38 และ 2.39

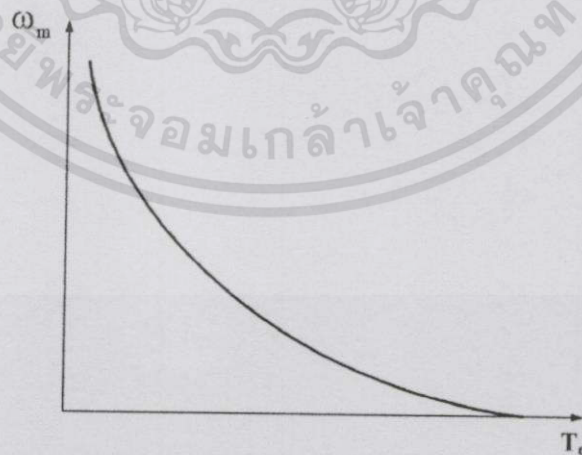
$$T_e = K_a \phi I_a = K_a K_f I_a^2 \quad (2.38)$$

$$I_a = \sqrt{\frac{T_e}{K_a K_f}} \quad (2.39)$$

$$E_a = K_a \phi \omega_m = V_t - I_a (R_a + R_f) \quad (2.40)$$

แทนสมการที่ 2.37 และ 2.39 ลงในสมการที่ 2.40 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบต่อแรงบิดตามสมการที่ 2.41 ซึ่งมีกราฟคุณลักษณะตามรูปที่ 2.10

$$\omega_m = \frac{V_t}{\sqrt{K_a K_f T_e}} - \frac{R_a + R_f}{K_a K_f} \quad (2.41)$$



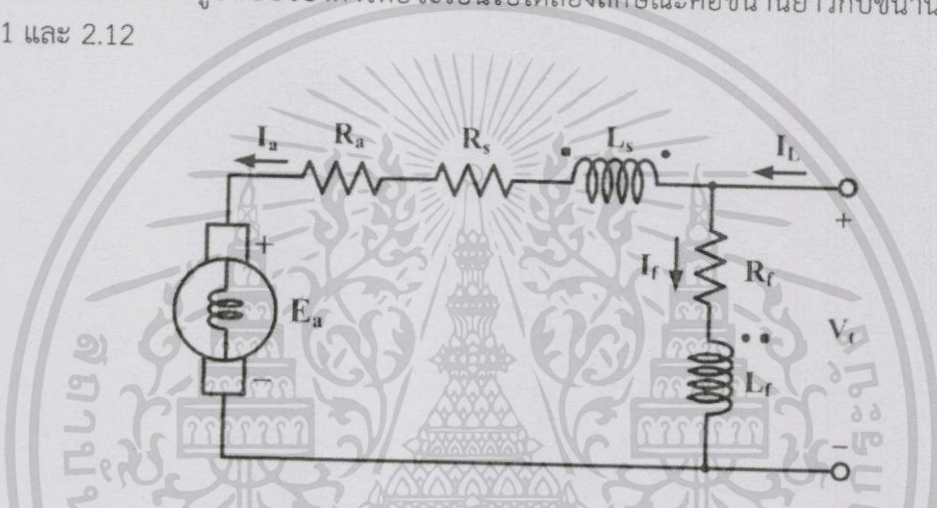
รูปที่ 2.10 กราฟคุณลักษณะระหว่างความเร็วรอบ และแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

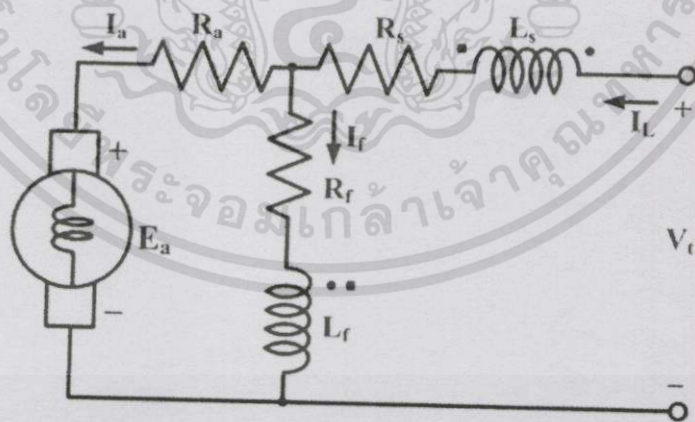
จากกราฟคุณลักษณะระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่าเมื่อภาระทางกลมากขึ้นส่งผลให้ความเร็วรอบตกลงอย่างรวดเร็ว หรือในกรณีที่ไม่มีภาระทางกล ความเร็วรอบจะสูงมากซึ่งอาจจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบทางกลได้ ถือเป็นข้อเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม

#### 2.3.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมจะมีการต่อขดลวดสนามเพิ่มอีกหนึ่งชุดอนุกรมเข้ากับขดลวดอาร์มาเจอร์ โดยหน้าที่ของขดลวดดังกล่าวจะสร้างสนามแม่เหล็กเสริมหรือหักล้างกับสนามแม่เหล็กที่ขดลวดสนามหลัก มีจุดประสงค์คือการลดผลของอาร์มาเจอร์รีแอกชันที่จะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กลดลง รูปแบบของการต่อจะเป็นไปได้สองลักษณะคือขนานยาวกับขนานสั้นตามรูปที่ 2.11 และ 2.12



รูปที่ 2.11 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนานยาว



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนานสั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนานยาวในรูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว กระแสอาร์มาเจอร์ ของมอเตอร์สามารถอธิบายได้จากสมการที่ 2.42

$$E_a = K_a \phi_{net} \omega_m = V_t - I_a (R_a + R_s) \quad (2.42)$$

ส่วนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนานสั้นในรูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว กระแสอาร์มาเจอร์ ของมอเตอร์สามารถอธิบายได้จากสมการที่ 2.43

$$E_a = K_a \phi_{net} \omega_m = V_t - I_a R \quad (2.43)$$

ฟลักซ์แม่เหล็กลัพธ์มาจากผลรวมหรือผลต่างระหว่างสนามแม่เหล็กที่สร้างมาจากขดลวดสนามหลัก ขดลวดสนามอนุกรมรวม และผลกระทบบของอาร์มาเจอร์รีแอกชัน ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการที่ 2.44 ถึง 2.47

$$\phi_{net} \propto I_f^{(eff)} \quad (2.44)$$

$$F_{net} = F_f \pm F_s - F_{AR} \quad (2.45)$$

$$N_f I_f^{(eff)} = N_f I_f \pm N_s I_s - N_f I_{AR} \quad (2.46)$$

$$I_f^{(eff)} = I_f \pm \frac{N_s}{N_f} I_s - I_{AR} \quad (2.47)$$

เมื่อ  $N_f$  คือ จำนวนรอบของขดลวดสนามหลัก  
 $N_s$  คือ จำนวนรอบขดลวดสนามอนุกรม

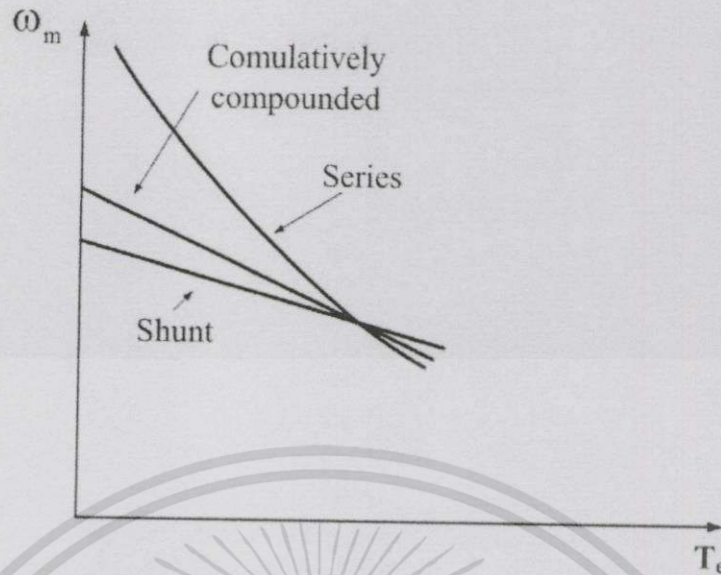
ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วรอบกับแรงบิดจะเป็นไปตามสมการที่ 2.48 2.49 และ 2.50

$$T_e = K_a \phi_{net} I_a \quad (2.48)$$

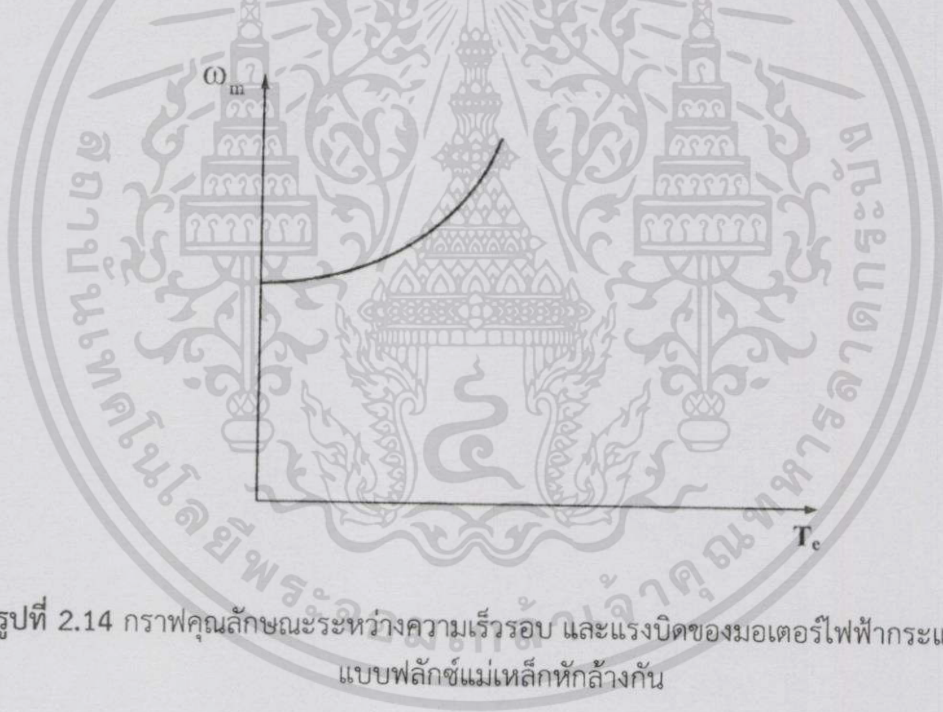
$$\omega_m = \frac{V_t - I_a R_a}{K_a \phi_{net}} \quad (2.49)$$

$$\omega_m = \frac{V_t}{K_a \phi_{net}} - \frac{R_a}{(K_a \phi_{net})^2} T_e \quad (2.50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 กราฟคุณลักษณะระหว่างความเร็วรอบ และแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบฟลักซ์แม่เหล็กเสริมกัน



รูปที่ 2.14 กราฟคุณลักษณะระหว่างความเร็วรอบ และแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบฟลักซ์แม่เหล็กหักล้างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ชนิดของมอเตอร์ คุณสมบัติ	กระตุ้นแยก	ขนาน	อนุกรม	ฟลักซ์ เสริม	ฟลักซ์ หักล้าง
จำนวนแหล่งจ่าย	2	1	1	1	1
ความสามารถในการรักษา ความเร็วรอบ	ดีมาก	ดี	แย่	แย่	แย่
ความสามารถในการ ควบคุมสนามแม่เหล็ก อย่างอิสระ	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้
แรงบิดเริ่มต้น	ปานกลาง	ปานกลาง	สูงมาก	สูง	ปานกลาง

### ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เนื่องจากความสามารถในการรักษาความเร็วรอบแม้ภาระทางกลเปลี่ยนไป รวมถึงความสามารถในการควบคุมสนามแม่เหล็กที่แยกอิสระออกจากอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก จึงเหมาะแก่การนำมาเป็นต้นกำลังให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อรักษาความเร็วรอบให้มีความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัส

## 2.5 วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง

วงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรงเป็นวงจรที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้ได้แรงดันไฟฟ้าขาออกตามที่ต้องการหรือรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่โดยอาศัยหลักการเปิดและปิดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

การเปิดและปิดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีวิธีการ 2 แบบคือ

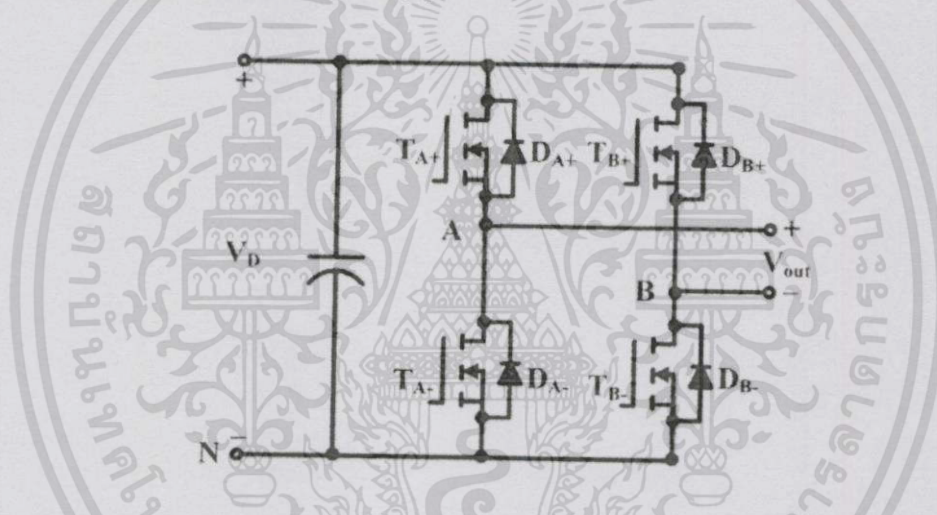
1. แบบความถี่คงที่ (Constant-frequency) เป็นวงจรทอนแรงดันไฟฟ้าที่ควบคุมให้คาบเวลา time period (T) คงที่แล้วปรับเวลา ON time ( $T_{on}$ ) การควบคุมในลักษณะนี้เรียกว่า pulse-width-modulation (PWM)
2. แบบความถี่ปรับค่าได้ (Variable-frequency) เป็นวงจรทอนแรงดันไฟฟ้าที่ปรับคาบเวลา time period โดยการปรับ ON time หรือ OFF time ( $T - T_{on}$ ) การควบคุมแบบนี้เรียกว่า frequency-Modulation แต่เนื่องจากการควบคุมในลักษณะนี้ความถี่มีการเปลี่ยนแปลงในย่านกว้างทำให้ยากต่อการกรองความถี่

ประเภทของวงจรแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสตรง

- ฟลายแบคคอนเวอร์เตอร์
- ฟอร์เวิร์ดคอนเวอร์เตอร์
- พุก-พุลตอนคอนเวอร์เตอร์
- ฮาล์ฟบริดจ์คอนเวอร์เตอร์
- ฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์

### 2.5.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ (Full Bridge DC-DC converter)

วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์แสดงในรูปที่ 2.15 ทำหน้าที่ควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกประกอบด้วยสวิตช์ทั้งหมด 4 ตัว สวิตช์แต่ละตัวทำงานสลับกันในการนำกระแสและหยุดนำกระแส โดยใช้สัญญาณที่ดับเบิ้ลยูเอ็มแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar PWM) ทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้มีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่สวิตช์ และสามารถควบคุมได้ทั้งขนาดและทิศทางของแรงดันไฟฟ้าและกระแส[3]



รูปที่ 2.15 ไดอะแกรมการต่อวงจรสวิตช์กำลังของคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์

ค่าแรงดันไฟฟ้าขาออกของคอนเวอร์เตอร์ในรูปที่ 2.15 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.51

$$V_{out} = (2D_1 - 1) \cdot V_d \quad (2.51)$$

โดยที่  $V_d$  แทนแรงดันไฟฟ้าขาเข้า

$V_{out}$  แทนแรงดันไฟฟ้าขาออก

$D_1$  แทนวัฏจักรการทำงาน (Duty Cycle) ของสวิตช์ A+

### 2.5.1.1 หลักการทำงาน

หลักการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ชนิดฟูลบริดจ์จะเป็นการรวมลักษณะเด่นด้านแรงดันไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์ชนิดฮาร์ฟบริดจ์และด้านกระแสของคอนเวอร์เตอร์ชนิดฟูลพูล โดยการทำงานของมอสเฟต  $T_{A+}$  ซึ่งนำกระแสพร้อมกับ  $T_{B-}$  และ  $T_{B+}$  นำกระแสพร้อมกับ  $T_{A-}$  ซึ่งแต่ละคู่จะสลับกันทำงาน

จากการทำงานดังกล่าวทำให้แรงดันไฟฟ้าฝั่งปฐมภูมิมีค่าแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงระหว่าง  $+V_D$  และ  $-V_D$  ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมมอสเฟตขณะไม่นำกระแสจึงไม่มากไปกว่า  $V_D$  อีกทั้งกระแสที่ไหลผ่านยังเท่ากับฟูลพูลอีกด้วย

แต่ข้อเสียของวงจรชนิดนี้คือต้องใช้มอสเฟตถึง 4 ตัว และเนื่องจากต้องให้คู่มอสเฟตทำงานไม่พร้อมกันดังนั้นจึงต้องแยกใช้วงจรขับเคลื่อนของมอสเฟตแต่ละคู่ออกจากกันโดยเด็ดขาด นอกจากนี้คุณสมบัติอื่นๆของวงจรถูกการหาค่าตัวเก็บประจุคัปปลิง ก็ยังคงเหมือนกับคอนเวอร์เตอร์ชนิดฮาร์ฟบริดจ์ นิยมใช้งานกับแรงดันไฟฟ้าปานกลางถึงแรงดันไฟฟ้าสูง

### 2.5.1.2 การสร้างสัญญาณ PWM ด้วยเทคนิคการสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์

ในการทำงานของสวิตซ์ที่ใช้สัญญาณ PWM แบบไบโพลาร์ในการขับนี้ สวิตซ์นั้นจะ ON, OFF เป็นคู่คือ  $T_{A+}$ ,  $T_{B-}$  และ  $T_{B+}$ ,  $T_{A-}$  โดยที่คู่ของสวิตซ์ทั้ง 2 คู่จะทำงานเป็น complementary คือถ้าคู่แรกทำงาน คู่ที่ 2 จะไม่ทำงาน

สัญญาณที่ใช้ในการขับสวิตซ์จะถูกสร้างจากการเทียบสัญญาณแรงดันไฟฟ้า  $V_{control}$  (สัญญาณมอดูเลต) กับสัญญาณสามเหลี่ยม  $V_{tri}$  (สัญญาณพาหะ) ที่มีความถี่เท่ากับความถี่สวิตซ์ เมื่อ  $V_{control} > V_{tri}$  สวิตซ์  $T_{A+}$ ,  $T_{B-}$  จะทำงาน แต่ถ้า  $V_{control} < V_{tri}$  สวิตซ์  $T_{B+}$ ,  $T_{A-}$  จะทำงานแทน

โดยอัตราส่วนการทำงานของสวิตซ์จะสามารถหาได้จากรูปคลื่นในรูป 2.16ก โดยกำหนดเวลาเริ่มต้น ( $t=0$ ) ดังรูป

$$V_{tri} = \hat{V}_{tri} \frac{t}{T_s / 4} \quad (2.52)$$

$$0 < t < \frac{1}{4} T_s$$

เมื่อ  $t=t_1$  ดังรูป 2.16ก,  $V_{tri} = V_{control}$  ดังนั้นจากสมการข้างต้นจะได้

$$t_1 = \frac{V_{control}}{\hat{V}_{tri}} \frac{T_s}{4} \quad (2.53)$$

และสามารถหาช่วงเวลา  $t_{on}$  ของคู่สวิตซ์ที่ 1 ( $T_{A+}, T_{B-}$ ) จาก

$$T_{on} = 2t_1 + \frac{1}{2} T_s \quad (2.54)$$

ดังนั้นสามารถหาวิถีการทำงานที่การทำงานของสวิตช์คู่ที่ 1 ( $T_{A+}, T_{B-}$ ) ได้จากสมการ 2.55

$$D_1 = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{V_{control}}{\hat{V}_{tri}} \right) \quad (2.55)$$

วิถีการทำงานที่การทำงานของสวิตช์คู่ที่ 2 ( $T_{A-}, T_{B+}$ ) ได้จาก

$$D_2 = 1 - D_1 \quad (2.56)$$

และจากวิถีการทำงานที่การทำงานของสวิตช์ข้างต้นจะได้  $V_{AN}$  และ  $V_{BN}$  ในรูป 2.16 ดังนั้น

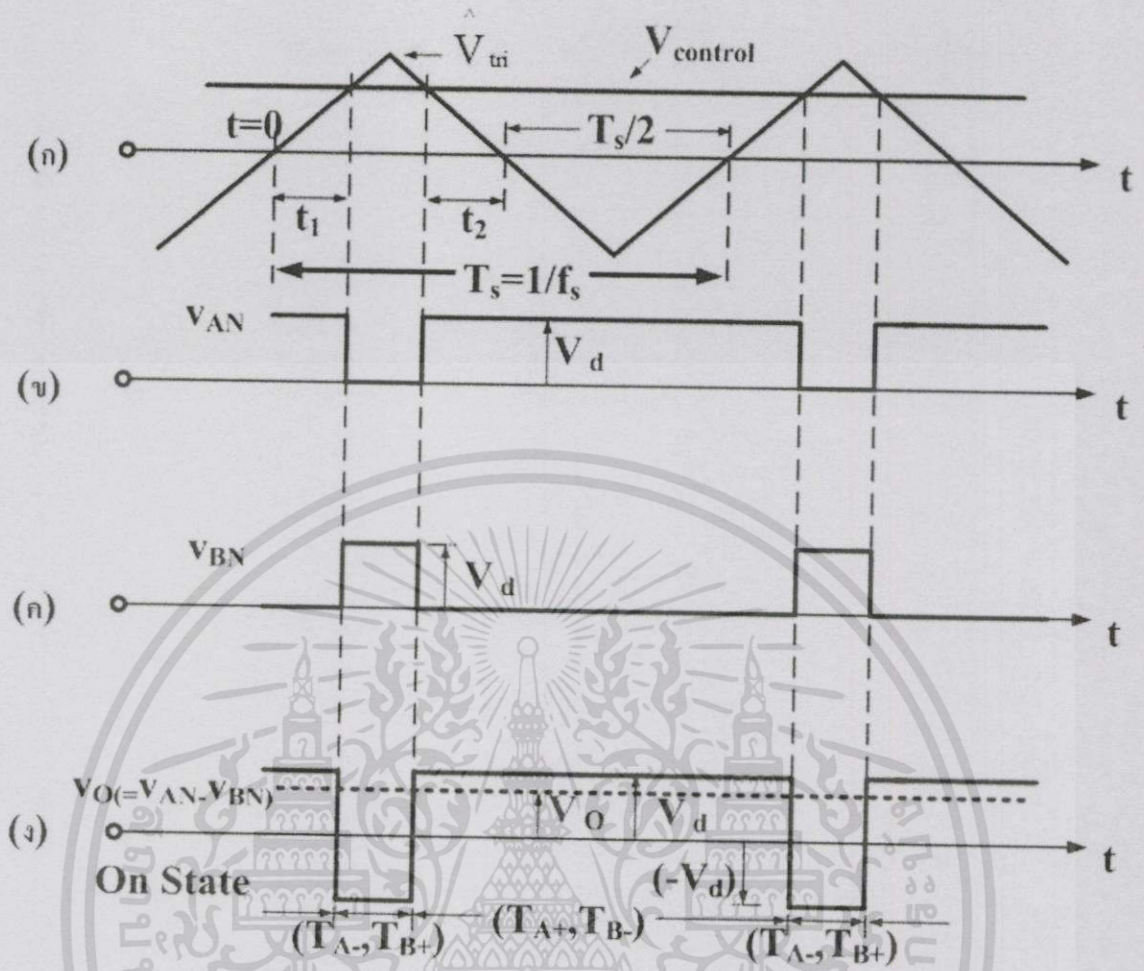
$$V_o = V_{AN} - V_{BN} = D_1 V_d - D_2 V_d = (2D_1 - 1) V_d \quad (2.57)$$

และเมื่อแทนค่า  $D_1$

$$V_o = \frac{V_d}{\hat{V}_{tri}} V_{control} = k V_{control} \quad (2.58)$$

เมื่อ  $k = V_d / \hat{V}_{tri}$  มีค่าคงที่ จากสมการที่ 2.58 จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยขาออกจะแปรผันตรงกับสัญญาณควบคุมขาเข้า

จากรูปแรงดันไฟฟ้า  $V_o$  มีค่าอยู่ระหว่าง  $V_{d+}$  ถึง  $V_{d-}$  ที่มีค่าเป็นทั้งบวกและลบซึ่งเป็นเหตุผลที่เรียกว่า การสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ โดยที่แรงดันไฟฟ้าขาออกจากคอนเวอร์เตอร์นั้นไม่ได้ขึ้นกับกระแสขาออก  $I_o$  เมื่อไม่สนใจช่วง Dead time ค่าของ  $D_1$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดและชั่วของแรงดันไฟฟ้า  $V_{control}$



รูปที่ 2.16 การสร้างสัญญาณ PWM แบบโพลาร์

2.5.1.3 การสร้างสัญญาณ PWM เทคนิคการสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์

การทำงานของสวิตซ์ที่ใช้สัญญาณ PWM แบบยูนิโพลาร์ สถานะของสวิตซ์มีอยู่ 3 สถานะดังแสดงในรูปที่ 2.17 โดยที่สวิตซ์ขาเดียวกันจะเป็น complementary กันคือ  $T_{A+}$  ทำงาน  $T_{A-}$  จะไม่ทำงาน  $T_{B+}$  ทำงาน  $T_{B-}$  จะไม่ทำงาน แต่  $T_{A+}$  กับ  $T_{B+}$  สามารถทำงานพร้อมกันได้และแรงดันไฟฟ้าขาออก  $V_o$  จะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อ  $T_{A+}$  และ  $T_{B+}$  ทำงานพร้อมกัน หรือ  $T_{A-}$  กับ  $T_{B-}$  ทำงานพร้อมกัน[4]

สัญญาณที่ใช้ในการขับสวิตซ์จะถูกสร้างมาจากการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าควบคุม ( $V_{control}$  และ  $-V_{control}$ ) กับสัญญาณสามเหลี่ยม ( $V_{tri}$ ) ซึ่งจะแตกต่างกับแบบโพลาร์ที่ใช้แรงดันไฟฟ้าควบคุม  $V_{control}$  เพียงตัวเดียวในการขับสวิตซ์ทั้ง 4 ตัว โดย  $V_{control}$  เปรียบเทียบ  $V_{tri}$  ใช้สำหรับขา A และเปรียบเทียบ  $-V_{control}$  กับ  $V_{tri}$  ใช้สำหรับขา B ที่มีหลักการการทำงานคือ  $T_{A+}$  ทำงานเมื่อ  $V_{control} > V_{tri}$  และ  $T_{B+}$  ทำงานเมื่อ  $-V_{control} > V_{tri}$

จากรูป 2.17 เมื่อทำการตรวจสอบและเปรียบเทียบ จะพบว่าค่าอัตราส่วนการทำงาน  $D_1$  ของสวิตซ์  $T_{A+}$  สามารถหาได้จากสมการ 2.59 ของการสวิตซ์แบบโพลาร์ เช่นเดียวกับอัตราส่วนการทำงาน  $D_2$  ของสวิตซ์  $T_{B+}$  หาได้จากสมการ 2.60 ซึ่งจะได้สมการดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

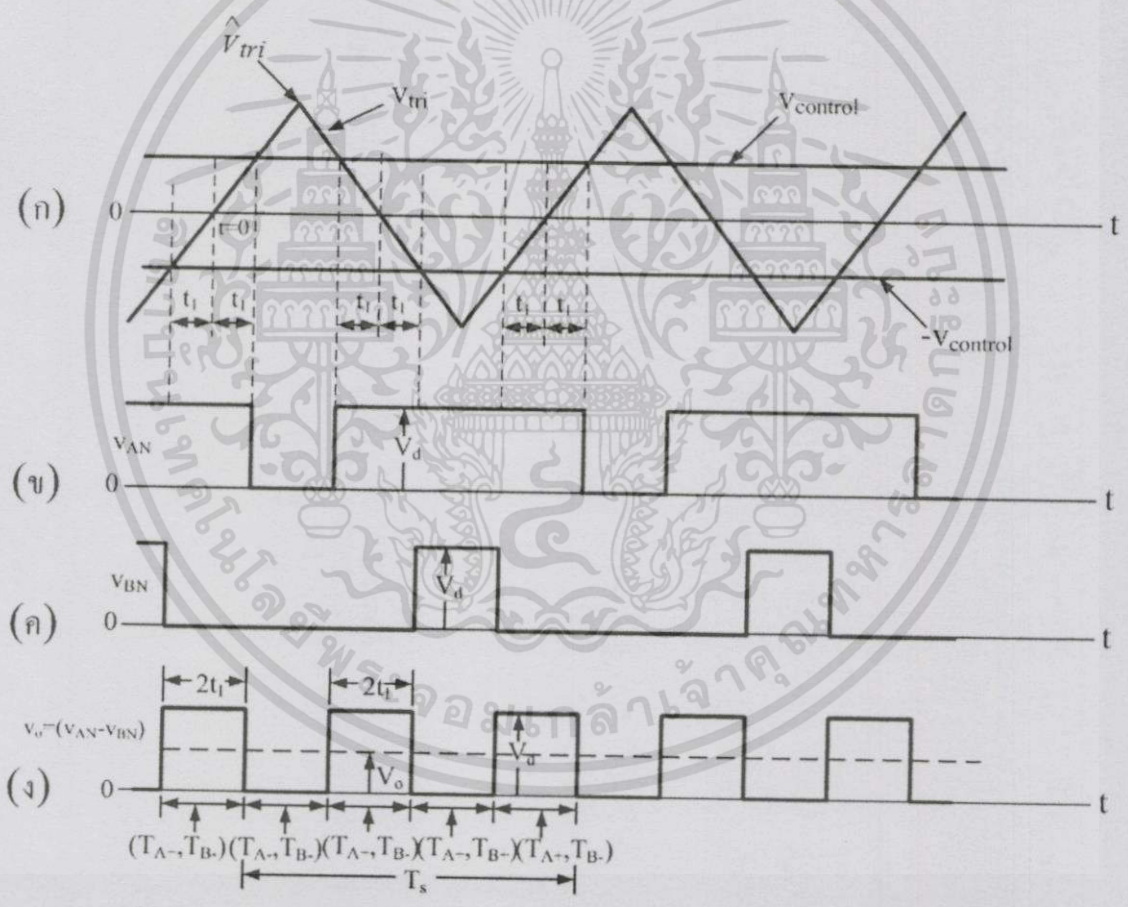
$$D_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{V_{control}}{\hat{V}_{tri}} + 1 \right) \quad ; T_{A+} \quad (2.59)$$

$$D_2 = 1 - D_1 \quad ; T_{B+} \quad (2.60)$$

ดังนั้นจากสมการจะได้

$$V_o = (2D - 1)V_d = \frac{V_d}{\hat{V}_{tri}} V_{control} \quad (2.61)$$

ในรูปที่ 2.17 แรงดันไฟฟ้าจะมีค่าเป็นบวกอย่างเดียวหรือลบอย่างเดียวและมีความถี่เป็น 2 เท่าของความถี่สวิตชิง ซึ่งต่างจากแบบโพลาร์ที่แรงดันไฟฟ้า  $V_o$  มีค่าทั้งบวกและลบ และมีความถี่เท่ากับความถี่สวิตชิง



รูปที่ 2.17 การสร้างสัญญาณ PWM แบบยูนิโพลาร์

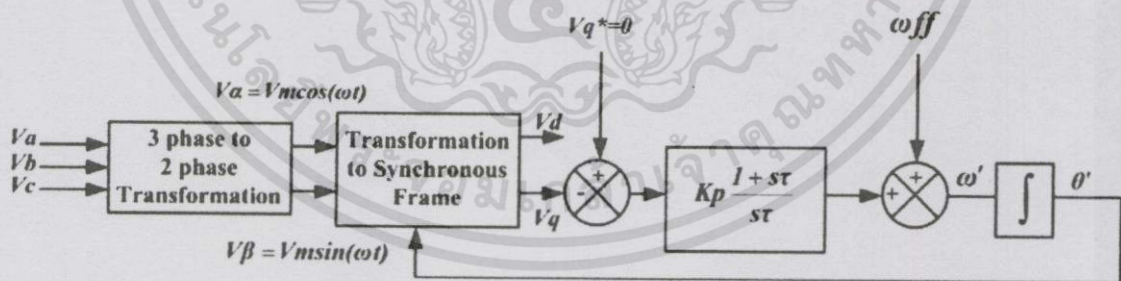
หัวข้อ	โพลาร์	ยูนิโพลาร์
จำนวนสัญญาณมอดูเลต	1	2
ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าขาออก	เท่ากับความถี่สวิตซ์ซิง	2 เท่าของความถี่สวิตซ์ซิง
กระแสกระแสเพื่อม	น้อย	น้อยมาก
วงจรรอง	ใหญ่และแพง	เล็กและถูก
แรงบิดกระแสเพื่อม	น้อย	น้อยมาก

ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบระหว่าง สัญญาณแบบโพลาร์ และยูนิโพลาร์

เหตุผลที่ใช้คอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ ที่ป้อนสัญญาณแบบยูนิโพลาร์ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากความถี่ของแรงดันไฟฟ้าขาออกมีค่าสูง ทำให้กระแสเพื่อมน้อยทำให้ค่าแรงบิดกระแสเพื่อมน้อยด้วย ส่งผลให้มอเตอร์ทำงานได้อย่างนุ่มนวลสามารถกลับทางหมุนได้ ความสูญเสียสวิตซ์ซิงต่ำ แต่มีข้อเสียคือมีจำนวนสวิตซ์ซิงถึง 4 ตัว การควบคุมสวิตซ์แต่ละตัวจะต้องใช้วงจรแยกโดดจากกัน

## 2.6 เฟสล็อกลูป (Phase Lock Loop)

เนื่องจากโครงงานนี้ได้มีการรับค่าความถี่ของระบบไฟฟ้ามาเป็นความเร็วอ้างอิง เพื่อให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับความเร็วซิงโครนัสสำหรับการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า จึงได้มีการนำทฤษฎีเฟสล็อกลูปมาใช้ในการรับค่าความถี่ของระบบและนำมาใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยปกติแล้วเฟสล็อกลูปจะถูกใช้ในระบบสัญญาณที่หลากหลาย เช่น วิทยุ ระบบสื่อสาร คอมพิวเตอร์ และการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งผู้ใช้สามารถประยุกต์ใช้ได้ตั้งแต่ความถี่ต่ำจนถึงระดับจิกะเฮิรตซ์



รูปที่ 2.18 การทำงานของเฟสล็อกลูป

จากรูปที่ 2.18 เป็นลักษณะการทำงานของเฟสล็อกลูปที่รับค่าแรงดันไฟฟ้าของระบบมาคำนวณเพื่อสร้างความถี่อ้างอิงโดยผ่านกระบวนการแปลงแกนด้วยการควบคุมแบบพีไอและอินทิเกรท

## 2.6.1 ทฤษฎี

หลักการพื้นฐานของระบบเฟสบล็อกคู่คือ ระบบที่มีการป้อนกลับโดยใช้การควบคุมแบบพีไอในการควบคุมและติดตามมุมเฟส ข้อมูลขาเข้าคือแรงดันไฟฟ้าสามเฟสของระบบไฟฟ้าในขณะที่ข้อมูลขาออกคือมุมเฟส ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

1. นำแรงดันไลน์ AB และ BC แปลงแกนเป็นกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งแกน  $\alpha\beta$

$$V_d^s = V_\alpha = \frac{2}{3}V_{AB} + \frac{1}{3}V_{BC} \quad (2.62)$$

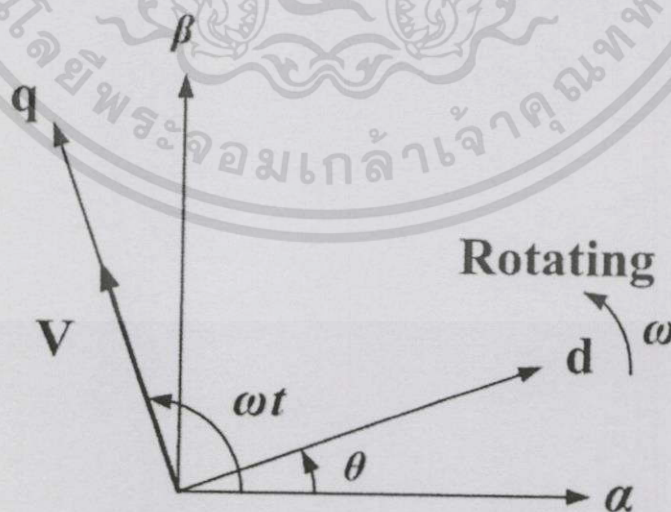
$$V_q^s = V_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}V_{BC} \quad (2.63)$$

2. แปลงกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งแกน  $\alpha\beta$  เข้าสู่กรอบอ้างอิงซิงโครนัส dq

$$V_d = V_d^s \cos\theta + V_q^s \sin\theta \quad (2.64)$$

$$V_q = -V_d^s \sin\theta + V_q^s \cos\theta \quad (2.65)$$

3. นำกรอบอ้างอิงแกน dq ที่ได้จากการแปลงแกนเข้าสู่ตัวควบคุมแบบพีไอ
4. นำความเร็วเชิงมุมที่ผ่านการควบคุมแบบพีไอแล้วทำการอินทิเกรตจะได้มุม
5. นำมุมที่ได้ไปสร้างเวกเตอร์หนึ่งหน่วย  $\cos\theta$  และ  $\sin\theta$
6. เวกเตอร์หนึ่งหน่วยจะถูกป้อนกลับไปยังกรอบอ้างอิง dq
7. ทำการประมาณความถี่ของระบบไฟฟ้าจากมุมที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 2.19 กรอบอ้างอิงซิงโครนัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรอบอ้างอิงซิงโครนัส (qd) ถูกแปลงมาจากกรอบอ้างอิงหยุดนิ่ง ( $\alpha\beta$ ) มุมเฟส ( $\theta$ ) ที่ได้จะถูกคำนวณด้วย  $\theta^*$  ซึ่งได้จากการปริพันธ์ของ  $\omega^*$  เป็นผลลัพธ์จากตัวควบคุมแบบพีไอ เนื่องจากค่าเกนของตัวควบคุมแบบพีไอ ได้ถูกออกแบบมาเพื่อให้  $V_q^*$  ติดตามกรอบอ้างอิง ดังนั้น  $V_q^*$  จะเท่ากับศูนย์และส่งผลให้ Space Vector ของแรงดันไฟฟ้าเกาะกันไปกับแกน q ทำให้ความถี่ที่คำนวณได้ ( $\omega^*$ ) เท่ากับความถี่ระบบ ( $\omega$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.19[5]

## 2.7 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า

ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า คือ กระบวนการทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสมีความเร็วและลำดับเฟสเท่ากับระบบไฟฟ้า โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะไม่สามารถส่งกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้าได้ถ้าไม่ทำงานที่ความเร็วเดียวกับระบบไฟฟ้า หลังจากที่ทำกรขนาน ความเร็วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะขึ้นอยู่กับความถี่ของระบบซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามภาระทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป แต่เมื่อระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่มากเกินไปโอกาสส่งผลให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสหลุดออกจากระบบไฟฟ้า

### 2.7.1 เงื่อนไขการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

#### 1. ลำดับเฟส (Phase Sequence)

ลำดับเฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากับระบบไฟฟ้าต้องมีลำดับเฟสเหมือนกัน นอกจากนี้ยังต้องมีมุมเฟสที่ตรงกันอีกด้วย สามารถต่างกันได้ไม่เกิน  $\pm 10^\circ$

#### 2. ระดับของแรงดันไฟฟ้า (Voltage Magnitude)

แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องเท่ากับแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า โดยแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสามารถมากกว่าแรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้าได้ 0 ถึง 5 % เมื่อแรงดันไฟฟ้าทั้งสองต่างกันส่งผลให้เกิดกำลังไฟฟ้าเสมือน (VAR) โหลในระบบจำนวนมาก เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าของระบบทำให้เกิดการกระตุ้นเกินแล้วจ่ายกำลังไฟฟ้าเสมือน (VAR) ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าของระบบทำให้เกิดการกระตุ้นขาดแล้วทำการดึงกำลังไฟฟ้าเสมือน (VAR) ออกจากระบบ

#### 3. ความถี่ (Frequency)

ความถี่แรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้องเท่ากับความถี่แรงดันไฟฟ้าของระบบไฟฟ้า จากมาตรฐานไอทริปเปิลอี 67[6] พบว่าความถี่สามารถต่างกันได้ไม่เกิน  $\pm 0.067$  Hz ถ้าความถี่ของทั้งสองไม่ตรงกันจะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสหลุดออกจากระบบและประพฤติตัวเป็นมอเตอร์ที่ถูกเร่งความเร็วอาจส่งผลให้เกิดความเสียหาย

## 2.7.2 วิธีการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า

### 1 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส

- 1.1 ชนิดหลอดสองหลอดดับ
- 1.2 ชนิดหลอดสองหลอดสว่าง

### 2 การขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

- 2.1 ชนิดสามหลอดดับ
- 2.2 ชนิดสามหลอดสว่าง
- 2.3 ชนิดหนึ่งหลอดดับสองหลอดสว่าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

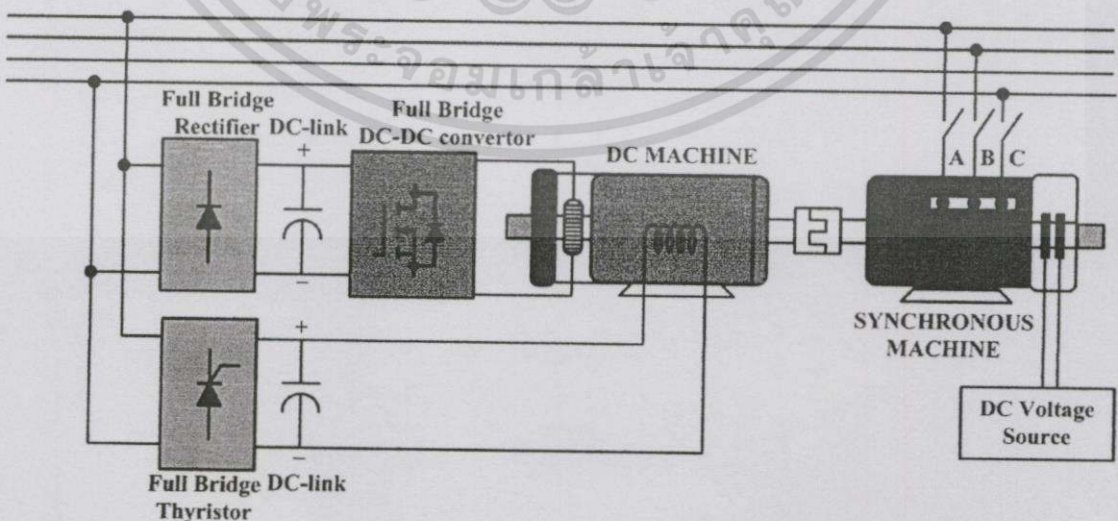
## หลักการงานและการออกแบบวงจร

### 3.1 บทนำ

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงหลักการงาน และการออกแบบวงจรควบคุมแบบวงปิด สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนแรกจะอธิบายระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนที่สองเป็นการจำลองการทำงานซึ่งทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยมีวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยเทคนิคการมอดูเลต PWM แบบยูนิโพลาร์ ส่วนที่สามเป็นการออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์ซึ่งแบ่งเป็น 3 วงจรหลักๆ คือ วงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า วงจรกำลัง และวงจรควบคุม วงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าประกอบไปด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า และวงจรรักษาระดับแรงดัน วงจรกำลังประกอบด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ วงจรเฟสล็อกกลูป และอุปกรณ์ป้องกัน และวงจรควบคุมประกอบไปด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรขับเคลื่อน วงจรตรวจวัดกระแส และวงจรเอนโคเดอร์

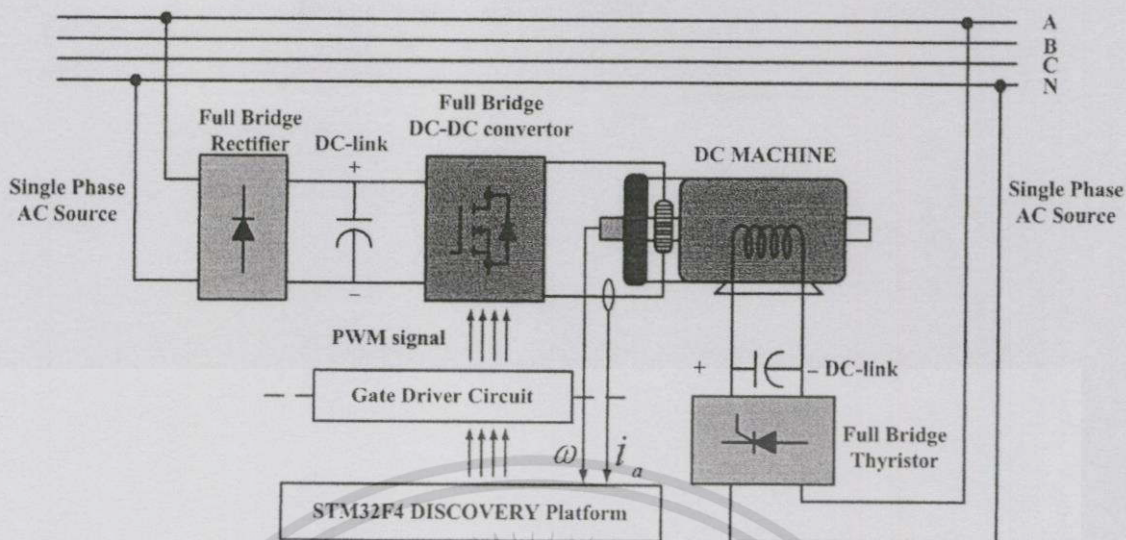
### 3.2 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในโครงงานนี้ประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกซึ่งคัปปลิงอยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส โดยมอเตอร์กระแสตรงชนิดนี้จะมี 2 ขดลวดคือ ขดลวดสนามและขดลวดอาร์มาเจอร์ ซึ่งในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าแบบกระตุ้นแยกจะมีการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เข้าขดลวดสนาม ส่วนขดลวดอาร์มาเจอร์จะมีการป้อนแรงดันจากวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ ดังแสดงในไดอะแกรมในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมการทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

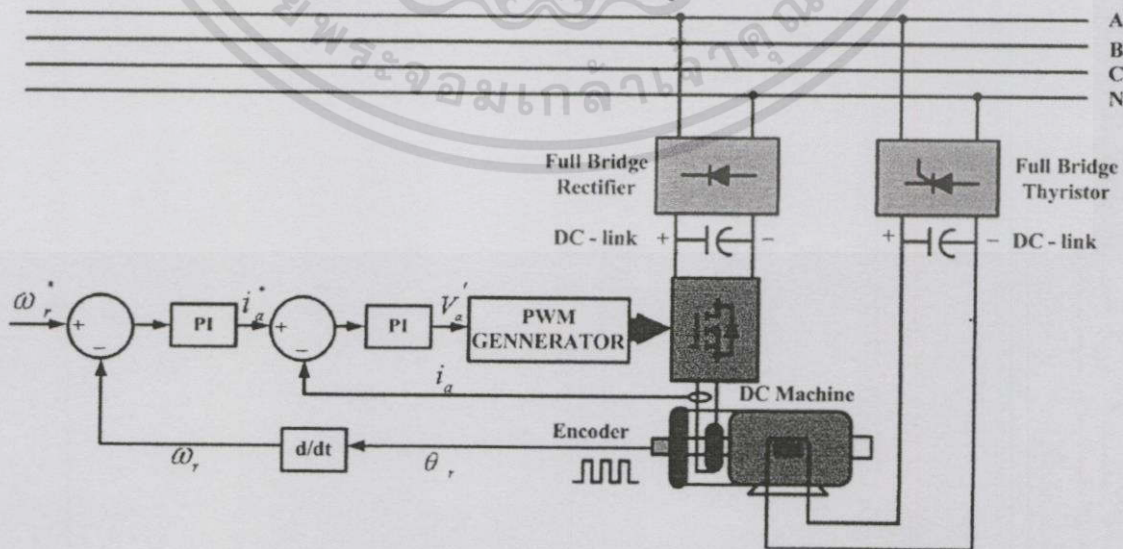
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 โดอะแกรมการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 3.1 เมื่อพิจารณาเฉพาะส่วนที่เป็นวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีโดอะแกรมของระบบดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งในการขับเคลื่อนและควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับโครงการนี้จะอาศัยไมโครคอนโทรลเลอร์บริษัท STMicroeletronic เบอร์ STM32F407VG สำหรับการทำการควบคุมความเร็วรอบโดยผ่านการสวิตช์มอสเฟตในวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ โดยอาศัยสัญญาณ PWM แบบยูนิโพลาร์ที่มีค่าความถี่สวิตซ์ซึ่งเท่ากับ 10 kHz

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงปิดใช้ตัวควบคุมพีโอแบบอนุกรม โดยนำค่าความเร็วรอบอ้างอิงจากระบบการเฟสล็อกกลู๊ป ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่วัดจากเอนโคดเดอร์ และกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่วัดจากเซ็นเซอร์กระแส มาทำการคำนวณด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ จากนั้นสร้างสัญญาณ PWM เพื่อป้อนแรงดันอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงในรูปที่ 3.3

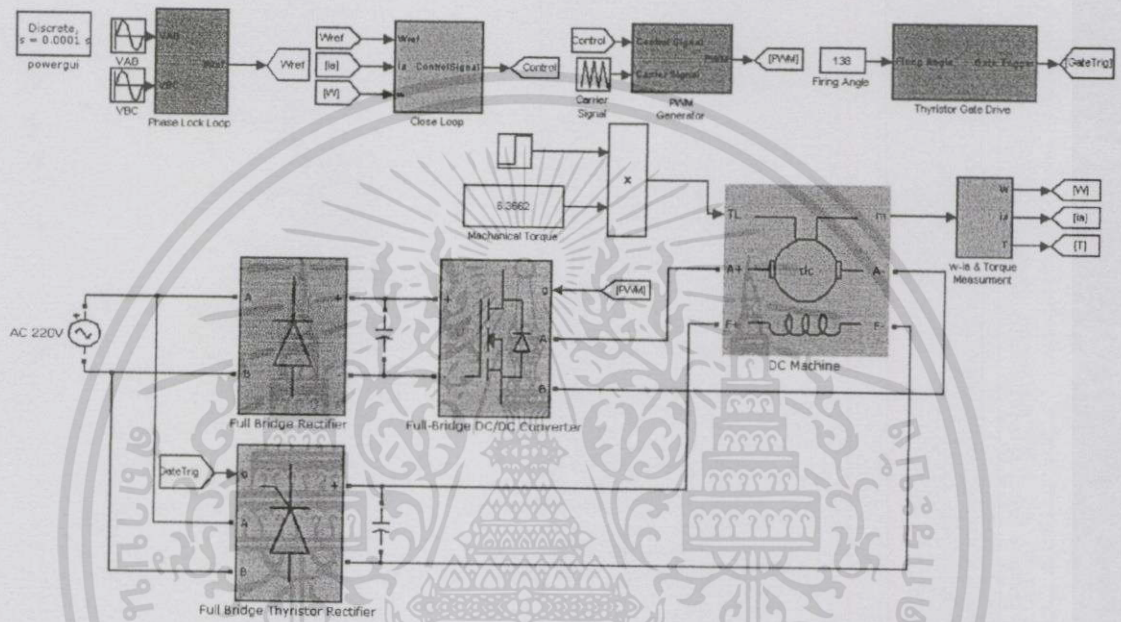


รูปที่ 3.3 โดอะแกรมการควบคุมวงปิดสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ญาติเห็นใบใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การจำลองทางคอมพิวเตอร์

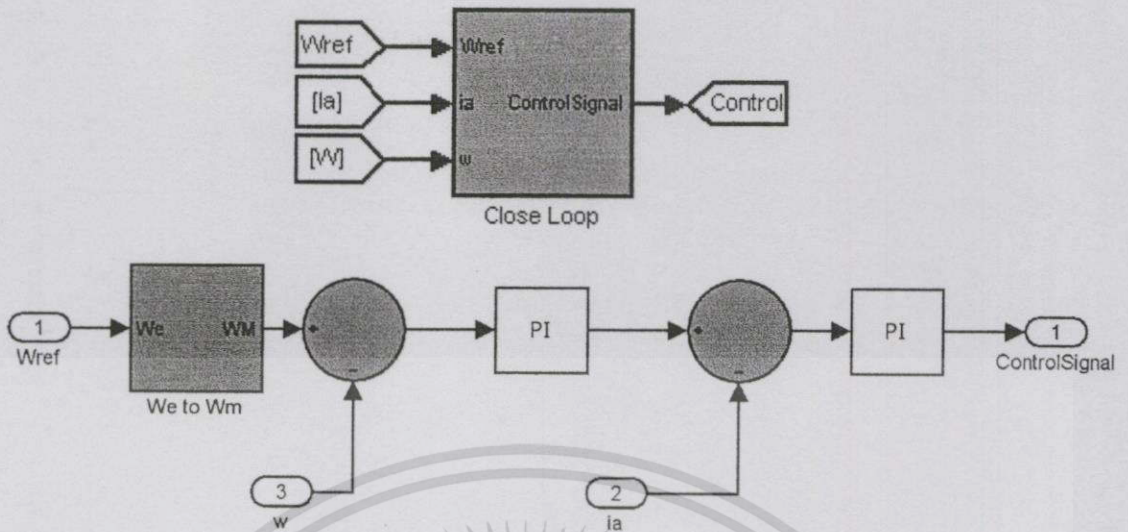
การจำลองการทำงานระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink แบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนวงจรกำลังซึ่งประกอบไปด้วย วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ ป้อนแรงดันเข้าขดลวดอาร์มาเจอร์ วงจรขดลวดสนามที่มี การป้อนแรงดันคงที่ และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ส่วนวงจรควบคุมประกอบไปด้วย วงจรควบคุมความเร็วรอบแบบวงปิด วงจรสร้างสัญญาณ PWM วงจรเฟสล็อกลูปิดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

#### 3.3.1 การควบคุมความเร็วรอบแบบวงปิด

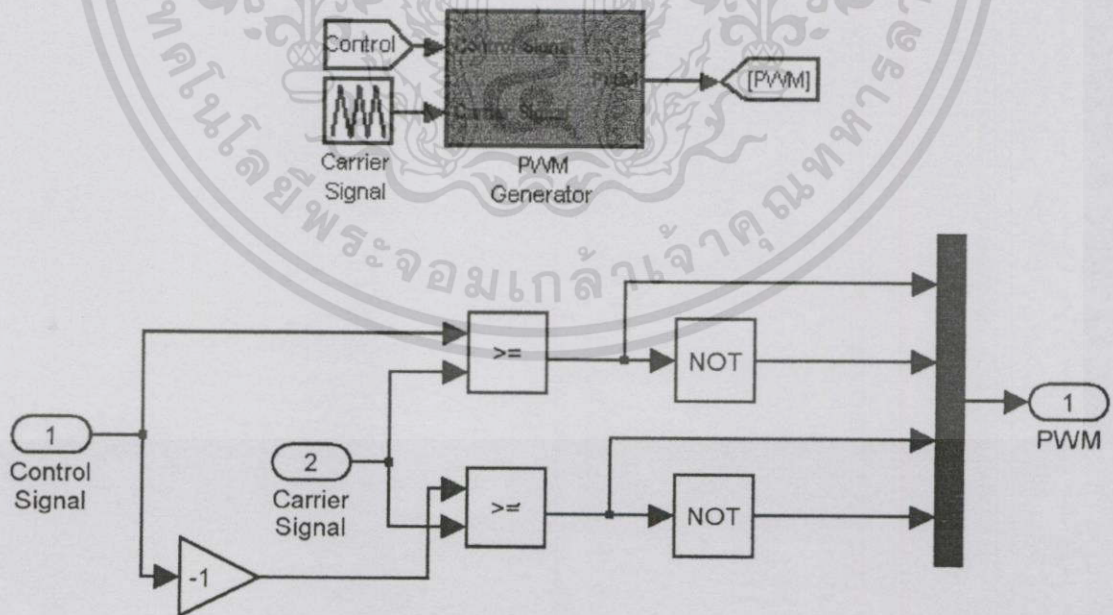
การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้มีความเร็วเชิงโคโรนัสเพื่อใช้เป็นต้นกำลังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโคโรนัสนั้น สามารถทำได้โดยการป้อนกลับความเร็วรอบและกระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI controller) โดยสัญญาณขาออกของตัวควบคุมแบบพีไอ จะถูกทำการมอดูเลตกับสัญญาณพาหะเพื่อสร้างสัญญาณควบคุมวงจรถอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ เพื่อทำการควบคุมความเร็วรอบของต้นกำลังให้มีค่าคงที่ [7] แม้กระทั่งทางด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโคโรนัสเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งแบบจำลองการควบคุมแบบวงปิดดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์การควบคุมความเร็วรอบแบบวงปิด

3.3.2 วงจรขั้วเกิด

สัญญาณที่ใช้ในการขั้วเกิดของมอเตอร์ในวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์เป็นสัญญาณ PWM ที่ได้มาจากสัญญาณขาออกของตัวควบคุมแบบพีไอ มาทำการมอดูเลตกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่สร้างขึ้นด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีความถี่ 10 kHz ได้เป็นสัญญาณ PWM แบบยูนิโพลาร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.6

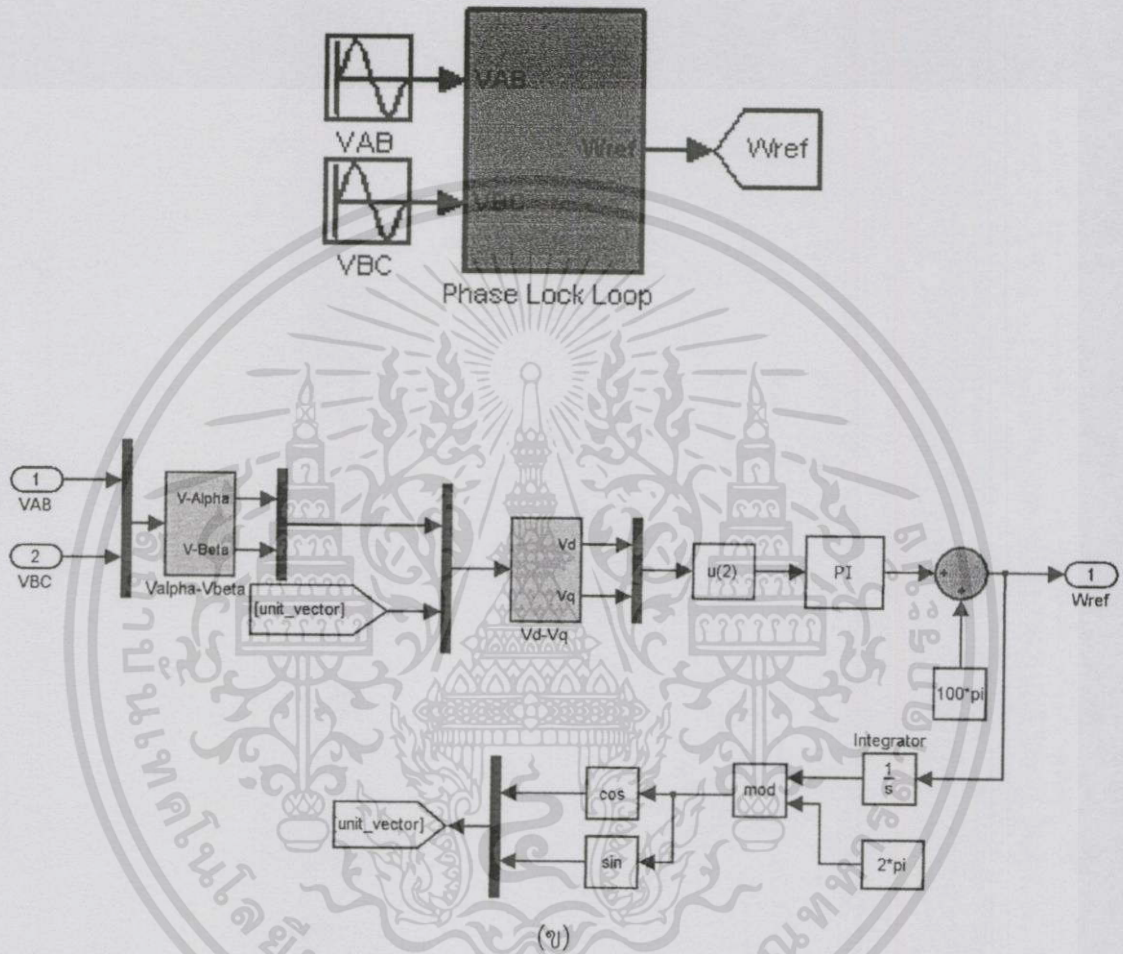


รูปที่ 3.6 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์วงจรสร้างสัญญาณPWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่จํากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 วงจรเฟสล็อกกลุ่

วงจรเฟสล็อกกลุ่มีหน้าที่ในการประมาณค่าความถี่หรือมุม โดยใช้แรงดันไลนซ์ของระบบไฟฟ้าเพื่อสร้างค่าความถี่เชิงมุมอ้างอิง ที่ใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงให้มีค่าเท่ากับความเร็วเชิงโคโรนัส ซึ่งแบบจำลองการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์วงจรวจรเฟสล็อกกลุ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

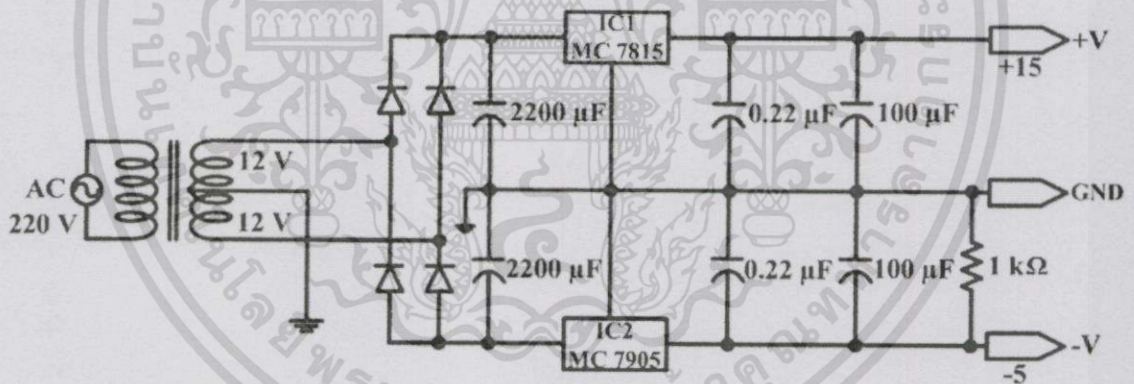
### 3.4 การออกแบบและการสร้างวงจร

การออกแบบวงจรควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกพิกัดกำลัง 1 กิโลวัตต์ ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่ วงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า วงจรกำลัง และวงจรควบคุม

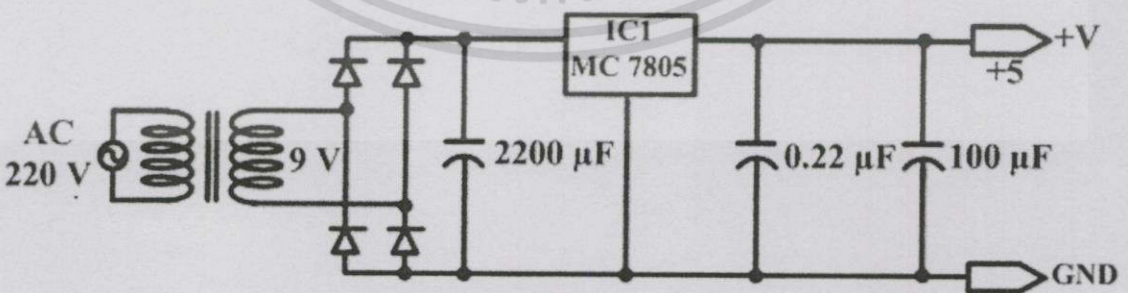
#### 3.4.1 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า

อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการควบคุมการขับเคลื่อนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต้องอาศัยแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเพื่อจ่ายไฟเลี้ยงวงจรให้สามารถทำงานได้ ซึ่งวงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ประกอบไปด้วย หม้อแปลงแรงดัน และวงจรรักษาระดับแรงดัน (voltage regulator)

วงจรรักษาระดับแรงดันเป็นวงจรที่ทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันกระแสตรงเพื่อควบคุมแรงดันให้มีค่าเหมาะสมกับอุปกรณ์ โดยไอซีที่ใช้ในการรักษาระดับแรงดัน ได้แก่ 78xx สำหรับแรงดันบวก และ 79xx สำหรับแรงดันลบ ซึ่งตัวอย่างการออกแบบแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำหรับวงจรขับเคลื่อนแสดงในรูปที่ 3.8 (ก) การออกแบบที่มีเฉพาะแรงดันบวกจะใช้ไอซีเฉพาะ 78xx ตัวอย่างแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4DISCOVERY แสดงในรูปที่ 3.8 (ข) และชิ้นงานวงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 3.8 (ค)

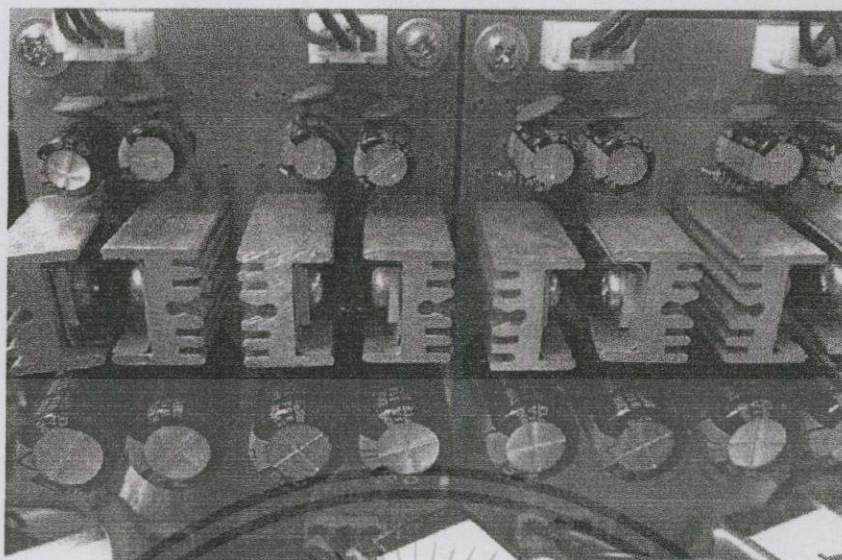


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

### รูปที่ 3.8 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า

(ก) ไดโอดแกรมแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำหรับวงจรขับเคลื่อน

(ข) ไดโอดแกรมแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4DISCOVERY

(ค) ชิ้นงานแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า

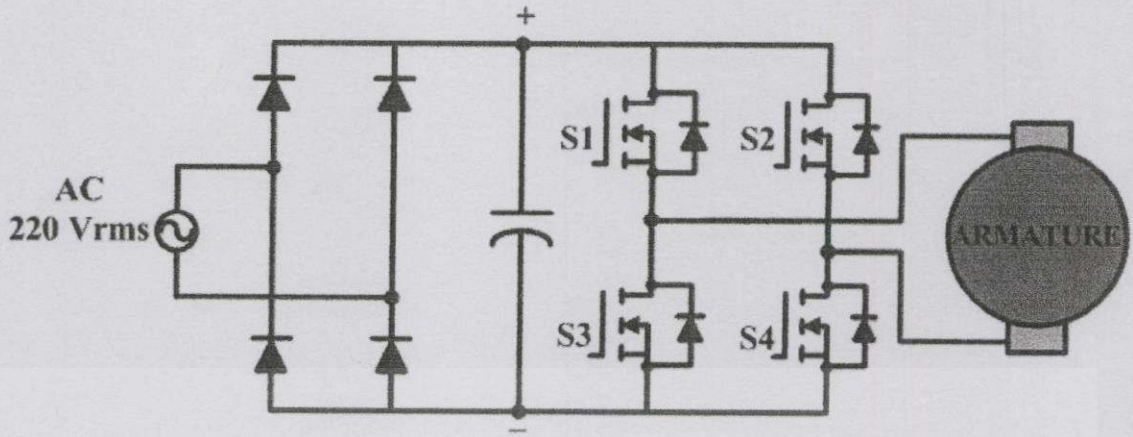
#### 3.4.2 วงจรกำลัง

วงจรกำลังทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปสู่มอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงประกอบด้วย วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ วงจรเฟสล็อกกลูป และ อุปกรณ์ป้องกัน

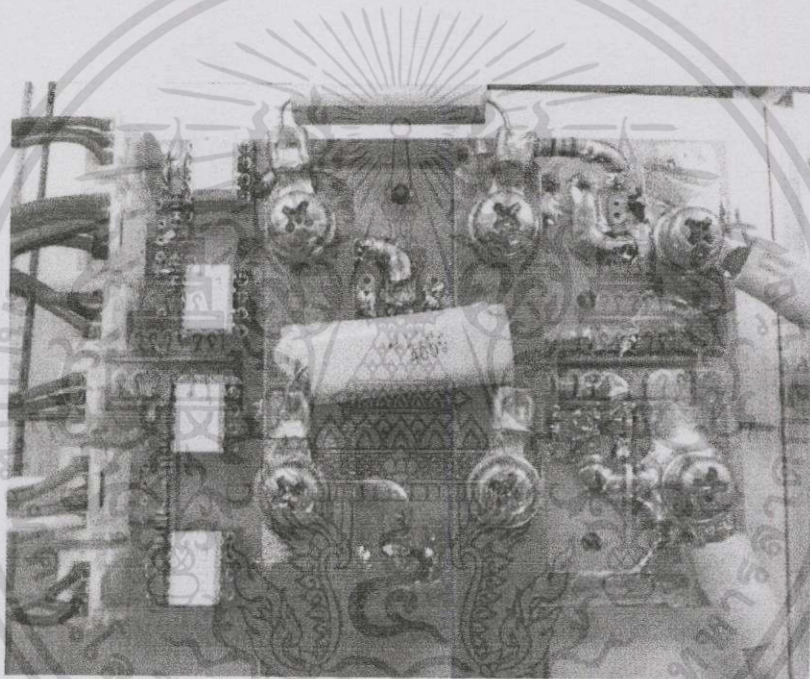
##### 3.4.2.1 วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์

วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ มีหน้าที่ในการควบคุมแรงดันที่ป้อนเข้าสู่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ประกอบด้วยสวิตช์มอสเฟตทั้งหมด 4 ตัว สวิตช์แต่ละตัวทำงานสลับกันในการนำกระแสและหยุดนำกระแส โดยใช้สัญญาณพีดับเบิลยูเอ็มแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar PWM) ซึ่งสัญญาณ PWM ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งจะแสดงไดโอดแกรมวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ดังรูปที่ 3.9 (ก) และนำมาออกแบบวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์จริงดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.9 วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์

(ก) ไดอะแกรมวงจรถงคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์

(ข) ชิ้นงานวงจรถงคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2.2 วงจรเฟสล็อกกลุ่

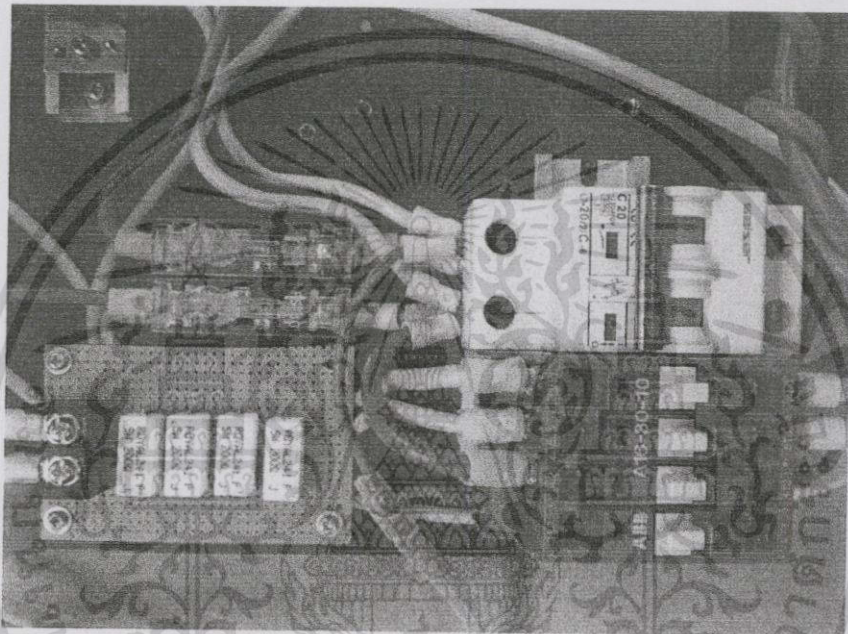
วงจรเฟสล็อกกลุ่มีหน้าที่สร้างกรอบอิงที่มีความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัส ซึ่งความเร็วของกรอบอ้างอิงดังกล่าวจะถูกนำมาเป็นความเร็วรอบอ้างอิงของการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงปิด[8] แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ชิ้นงานวงจรเฟสล็อกกลุ่ (ก) หม้อแปลงลดทอนระดับแรงดันไลน์ 400/9 โวลต์  
(ข) วงจรตรวจจับแรงดัน

### 3.4.2.3 อุปกรณ์ป้องกัน

อุปกรณ์ป้องกันเป็นอุปกรณ์ที่ต่อเข้ากับระบบการทดลองเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากความผิดพลาดของผู้วิจัยหรืออุปกรณ์ต่างๆภายในระบบที่มีความผิดปกติ ซึ่งทำการติดตั้งระหว่างแหล่งจ่ายระบบไฟฟ้ากับระบบที่ใช้ในการทดลอง โดยอุปกรณ์ป้องกันประกอบด้วยเซอร์กิตเบรกเกอร์ แมกเนติกคอนแทคเตอร์ที่ทำหน้าที่ตัดต่อวงจรอาร์มาเจอร์เมื่อเกิดกระแสเกิน และทำหน้าที่ตัดต่อความต้านทานที่ใช้จำกัดกระแสจตุรัสตัวเก็บประจุ และฟิวส์ขนาด 10 A 250 V ดังรูปที่ 3.11



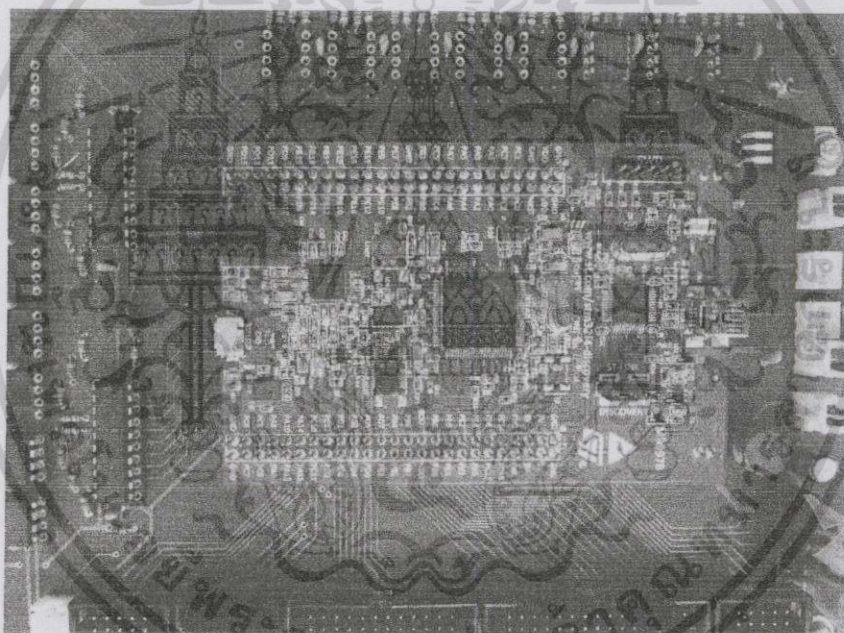
รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ป้องกัน

### 3.4.3 วงจรควบคุม

วงจรควบคุมเป็นส่วนที่ใช้ในการสร้างสัญญาณ PWM เพื่อควบคุมการทำงานของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าคงที่ โดยวงจรควบคุมประกอบไปด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM CORTEX M4 STM32F407VG

#### 3.4.3.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM CortexM4 STM32F407VG

ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และเป็นตัวควบคุมการสวิตช์ของมอสเฟตในวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ โดยสร้างสัญญาณ PWM แบบยูนิโพลาร์เพื่อไปขับเกตของมอสเฟตในคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ทำงานตามที่ต้องการ ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้จะเป็น ARM Cortex M4 STM32F4DISCOVERYบอร์ด STM32F407VG แสดงดังรูป 3.12

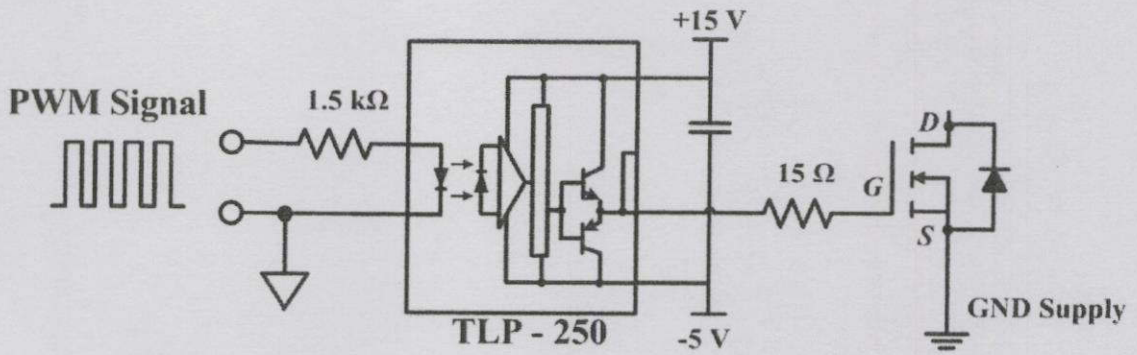


รูปที่ 3.12 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM Cortex M4 STM32F407VG

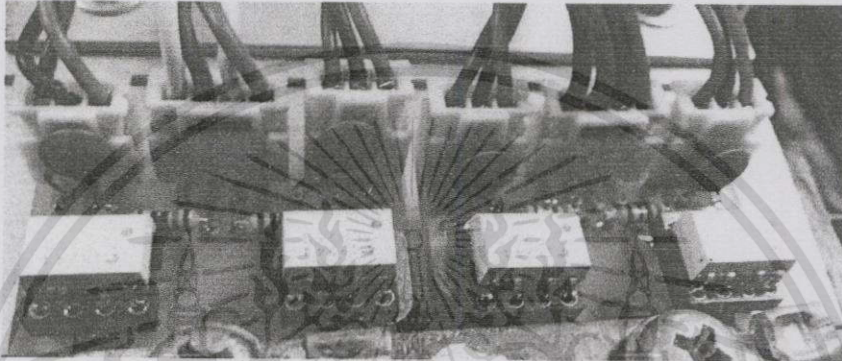
#### 3.4.3.2 วงจรขับเคลื่อน

วงจรขับเคลื่อนเป็นวงจรที่มีหน้าที่ในการรับสัญญาณ PWM เพื่อใช้เป็นสัญญาณป้อนเกตของมอสเฟตในวงจรคอนเวอร์เตอร์ซึ่งประกอบไปด้วยมอสเฟต 4 ตัว โดยสัญญาณ PWM จะถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรขับเคลื่อนประกอบไปด้วยไอซี TLP-250 ใช้ในการแยกกราวด์เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับทางด้านวงจรควบคุมดังแสดงในรูปที่ 3.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

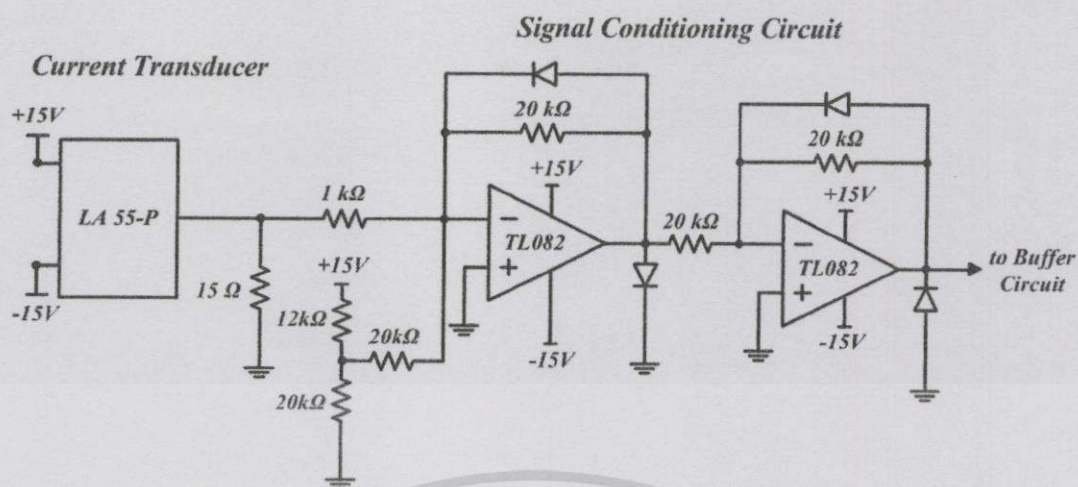


(ข)

รูปที่ 3.13 วงจรขับเคลื่อน (ก) ไดโอดแฉกรวมวงจรขับเคลื่อน (ข) ชิ้นงานวงจรขับเคลื่อน

#### 3.4.3.3 วงจรตรวจวัดกระแส

การวัดกระแส นั้นจะใช้ Current Transducer บริษัท Liaisons Electroniques-Mecaniques (LEM) เบอร์ LA55-P ซึ่งมีหน้าที่ในการวัดขนาดและเปลี่ยนกระแสอาร์มาเจอร์เป็นสัญญาณแรงดันส่งไปยังวงจรปรับสภาพสัญญาณ (signal conditioning circuit) เพื่อปรับระดับแรงดันให้เหมาะสมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ และต่อวงจรบัฟเฟอร์เพื่อรักษาระดับแรงดัน ไดโอดแฉกรวมวงจรตรวจวัดกระแสแสดงในรูปที่ 3.14 (ก) และวงจรตรวจวัดกระแสจริงแสดงดังรูปที่ 3.14 (ข)



(ก)



(ข)

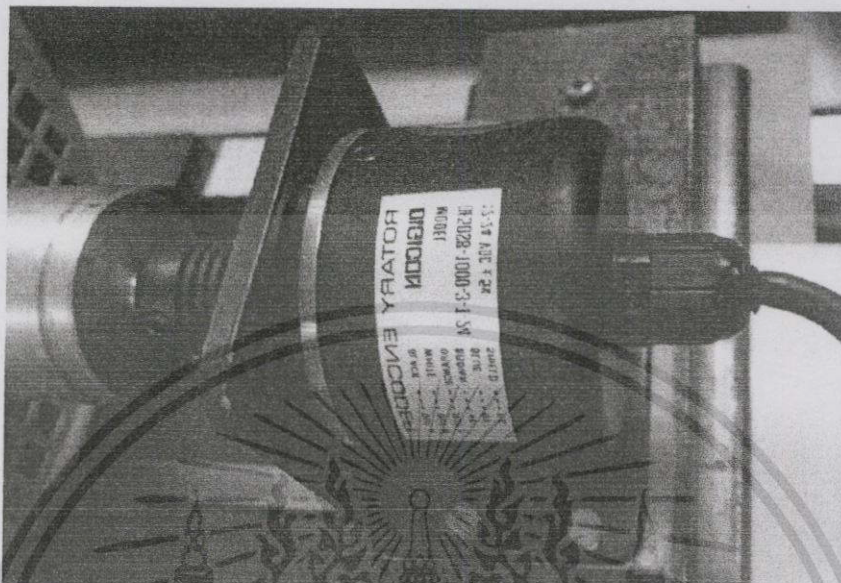
รูปที่ 3.14 วงจรตรวจวัดกระแส (ก) ไดอะแกรมวงจรตรวจวัดกระแส (ข) ชิ้นงานวงจรตรวจวัดกระแส

#### 3.4.3.4 วงจรเอนโคเดเตอร์

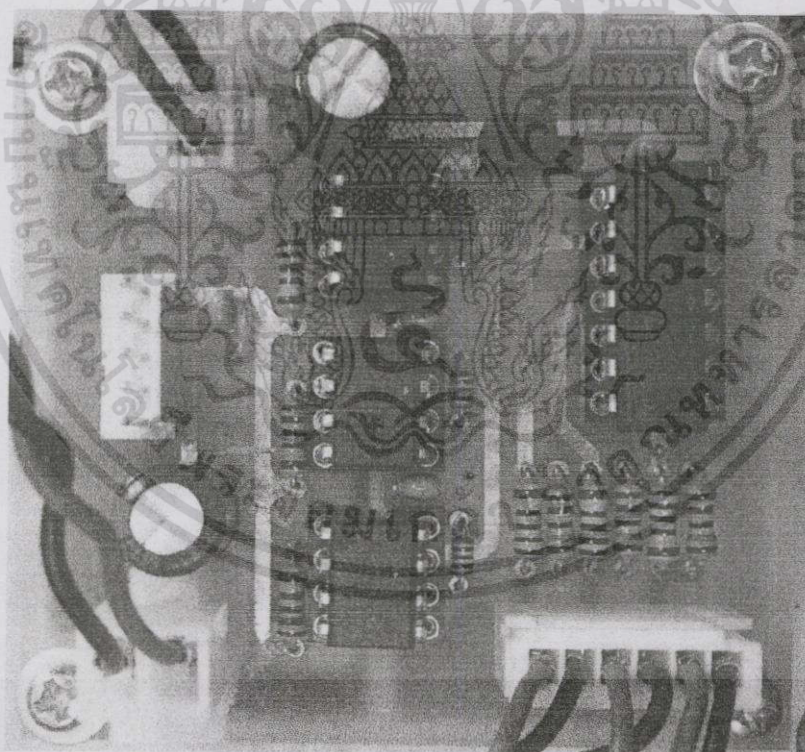
วงจรเอนโคเดเตอร์เป็นวงจรที่รับสัญญาณจากโรตารีเอนโคเดเตอร์แบบ Shaft DE50S8 SERIES ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตัวเครื่อง 50 มิลลิเมตร ใช้แหล่งจ่ายไฟในย่านกว้าง 12 ถึง 24 V DC  $\pm$  5 % 1,000 พัลส์ต่อรอบ สัญญาณออกจะเป็น 3 ขา A B Z โดยขา A กับขา B จะให้สัญญาณพัลส์ออกมาโดยจะ shift phase กัน 90 องศา ขา Z จะเป็นสัญญาณ 1 พัลส์เมื่อครบรอบ เวลาในการตอบสนองสูงสุด 1 ไมโครวินาที [9] เอนโคเดเตอร์ที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.15 (ก) และสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ได้จากเอนโคดเดอร์จะเข้าไปสู่วงจรเอนโคดเดอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.15 (ข) เพื่อทำการปรับระดับแรงดันให้เหมาะสมกับไมโครคอนโทรลเลอร์



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.15 วงจรเอนโคดเดอร์ (ก) เอนโคดเดอร์ (ข) ชีงงานวงจรเอนโคดเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 บทสรุป

เนื้อหาบทนี้เป็นการใช้หลักการพื้นฐานจากบทที่ 2 ซึ่งเป็นทฤษฎีนำมาประยุกต์ใช้กับโปรแกรม MATLAB/Simulink เพื่อจำลองการออกแบบทางคอมพิวเตอร์ โดยมีจำลองการทำงานในสภาวะที่การเกิดการเปลี่ยนแปลงไป เพื่อให้ได้พารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสมกับระบบ และนำไปใช้ในการออกแบบโปรแกรมบนไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อควบคุมการทำงานของระบบต่างๆ และทำการทดลองผลในบทต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 บทนำ

จุดประสงค์ในการทดลองการควบคุมความเร็วรอบแบบวงปิดสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อดูผลตอบสนองของความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อภาระทางกลเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งภาระทางกลที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นจะเป็นภาระที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสซึ่งมีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นต้นกำลัง โดยทำการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้โหลดไฟเป็นลำดับขั้น 5 ขั้นคือ 179.23 387.98 595.83 784.84 และ 1006.46 วัตต์ ตามลำดับ (ค่ากำลังไฟฟ้างกล่าวมาจากการคำนวณแรงดันและกระแสที่เข้าสู่ภาระโหลดไฟสามเฟส เฟสละ 2 4 6 8 และ 10 โหลด ตามลำดับ) อีกการทดลองคือการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้าโดยมีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นต้นกำลัง ซึ่งถูกควบคุมความเร็วรอบให้มีค่าเท่ากับความเร็วซิงโครนัสของระบบไฟฟ้า ในบทนี้จะนำเสนอการทดลองความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การทดลองกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การทดลองแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า และการทดลองเฟสล็อก

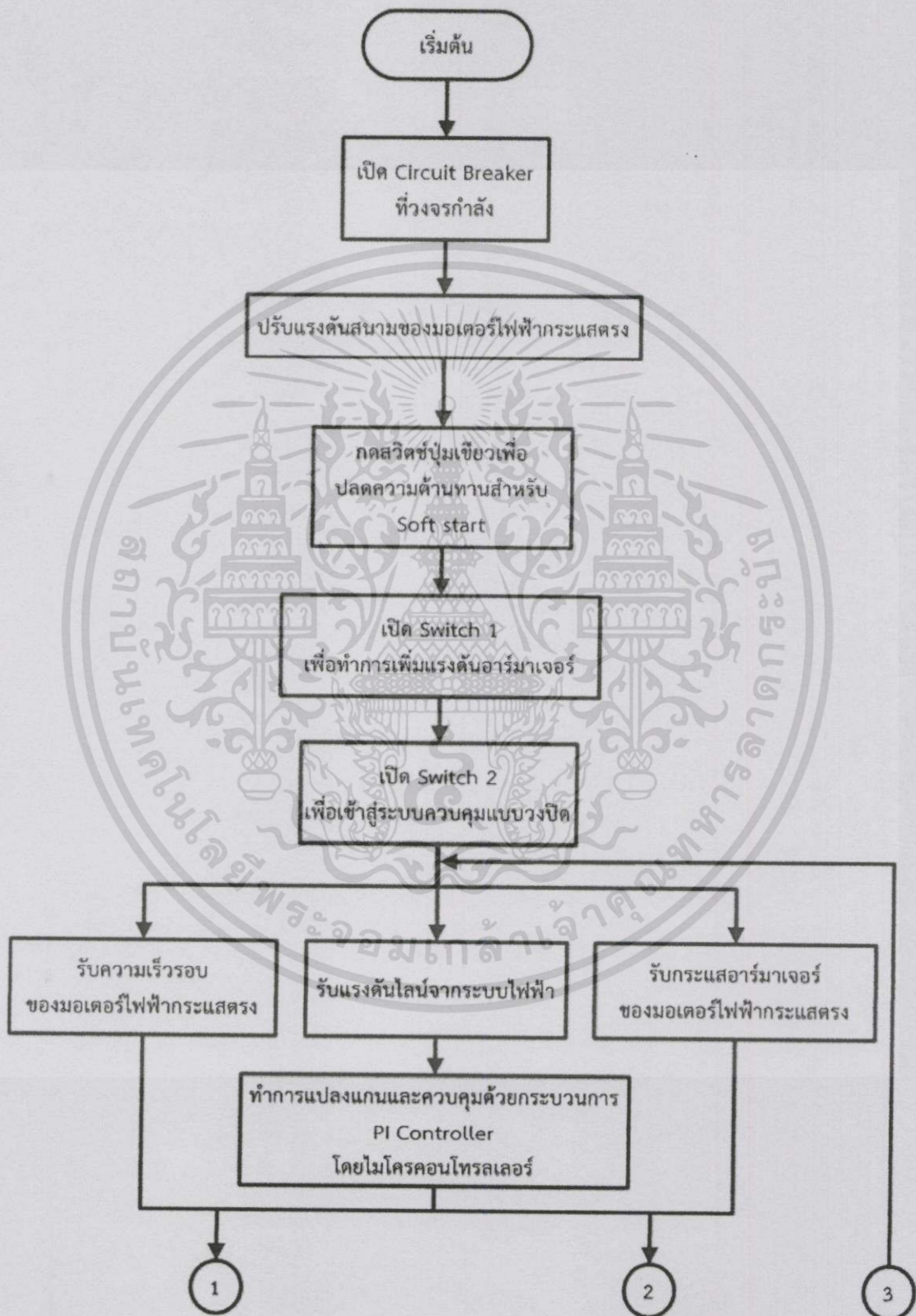
#### 4.2 การทดลอง

การทดลองการควบคุมความเร็วรอบแบบวงปิดสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้น เริ่มจากการเพิ่มแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อให้ได้ความเร็วรอบค่าหนึ่งจากนั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการป้อนค่าผลต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงจากกระบวนการเฟสล็อก กับความเร็วรอบจากเอนโคเดอร์และค่ากระแสอาร์มาเจอร์กลับสู่กระบวนการควบคุมแบบวงปิด ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณจะนำไปควบคุมสัญญาณ PWM ที่ใช้ขับเกตของมอสเฟตที่วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์เพื่อเพิ่มหรือลดแรงดันที่ขั้วอาร์มาเจอร์ ให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ควบคุมความเร็วรอบเท่ากับความเร็วซิงโครนัสของระบบไฟฟ้าตามที่กำหนดแม้ว่าภาระทางกลจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ทำการทดลองเพิ่มและลดภาระขนาด 179.23 387.98 595.83 784.84 และ 1006.46 วัตต์ บันทึกผลตอบสนองชั่วครู่และสถานะคงตัวของความเร็วรอบและกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งกระบวนการทำงานจะถูกแสดงในรูปที่ 4.1

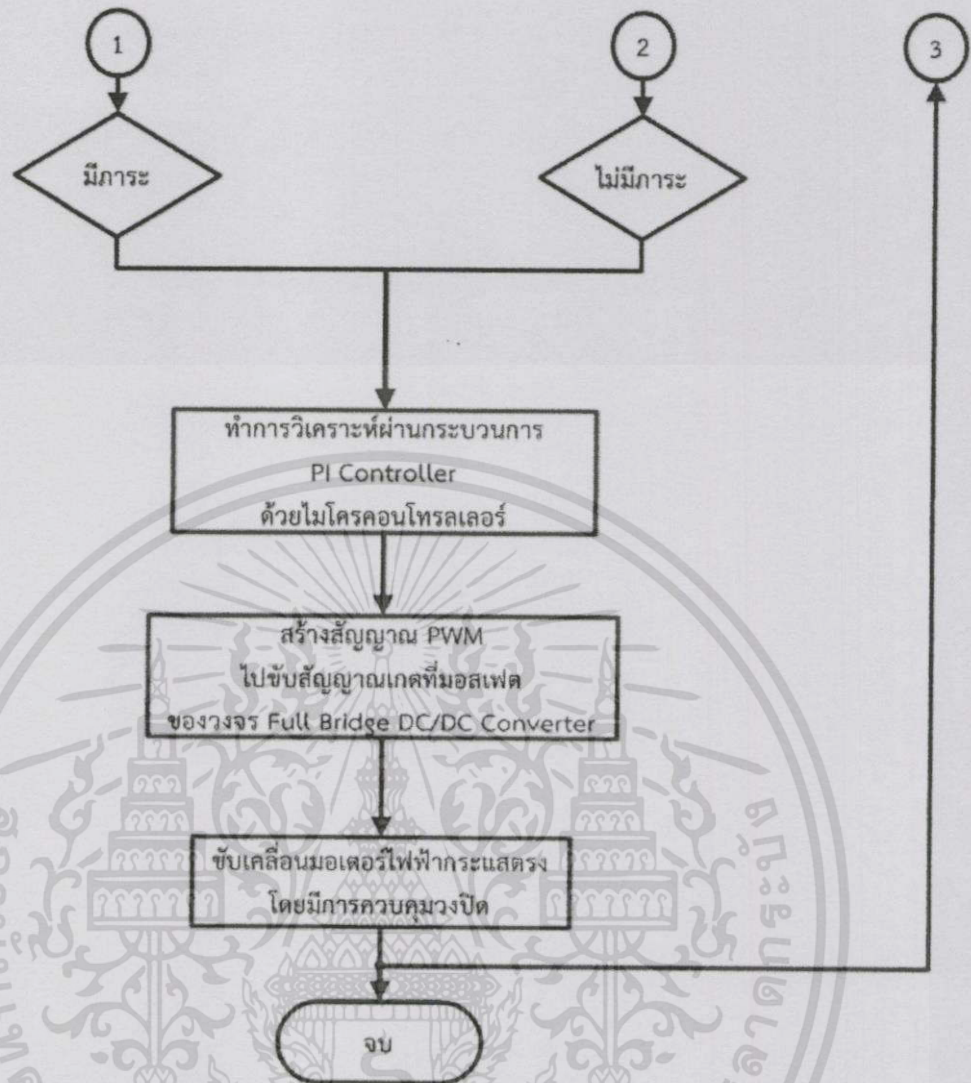
การทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้ามีจุดประสงค์เพื่อสังเกตผลตอบสนองความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพิ่มความถี่ของระบบไฟฟ้า ซึ่งในขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีความเร็วรอบเท่ากับความเร็วซิงโครนัสจึงทำการกระตุ้นกระแสเข้ามาที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส ปรับให้เข้าเงื่อนไขของการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันที่ขั้วเครื่องกำเนิดกับแรงดันระบบไฟฟ้าต้องต่างกันไม่เกิน  $\pm 5\%$  ลำดับเฟสตรงกัน และความถี่ต่างกันไม่เกิน  $\pm 0.067\%$  เมื่อตรงตามเงื่อนไขจึงทำการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

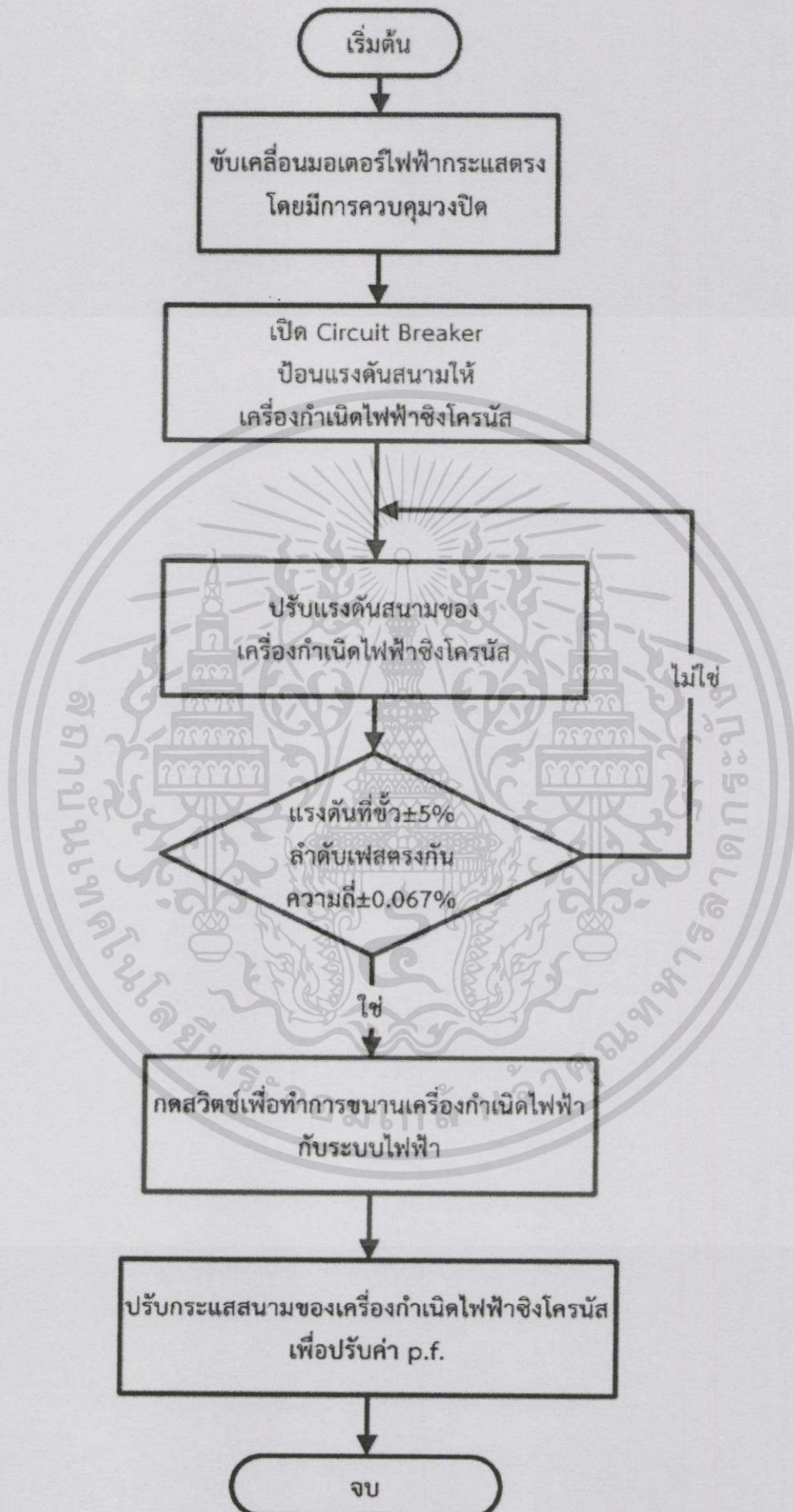
ซิงโครนัสเข้าสู่ระบบไฟฟ้าจากนั้นปรับค่ากระแสสนามของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเพื่อทดสอบความสามารถในการทำงานที่ตัวประกอบกำลังค่าต่างๆ ซึ่งกระบวนการทำงานจะถูกแสดงในรูปที่ 4.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 กระบวนการควบคุมความเร็วรอบแบบวงปิดสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

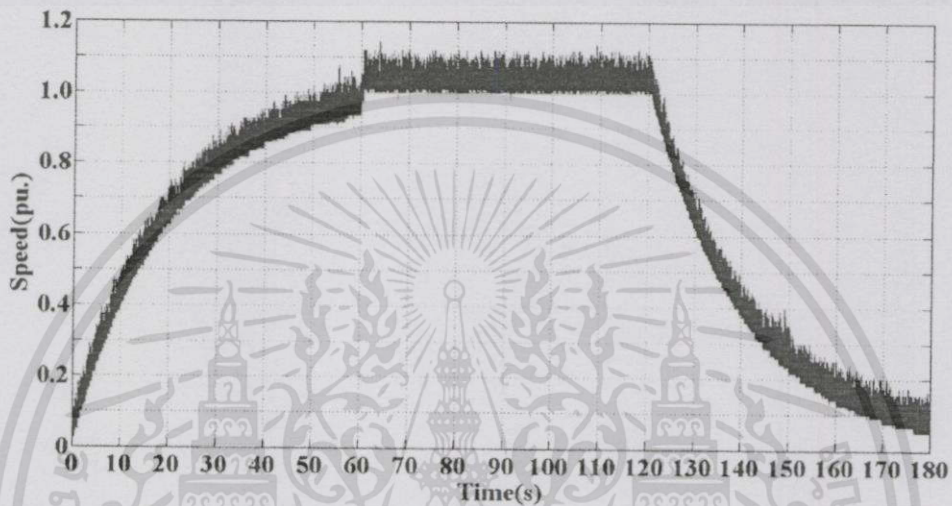


รูปที่ 4.2 กระบวนการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มการทดลองทำการเปิดสวิตช์ 1 เพื่อเพิ่มแรงดันอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงจนถึงค่าที่กำหนดไว้ จากนั้นทำการเปิดสวิตช์ 2 เพื่อเข้าสู่ระบบควบคุมแบบวงปิด

เมื่อสิ้นสุดการทำงานทำการปิดสวิตช์ 2 เพื่อลดแรงดันอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงลงจนถึงค่าที่กำหนดไว้ แล้วทำการปิดสวิตช์ 1 เพื่อหยุดการขับเคลื่อนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งผลตอบสนองความเร็วรอบเป็นไปตามรูปที่ 4.3

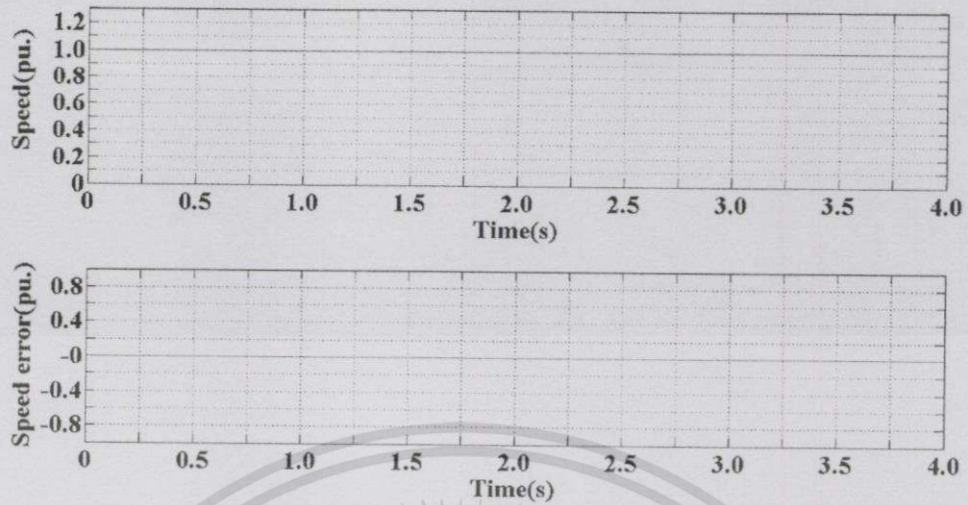


รูปที่ 4.3 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจากการทำงาน switch 1 และ switch 2

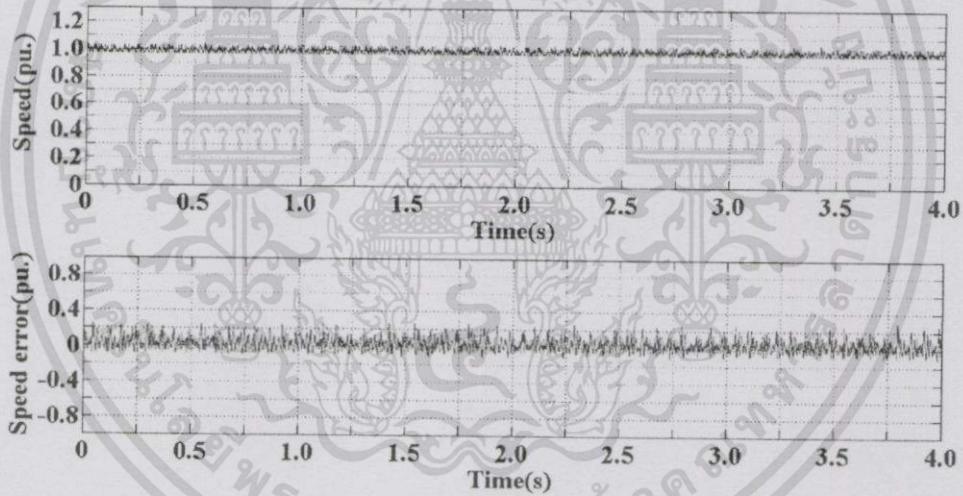
#### 4.3 การทดลองความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นเป็นตัวแปรหลักในการทำงานของปริณญาณิพนธ์นี้ โดยในการทดลองได้มีการเพิ่มและลดภาระค่าต่างๆ เพื่อดูผลตอบสนองของความเร็วรอบที่มีการควบคุมแบบวงปิดต่อภาระที่เปลี่ยนไป

ในการทดลองกรณีไร้ภาระเมื่อระบบเข้าสู่การควบคุมแบบวงปิดพบว่าความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าคงที่ 1 pu. หรือ 1500 rpm ค่าความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงซึ่งคำนวณมาจากเฟสล็อกกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่า 0 pu. หรือ 0 rpm ซึ่งผลตอบสนองความเร็วรอบจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.4 และ 4.5



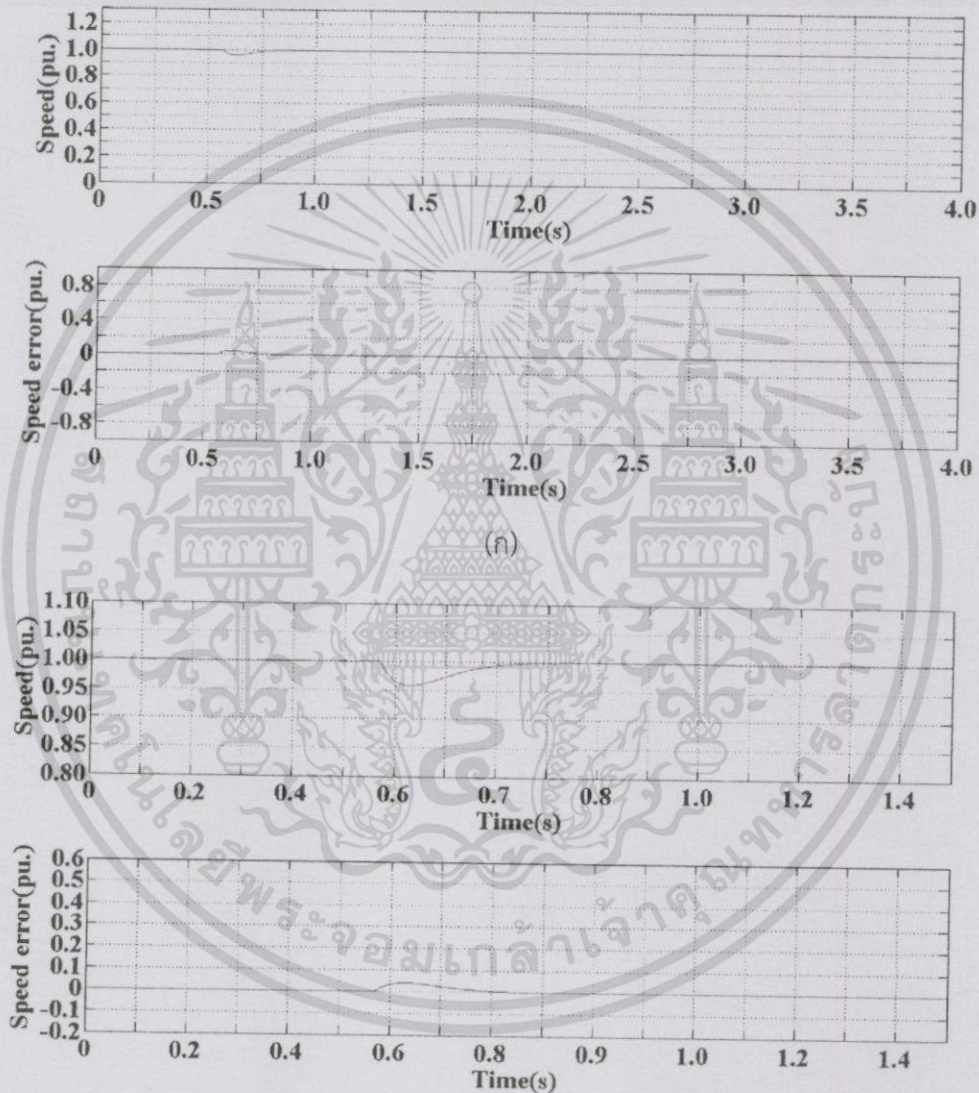
รูปที่ 4.4 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะไร้ภาระ



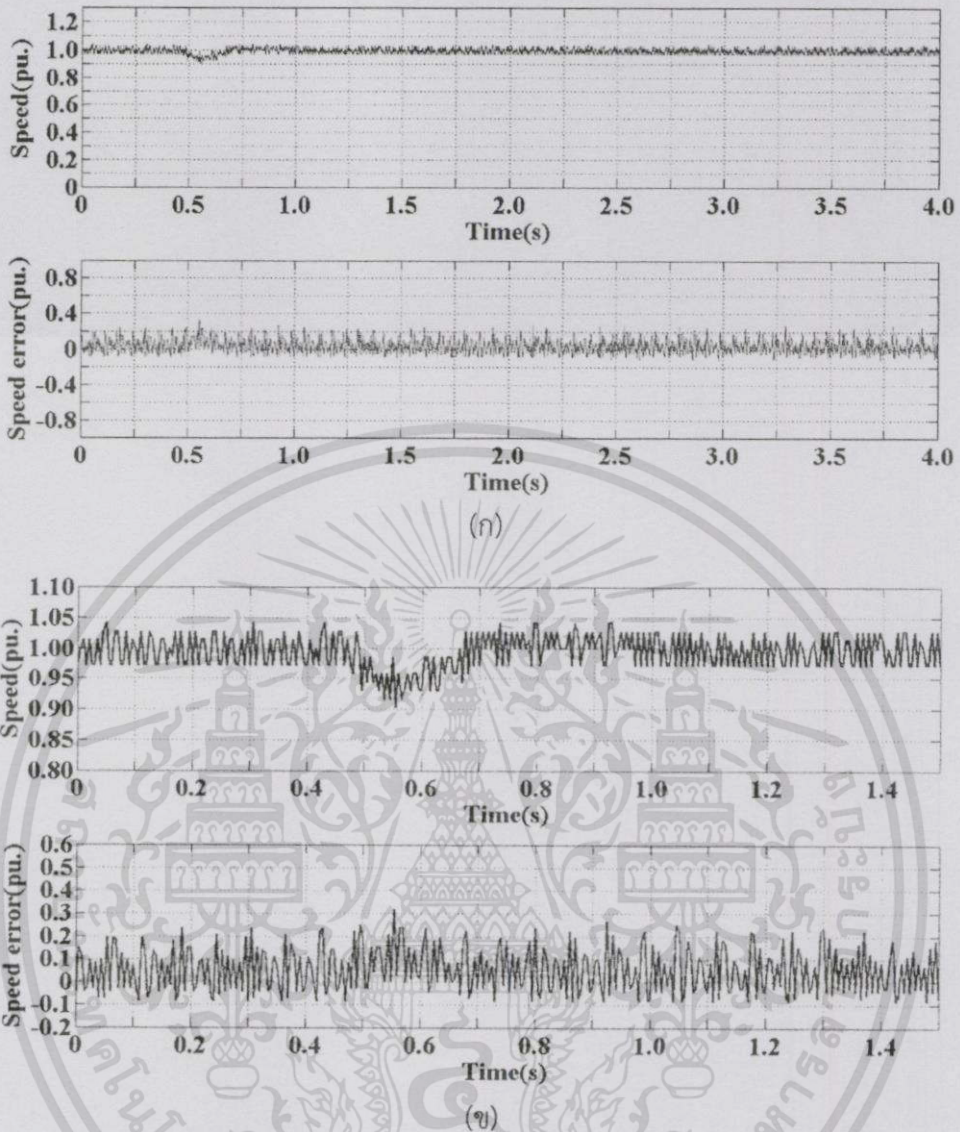
รูปที่ 4.5 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะไร้ภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการเพิ่มภาระขนาด 179.23 วัตต์จะส่งผลให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลง ซึ่งผลตอบสนองสถานะชั่วครู่ของความเร็วยุบที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงภาระคือความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะลดลงเหลือ 0.93 pu. หรือ 1395 rpm จากนั้นระบบจะทำการควบคุมความเร็วรอบให้เข้าสู่สภาวะคงตัวที่ความเร็วรอบ 1 pu. หรือ 1500 rpm ซึ่งผลตอบสนองความเร็วรอบจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.6 และ 4.7



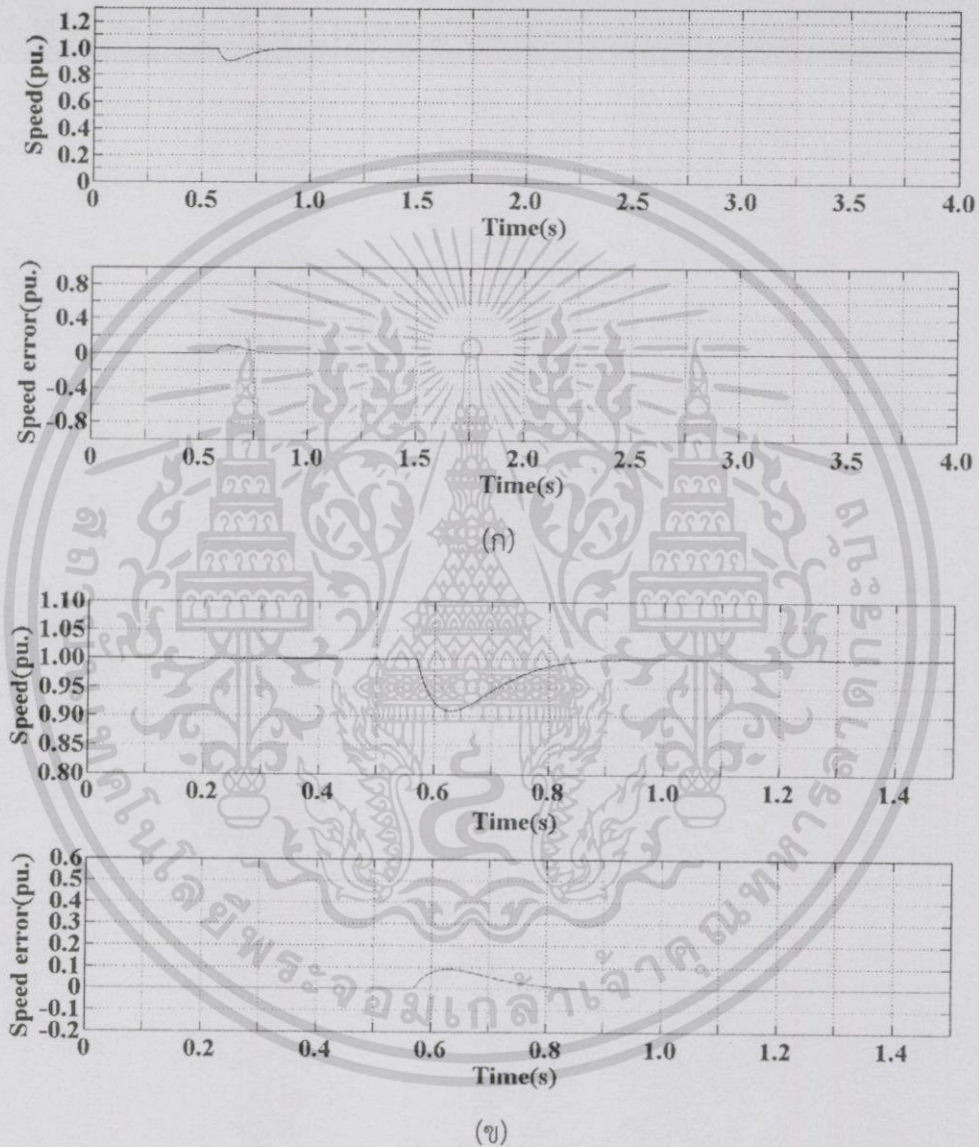
รูปที่ 4.6 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 179.23 วัตต์ (ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง



รูปที่ 4.7 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 179.23 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

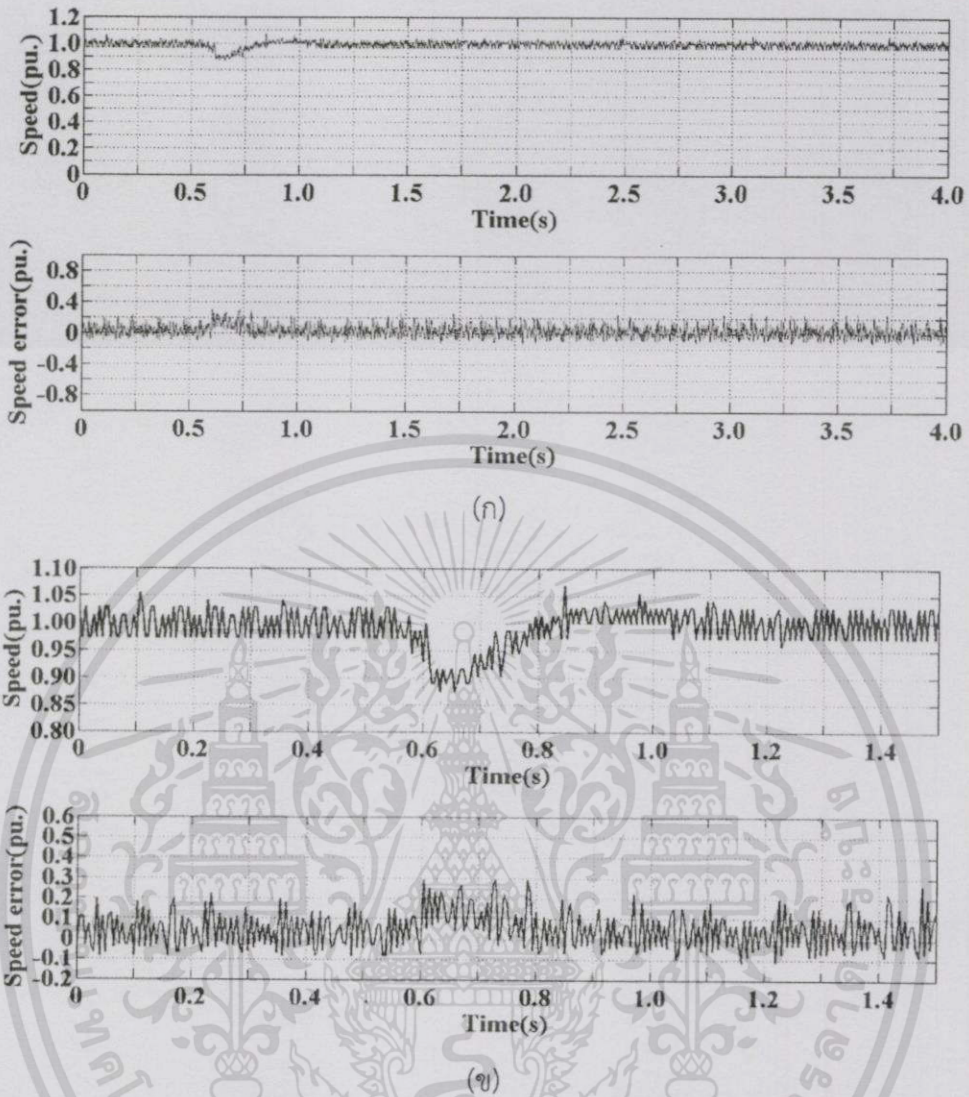
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีเพิ่มภาระขนาด 387.98 วัตต์จะส่งผลให้ผลตอบสนองสถานะชั่วคราวของความเร็วรอบลดลงเหลือ 0.9 pu. หรือ 1350 rpm จากนั้นระบบจะทำการควบคุมความเร็วรอบให้เข้าสู่สภาวะคงตัวที่ความเร็วรอบ 1 pu. หรือ 1500 rpm ซึ่งผลตอบสนองความเร็วรอบจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.8 และ 4.9



รูปที่ 4.8 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 387.98 วัตต์ (ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

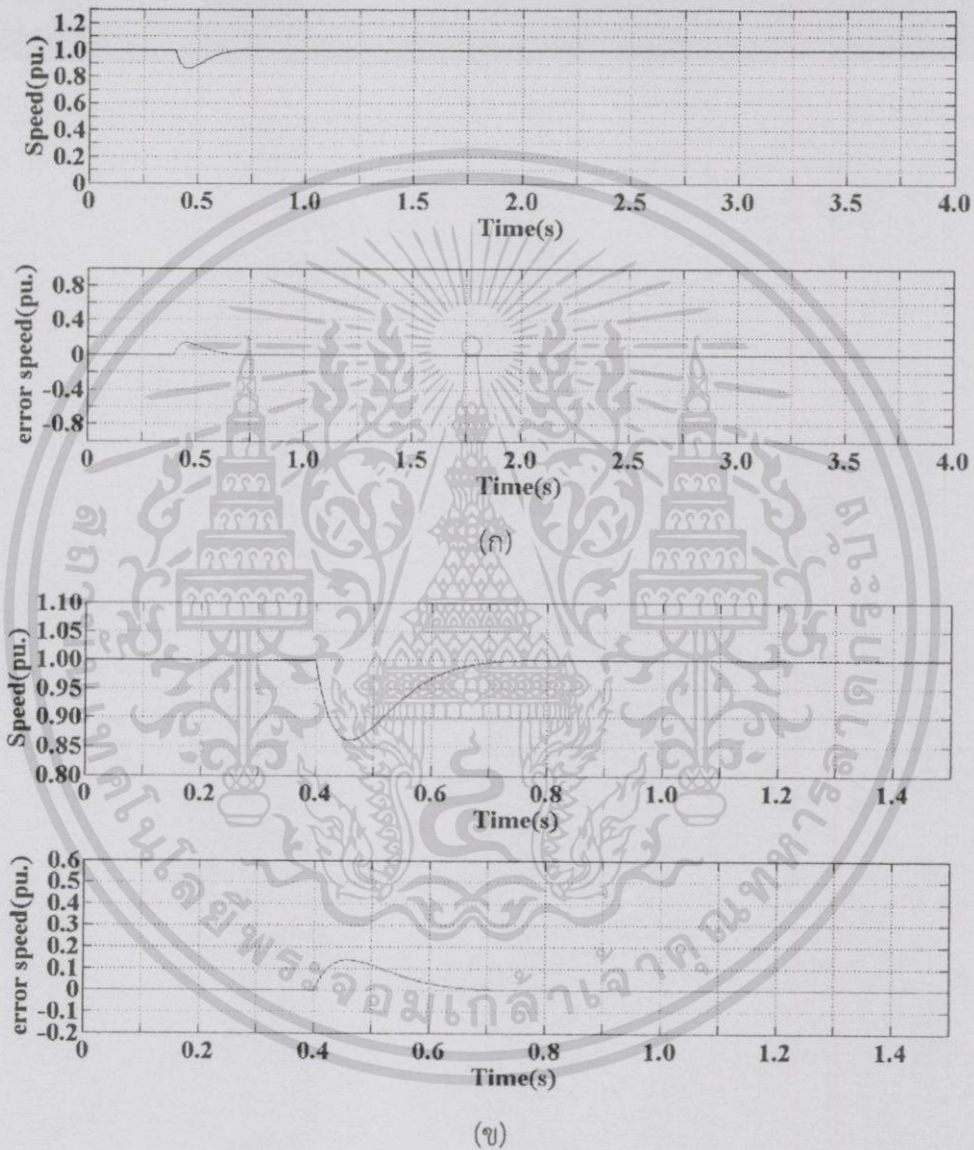
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 387.98 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

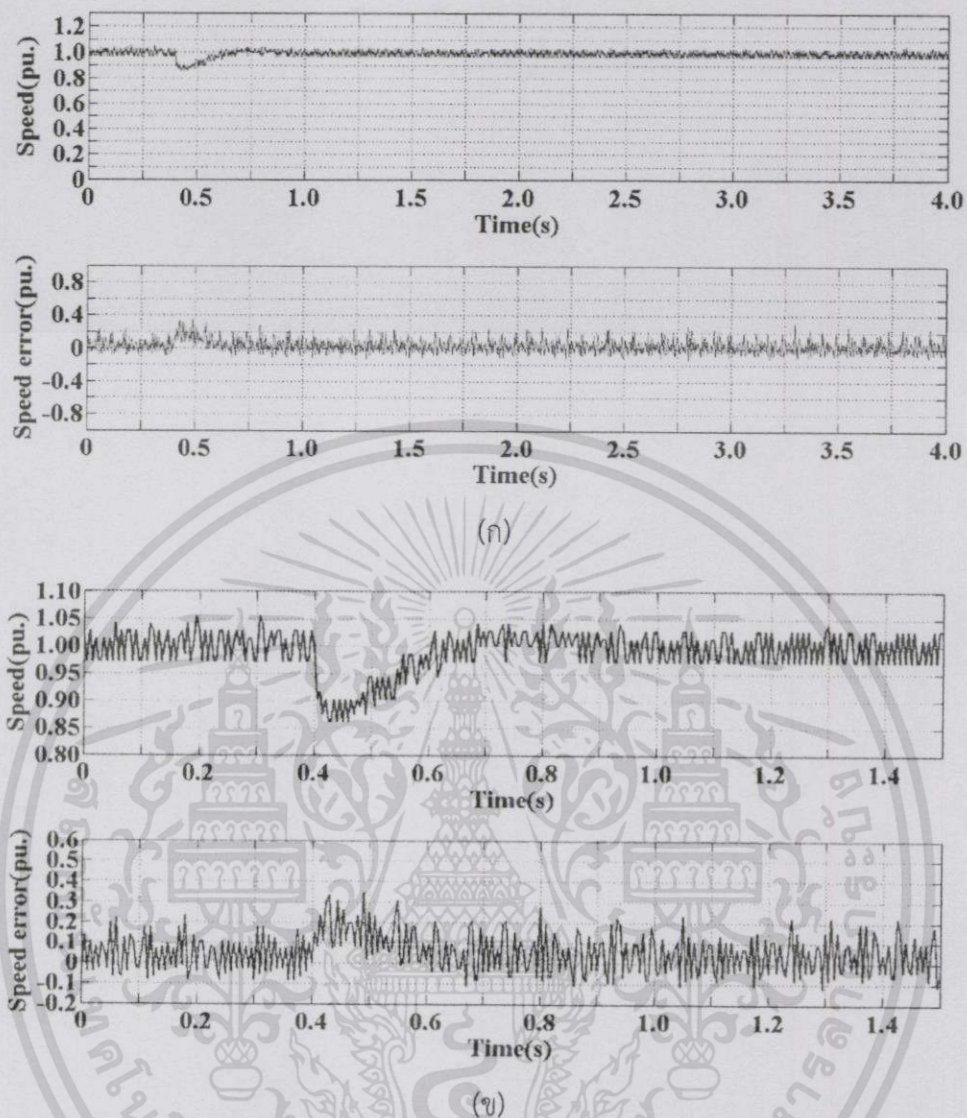
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีเพิ่มภาระขนาด 595.83 วัตต์จะส่งผลให้ผลตอบสนองสถานะชั่วคราวของความเร็วรอบลดลงเหลือ 0.9033 pu. หรือ 1335 rpm จากนั้นระบบจะทำการควบคุมความเร็วรอบให้เข้าสู่สภาวะคงตัวที่ความเร็วรอบ 1 pu. หรือ 1500 rpm ซึ่งผลตอบสนองความเร็วรอบจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.10 และ 4.11



รูปที่ 4.10 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 595.83 วัตต์ (ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

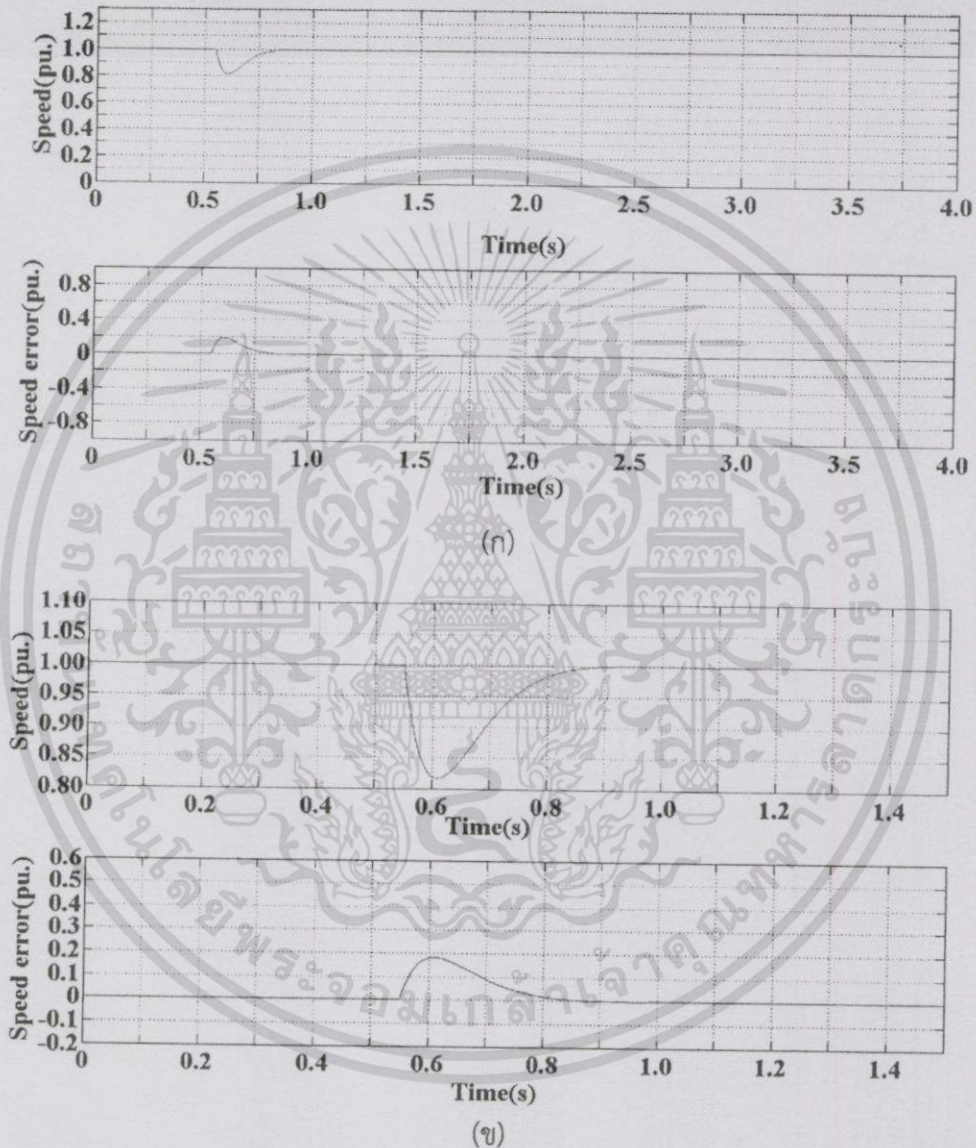
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



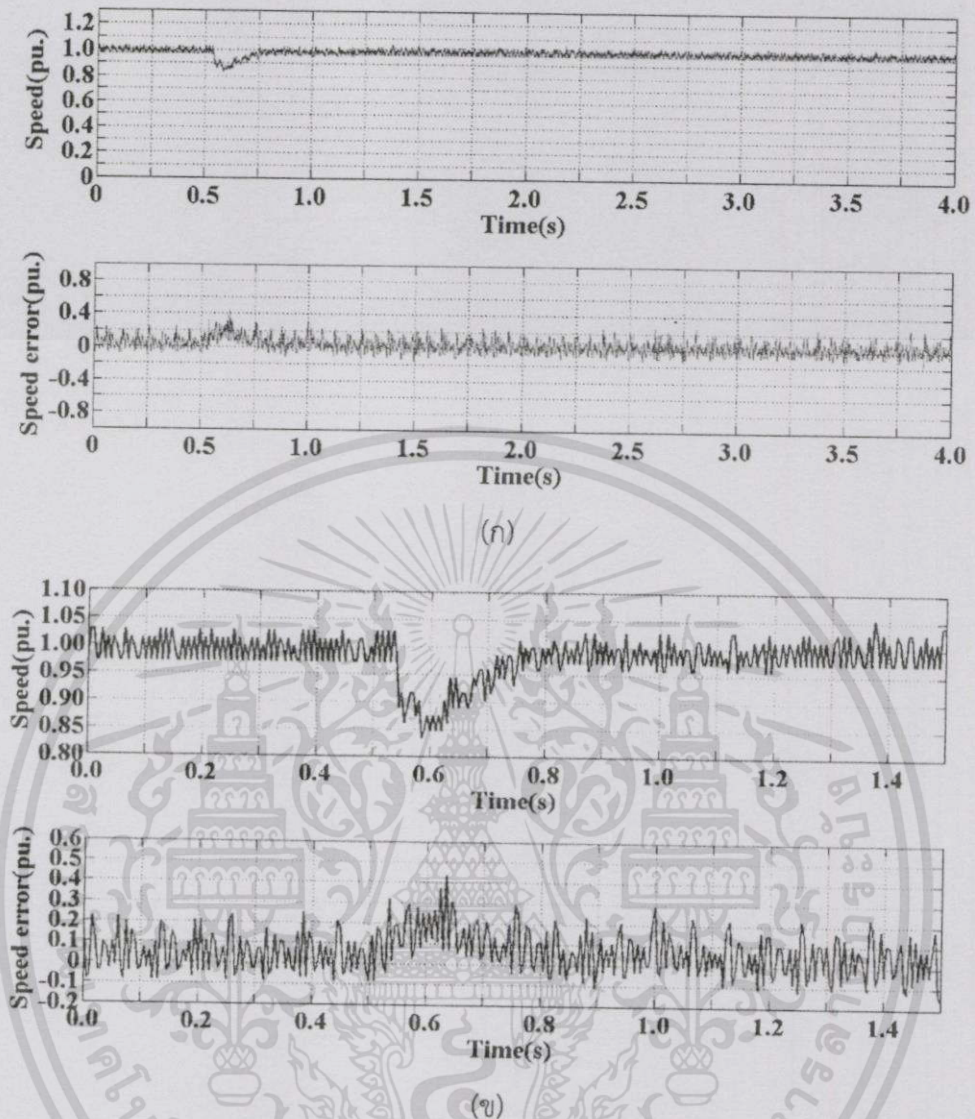
รูปที่ 4.11 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 595.83 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีเพิ่มภาระขนาด 784.84 วัตต์จะส่งผลให้ผลตอบสนองสถานะชั่วครู่ของความเร็วรอบ ลดลงเหลือ 0.86 pu. หรือ 1290 rpm จากนั้นระบบจะทำการควบคุมความเร็วรอบให้เข้าสู่สภาวะ คงตัวที่ความเร็วรอบ 1 pu. หรือ 1500 rpm ซึ่งผลตอบสนองความเร็วรอบจากการจำลองทาง คอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.12 และ 4.13



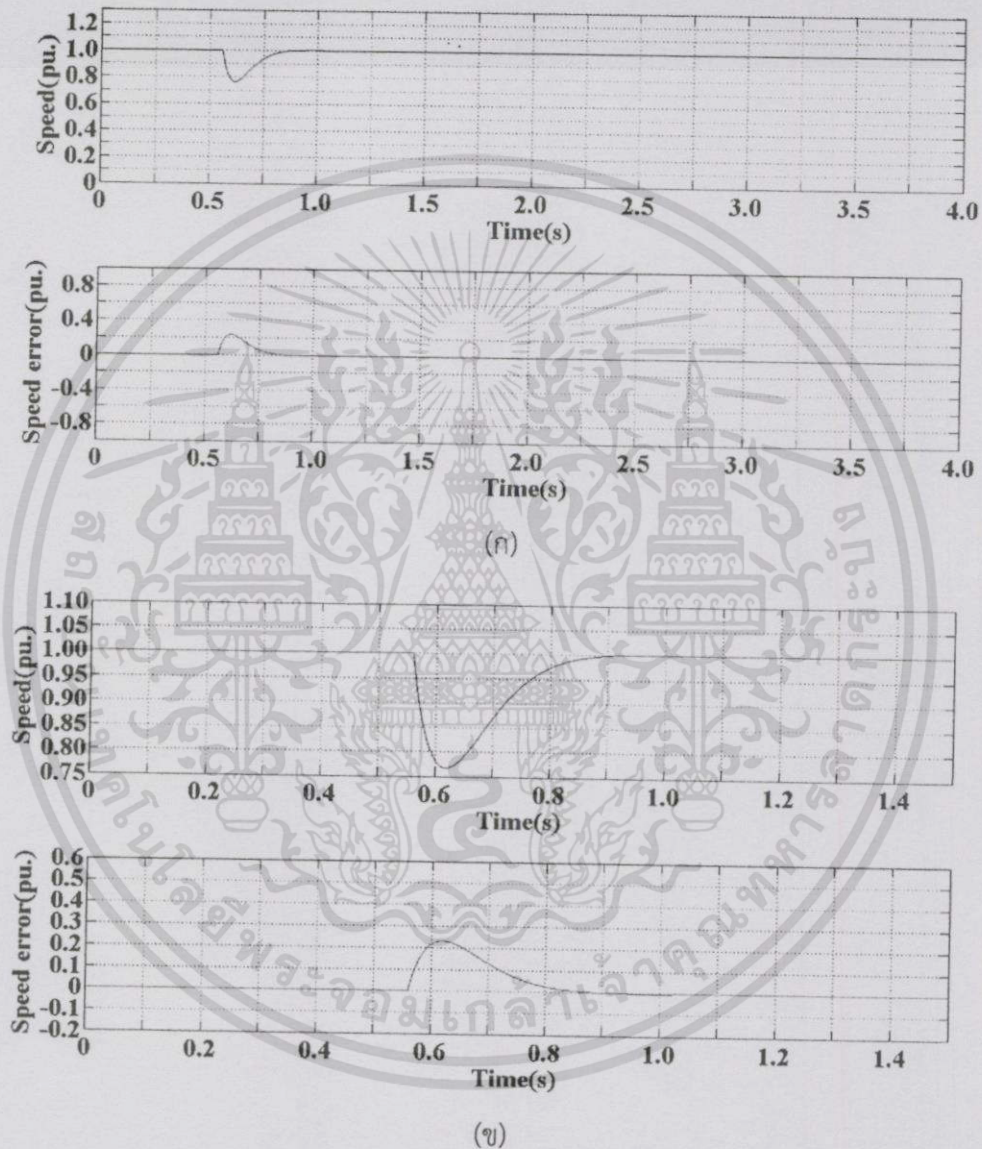
รูปที่ 4.12 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขณะเพิ่มภาระ 784.84 วัตต์ (ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง



รูปที่ 4.13 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 784.84 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

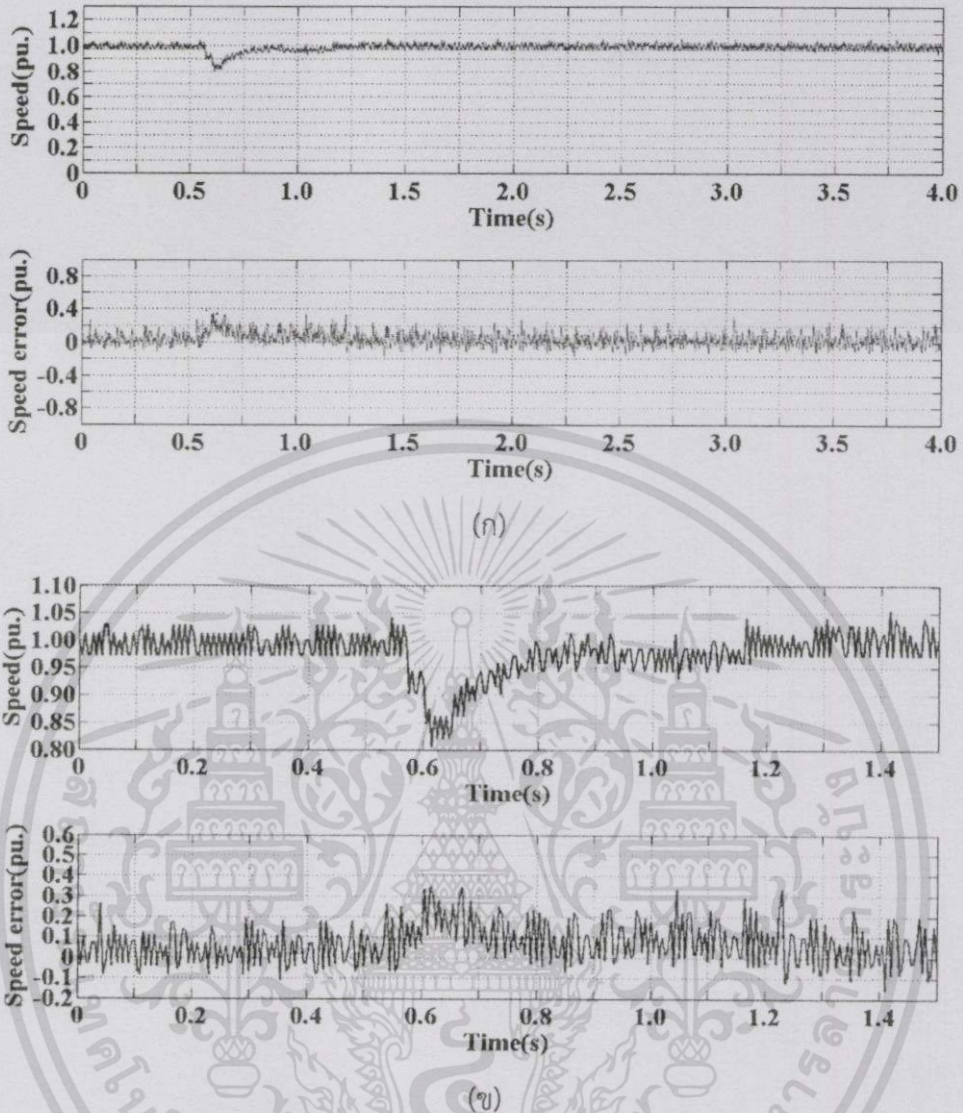
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีเพิ่มภาระขนาด 1006.46 วัตต์จะส่งผลให้ผลตอบสนองสภาวะชั่วคราวของความเร็วรอบลดลงเหลือ 0.84 pu. หรือ 1260 rpm จากนั้นระบบจะทำการควบคุมความเร็วรอบให้เข้าสู่สภาวะคงตัวที่ความเร็วรอบ 1 pu. หรือ 1500 rpm ซึ่งผลตอบสนองความเร็วรอบจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.14 และ 4.15



รูปที่ 4.14 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 1006.46 วัตต์ (ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

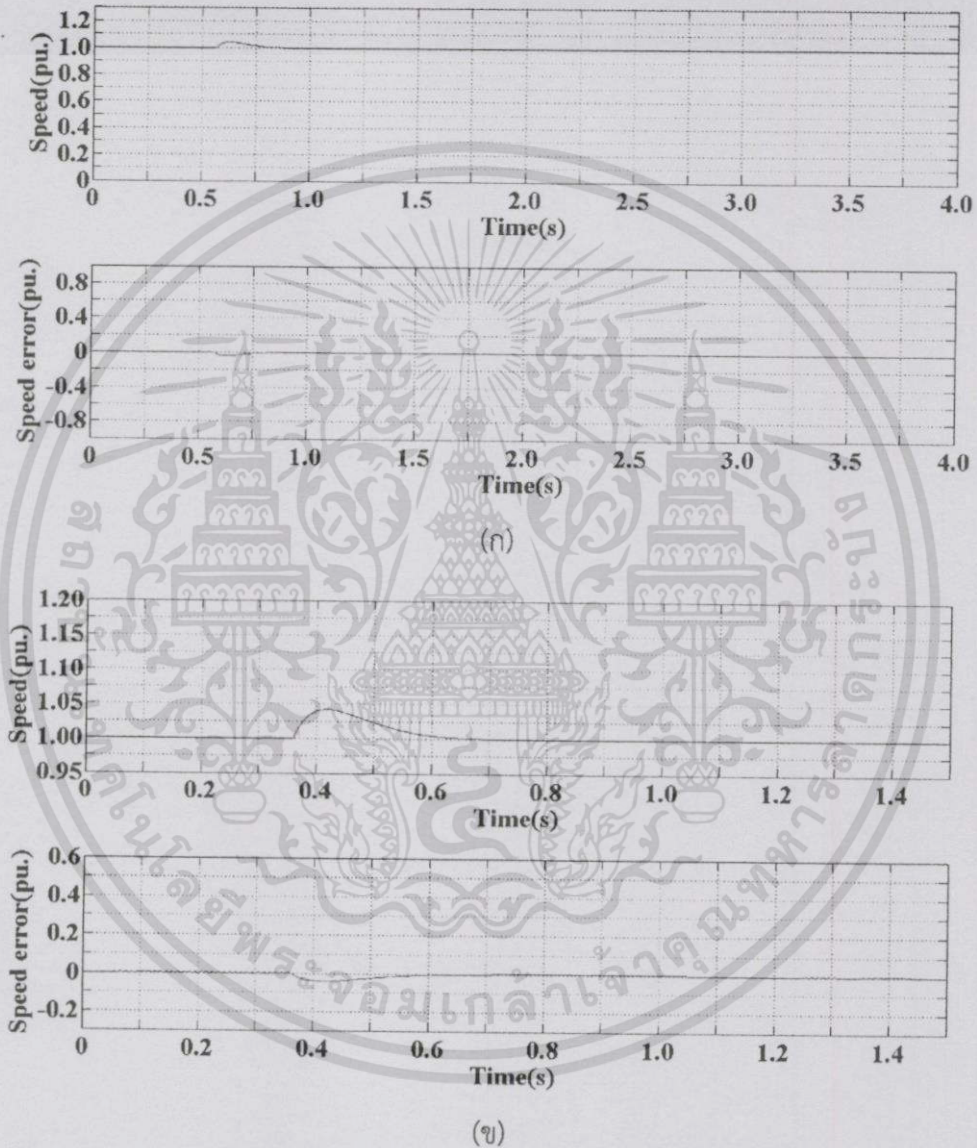


รูปที่ 4.15 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 1006.46 วัตต์

(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

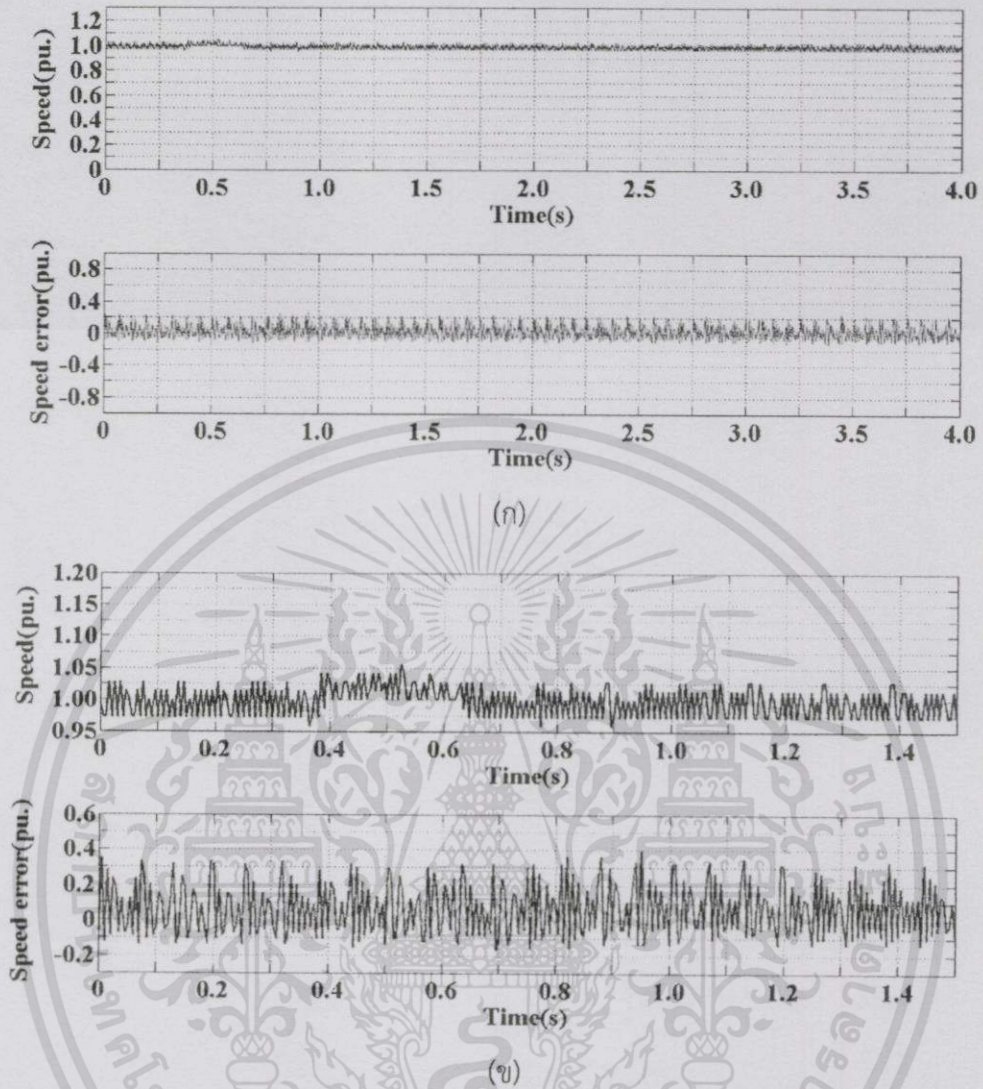
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการปลดภาระขนาด 179.23 วัตต์จะส่งผลให้ผลตอบสนองสถานะชั่วคราวของความเร็วรอบเพิ่มขึ้นเป็น 1.03 pu. หรือ 1545 rpm จากนั้นระบบจะทำการควบคุมความเร็วรอบให้เข้าสู่สภาวะคงตัวที่ความเร็วรอบ 1 pu. หรือ 1500 rpm ซึ่งผลตอบสนองความเร็วรอบจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.16 และ 4.17



รูปที่ 4.16 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 179.23 วัตต์ (ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

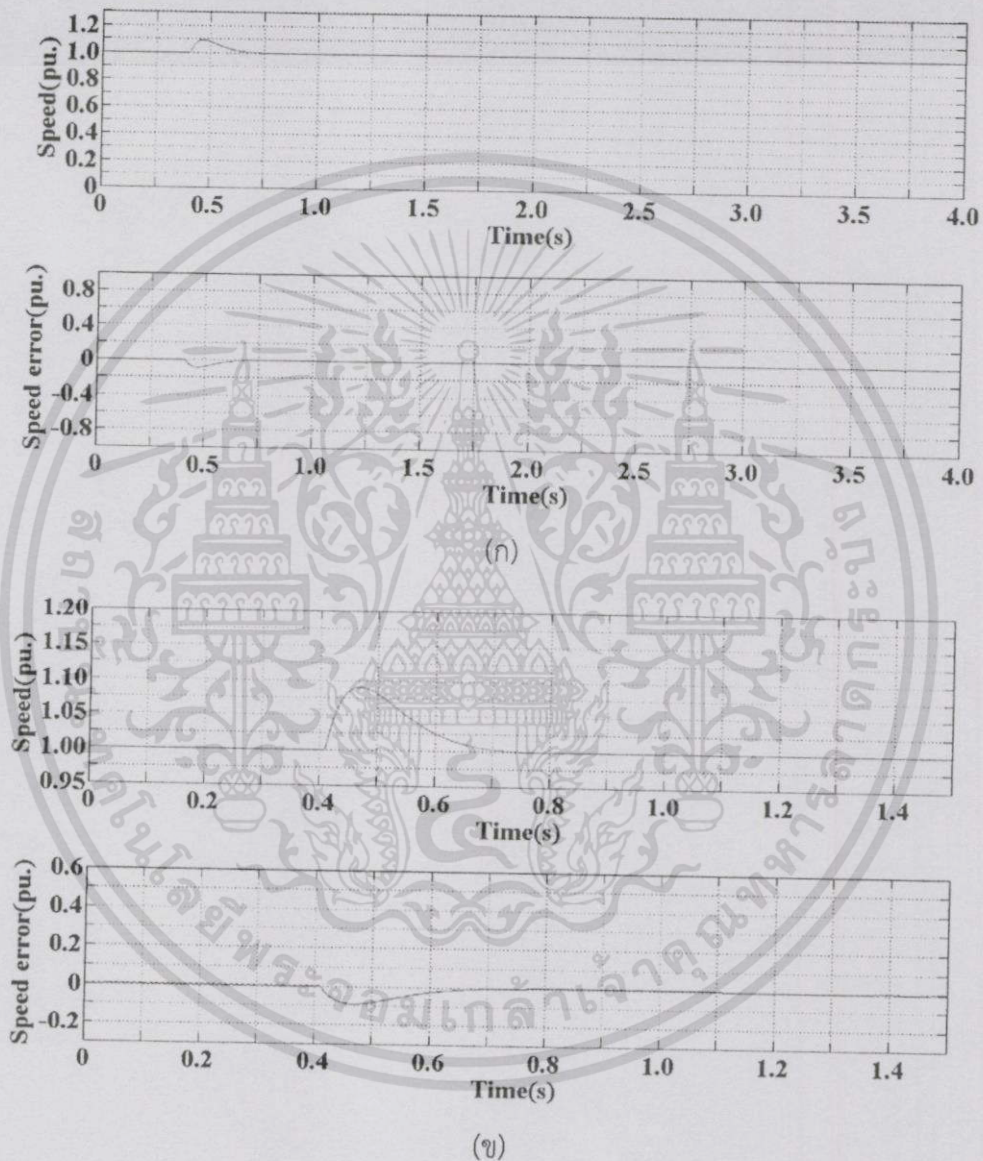
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 179.23 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

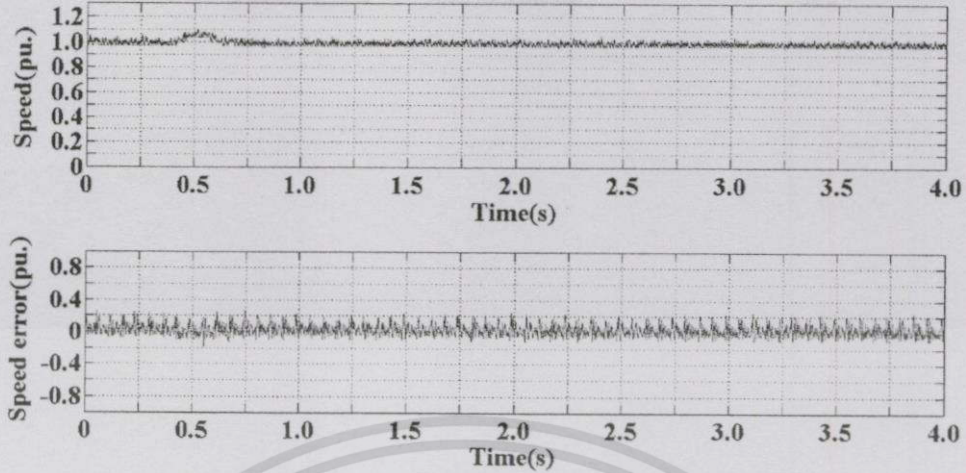
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีปลดภาระขนาด 387.98 วัตต์จะส่งผลให้ผลตอบสนองสภาวะชั่วครู่ของความเร็รรอบเพิ่มขึ้นเป็น 1.07 pu. หรือ 1605 rpm จากนั้นระบบจะทำการควบคุมความเร็รรอบให้เข้าสู่สภาวะคงตัวที่ความเร็รรอบ 1 pu. หรือ 1500 rpm ซึ่งผลตอบสนองความเร็รรอบจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.18 และ 4.19

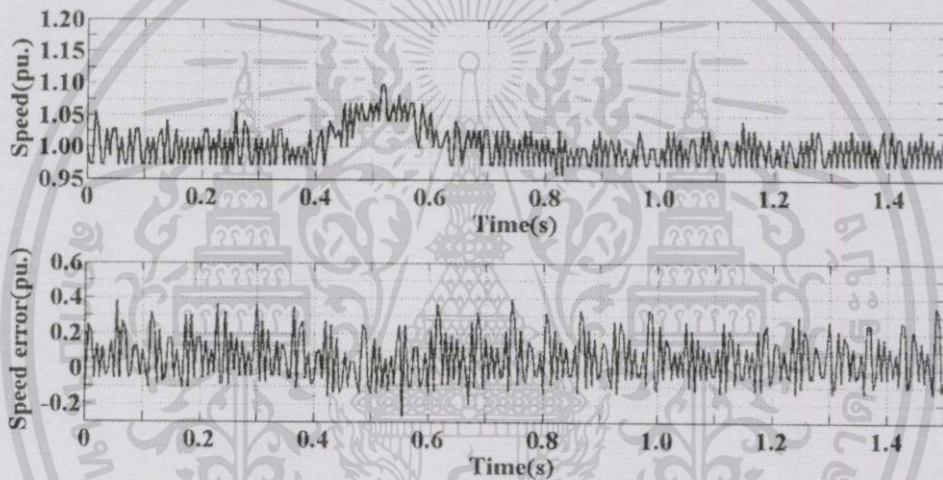


รูปที่ 4.18 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 387.98 วัตต์ (ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

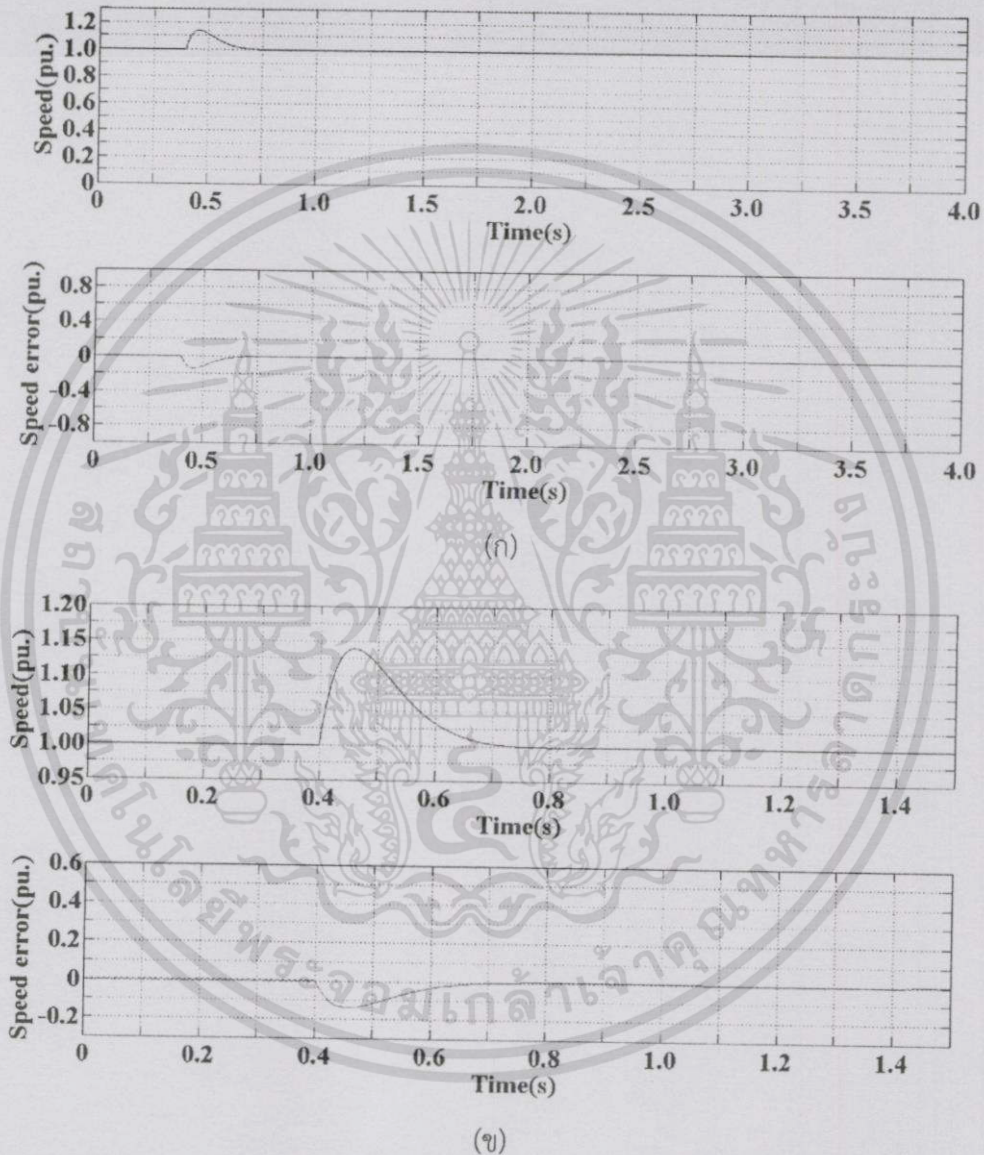


(ข)

รูปที่ 4.19 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 387.98 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

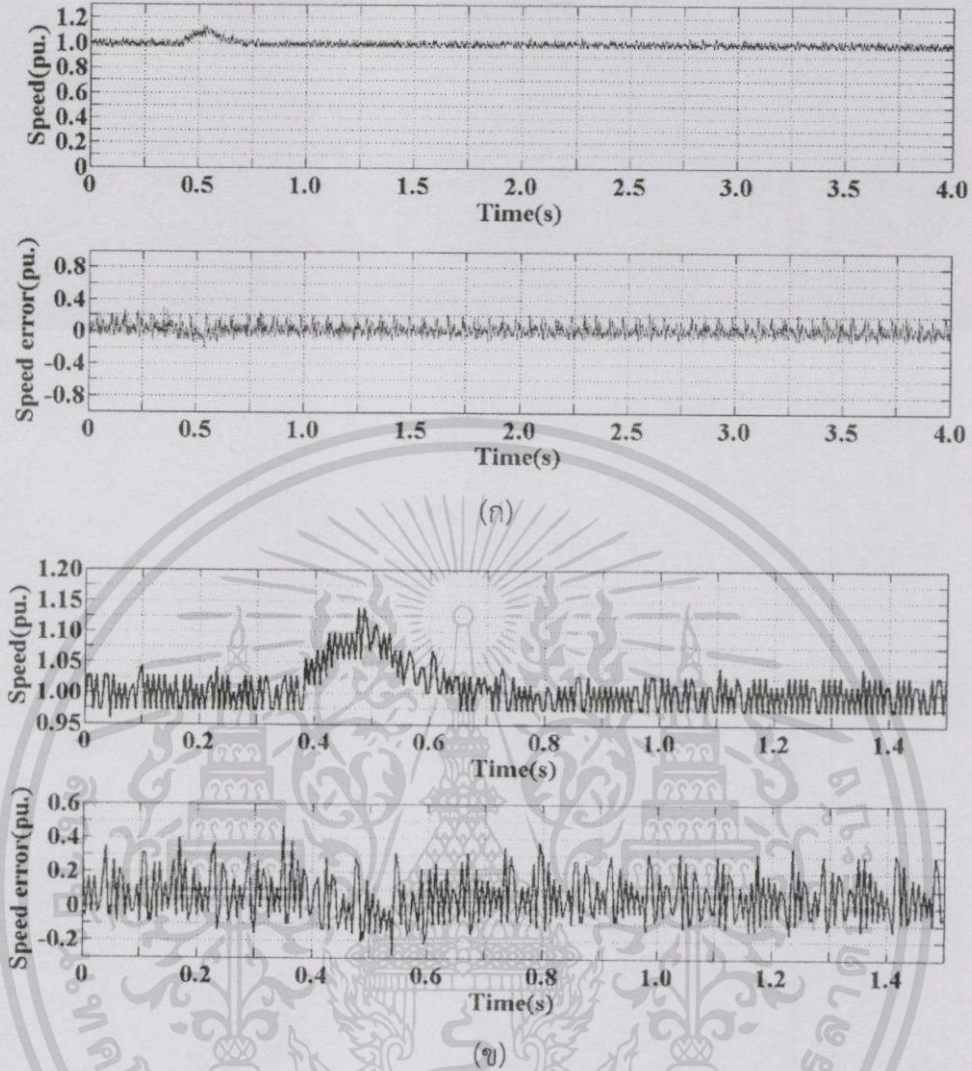
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีปลดภาระขนาด 595.83 วัตต์จะส่งผลให้ผลตอบสนองสถานะชั่วครู่ของความเร็รรอบเพิ่มขึ้นเป็น 1.1 pu. หรือ 1650 rpm จากนั้นระบบจะทำการควบคุมความเร็รรอบให้เข้าสู่สภาวะคงตัวที่ความเร็รรอบ 1 pu. หรือ 1500 rpm ซึ่งผลตอบสนองความเร็รรอบจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.20 และ 4.21



รูปที่ 4.20 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงความเร็รรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็รรอบอ้างอิงกับความเร็รรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 595.83 วัตต์ (ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

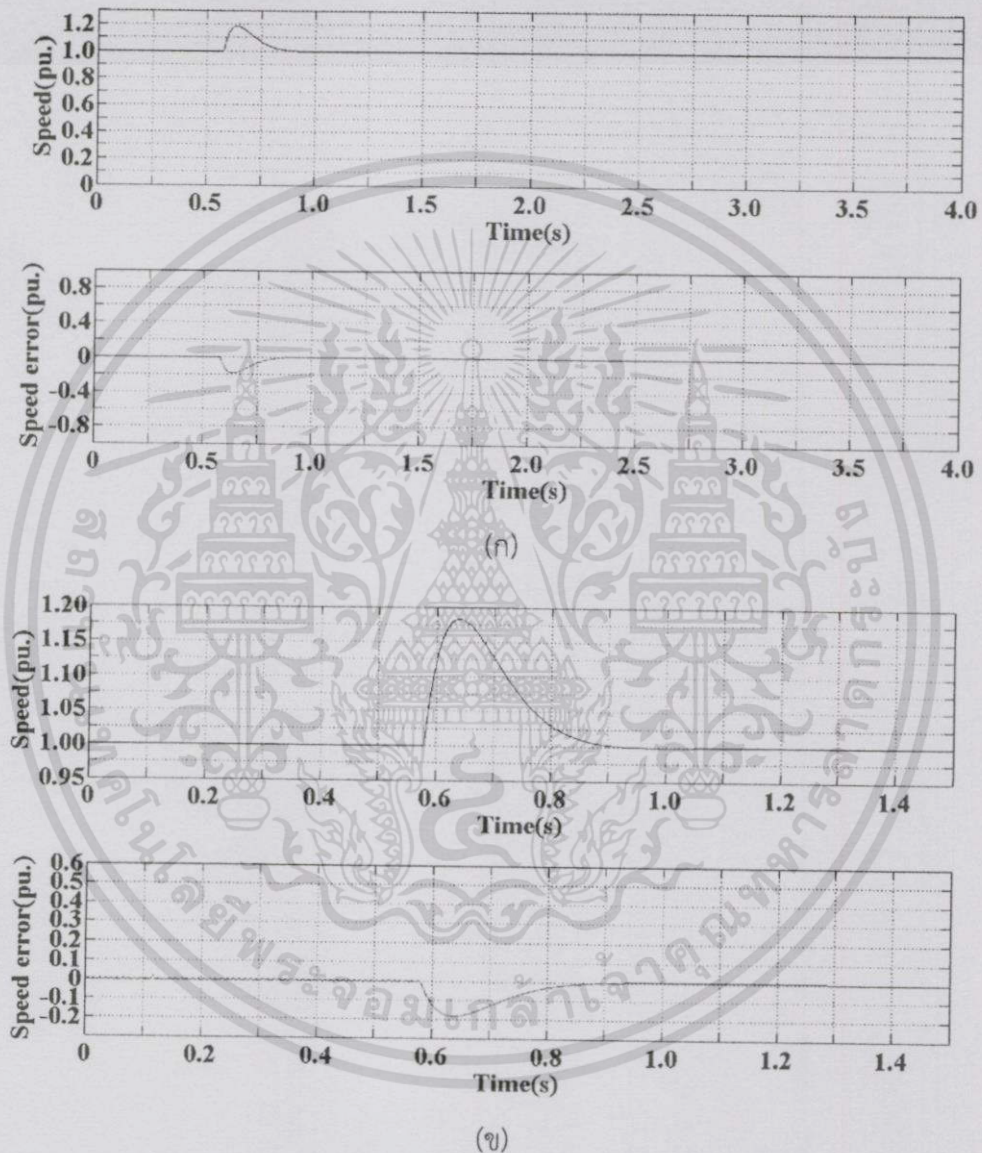
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 595.83 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

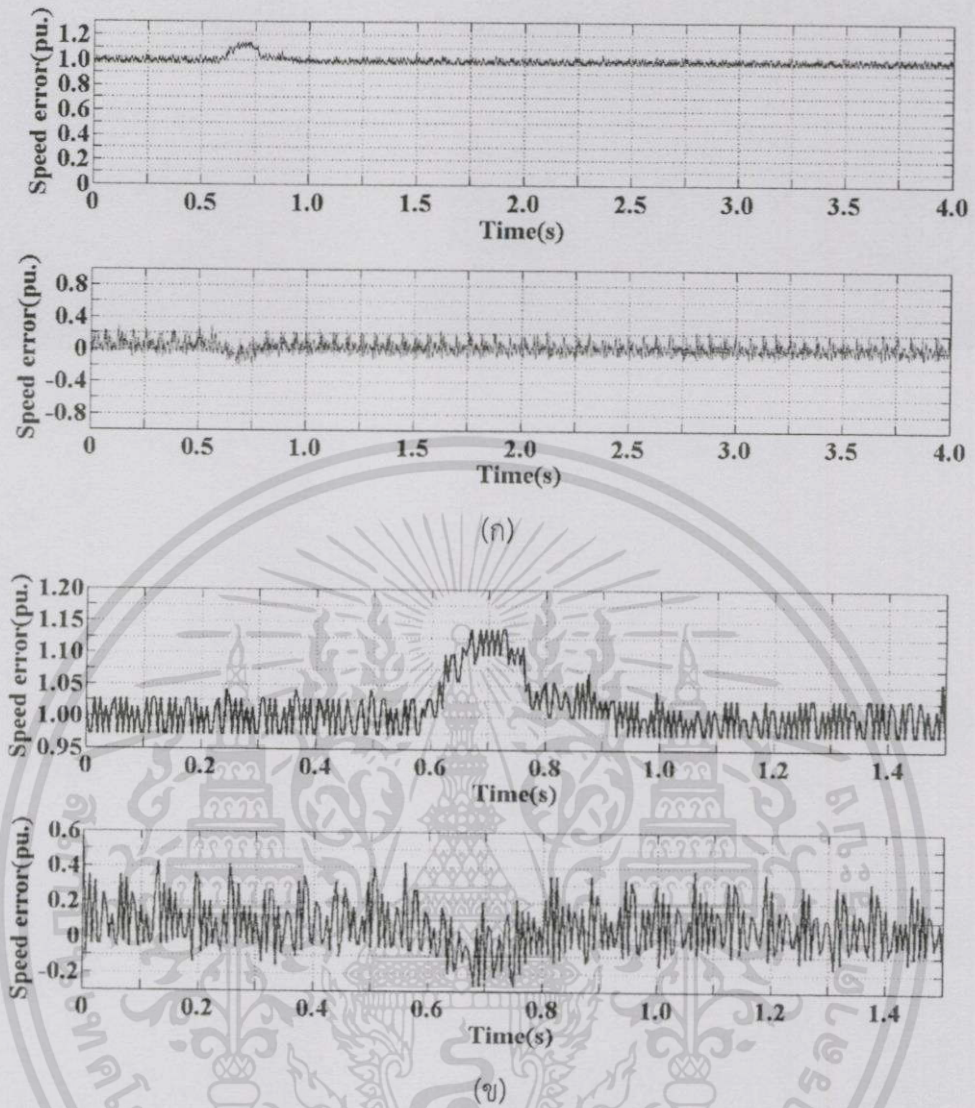
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีปลดภาระขนาด 784.84 วัตต์จะส่งผลให้ผลตอบสนองสภาวะชั่วครู่ของความเร็วยิ่งเพิ่มขึ้นเป็น 1.13 pu. หรือ 1695 rpm จากนั้นระบบจะทำการควบคุมความเร็วรอบให้เข้าสู่สภาวะคงตัวที่ความเร็วรอบ 1 pu. หรือ 1500 rpm ซึ่งผลตอบสนองความเร็วรอบจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.22 และ 4.23



รูปที่ 4.22 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 784.84 วัตต์ (ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

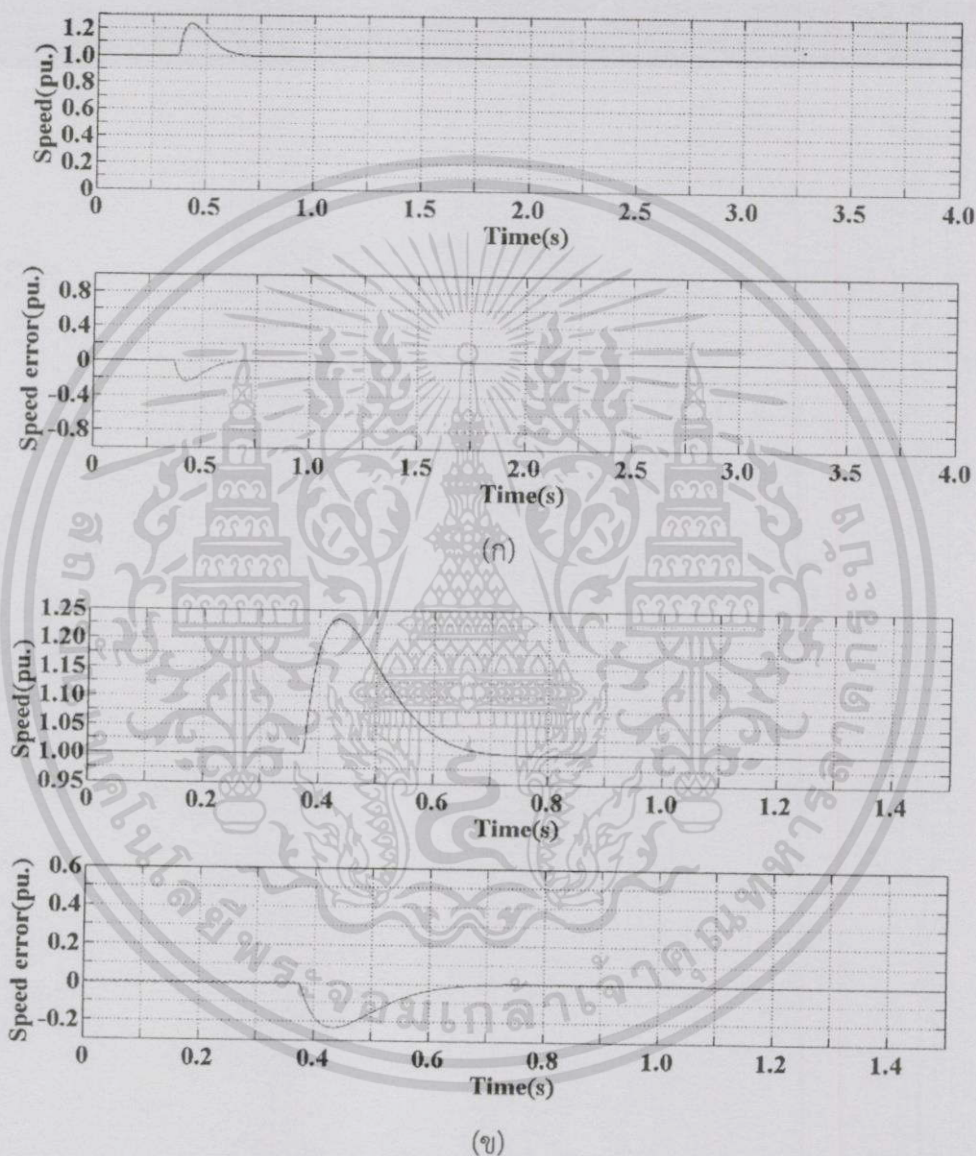
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 784.84 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

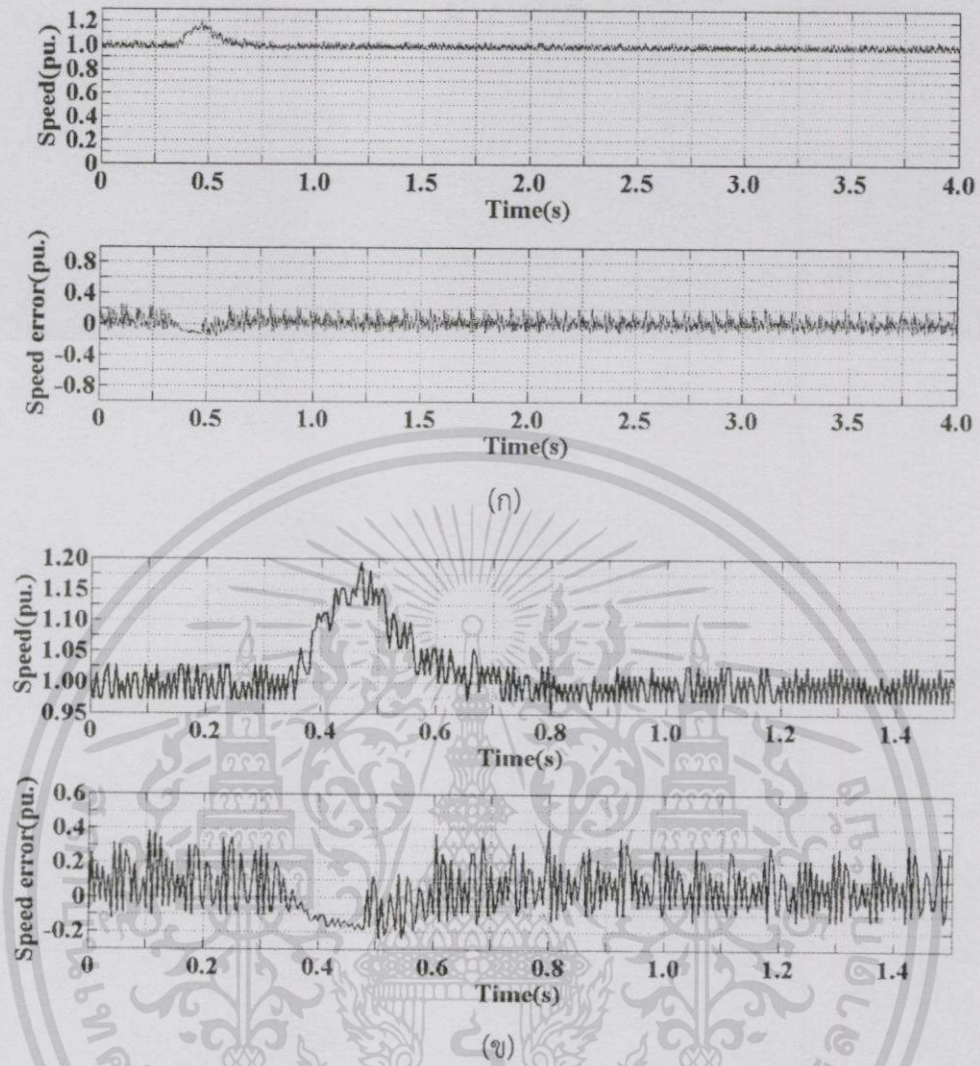
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีปลดภาระขนาด 1006.46 วัตต์จะส่งผลให้ผลตอบสนองสภาวะชั่วคราวของความเร็วยกขึ้นเป็น 1.15 pu. หรือ 1725 rpm จากนั้นระบบจะทำการควบคุมความเร็วรอบให้เข้าสู่สภาวะคงตัวที่ความเร็วรอบ 1 pu. หรือ 1500 rpm ซึ่งผลตอบสนองความเร็วรอบจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.24 และ 4.25



รูปที่ 4.24 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 1006.46 วัตต์ (ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



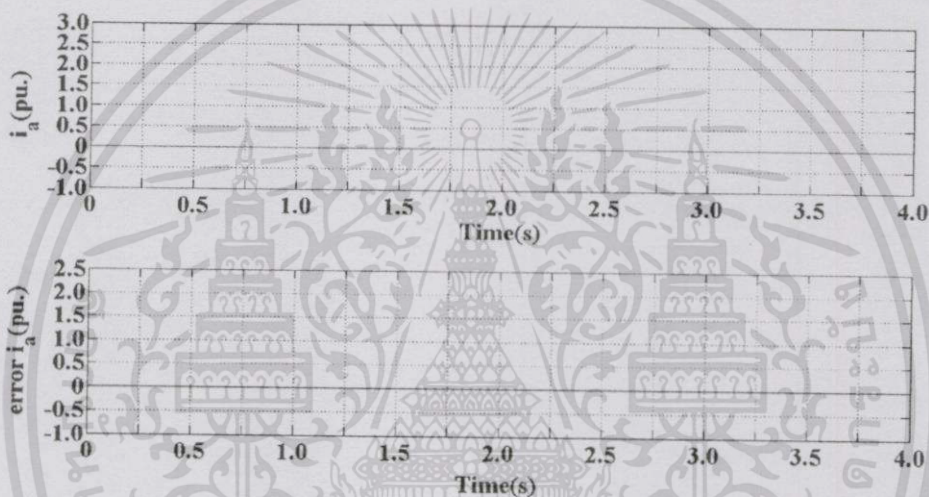
รูปที่ 4.25 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 1006.46 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

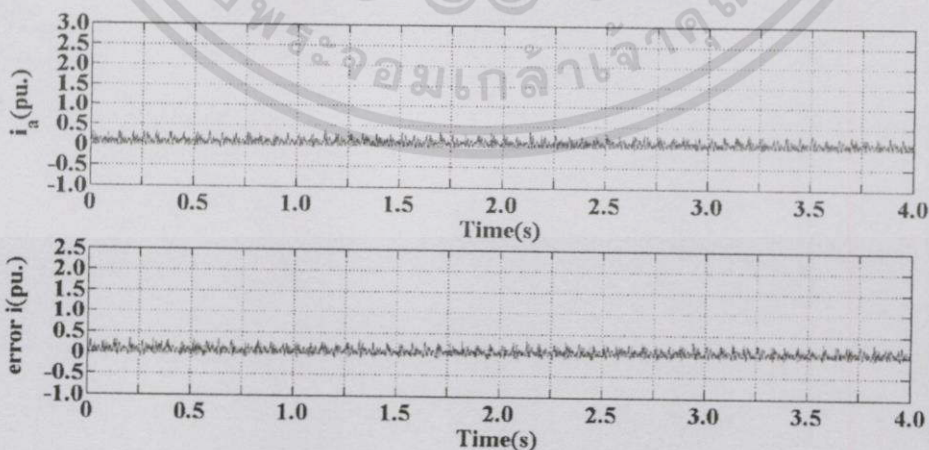
#### 4.4 การทดลองกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ผลตอบสนองของกระแสอาร์มาเจอร์ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของภาระนั้นมีแนวโน้มคือเมื่อภาระเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กระแสมีค่าสูงขึ้นโดยในการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองชั่วครู่และผลตอบสนองสภาวะคงตัวของกระแสอาร์มาเจอร์ขณะที่มีการเพิ่มและลดภาระที่ค่าต่างๆ

ในการทดลองกรณีไร้ภาระเมื่อระบบเข้าสู่การควบคุมแบบวงปิดพบว่ากระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าคงที่ 0.1 pu. หรือ 0.45 A ค่าความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงซึ่งคำนวณมาจากการควบคุมแบบพีโอวงนอกกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่า 0 pu. หรือ 0 A ซึ่งผลตอบสนองกระแสอาร์มาเจอร์จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.26 และ 4.27



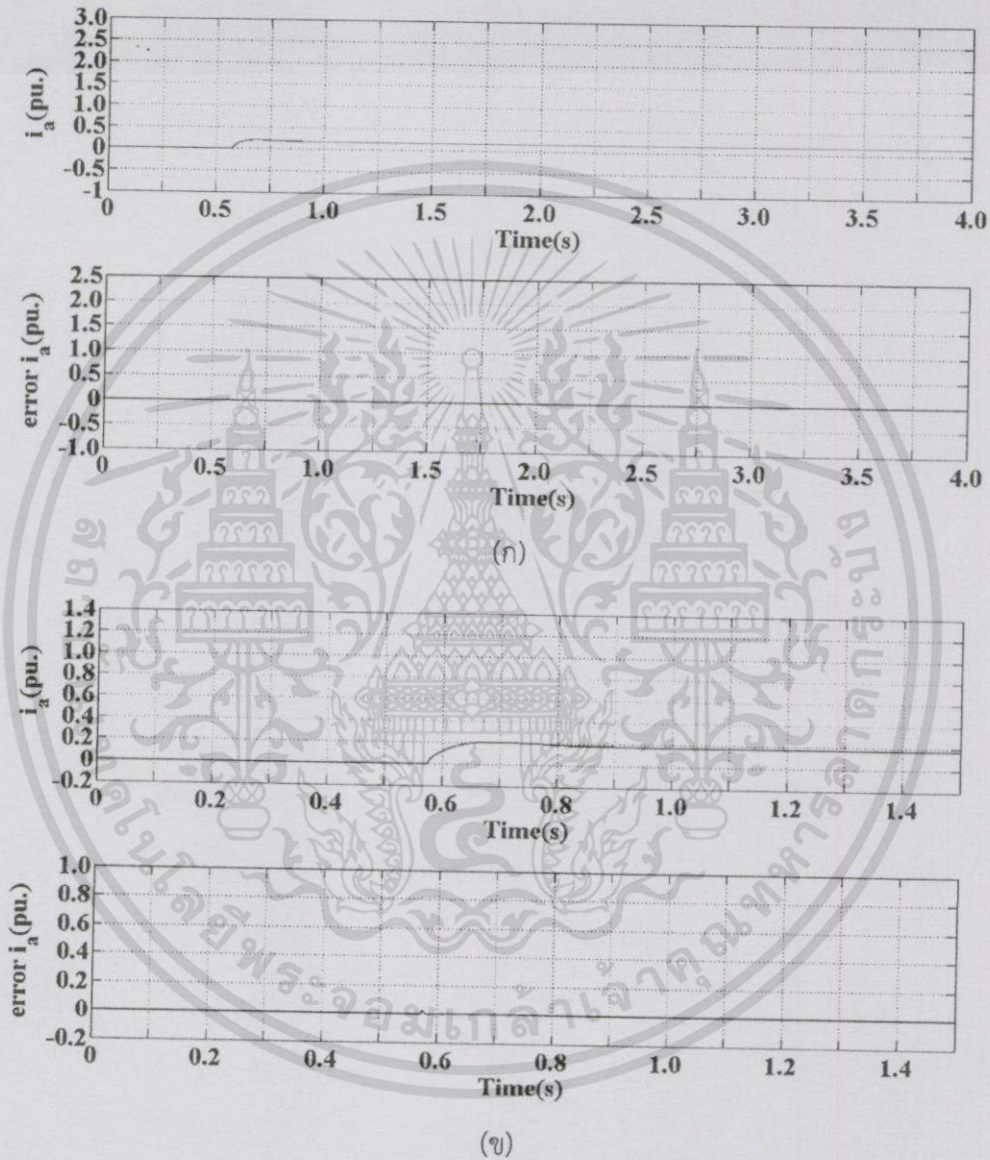
รูปที่ 4.26 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะไร้ภาระ



รูปที่ 4.27 ผลการทดลองแสดงกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะไร้ภาระ

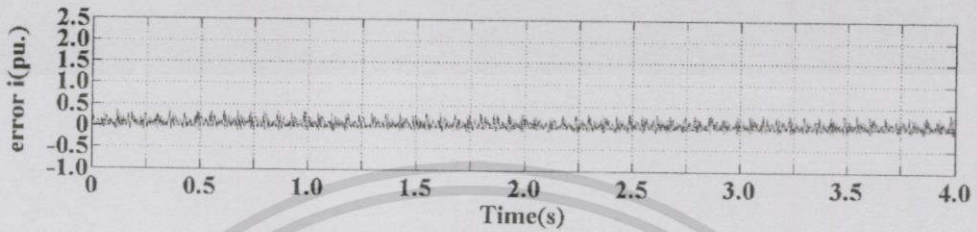
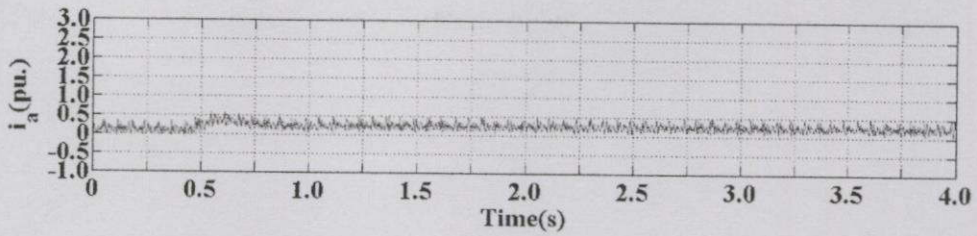
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการเพิ่มภาระขนาด 179.23 วัตต์ ผลตอบสนองสถานะชั่วครู่ของกระแสอาร์มาเจอร์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.1 pu. หรือ 0.45 A และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่า 0.28 pu. หรือ 1.28 A ซึ่งผลตอบสนองกระแสอาร์มาเจอร์จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.28 และ 4.29

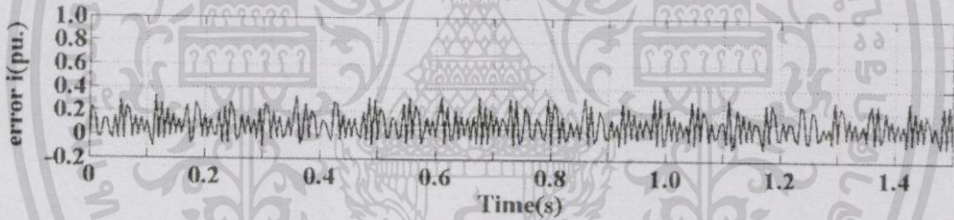
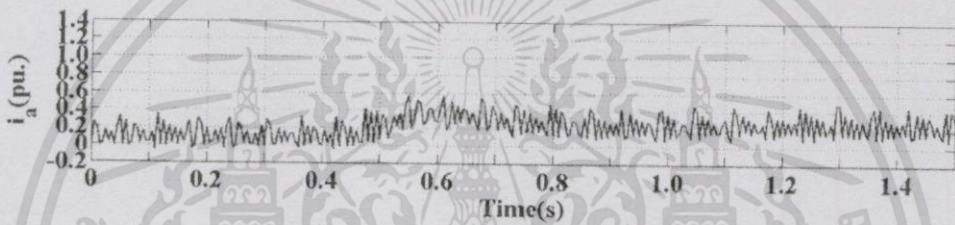


รูปที่ 4.28 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 179.23 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

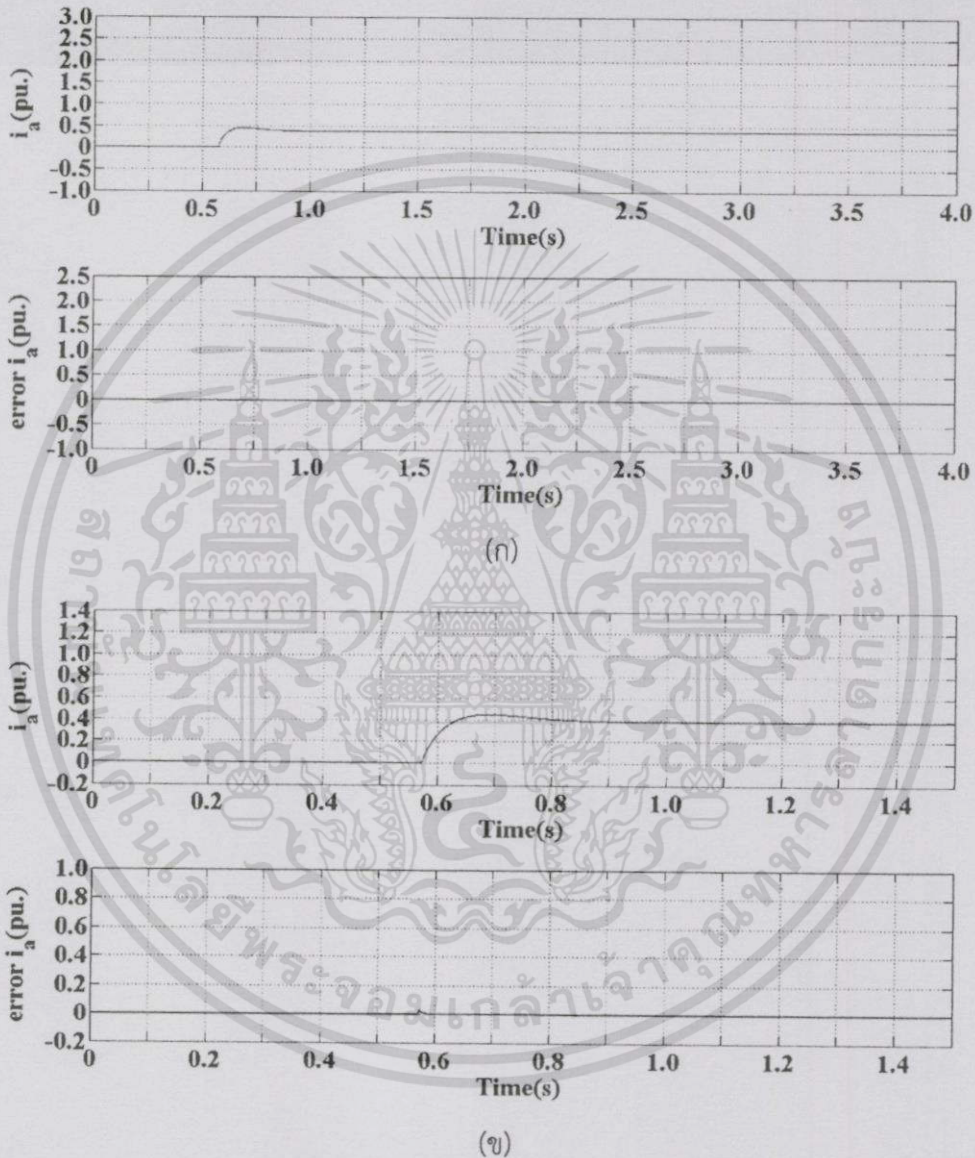


(ข)

รูปที่ 4.29 ผลการทดลองแสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์  
อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 179.23 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

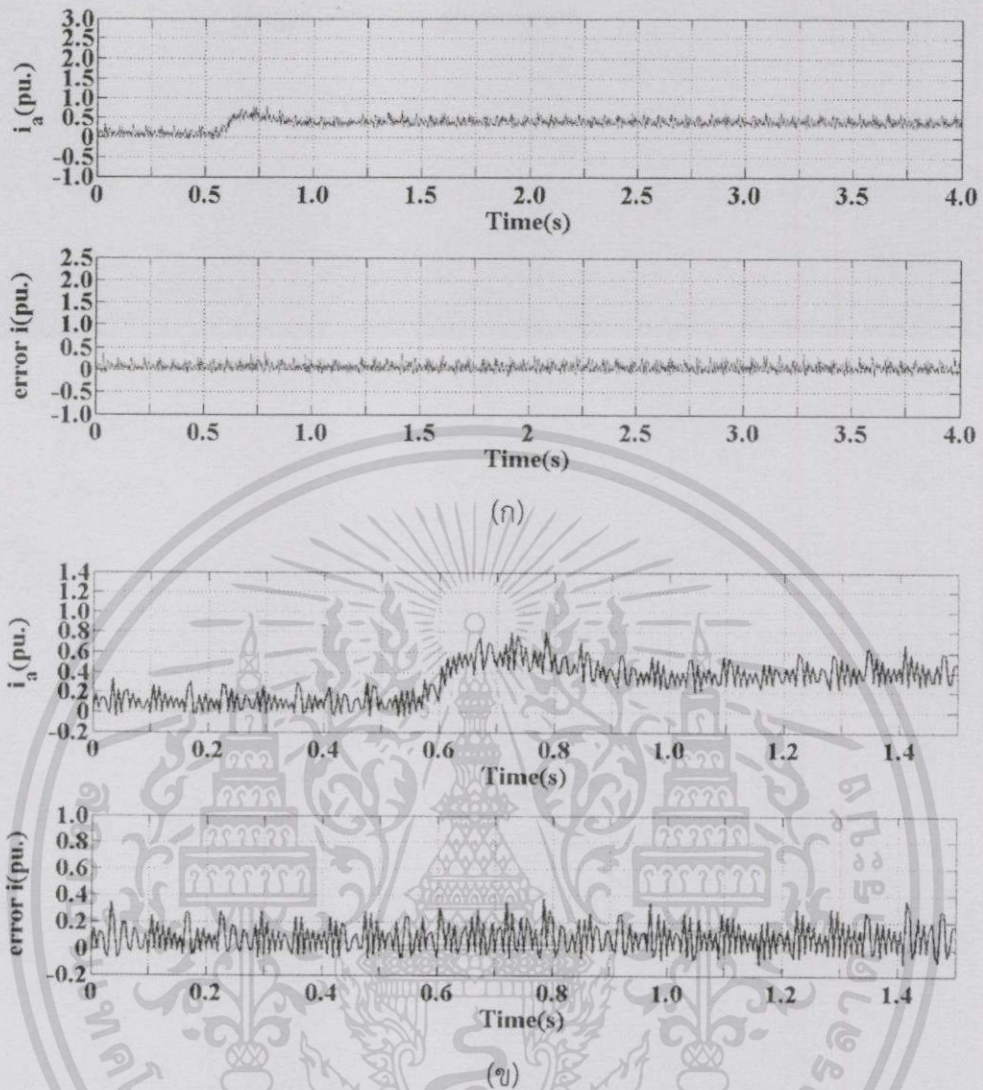
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีเพิ่มภาระขนาด 387.98 วัตต์ ผลตอบสนองสภาวะชั่วครู่ของกระแสอาร์มาเจอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.1 pu. หรือ 0.45 A และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่า 0.44 pu. หรือ 1.98 A ซึ่งผลตอบสนองกระแสอาร์มาเจอร์จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.30 และ 4.31



รูปที่ 4.30 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 387.98 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

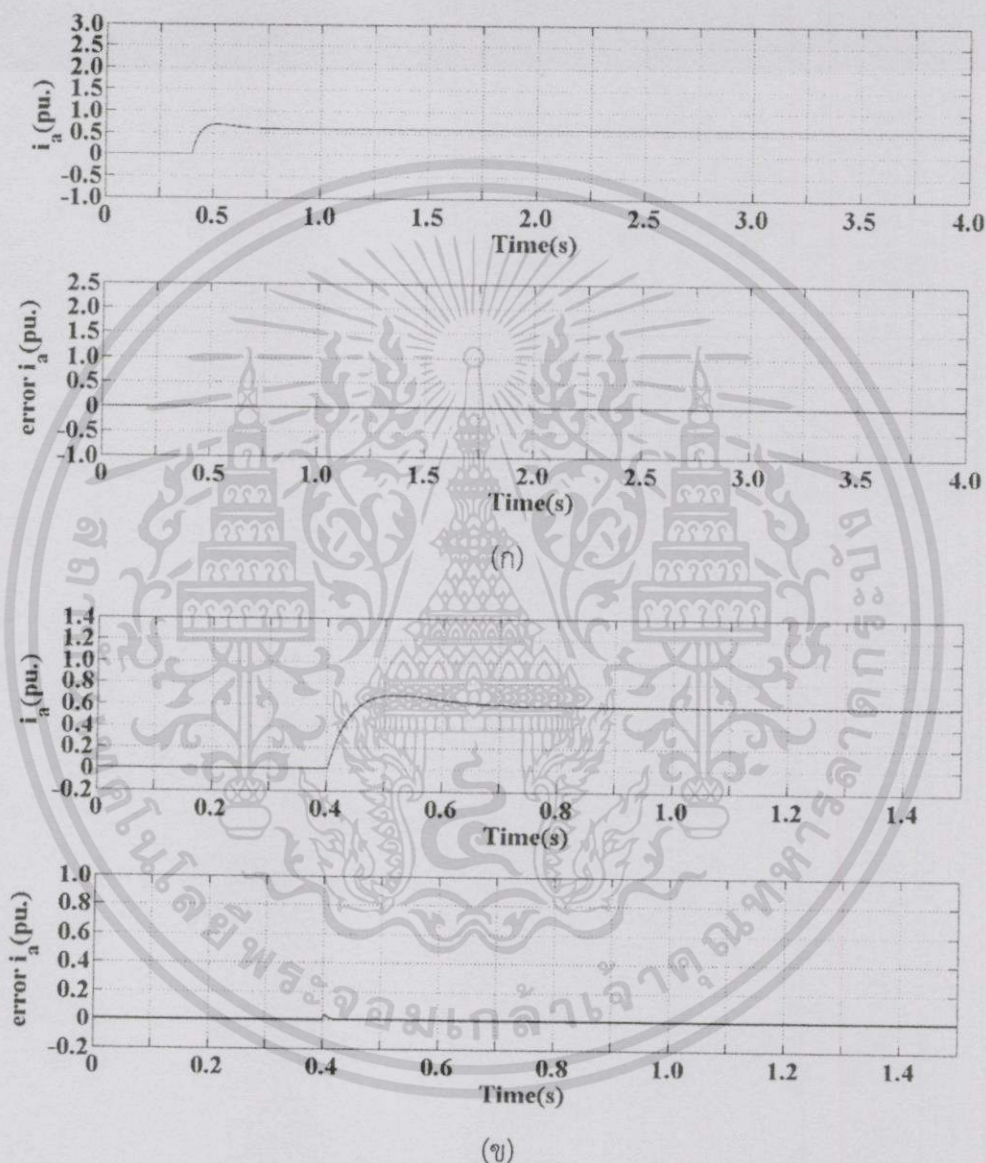
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 ผลการทดลองแสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์  
อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 387.98 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

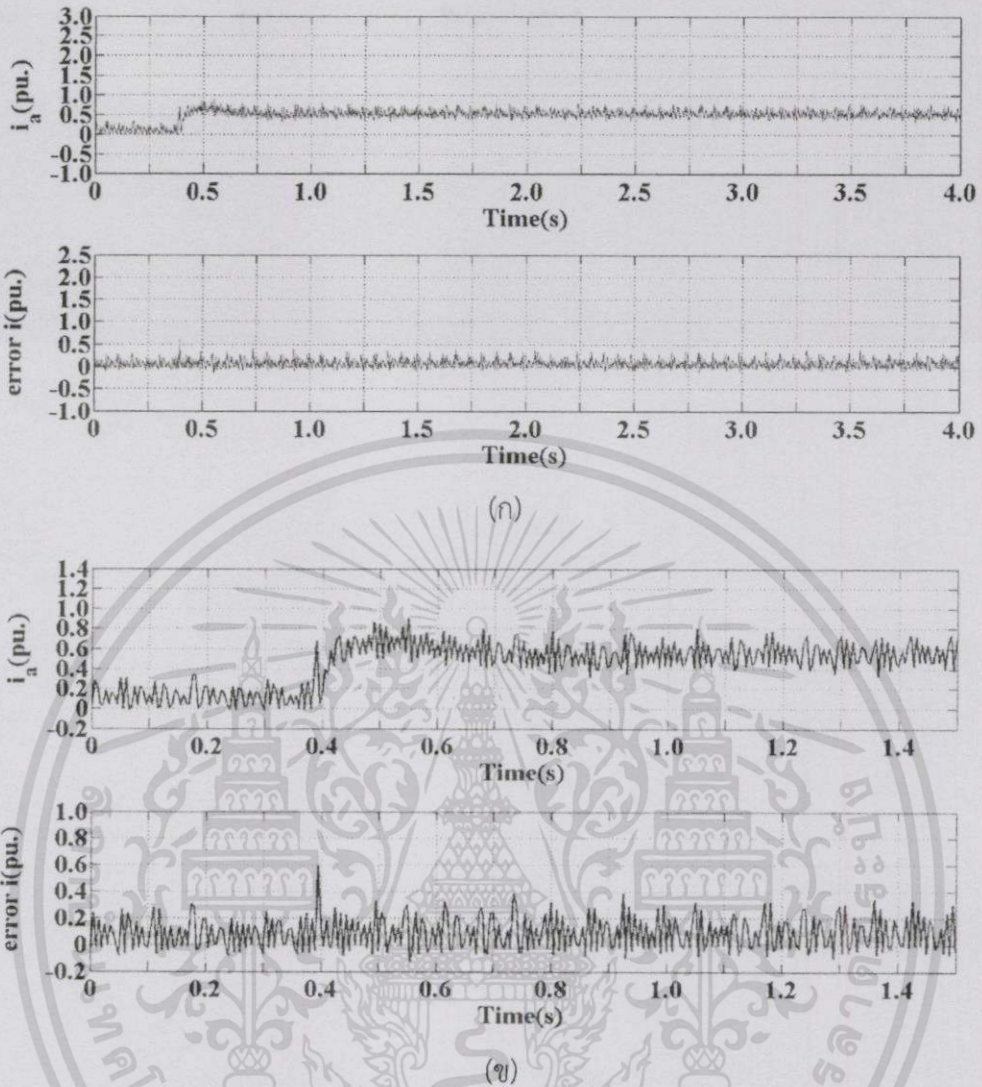
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีเพิ่มภาระขนาด 595.83 วัตต์ ผลตอบสนองสถานะชั่วครู่ของกระแสอาร์มาเจอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.1 pu. หรือ 0.45 A และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่า 0.62 pu. หรือ 2.82 A ซึ่งผลตอบสนองกระแสอาร์มาเจอร์จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.32 และ 4.33



รูปที่ 4.32 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 595.83 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

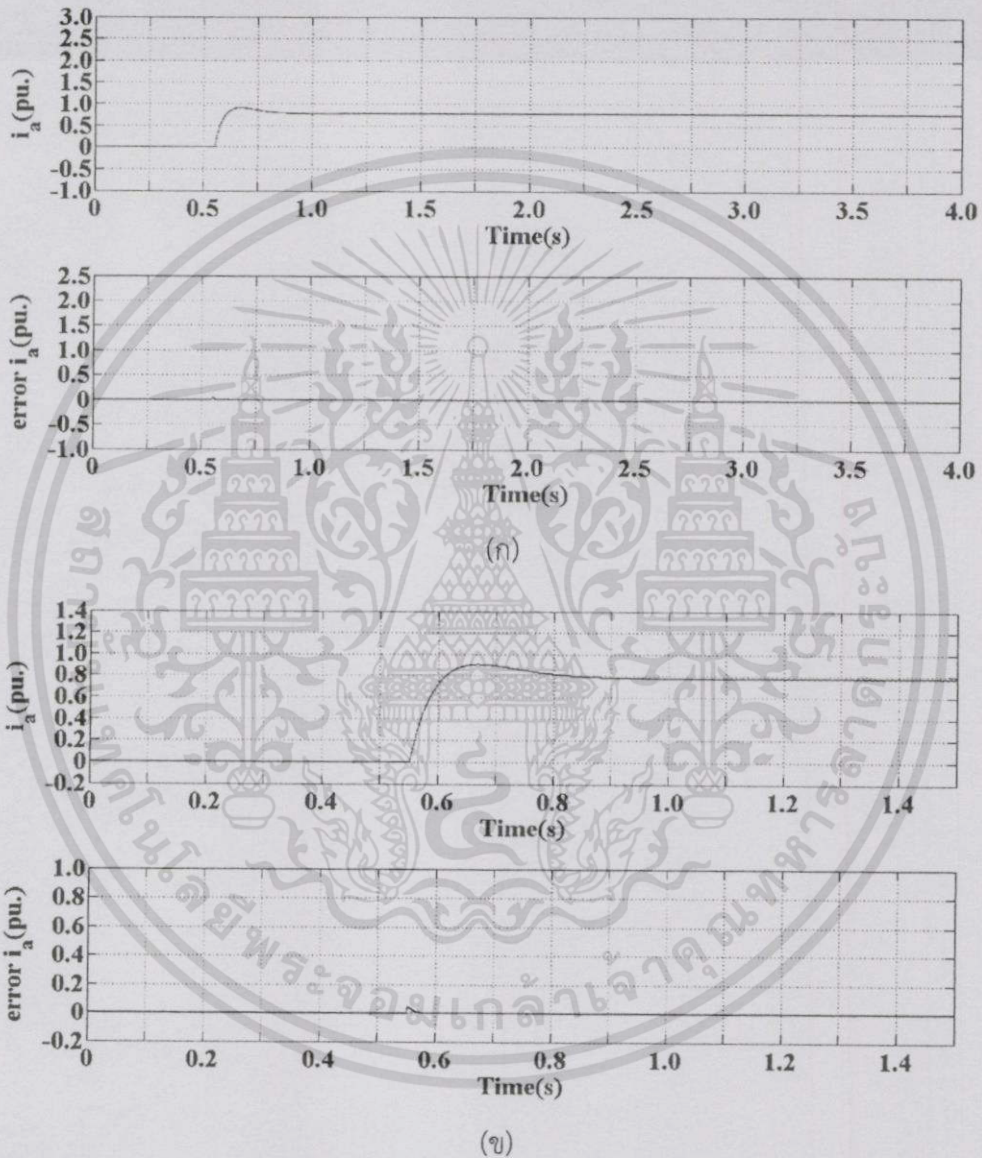
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



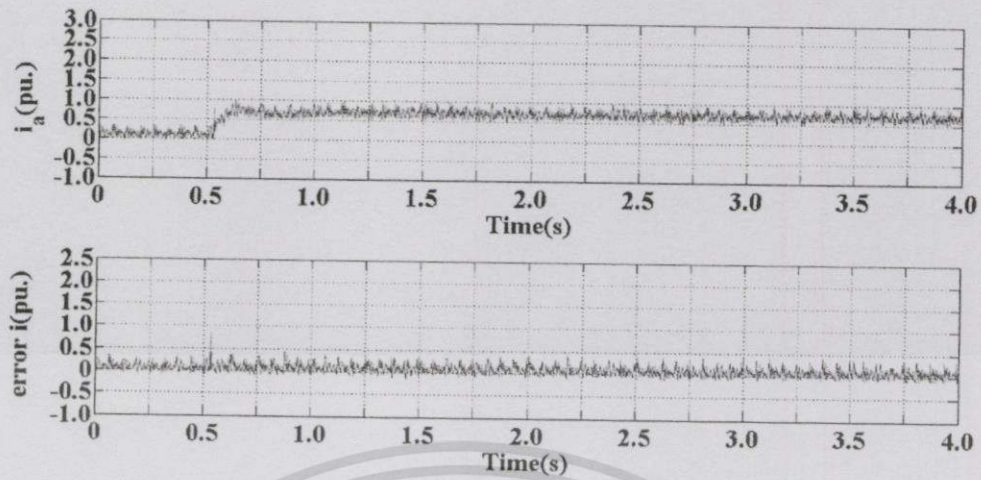
รูปที่ 4.33 ผลการทดลองแสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์  
อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 595.83 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

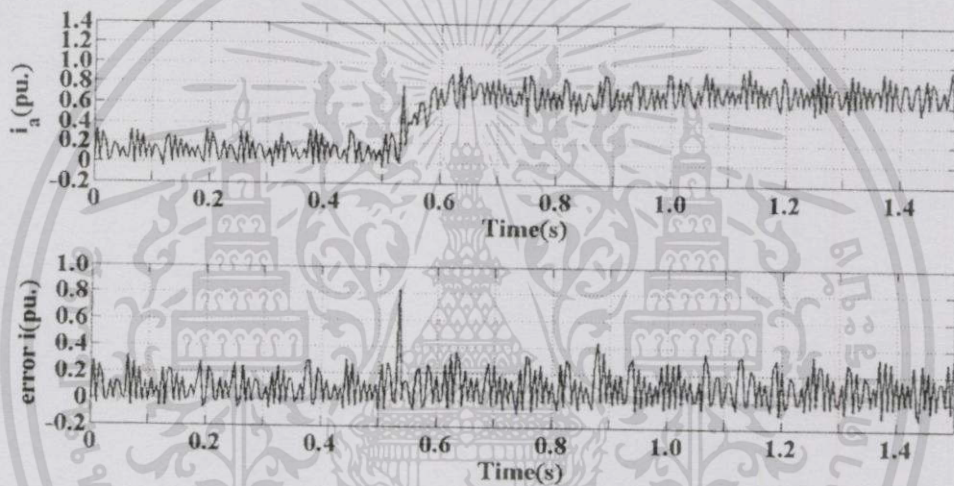
ในกรณีเพิ่มภาระขนาด 784.84 วัตต์ ผลตอบสนองสถานะชั่วครู่ของกระแสอาร์มาเจอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.1 pu. หรือ 0.45 A และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่า 0.8 pu. หรือ 3.6 A ซึ่งผลตอบสนองกระแสอาร์มาเจอร์จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.34 และ 4.35



รูปที่ 4.34 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 784.84 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง



(ก)

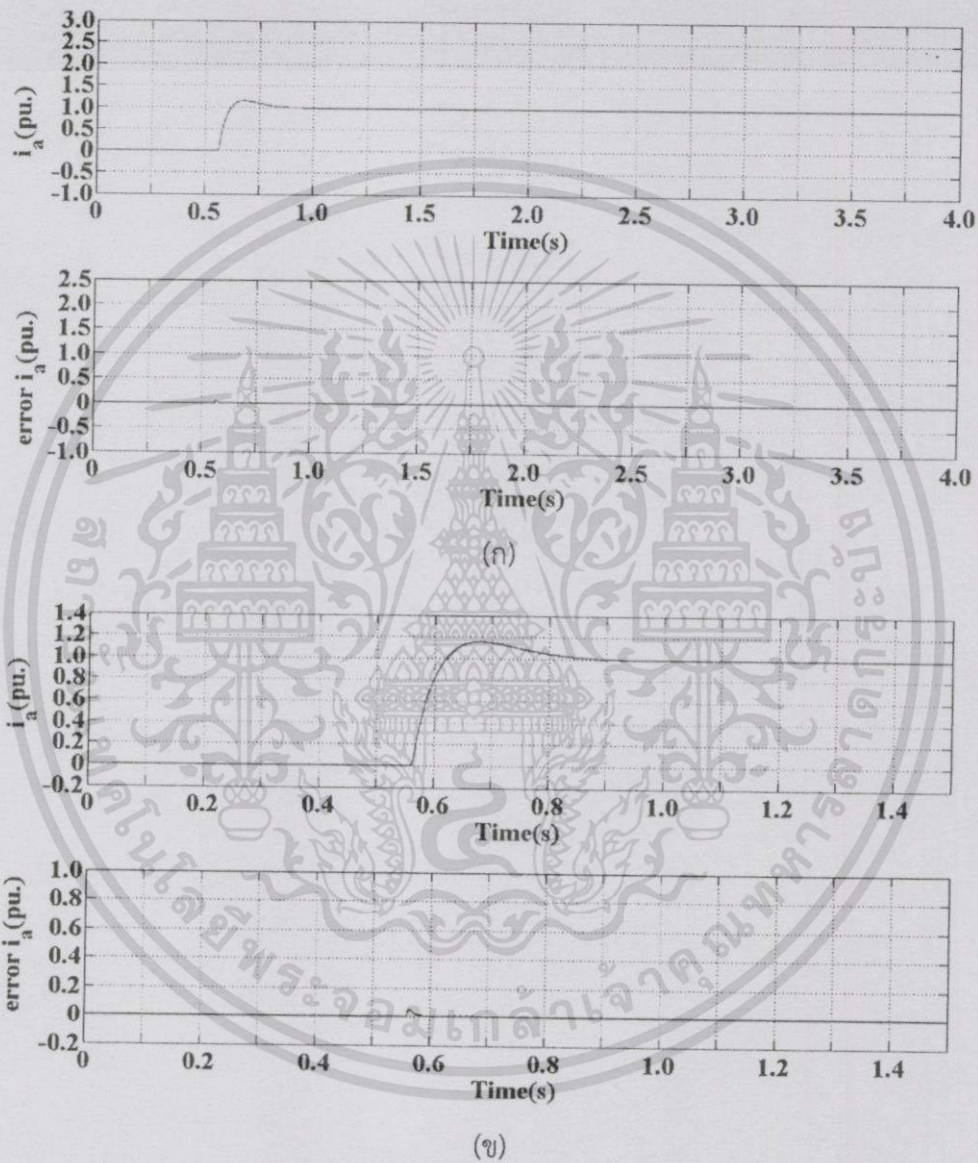


(ข)

รูปที่ 4.35 ผลการทดลองแสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์  
อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 784.84 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

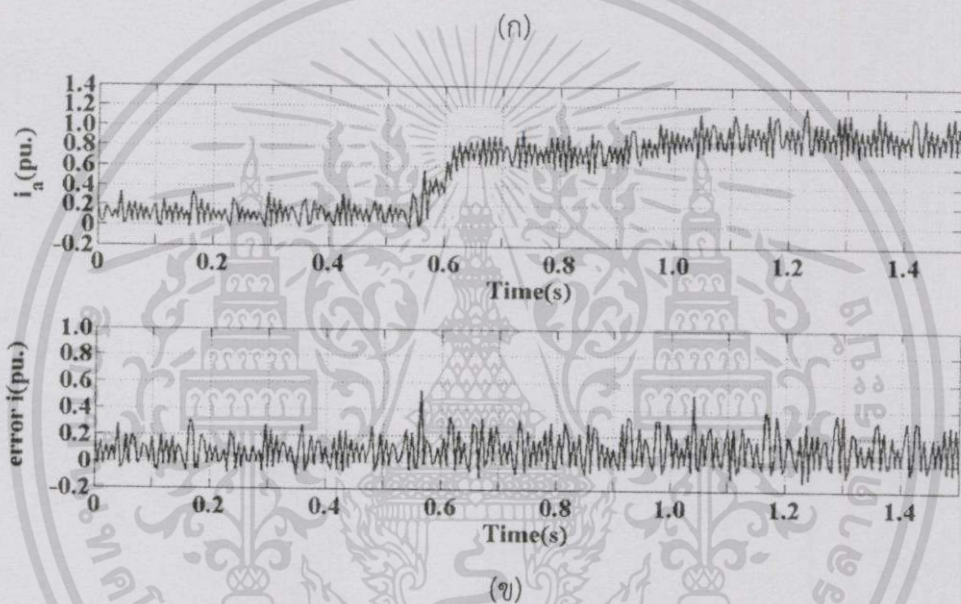
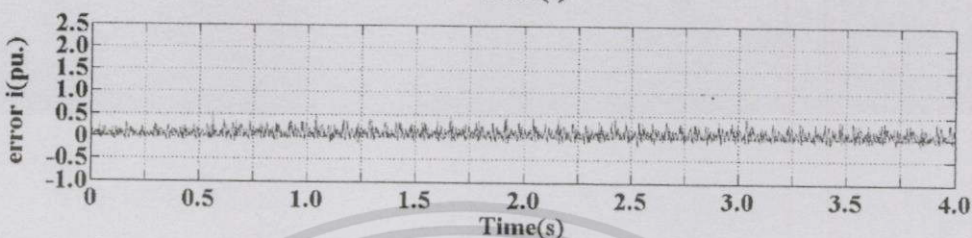
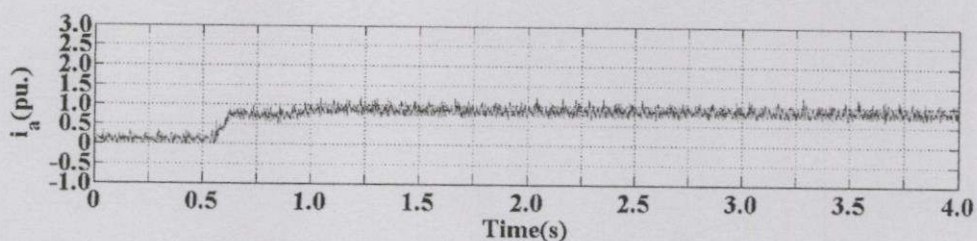
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีเพิ่มภาระขนาด 1006.46 วัตต์ ผลตอบสนองสภาวะชั่วครู่ของกระแสอาร์มาเจอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.1 pu. หรือ 0.45 A และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่า 1.01 pu. หรือ 4.56 A ซึ่งผลตอบสนองกระแสอาร์มาเจอร์จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.36 และ 4.37



รูปที่ 4.36 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 1006.46 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

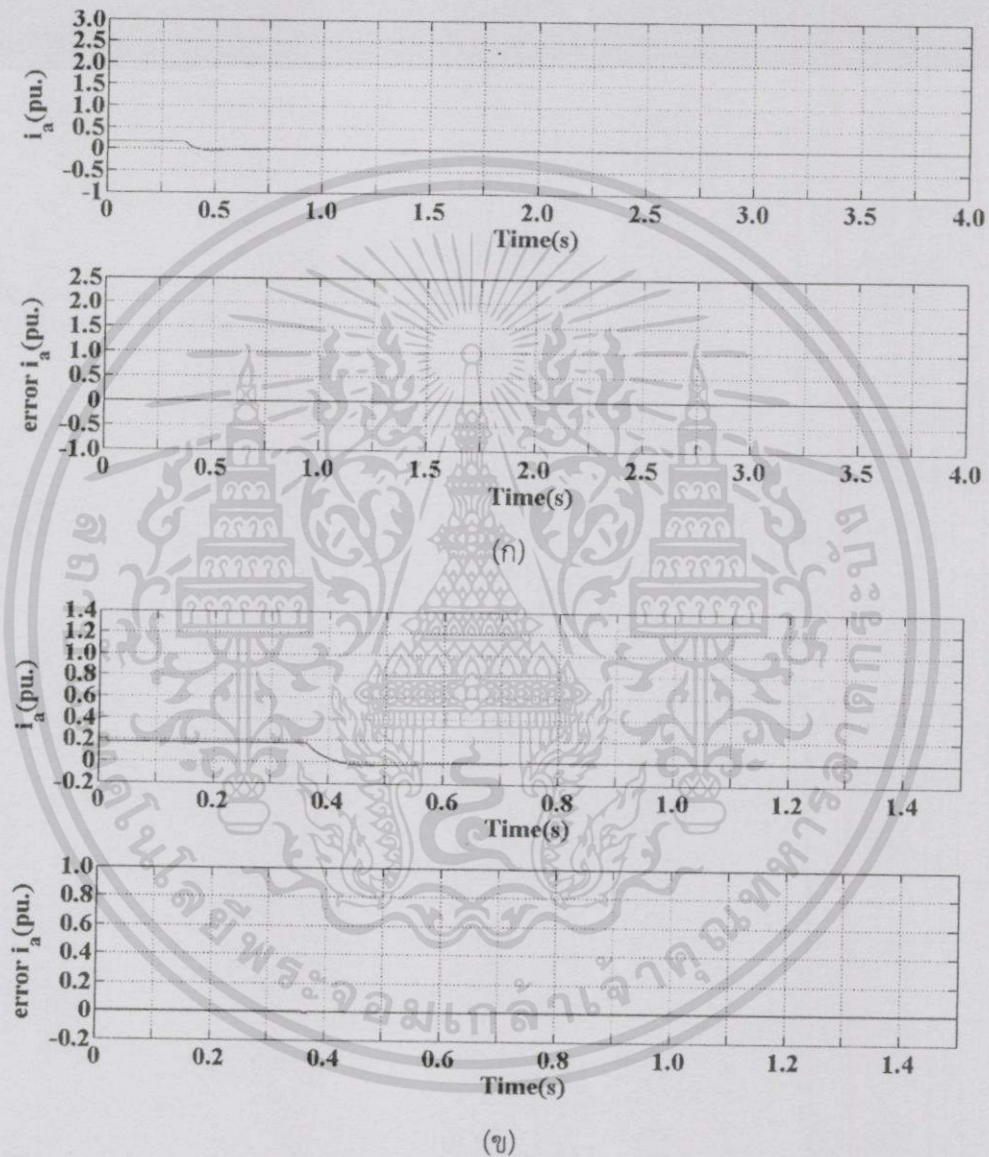
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 ผลการทดลองแสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์  
อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 1006.46 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

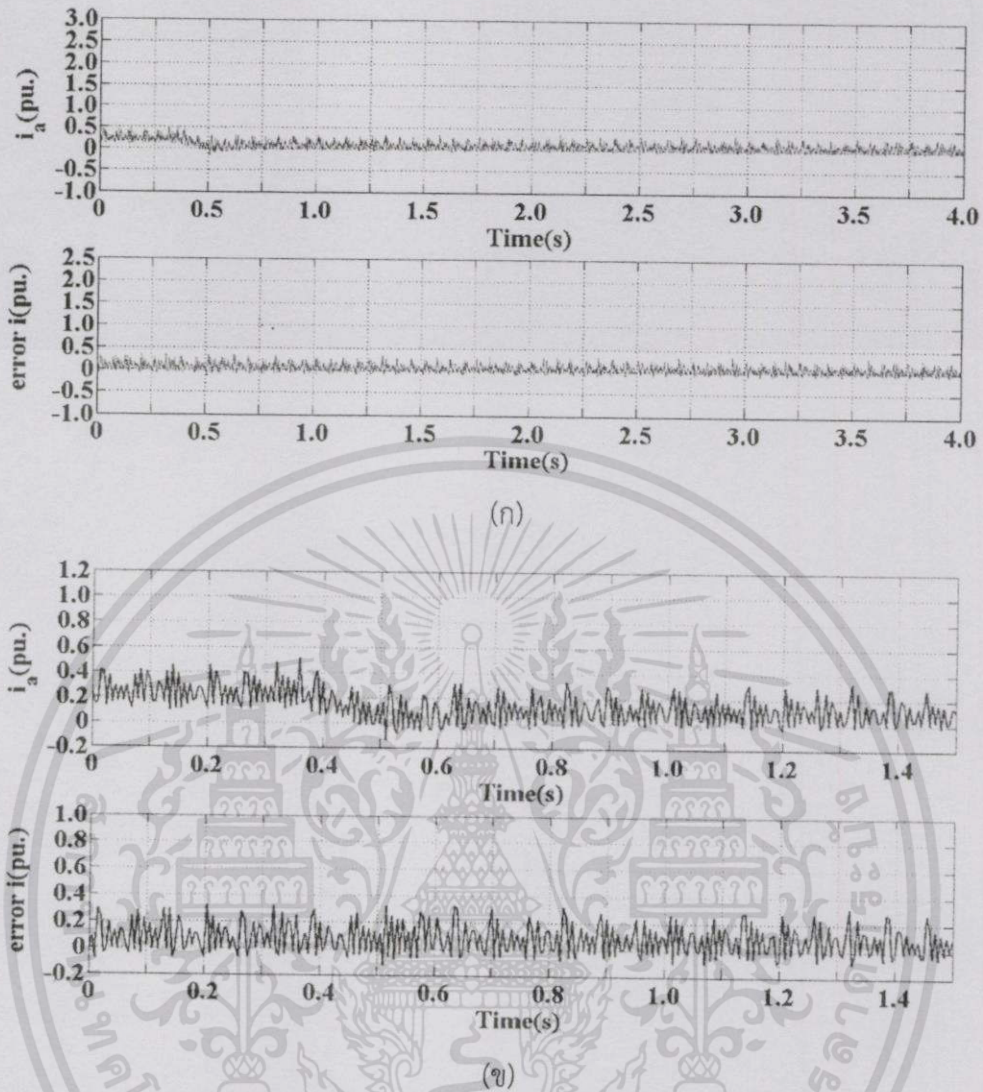
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการปลดภาระขนาด 179.23 วัตต์ ผลตอบสนองสถานะชั่วครู่ของกระแสอาร์มาเจอร์จะมีค่าลดลงจาก 0.28 pu. หรือ 1.28 A และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่า 0.1 pu. หรือ 0.45 A ซึ่งผลตอบสนองกระแสอาร์มาเจอร์จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.38 และ 4.39



รูปที่ 4.38 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 179.23 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

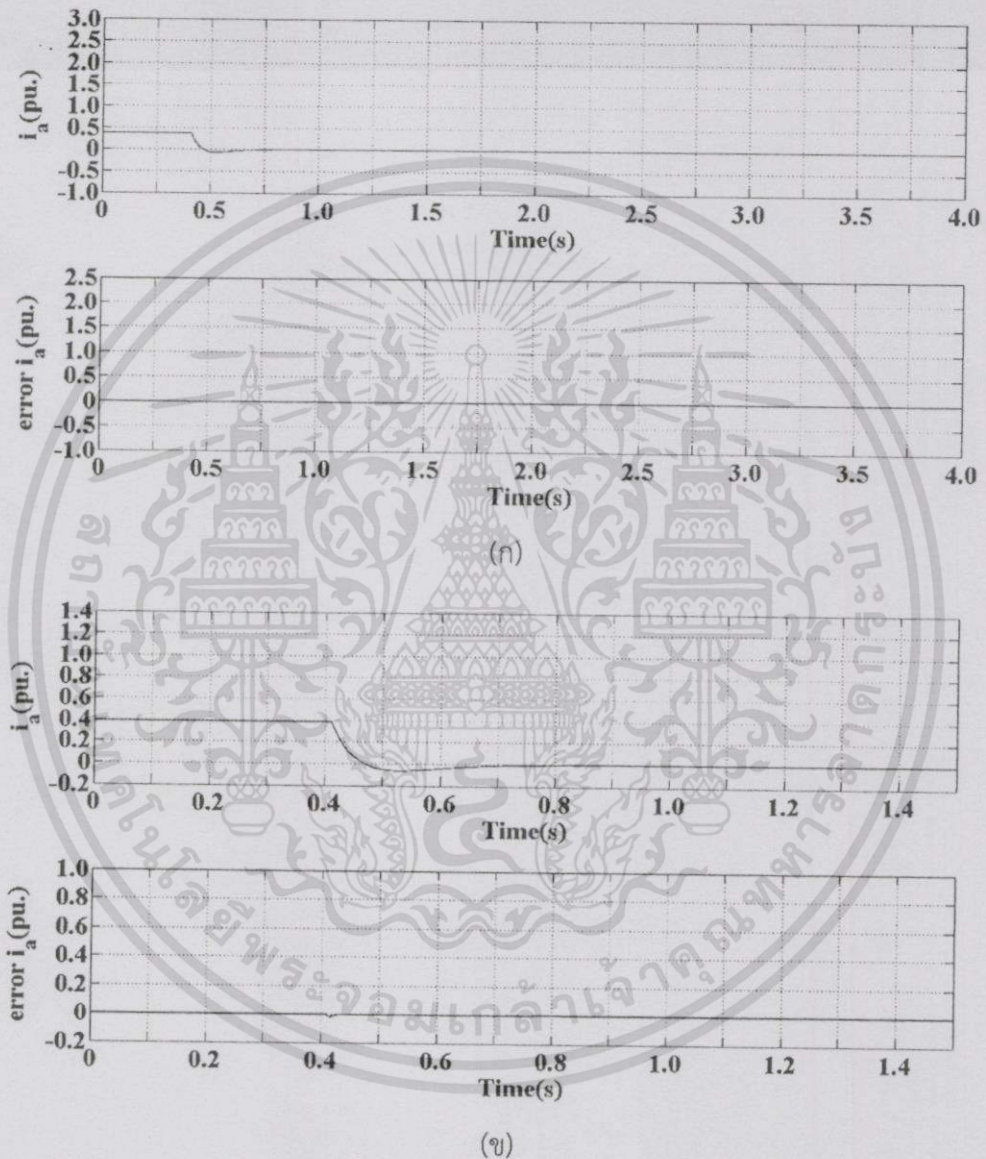
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



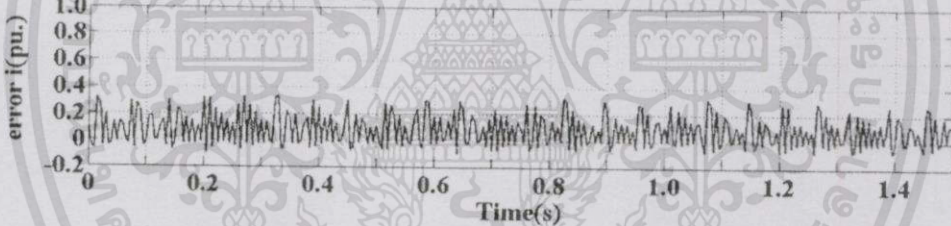
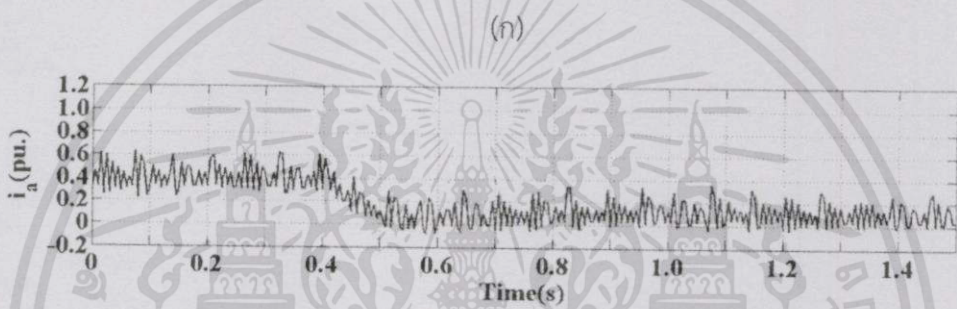
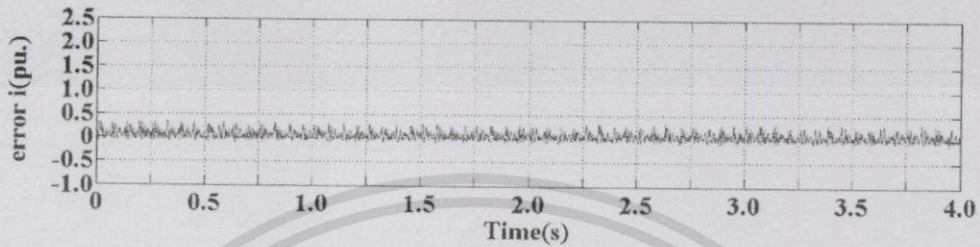
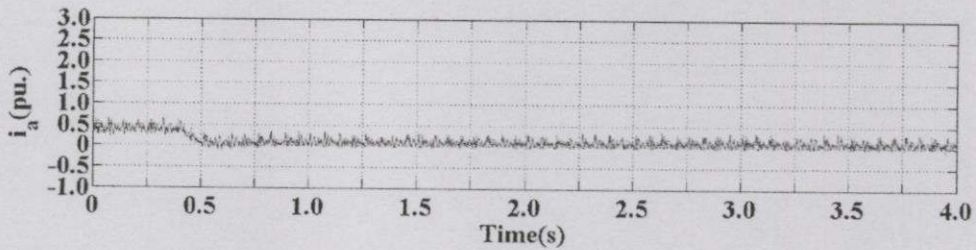
รูปที่ 4.39 ผลการทดลองแสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์  
อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 179.23 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีปลดภาระขนาด 387.98 วัตต์ ผลตอบสนองของสภาวะชั่วครู่ของกระแสอาร์มาเจอร์จะมีค่าลดลงจาก 0.44 pu. หรือ 1.98 A และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่า 0.1 pu. หรือ 0.45 A ซึ่งผลตอบสนองของกระแสอาร์มาเจอร์จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.40 และ 4.41



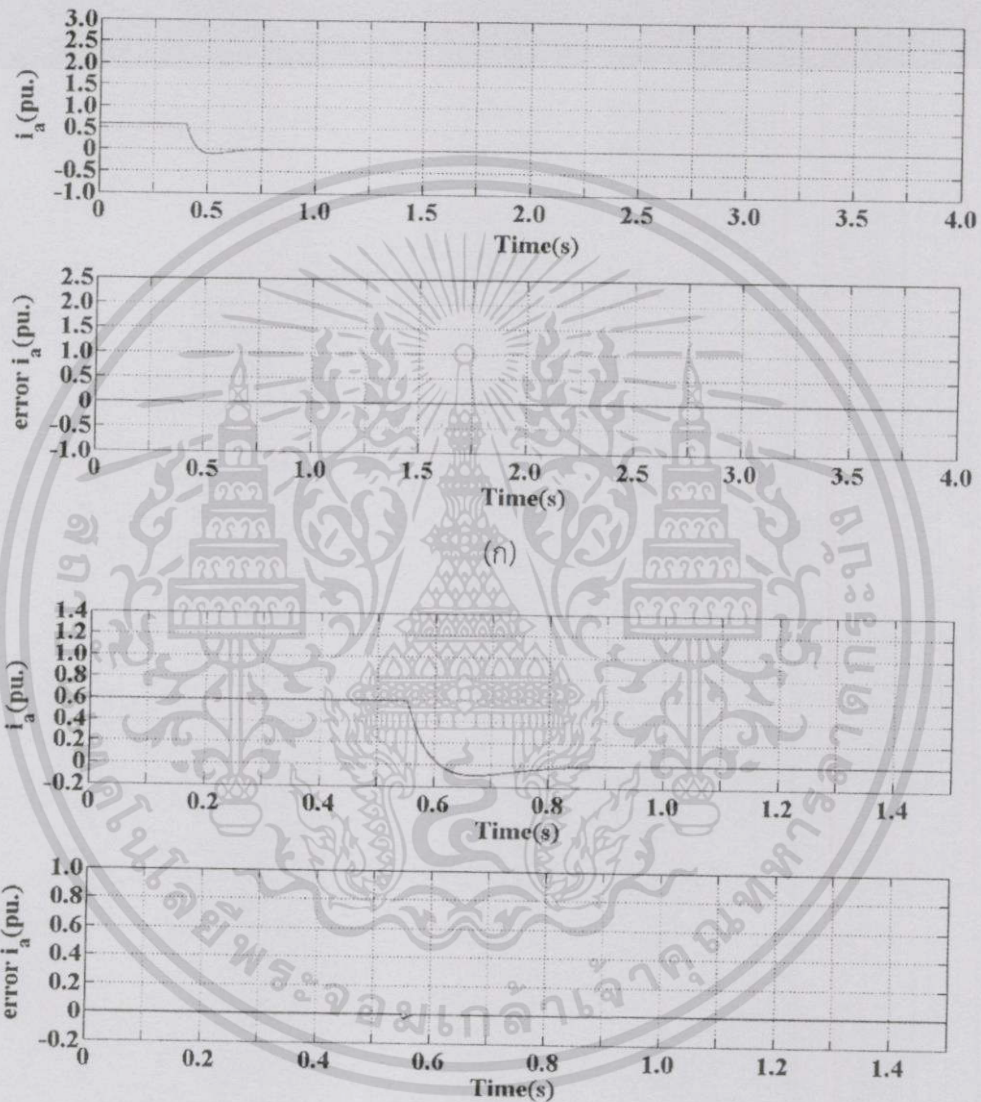
รูปที่ 4.40 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 387.98 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง



รูปที่ 4.41 ผลการทดลองแสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์  
อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 387.98 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

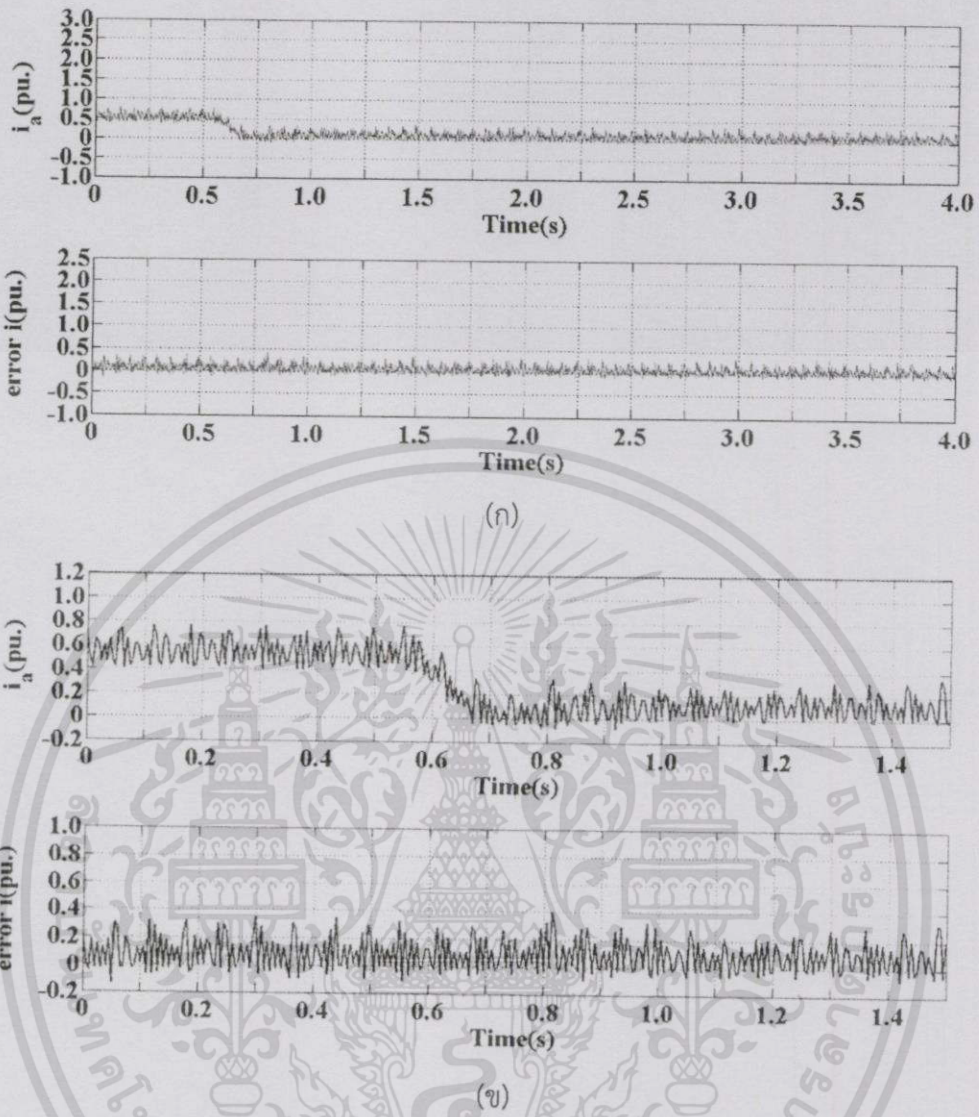
ในกรณีปลดภาระขนาด 595.83 วัตต์ ผลตอบสนองสถานะชั่วครู่ของกระแสอาร์มาเจอร์จะมีค่าลดลงจาก 0.62 pu. หรือ 2.82 A และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่า 0.1 pu. หรือ 0.45 A ซึ่งผลตอบสนองกระแสอาร์มาเจอร์จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.42 และ 4.43



(ข)

รูปที่ 4.42 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 595.83 วัตต์

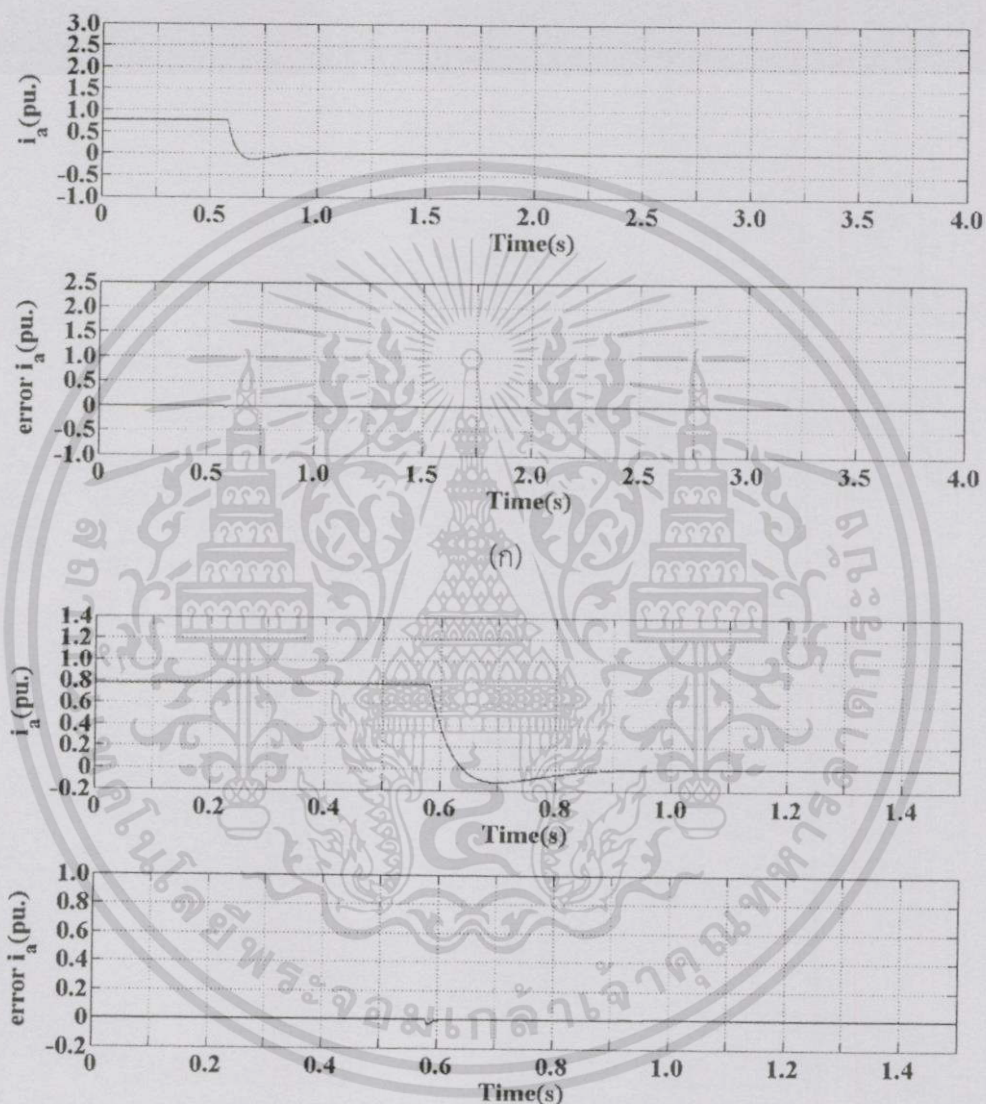
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง



รูปที่ 4.43 ผลการทดลองแสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์  
อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 595.83 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

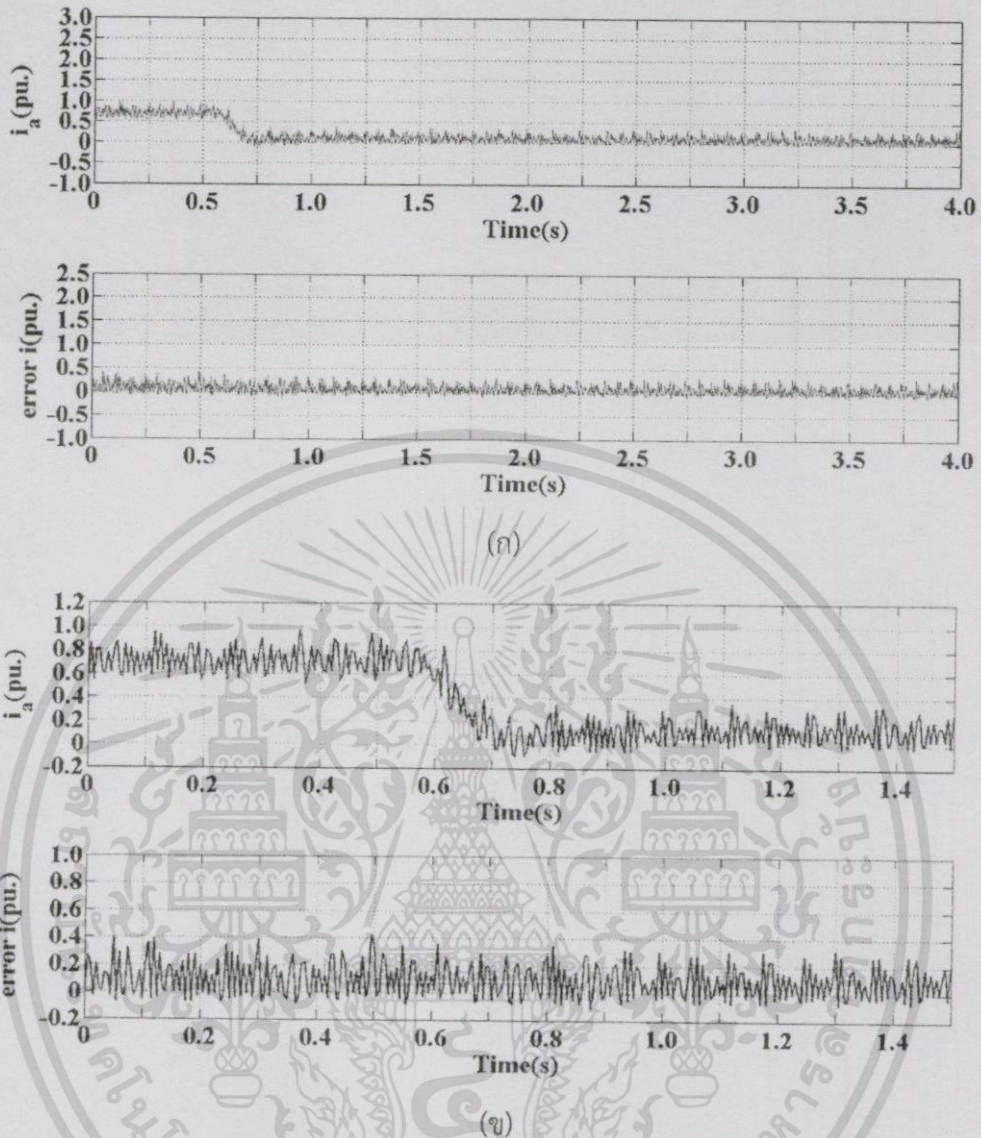
ในกรณีปลดภาระขนาด 784.84 วัตต์ ผลตอบสนองสถานะชั่วครู่ของกระแสอาร์มาเจอร์จะมีค่าลดลงจาก 0.8 pu. หรือ 3.6 A และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่า 0.1 pu. หรือ 0.45 A ซึ่งผลตอบสนองกระแสอาร์มาเจอร์จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.44 และ 4.45



(ข)

รูปที่ 4.44 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 784.84 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

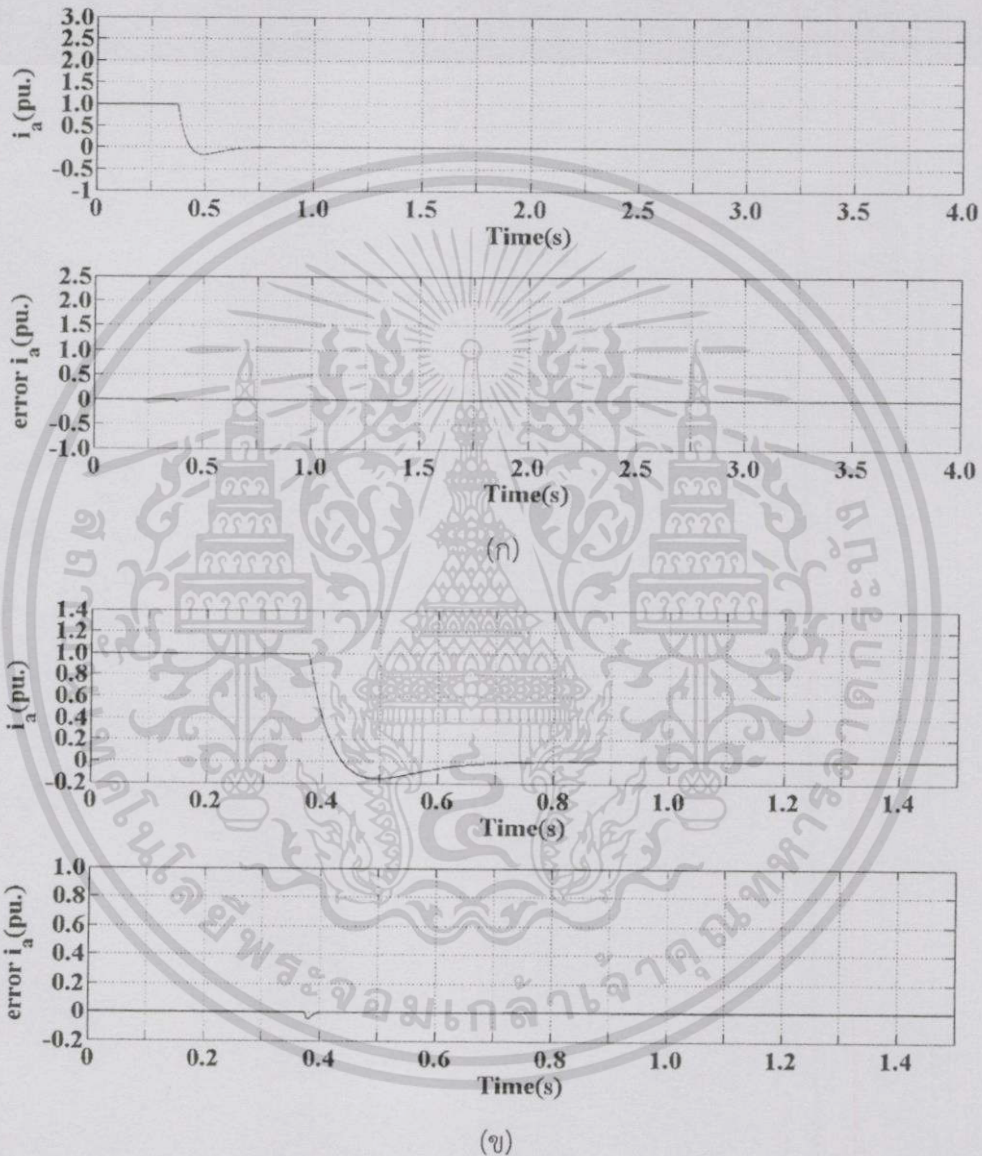
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.45 ผลการทดลองแสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์  
 อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 784.84 วัตต์  
 (ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

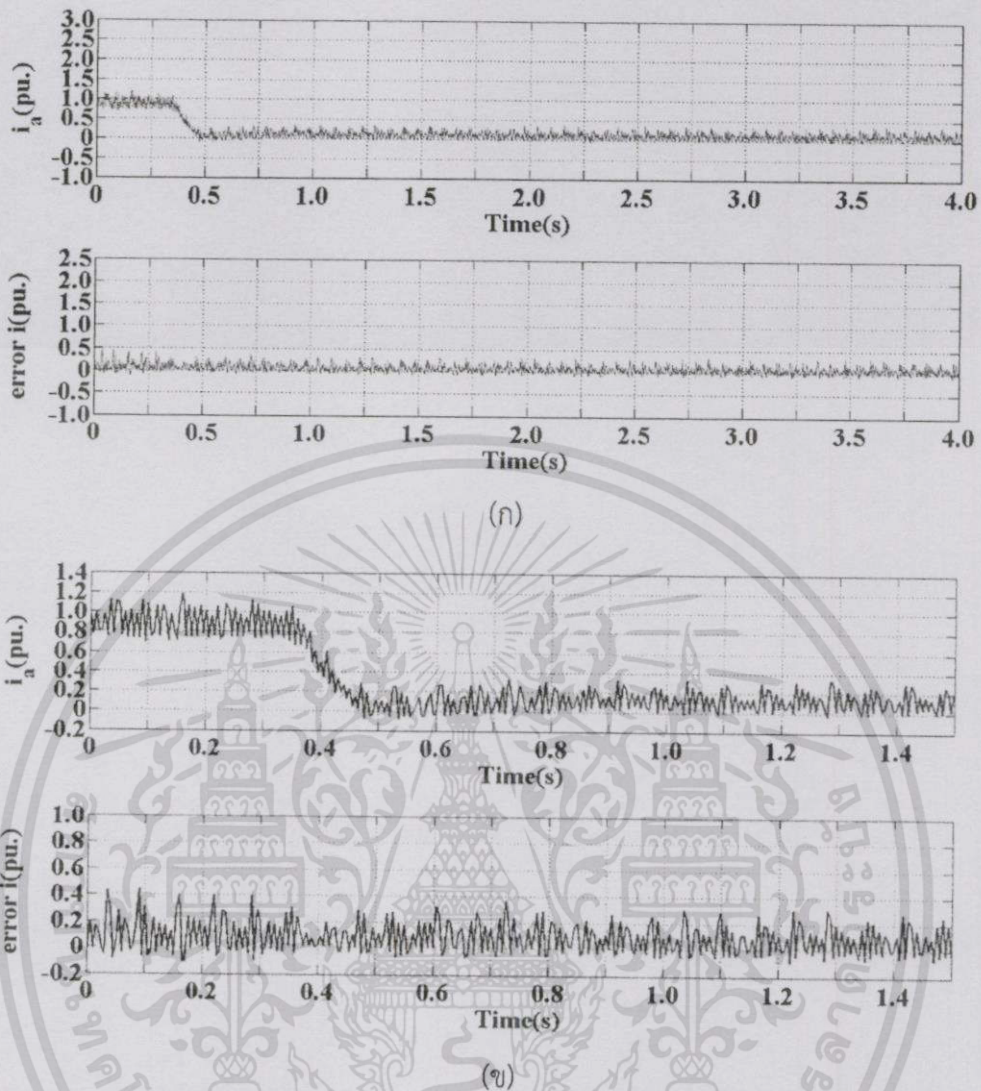
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีปลดภาระขนาด 1006.46 วัตต์ ผลตอบสนองสถานะชั่วครู่ของกระแสอาร์มาเจอร์จะมีค่าลดลงจาก 1.01 pu. หรือ 4.56 A และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่า 0.1 pu. หรือ 0.45 A ซึ่งผลตอบสนองกระแสอาร์มาเจอร์จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.46 และ 4.47



รูปที่ 4.46 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 1006.46 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



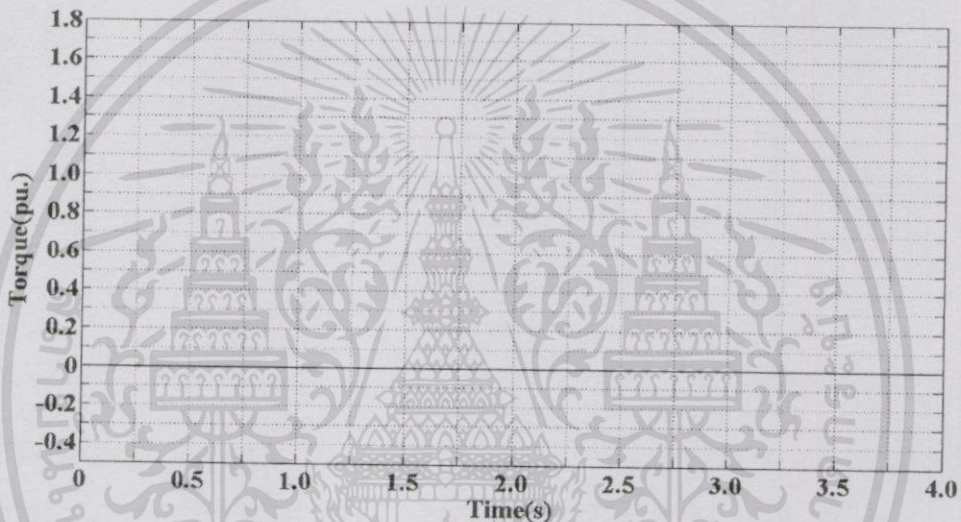
รูปที่ 4.47 ผลการทดลองแสดงกระแสอาร์มาเจอร์และความแตกต่างระหว่างกระแสอาร์มาเจอร์  
อ้างอิงกับกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 1006.46 วัตต์  
(ก) กราฟขนาดจริง (ข) กราฟขยายจากขนาดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

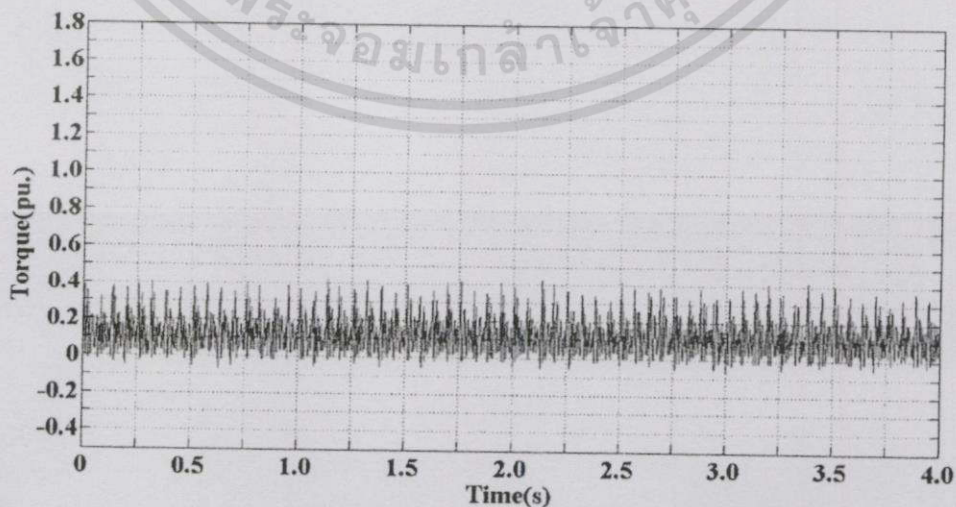
#### 4.5 การทดลองแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

แรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกระแสอาร์มาเจอร์ ซึ่งในการทดลองเพิ่มหรือลดภาระจะแสดงให้เห็นว่าเมื่อภาระเกิดการเปลี่ยนแปลง แรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเพื่อรักษาให้เท่ากับแรงบิดทางกลที่เปลี่ยนไปจึงทำให้ความเร็วมีค่าคงที่ได้

ในการทดลองกรณีไร้ภาระเมื่อระบบเข้าสู่การควบคุมแบบวงปิดพบว่าแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าคงที่ประมาณ 0.12 pu. หรือ 0.7649 Nm ซึ่งผลตอบสนองแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.48 และ 4.49



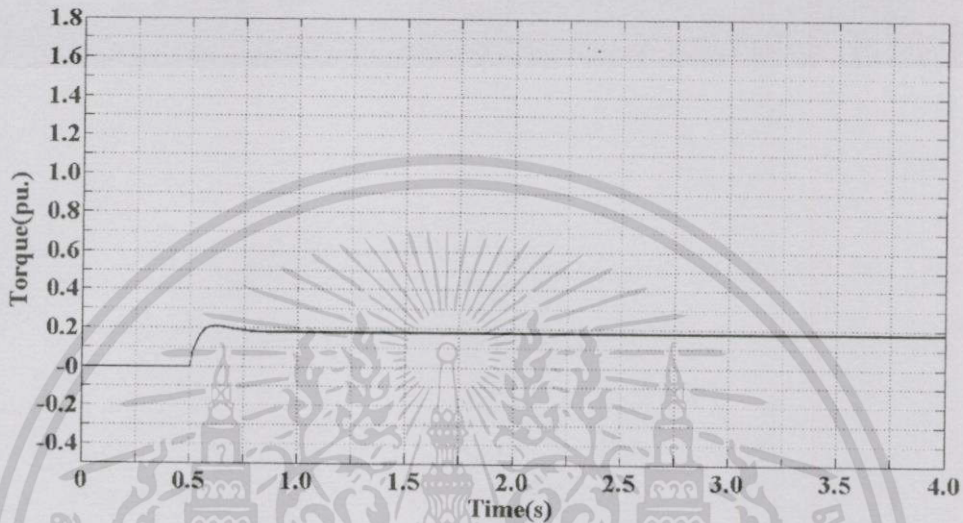
รูปที่ 4.48 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะไร้ภาระ



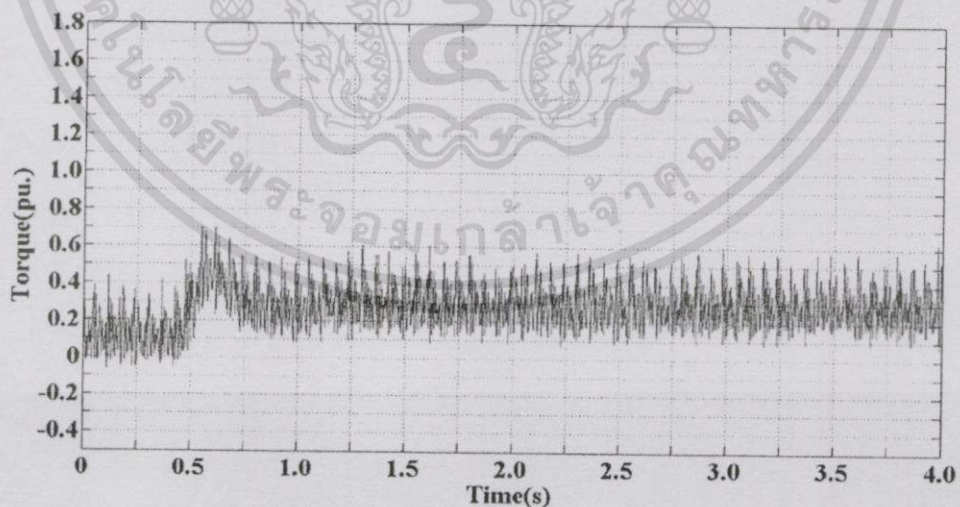
รูปที่ 4.49 ผลการทดลองแสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะไร้ภาระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการเพิ่มภาระขนาด 179.23 วัตต์ ผลตอบสนองชั่วครู่แรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.12 pu. หรือ 0.7649 Nm และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่า 0.34 pu. หรือ 2.1757 Nm ซึ่งผลตอบสนองแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.50 และ 4.51



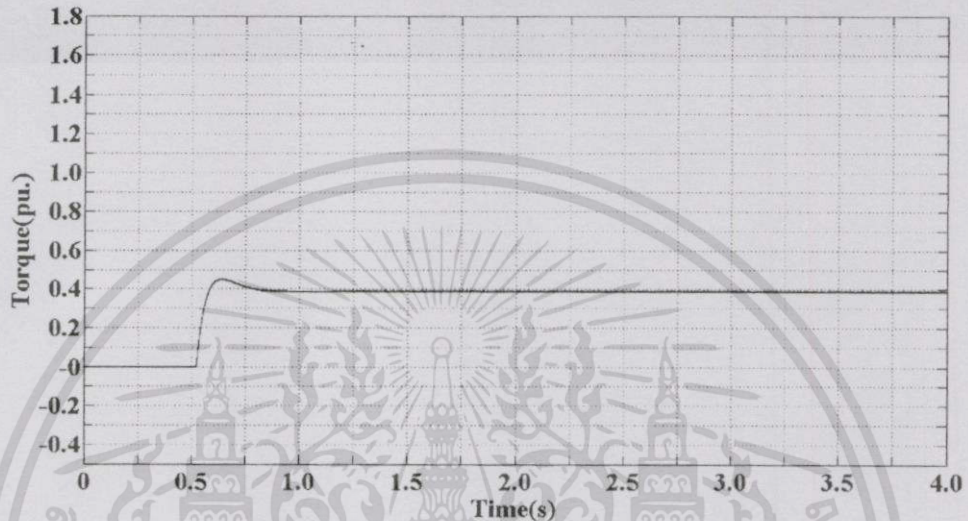
รูปที่ 4.50 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 179.23 วัตต์



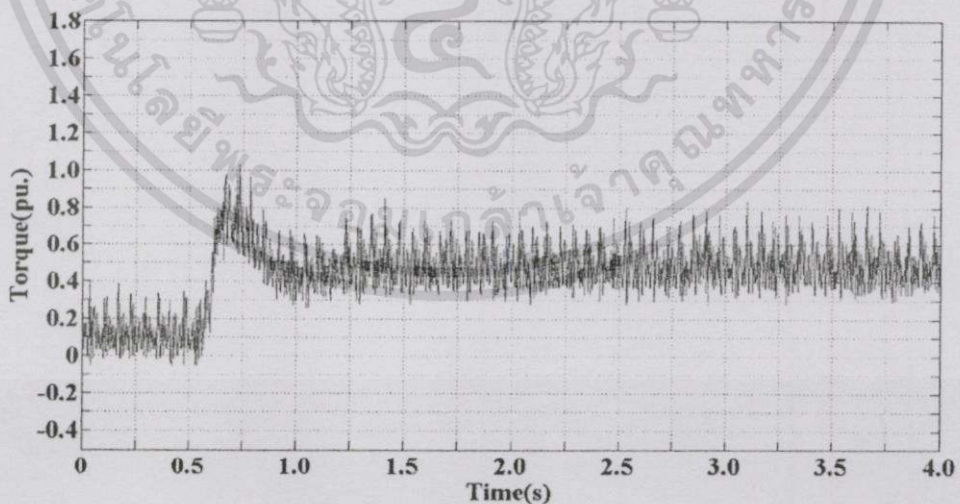
รูปที่ 4.51 ผลการทดลองแสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 179.23 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีเพิ่มภาระขนาด 387.98 วัตต์ ผลตอบสนองชั่วครู่แรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.12 pu. หรือ 0.7649 Nm และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่า 0.51 pu. หรือ 3.2758 Nm ซึ่งผลตอบสนองแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.52 และ 4.53



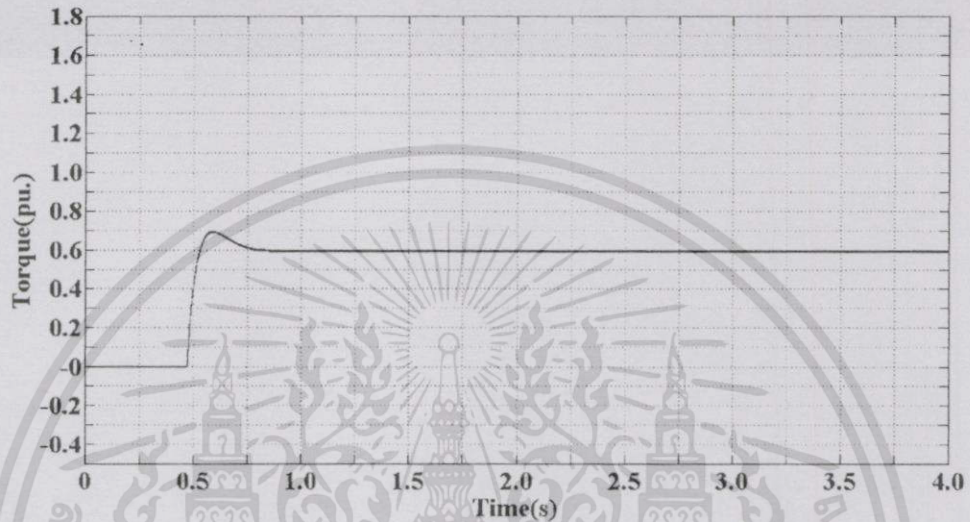
รูปที่ 4.52 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 387.98 วัตต์



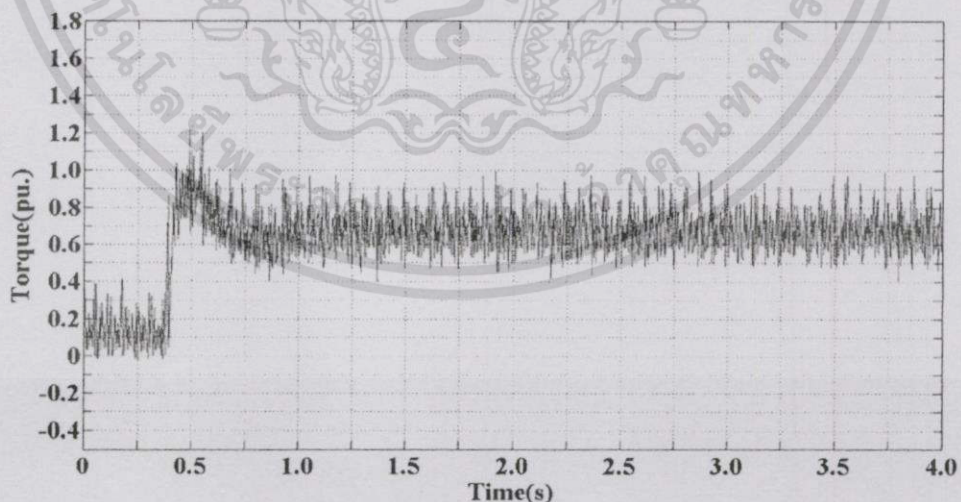
รูปที่ 4.53 ผลการทดลองแสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 387.98 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีเพิ่มภาระขนาด 595.83 วัตต์ ผลตอบสนองชั่วครู่แรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.12 pu. หรือ 0.7649 Nm และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่า 0.77 pu. หรือ 4.8831 Nm ซึ่งผลตอบสนองแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.54 และ 4.55



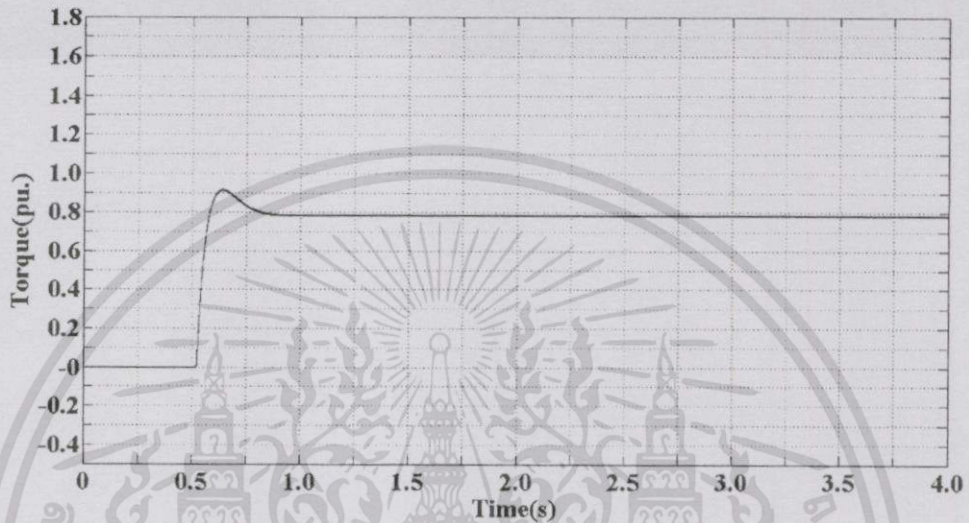
รูปที่ 4.54 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 595.83 วัตต์



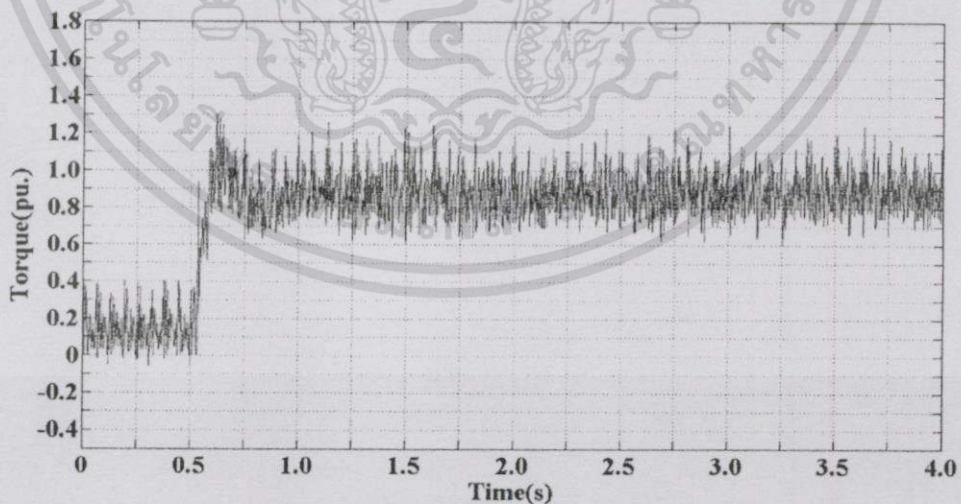
รูปที่ 4.55 ผลการทดลองแสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 595.83 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีเพิ่มภาระขนาด 784.84 วัตต์ ผลตอบสนองชั่วคราวแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.12 pu. หรือ 0.7649 Nm และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่า 0.98 pu. หรือ 6.2567 Nm ซึ่งผลตอบสนองแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.56 และ 4.57



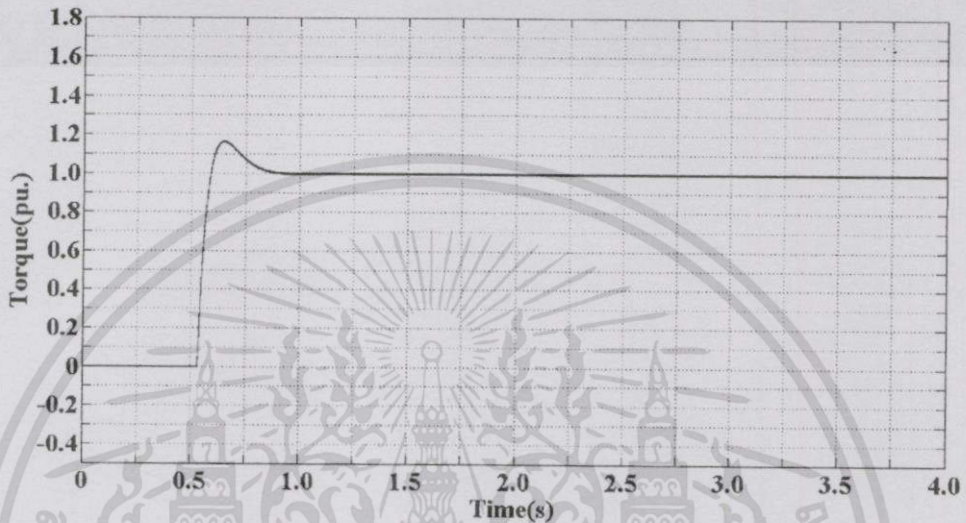
รูปที่ 4.56 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 784.84 วัตต์



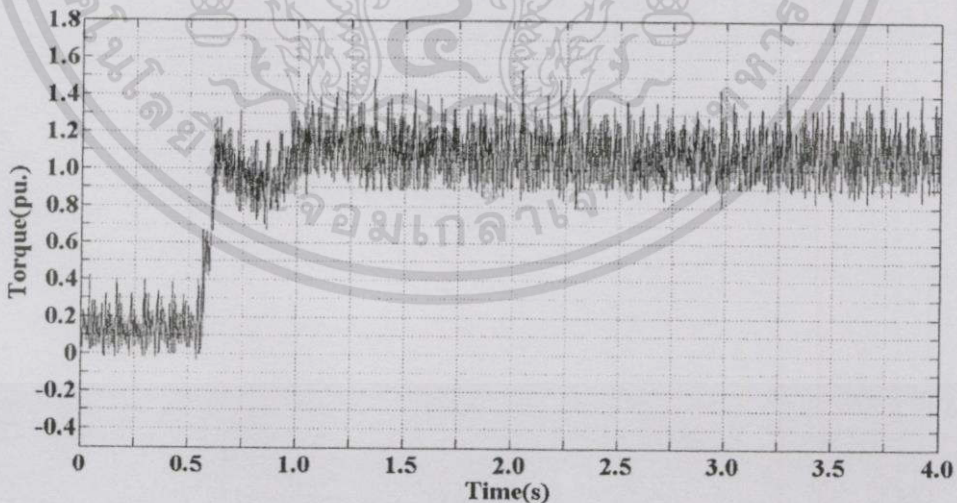
รูปที่ 4.57 ผลการทดลองแสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 784.84 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีเพิ่มภาระขนาด 1006.46 วัตต์ ผลตอบสนองชั่วครู่แรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 0.12 pu. หรือ 0.7649 Nm และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่า 1.24 pu. หรือ 7.8961 Nm ซึ่งผลตอบสนองแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.58 และ 4.59



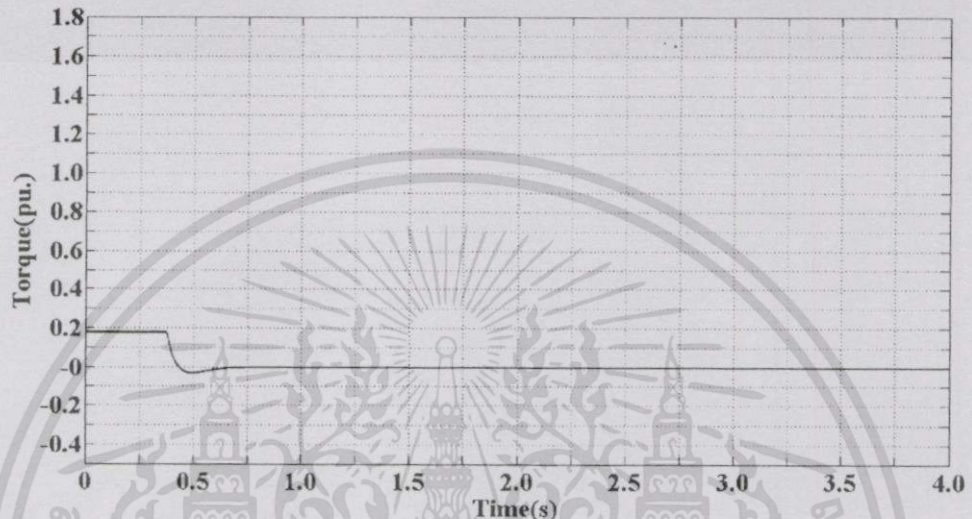
รูปที่ 4.58 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 1006.46 วัตต์



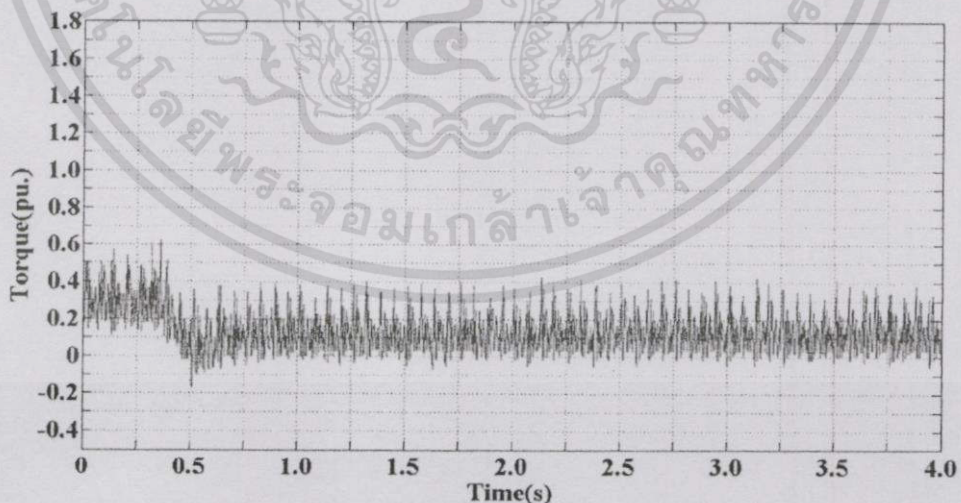
รูปที่ 4.59 ผลการทดลองแสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะเพิ่มภาระ 1006.46 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการปลดภาระขนาด 179.23 วัตต์ ผลตอบสนองชั่วครู่แรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าลดลงจาก 0.34 pu. หรือ 2.1757 Nm และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่า 0.12 pu. หรือ 0.7649 Nm ซึ่งผลตอบสนองแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.60 และ 4.61



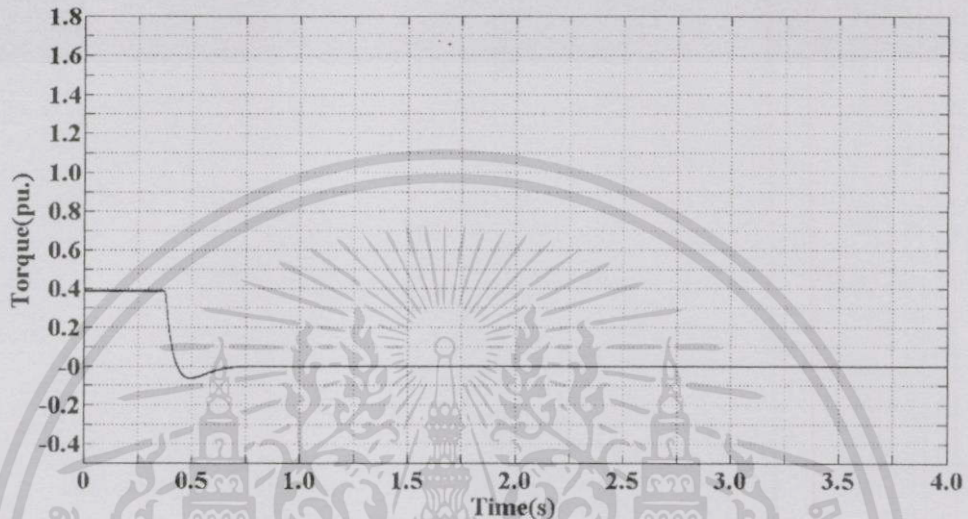
รูปที่ 4.60 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 179.23 วัตต์



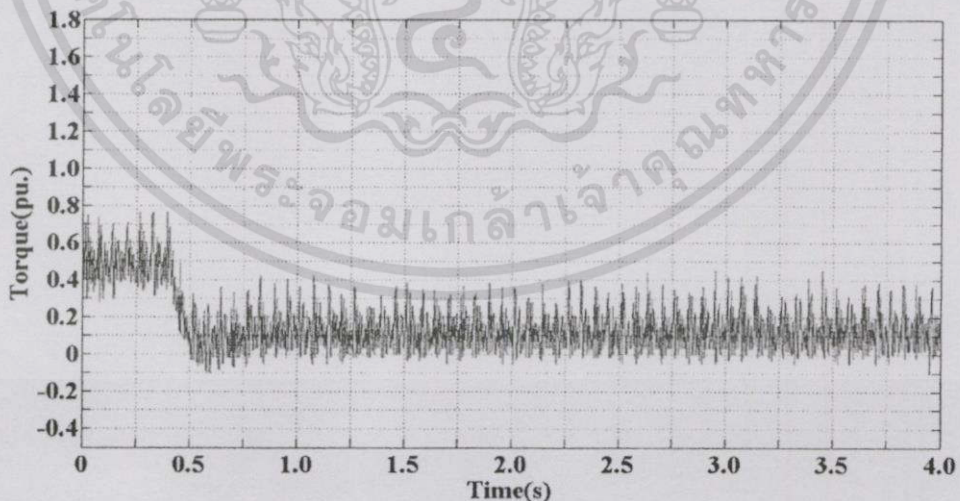
รูปที่ 4.61 ผลการทดลองแสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 179.23 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีปลดภาระขนาด 387.98 วัตต์ ผลตอบสนองชั่วครู่แรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าลดลงจาก 0.51 pu. หรือ 3.2758 Nm และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่า 0.12 pu. หรือ 0.7649 Nm ซึ่งผลตอบสนองแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.62 และ 4.63



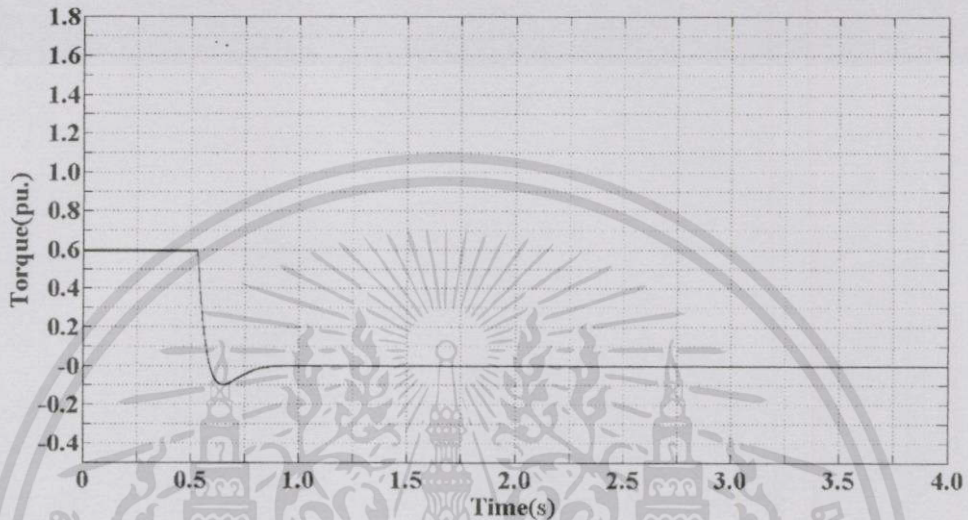
รูปที่ 4.62 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 387.98 วัตต์



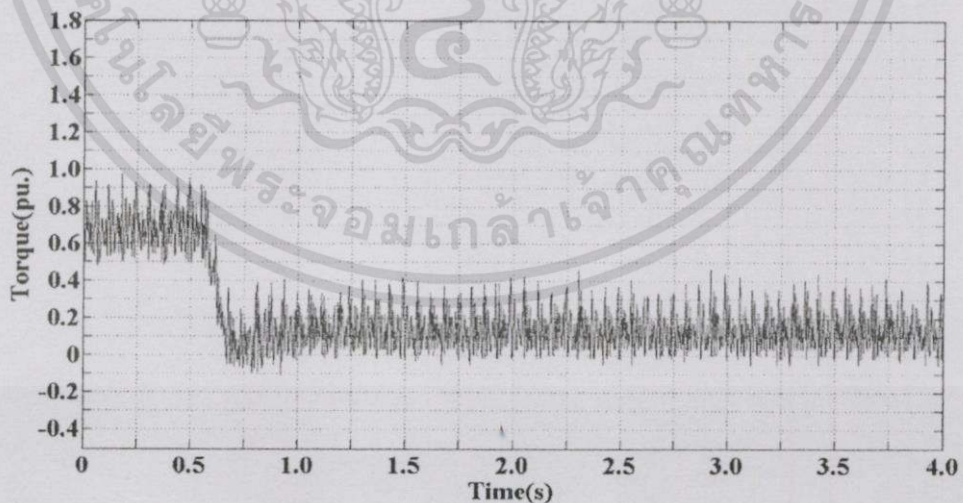
รูปที่ 4.63 ผลการทดลองแสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 387.98 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีปลดภาระขนาด 595.83 วัตต์ ผลตอบสนองชั่วครู่แรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าลดลงจาก 0.77 pu. หรือ 4.8831 Nm และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่า 0.12 pu. หรือ 0.7649 Nm ซึ่งผลตอบสนองแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.64 และ 4.65



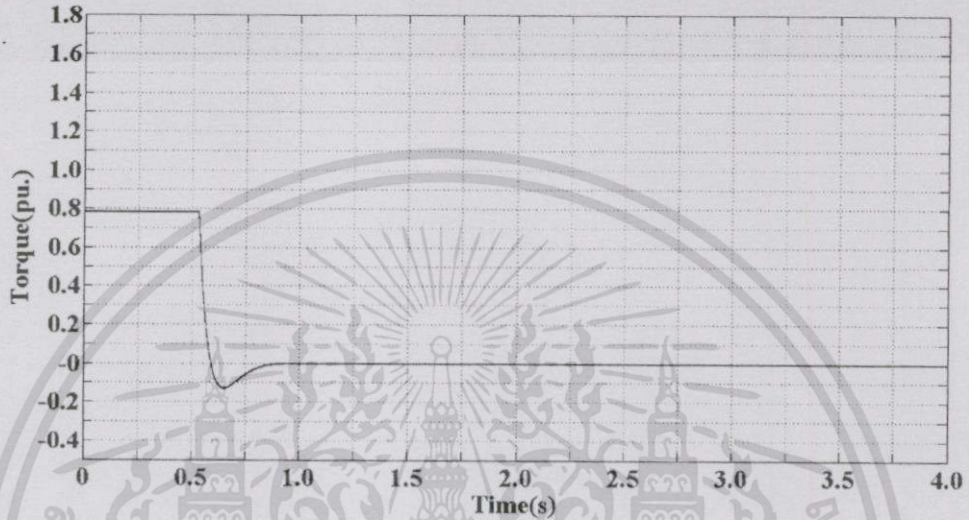
รูปที่ 4.64 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 595.83 วัตต์



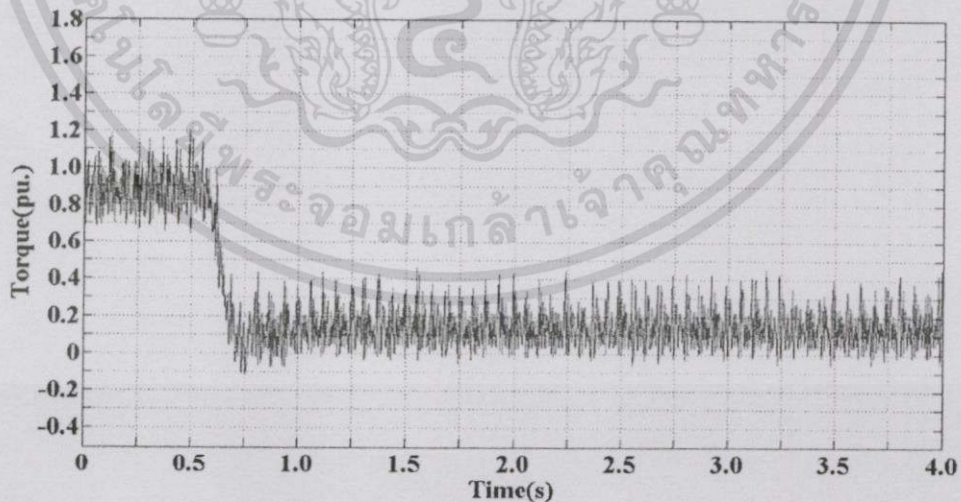
รูปที่ 4.65 ผลการทดลองแสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 595.83 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีปลดภาระขนาด 784.84 วัตต์ ผลตอบสนองชั่วครู่แรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าลดลงจาก 0.98 pu. หรือ 6.2567 Nm และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่า 0.12 pu. หรือ 0.7649 Nm ซึ่งผลตอบสนองแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.66 และ 4.67



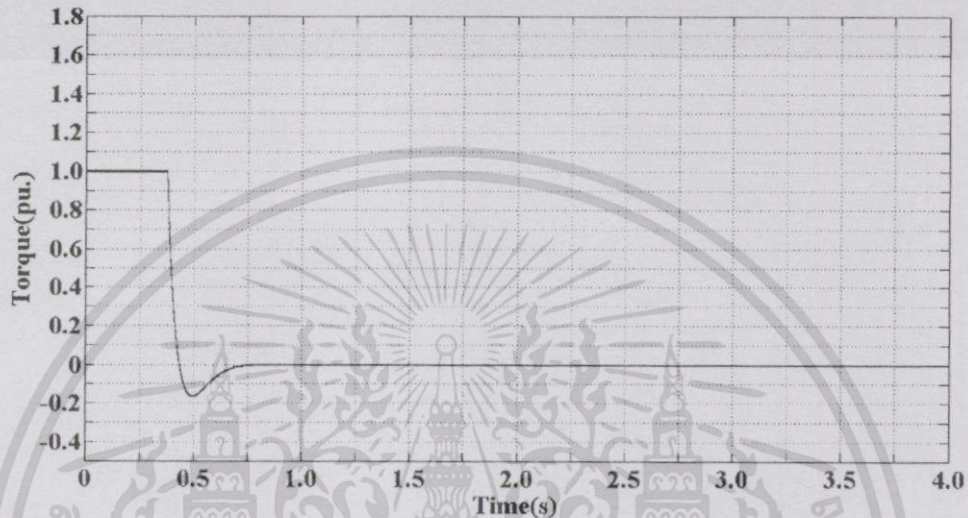
รูปที่ 4.66 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 784.84 วัตต์



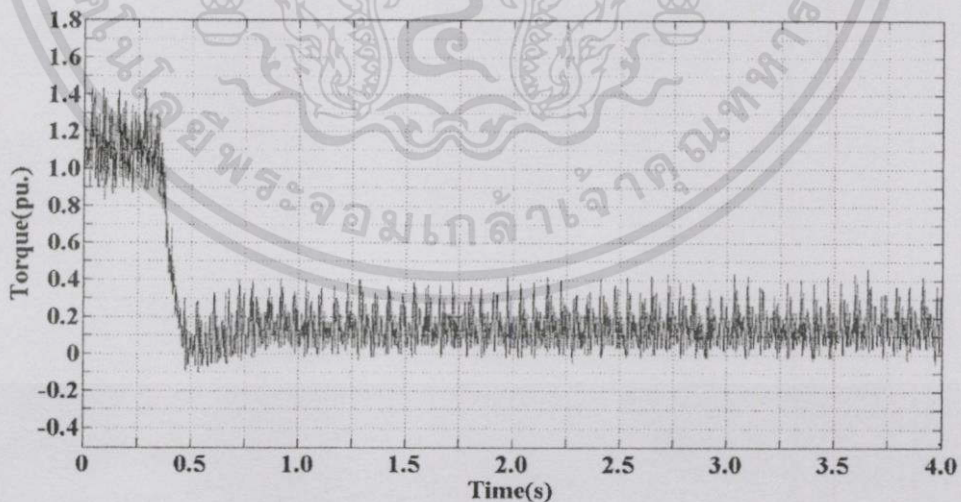
รูปที่ 4.67 ผลการทดลองแสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 784.84 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีปลดภาระขนาด 1006.46 วัตต์ ผลตอบสนองชั่วครู่แรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าลดลงจาก 1.24 pu. หรือ 7.8961 Nm และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่า 0.12 pu. หรือ 0.7649 Nm ซึ่งผลตอบสนองแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าจากการจำลองทางคอมพิวเตอร์และจากการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.68 และ 4.69



รูปที่ 4.68 ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์แสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 1006.46 วัตต์



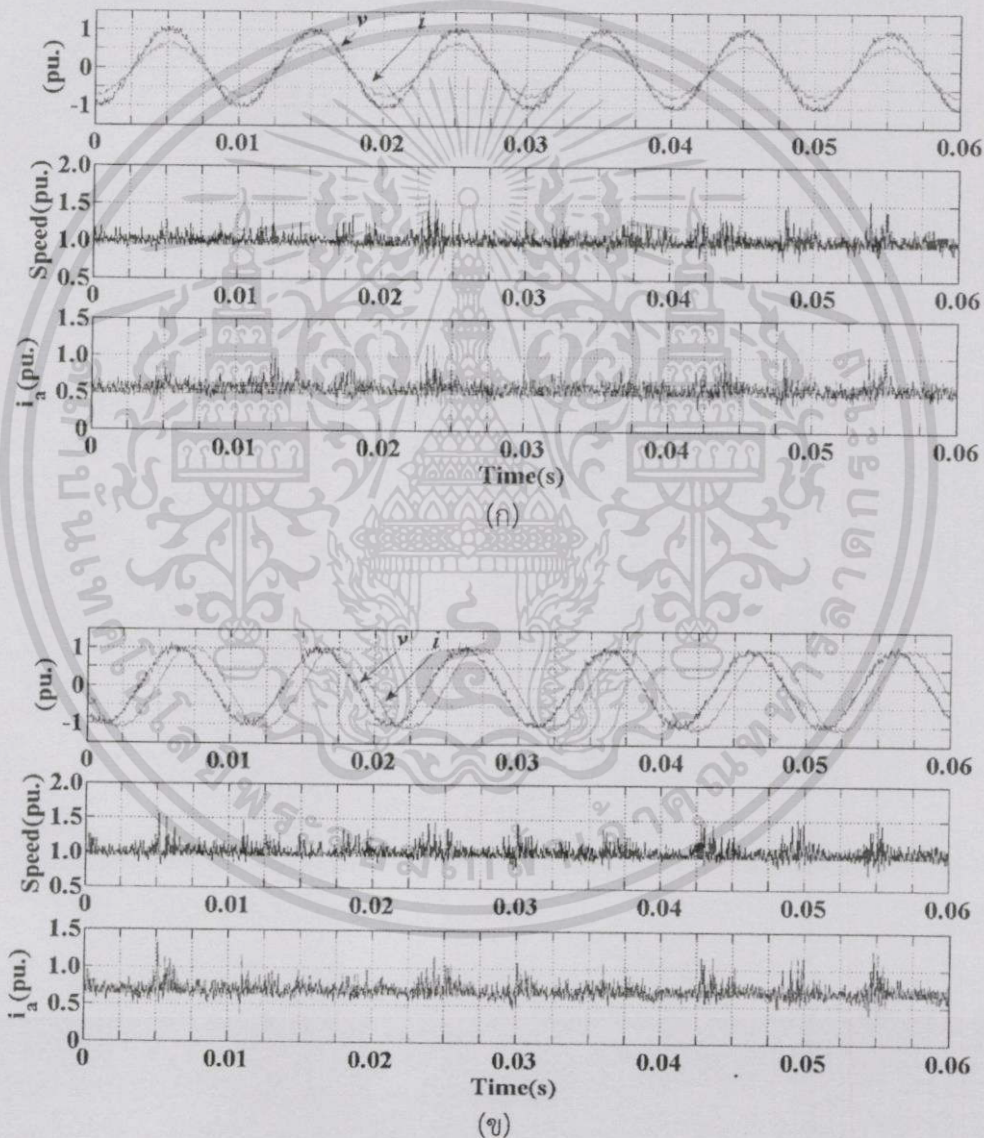
รูปที่ 4.69 ผลการทดลองแสดงแรงบิดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขณะปลดภาระ 1006.46 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

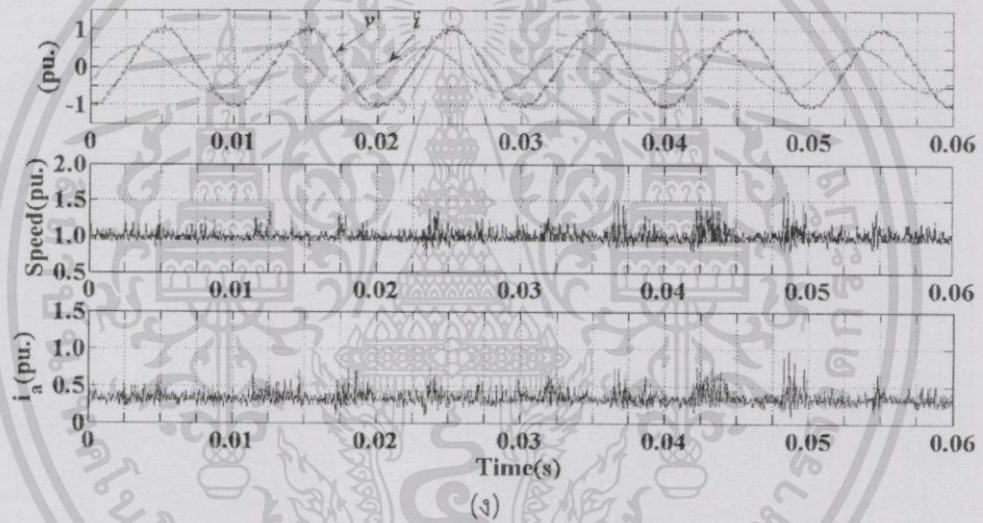
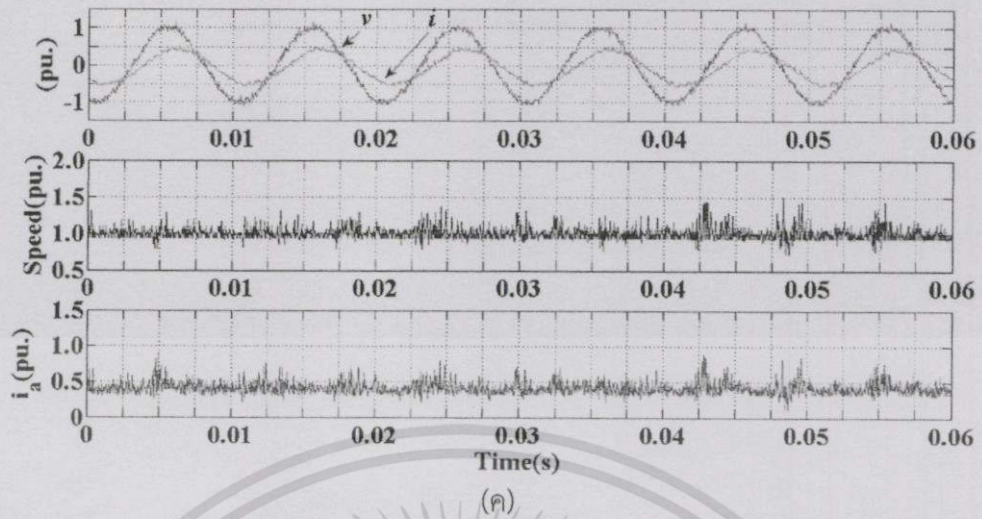
#### 4.6 การทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า

ในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเข้ากับระบบไฟฟ้าจำเป็นต้องมีเงื่อนไขของการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า 3 ประการ ได้แก่ แรงดันที่ขั้วต้องต่างกันไม่เกิน  $\pm 5\%$  ลำดับเฟสตรงกัน และความถี่ต่างกันไม่เกิน  $\pm 0.067\%$

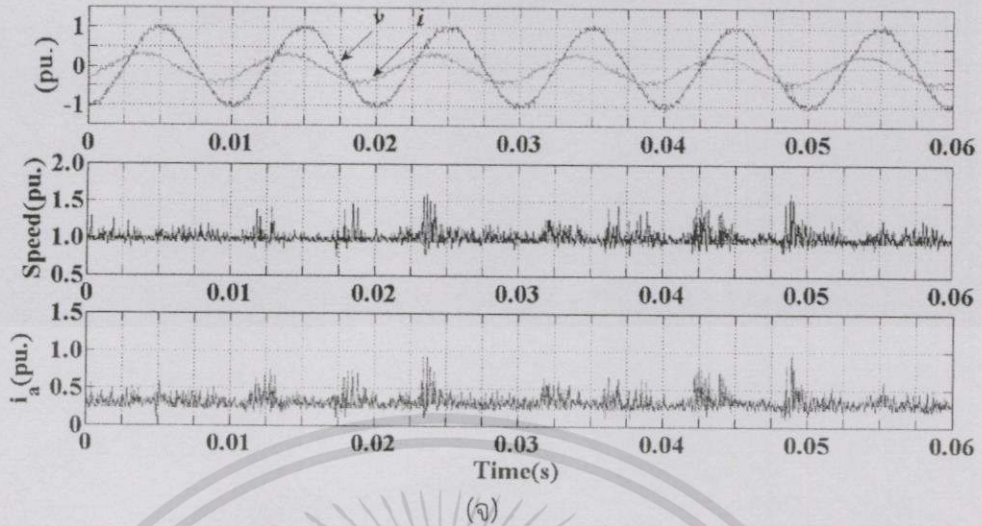
จากการทดลองจะเห็นได้ว่าการควบคุมความเร็วรอบแบบวงปิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ที่ทำหน้าที่เป็นต้นกำลังให้กับเครื่องกำเนิดสามารถรักษาความเร็วรอบได้ในสภาวะการทำงานที่ค่าประกอบกำลังต่างๆตามรูปที่ 4.70



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



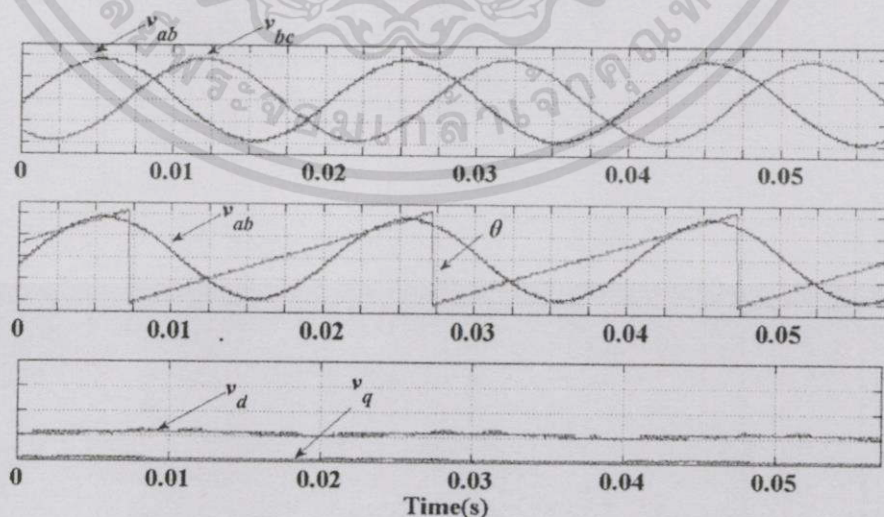
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.70 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบ กระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันอาร์มาเจอร์ กระแสอาร์มาเจอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส  
 (ก) ขณะ p.f. unity (ข) ขณะ p.f. lag 0.7 (ค) ขณะ p.f. lag 0.8  
 (ง) ขณะ p.f. lead 0.7 (จ) ขณะ p.f. lead 0.8

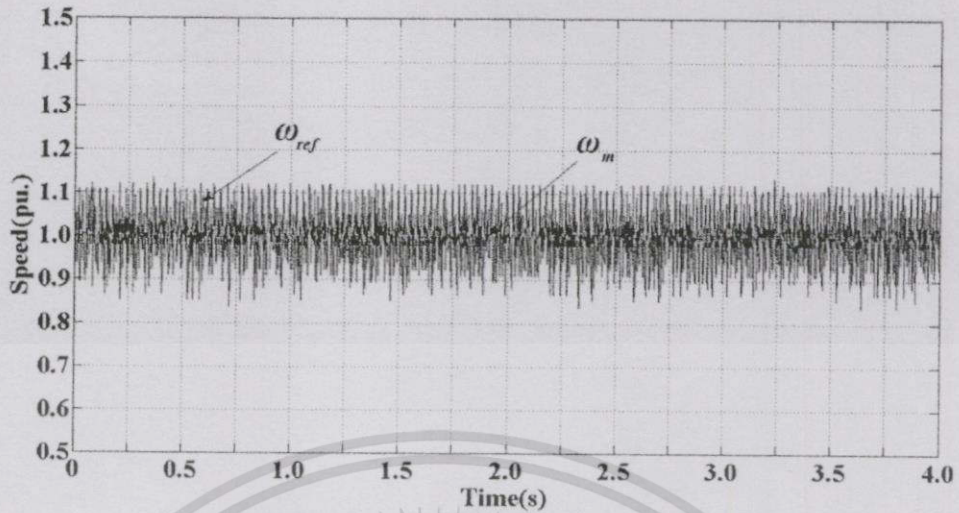
4.7 การทดลองเฟสล็อกกลุ่

ในการสร้างกรอบอ้างอิงที่มีความเร็วรอบเท่ากับความเร็วซิงโครนัสนั้นทำได้โดยการแปลงแกนของแรงดันในแกน  $d$  ที่ได้จากการแปลงแกนมีค่าเป็นศูนย์ และความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีค่าเท่ากับความเร็วซิงโครนัสดังรูปที่ 4.71 และ 4.72



รูปที่ 4.71 ผลการทดลองแสดงสัญญาณเฟสล็อกกลุ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.72 ผลการทดลองแสดงความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วยรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ตารางที่ 4.1 สถานะการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ภาระค่าต่างๆขณะความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าคงที่

Load (W)	$V_a$ (V)	$V_f$ (V)	$I_a$ (A)	$P_{input}$ (W)
0	267	200.0	0.45	120.15
179.23	267	200.0	1.28	341.76
387.98	268	200.0	1.98	530.64
595.83	272	205.8	2.82	767.04
784.84	273	203.0	3.60	982.80
1006.46	272	202.0	4.56	1240.32

ตารางที่ 4.2 แรงดันและกระแสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ทำการจ่ายภาระทางไฟฟ้าค่าต่างๆขณะความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าคงที่

Load (W)	$I_{syn}$ (A)	$V_{syn}$ on load (V)
0	0	400
179.23	0.26	398
387.98	0.56	400
595.83	0.86	400
784.84	1.13	401
1006.46	1.46	398

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### บทสรุป

#### 5.1 บทสรุป

ปริญญานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการควบคุมแบบวงปิดสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เป็นการควบคุมความเร็วรอบสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่อาศัยการป้อนกลับค่าความเร็วรอบ และกระแสเพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่าเท่ากับความเร็วรอบเชิงโคโรนัสของระบบไฟฟ้า แม้ว่าภาระทางกลมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งระบบจะถูกประมวลผลโดย ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4DISCOVERY แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถรักษาความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ได้แม้ภาระทางกลมีการเปลี่ยนแปลงไป และสามารถควบคุมให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำหน้าที่เป็นต้นกำลังให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโคโรนัสเพื่อการขนานเข้ากับระบบไฟฟ้าได้ โดยผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- ผลตอบสนองความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อทำการต่อภาระหรือปลดภาระกับระบบ ความเร็วรอบจะมีการเปลี่ยนแปลงในสถานะชั่วคราว จากนั้นจะกลับเข้าสู่ค่า 1 pu. (1500 rpm) ดั้งเดิม ในกรณีที่ภาระยังมีค่ามากขึ้นจะส่งผลทำให้ความเร็วรอบมีการเปลี่ยนแปลงในสถานะชั่วคราวมากขึ้น แต่ยังสามารถควบคุมให้ความเร็วรอบมีค่าที่ 1 pu. (1500 rpm) ได้

- ผลตอบสนองต่อกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อทำการต่อภาระเข้าสู่ระบบ กระแสจะมีค่ามากขึ้นเพื่อรักษาแรงบิดทางไฟฟ้าให้เท่ากับแรงบิดทางกล ทำให้ความสามารถในการรักษาความเร็วรอบไว้ได้ โดยขนาดของกระแสจะขึ้นอยู่กับภาระที่ต่อ ยิ่งภาระมีค่ามากขึ้นก็จะส่งผลให้กระแสมีค่าสูงขึ้น

- ผลตอบสนองต่อแรงบิดทางไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงพบว่าแรงบิดทางไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับกระแสอาร์มาเจอร์เป็นหลัก เมื่อทำการต่อภาระกับระบบพบว่าแรงบิดทางไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดทางกล และเข้าสู่สถานะคงตัวที่แรงบิดทางไฟฟ้าค่าใหม่ซึ่งยังคงสามารถรักษาความเร็วรอบให้คงที่ เมื่อทำการปลดภาระแรงบิดทางไฟฟ้าจะมีค่าตกลงและเข้าสู่สถานะคงตัวซึ่งยังคงสามารถรักษาความเร็วรอบให้คงที่ได้เช่นกัน

- ผลการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโคโรนัสเข้ากับระบบไฟฟ้า พบว่าสามารถทำการควบคุมให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าเท่ากับความเร็วเชิงโคโรนัสของระบบไฟฟ้า และหลังจากการขนานสามารถปรับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่างๆได้

ซึ่งการควบคุมความเร็วรอบแบบวงปิดสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับห้องปฏิบัติการการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโคโรนัสเข้าสู่ระบบไฟฟ้าให้ทำการทดลองได้ง่ายขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เพื่อให้ได้ผลตอบสนองต่อความถี่ของระบบไฟฟ้าที่ดีขึ้นจึงควรมีการปรับแก้ไขค่า  $K_p$  และ  $K_i$  ของตัวควบคุม

5.2.2 เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนในระบบ จึงควรทำการแก้ไขและออกแบบอุปกรณ์เพื่อลดสัญญาณรบกวน

5.2.3 ควรปรับปรุงระบบควบคุมเพื่อรองรับการทำงานแบบสัจตฤภาคอย่างสมบูรณ์

5.2.4 ควรมีการออกแบบระบบเพื่อลดกระบวนการทำงานและขั้นตอนการเริ่มให้มีความง่ายต่อการใช้งานมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Chapman, *Electric Machinery and Power System Fundamentals*, McGraw Hill., 2002.
- [2] P.C.Sen, *Principles of electric machines and power electronics*, second edition, John Wiley & Sons, INC., 1997.
- [3] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, *Power Electronics Converters, Applications and Design*, 2nd Edition. John Wiley & Sons, INC.
- [4] Tamer H. Abdelhamid, "Performance of Single-Phase DC Drive System Controlled by Uniform PWM Full-Bridge DC-DC Converter", *MELECON*, vol 3., 2000, pp974-977
- [5] Jim Ögren, "PLL Design for inverter grid connection", ISSN: 1401-5757., 2011
- [6] Michael J. Thompson, "Fundamentals and Advancements in Generator Synchronizing Systems", *Protective Relay Engineering 65<sup>th</sup> Annual Conference* , 2012, pp203-214
- [7] Ali Bekir Yildiz, M. Zeki Bilgin, *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems*. "Speed Control of Averaged DC Motor Drive System by Using Neuro-PID Controller", *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering System*, 2006, pp1075-1082
- [8] ผศ.มนตรี ศิริปรัชญานันท์, เฟสติกอกลูบ, เอกสารประกอบการเรียนการสอน, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [9] วรชาติ แซ่ก๊ก, เกียรติศักดิ์ โปปัญญามะกุล, อรรถพล เทนโรสง, "เครื่องวัดความเร็วมอเตอร์", *ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*, 2541.
- [10] วรชาติ แซ่ก๊ก, "เทคนิคการหาคุณลักษณะแรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการเพิ่มโมเมนต์ความเฉื่อย", *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*, 2545
- [11] Zhijun Liu, "PWM Speed Control System of DC motor Based on AT89S51", *EMEIT*, vol 3, 2011, pp1301-1303
- [12] Austin Hughes, *Electric Motors and Drives*, Third edition, Elsevier Ltd., 2006.
- [13] Glen Kulak, Ed Nowicki, M William Rosehart, *Engineering Considerations when replacing an old DC drive system*, *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting* , Volume 2, 2002, PP.664-668

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

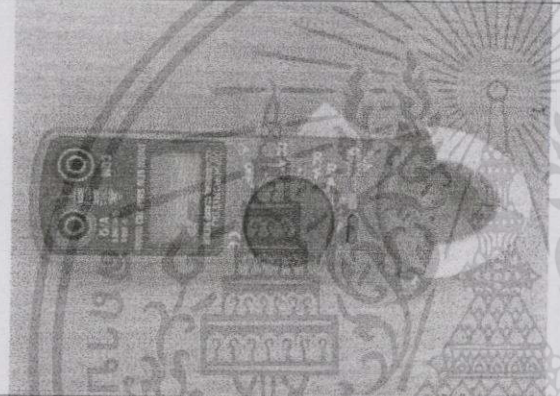

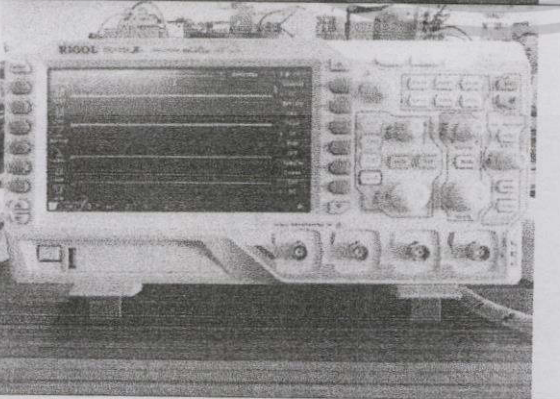


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

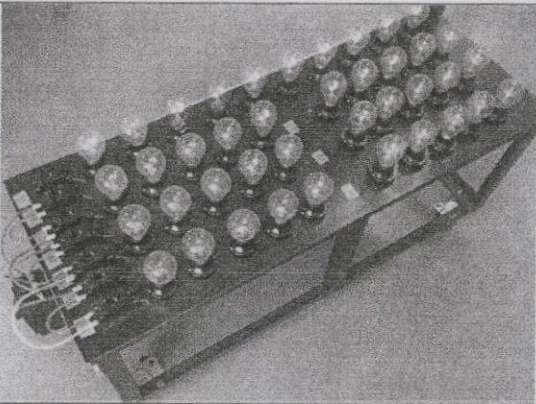
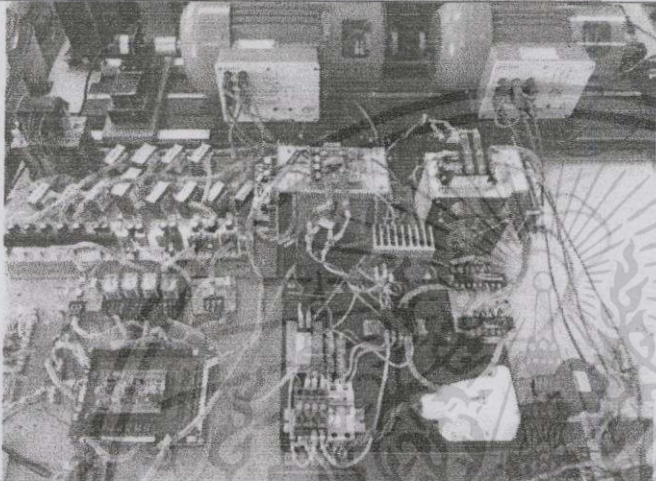
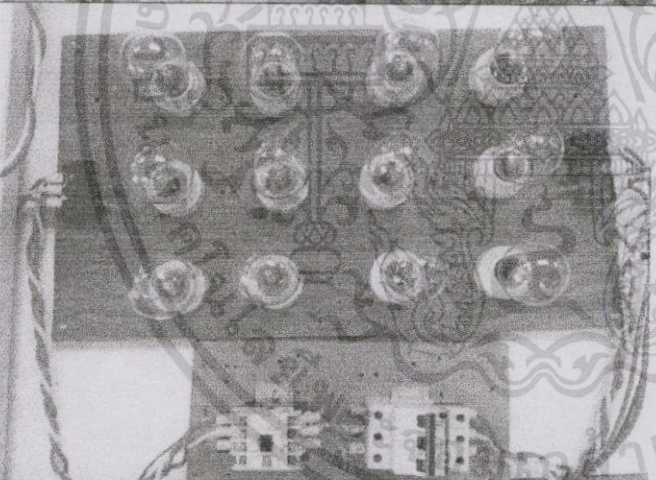
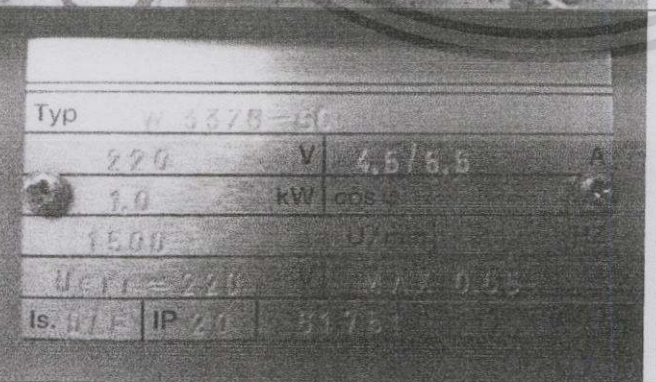


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.  
รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

รูปถ่ายชิ้นงานและอุปกรณ์	รายละเอียด
	มัลติมิเตอร์
	แคสพมิเตอร์
	แทคโคมิเตอร์
	ออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	<p>ภาระโหลดไฟ</p>																								
	<p>ชิ้นงานการควบคุมแบบวงปิด สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง</p>																								
	<p>ชุดขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เชิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า</p>																								
 <table border="1" data-bbox="193 1526 841 1871"> <tr> <td>Typ</td> <td colspan="3">M 3375-50</td> </tr> <tr> <td></td> <td>220</td> <td>V</td> <td>4,5/8,5</td> </tr> <tr> <td></td> <td>1,0</td> <td>kW</td> <td>cos φ</td> </tr> <tr> <td></td> <td>1500</td> <td>U<sub>n</sub></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td colspan="2">U<sub>eff</sub> = 220</td> <td>0,85</td> </tr> <tr> <td>Is. RTF</td> <td>IP 20</td> <td>3375</td> <td></td> </tr> </table>	Typ	M 3375-50				220	V	4,5/8,5		1,0	kW	cos φ		1500	U <sub>n</sub>			U <sub>eff</sub> = 220		0,85	Is. RTF	IP 20	3375		<p>Name Plate of DC motor</p>
Typ	M 3375-50																								
	220	V	4,5/8,5																						
	1,0	kW	cos φ																						
	1500	U <sub>n</sub>																							
	U <sub>eff</sub> = 220		0,85																						
Is. RTF	IP 20	3375																							

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Name Plate of Synchronous Generator			
Typ	W 3375-4B		
$\gamma/\Delta$	400/230	V	1.52/2.66 A
0.8 kVA/0.8	KW	cos $\phi$ DB-1	0.8
95.00	U/min	HZ	
U <sub>LL</sub> = 220	V	VA	A
Is. I/F	IP 20	017.3	VDE 0530

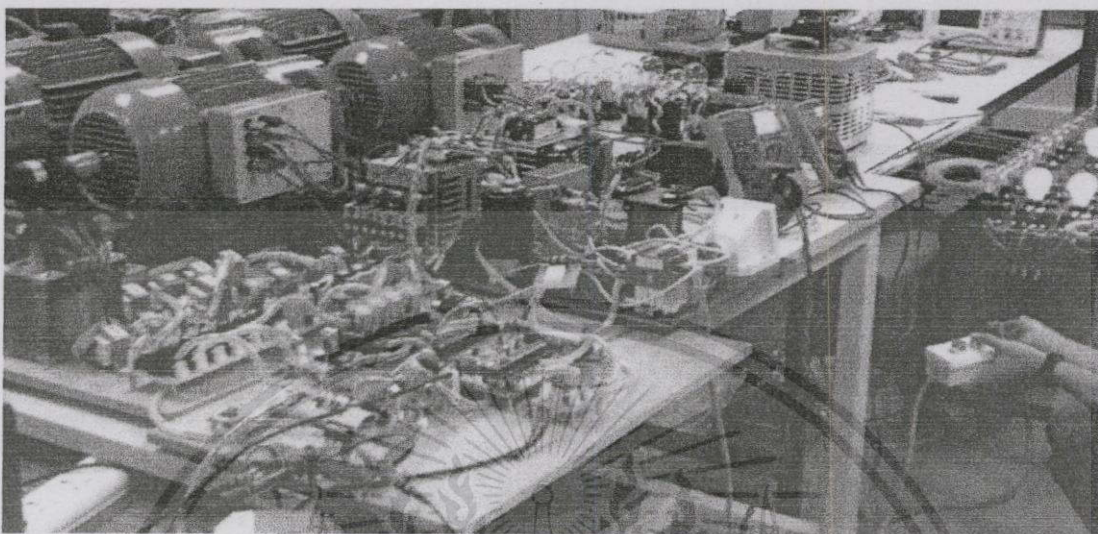


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

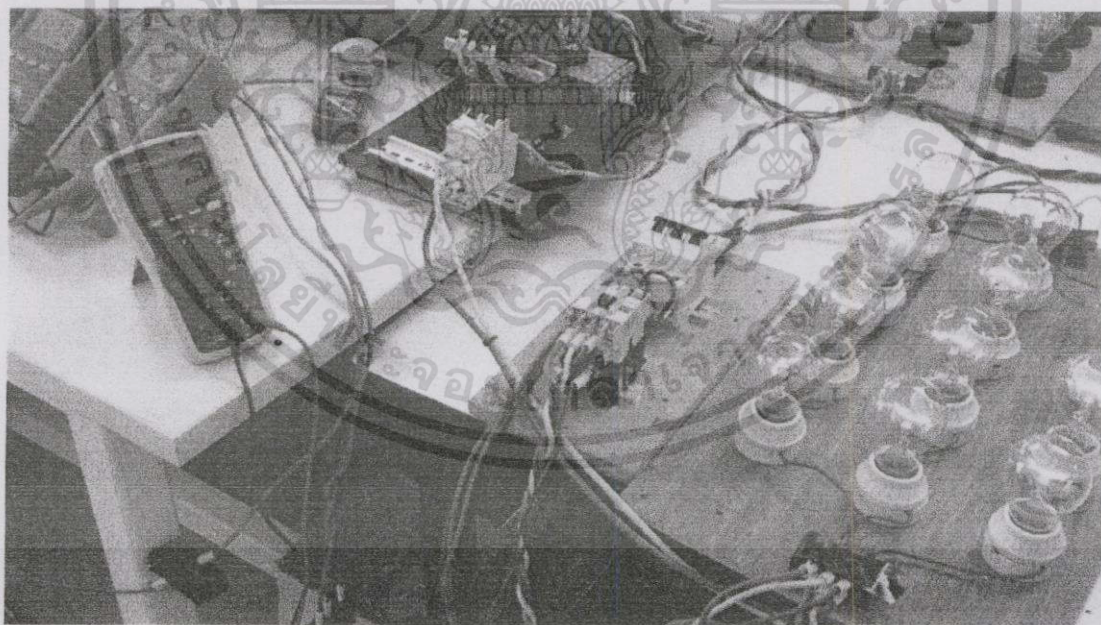


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.  
รูปการทดลอง



รูปที่ ข1 การทดลองการควบคุมแบบวงปิดสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ ข2 การทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสกับระบบไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค.

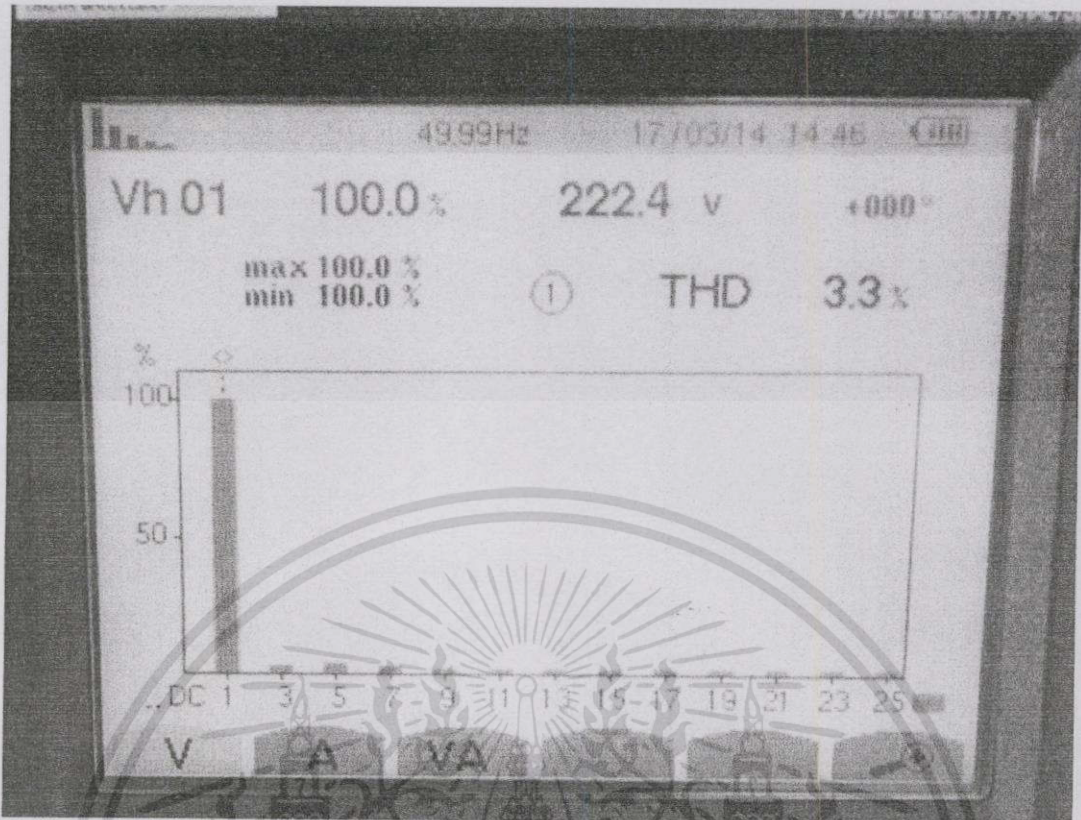
## ตัวประกอบกำลังและความผิดเพี้ยนของสัญญาณขาเข้า

## ค1 ความผิดเพี้ยนของสัญญาณขาเข้า

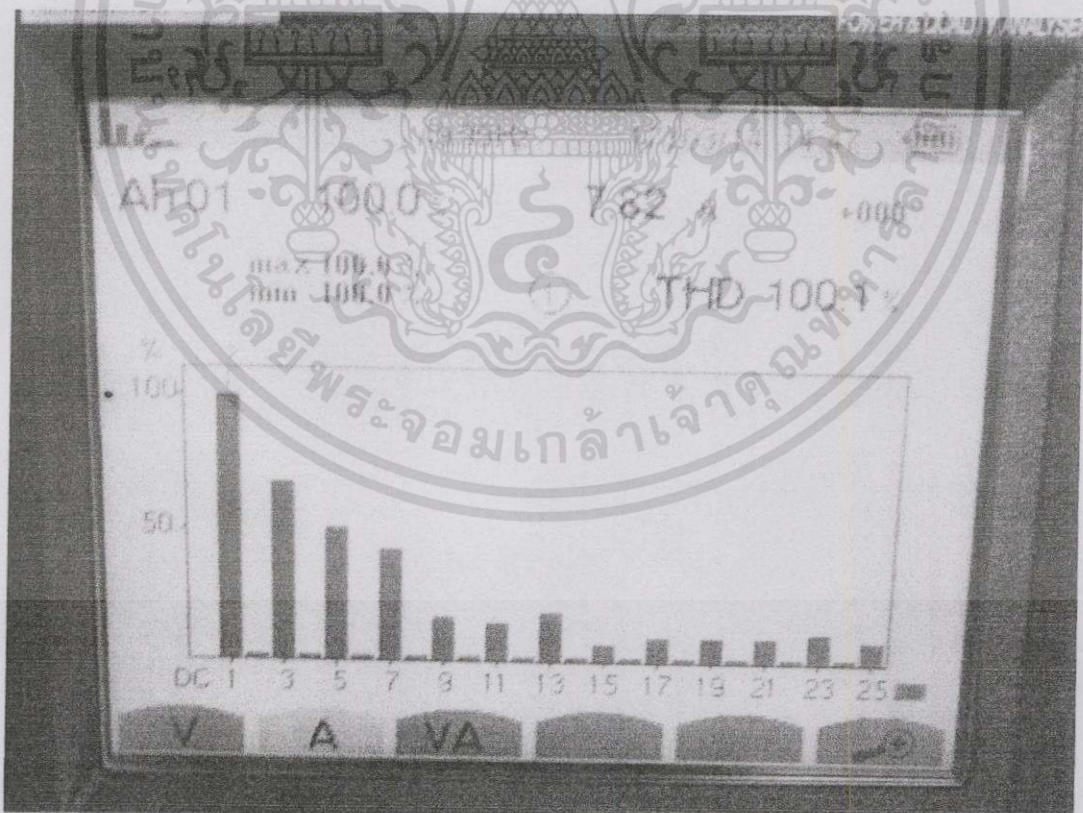
เนื่องด้วยการใช้วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นมีข้อดีเหนือการควบคุมด้วยไทรสเตอร์ในเรื่องของความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแรงดันขาเข้าที่ต่ำกว่า แต่ในทางตรงข้ามความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสนั้นจะมีความผิดเพี้ยนที่มากกว่า ซึ่งรูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้าของระบบดังแสดงในรูปที่ ค1 และสเปกตรัมฮาร์โมนิกส์จะถูกแสดงดังรูปที่ ค2 ถึง ค3



รูปที่ ค1 รูปคลื่นแรงดันและกระแสขาเข้า



รูปที่ ค2 สเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของรูปคลื่นแรงดันขาเข้า

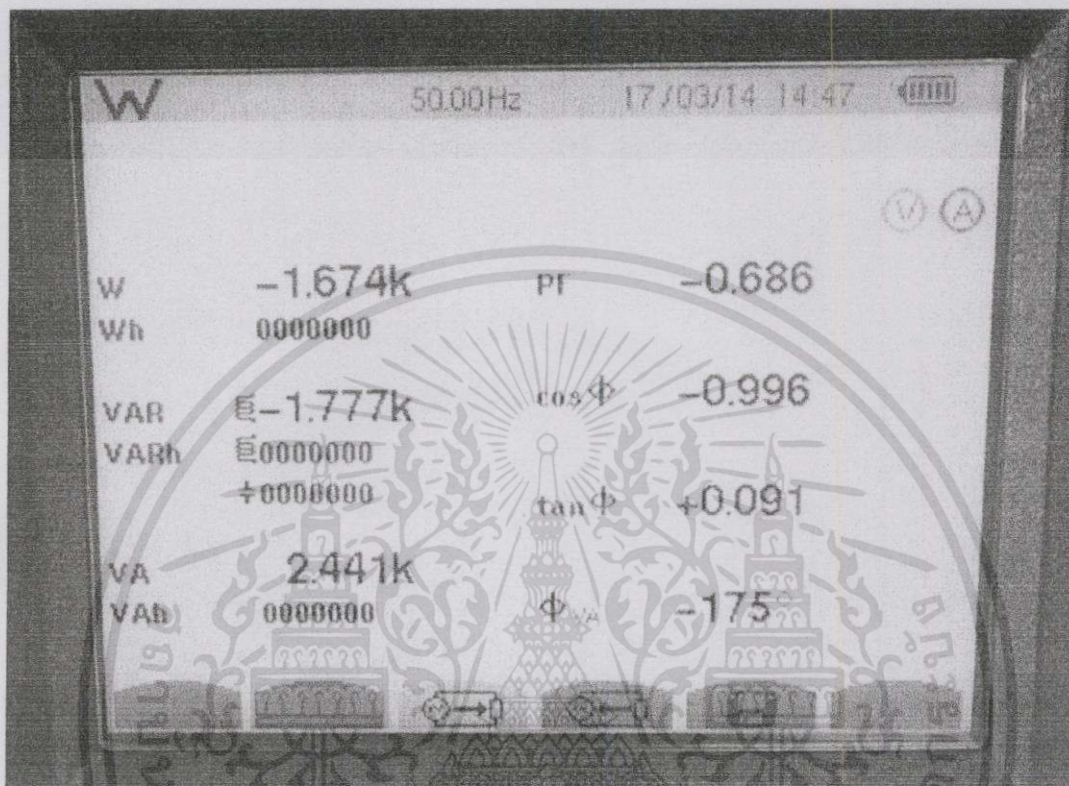


รูปที่ ค3 สเปกตรัมฮาร์มอนิกส์ของรูปคลื่นกระแสขาเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ค2 ตัวประกอบกำลัง

ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นตัวประกอบกำลังมักจะมีค่าต่ำ ซึ่งถือเป็นข้อเสียของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจำเป็นต้องมีการชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือนเพื่อประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ซึ่งตัวประกอบกำลังที่ได้จากทดลองนั้นจะถูกแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ ค4 ตัวประกอบกำลังและกำลังไฟฟ้าขาเข้า

## ค3 ประสิทธิภาพ

ประสิทธิภาพของระบบโดยรวมจะถูกแสดงไว้ดังตารางที่ ค1

### ตารางที่ ค1 ประสิทธิภาพของระบบขับเคลื่อน

กำลังไฟฟ้าขาเข้า	1674 วัตต์
กำลังไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	1320.5 วัตต์
กำลังไฟฟ้าขาออก	1039.25 วัตต์
ประสิทธิภาพของระบบขับเคลื่อน	78.89 %
ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ	62 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การควบคุมวงปิดสำหรับมอเตอร์กระแสตรง

### Closed Loop Control for a DC motor

สรรเสริญ มีสุข สรวิต โชติเรืองนภา สาโรจน์ ทาป็นแก้ว และสุพัฒน์ กิจศิริกุล

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร 0-2739-2478

#### บทคัดย่อ

โครงงานฉบับนี้นำเสนอการควบคุมแบบวงปิดสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อใช้งานมอเตอร์ดังกล่าวเป็นต้นกำลังสำหรับการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสสำหรับการขนานกับระบบไฟฟ้า โครงงานนี้ได้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกขนาด 1 kW ซึ่งถูกขับป้อนด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัส โดยมอเตอร์ดังกล่าวจะถูกขับเคลื่อนด้วยคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ (Full Bridge DC-DC converter) ซึ่งถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ STM32F407VG ในการออกแบบและจำลองการทำงานของระบบควบคุมจะถูกจำลองบนโปรแกรม MATLAB/Simulink ซึ่งระเบียบวิธีการที่ได้จะถูกนำมาใช้ในการสร้างระบบจริงต่อไป ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์และผลการทดลองจริง ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบสำหรับการวิเคราะห์และปรับปรุงสมรรถนะระบบให้ดีขึ้น

**คำสำคัญ:** การควบคุมวงปิด, มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก, คอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์

#### Abstract

This thesis presents the control of a DC motor as a prime mover for a synchronous generator drive grid synchronization process. A 1 kW separately excited DC motor drive by a full bridge DC-DC converter is used in this project. The STM32F407VG microcontroller is used to control the full bridge DC-DC converter. MATLAB/Simulink program is used to simulate and design the control system of the motor. The designed algorithm is applied to the real system. The simulation and experiment results are compared for analysis and improvement the performance of the system.

**Keyword:** closed loop control, separately excited motor, full bridge DC-DC converter

#### 1. บทนำ

ปัจจุบันการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสเข้ากับระบบไฟฟ้าในห้วงปฏิบัติการโดยมีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นต้นกำลังนั้น จำเป็นต้องอาศัยการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งต้องใช้ความชำนาญในการควบคุมให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีความเร็วรอบเท่ากับความเร็วเชิงโรตัสของระบบไฟฟ้า โดยงานที่ต้องการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนิยมใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก เนื่องจากมอเตอร์ชนิดนี้มีความสัมพันธ์ในการรักษาความเร็วรอบแม้ว่าภาระทางกลมีการเปลี่ยนแปลงไป[1] อีกทั้งยังมีคุณสมบัติในการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ขดลวดอาร์มาเจอร์และแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ขดลวดสนามที่อิสระจากกัน ทำให้สามารถควบคุมความเร็วรอบได้อย่างอิสระ[2] โดยช่วงที่ความเร็วรอบต่ำกว่าความเร็วพิกัดจะใช้แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ขดลวดอาร์มาเจอร์ในการควบคุม ส่วนช่วงที่ความเร็วรอบสูงกว่าความเร็วพิกัดจะใช้แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ขดลวดสนามในการควบคุม

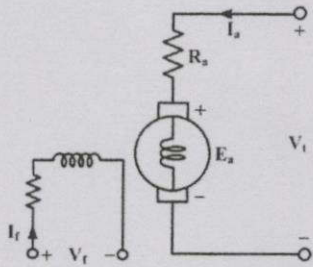
ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงได้นำคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งมีข้อดีคือสามารถประยุกต์ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ในสี่จตุภาค (4 quadrant) สามารถควบคุมความเร็วรอบ และสามารถควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์กระแสตรงได้อย่างอิสระ ด้วยการควบคุมแบบวงปิดที่มีการป้อนกลับค่าความเร็วรอบ และค่ากระแสอาร์มาเจอร์ เพื่อรองรับการทดลองการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตัสเข้าสู่ระบบไฟฟ้าในห้วงปฏิบัติการโดยควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้เท่ากับความเร็วเชิงโรตัสของระบบไฟฟ้า ขณะที่ภาระทางกลมีการเปลี่ยนแปลงไปได้

## 2. ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในบทความนี้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ขดลวดอาร์มาเจอร์และขดลวดสนามจะถูกกระตุ้นด้วยแหล่งจ่ายแยกชุดกัน ซึ่งมีข้อดีคือสามารถควบคุมสนามแม่เหล็กและแรงบิดได้อิสระออกจากกัน[3] ผลคือสามารถควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ในวงกว้าง โดยวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกนั้นได้ถูกแสดงในรูปที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วกระแสตรงมาเจอร์สามารถอธิบายได้จากสมการที่ 1

$$E_a = K_a \phi \omega = V_t - I_a R_a \quad (1)$$

โดยความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วรอบกับแรงบิดจะเป็นไปตามสมการที่ 2 3 และ 4

$$T_e = K_a \phi I_a \quad (2)$$

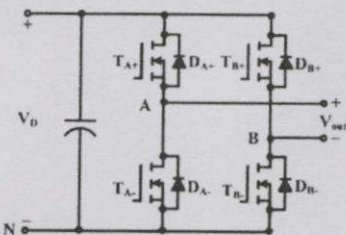
$$\omega_m = \frac{V_t - I_a R_a}{K_a \phi} \quad (3)$$

$$\omega_m = \frac{v_t}{K_a \phi} - \frac{R_a}{(K_a \phi)^2} T_e \quad (4)$$

เนื่องด้วยคุณลักษณะความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก เมื่อแรงบิดเปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลให้ความเร็วเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยซึ่งถือเป็นข้อดีในการรักษาความเร็วรอบ

### 2.2 วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์

วงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ ดังแสดงในรูปที่ 2 ทำหน้าที่ควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าขาออกประกอบด้วยสวิทช์ทั้งหมด 4 ตัว ซึ่งสวิทช์แต่ละตัวทำงานสลับกันในการนำกระแสและหยุดนำกระแส โดยใช้สัญญาณพีดีบีเบิ้ลยูเอ็มแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar PWM) ทำให้แรงดันไฟฟ้าขาออกที่ได้มีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่สวิทช์ สามารถควบคุมได้ทั้งขนาดและทิศทางของแรงดันไฟฟ้าและกระแส[4]

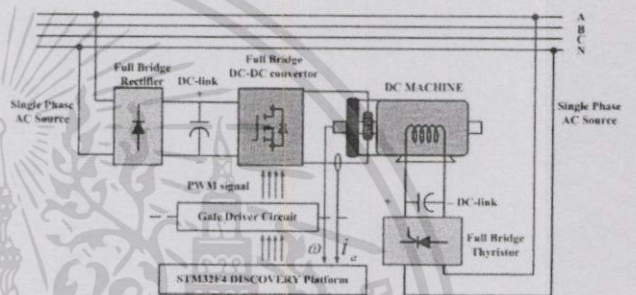


รูปที่ 2 ไอโอะแกรมการต่อวงจรสวิทช์กำลังของคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์

### 3. หลักการทำงาน

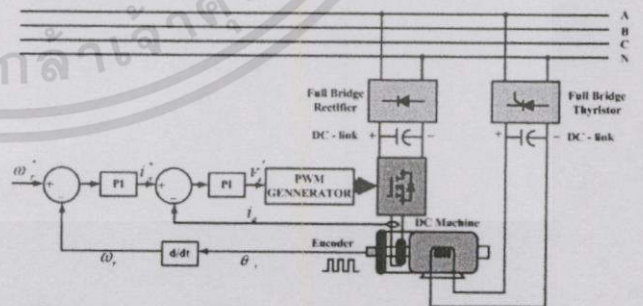
#### 3.1 ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในบทความนี้ประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกคัปปลิงอยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตารี โดยมอเตอร์กระแสตรงชนิดนี้จะมี 2 ขดลวดคือ ขดลวดสนามและขดลวดอาร์มาเจอร์ ซึ่งในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าแบบกระตุ้นแยกจะมีการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เข้าขดลวดสนาม ส่วนขดลวดอาร์มาเจอร์จะมีการป้อนแรงดันไฟฟ้าจากวงจรคอนเวอร์เตอร์ไฟตรง-ไฟตรงชนิดฟูลบริดจ์ ดังแสดงในไอโอะแกรมในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ไอโอะแกรมการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงปิดใช้กระบวนการ PI controller แบบ cascade โดยนำค่าความเร็วรอบอ้างอิงจากกระบวนการเฟสล็อกคูล ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่วัดจากเอนโคเดอร์ และกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่วัดจากเซ็นเซอร์กระแส มาทำการคำนวณด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ จากนั้นสร้างสัญญาณ PWM เพื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงในรูปที่ 4

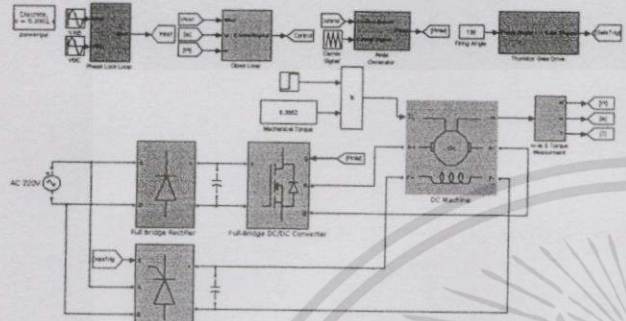


รูปที่ 4 ไอโอะแกรมการควบคุมวงปิดสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การจำลองทางคอมพิวเตอร์

ในการจำลองการทำงานระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink มีจุดประสงค์ในการจำลองเพื่อควบคุมให้ความเร็วรอบมีค่าเท่ากับความเร็วเชิงโรตอร์ของระบบไฟฟ้าแม้ว่ากระทางกลเปลี่ยนไป เพื่อให้เหมือนกับสภาวะทำงานจริงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แสดงด้วยรูปที่ 5



รูปที่ 5 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

### 5. สรุปการทำงาน

โครงการนี้ได้นำเสนอการควบคุมแบบวงปิดสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เป็นการควบคุมความเร็วรอบสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่อาศัยการป้อนกลับค่าความเร็วรอบ และกระแสเพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่าเท่ากับความเร็วรอบเชิงโรตอร์ของระบบไฟฟ้าแม้ว่ากระทางกลมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งระบบจะถูกประมวลผลโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM CortexM4 STM32F4DISCOVERY แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถรักษาความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้คงที่ได้แม้กระทางกลมีการเปลี่ยนแปลงไป และสามารถควบคุมให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำหน้าที่เป็นต้นกำลังให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์สำหรับการขนานเข้ากับระบบไฟฟ้าได้ โดยผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- ผลตอบสนองความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อทำการต่อภาระหรือปลดภาระกับระบบ ความเร็วรอบจะมีการเปลี่ยนแปลงในสภาวะชั่วครู่ จากนั้นจะกลับเข้าสู่ค่า 1 pu. (1500 rpm) ดังเดิม ในกรณีที่มีการยังมีค่ามากขึ้นจะส่งผลทำให้ความเร็วรอบมีการเปลี่ยนแปลงในสภาวะชั่วครู่มากขึ้น แต่ยังสามารถควบคุมให้ความเร็วรอบมีค่าที่ 1 pu. (1500 rpm) ได้

- ผลตอบสนองต่อกระแสอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อทำการต่อภาระเข้าสู่ระบบ กระแสจะมีค่ามากขึ้นเพื่อรักษาแรงบิดทางไฟฟ้าให้เท่ากับแรงบิดทางกล ทำให้คงความสามารถในการรักษาความเร็วรอบไว้ได้ โดยขนาดของกระแสจะขึ้นอยู่กับภาระที่ต่อ ยิ่งภาระมีค่ามากขึ้นก็จะส่งผลให้กระแสมีค่าสูงขึ้น

- ผลตอบสนองต่อแรงบิดทางไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงพบว่าแรงบิดทางไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับกระแสอาร์มาเจอร์เป็นหลัก เมื่อทำการต่อภาระกับระบบพบว่าแรงบิดทางไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดทางกล และเข้าสู่สภาวะคงตัวที่แรงบิดทางไฟฟ้าค่าใหม่ซึ่งยังคงสามารถรักษาความเร็วรอบให้คงที่ เมื่อทำการปลดภาระแรงบิดทางไฟฟ้าจะมีค่าลดลงและเข้าสู่สภาวะคงตัวซึ่งยังคงสามารถรักษาความเร็วรอบให้คงที่ได้เช่นกัน

- ผลการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์เข้ากับระบบไฟฟ้า พบว่าสามารถทำการควบคุมให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าเท่ากับความเร็วเชิงโรตอร์ของระบบไฟฟ้า และหลังจากการขนานสามารถปรับค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่างๆได้

ซึ่งการควบคุมความเร็วรอบแบบวงปิดสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับห้องปฏิบัติการการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์เข้าสู่ระบบไฟฟ้าให้ทำการทดลองได้ง่ายขึ้น

### 4. การทดลองและผลการทดลอง

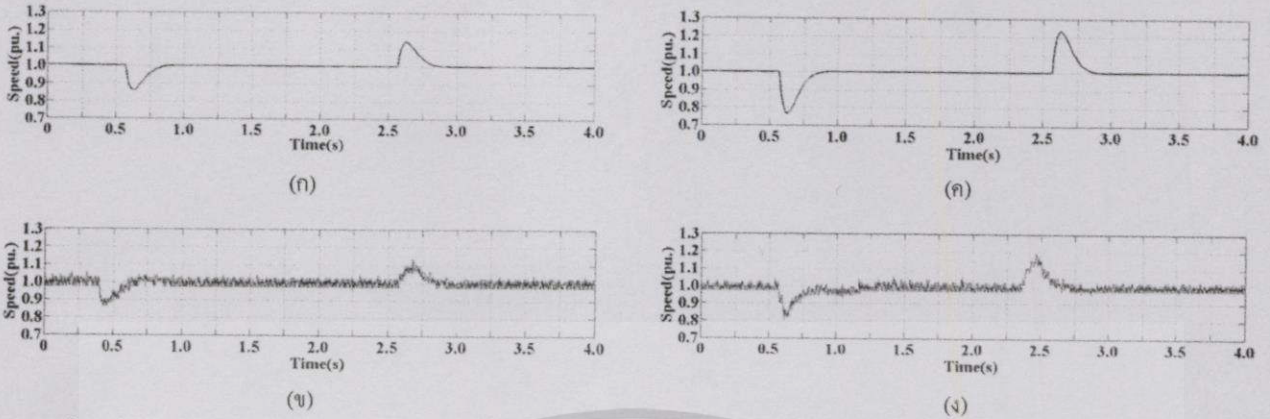
ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นเป็นตัวแปรหลักในการทำงาน โดยในการทดลองได้มีการเพิ่มและลดภาระต่างๆ เพื่อดูผลตอบสนองของความเร็วรอบที่มีการควบคุมแบบวงปิดต่อภาระที่เปลี่ยนไป แสดงดังรูปที่ 6

ผลการทดลองของกระแสอาร์มาเจอร์ เมื่อภาระเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กระแสมีค่าสูงขึ้น โดยในการทดลองนี้จะแสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองชั่วครู่และผลตอบสนองสภาวะคงตัวของกระแสอาร์มาเจอร์ ขณะที่มีการเพิ่มและลดภาระที่ค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 7

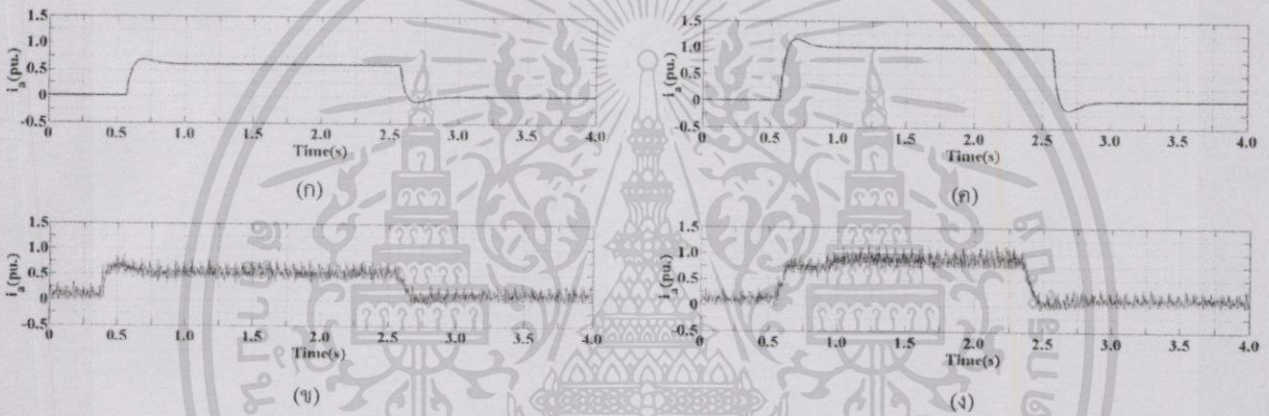
แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงนั้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกระแสอาร์มาเจอร์ ซึ่งในการทดลองเพิ่มหรือลดภาระจะแสดงให้เห็นว่าแรงบิดทางไฟฟ้าของมอเตอร์จะเกิดเปลี่ยนแปลงให้มีค่าเท่ากับแรงบิดทางกลที่เปลี่ยนไปเพื่อรักษาความเร็วให้มีค่าคงที่

ในการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์เข้ากับระบบไฟฟ้า จำเป็นต้องมีเงื่อนไขของการขนานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโรตอร์กับระบบไฟฟ้า 3 ประการ ได้แก่ แรงดันที่ขั้วต้องต่างกันไม่เกิน  $\pm 5\%$  ลำดับเฟสต้องตรงกัน และความถี่ต่างกันไม่เกิน  $\pm 0.067\%$

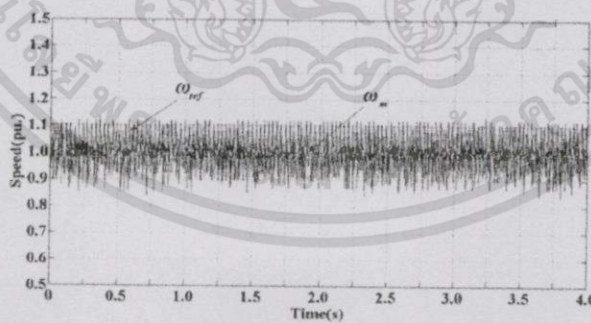
จากการทดสอบจะเห็นว่า การควบคุมความเร็วรอบแบบวงปิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ทำหน้าที่เป็นต้นกำลังให้กับเครื่องกำเนิดสามารถรักษาความเร็วรอบให้มีค่าเท่ากับความเร็วเชิงโรตอร์ของระบบไฟฟ้าดังรูปที่ 8



รูปที่ 6 การทดลองความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ 595.83 วัตต์ (ข) ผลการทดลอง 595.83 วัตต์ (ค) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ 1006.46 วัตต์ (ง) ผลการทดลอง 1006.46 วัตต์



รูปที่ 7 การทดลองกระแสแอมแปร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (ก) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ 595.83 วัตต์ (ข) ผลการทดลอง 595.83 วัตต์ (ค) ผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ 1006.46 วัตต์ (ง) ผลการทดลอง 1006.46 วัตต์



รูปที่ 8 ผลการทดลองความเร็วรอบอ้างอิงกับความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารอ้างอิง

[1] S.Chapman, "Electric Machinery and Power System Fundamentals," McGraw Hill, 2002.  
 [2] T.H Abdelhamid, "Performance of Single-phase DC Drive System Controlled by Uniform P WM Full-Bridge DC-DC Converter," 10th Mediterranean Electrotechnical Conference, pp. 974 - 977 vol.3, May 2000.  
 [3] P.C.Sen, "Principles of electric machines and power electronics," second edition, John Wiley & Sons, INC, 1997.  
 [4] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, "Power Electronics Converters, Applications, and Design," second Edition. John Wiley & Sons, INC.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



นายสรสรเสริญ มีสุข

รหัสนักศึกษา 53011641

เกิดวันที่ 22 พฤศจิกายน 2534

ภูมิลำเนา ชลบุรี

E-mail : sern\_meesuk@hotmail.com



นายสรวิศ โชติเรืองนภา

รหัสนักศึกษา 53011643

เกิดวันที่ 21 พฤศจิกายน 2534

ภูมิลำเนา นนทบุรี

E-mail : sorawit\_ostar@hotmail.com



นายสาโรจน์ ทาบั้นแก้ว

รหัสนักศึกษา 53011671

เกิดวันที่ 8 ธันวาคม 2534

ภูมิลำเนา ชลบุรี

E-mail : doraemonandmax@hotmail.com



นายสุพัฒน์ กิจศิริกุล

รหัสนักศึกษา 53011756

เกิดวันที่ 8 พฤษภาคม 2535

ภูมิลำเนา สุพรรณบุรี

E-mail : kaikomairu@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้