

๕๒

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มี  
แปรงถ่าน

STUDY AND ANALYSIS BEHAVIORS OF BRUSHLESS DC MACHINE



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2546

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 48387  
วัน, เดือน, ปี 24 ต.ค. 2546

ISBN 974-324-757-2

b..... 11 332 642  
i..... 122102 8X

รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# STUDY AND ANALYSIS BEHAVIORS OF BRUSHLESS DC MACHINE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2003

ISBN 974-324-757-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPY RIGHT 2003**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมของเครื่องจักรกลไฟฟ้า กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน
นักศึกษา	นายนิติพงษ์ สมไชยวงศ์
รหัสประจำตัว	43061421
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ประภาส อุดคภูมิพันธ์ุ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษา และวิเคราะห์พฤติกรรมของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน(BLDCM) โดยการใช้โปรแกรม Matlab&Simulink ในการสร้างแบบจำลองของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน โดยศึกษาจากคุณสมบัติ และพฤติกรรมทางพลวัตของเครื่องจักรกลไฟฟ้า เพื่อใช้แบบจำลองนี้ในการศึกษาการทำงานของ BLDCM ผลการทดสอบพบว่า คุณสมบัติที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการสร้างชุดควบคุม BLDCM โดยใช้ไดนาโมมิเตอร์ เป็นเครื่องมือในการทดสอบตามเงื่อนไขต่างๆ ผลงานวิจัยนี้สามารถนำแบบจำลองที่สร้างขึ้นไปใช้จำลองการทำงานของ BLDCM ในสภาวะต่างๆ ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลา และต้นทุนในการทดสอบหรือออกแบบ อีกทั้งยังไม่เกิดความเสียหายขึ้นกับ BLDCM ในกรณีที่ทำกรทดสอบ ภาระเกินพิกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title Study and Analysis behaviors of Brushless DC Machine.  
Student Mr.Nitipong Somchaiwong  
Student I.D. 43061421  
Degree Master of Engineering  
Programme Instrumentation Engineering  
Year 2003  
Thesis Advisor Assoc.Prof. Prapart Ukakimaparn

## ABSTRACT

This thesis presents the study and Analysis behaviors of Brushless DC Machine (BLDCM) advantage of using Matlab&Simulink program to simulate the BLDCM. This method is created based on the dynamic characteristic of the machine. Then the model simulated was used to study the function of BLDCM under various conditions. The results shows that the characteristic and behavior of the machine simulated by using Matlab&Simulink program are equivalent to those tested by Dynamometer. The experiment also shows that not only can this method simulate the operation of BLDCM under various conditions, it can also reduce the designing time and costs and the damage that may occur when testing or overload.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาและวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จาก ผศ.ประภาส อุดคภิมาพันธ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ จากท่านและขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อประหลาด และคุณแม่วรรณมา สมไชยวงศ์ และพี่สาว คุณศิริพร สมไชยวงศ์ ที่ให้กำลังใจและเป็นที่ยกคำปรึกษาในการศึกษาและดำเนินชีวิตเสมอมา ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งในความอนุเคราะห์และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ไสว พงศ์สวัสดิ์ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม ที่ช่วยเหลือ ให้คำแนะนำในบางจุดที่ผู้วิจัยติดปัญหาบางอย่าง ซึ่งมีส่วนช่วยให้ผู้วิจัยเข้าใจในปัญหานั้น

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมที่ให้ความรู้และสถานที่ในการทำงานวิจัย อีกทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างและทดสอบคุณสมบัติของมอเตอร์

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ นักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำต่างๆ พร้อมทั้งยังช่วยตรวจสอบและแก้ไขทฤษฎี อื่นๆ ที่ผิดพลาด จนสำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และยังให้กำลังใจต่อผู้วิจัยตลอดมา

สุดท้ายขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นิติพงษ์ สมไชยวงศ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	III
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	1
1.4 ทฤษฎี หรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้า.....	4
2.1 บทนำ.....	4
2.2 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง.....	4
2.2.1 ชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	4
2.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็ว.....	7
2.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ.....	9
2.3.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	9
2.3.1.1 วงจรสมมูล.....	10
2.3.2 ชิงโครนัสมอเตอร์.....	14
2.3.2.1 คุณสมบัติของแรงบิด.....	15
2.3.2.2 คุณลักษณะของเครื่องจักรกลชิงโครนัสแบบเซเลี่ยนท์โพล.....	17
2.3.2.3 แบบจำลองพลศาสตร์ (Dynamic Model).....	19
2.4 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.4.1	หลักการทํางานเบื้องต้นของ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน	21
2.4.2	การควบคุมการทํางานของ BLDCM 3 เฟส	21
2.5	การเปลี่ยนระนาบ ABC เป็นระนาบ qd0	23
2.5.1	การย้ายแกน	23
บทที่ 3	การออกแบบและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	28
3.1	บทนำ	28
3.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของ Brushless DC Machine	29
3.2.1	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าในระนาบ "a , b , c"	29
3.2.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าในระนาบ "q,d,0"	31
3.3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของ ชุดขับเคลื่อน Brushless DC Machine	33
บทที่ 4	การออกแบบและสร้างชุดควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้า	38
4.1	บทนำ	38
4.2	การออกแบบด้านฮาร์ดแวร์ของชุดควบคุม Brushless DC Machine	39
4.2.1	วงจร Differential Line Receivers	40
4.2.2	วงจรสร้างสัญญาณรูปคลื่นอ้างอิง	41
4.2.3	วงจร มัลติพลาย	41
4.2.4	วงจรสร้างสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม	41
4.2.5	วงจรเปรียบเทียบ	42
4.2.6	วงจรล็อคเอาท์	43
4.2.7	วงจรขั้วเกท	44
4.3	การออกแบบด้านฮาร์ดแวร์ของชุดกำลัง Brushless DC Machine	46
4.3.1	วงจรป้องกันแรงดันย้อนกลับ	46
4.3.2	ไอซีพีทีปริตจอินเวอร์เตอร์	47
บทที่ 5	ผลการทดลองหรือการวิเคราะห์	48
5.1	บทนำ	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.2 ผลจากการจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	49
5.2.1 จำลองพฤติกรรมกรรมการเริ่มหมุน.....	49
5.2.2 จำลองพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนแปลงแรงบิดในสภาวะที่มีภาระทางกล.....	50
5.2.3 การจำลองพฤติกรรมการควบคุมความเร็วโรเตอร์ .....	51
5.3 ผลการทดลองชุดควบคุมที่ได้จากการออกแบบทาง ฮาร์ดแวร์.....	53
5.3.1 ทดสอบพฤติกรรมตอนเริ่มหมุนไปสู่สภาวะคงตัว.....	53
5.3.2 ทดสอบการเพิ่มภาระทางกล.....	55
5.3.3 ทดสอบการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขั้วของ BLDCM.....	59
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	60
6.1 บทสรุป.....	60
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	61
เอกสารอ้างอิง.....	62
ประวัติผู้เขียน.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงความสัมพันธ์ของ มุมองศาทางไฟฟ้าของ โรเตอร์ ,สัญญาณซีดำแหน่ง และค่าที่โปรแกรมใน อิพรอม ณ.ตำแหน่งใดๆ ของ.....	39
5.1 แสดงคุณสมบัติของ มอเตอร์ MITSUBISHI รุ่น HA - SC43.....	48



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก.....	4
2.2 แสดงวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน.....	5
2.3 แสดงวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม.....	6
2.4 แสดงวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ Short shunt compound DC Motor โดยสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้.....	6
2.5 แสดงวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ Long shunt compound DC Motor.....	7
2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด และความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	8
2.7 วงจรมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ.....	10
2.8 วงจรสมมูลย์แสดงการเกาะติดกันทางสนามแม่เหล็กระหว่างวงจรมอเตอร์กับวงจรโรเตอร์ที่หมุนไปด้วยความเร็ว $\omega_m$ .....	14
2.9 วงจรสมมูลย์แสดงพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบนขดลวดสเตเตอร์.....	14
2.10 วงจรสมมูลของซิงโครนัสมอเตอร์เมื่อไม่คิดค่า $R_m$ .....	15
2.11 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องจักรกลซิงโครนัสขณะทำงานเป็นมอเตอร์.....	16
2.12 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องจักรกลซิงโครนัสขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิด.....	16
2.13 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของเซเลี่ยนทีโพล $X_{ds} \neq X_{qs}$ ขณะเป็นมอเตอร์.....	17
2.14 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของเซเลี่ยนทีโพล $X_{ds} \neq X_{qs}$ ขณะเป็นเครื่องกำเนิด.....	18
2.15 วงจรสมมูล d-q ของซิงโครนัสมอเตอร์ บนแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส.....	20
2.16 แสดงการควบคุม BLDCM 3 เฟสโดยใช้ไฟได้ทรานซิสเตอร์ตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์...21	21
2.17 แสดงทิศทางของ สนามแม่เหล็ก.....	22
2.18 สภาวะการทำงานและทิศทางหมุนของมอเตอร์ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา.....	22
2.19 สภาวะการทำงานและทิศทางหมุนของมอเตอร์ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	22
2.20 แกน d ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหลัก และแกน q ที่เกิดจากสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์...23	23
2.21 การย้ายแกนของระบบไฟฟ้า 3 เฟสให้อยู่บนแกน d-q-0 ในระบบแกนอ้างอิงคงที่.....	24
2.22 การแปลงแรงดันบนแกนอ้างอิงหยุดนิ่งไปอยู่บนแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม $\omega_r$ .....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงโครงสร้างและหลักการพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้า กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน.....	28
3.2 องค์ประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าใช้อ้างอิงในระนาบ "a,b,c" และ "q,d,0".....	29
3.3 บล็อกไดอะแกรมของ BLDCM เพื่อนำไปสร้างในโปรแกรม MABLAB&SIMULINK.....	32
3.4 บล็อกไดอะแกรมการแปลงแรงดันจากระนาบ "a,b,c" เป็น "q,d,0".....	32
3.5 บล็อกไดอะแกรมของ BLDCM ที่สร้างด้วยโปรแกรม MABLAB&SIMULINK.....	32
3.6 แสดงการสร้างสัญญาณรูปคลื่นอ้างอิง เฟส A,B,C ที่สมมาตรกันและห่างกัน 120 องศา ทางไฟฟ้า ที่สร้างโดยรับค่าสัญญาณ 1A,2A,3A จากเกนยโคดเอนโคดเดอร์.....	33
3.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณรูปคลื่น อ้างอิงด้วยโปรแกรม MATLAB&SIMULINK.....	34
3.8 แสดงรูปคลื่นที่สร้างจากสมการที่ (3.17),(3.18),(3.19) ใช้ในการสร้างรูปคลื่น อ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง.....	34
3.9 แสดงการเปรียบเทียบของสัญญาณรูปคลื่นอ้างอิง และสัญญาณรูปคลื่น สามเหลี่ยมความถี่สูง เพื่อสร้างสัญญาณพีดับลิวเอ็ม.....	34
3.10 บล็อกไดอะแกรมการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส PWM....	35
3.11 แสดงสัญญาณ PWM ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ .....	35
3.12 แสดงรูปคลื่น $(v_c)$ , $(v_{\omega})$ , $(v_{\omega})$ ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยที่ $v_c$ เป็นรูปคลื่นอ้างอิง $v_{\omega}$ คือแรงดัน เกตต์พุตของอินเวอร์เตอร์ $v_{\omega}$ เป็นแรงดัน $v_{\omega}$ เฟสของมอเตอร์.....	36
3.13 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ อินเวอร์เตอร์ โดยการ แทนค่าตามหมายเลขสมการ.....	36
3.14 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ อินเวอร์เตอร์.....	37
4.1 บล็อกไดอะแกรมของแสดงโครงสร้างชุดควบคุม และชุดกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อน BLDCM.....	38
4.2 แสดงส่วนประกอบของวงจรชุดควบคุมที่ใช้ ในการควบคุม BLDCM.....	39
4.3 รูปคลื่นสัญญาณอ้างอิง เฟส A,C สร้างโดยการรับสัญญาณ เกนยโคด จาก เอนโคดเดอร์ มาซึ่งค่าใน EPROM.....	40

# สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 วงจร Differential Line Receivers.....	40
4.5 วงจรสร้างสัญญาณรูปคลื่นอ้างอิงจะใช้ทั้งหมด 2 ชุด คือสร้างสัญญาณอ้างอิง เฟส A,C.....	41
4.6 วงจร Multiplier ปรับแต่งสัญญาณอ้างอิง เฟส A,B และ C ที่สามารถปรับแต่งขนาดได้.....	41
4.7 วงจรสร้างสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม ที่สามารถปรับความถี่ของสัญญาณได้ โดยการเปลี่ยนค่า ตัวเก็บประจุ ที่ขา 10 และความต้านทานปรับค่าได้ที่ต่อระหว่างขา 4 กับขา 5.....	42
4.8 วงจรเปรียบเทียบ สร้างสัญญาณรูปคลื่น พีคดับลิวเอ็ม ใช้ไอซีเบอร์ LM 311.....	42
4.9 รูปคลื่นสัญญาณอ้างอิง 1 เฟส ที่นำมาเปรียบเทียบ.....	42
4.10 สัญญาณอ้างอิงและสัญญาณสามเหลี่ยม(10kHz) ที่นำมาเปรียบเทียบ.....	43
4.11 สัญญาณพีคดับลิวเอ็มที่ได้จากการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณอ้างอิง 1 เฟส กับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม.....	43
4.12 วงจรลอคเอาท์ ป้องกันการช็อตทรู( Short Through )ของ ไอซีบีที ในกิ่งเดียวกัน.....	44
4.13 สัญญาณเอาท์พุทของวงจรถอดเอาท์ ที่ใช้ในวงจรถอบคุม มีค่าเท่ากับ $2 \mu sec$ .....	44
4.14 วงจรขับเกท สร้างสัญญาณควบคุมการเปิด – ปิด ไอซีบีที และแยกกราวด์จากวงจรถอบคุมกับวงจรถัก.....	44
4.15 เอาท์พุทของวงจรถักเบส มีขนาด บวก 12 โวลต์ และ ลบ 9 โวลต์ ใช้ควบคุมการเปิด – ปิด ไอซีบีที.....	45
4.16 แสดงชุดวงจรถอบคุมที่ใช้ในการทดสอบ.....	45
4.17 แสดงชุดวงจรถักเบส ที่ใช้ในการทดสอบ.....	45
4.18 แสดงส่วนประกอบของชุดกำลัง ในการขับเคลื่อน BLDCM.....	46
4.19 แสดงวงจรที่ออกแบบเพื่อป้องกันแรงดันย้อนกลับ.....	46
4.20 แสดงวงจรถักเบสป้องกันแรงดันย้อนกลับที่สร้างขึ้นเพื่อป้องกันความเสียหาย ที่จะเกิดกับไอซีบีที ,วงจรถอบคุม และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	47
4.21 วงจรถักเบส ไอซีบีที บริจด์ อินเวอร์เตอร์.....	47
4.21 วงจรถักเบส ไอซีบีที บริจด์ อินเวอร์เตอร์ ที่สร้างขึ้นโดยใช้ ไอซีบีที เบอร์ IRG4PC50UD.....	47

# สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ BLDCM และ อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส PWM ที่สร้างด้วย โปรแกรม Matlab&Simulink.....	49
5.2 ความเร็วโรเตอร์ ( $\omega_r$ ) และ แรงบิดสนามแม่เหล็ก ( $T_{em}$ ) .....	50
5.3 แรงดันเฟส ( $V_{as}$ ) แรงดันไลน์ ( $V_{ab}$ ) และกระแสเฟส ( $I_{as}$ ).....	50
5.4 ความเร็วโรเตอร์( $\omega_r$ ),แรงบิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า( $T_{em}$ )และภาระทางกล $T_L$ (Nm).....	51
5.5 แรงดันเฟส( $V_{as}$ ) แรงดันไลน์ ( $V_{ab}$ )และกระแสเฟส ( $I_{as}$ ) .....	51
5.6 ความเร็วโรเตอร์( $\omega_r$ ),แรงบิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า( $T_{em}$ ) และภาระทางกล $T_L$ (Nm).....	52
5.7 แรงดันเฟส ( $V_{as}$ ) แรงดันไลน์ ( $V_{ab}$ )และกระแสเฟส ( $I_{as}$ ).....	52
5.8 แสดงพฤติกรรมของกระแสไฟฟ้าและความเร็วของ BLDCM ในสภาวะเริ่มหมุนไปสู่สภาวะคงตัว.....	53
5.9 แสดงรูปขยายพฤติกรรมของกระแสเฟสในช่วงระยะเวลาที่เริ่มหมุนไปสู่สภาวะคงตัวพิจารณาช่วงคาบของกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบเนื่องมาจากความถี่ของสัญญาณทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายได้มาจากความเร็วรอบของ BLDCM.....	54
5.10 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันระหว่างเฟสของ BLDCM เมื่ออยู่ในภาวะคงตัว.....	54
5.11 แสดงรูปคลื่นกระแสเฟสและ กราฟการเพิ่มภาระทางกลแบบทันทีทันใดที่ 0.3 Nm.....	55
5.12 ส่วนขยายรูปคลื่นกระแสช่วงขณะเปลี่ยนแปลงภาระทางกล เมื่อภาระทางกลเพิ่มขึ้น ขนาดของกระแสก็จะมาก และช่วงคาบของของกระแสกว้างขึ้นแสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบของ BLDCM ลดลงด้วย.....	55
5.13 ส่วนขยายของกระแสและเส้นกราฟของภาระทางกล เมื่อทำการปลดภาระทางกลออกแบบทันทีทันใดกระแสมีขนาดลดลงและมีความถี่ของสัญญาณเพิ่มมากขึ้น.....	56
5.14 แสดงส่วนขยายรูปคลื่นกระแสให้เห็นชัดเจนยิ่งขึ้น พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของช่วงคาบกระแขยายช่วงเวลาเปลี่ยนแปลงภาระทางกลเทียบกับกระแส.....	56
5.15 แสดงส่วนขยายรูปคลื่นกระแสของ BLDCM ในสภาวะคงตัวเมื่อไม่มีภาระทางกลพิจารณารูปร่างของกระแส เนื่องจาก การใช้แรงดันรูปคลื่นขั้นบันไดมาใช้ในการสร้างสัญญาณขับเกท จึงทำให้ได้กระแสดังรูป.....	57
5.16 แสดงส่วนขยายรูปคลื่นกระแสของ BLDCM ในสภาวะคงตัว เมื่อมีภาระทางกล 0.3 Nm.....	57

# สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.17 แสดงพฤติกรรมของความเร็วรอบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางกลแบบทันทีทันใดพิจารณากราฟความเร็วรอบของ BLDCM (กราฟล่าง) ความเร็วรอบจะค่อยๆ ลดลง ในขณะที่เพิ่มภาระทางกลแบบทันทีทันใด (กราฟบน)เนื่องจากความเฉื่อย ของ BLDCM .....58	
5.18 แสดงพฤติกรรมของความเร็วรอบ(กราฟล่าง) ค่อยๆ ลดลง เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของภาระทางกล 0.3 Nm แบบทันทีทันใด พิจารณากราฟภาระทางกล(กราฟบน) จะมีการกระเพื่อม เนื่องมาจาก การใช้รูปคลื่น แบบ ชันบันได.....58	
5.19 แสดงพฤติกรรมของความเร็วรอบเมื่อทำการลดภาระทางกล(กราฟบน) จาก 0.3 Nm เป็น 0 Nm แบบทันทีทันใด พิจารณากราฟความเร็วรอบ(กราฟล่าง) จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนเข้าสู่สภาวะคงตัว .....59	
5.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้ากับความเร็วยรอบที่เป็นเชิงเส้นซึ่งเป็นคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ทดสอบที่แรงบิดต่างกันคือ $T_1$ และ $T_2$ เมื่อ $T_1 > T_2$ .....59	

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน(BLDCM)ได้ถูกออกแบบเข้ามาแทนที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบดั้งเดิมอย่างแพร่หลายด้วยคุณสมบัติเด่นสองประการหลักอันได้แก่โครงสร้างกะทัดรัด เนื่องจากไม่ต้องมีแปรงถ่านและลดส่วนประกอบทางกลลงทำให้การสูญเสียทางกลที่อยู่ในรูปของความหนืดจากคอมมิวเตเตอร์หมดไป เหลือเพียงความหนืดจากแบร์ริงบริเวณเพลลาของมอเตอร์ และความหนืดของอากาศบริเวณช่องว่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น อันเป็นผลให้ผลการตอบสนองทางกลของ BLDCM ดีเยี่ยม เมื่อเทียบตามขนาดที่เท่ากันกับเครื่องจักรกลแบบดั้งเดิม อย่างไรก็ตามในการใช้งาน BLDCM จำเป็นต้องมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาช่วย อีกทั้งยังไม่สามารถทดสอบคุณสมบัติจริงของตัวมอเตอร์เปล่าได้โดยตรง ถ้าปราศจากอุปกรณ์ขับเคลื่อนจำเป็น ดังนั้นการออกแบบอุปกรณ์ขับเคลื่อนให้กับมอเตอร์ต้องอาศัยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ถูกต้อง ซึ่งการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาแทนมอเตอร์และจำลองการทำงานในสภาวะการทำงานแบบต่างๆ เป็นทางหนึ่งที่จะศึกษาผลตอบสนองของมอเตอร์ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ทางกลและทางไฟฟ้าและลดเวลาในการสร้างงานจริง จึงนับว่ามีความจำเป็นอย่างมากแต่ทั้งนี้แบบจำลองที่สร้างขึ้นมาจะต้องมีความถูกต้องกับการทำงานจริงมากที่สุดซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้ได้เลือกใช้ มอเตอร์ MITSUBISHI รุ่น HA\_SC43 เป็นกรณีศึกษา

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยฉบับนี้ต้องการนำเสนอการศึกษาพฤติกรรมทางไฟฟ้าและทางกลของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน(BLDCM) ด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของ BLDCM โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ นำมาวิเคราะห์และศึกษาพฤติกรรมของ BLDCM ซึ่งจะใช้โปรแกรม Matlab&Simulink ช่วยในการจำลองหาพฤติกรรมทางไฟฟ้าและทางกลของ BLDCM ในสภาวะการทำงานที่ต่างกันคือ ในสภาวะเริ่มหมุนจนเข้าสู่สภาวะคงตัว, การเปลี่ยนแปลงภาระทางกล และการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขั้วของ BLDCM โดยจะนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบ ระบบควบคุม และขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้า

### 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

พฤติกรรมทางไฟฟ้าและทางกลของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน (BLDCM) โดยทั่วไปสามารถทราบค่าพฤติกรรมที่เข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วเท่านั้น ไม่สามารถทราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงพฤติกรรม ในช่วงระหว่างที่มีการเปลี่ยนแปลงจากสภาวะภายนอก เช่น มีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องจักรกลไฟฟ้า หรือ การเปลี่ยนแปลงภาระทางกล ดังนั้นงานวิจัยนี้จะแสดงพฤติกรรมของเครื่องจักรกลในช่วงสภาวะดังกล่าว โดยนำเสนอวิธีการวิเคราะห์ และการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ BLDCM ด้วยการใช้วงจรสมมูลย์ และข้อมูลจากแผ่นป้ายของ BLDCM มาเขียนอัลกอริทึม และจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Matlab&Simulink เพื่อใช้จำลองหาพฤติกรรมทางไฟฟ้าและทางกลของ BLDCM ในสภาวะการทำงานแบบต่างๆ

#### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ จะใช้โปรแกรม Matlab&Simulink ในการแสดงพฤติกรรมทางไฟฟ้าและพฤติกรรมทางกลของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน(BLDCM) การเขียนโปรแกรมจะนำวิธีการเปลี่ยนระนาบ ABC เป็นระนาบ  $qd0$  มาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า และอินเวอร์เตอร์ เพื่อลดจำนวนสมการและจำนวนตัวแปร ซึ่งจะทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีรูปแบบที่ไม่ซับซ้อน ในงานวิจัยฉบับนี้ยังใช้ผลจากการจำลองไปเปรียบเทียบกับการทดลองจริงโดยใช้ ชุดขับเคลื่อนแบบเวคเตอร์คอนโทรล ซึ่งใช้เอนโคเดอร์เป็นตัวตรวจจับตำแหน่งในการสร้างสัญญาณอ้างอิงแบบซึ้นบันได 3 เฟส ให้กับวงจรมอดูเลตตามความกว้างพัลส์(PWM) และใช้ไดนาโมมิเตอร์เป็นเครื่องมือในการทดสอบ จากการจำลองพฤติกรรมทางไฟฟ้าและทางกลของ BLDCM ทำให้ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์ผลการจำลองได้ในหลายลักษณะ ทำการเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จุดทำงานต่างๆกันได้ง่าย ซึ่งโปรแกรมและวงจรทดลองในวิทยานิพนธ์นี้จึงเป็นประโยชน์ต่อการนำไปศึกษาคุณสมบัติของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน

#### 1.5 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้จะกล่าวถึงการออกแบบ และการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน(BLDCM) โดยใช้โปรแกรม Matlab&Simulink เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมทางไฟฟ้าและทางกล นำไปเปรียบเทียบกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงโดยการสร้างชุดขับเคลื่อน BLDCM ด้วยข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์และจำลองการทำงาน โดยให้หลักการควบคุมแบบเวคเตอร์คอนโทรล ซึ่งใช้เอนโคเดอร์เป็นตัวตรวจจับตำแหน่งในการสร้างสัญญาณอ้างอิงแบบซึ้นบันได 3 เฟส ให้กับวงจรมอดูเลตตามความกว้างพัลส์(PWM) ซึ้นมาทำการทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้าต้นแบบ โดยเลือกใช้มอเตอร์ MITSUBISHI รุ่น HA\_SC43 เป็นกรณีศึกษา เพื่อพิสูจน์ความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะได้เปรียบเทียบให้เห็นในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

การทำงานวิจัยฉบับนี้มีขั้นตอนการศึกษาเริ่มจากการศึกษาเกี่ยวกับ “การสับคั่นและจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน” เช่นการศึกษาทำความเข้าใจเกี่ยวกับโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้า, สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการหาค่าปริมาณทางไฟฟ้าและสมการความสัมพันธ์ทางกลของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน ฯลฯ ซึ่งจะนำทฤษฎี และวิธีการต่างๆ มาใช้เป็นแนวทางในการคำนวณ และออกแบบสร้างชุดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิจัย จากนั้นศึกษาวิธีการขั้นตอนการออกแบบชุดขับเคลื่อน BLDCM ด้วยหลักการควบคุมแบบเวกเตอร์คอนโทรล โดยใช้เอนโคเดอร์เป็นตัวตรวจจับตำแหน่งในการสร้างสัญญาณอ้างอิงแบบซึ้นบันได 3 เฟส ให้กับวงจรมอดูเลตตามความกว้างพัลส์(PWM) เมื่อได้วิธีการและขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แล้วจึงทำการจำลองพฤติกรรมของ BLDCM โดยใช้โปรแกรม Matlab&Simulink จากนั้นทำการออกแบบ และสร้างชุดขับเคลื่อน BLDCM โดยใช้หลักการข้างต้น เพื่อใช้เปรียบเทียบกับผลจากการจำลอง ทำการวิเคราะห์ผลการเปรียบเทียบ และนำเสนอวิธีการแก้ไขเพื่อใช้ในการปรับปรุงข้อบกพร่องของแบบจำลอง ให้มีการทำงานใกล้เคียงกับระบบจริงมากที่สุด และนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

## บทที่ 2

# ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเครื่องจักรกลไฟฟ้า

### 2.1 บทนำ

เครื่องจักรกลไฟฟ้าเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปพลังงานชนิดหนึ่งคือ สามารถเปลี่ยนพลังงานกลให้อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าเรียกเครื่องจักรกลชนิดนี้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และเครื่องจักรกลที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลเรียกว่ามอเตอร์ ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวข้องกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน ดังนั้นจึงนำเสนอเครื่องจักรกลไฟฟ้า ในส่วนเฉพาะที่เป็นมอเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยซึ่งจะนำเสนอในหัวข้อต่อไป

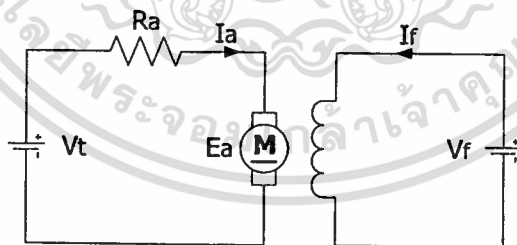
### 2.2 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแตกต่างกันที่มอเตอร์ไฟฟ้าจะป้อนพลังงานไฟฟ้าเข้าไป และจ่ายพลังงานกลออกมา แต่ตรงกันข้ามเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะทำการให้พลังงานเข้าไป แล้วจ่ายพลังงานไฟฟ้าออกมา นอกจากนี้ทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าก็ต่างกันด้วย คือ มอเตอร์ไฟฟ้ารับกระแสไฟฟ้าจากภายนอก ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะจ่ายกระแสไฟฟ้าออกไปภายนอก

#### 2.2.1 ชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบ่งเป็น 4 ชนิด ดังนี้

2.2.1.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก (Separately Excited DC Motor) ซึ่งมีวงจรสมมูลดังรูป 2.1



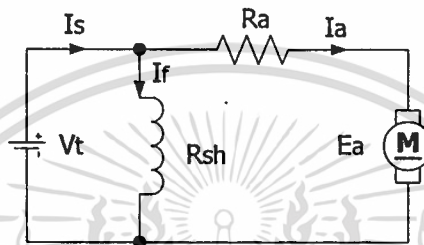
รูปที่ 2.1 แสดงวงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก การควบคุมคักดาที่ตกคร่อมอาร์เมเจอร์และขดสนาม(Field) นั้นแยกอิสระต่อกัน ขณะที่ทำงานเป็นมอเตอร์คักดาไฟฟ้าที่ขั้ว ( $V_f$ ) จะมีค่ามากกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ( $E_a$ ) ดังนั้นพลังงานไฟฟ้าจะจ่ายออกมาจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวดอาร์เมเจอร์ โดยสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

$$V_t = E_a + I_a R_a \quad (2.1)$$

- เมื่อ  $I_a$  คือ กระแสอาร์เมเจอร์ (armature current), A  
 $V_t$  คือ ศักดาไฟฟ้าตกคร่อมอาร์เมเจอร์ (armature voltage), V  
 $R_a$  คือ ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (resistance of the armature circuit),  $\Omega$

### 2.2.1.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน (Shunt DC Motor) ซึ่งมีวงจรมูลย ดังรูป 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงวงจรมูลยของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน

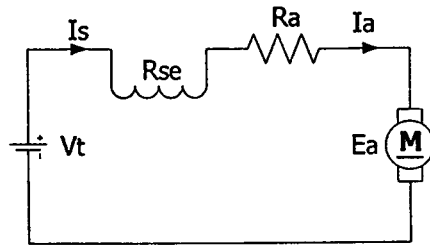
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน ขดสนามและอาร์เมเจอร์ต่อกับแหล่งจ่ายไฟเดียวกัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่ในวงจรขดสนามจะแปรตามศักดาไฟฟ้าที่ขั้ว ( $V_t$ ) ซึ่งจ่ายมาจากแหล่งจ่ายไฟ โดยสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$V_t = E_a + I_a R_a \quad (2.2)$$

$$I_s = I_a + I_f \quad (2.3)$$

- เมื่อ  $I_s$  คือ กระแสที่มาจากแหล่งจ่าย, A  
 $I_f$  คือ กระแสที่ผ่านขดสนาม (field current), A

### 2.2.1.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม (Series DC Motor) ซึ่งมีวงจรมูลยดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม กระแสที่ไหลผ่านขดสนาม คือ กระแสที่ไหลผ่าน อาร์เมเจอร์ ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่ขดสนาม(field flux) จึงขึ้นกับกระแสอาร์เมเจอร์ด้วย เมื่อภาระเพิ่มขึ้นกระแสอาร์เมเจอร์เพิ่มจะมีผลทำให้เส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้วมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

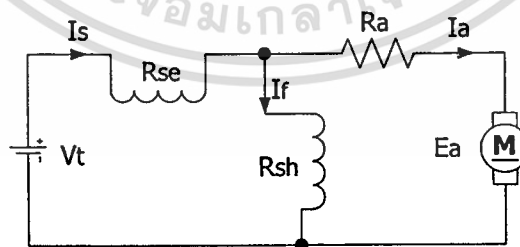
$$V_t = E_a + I_a (R_a + R_{se}) \quad (2.4)$$

$$I_a = I_s \quad (2.5)$$

เมื่อ  $R_{se}$  คือ ความต้านทานที่ต่ออนุกรม

2.2.1.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม( Compound DC Motor ) โดยแบ่งแบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมตามการต่อวงจรได้เป็น 2 แบบ ดังนี้คือ

2.2.1.4.1 Short shunt compound DC Motor ซึ่งมีการต่อขลวดสร้างสนามแบบขนานต่อคร่อมขลวดอาร์เมเจอร์ โดยที่ขลวดสร้างสนามแบบอนุกรมต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายไฟดังวงจรสมมูลย์ในรูป 2.4



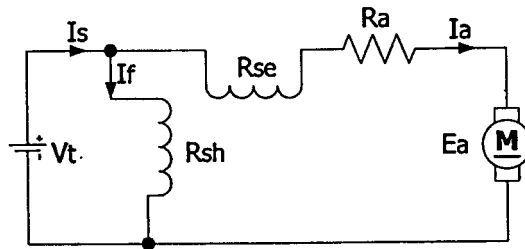
รูปที่ 2.4 แสดงวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ Short shunt compound DC Motor โดยสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$V_t = E_a + I_a R_a + I_s R_{se} \quad (2.6)$$

$$I_s = I_a + I_f \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.4.2 Long shunt compound DC Motor มอเตอร์แบบนี้จะมีขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กแบบอนุกรมต่ออนุกรมกับขดลวดอาร์เมเจอร์ ส่วนทางด้านขดลวดสร้างสนามแบบขนานต่อคร่อมขั้วไฟฟ้าป้อนเข้า ดังวงจรสมมูลย์ในรูป 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ Long shunt compound DC Motor

โดยสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$V_t = E_a + I_a (R_a + R_{se}) \quad (2.8)$$

$$I_s = I_a + I_f \quad (2.9)$$

### 2.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็ว

ในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แรงบิดทางไฟฟ้า ( electromagnetic torque ) เกิดจากฟลักซ์กระตุ้น ( field flux )  $\phi_f$  และกระแสอาร์เมเจอร์  $i_a$  ส่วนแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (back-emf) เกิดจากการหมุนของอาร์เมเจอร์ที่ความเร็วเชิงมุม  $\omega_m$  และฟลักซ์กระตุ้น  $\phi_f$

$$T_{em} = k_t \phi_f i_a \quad (2.10)$$

$$e_a = k_e \phi_f \omega_m \quad (2.11)$$

จากสมการ 2.10 , 2.11 จะได้

$$P_m = \omega_m T_{em} = k_t \phi_f \omega_m i_a \quad (2.12)$$

$$P_e = e_a i_a = k_e \phi_f \omega_m i_a \quad (2.13)$$

เมื่อ  $k_t$  คือ ค่าคงที่ของแรงบิด (torque constant)

$k_e$  คือ ค่าคงที่ของโวลต์เตจ (voltage constant)

$e_a$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$i_a$	คือ กระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์
$\omega_m$	คือ ความเร็วเชิงมุม
$\phi_f$	คือ ฟลักซ์กระตุ้น
$P_m$	คือ กำลังทางกล
$P_e$	คือ กำลังทางไฟฟ้า

ที่สถานะคงตัว (steady state) สมมติให้ฟลักซ์กระตุ้น  $\phi_f$  มีค่าคงที่ โดยกำหนดให้  $k_T = k_f \phi_f$  และ  $k_E = k_e \phi_f$  จะได้

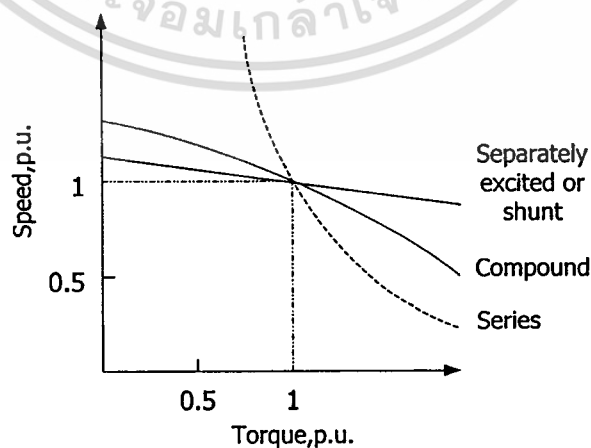
$$T_{em} = k_T I_a \quad (2.14)$$

$$E_a = k_E \omega_m \quad (2.15)$$

จากวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบกระตุ้นแยกจะได้อัตราเร็วเชิงมุมเป็นฟังก์ชันของ  $T_{em}$

$$\omega_m = \frac{1}{k_E} \left( V_t - \frac{R_a}{k_T} T_{em} \right) \quad (2.16)$$

ขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำการขับภาระทางกล ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของตัวหมุนกับแรงบิดที่ขับภาระ ซึ่งความเร็วของมอเตอร์จะตกลงเมื่อภาระเพิ่มขึ้นหรือเพิ่มแรงบิดขึ้นที่มอเตอร์ตัวขับ แต่จะตกลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงว่าที่การต่อขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กเป็นแบบใด ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงบิดขับภาระ ดังแสดงตามรูป 2.6



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับ

### 2.3.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor)

มอเตอร์เหนี่ยวนำจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นสเตเตอร์ และส่วนโรเตอร์ เมื่อต่อไฟให้ขดลวดบนสเตเตอร์ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนตัดผ่านโรเตอร์ ส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นในช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์ โดยที่สนามแม่เหล็กนี้จะหมุนรอบสเตเตอร์ด้วยความเร็วซิงโครนัส(Synchronous speed) ตามสมการ

$$N_e = \frac{120f_e}{p} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $N_e$  คือความเร็วซิงโครนัส มีหน่วยเป็น rpm.

$f_e$  คือความถี่ของคลื่นไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไป

$p$  คือจำนวนขั้วแม่เหล็ก

มอเตอร์เหนี่ยวนำ หากขาดความเร็วที่แตกต่างระหว่างสนามแม่เหล็กหมุนบน สเตเตอร์กับความเร็วของตัวโรเตอร์แล้ว การเหนี่ยวนำจะไม่เกิดขึ้น แต่เมื่อใดก็ตามที่มอเตอร์มีโหลดแม้แต่เพียงแคแรงเสียดทานต่อการหมุนของโรเตอร์ ก็จะทำให้โรเตอร์หมุนช้ากว่าสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ทันที การที่ภาระทางกลทำให้โรเตอร์หมุนช้ากว่าสนามแม่เหล็กนี้เราเรียกว่าเกิดการไถล และเรามักเรียกค่าไถลด้วยการเรียกทับศัพท์ว่า *ค่าสลลิป (slip)* โดยให้นิยามของค่าสลลิปตามปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นว่า สลิป หมายถึง ค่าความแตกต่างระหว่างความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ กับความเร็วของโรเตอร์  $N_e - N_r$  และสามารถเขียนเป็นค่าสลลิปต่อหนึ่งหน่วย (Per unit slip) ได้ดังนี้

$$S = \frac{N_e - N_r}{N_e} = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e} = \frac{\omega_{ls}}{\omega_e} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $\omega_e$  คือ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์

$\omega_r$  คือ ความเร็วเชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์

$\omega_{ls}$  คือ ความเร็วเชิงมุมของสลลิป

### สมการแรงบิดสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_e = \pi \left( \frac{P}{2} \right) l_r B_p F_p \sin \delta \quad (2.19)$$

เมื่อ  $l$  = ความยาวตามแนวแกนของตัวนำที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก

$r$  = รัศมีของโรเตอร์

$B_p$  = ค่าสูงสุดของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในช่องว่างอากาศ

$F_p$  = ค่าสูงสุดของแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ (rotor mmf)

จากสมการที่ (2.19) สามารถเขียนอีกรูปหนึ่งคือ

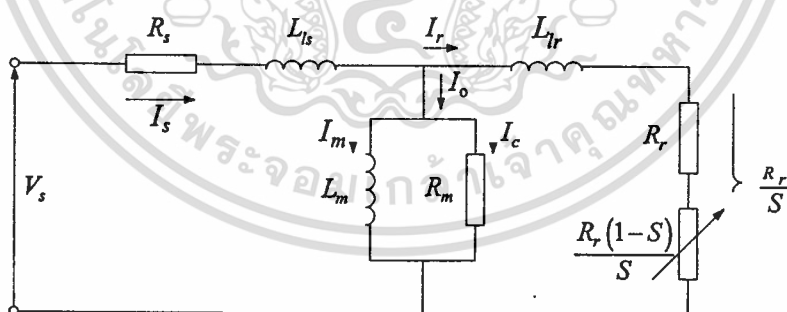
$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) |\bar{\psi}_m| |\bar{I}_r| \sin \delta \quad (2.20)$$

เมื่อ  $|\bar{\psi}_m|$  คือค่าสูงสุดของสนามแม่เหล็กต่อขั้วแม่เหล็ก

$|\bar{I}_r|$  คือกระแสสูงสุดบนโรเตอร์

### 2.3.1.1 วงจรสมมูล

โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงแต่ต่างกันตรงที่ด้านทุติยภูมิ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถหมุนได้ ดังนั้นจึงสามารถเขียนวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ในลักษณะเดียวกันกับหม้อแปลงไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 2.7

$$I_r = nI_r' = \frac{n^2 S V_m}{R_r' + j\omega_{sl} L_r}$$

$$I_r = \frac{V_m}{\left( \frac{R_r}{S} \right) + j\omega_e L_r} \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.21) จะเห็นว่าถ้าค่า  $S$  ยิ่งมาก  $I_r$  ก็ยิ่งมาก การรับภาระทางกลของมอเตอร์ก็  
จะถูกส่งผ่านเข้าสู่ระบบในรูปของการเปลี่ยนค่า สลิป  $S$  ถ้าไหลต่น้อยคือสลิป  $S$  ก็เข้าใกล้ 0 แต่  
ถ้าไหลตมมากค่าสลิป  $S$  ก็เข้าใกล้ 1

จากสมการ (2.20) เราสามารถเขียนสมการอยู่ในรูปของขนาดได้คือ

$$T_e = k\psi_m I_r \sin \delta \quad (2.22)$$

เนื่องจาก  $\psi_m$  จะแปรผันโดยตรงกับ  $I_m$  ดังนั้น

$$T_e = k' I_m I_r \sin \delta \quad (2.23)$$

หากประมาณว่า  $R_m \rightarrow \infty$  จนทำให้  $I_c \rightarrow 0$  จะทำให้  $I_o \cong I_m$  และถ้าหลัง  $V_m \cong 90^\circ$   
และมี ผลทำให้  $I_r \cos(\delta - 90^\circ) = I_r \sin \theta$  แต่เนื่องจาก  $\cos(\delta - 90^\circ) = \sin \delta$  เราจึงเขียน  
สมการ  $T_e$  ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} T_e &= k' I_m I_r \sin \delta \\ &= k' I_m I_a \end{aligned} \quad (2.24)$$

เมื่อ  $I_a = I_r \sin \theta$  ซึ่งถือเป็นส่วนประกอบของแรงบิด (torque component) ที่แผ่ตัว  
อยู่ในกระแสเตเตอร์ สำหรับค่าทางไฟฟ้าอื่น ๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

$$\text{กำลังไฟฟ้าขาเข้า} \quad P_{in} = 3V_s I_s \cos \theta \quad (2.25)$$

$$\text{กำลังสูญเสียในขดลวดด้านสเตเตอร์} \quad P_{ls} = 3I_s^2 R_s \quad (2.26)$$

$$\text{การสูญเสียในแกนเหล็ก} \quad P_{lc} = 3 \frac{V_m^2}{R_m} \quad (2.27)$$

$$\text{กำลังที่ข้ามช่องว่างอากาศไปโรเตอร์} \quad P_g = 3I_r^2 \frac{R_r}{S} \quad (2.28)$$

$$\text{กำลังสูญเสียในตัวนำด้านโรเตอร์} \quad P_{lr} = 3I_r^2 R_r \quad (2.29)$$

$$\text{กำลังไฟฟ้าขาออก} \quad P_o = P_g - P_{lr} = 3I_r^2 R_r \frac{1-S}{S} \quad (2.30)$$

$$\text{กำลังกลที่เพลลา} \quad P_{sh} = P_o - P_{FW} \quad (2.31)$$

เมื่อ  $P_{FW}$  คือกำลังสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและแรงต้านของลม ส่วนการสูญเสียในแกนเหล็กที่ตัวโรเตอร์นั้นได้ถูกนำไปรวมไว้กับสเตเตอร์ตั้งแต่เขียนวงจรสมมูลแล้ว

เนื่องจาก

$$P = T\omega$$

ดังนั้น

$$T_e = \frac{P_o}{\omega_m}$$

แทนค่า  $P_o$  ในสมการที่(2.30)

$$= \frac{3}{\omega_m} I_r^2 R_r \frac{1-S}{S} = \frac{3}{\omega_m} \quad (2.32)$$

$\omega_m$  คือความเร็วเชิงมุมทางกลของโรเตอร์ มีค่าเท่ากับ  $\left(\frac{2}{P}\right)\omega_r$

จากสมการ 2.18

$$S = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e}$$

จะได้

$$\omega_r = \omega_e - S\omega_e = (1-S)\omega_e \quad (2.33)$$

$$\therefore \omega_m = \left(\frac{2}{P}\right)(1-S)\omega_e \quad (2.34)$$

แทนใน (2.32) จะได้

$$T_e = 3 \left(\frac{P}{2}\right) I_r^2 \frac{R_r}{S\omega_e} \quad (2.35)$$

แทนในสมการ (2.28) ลงในสมการ (2.35) จะได้

$$T_e = \left(\frac{P}{2}\right) \frac{P_g}{\omega_e} \quad (2.36)$$

เนื่องจาก

$$I_r = \frac{V_s}{\sqrt{(R_s + R_r/s)^2 + \omega_e^2 (L_s + L_r)^2}} \quad (2.37)$$

$$\text{แทนสมการ (2.35) จะได้ } T_e = 3 \left(\frac{P}{2}\right) \frac{R_r}{S\omega_e} \frac{V_s^2}{(R_s + R_r/S)^2 + \omega_e^2 (L_s + L_r)^2} \quad (2.38)$$

จากสมการ (2.38) หาแรงบิดเริ่มแรก (starting torque) โคนแทน  $S = 1$

$$T_{es} = 3 \left(\frac{P}{2}\right) \frac{R_r}{\omega_e} \frac{V_s^2}{(R_s + R_r)^2 + \omega_e^2 (L_s + L_r)^2} \quad (2.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาอนุพันธ์ของสมการ (2.38) เทียบกับสลิป  $S$  แล้วจับเท่ากับ 0 จะได้ค่า  $S_m$  และ  $T_{em}$  ดังนี้

$$S_m = \pm \frac{R_r}{\sqrt{R_s^2 + \omega_e^2 (L_s + L_r)^2}} \quad (2.40)$$

แทน  $+S_m$  ในสมการ (2.38) จะได้แรงบิดสูงสุดของช่วงที่ทำงานเป็น มอเตอร์ (motoring breakdown torque)

$$T_{em} = \frac{3}{4} \cdot \frac{P}{\omega_e} \cdot \frac{V_s^2}{\sqrt{R_s^2 + \omega_e^2 (L_s + L_r)^2} + R_s} \quad (2.41)$$

แทน  $-S_m$  ในสมการ (2.38) จะได้แรงบิดสูงสุดของช่วงที่ทำงานเป็น เครื่องกำเนิด (regeneration breakdown torque)

$$T_{eg} = -\frac{3}{4} \cdot \frac{P}{\omega_e} \cdot \frac{V_s^2}{\sqrt{R_s^2 + \omega_e^2 (L_s + L_r)^2} - R_s} \quad (2.42)$$

เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาพฤติกรรม เราอาจจะเลยพารามิเตอร์ด้าน ปฐมภูมิ คือ  $R_s$  และ  $L_r$  แทน  $R_s = 0$  และ  $L_r = 0$  ในสมการ (2.41)

$$T_e = 3 \left( \frac{P}{2} \right) \cdot \frac{R_r}{S \omega_e} \cdot \frac{V_s^2}{\left( \frac{R_r}{S} \right)^2 + (\omega_e L_r)^2} \quad (2.43)$$

$$T_e = 3 \left( \frac{P}{2} \right) \cdot \frac{R_r}{2} \cdot \frac{S V_s^2}{R_r^2 + S^2 \omega_e^2 L_r^2}$$

เนื่องจาก  $S = \frac{\omega_{sl}}{\omega_e}$  ดังนั้น  $S \omega_e = \omega_{sl}$  แทนในสมการ (2.43)

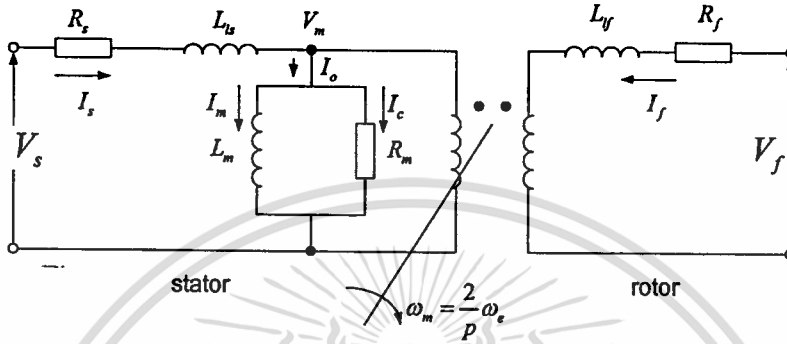
$$T_e = 3 \left( \frac{P}{2} \right) \frac{R_r}{\omega_e} \cdot \frac{\omega_{sl}}{\omega_e} \cdot \frac{V_s^2}{R_r^2 + \omega_{sl}^2 L_r^2}$$

$$T_e = 3 \left( \frac{P}{2} \right) \left( \frac{V_s}{\omega_e} \right)^2 \frac{\omega_{sl} R_r}{R_r^2 + \omega_{sl}^2 L_r^2} \quad (2.44)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

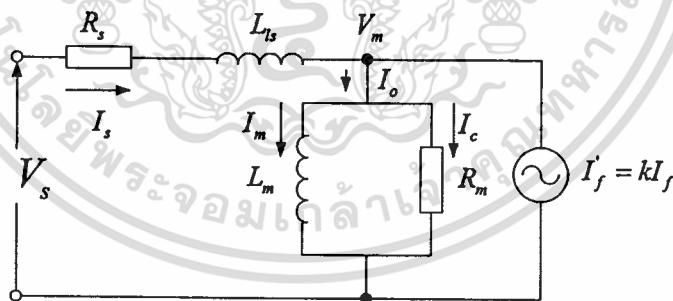
### 2.3.2 ซิงโครนัสมอเตอร์

ซิงโครนัสมอเตอร์ จะมีความแม่นยำในการควบคุมความเร็วหรือตำแหน่งเพราะ ไม่มีเรื่องของสลิปมาเกี่ยวข้อง ขดลวดสเตเตอร์ของซิงโครนัสมอเตอร์จะมีลักษณะการพันเหมือนกับมอเตอร์เหนี่ยวนำทุกประการ เพราะลักษณะการสร้างสนามแม่เหล็กหมุนเหมือนกันทุกประการ แตกต่างตรงที่โรเตอร์ซึ่งจะใช้ขั้วแม่เหล็กแยกกันต่างหากอีกชุดหนึ่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อสร้างขั้วแม่เหล็ก เหนือ - ใต้ ขึ้นมาเกาะกับขั้วแม่เหล็กบนสเตเตอร์



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลแสดงการเกาะติดกันทางสนามแม่เหล็กระหว่างวงจรบนสเตเตอร์กับวงจรโรเตอร์ที่หมุนไปด้วยความเร็ว  $\omega_m$

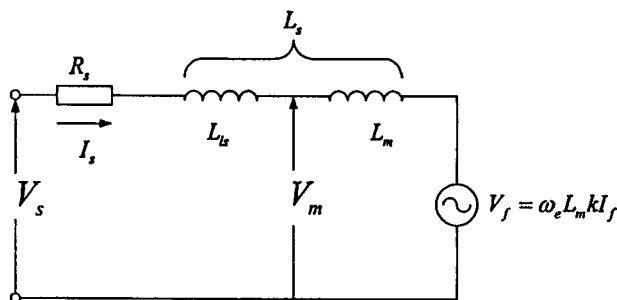
จากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่าโรเตอร์ถูกจ่ายพลังงานด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง  $V_f$  ซึ่งจะทำให้เกิด  $I_f$  ไหลในวงจรทางฝั่งโรเตอร์ แต่วงจรด้านสเตเตอร์จะถูกจ่ายพลังงานด้วยแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ  $V_s$  ซึ่งเป็นผลทำให้เกิด  $I_s$  ไหลในวงจร



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลแสดงพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าบนขดลวดสเตเตอร์

จากรูปที่ 2.9 จากลักษณะโครงสร้างที่โรเตอร์ตัดผ่านสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์ ด้วยความเร็ว  $\omega_m$  จึงทำให้เกิดพฤติกรรมของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขึ้นบนขดลวดสเตเตอร์ โดยที่  $I_f$  คือ แหล่งจ่ายกระแสสลับคงที่ซึ่งมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $I_f$  บนโรเตอร์ และด้วยการใช้หลักการตามทฤษฎีของเทวินิน ถ้าเราละเลย  $R_m$  ซึ่งมีผลต่อวงจรค่อนข้างน้อย เราก็สามารถแปลงแหล่งจ่ายกระแสซึ่งขนานกับ  $L_m$  ให้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่อนุกรมกับ  $L_m$  ได้ ดังรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของซิงโครนัสมอเตอร์เมื่อไม่คิดค่า  $R_m$

จากรูปที่ 2.10 แหล่งจ่ายแรงดันนี้จะมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $I_f$  และ  $\omega_e$  ของโรเตอร์ตามหลักการเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทุกประการและเนื่องจากแรงดัน  $V_f$  นี้เป็นแรงดัน emf ที่เกิดจากกระแสกระตุ้น (excitation current) เราจึงเรียก  $V_f$  นี้ว่า excitation emf นอกจากนี้  $V_f$  ยังขึ้นตรงกับ  $\omega_e$  ซึ่งก็คือความเร็วที่สนามแม่เหล็กบนโรเตอร์หมุนตัดผ่าน  $V_f$  จึงได้ชื่ออีกอย่างหนึ่งว่า speed emf

ผลบวกของค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหล  $\omega_e L_{ls}$  และรีแอกแตนซ์ที่สร้างสนามแม่เหล็กหมุน  $\omega_e L_{ms}$  นี้ถูกเรียกรวมกันว่า ซิงโครนัสรีแอกแตนซ์  $X_s$  ดังนั้น

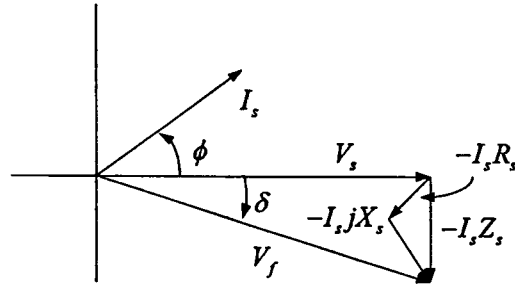
$$X_s = \omega_e L_s = \omega_e L_{ls} + \omega_e L_{ms} \quad (2.45)$$

และอิมพีแดนซ์ทั้งหมดของซิงโครนัสมอเตอร์ถูกเรียกว่า ซิงโครนัสอิมพีแดนซ์ โดยที่

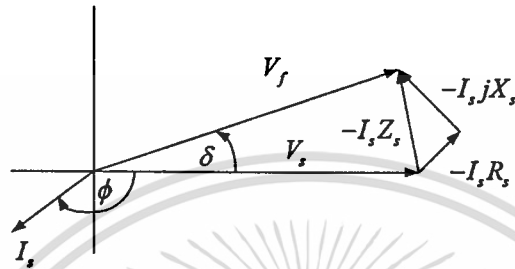
$$Z_s = R_s + jX_s \quad (2.46)$$

### 2.3.2.1 คุณสมบัติของแรงบิด

เฟสเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสสลับแบบซิงโครนัสทั้งในขณะที่ทำงานเป็นมอเตอร์ดังรูป 2.11 และทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้างดรูป 2.12 ในรูปที่ 2.11 ซึ่งเครื่องจักรทำงานเป็นมอเตอร์ เฟสเซอร์ไดอะแกรมที่นำมาแสดงเป็นเฟสเซอร์ขณะจ่ายกระแสกระตุ้นสูง (over excitation) กล่าวคือมอเตอร์ทำงานที่เพาเวอร์แฟกเตอร์นำหน้า และจ่ายกำลังรีแอกทีฟเข้าระบบ ส่วนรูปที่ 2.12 เป็นเฟสเซอร์ของเครื่องกำเนิดขณะจ่ายกระแสกระตุ้นต่ำ (under excitation) กล่าวคือ เครื่องกำเนิดจะรับกำลังรีแอกทีฟจากระบบ ส่วนมุม  $\delta$  ซึ่งเป็นมุมระหว่าง  $V_s$  กับ  $V_f$  มักถูกเรียกว่ามุมกำลัง (power angle)



รูปที่ 2.11 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องจักรกลซิงโครนัสขณะทำงานเป็นมอเตอร์



รูปที่ 2.12 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องจักรกลซิงโครนัสขณะทำงานเป็นเครื่องกำเนิด

เพื่อให้การพิจารณาเป็นไปอย่างง่ายเราจะละเลยและไม่นำค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์มาคิด ดังนั้นเราสามารถหาความสัมพันธ์ต่าง ๆ ได้จากรูปที่ 2.11 และ 2.12 ดังนี้

$$\begin{aligned} \bar{I}_s &= \frac{\bar{V}_s |0 - \bar{V}_f| - \delta}{jX_s} \\ &= \frac{\bar{V}_s | -90^\circ - \bar{V}_f | - (90 + \delta)}{X_s} \end{aligned} \quad (2.47)$$

หรือ

$$\begin{aligned} I_s \cos \phi &= \frac{V_s}{X_s} \cos(-90^\circ) - \frac{V_f}{X_s} \cos(-\delta - 90^\circ) \\ &= -\frac{V_f}{X_s} \cos(\delta + 90^\circ) \end{aligned} \quad (2.48)$$

กำลังของมอเตอร์สามารถหาได้จาก

$$P_{in} = 3V_s I_s \cos(\delta + 90^\circ) \quad (2.49)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการ (2.48) ลงใน (2.49) จะได้

$$P_{in} = \frac{3V_s V_f}{X_s} \sin \delta \tag{2.50}$$

นี่คือสาเหตุที่เรียกมุม  $\delta$  ว่ามุมกำลังหรือ power angle of synchronous machine ถ้าไม่นำเรื่องกำลังสูญเสียมาคิดกำลังทั้งหมดที่ส่งให้มอเตอร์จะถูกแปลงเป็นกำลังกลที่เพล

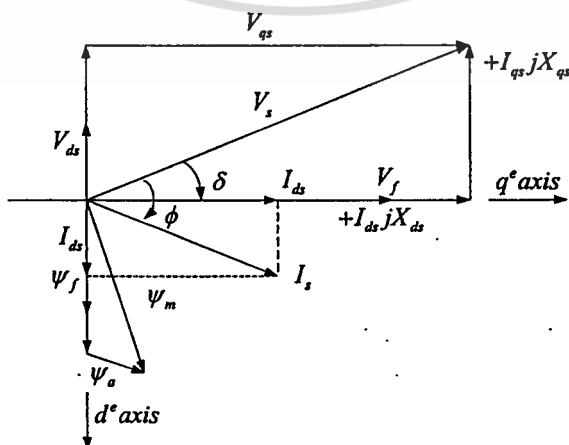
$$P_{in} = P_s = \frac{2}{p} \omega_e T_e \tag{2.51}$$

นำสมการ (2.50) มาแทนลงในสมการ (2.51) แล้วจัดรูปเสียใหม่ จะได้

$$T_e = 3 \left( \frac{p}{2} \right) \cdot \frac{V_s}{\omega_e} \cdot \frac{V_f}{X_s} \sin \delta \tag{2.52}$$

### 2.3.2.2 คุณสมบัติของเครื่องจักรกลซิงโครนัสแบบเซเลียนท์โพล

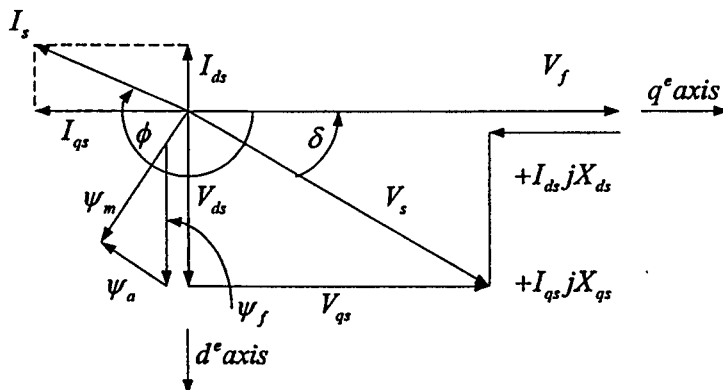
คุณสมบัติของโรเตอร์แบบเซเลียนท์โพลจะต่างกับมอเตอร์ทรงกระบอกตรงที่ค่าความต้านทานแม่เหล็กของช่องว่างอากาศ (reluctance) ที่แกน  $d^e$  กับแกน  $q^e$  ของเซเลียนท์โพลไม่เท่ากัน ในขณะที่โรเตอร์แบบทรงกระบอกจะเท่ากัน ผลของการไม่สมมาตรเนื่องจากรูปร่างของเซเลียนท์โพลนี้ ทำให้  $X_d \neq X_q$  รูปที่ 2.13 และรูปที่ 2.14 แสดงเฟสเซอร์ไดอะแกรมของเครื่องจักรแบบเซเลียนท์โพล ทั้งขณะทำงานเป็นมอเตอร์ และเครื่องกำเนิด ตามลำดับ เฟสเซอร์ไดอะแกรมของฟลักซ์แม่เหล็กเชื่อมโยง  $\psi$  ก็ถูกนำมาแสดงไว้ในไดอะแกรมดังกล่าวด้วย และเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา เราจะตัดความต้านทานด้านสเตเตอร์ออกไปทั้งหมด เพราะจะมีผลต่อระบบน้อย



รูปที่ 2.13 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของเซเลียนท์โพล  $X_d \neq X_q$  ขณะเป็นมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 เฟสเซอร์ไดอะแกรมของเซเลินท์โพล  $X_{ds} \neq X_{qs}$  ขณะเป็นเครื่องกำเนิด

จากรูปที่ 2.13 และ 2.14  $\psi_f$  คือฟลักซ์แม่เหล็กเนื่องจากตัวโรเตอร์จะถูกวางไว้ในแนวแกน  $d^e$  ซึ่งก็จะเป็นแกนเดียวกันกับสนามแม่เหล็กหลักในเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง  $\psi_f$  นี้เกิดจาก  $I_f$  ซึ่งเมื่อโอนมาอยู่บนสเตเตอร์ก็คือ  $I'_f$  ดังนั้น  $V_f$  ซึ่งเกิดจาก  $I'_f$  จึงนำหน้า  $\psi_f$  อยู่  $90^\circ$  หรือวางอยู่บนแกน  $q^e$  นั่นเอง สำหรับ  $V_s$  นั้น เมื่อเครื่องจักรยังไม่จ่ายโหลดก็จะทับกันกับ  $V_f$ พอดี ซึ่งในกรณีที่เป็นเครื่องกำเนิดจะเห็นภาพพจน์ได้ง่าย เพราะถ้ายังไม่จ่ายโหลด ( $I_s = 0$ ) แรงดันที่ขั้ว  $V_s$  ก็คือแรงดันที่เครื่องกำเนิดผลิตขึ้นมาคือ  $V_f$  ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.14 แต่ถ้าเป็นมอเตอร์แล้วจะมองได้ยากกว่า เพราะที่จริงแล้วจะมีกำลังเชิงโครนัสตัวหนึ่งที่ต้องถูกจ่ายเข้ามาเพื่อมาสร้างการยึดเกาะของสนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์กับโรเตอร์เข้าไว้ด้วยกันแม้ยังไม่มีโหลด แต่อย่างไรก็ตาม  $I_s$  ในขณะนั้นแทบจะถือได้ว่าถูกนำมาสร้างสนามแม่เหล็กทั้งหมด ทำให้เกือบทั้งหมดของ  $I_s$  คือองค์ประกอบกระแสแอกทีฟ (reactive component) และถือได้ว่า  $I_s$  ขณะไม่มีโหลดจะล่าหลัง  $V_s$  อยู่  $90^\circ$  และทำให้  $\psi_m$  อยู่ในแนวเดียวกัน  $\psi_f$  โดยที่  $\psi_m$  เกิดจาก  $I_m$  และ  $I_m$  เป็นผลรวมของ  $I_s$  กับ  $I'_f$  (ไม่คิด  $R$ ) ต่อมาเมื่อเพิ่มโหลดให้กับเครื่องจักร ในกรณีที่เป็นเครื่องกำเนิดเราก็จะพบว่า  $I_s$  เริ่มไหลไปยังไหลมากขึ้น และมีองค์ประกอบแอกทีฟ (active component) มากขึ้น  $I_s$  ที่เพิ่มขึ้นจะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาตัวหนึ่ง คือ  $\psi_a$  ซึ่งเมื่อรวมกับ  $\psi_f$  แล้วก็จะได้สนามแม่เหล็กรวมในช่องว่างอากาศ  $\psi_m$  ขึ้นมา ส่วนในกรณีของมอเตอร์เมื่อเราเพิ่มโหลดทางกลเข้าที่เพลา ส่งผลให้สนามแม่เหล็กโรเตอร์ถูกดึงออกจากสนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์ ทำให้  $V_f$  ล้าหลัง  $V_s$  เป็นมุม  $\delta$  ส่งผลให้  $I_s$  มีค่ามากขึ้นและมีองค์ประกอบแอกทีฟเพิ่มเข้ามา เช่นเดียวกับกรณีเครื่องกำเนิดกระแส  $I_s$  ก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก  $\psi_a$  ซึ่งถือเป็นฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจากปฏิกิริยาอาร์เมเจอร์ เมื่อมารวมกับ  $\psi_f$  แล้วก็จะได้ฟลักซ์แม่เหล็กรวมในช่องว่างอากาศ  $\psi_m$  ขึ้นมา และเนื่องจากขั้วแม่เหล็กเป็นเซเลินท์โพล กระแส  $I_s$  จะถูกแยกออกมาให้อยู่ในแกน  $d$  และแกน  $q$  เพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

จากเฟสเซอร์ไดอะแกรมรูปที่ 2.13 จะเห็นว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_s \cos \phi = I_{qs} \cos \delta - I_{ds} \sin \delta \quad (2.53)$$

แทนสมการ (2.53) ลงในสมการ (2.51) จะได้

$$P_{in} = 3V_s (I_{qs} \cos \delta - I_{ds} \sin \delta) \quad (2.54)$$

พิจารณาเฟสเซอร์ไดอะแกรม

$$I_{ds} = \frac{V_s \cos \delta - V_f}{X_{ds}} \quad (2.55)$$

$$-I_{qs} = \frac{V_s \sin \delta}{X_{qs}} \quad (2.56)$$

แทนสมการ (2.55), (2.56) ลงในสมการ (2.54) จะได้

$$P_{in} = \frac{3V_s V_f}{X_{ds}} \sin \delta + 3V_s^2 \frac{X_{ds} - X_{qs}}{2X_{ds} X_{qs}} \sin 2\delta \quad (2.57)$$

แทนสมการ (2.57) ใน (2.51) แล้วจัดรูปสมการใหม่ จะได้สมการแรงบิดดังนี้

$$T_e = 3 \left( \frac{p}{2} \right) \frac{1}{3} \left( \frac{V_s V_f}{X_{ds}} \sin \delta + V_s^2 \frac{X_{ds} - X_{qs}}{2X_{ds} X_{qs}} \sin 2\delta \right) \quad (2.58)$$

สมการ (2.58) นี้ถ้าพิจารณาให้ดีจะเห็นว่าพจน์แรกของสมการจะเหมือนกับสมการ (2.55) ทุกประการยกเว้น  $X_s$  ที่ถูกแทนที่ด้วย  $X_{ds}$  จึงกล่าวได้ว่าพจน์แรกของสมการเป็นพจน์ของโรเตอร์ทรงกระบอกส่วนพจน์หลังเกิดจากความเป็นเซเลินท์ของโรเตอร์ ซึ่งค่าความต้านทานแม่เหล็กในช่องว่างอากาศของแกน d และ q มีค่าไม่เท่ากัน เราจึงเรียกพจน์ที่สองของสมการนี้ว่า แรงบิดรีลักแตนซ์ (reluctance torque)

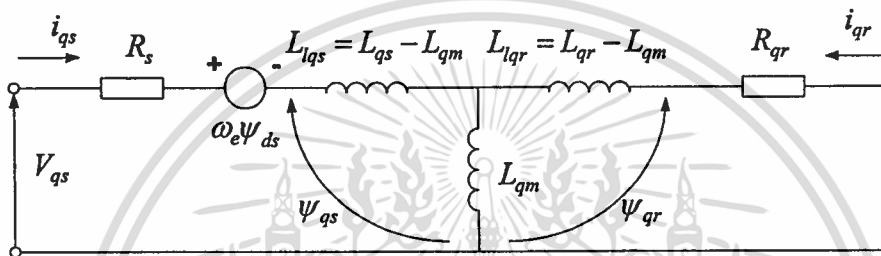
### 2.3.2.3 แบบจำลองพลวัต (Dynamic Model)

สนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ของซิงโครนัสมอเตอร์มีความเหมือนกับสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำทุกประการ จะต่างกันตรงที่ความเร็วในการหมุนของสนามแม่เหล็ก

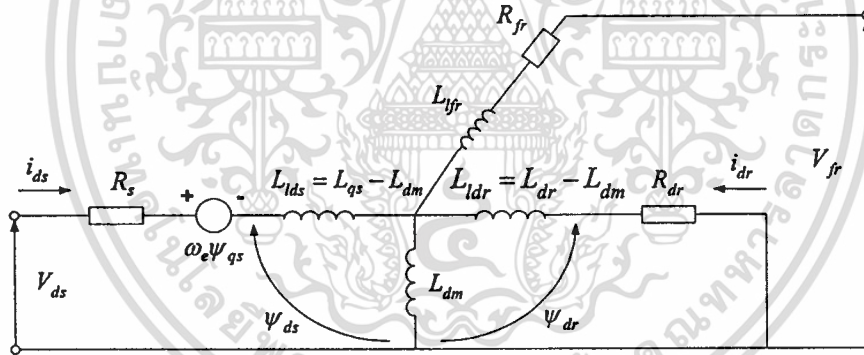
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กของโรเตอร์เท่านั้นที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงสามารถเขียนวงจรสมมูล d-q ของซิงโครนัส มอเตอร์บนแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัสได้ ตามรูปที่ 2.15 ซึ่งพจน์  $\omega_e - \omega_r$  จะหายไป เนื่องจาก  $\omega_e = \omega_r$  และเนื่องจากไม่มีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเกิดขึ้นบนโรเตอร์ ตัวแปร  $V_{qr}$  และ  $V_{dr}$  จึงไม่ปรากฏ แต่วงจรสมมูลของแกน  $d^e$  ซึ่งอ้างอิงกับสนามแม่เหล็ก (ซึ่งก็คือสนามแม่เหล็กบน โรเตอร์) จะมี  $V_{fr}$  ซึ่งเป็นตัวป้อนกระแสสร้างแม่เหล็กเข้ามาาร่วมด้วย

พารามิเตอร์บนโรเตอร์อีกจุดหนึ่งคือ  $L_{lqr}$  และ  $L_{ldr}$  คือผลของขดลวดบนโรเตอร์ที่เรียกว่า Amortisseur winding ซึ่งจะทำหน้าที่ในการที่จะทำให้โรเตอร์สามารถติดตามความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนบนสเตเตอร์ได้ดียิ่งขึ้น ขดลวดนี้ถ้าจะมองให้ง่ายก็เหมือนกับมีมอเตอร์เหนี่ยวนำอีกตัวหนึ่งฝังอยู่ในโรเตอร์ของซิงโครนัสมอเตอร์



(ก) บนแกน  $q^e$



(ข) บนแกน  $d^e$

รูปที่ 2.15 วงจรสมมูล d-q ของซิงโครนัสมอเตอร์ บนแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส

จากรูปเราสามารถนำมาเขียนสมการได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ 0 \\ 0 \\ V_{fr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + SL_{qs} & \omega_e L_{ds} & SL_{qm} & \omega_e L_{dm} & 0 \\ -\omega_e L_{qs} & R_s + SL_{ds} & -\omega_e L_{qm} & SL_{dm} & \omega_e L_{dm} \\ SL_{qm} & 0 & R_{qr} + SL_{qr} & 0 & 0 \\ 0 & SL_{dm} & 0 & R_{dr} + SL_{dr} & \omega_e L_{dm} \\ 0 & SL_{dm} & 0 & SL_{dm} & R_{fr} + S(L_{lfr} + L_{dm}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \\ i_{fr} \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

## 2.4 เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน

ทราบกันอยู่แล้วว่า มอเตอร์กระแสตรง เป็นมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง แต่มีข้อเสียตรงที่แปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ เสื่อมเมื่อใช้ไปในระยะหนึ่ง ดังนั้นจึงนำสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์มาใช้ทำหน้าที่แทนแปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์เรียกมอเตอร์ชนิดนี้ว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน(BLDCM)

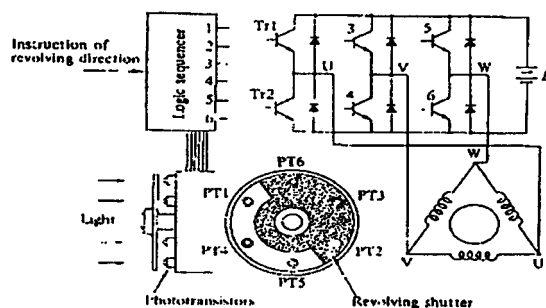
### 2.4.1 หลักการทำงานเบื้องต้นของ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน

BLDCM มีโครงสร้างใกล้เคียงกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิด Permanent Magnet Synchronous Motor โดยจะมีขดลวด อาเมเจอร์ อยู่ที่สเตเตอร์ ส่วนโรเตอร์นั้นจะเป็นแม่เหล็กถาวร การพันขดลวดสเตเตอร์นั้นจะพันเหมือนกับ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบหลายเฟสทั่วไป แต่มีความแตกต่างจาก มอเตอร์แบบซิงโครนัส ตรงที่ BLDCM จะต้องทำการตรวจจับขั้วของโรเตอร์(ขั้วของแม่เหล็ก) เพื่อนำไปสร้างสัญญาณควบคุมสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ เซนเซอร์เป็นตัวตรวจจับขั้วของโรเตอร์

### 2.4.2 การควบคุมการทำงานของ BLDCM 3 เฟส

BLDCM ชนิด 3 เฟส ควบคุมโดยใช้ วงจรบริดจ์ 3 เฟส มีประสิทธิภาพดี โดยอัตราส่วนระหว่างกำลังงานทางกลด้านเอาต์พุต กับกำลังงานไฟฟ้าทางด้าน อินพุต ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ จะมีค่าสูง ในรูปที่ 2.16 เป็นการควบคุมโดยใช้วงจรบริดจ์ 3 เฟส ซึ่งการตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ ใช้โฟโตทรานซิสเตอร์(Phototransistor) 6 เป็นตัวสร้างสัญญาณในการเปิด – ปิด ทรานซิสเตอร์

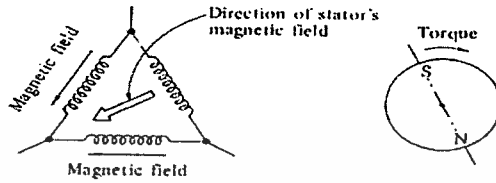
เมื่อ โฟโตทรานซิสเตอร์ ตรวจจับแสงได้จะทำการสร้างสัญญาณไปควบคุมการทำงานของ ทรานซิสเตอร์ ในรูปที่ 2.16 โฟโตทรานซิสเตอร์ หมายเลข  $PT_1, PT_4, PT_5$  ทำงานสร้างสัญญาณให้  $Tr_1, Tr_4, Tr_5$  ทำงาน ทำให้มีกระแสไหลผ่านจุด U กับ W ครบวงจรที่แหล่งจ่าย โดยที่จุด V เป็นศูนย์ กระแสจะไหลจากขั้ว U ไปยัง V และจาก W ไปยัง V ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งเราสามารถเขียนรูปลูกศรแสดงให้เห็นถึงทิศทางของ สนามแม่เหล็ก(magnetic fields) ที่สร้างขึ้นโดยกระแสแต่ละเฟส ซึ่งลูกศรอันใหญ่แสดงถึงผลรวมของ สนามแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นที่ สเตเตอร์



รูปที่ 2.16 แสดงการควบคุม BLDCM 3 เฟสโดยใช้โฟโตทรานซิสเตอร์ตรวจจับตำแหน่งโรเตอร์

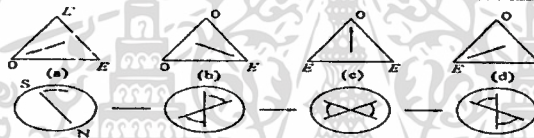
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตำแหน่งที่ โรเตอร์อยู่ห่างเส้นแรงสนามแม่เหล็ก อยู่  $90^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 2.17 จะเกิดแรงบิดในทิศทางตามเข็มนาฬิกาเกิดขึ้นที่โรเตอร์ หลังจากผ่านไปประมาณ  $30^\circ$   $PT_5$  หยุดทำงาน และ  $PT_6$  ทำงานแทน ซึ่งสนามแม่เหล็ก จะถูกสร้างขึ้นที่สเตเตอร์ห่างออกไป  $60^\circ$  ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา เมื่อขั้วใต้ของโรเตอร์เคลื่อนที่เข้าใกล้ขั้วใต้ของสเตเตอร์ ก็จะหมุนไปตามทิศทางตามเข็มนาฬิกา สภาวะการทำงาน และทิศทางหมุนของมอเตอร์แสดงให้เห็นตามรูป 2.18



รูปที่ 2.17 แสดงทิศทางของ สนามแม่เหล็ก

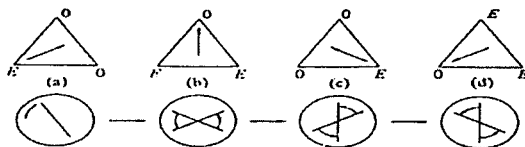
ON-OFF sequence	1	2	3	4	5	6
$Tr_1$	1	1	1	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1
3	0	0	1	1	1	0
4	1	1	0	0	0	1
5	1	0	0	0	1	1
6	0	1	1	1	0	0



รูปที่ 2.18 แสดงสภาวะการทำงานและทิศทางหมุนของมอเตอร์ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

ในการกลับทิศทางหมุนของมอเตอร์จะทำได้โดยการกำหนดการทำงานของวงจร logic ที่ไฟโต้ทรานซิสเตอร์ พิจารณารูป 2.16 กำหนดให้  $Tr_2, Tr_3, Tr_6$  ทำงาน จ่ายกระแสแก่ขดลวดครบวงจร ส่วนขดลวด U,W เป็นศูนย์ พิจารณารูปที่ 2.19(a) magnetic field ที่เกิดขึ้นที่ สเตเตอร์จะกลับทิศทาง และแรงบิดที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ก็จะหมุนกลับทิศทางด้วย หลัจากมอเตอร์หมุนไป  $30^\circ$   $Tr_2$  หยุดทำงาน และ  $Tr_4$  ทำงาน สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นก็จะเคลื่อนไปอีก  $60^\circ$  ซึ่งแสดงดังรูป 2.19(b) โรเตอร์จะสร้างแรงบิดในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (CCW.) แสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.19(a-d)

ON-OFF sequence	1	2	3	4	5	6
$Tr_1$	0	1	1	1	0	0
2	1	0	0	0	1	1
3	1	1	0	0	0	1
4	0	0	1	1	1	0
5	0	0	0	1	1	1
6	1	1	1	0	0	0



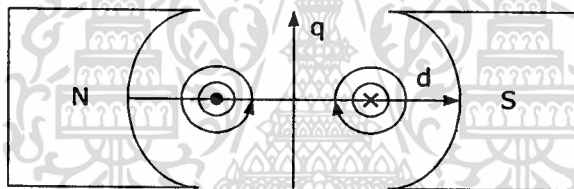
รูปที่ 2.19 แสดงสภาวะการทำงานและทิศทางหมุนของมอเตอร์ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 การเปลี่ยนระนาบ ABC เป็นระนาบ qd0

พิจารณาความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสสลับที่ควบคุมให้  $V/f$  คงที่ กับความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแล้ว จะพบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวของมอเตอร์ทั้ง 2 ชนิดมีลักษณะเหมือนกัน แต่การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงจะง่ายกว่ามาก ในขณะที่การควบคุมมอเตอร์กระแสสลับค่อนข้างสลับซับซ้อน ดังนั้นเพื่อให้การควบคุมมอเตอร์กระแสสลับเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นจึงเกิดแนวความคิดที่จะมองมอเตอร์กระแสสลับให้เป็นมอเตอร์กระแสตรง

เพื่อง่ายต่อการควบคุม วิธีดังกล่าวสามารถทำได้โดยการโอนย้ายพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับให้มาอยู่บนแกน d-q ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 2.20 โดยที่แกน d-q นี้เรายังสามารถที่จะพิจารณาให้เป็นแกนที่อยู่กับที่หรือเป็นแกนที่หมุนได้ด้วยความเร็วเชิงมุม  $\omega_e$  ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการที่จะพิจารณาสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับให้อยู่ในรูปสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่หยุดนิ่งอยู่กับที่

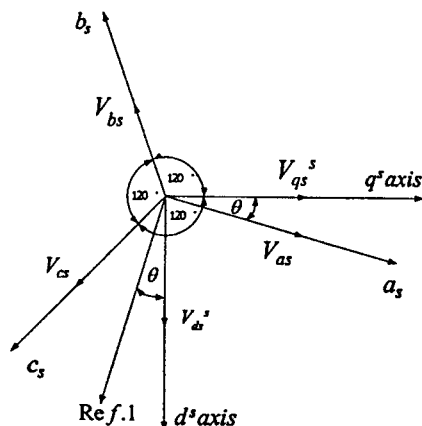


รูปที่ 2.20 แกน d ซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็กหลัก และแกน q ซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์

### 2.5.1 การแปลงระนาบ A,B,C เป็นระนาบ q,d,0

รูปที่ 2.21 เป็นเฟสเซอร์ไดอะแกรมของแรงดันที่จ่ายให้สเตเตอร์  $a_s$ ,  $b_s$  และ  $c_s$  กับแกน  $d^s$  และ  $q^s$  ซึ่งเราจะทำการย้ายแกนของแรงดัน 3 เฟสเข้าหา สำหรับสัญลักษณ์ของเฟส a, b, c และแกน d, q นั้นใช้สัญลักษณ์ s ตัวล่างเพื่อบอกว่าเฟสเซอร์และแกนที่อ้างอิงอยู่บน สเตเตอร์ ส่วน s ตัวบนแทนแกนอ้างอิงที่อยู่นิ่ง (stationary axis)

ในที่นี้จะทำการย้ายแกนของแรงดัน ซึ่งการพิจารณาย้ายแกนในส่วนของกระแส และฟลักซ์แม่เหล็กสามารถทำได้ด้วยวิธีเดียวกัน มุม  $\theta$  เป็นมุมระหว่างเฟส a และแกน q ซึ่งจะมีค่าเป็นเท่าใดก็ได้ จากรูปเราจะเริ่มด้วยการพิจารณาแรงดันของแต่ละเฟสให้อยู่ในรูปของแกน  $d^s$  และ  $q^s$  ตามลำดับดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.21 การย้ายแกนของระบบไฟฟ้า 3 เฟสให้อยู่บนแกน d-q ในระบบแกนอ้างอิงคงที่

1. พิจารณาองค์ประกอบของแรงดัน  $V_{ds}^s$  และ  $V_{qs}^s$  บนแกน  $a_s$ 
    - (1.1) องค์ประกอบของ  $V_{qs}^s$  บนแกน  $a_s$  คือ  $V_{qs}^s \cos \theta$
    - (1.2) องค์ประกอบของ  $V_{ds}^s$  บนแกน  $a_s$  คือ  $V_{ds}^s \sin \theta$  ทั้งนี้อ้างอิงมุม  $\theta$  กับแกน Ref. 1 ซึ่งตั้งฉากกับ  $a_s$  ทำให้แกน Ref. 1 ทำมุม  $\theta$  กับแกน  $d^s$  ด้วย
  2. พิจารณาองค์ประกอบของแรงดัน  $V_{ds}^s$  และ  $V_{qs}^s$  บนแกน  $b_s$ 
    - (2.1) องค์ประกอบของ  $V_{qs}^s$  บนแกน  $b_s$  คือ  $V_{qs}^s \cos(120-\theta)$  แต่เนื่องจาก  $\cos(-\phi) = \cos \phi$  ดังนั้น  $V_{qs}^s \cos(\theta-120^\circ)$
    - (2.2) องค์ประกอบของ  $V_{ds}^s$  บนแกน  $b_s$  คือ  $V_{ds}^s \cos(90+(120-\theta))$  โดยมุม  $90^\circ$  คือมุมระหว่าง  $d_s$  กับ  $q_s$  ส่วน  $(120-\theta)$  คือ มุมระหว่าง  $q_s$  กับ  $b_s$  ทำการกระจายฟังก์ชันตรีโกณมิติจะได้  $V_{ds}^s [\cos 90 \cos(120-\theta) - \sin 90 \sin(120-\theta)]$  ซึ่งก็คือ  $-V_{ds}^s \sin(120-\theta)$  เมื่อ  $-\sin \phi = \sin(-\phi)$  จะได้  $-V_{ds}^s \sin(120-\theta) = V_{ds}^s \sin(\theta-120)$
  3. พิจารณาองค์ประกอบของแรงดัน  $V_{ds}^s$  และ  $V_{qs}^s$  บนแกน  $c_s$ 
    - (3.1) องค์ประกอบของ  $V_{qs}^s$  บนแกน  $c_s$  คือ  $V_{qs}^s \cos(\theta+120)$
    - (3.2) องค์ประกอบของ  $V_{ds}^s$  บนแกน  $c_s$  มุมระหว่างแกน  $d_s$  และ  $c_s$  คือ  $360-(120+120+90-\theta) = 30+\theta$  ดังนั้นองค์ประกอบของ  $V_{ds}^s$  บน  $c_s$  คือ  $V_{ds}^s \cos(30+\theta)$  เมื่อ  $\cos(30+\theta)$  เท่ากับ  $\sin(120+\theta)$  จะได้  $V_{ds}^s \sin(\theta+120)$
- จากผลการพิจารณาตั้งแต่ 1-3 เรานำมาเขียนสมการของแรงดัน  $V_{as}$ ,  $V_{bs}$  และ  $V_{cs}$  ให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta-120) & \sin(\theta-120) & 1 \\ \cos(\theta+120) & \sin(\theta+120) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \\ V_{0s}^s \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

โดย  $V_{0s}^s$  คือ องค์ประกอบของแรงดันลำดับศูนย์ (zero-sequence component)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$dq0$  หรือ องค์ประกอบแรงดันลำดับศูนย์นี้ในภาวะที่เฟสทั้งสามเกิดสมดุลแรงดันลำดับศูนย์ จะไม่ปรากฏแต่ที่ต้องเขียนไว้เนื่องจากทางด้านซ้ายมือของสมการมีสมาชิกอยู่ 3 ตัว ดังนั้นในพจน์ของ DC จึงต้องมีสมาชิกอยู่ 3 ตัวด้วย แต่ส่วนที่เป็นแรงดันลำดับศูนย์นี้เมื่อไปปรากฏเป็นส่วนหนึ่งในสมการของ  $V_{as}$ ,  $V_{bs}$  และ  $V_{cs}$  เฟสเซอร์หนึ่งหน่วยของแรงดันลำดับศูนย์ที่แฝงอยู่ในเฟสทั้งสามนี้ก็เกิดสมดุลและหักล้างกันไปเอง

จากสมการ (2.60) ทำอินเวอร์สเมทริกซ์จะได้

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \\ V_{0s}^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta+120^\circ) \\ \sin\theta & \sin(\theta-120^\circ) & \sin(\theta+120^\circ) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

เพื่อให้การพิจารณาเป็นไปได้ง่ายขึ้น เราจะกำหนดให้  $\theta = 0^\circ$  ซึ่งจะทำให้แกน  $q^s$  ทับกับแกน  $a_s$  พอดี และเนื่องจากการพิจารณากระทำบนสมมติฐานที่ว่าแรงดันทั้ง 3 เฟสสมดุล ดังนั้นผลของแรงดันลำดับศูนย์จะหักล้างกันไปเอง จากสมการ (2.60) เราจึงสามารถแยกเขียนสมการให้ดูง่ายขึ้นได้ดังนี้

$$V_{as} = V_{qs}^s \quad (2.62)$$

$$V_{bs} = -\frac{1}{2}V_{qs}^s - \frac{\sqrt{3}}{2}V_{ds}^s \quad (2.63)$$

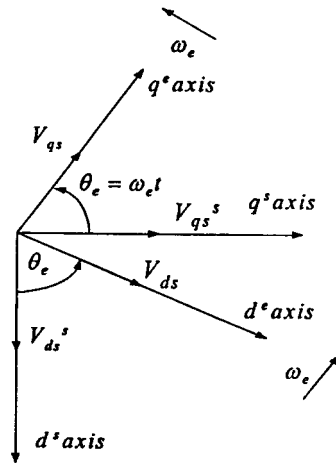
$$V_{cs} = -\frac{1}{2}V_{qs}^s + \frac{\sqrt{3}}{2}V_{ds}^s \quad (2.64)$$

และจากสมการ (2.61) จะได้

$$V_{qs}^s = \frac{2}{3}V_{as} - \frac{1}{3}V_{bs} - \frac{1}{3}V_{cs} = V_{as} \quad (\text{ทับกันพอดี}) \quad (2.65)$$

$$V_{ds}^s = -\frac{1}{\sqrt{3}}V_{bs} + \frac{1}{\sqrt{3}}V_{cs} \quad (2.66)$$

แรงดันบนแกนอ้างอิงหยุดนิ่งนี้สามารถแปลงไปอยู่บนแกนอ้างอิงซึ่งหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม  $\omega_e$  ได้ โดยให้รูปที่ 2.21



รูปที่ 2.22 การแปลงแรงดันบนแกนอ้างอิงหยุดนิ่งไปอยู่บนแกนอ้างอิงที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม  $\omega_e$

เพื่อให้่ายต่อการเขียน เราจะเขียน  $V_{ds}$  และ  $V_{qs}$  ซึ่งอยู่บนแกน  $d^e$  และ  $q^e$  โดยละเว้นการเขียนตัวห้อย e ไว้ข้างบน

จากรูปที่ 2.22 จะได้ว่า

$$V_{qs} = V_{qs}^s \cos \omega_e t + V_{ds}^s \sin \omega_e t \quad (2.67)$$

$$V_{ds} = V_{qs}^s \sin \omega_e t + V_{ds}^s \cos \omega_e t \quad (2.68)$$

และเราสามารถแปลงแกนเคลื่อนที่ให้มาอยู่บนแกนหยุดนิ่งได้ดังนี้

$$V_{qs}^s = V_{qs} \cos \omega_e t + V_{ds} \sin \omega_e t \quad (2.69)$$

$$V_{ds}^s = -V_{qs} \sin \omega_e t + V_{ds} \cos \omega_e t \quad (2.70)$$

เพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนมากขึ้น ให้พิจารณาตัวอย่างดังต่อไปนี้

$$V_{as} = V_{sm} \cos \omega_e t \quad (2.71)$$

$$V_{bs} = V_{sm} \cos(\omega_e t - 120^\circ) \quad (2.72)$$

$$V_{cs} = V_{sm} \cos(\omega_e t + 120^\circ) \quad (2.73)$$

แทนสมการ (2.71)–(2.73) ลงในสมการ (2.65) และ (2.66) เพื่อแปลงแรงดันทั้ง 3 เฟสให้ไปอยู่บนแกน  $q^s$  และ  $d^s$  จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{qs}^s = V_{sm} \cos \omega_e t \quad (2.74)$$

$$V_{ds}^s = -V_{sm} \sin \omega_e t \quad (2.75)$$

จากนั้นก็แปลงแรงดันบนแกนหยุดนิ่งให้ไปอยู่บนแกนที่เคลื่อนที่ โดยการแทนสมการ (2.74) และ (2.75) ลงในสมการ (2.67) และ (2.68) จะได้

$$V_{qs} = V_{sm} = \hat{V}_m \quad (2.76)$$

$$V_{ds} = 0 \quad (2.77)$$

เมื่อ  $\hat{V}_m$  เป็นแรงดันเทียบเท่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เพราะไม่มีส่วนของคลื่นรูปไซน์เข้ามาเกี่ยวข้อง

จากความสัมพันธ์ตามสมการ (2.75) และ (2.77) จะเห็นว่าแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งมีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์ และมีความเร็วเชิงมุม  $\omega_e$  ไปปรากฏเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงบนแกนที่หมุนด้วยความเร็วเชิงโคโรนัส  $\omega_e$  และแรงดันที่ไปปรากฏนั้นจะเป็นแรงดันซึ่งอยู่บนแกน  $q$  ซึ่งแกน  $q$  นี้ถ้าเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง คือ แกนของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากโรเตอร์ และขดลวดซึ่งอยู่บนโรเตอร์ ของมอเตอร์กระแสตรงคือ อาร์เมเจอร์ ในขณะที่แรงดันบนแกน  $q$  ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเกิดจากการจ่ายไฟเข้าทางสเตเตอร์ ซึ่งเป็นที่วางขดลวด อาร์เมเจอร์ ของมอเตอร์กระแสสลับเช่นกัน ดังนั้น ถ้ามองในมุมของแกน  $d$ - $q$  แล้ว อาร์เมเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรงซึ่งอยู่บนโรเตอร์ก็คืออาร์เมเจอร์ของมอเตอร์กระแสสลับซึ่งอยู่บนสเตเตอร์นั่นเอง และจากสมการ (2.77)  $V_{ds} = 0$  ก็เพราะว่ายังไม่พิจารณาถึงแรงคลื่นไฟฟ้าบนโรเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับนั่นเอง

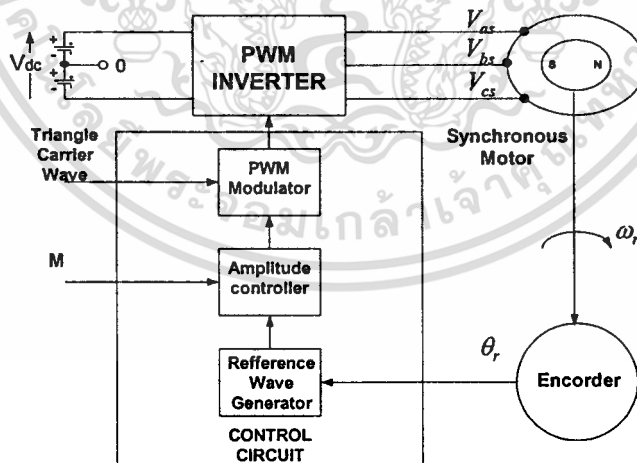
## บทที่ 3

# การออกแบบและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

### 3.1 บทนำ

การออกแบบและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB&SIMULINK นี้จะอาศัยทฤษฎี และหลักการพื้นฐานเกี่ยวกับโครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน(BLDCM), หลักการกำเนิดสัญญาณ ที่ดับบลิวเอ็ม,ผลจากเดดไทม์,หลักการทํางานของอินเวอร์เตอร์, และวิธีการแปลงระนาบ "a,b,c" เป็น "q,d,o" มาใช้ในการออกแบบและเขียนโปรแกรมให้มีความถูกต้องมากที่สุด โดยจะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 2 ส่วนคือในหัวข้อ 3.2 จะเป็นการแสดงวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ BLDCM และในหัวข้อ 3.3 จะเป็นการแสดงวิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ที่ดับบลิวเอ็ม

โครงสร้างของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่านจะมีลักษณะเป็นแบบซิงโครนัสมอเตอร์ ซึ่งควบคุมโดยใช้เซนเซอร์ [1],[2],[3],[4] ในงานวิจัยนี้ใช้ เกรยโคดเอนโคดเดอร์ เป็นตัวตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ เพื่อนำมาสร้างสัญญาณรูปคลื่นอ้างอิง(ซิกซ์ สเตป) สามารถปรับแต่งขนาดของสัญญาณอ้างอิงโดยปรับค่า มอดูเลชันอินเด็กซ์ ก่อนการนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม เพื่อสร้างสัญญาณ ที่ดับบลิวเอ็ม ผ่านวงจรเดดไทม์ แล้วนำไปสร้างรูปคลื่นแรงดันเพื่อจ่ายให้กับ BLDCM ซึ่งโครงสร้างและหลักการทํางานแสดงให้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงโครงสร้างและหลักการพื้นฐานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน

## 3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Brushless DC Machine

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน ได้จากการศึกษาหลักการทํางาน และสมการพื้นฐานของ BLDCM โดยศึกษาจากสมการในระนาบ "a,b,c" และ "q,d,0" เพื่อนํามาเขียนเป็นแบบจำลองทางทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB&SIMULINK

### 3.2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าในระนาบ "a , b , c"

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน ในระนาบ "a,b,c" สามารถพิจารณาจากซิงโคไนต์สมอเตอร์ 3 เฟส ซึ่งดูได้จากองค์ประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าในรูปที่ 3.2 โดยใช้คุณสมบัติดังต่อไปนี้

- เครื่องจักรกลไฟฟ้าต่อแบบ Y
- ขั้วแม่เหล็กถาวรของโรเตอร์เป็นแบบเซเลเนียมโพล
- ไม่สนใจค่าจากผลของการอิ่มตัวของเครื่องจักรกลไฟฟ้า
- ไม่สนใจค่า Iron losses และ Mechanical losses



รูปที่ 3.2 องค์ประกอบของเครื่องจักรกลไฟฟ้าใช้อ้างอิงในระนาบ "a,b,c" และ "q,d,0"

สมการแรงดันในระนาบ "a , b , c"

$$V_{as} = R_s \cdot i_{as} + \frac{d}{dt} \lambda_{as} \quad (V) \quad (3.1)$$

$$V_{bs} = R_s \cdot i_{bs} + \frac{d}{dt} \lambda_{bs} \quad (V) \quad (3.2)$$

$$V_{cs} = R_s \cdot i_{cs} + \frac{d}{dt} \lambda_{cs} \quad (V) \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดัน  $V_{as}, V_{bs}, V_{cs}$  มีความถี่ขึ้นอยู่กับความเร็วของโรเตอร์ ( $\omega_r$ ) และแรงดันจะมีระยะห่างระหว่างเฟส 120 องศาซึ่งกันและกัน

ฟลักซ์ลิงก์เกจ (flux linkages) อธิบายได้ดังนี้

$$\lambda_{as} = L_{aa} \cdot i_{as} + L_{ab} \cdot i_{bs} + L_{ac} \cdot i_{cs} + \lambda_m \cdot \sin \theta_r \quad (\text{v.sec}) \quad (3.4)$$

$$\lambda_{bs} = L_{ba} \cdot i_{as} + L_{bb} \cdot i_{bs} + L_{bc} \cdot i_{cs} + \lambda_m \cdot \sin \left[ \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right] \quad (\text{v.sec}) \quad (3.5)$$

$$\lambda_{cs} = L_{ca} \cdot i_{as} + L_{cb} \cdot i_{bs} + L_{cc} \cdot i_{cs} + \lambda_m \cdot \sin \left[ \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right] \quad (\text{v.sec}) \quad (3.6)$$

เมื่อ  $\lambda_m$  เป็นขนาดของ flux linkage ที่ถูกสร้างจากแม่เหล็กถาวรกับขดลวดสเตเตอร์

$\theta_r$  เป็นมุมองศาทางไฟฟ้าระหว่างทิศทางแม่เหล็กที่เกิดจากเฟส A กับทิศทางแม่เหล็กที่เกิดจากแกน q ซึ่งใช้อ้างอิงขั้วของโรเตอร์

แรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กสามารถอธิบายโดยละเอียด เมื่อเครื่องจักรกลไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง ณ. เวลาใดๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} T_{em} = p \{ & 2L_b \left[ \left( i_{as}^2 - \frac{i_{bs}^2}{2} - \frac{i_{cs}^2}{2} - i_{as} \cdot i_{as} - i_{as} \cdot i_{cs} + 2i_{bs} \cdot i_{cs} \right) \sin 2\theta_r \right. \\ & + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (i_{bs}^2 - i_{cs}^2 - 2i_{as} \cdot i_{bs} + 2i_{as} \cdot i_{cs}) \cdot \cos 2\theta_r ] \\ & \left. + \lambda_m \cdot \left[ \left( i_{as} - \frac{i_{bs}}{2} - \frac{i_{cs}}{2} \right) \cdot \cos \theta_r + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (i_{bs} - i_{cs}) \cdot \sin \theta_r \right] \right\} \quad (\text{Nm}) \quad (3.7) \end{aligned}$$

สมการการแรงบิดทางกลสามารถอธิบายได้ คือ

$$T_{en} = J \left[ \frac{1}{p} \right] \cdot \frac{d}{dt} \cdot \omega_r + \frac{B_m}{p} \cdot \omega_r + T_L \quad (\text{Nm}) \quad (3.8)$$

เมื่อ

$J$  - ค่าความเฉื่อยของโรเตอร์ [Nm . sec<sup>2</sup>]

$T_L$  - ค่าแรงบิดภาระทางกล [Nm]

$B_m$  - ผลของการหน่วงที่มาจากระบบการเคลื่อนที่ของเครื่องกลไฟฟ้าและผลของโหลด

[Nm . sec/rad ] โดยทั่วไปน้อยมากไม่จำเป็นต้องคิด

$P$  - จำนวนขั้วแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าในระนาบ "q,d,o"

ในระนาบ "q,d,o" ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะมีสมการไม่เป็นเชิงเส้น 3 สมการ คือสมการแรงดัน 2 สมการ และสมการแรงบิดของสนามแม่เหล็ก 1 สมการ โดยที่การเปลี่ยนระนาบจาก "a,b,c" ไปสู่ระนาบ "q,d,o" จะใช้ทฤษฎีของ Park's Transformation และ Inverse Park's Transformation

สมการแรงดันในระนาบ "q,d,o" คือ

$$V_q = R_s \cdot i_q + \omega_r \cdot L_d \cdot i_d + \omega_r \cdot \lambda_m + \frac{d}{dt}(L_q \cdot i_q) \quad (V) \quad (3.9)$$

$$V_d = R_s \cdot i_d - \omega_r \cdot L_q \cdot i_q + \frac{d}{dt}(L_d \cdot i_d) \quad (V) \quad (3.10)$$

---

สมการแรงบิดของสนามแม่เหล็ก คือ

$$T_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot [(L_d - L_q) \cdot i_q \cdot i_d + \lambda_m \cdot i_q] \quad (Nm) \quad (3.11)$$

โดยที่  $L_q$ ,  $L_d$  เป็นค่าคงที่ กระแสในระนาบ "q, d, o" คือ

$$i_q = \int \frac{1}{L_q} [V_q - R_s \cdot i_q - \omega_r \cdot L_q \cdot i_q - \lambda_m \cdot \omega_r] dt \quad (A) \quad (3.12)$$

$$i_d = \int \frac{1}{L_d} [V_d - R_s \cdot i_d + \omega_r \cdot L_q \cdot i_q] dt \quad (A) \quad (3.13)$$

ความเร็วโรเตอร์หาได้จากสมการที่ (3.8) โดยกำหนด  $B_m = 0$  จะได้

$$\omega_r = \frac{P}{J} \cdot \int (T_{em} - T_L) dt \quad \left( \frac{el.rad}{sec} \right) \quad (3.14)$$

มุมมองศาทางไฟฟ้าของโรเตอร์

$$\theta_r = \int \omega_r dt + \theta_r(0) \quad (el.rad) \quad (3.15)$$

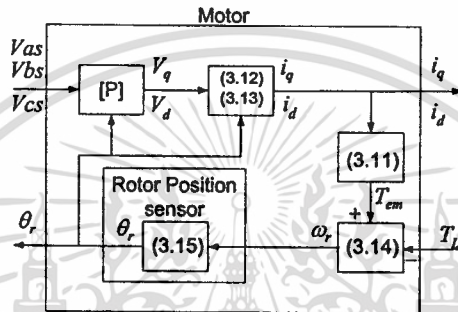
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมมองสาขาไฟฟ้าของแรงดันที่อินเวอร์เตอร์

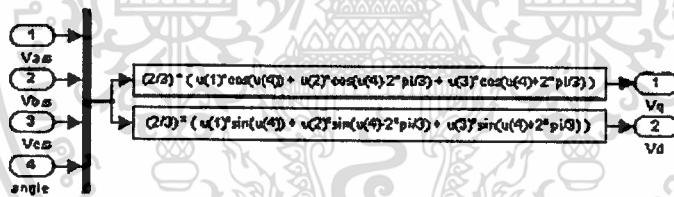
$$\theta_e = \int \omega_r dt + \theta_e(0) = \theta_r \quad (\text{el.rad}) \quad (3.16)$$

สมการแรงบิดทางกล (3.8) ในระนาบ "q, d, o" ไม่เปลี่ยนแปลง

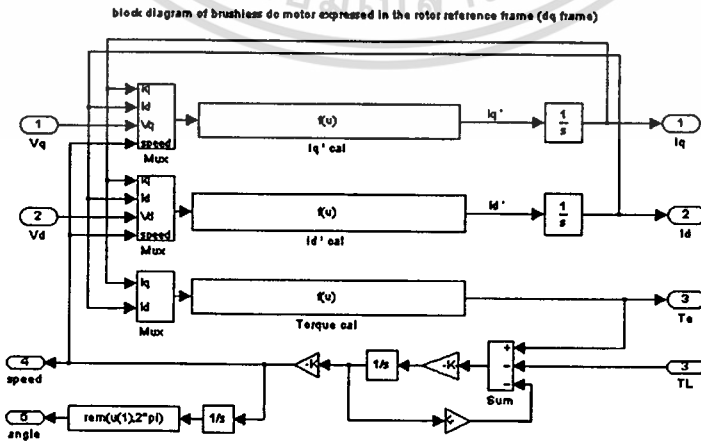
นำสมการที่ได้สร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยเชื่อมโยงความสัมพันธ์ตามรูปที่ 3.3 และสร้างโดยใช้โปรแกรม MATLAB&SIMULINK



รูปที่ 3.3 บล็อกไดอะแกรมของ BLDCM เพื่อนำไปสร้างในโปรแกรม MABLAB&SIMULINK



รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมการแปลงแรงดันจากระนาบ "a,b,c" เป็น "q,d,0"

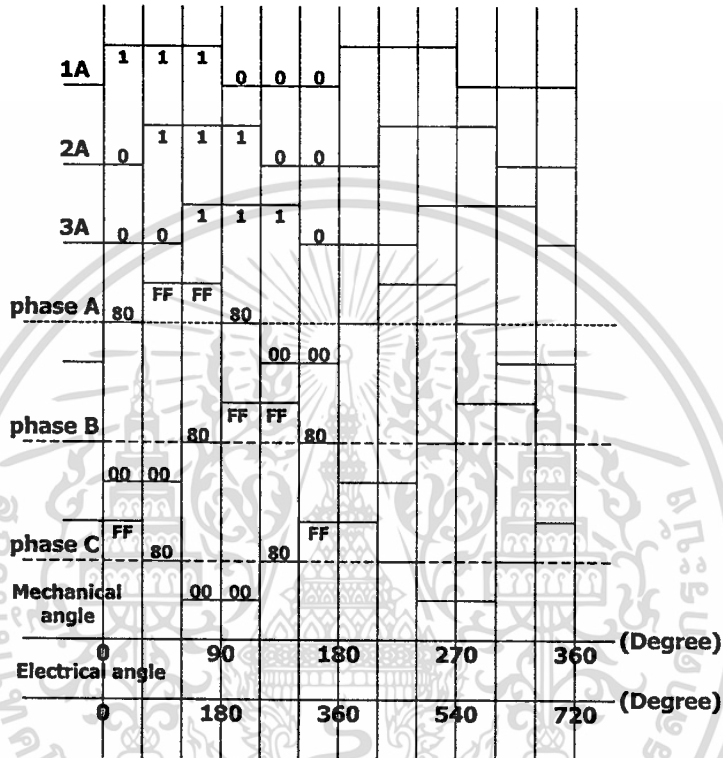


รูปที่ 3.5 บล็อกไดอะแกรมของ BLDCM ที่สร้างด้วยโปรแกรม MABLAB&SIMULINK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ ชุดขับเคลื่อน Brushless DC Machine

จำลองการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส พีดับบลิวเอ็ม โดยสร้างสัญญาณอ้างอิงรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่สมมาตรกัน และห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้าที่ได้จากการแปลงสัญญาณจากเอนโคเดอร์ ดังรูปที่ 3.6 และนำไปสร้างสัญญาณ PWM โดยวิธี chopping 3 เฟส ซึ่งใช้สัญญาณรูปคลื่นอ้างอิง( $f_i$  ;  $i = a,b,c$ ) และคลื่นสามเหลี่ยมความถี่สูง( $V_{mf}$ ) ตามรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.6 แสดงการสร้างสัญญาณรูปคลื่นอ้างอิง เฟส A,B,C ที่สมมาตรกันและห่างกัน 120 องศาทางไฟฟ้า ที่สร้างโดยรับค่าสัญญาณ 1A,2A,3A จากเอนโคเดอร์

สมการที่ใช้สร้างรูปคลื่นอ้างอิง

$$V_a = M \cdot \cos(\theta_e) \quad (3.17)$$

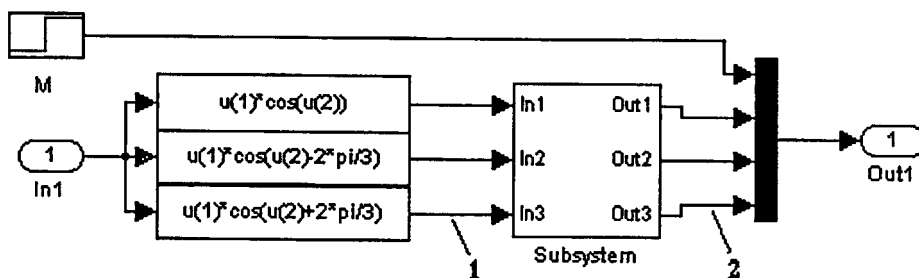
$$V_b = M \cdot \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.18)$$

$$V_c = M \cdot \cos\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.19)$$

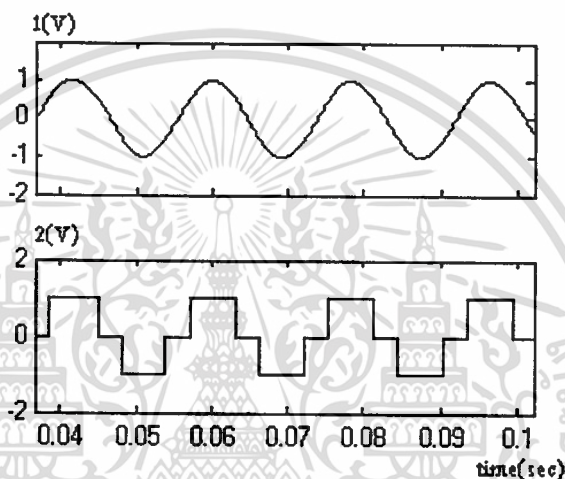
เมื่อ M - ค่าอ้างอิง

$\theta_e$  - มุมองศาทางไฟฟ้าของรูปคลื่นอ้างอิง

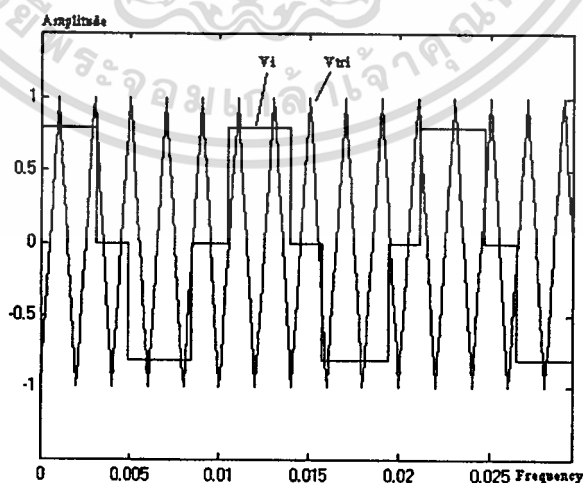
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณรูปคลื่นอ้างอิงด้วยโปรแกรม MATLAB&SIMULINK

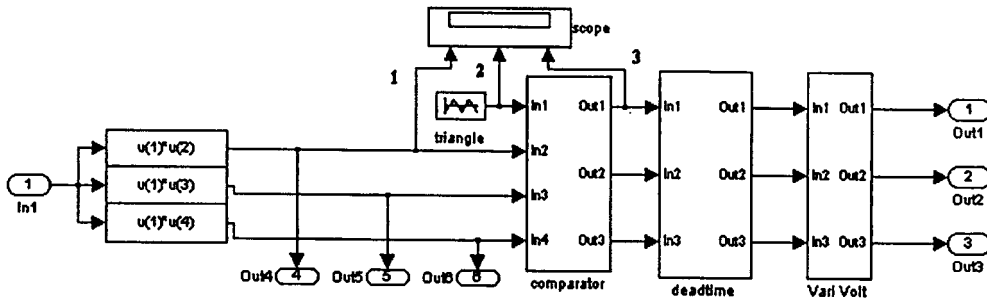


รูปที่ 3.8 แสดงรูปคลื่นที่สร้างจากสมการที่ (3.17),(3.18),(3.19) ใช้ในการสร้างรูปคลื่นอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง

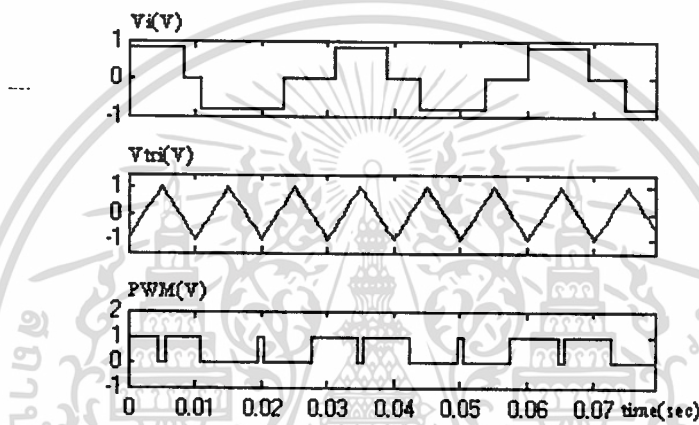


รูปที่ 3.9 แสดงการเปรียบเทียบของสัญญาณรูปคลื่นอ้างอิง และสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยมความถี่สูง เพื่อสร้างสัญญาณพีคดับลิวเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 บล็อกไดอะแกรมการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส PWM



รูปที่ 3.11 แสดงสัญญาณ PWM ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แรงดันที่ขั้วของอินเวอร์เตอร์ คือ

$$V_{io} = \frac{V_{dc}}{2} \quad \text{เมื่อ} \quad V_i(t) > V_{tri}(t); i = a, b, c \quad (3.20)$$

$$V_{io} = -\frac{V_{dc}}{2} \quad \text{เมื่อ} \quad V_i(t) < V_{tri}(t); i = a, b, c \quad (3.21)$$

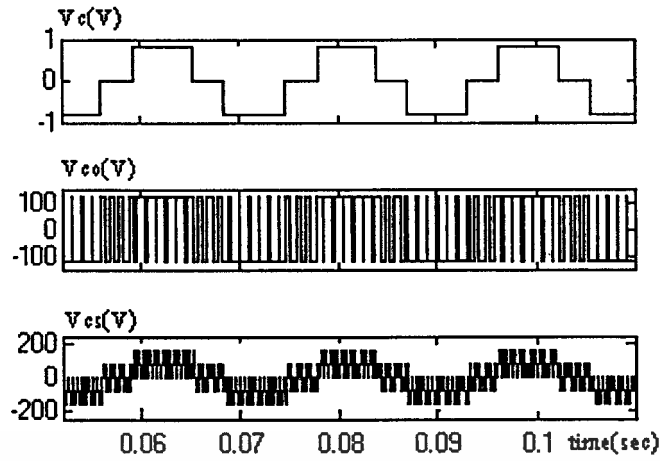
แรงดันเฟสของมอเตอร์

$$V_{as} = \frac{1}{3}(2.V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \quad (V) \quad (3.22)$$

$$V_{bs} = \frac{1}{3}(2.V_{bo} - V_{ao} - V_{co}) \quad (V) \quad (3.23)$$

$$V_{cs} = \frac{1}{3}(2.V_{co} - V_{ao} - V_{bo}) \quad (V) \quad (3.24)$$

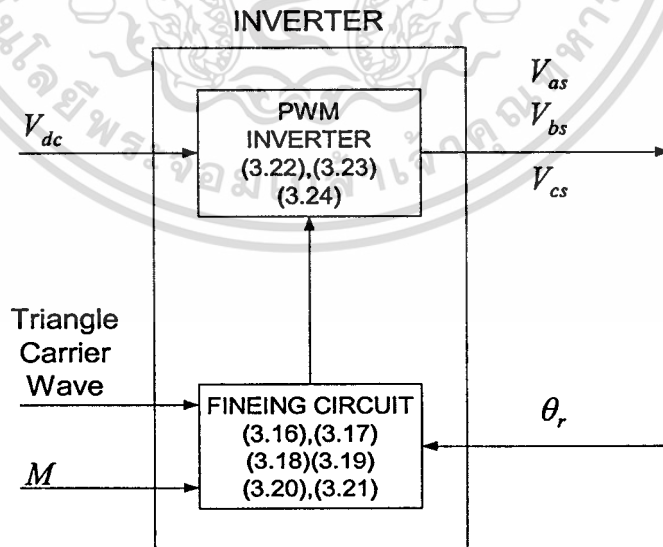
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แสดงรูปคลื่น  $(V_c), (V_{co}), (V_{cs})$  ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยที่  $V_c$  เป็นรูปคลื่นอ้างอิง  $V_{co}$  คือแรงดัน เชาต์พัทของอินเวอร์เตอร์  $V_{cs}$  เป็นแรงดันเฟสของมอเตอร์

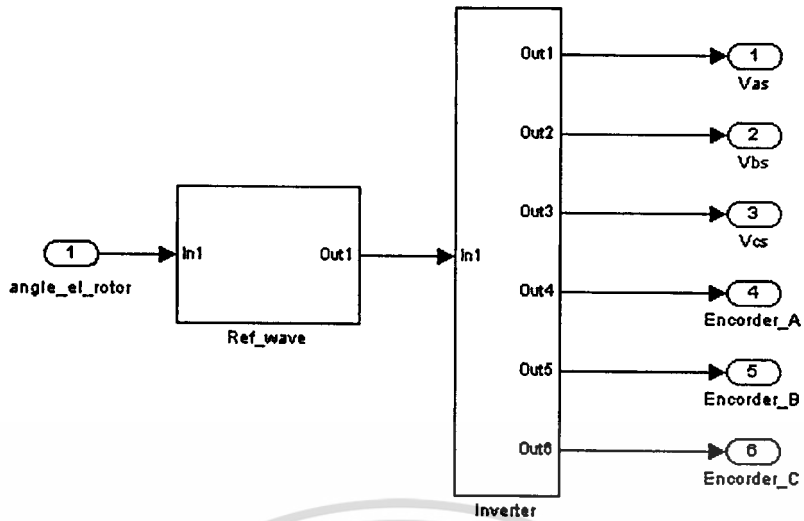
แหล่งจ่ายแรงดันของมอเตอร์ในระบบ "q, d, o" คือ  $V_q, V_d$

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} V_{as} \cdot \cos \theta_r + V_{bs} \cdot \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) + V_{cs} \cdot \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ V_{as} \cdot \sin \theta_r + V_{bs} \cdot \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) + V_{cs} \cdot \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.25)$$



รูปที่ 3.13 บล็อกไดอะแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ อินเวอร์เตอร์ โดยการแทนค่าตาม หมายเลขสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ อินเวอร์เตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

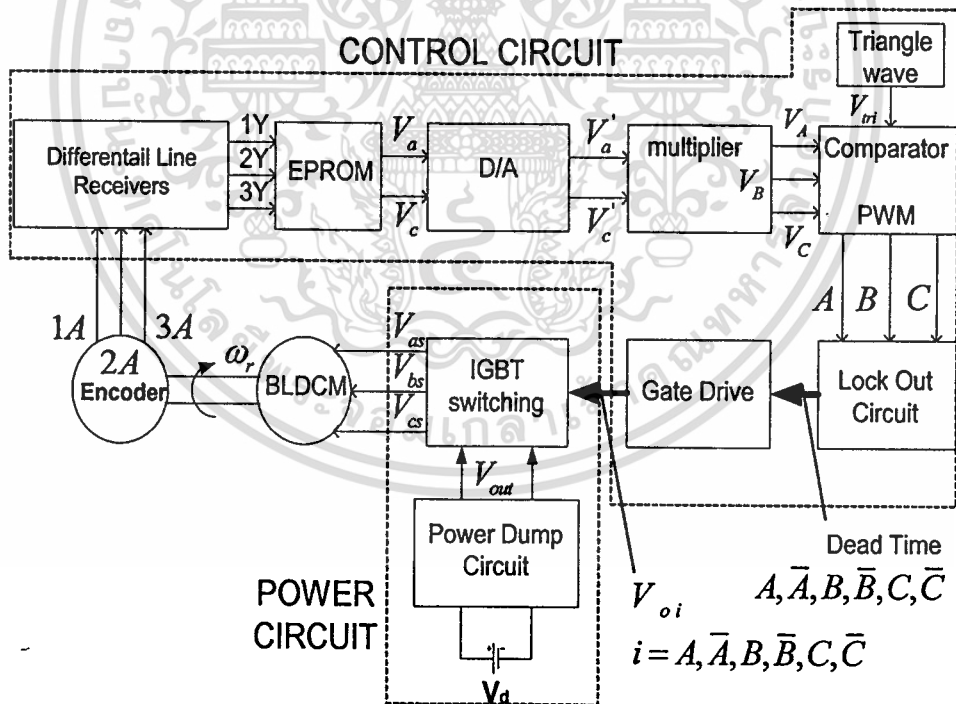
# การออกแบบและการสร้างชุดควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้า

### 4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและสร้างชุดควบคุม ที่ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้า กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน โดยจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

1. ส่วนของวงจรควบคุม
2. ส่วนของวงจรถูกำลัง

ในส่วน ของวงจรควบคุมจะใช้วิธีการควบคุมเฟส และหลักการมอดดูเลชั่น ความกว้างของพัลส์[PWM] สัญญาณ PWM ที่ได้จะทำการสร้างเดดไทม์ เพื่อนำไปใช้ในวงจรขับเคลื่อน ในส่วนของวงจรถูกำลังจะใช้ ไอจีบีที เป็นสวิตช์ ในวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ต่อแบบบริจด์ และชุดของวงจรป้องกันแรงดันย้อนกลับ โดยจะอธิบายรายละเอียดในส่วนต่อไป และมีโครงสร้างของวงจรทั้งหมดดังนี้



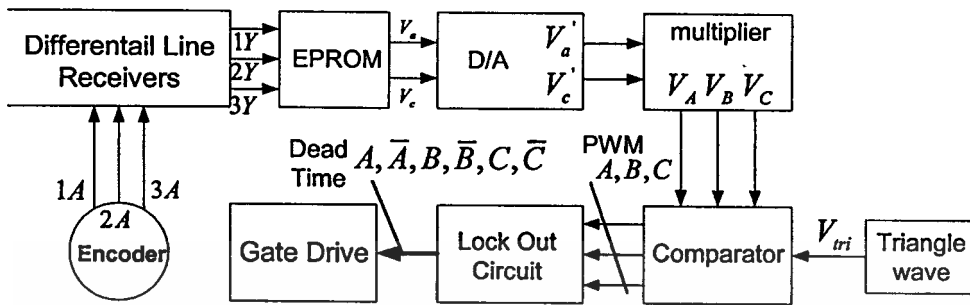
รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของแสดงโครงสร้างชุดควบคุม และชุดกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อน

BLDCM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2 การออกแบบด้าน ฮาร์ดแวร์ ของชุดควบคุม DC Brushless Motor

การออกแบบและ สร้างส่วนต่าง ๆ ของชุดควบคุมในการขับเคลื่อน BLDCM โดยแสดงเป็นส่วนๆ ได้ดังรูป

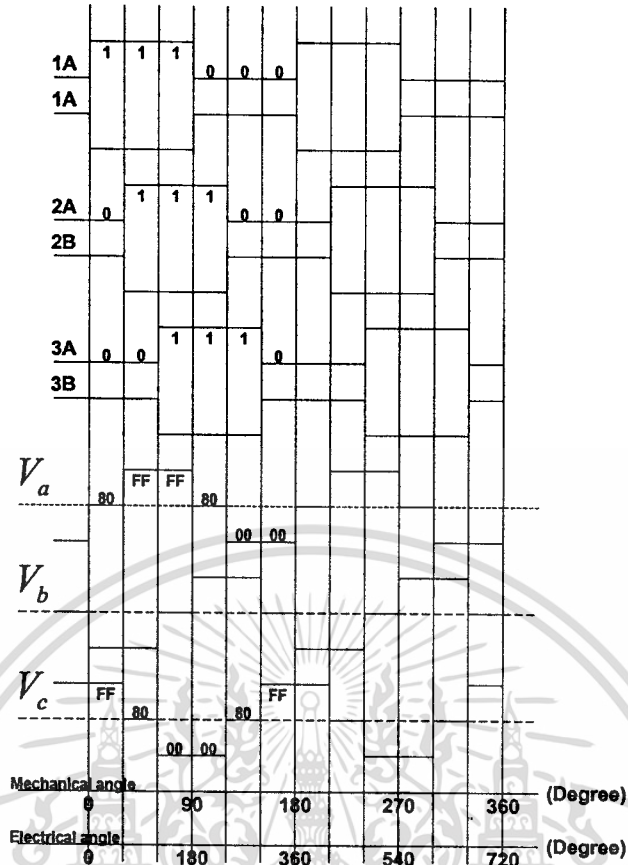


รูปที่ 4.2 แสดงส่วนประกอบของวงจรชุดควบคุมที่ใช้ ในการควบคุม BLDCM

การสร้างสัญญาณควบคุมเพื่อนำไปใช้ในการ เปิด - ปิด ไอจีบีที ในส่วนของวงจรถูกตั้งนั้น เริ่มต้นจากการรับค่าสัญญาณ ซึ่งตำแหน่งโรเตอร์จาก Encoder ผ่านวงจร Differential Line Receivers นำไปซึ่งตำแหน่ง EPROM ที่โปรแกรมรูปคลื่นสัญญาณอ้างอิง สัญญาณที่ได้อยู่ในรูปแบบสัญญาณ ดิจิตอล ต้องทำการแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบของสัญญาณ อนุาล็อก โดยแปลงผ่านวงจร D/A ซึ่งในขั้นตอนนี้จะได้รูปคลื่นสัญญาณอ้างอิง 2 เฟส คือ เฟส A และ เฟส C นำไปผ่านวงจร Multiplier เพื่อสร้างสัญญาณอ้างอิง 3 เฟส A,B และ C ที่สามารถปรับขนาด และ กลับเฟส ของสัญญาณอ้างอิง เพื่อผลในการกลับทิศทางการหมุนของ BLDCM

ตารางที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ของ มุมองศาทางไฟฟ้าของ โรเตอร์ ,สัญญาณซึ่งตำแหน่ง และ ค่าที่โปรแกรมใน อีพรอม ณ.ตำแหน่งใดๆ ของ

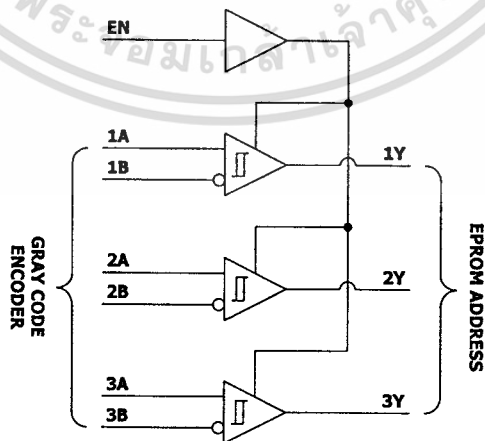
Electrical angle (Degree)	Encoder(Gray Code)			EPROM		
	3	2	1	Address	Data(A)	Data(C)
0	0	0	1	01	80	FF
60	0	1	1	03	FF	80
120	1	1	1	07	FF	00
180	1	1	0	06	80	00
240	1	0	0	04	00	80
300	0	0	0	00	00	FF



รูปที่ 4.3 รูปคลื่นสัญญาณอ้างอิง เฟส A,C สร้างโดยการรับสัญญาณ เกรย์โคด จาก เอนโคดเดอร์ มาที่ค่าใน EPROM

#### 4.2.1 วงจร Differential Line Receivers

วงจร Differential Line Receivers ทำหน้าที่ปรับขนาดและความคมชัดของสัญญาณที่รับค่า สัญญาณจาก เอนโคดเดอร์ นำไปติดตั้งตำแหน่ง อีพรอม ใช้ IC เบอร์ SN75175

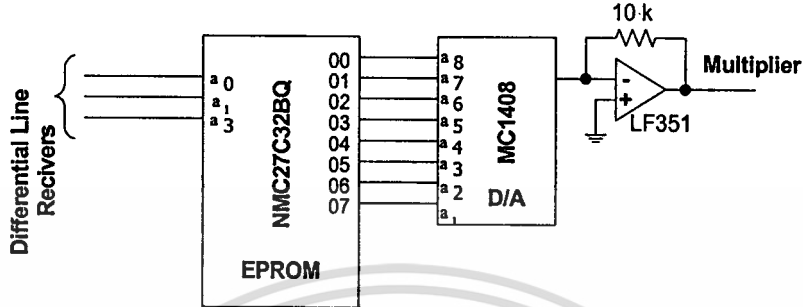


รูปที่ 4.4 วงจร Differential Line Receivers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.2.2 วงจรสร้างสัญญาณรูปคลื่นอ้างอิง

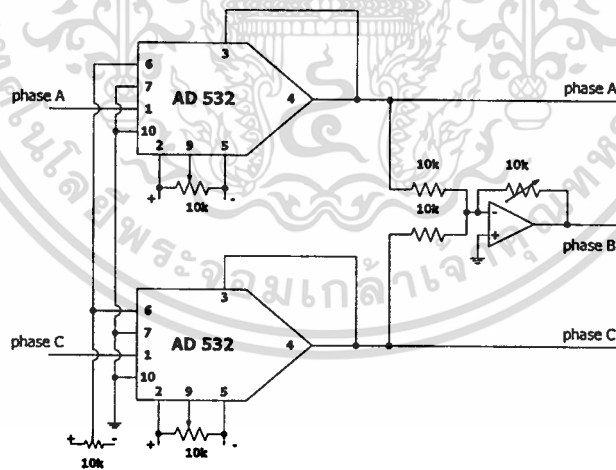
รับสัญญาณจาก Differential Line Receivers เพื่อนำมาจัดตำแหน่ง อีพรอม ที่โปรแกรมรูปคลื่นสัญญาณอ้างอิงไว้(แสดงดังรูปที่ 4.3) นำสัญญาณที่ได้เปลี่ยนจากสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณ อนุาล็อก โดยแปลงผ่านวงจร D/A



รูปที่ 4.5 วงจรสร้างสัญญาณรูปคลื่นอ้างอิงจะใช้ทั้งหมด 2 ชุด ใช้สร้างสัญญาณอ้างอิงเฟส A,C

### 4.2.3 วงจร มัลติพลาย

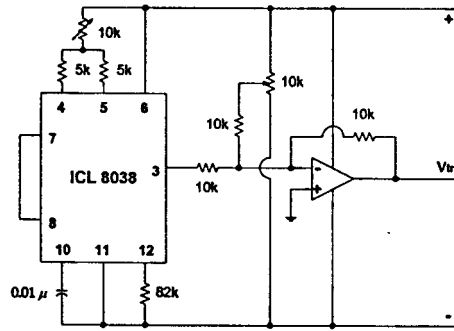
วงจร มัลติพลาย ทำหน้าที่เตรียมสัญญาณอ้างอิงเพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณ PWM คือ ปรับขนาด , กลับเฟสของสัญญาณอ้างอิง เมื่อต้องการ และสร้างสัญญาณอ้างอิง 3 เฟส ใช้ IC เบอร์ AD 532



รูปที่ 4.6 วงจร Multiplier ปรับแต่งสัญญาณอ้างอิง เฟส A,B และ C ที่สามารถปรับแต่งขนาดได้

### 4.2.4 วงจรสร้างสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม

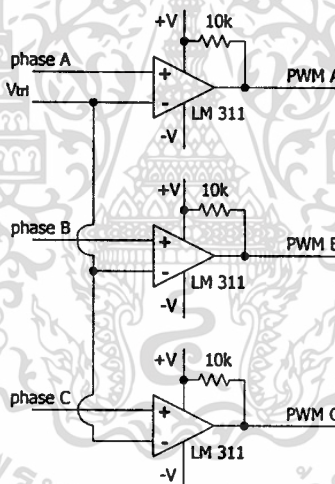
วงจรสร้างสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม เพื่อนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง เพื่อสร้างสัญญาณ PWM ใช้ IC เบอร์ ICL 8038



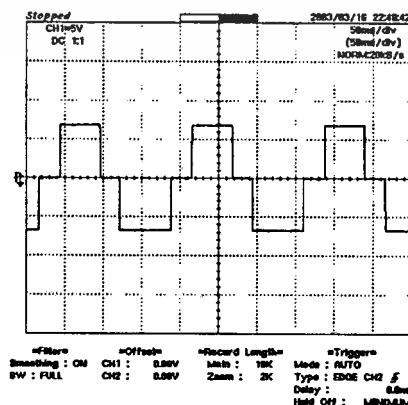
รูปที่ 4.7 วงจรสร้างสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม ที่สามารถปรับความถี่ของสัญญาณได้ โดยการเปลี่ยนค่า ตัวเก็บประจุ ที่ขา 10 และความต้านทานปรับค่าได้ที่ต่อระหว่างขา 4 กับขา 5

#### 4.2.5 วงจรเปรียบเทียบ

รับสัญญาณอ้างอิงจากวงจร มัลติพลาย และสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม นำมาเปรียบเทียบ เพื่อสร้างเอาต์พุต ที่เป็นสัญญาณพีดับบิวเอ็ม โดยใช้ไอซีเบอร์ LM 311

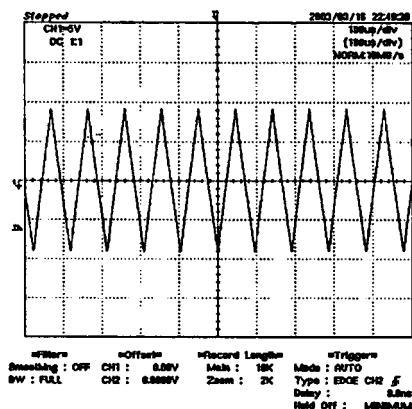


รูปที่ 4.8 วงจรเปรียบเทียบ สร้างสัญญาณรูปคลื่น พีดับบิวเอ็ม ใช้ไอซีเบอร์ LM 311



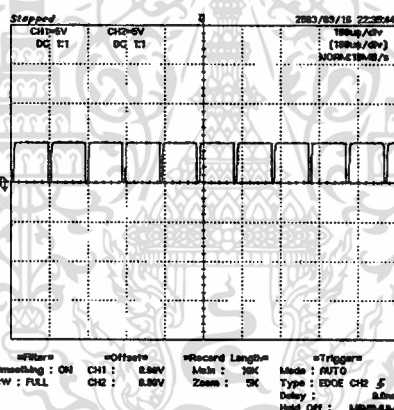
รูปที่ 4.9 รูปคลื่นสัญญาณอ้างอิง 1 เฟส ที่นำมาเปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการวิจัย ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 รูปคลื่นสัญญาณสามเหลี่ยม ที่นำมาเปรียบเทียบ

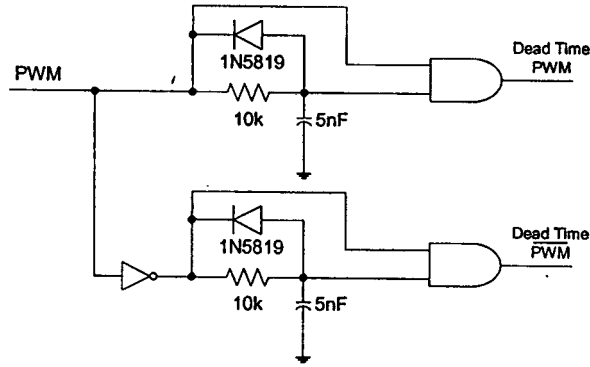
โดยในการเปรียบเทียบ ถ้าสัญญาณสามเหลี่ยมมีค่าน้อยกว่าสัญญาณอ้างอิงจะให้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าเป็นบวก และในทางกลับกันถ้าสัญญาณสามเหลี่ยมมีค่ามากกว่าสัญญาณอ้างอิงจะได้สัญญาณเอาต์พุตมีค่าเป็นลบ ดังนั้นจึงได้สัญญาณเอาต์พุตเป็นพีดับบิวเอมแล้วนำสัญญาณที่ได้ไปเข้าวงจรล็อกเอาต์เพื่อสร้างเดดไทม์ต่อไป



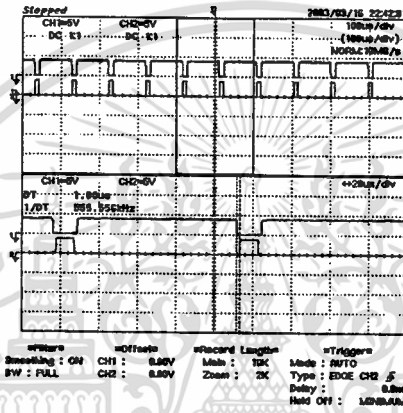
รูปที่ 4.11 สัญญาณพีดับบิวเอมที่ได้จากการเปรียบเทียบรูปคลื่นสัญญาณอ้างอิง 1 เฟส กับสัญญาณรูปคลื่นสามเหลี่ยม

#### 4.2.6 วงจรล็อกเอาต์ ( Lock Out Circuit )

จะรับสัญญาณพีดับบิวเอมจากวงจรเปรียบเทียบ ทำหน้าที่แยกสัญญาณที่จะนำไปควบคุมไอจีบีทีตัวบน และตัวล่างในกึ่งเดียวกันของบริดจ์อินเวอร์เตอร์ โดยสัญญาณที่จะไปควบคุมไอจีบีทีแต่ละตัวในกึ่งเดียวกันนั้นเปิด-ปิด ( on-off ) ไม่พร้อมกัน เพื่อให้ไอจีบีทีแต่ละตัวนั้นทำงานสลับกันไป ซึ่งสัญญาณที่ไปควบคุมไอจีบีทีแต่ละตัวนั้นต้องมีการสร้างเดดไทม์ ( Dead Time ) เพื่อไม่ให้ไอจีบีทีเกิดการช็อตทอร์ ( Short Through ) สำหรับสัญญาณแต่ละเฟสจะใช้วงจรล็อกเอาต์ 1 ชุด ดังนั้นจึงใช้วงจรล็อกเอาต์ทั้งหมด 3 ชุด



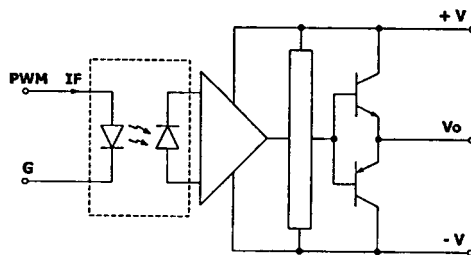
รูปที่ 4.12 วงจรล๊อคเอาต์ ป้องกันการช็อตท루 ( Short Through ) ของ ไอจีบีที ในกึ่งเดียวกัน



รูปที่ 4.13 สัญญาณเอาต์พุตของวงจรล๊อคเอาต์ ที่ใช้ในวงจรควบคุม มีค่าเท่ากับ

4.2.7 วงจรขับเกท (Gate Drive Circuit)

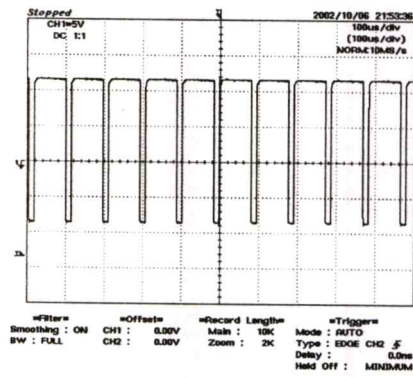
วงจรขับเกทจะใช้ในการขับให้ไอจีบีทีในส่วนของวงจรกำลัง 3 เฟสอินเวอร์เตอร์ เปิด - ปิด ตามที่เราต้องการ ซึ่งจะใช้ทั้งหมด 6 ชุด โดยวงจรขับเกทแต่ละชุดจะรับสัญญาณจากวงจรล๊อคเอาต์แล้วนำมาขยายระดับสัญญาณเพื่อนำไปขับไอจีบีที ซึ่งโดยปกติแล้ววงจรขับเกทจะต้องจ่ายกระแสได้เหมาะสม และเพียงพอกับความเร็วของการสวิตชิ่งที่ต้องการ นอกจากนี้วงจรขับเกทจะทำหน้าที่แยกกราวด์ระหว่างส่วนของวงจรควบคุมกับวงจรกำลัง ทั้งนี้เพื่อป้องกันการรบกวนและเป็นอันตรายจากไฟแรงดันสูงจากวงจรกำลัง โดยใช้ IC เบอร์ TLP 250



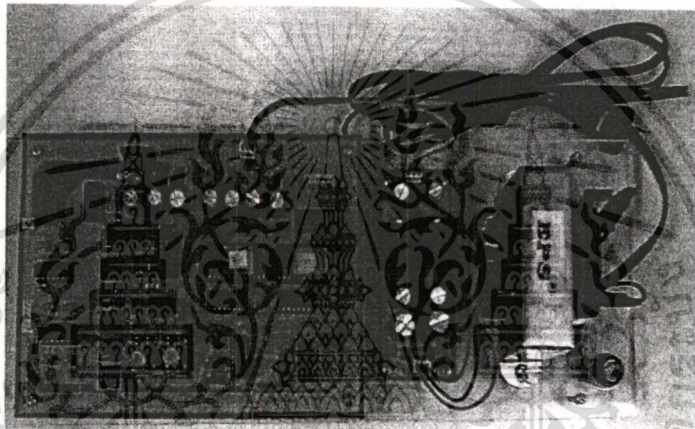
รูปที่ 4.14 วงจรขับเกทสร้างสัญญาณควบคุมการ เปิด-ปิด ไอจีบีที และแยกกราวด์วงจรควบคุม

กับวงจรกำลัง

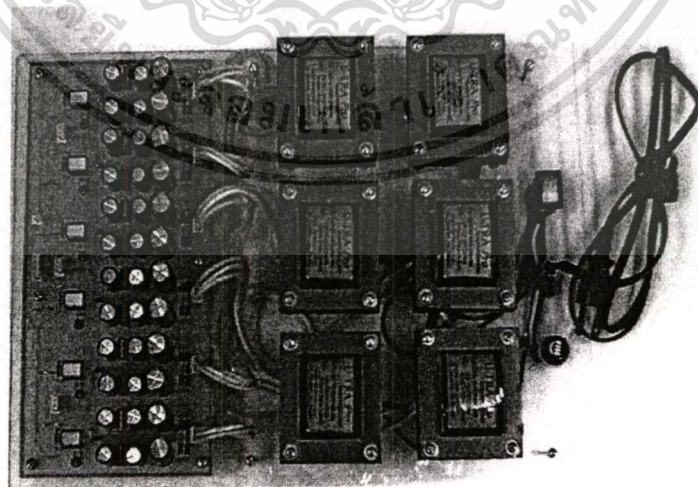
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 เาต์พุตของวงจรขั้วเบส มีขนาด บวก 12 โวลต์ และ ลบ 9 โวลต์ ใช้ควบคุมการเปิด - ปิด ไอซีบีที



รูปที่ 4.16 แสดงชุดวงจรควบคุมที่ใช้ในการทดสอบ

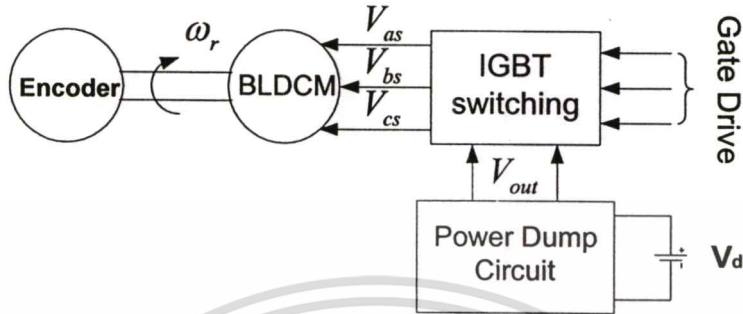


รูปที่ 4.17 แสดงชุดวงจรขั้วเบส ที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การออกแบบด้าน ฮาร์ดแวร์ ของชุดกำลัง DC Brushless Motor

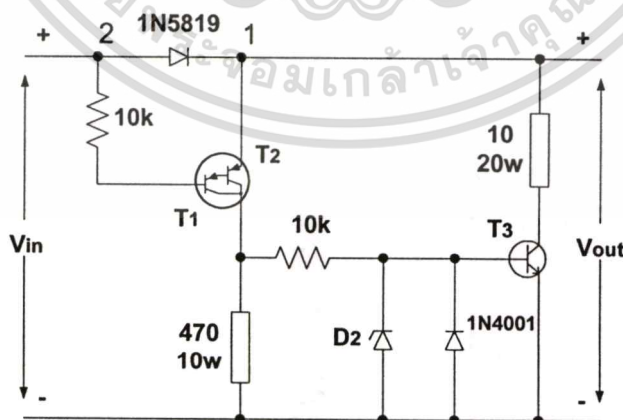
วงจรชุดกำลังทำหน้าที่ในการจ่ายแรงดันให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน ประกอบไปด้วยส่วนของชุดป้องกันแรงดันย้อนกลับ และชุด ไอจีบีทีบริดจิ้นเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.18 แสดงบล็อกไดอะแกรมของชุดกำลัง ในการขับเคลื่อน BLDCM

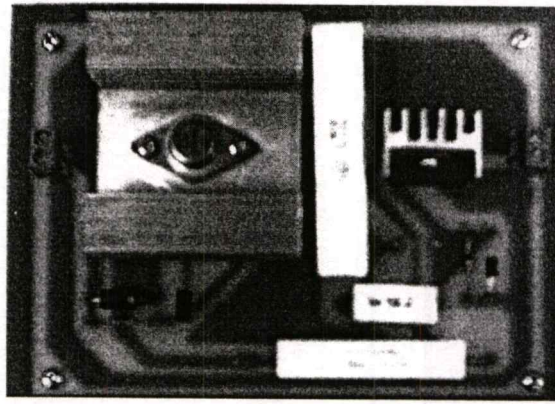
#### 4.3.1 วงจรป้องกันแรงดันย้อนกลับ

วงจรป้องกันแรงดันย้อนกลับ มีหลักการทำงานคือ เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าไหลย้อนออกมาจากตัวมอเตอร์มีขนาดมากกว่าแรงดันที่จ่ายให้กับชุด IGBT แรงดันส่วนที่มากกว่านั้นจะถูกทำลายโดยความต้านทาน  $R_4$  เพื่อป้องกันชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง และไอจีบีที ไม่ให้เกิดความเสียหายเนื่องจากแรงดันดังกล่าว มีหลักการทำงานดังนี้ วงจรจะทำการตรวจจับค่าแรงดันระหว่างจุดที่ 1 และ จุดที่ 2 หากค่าแรงดันจุดที่ 1 มีค่ามากกว่าแรงดันจุดที่ 2 เกิดกว่าค่าที่ออกแบบไว้  $T_1$  และ  $T_2$  จะนำกระแส และ  $T_3$  จะทำงาน ทำให้แรงดันส่วนที่ไหลย้อนกลับไหลผ่าน  $R_4$  และจะถูกแปลงเป็นพลังงานความร้อนโดย  $R_4$



รูปที่ 4.19 แสดงวงจรป้องกันแรงดันย้อนกลับ ใช้ป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับ แหล่งจ่ายไฟตรงและ ไอจีบีที อันเนื่องมาจากมอเตอร์อยู่ในสภาวะเป็นเครื่องกำเนิด

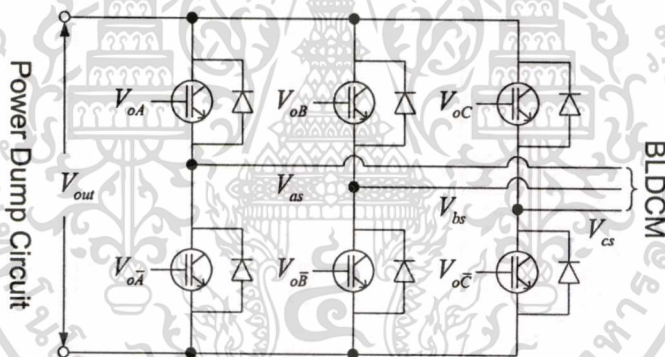
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



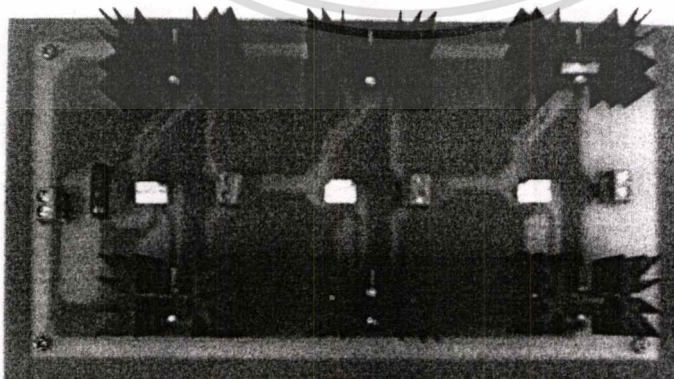
รูปที่ 4.20 แสดงวงจรป้องกันแรงดันย้อนกลับที่สร้างขึ้นเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับ ไอจีบีที , วงจรควบคุม และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

#### 4.3.2 ไอจีบีทีบริดจ์อินเวอร์เตอร์

ชุดไอจีบีทีบริดจ์อินเวอร์เตอร์ จะต่อกับชุดป้องกันแรงดันย้อนกลับทางด้าน  $V_{out}$  ไอจีบีที ต่อ กันแบบบริดจ์ทั้งหมด 6 ตัว รับสัญญาณควบคุมจากวงจรขับเคลื่อน ใช้ IGBT เบอร์ IRG4PC50UD



รูปที่ 4.21 วงจรกำลัง ไอจีบีที บริดจ์ อินเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.22 วงจรกำลัง ไอจีบีที บริดจ์ อินเวอร์เตอร์ ที่สร้างขึ้นโดยใช้ ไอจีบีที เบอร์ IRG4PC50UD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

#### 5.1 บทนำ

ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการสืบค้นพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน (BLDCM) ในสภาวะการทำงานต่างๆกัน คือจำลองพฤติกรรมการเริ่มหมุน , การเปลี่ยนแปลงภาระทางกล และการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ โดยวิธีจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB&SIMULINK และทดลองกับชุดขับเคลื่อนโดยอาศัยหลักการควบคุมเฟส โดยใช้ ไอจีบีที เป็นสวิตช์ 3 เฟส โดยทำการเปรียบเทียบความสามารถของโปรแกรมกับผลที่ได้จากการทดลองจริง โดยได้แบ่งการทดลองในบทนี้ออกเป็น 2 ส่วนคือในหัวข้อที่ 5.2 เป็นผลจากการจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หัวข้อที่ 5.3 เป็นผลการทดลองชุดควบคุมที่ได้จากการออกแบบทางฮาร์ดแวร์

ตารางที่ 5.1 แสดงคุณสมบัติของ มอเตอร์ MITSUBISHI รุ่น HA - SC43

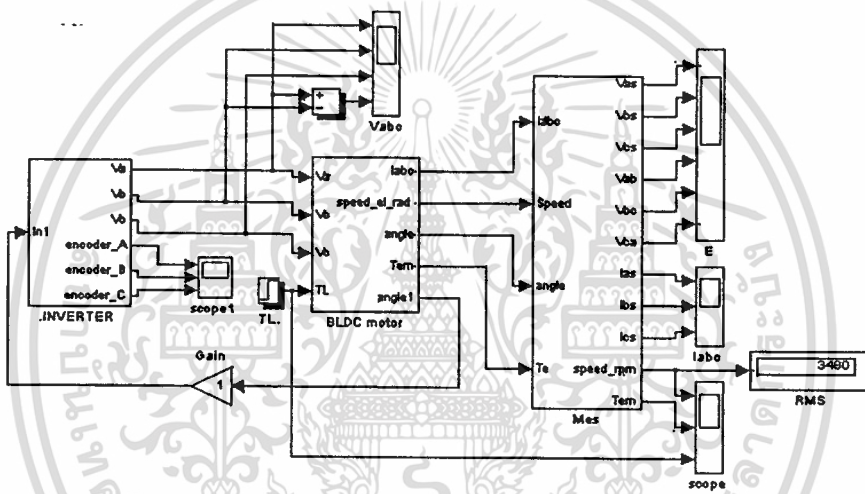
คุณสมบัติ ของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ	
ยี่ห้อ	MITSUBISHI
รุ่น	HA - SC43
ลักษณะการต่อขดลวด	สตาร์
จำนวนโพล	4
ค่าความเฉื่อยของโรเตอร์ (J)	$0.98 (x10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2)$
ค่าความเฉื่อยของโรเตอร์ (B)	$1.325 (x10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2)$
ค่าความต้านทานภายในขดลวด	$1.9 \Omega$
ค่าความเหนี่ยวนำภายในขดลวด	7.33 mH
พิกัดกำลังงาน	400 W.
พิกัดแรงดัน	3~, 200–230 V AC, 50Hz/60 Hz
พิกัดกระแส	2.5 A.
พิกัดความเร็ว	3000 rpm.
ความเร็วสูงสุด	4000 rpm.
พิกัดแรงบิด	1.3 Nm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ผลจากการจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการออกแบบและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในบทที่ 3 ทำการจำลองดูพฤติกรรมของ BLDCM ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

1. จำลองดูพฤติกรรมการเริ่มหมุน จนเข้าสู่สภาวะคงตัว เพื่อดูคุณสมบัติโดยทั่วไป
2. ทำการเปลี่ยนแปลงภาระทางกลให้กับ BLDCM ดูผลการตอบสนองของความเร็ว กระแส โดยการทดสอบที่ภาระทางกล 1.0 Nm(ที่พิกัด)
3. ทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่แหล่งจ่าย สังเกตพฤติกรรมการตอบสนองของ กระแส ความเร็ว และแรงบิดทำการทดสอบโดยเปลี่ยน ค่า มอเตอร์เลขขึ้นอินเด็ก(M) จาก 0.8 เป็น 0.5 ที่ขนาดแรงดัน 240V.(ที่พิกัด)



รูปที่ 5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ BLDCM และ อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส PWM ที่สร้างด้วยโปรแกรม Matlab&Simulink

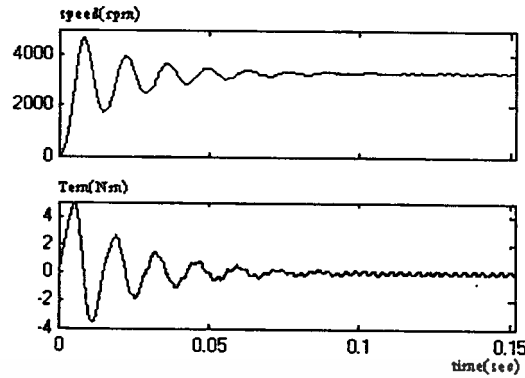
### 5.2.1 จำลองพฤติกรรมกรการเริ่มหมุน

ผลการตอบสนองของมอเตอร์เมื่อจ่ายแรงดันกระแสตรงจากอินเวอร์เตอร์โดยวิเคราะห์จากการเริ่มหมุนมอเตอร์ไปถึงสภาวะคงตัว(steady state) ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

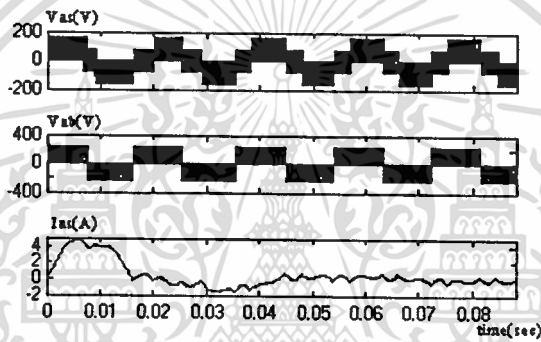
- a) ค่า  $L_q = L_d$
- b)  $\theta_r(0) = \theta_e(0) = 0$
- c) ใช้แรงบิดภาระทางกล  $T_L = 0$  [Nm]
- d) แรงดันกระแสตรงจากอินเวอร์เตอร์  $V_{dc} = 240V$ .
- e)  $M = 0.8$
- f)  $f_\Delta = 10kHz$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมมอเตอร์แสดงให้เห็นตามรูปดังนี้



รูปที่ 5.2 ความเร็วโรเตอร์ ( $\omega_r$ ) และ แรงบิดสนามแม่เหล็ก ( $T_{em}$ )



รูปที่ 5.3 แรงดันเฟส ( $V_{as}$ ) แรงดันไลน์ ( $V_{ab}$ ) และกระแสเฟส ( $I_{as}$ )

จากรูปที่ 5.2 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมช่วงระยะเวลาที่มอเตอร์ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัว รูปที่ 5.3 แสดงถึงพฤติกรรมของมอเตอร์ ในขณะที่เริ่มหมุนจนเข้าสู่สภาวะคงตัวพิจารณาช่วงคาบของแรงดันที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่แหล่งจ่ายที่สัมพันธ์กับความเร็ว

### 5.2.2 จำลองพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนแปลงแรงบิดในสภาวะที่มีภาระทางกล

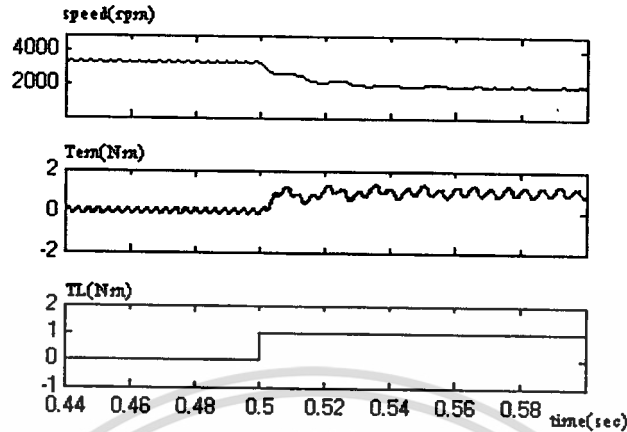
การตอบสนองของมอเตอร์ไฟฟ้าจะได้รับการเปลี่ยนแปลงค่าแรงบิดภาระทางกลจาก

$T_L = 0$  [Nm] เป็น  $T_L = 1$  [Nm] ภายใต้เงื่อนไขดังนี้

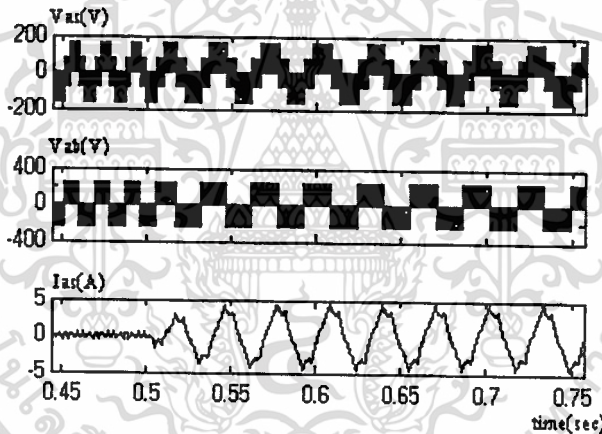
- $L_d = L_q$
- $\theta_r(0) = \theta_e(0) = 0$
- แรงดันกระแสตรงจากอินเวอร์เตอร์  $V_{dc} = 240V$  .
- $M = 0.8$
- $f_\Delta = 10kHz$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ได้จากการจำลองการ การจำลองพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงแรงบิดภาระทางกลแสดงให้เห็นตามรูปดังนี้



รูปที่ 5.4 ความเร็วโรเตอร์ ( $\omega_r$ ), แรงบิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ( $T_{em}$ ) และภาระทางกล  $T_L$  (Nm)



รูปที่ 5.5 แรงดันเฟส ( $V_{as}$ ) แรงดันไลน์ ( $V_{ab}$ ) และกระแสเฟส ( $I_{as}$ )

จากรูปที่ 5.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงภาระทางกลที่มีผลต่อความเร็วที่ค่อยๆ ลดลงและแรงบิดที่มากขึ้น และรูปที่ 5.5 แสดงพฤติกรรมของมอเตอร์เมื่อมีการจ่ายโหลดแบบทันทีทันใดความเร็วจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความถี่แรงดันที่จ่ายให้ และขนาดของกระแสเพิ่มขึ้น

### 5.2.3 การจำลองพฤติกรรมควบคุมความเร็วโรเตอร์

การตอบสนองของมอเตอร์จะหาได้จากการลดลงทันทีทันใดของค่าอ้างอิงรูปคลื่นจาก  $M = 0.8$  เป็น  $M = 0.4$  ภายใต้เงื่อนไขต่อไปนี้

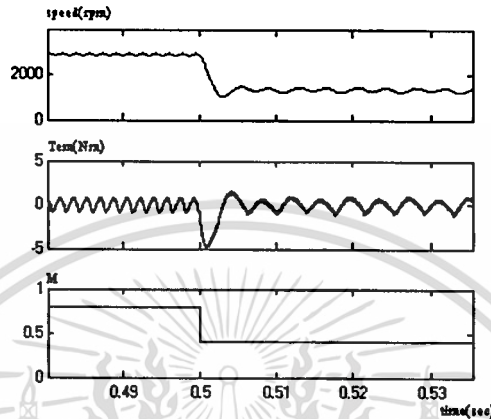
a)  $L_d = L_q$

b)  $\theta_r(0) = \theta_e(0) = 0$

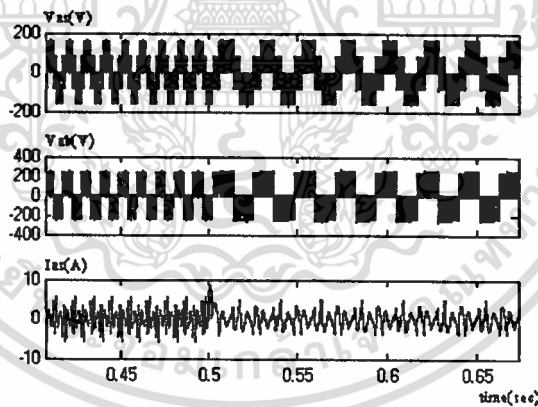
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- c) แรงบิดภาระทางกล  $T_L = 0$  [Nm]  
 d) แรงดันกระแสตรงจากอินเวอร์เตอร์  $V_{dc} = 240V$  .  
 e)  $f_\Delta = 10kHz$

ผลที่ได้จากการจำลองการควบคุมความเร็วโรเตอร์แสดงให้เห็ดังรูปดังนี้



รูปที่ 5.6 ความเร็วโรเตอร์ ( $\omega_r$ ), แรงบิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ( $T_{em}$ ) และภาระทางกล  $T_L$  (Nm)



รูปที่ 5.7 แรงดันเฟส ( $V_{gs}$ ) แรงดันไลน์ ( $V_{ab}$ ) และกระแสเฟส ( $I_{as}$ )

จากรูปที่ 5.6 แสดงพฤติกรรมของมอเตอร์เมื่อลดขนาดของแรงดันลงทันทีทันใด ทำให้ความเร็วลดลงแบบไม่มีดีเทอร์ภาพ และเกิดการแกว่งของแรงบิดภาระทางกลและรูปที่ 5.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดแรงดัน ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสแบบทันทีทันใด และความถี่ของแรงดันเปลี่ยนแปลงตามความเร็ว

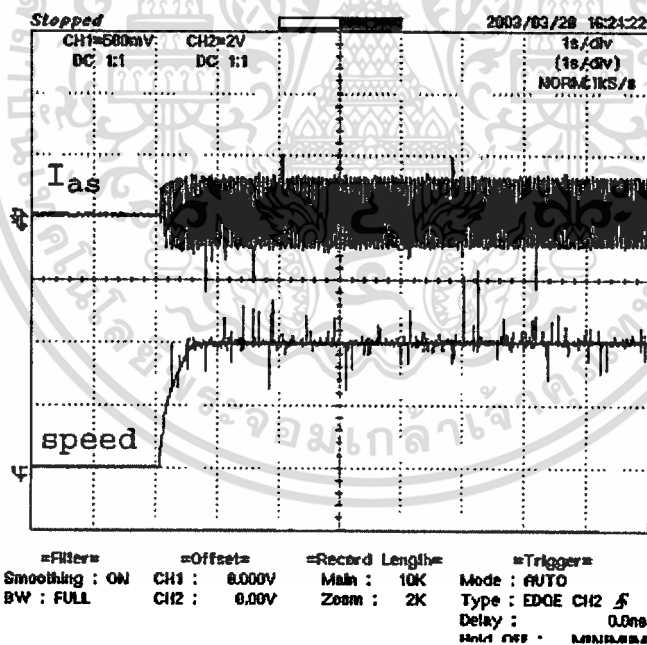
### 5.3 ผลการทดลองชุดควบคุมที่ได้จากการออกแบบทาง ฮาร์ดแวร์

ทำการทดสอบคุณสมบัติของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน(BLDCM) โดยใช้ไดนาโมมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ลักษณะคือ

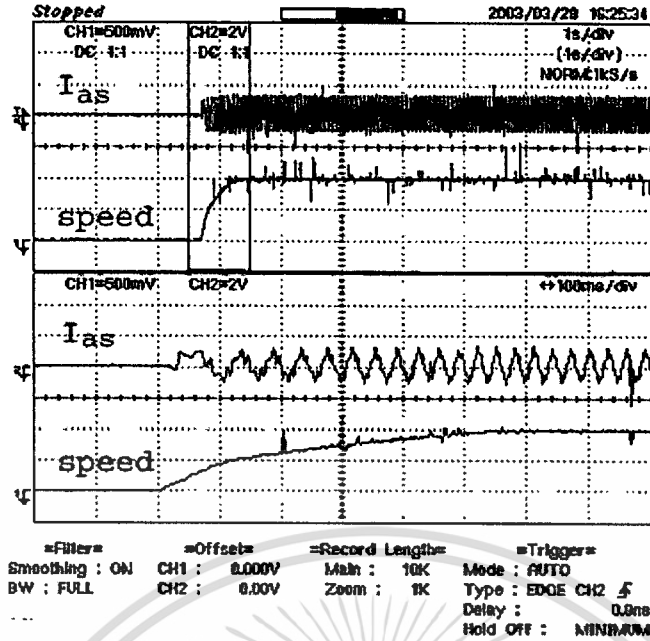
1. ทดสอบคุณสมบัติทั่วไป คือดูพฤติกรรมตอนเริ่มหมุนไปสู่สภาวะคงตัว
2. ทดสอบการเปลี่ยนแปลงภาระทางกลแบบทันทีทันใดกับ BLDCM เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทางไฟฟ้าและทางกลของ BLDCM
3. ทำการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่แหล่งจ่าย โดยเปลี่ยน ค่า มอเตอร์เลขอินเด็ก(M) จาก 0.8 เป็น 0.4 ที่ขนาดแรงดัน 240V.(ที่พิกัด)

#### 5.3.1 ทดสอบพฤติกรรมตอนเริ่มหมุนไปสู่สภาวะคงตัว

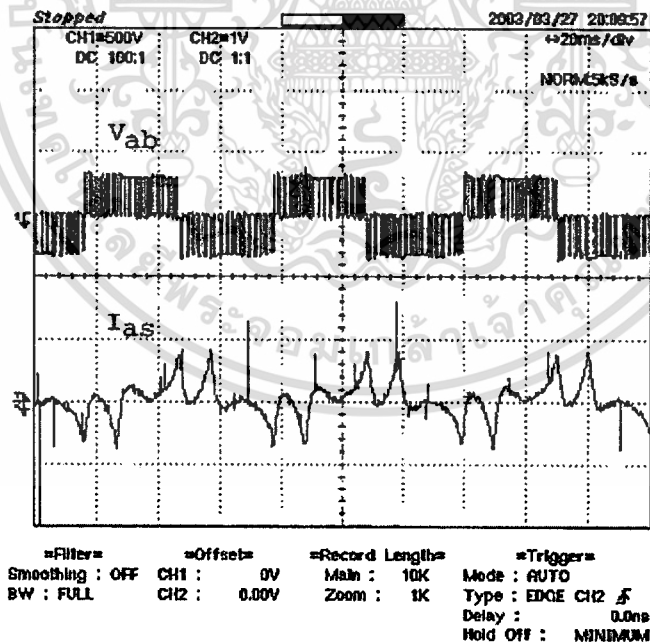
ทำการจ่ายแรงดันกระแสตรงขนาด 60 โวลต์ แบบทันทีทันใดเพื่อดูผลการตอบสนองในสภาวะ ทรานเซียน ซึ่งสามารถทราบพฤติกรรมของ BLDCM ทั้งทางกลและทางไฟฟ้าได้จากรูปคลื่นกระแส และเส้นกราฟความเร็วรอบโดยพิจารณาในช่วง ขณะเริ่มหมุนไปสู่สภาวะคงตัว



รูปที่ 5.8 แสดงพฤติกรรมของกระแสไฟฟ้าและความเร็วของ BLDCM ในสภาวะเริ่มหมุนไปสู่สภาวะคงตัว



รูปที่ 5.9 แสดงรูปขยายพฤติกรรมของกระแสเฟสในช่วงระยะเวลาที่เริ่มหมุนไปสู่สภาวะคงตัวพิจารณาช่วงคาบของกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามความเร็วรอบเนื่องจากความถี่ของสัญญาณทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายได้มาจากความเร็วรอบของ BLDCM

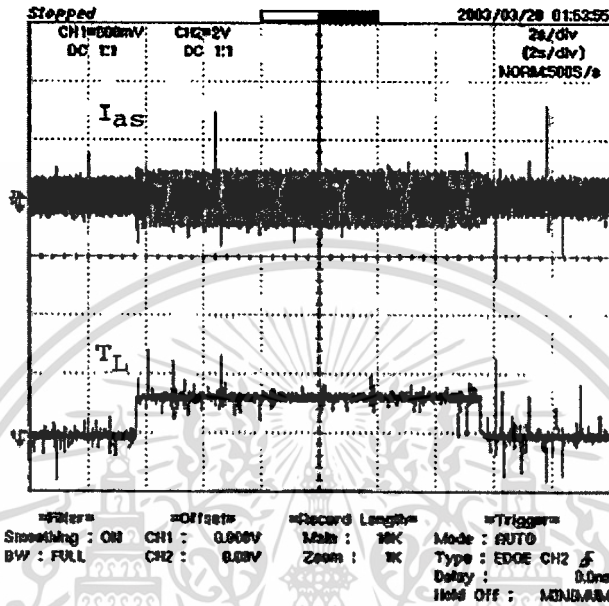


รูปที่ 5.10 แสดงรูปคลื่นกระแสและแรงดันระหว่างเฟสของ BLDCM เมื่ออยู่ในภาวะคงตัว

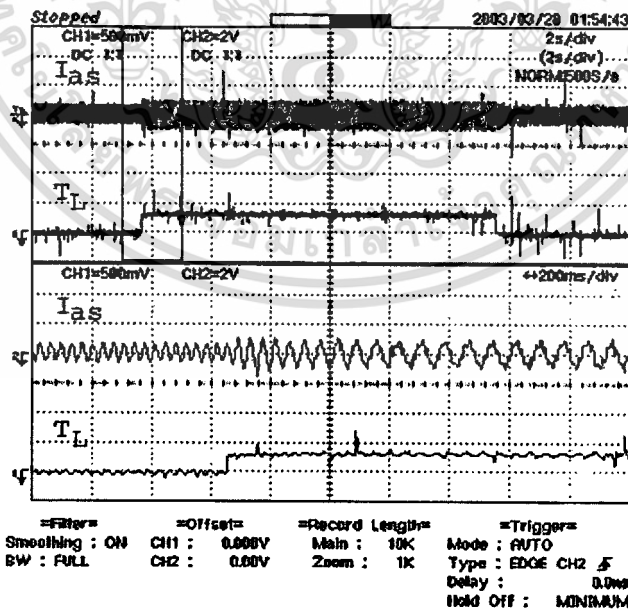
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.2 ทดสอบการเพิ่มภาระทางกล

ทำการเพิ่มภาระทางกลแบบทันทีทันใดในสถานะที่ BLDCM อยู่ในสถานะคงตัว พิจารณาการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมทางไฟฟ้า และทางกลของ BLDCM โดยที่พฤติกรรมทางไฟฟ้าพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของกระแส และช่วงคาบเวลาที่เปลี่ยนไป



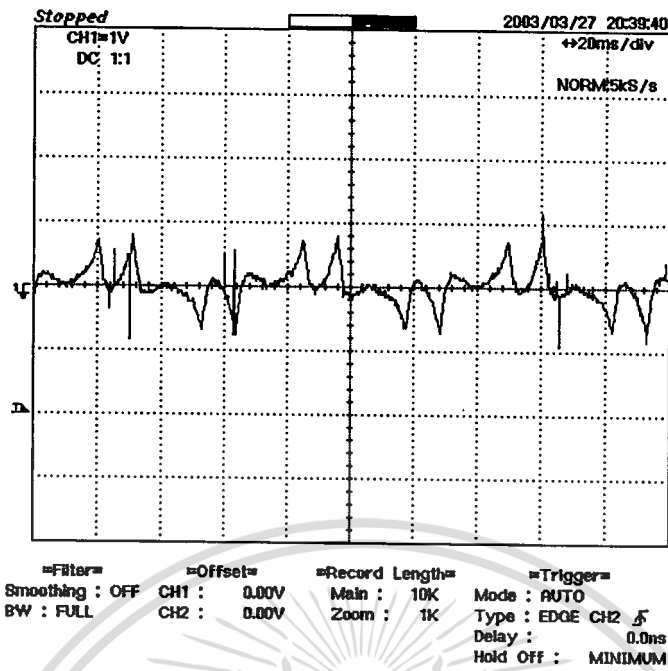
รูปที่ 5.11 แสดงรูปคลื่นกระแสเฟสและ กราฟการเพิ่มภาระทางกลแบบทันทีทันใดที่ 0.3 Nm



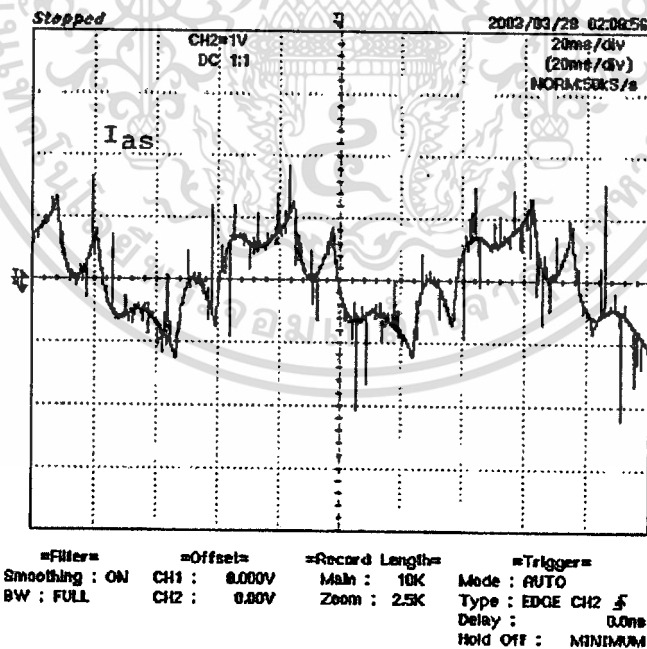
รูปที่ 5.12 ส่วนขยายรูปคลื่นกระแสช่วงขณะเปลี่ยนแปลงภาระทางกล เมื่อภาระทางกลเพิ่มขึ้น ขนาดของกระแสก็จะมาก และช่วงคาบของของกระแสกว้างขึ้นแสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบของ BLDCM ลดลงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงาน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 5.15 แสดงส่วนขยายรูปคลื่นกระแสของ BLDCM ในสถานะคงตัว เมื่อไม่มีภาระทางกล พิจารณารูปร่างของกระแส เนื่องจาก การใช้แรงดันรูปคลื่นขั้นบันไดมาใช้ในการสร้างสัญญาณขับเกท จึงทำให้ได้กระแสดังรูป



รูปที่ 5.16 แสดงส่วนขยายรูปคลื่นกระแสของ BLDCM ในสถานะคงตัว เมื่อมีภาระทางกล 0.3 Nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 บทสรุป

ในบทที่ 5 แสดงพฤติกรรมทางไฟฟ้าและทางกลของ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน(BLDCM) ในสภาวะต่างๆ กันคือ พฤติกรรมการเริ่มหมุนไปสู่สภาวะคงตัว, การเปลี่ยนแปลงภาระทางกล และการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่ขั้วของ BLDCM ที่ได้จาก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้โปรแกรม Matlab&Simulink และที่ได้จากการทดสอบจริง ซึ่งใช้ไดนาโมมิเตอร์เป็นเครื่องมือในการทดสอบ เป็นไปในทิศทางเดียวกัน

ในการทดลองนี้ ได้ทำการทดสอบเพื่อดูพฤติกรรมทางไฟฟ้าและทางกล โดยแบ่งการพิจารณาได้ดังนี้

1. แสดงพฤติกรรมการเริ่มหมุนไปสู่สภาวะทางกล จากรูปที่ 5.2,5.3 เป็นการจำลองพฤติกรรมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแสดงให้เห็นพฤติกรรมทางกลคือในช่วงสภาวะเริ่มหมุนซึ่งความเร็วรอบจะสัมพันธ์กับความถี่ของแรงดันที่จ่ายให้กับ BLDCM พิจารณาเทียบกับรูปที่ 5.8 และ 5.9 ซึ่งเป็นผลจากการทดลองจริง มีลักษณะที่เหมือนกันคือในช่วงขณะเริ่มหมุนความถี่ช่วงคาบของกระแสจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนคงที่เมื่อ BLDCM เข้าสู่สภาวะคงตัว ส่วนเส้นกราฟความเร็วในช่วงเริ่มหมุนจนเข้าสู่สภาวะคงตามรูปที่ 5.2 ตัวนั้นมีการกระเพื่อมของกราฟในช่วงสั้นๆ เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองจริงตามรูปที่ 5.8 ไม่มีการกระเพื่อมของสัญญาณ เนื่องมาจากการใช้ ไดนาโมมิเตอร์ ซึ่งมีความหนืด จึงทำให้ ไม่มีการกระเพื่อมของสัญญาณ ในช่วงสั้นๆ ให้เห็น

2. แสดงพฤติกรรมทางไฟฟ้าและทางกลของ BLDCM เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงภาระทางกลสามารถสรุปผลได้ดังนี้คือ จากรูปที่ 5.4 แสดงผลที่ได้จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปลี่ยนแปลงภาระทางกลจาก 0 Nm เป็น 1 Nm แบบทันทีทันใด สังเกตได้ว่า ความเร็วรอบจะค่อยๆ ลดลง จนเข้าสู่สภาวะคงตัว พิจารณาเปรียบเทียบกับรูปที่ 5.17,5.18 เป็นผลที่ได้จากการทดสอบจริง ให้ผลในลักษณะเดียวกัน ส่วนพฤติกรรมทางไฟฟ้า แสดงได้จากรูปที่ 5.5 เมื่อทำการเพิ่มภาระทางกล ค่าของกระแสมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ ค่าความถี่ช่วงคาบของ กระแสมีค่าลดลง เนื่องจากความเร็วของ BLDCM ลดลงนั่นเอง เช่นเดียวกับผลที่ได้จากการทดสอบจริง ซึ่งแสดงให้เห็นตามรูปที่ 5.11,5.12,5.13,5.14,5.15 และ 5.16 ซึ่งจะแสดงพฤติกรรมทางไฟฟ้าของ BLDCM เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระทางกล

3. ทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงดันที่ขั้ว เพื่อดูพฤติกรรมของ BLDCM พิจารณารูปที่ 5.6 ซึ่งแสดงพฤติกรรมทางกลเมื่อ ทำการลดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ BLDCM โดยการปรับค่า

ตัวประกอบกำลัง Modulation index(M) จาก 0.8 เป็น 0.4 แบบทันทีทันใด เมื่อ มอเตอร์ถูกปรับ การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดแรงดันแหล่งจ่ายลงทำให้ค่าของความเร็วลดลงโดยมีการกระเพื่อมของสัญญาณก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัว ส่วนพฤติกรรมทางไฟฟ้าแสดงให้เห็นตามรูปที่ 5.7 ในขณะที่ทำการปรับขนาดแรงดันทันทีทันใดนั้น พิจารณาจากรูปคลื่นกระแสซึ่งจะมีการกระชากในขณะที่เปลี่ยนแปลงแรงดันแบบทันทีทันใด ก่อนจะเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งความถี่ช่วงคาบของ กระแสมีค่าลดลงเนื่องจากความเร็วรอบลดลง หากพิจารณาตามรูปที่ 5.20 เป็นกราฟที่ได้จากการทดสอบจากวงจรจริง ลักษณะของกราฟจะเป็นเชิงเส้นซึ่งเป็นคุณสมบัติของ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งสามารถใช้อธิบายผลที่ได้จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้

## 6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

ผลที่ได้จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลที่ได้จากการทดสอบจริง สามารถนำไปใช้อธิบายพฤติกรรมทางไฟฟ้าและทางกลของ BLDCM ได้ เนื่องจากไม่สามารถทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขเดียวกันได้ทั้งหมด เพราะข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ จึงส่งผลให้มีข้อจำกัดในการเปรียบเทียบผลการทดสอบ กับผลที่ได้จากการจำลอง แต่สามารถสรุปได้ว่า สามารถใช้ผลที่ได้จากการจำลองโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อธิบายถึงพฤติกรรมทางไฟฟ้าและทางกลของ BLDCM ได้ เนื่องจากพฤติกรรมที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลที่ได้จากการทดลองจากไดนาโมมิเตอร์ อีกตัวแปรที่มีความสำคัญคือ ไดนาโมมิเตอร์ที่ใช้มีความหนืด ซึ่งมีผลต่อการแสดงพฤติกรรมทางกล ของ BLDCM จึงเป็นผลให้แสดงผลการตอบสนองได้ไม่ดีเท่าที่ควร แนวทางในการพัฒนา โปรแกรมที่สร้างขึ้นยังมีการใช้งานที่ยังยากอยู่ในการใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลอง อีกทั้งยังไม่ได้รวมผลอันเนื่องมาจากอุปกรณ์ ที่อาจเกิดแรงดันตกคร่อมขึ้น ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ผลการทดลองกับผลจากการจำลองการทำงานไม่ตรงกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลที่เกิดขึ้นจาก R และ C ในวงจร เดดไทม์ และค่ากำลังสูญเสียทางกลก็มีได้นำมาคิด จึงมีความผิดพลาดของค่าที่ได้อยู่บ้าง หากทำการปรับปรุงและเพิ่มเติมในส่วนของสมการทางคณิตศาสตร์ ให้มีความสมบูรณ์ ของแบบจำลอง ค่าที่ได้ก็จะมีค่าผิดพลาดน้อยลง ซึ่งในกรณีที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้เป็นกรณีนำเสนอ เพื่อใช้เป็นกรณีศึกษาเพื่อนำไปพัฒนาต่อไป

## หนังสืออ้างอิง

- [1] นิติพงษ์ สมไชยวงศ์, ประกาศ อุดคภิมหาพันธ์ "การวิเคราะห์และจำลองพฤติกรรมของมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปลงถ่าน", วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 20, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2546, หน้า 97 - 102
- [2] J.M.D. Murphy and F.G. Turnbull, "Power Electric Control of AC Motor," Pergamon Rpress, 1988.
- [3] T.S.E. Miller, "Brushless Permanent – Magnet and Reluctance Motor Drives," Claverdon – Press – Oxford, 1989.
- [4] T.J. Sokira and W. Jaffe, "Brushless DC Motor Electronic Commutation and Control," Tab Book INC, 1989.
- [5] Y. Dote and S. Kinoshita, "Brushless Servomotors Fundamentals and Applications," Clarcndon – Press – Oxford, 1990.
- [6] P.C. Krause, "Analysis of Electric Machinery," McGraw – Hill Book company, 1987.
- [7] P.C. Krause, R.M. voyles and O. Wasynczuk, "Anulysis and Simulation of a Brushless DC Motor," Proc. Of sixth Internation Motor – conf., April 1984, pp.86-94
- [8] D.A. Bradley, "Basic Electrical Power and Machines," Chapman & Hall, 1994.
- [9] R.Krishnan, "Electric Motor Drives Modeling, Analysis, and Control," Virginia Tech, Blacksborg. VA, 2001.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายนิติพงษ์ สมไชยวงศ์  
 เกิดวันที่ 22 มิถุนายน 2517 ที่จังหวัดเชียงราย  
 การศึกษา ปีการศึกษา 2532 - 2535 ระดับ ปวช. สาขา ไฟฟ้า  
 วิทยาลัยเทคนิคเชียงราย  
 ปีการศึกษา 2535 - 2537 ระดับ ปวส. สาขา ไฟฟ้า  
 สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ เชียงใหม่  
 ปีการศึกษา 2537 - 2539 ระดับ ปริญญาตรี สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า  
 สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา

### ประสบการณ์ทำงาน

ธ.ค. 2539 – ปัจจุบัน : อาจารย์ 1 ระดับ 4 แผนก ไฟฟ้า  
 สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเชียงราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้