

การปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง
ด้วยแบบจำลองเสมือนจริง

THE IMPROVEMENT MECHANICAL CHARACTERISTIC
OF DC MACHINE USING VIRTUAL MODEL

ณัฐรักษ์ นฤพร
NATARAK NARUJORN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2006-EN-M-960-045

การปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง
ด้วยแบบจำลองเสมือนจริง

THE IMPROVEMENT MECHANICAL CHARACTERISTIC
OF DC MACHINE USING VIRTUAL MODEL



ณัฐรักษ์ นฤวร

NATARAK NARUVORN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 79822
วัน,เดือน,ปี..... 18 เม.ย. 2551

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2551

**THE IMPROVEMENT MECHANICAL CHARACTERISTIC
OF DC MACHINE USING VIRTUAL MODEL**

NATARAK NARUVORN

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

2008

KMITL-2008-EN-M-060-045

COPYRIGHT 2008

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยแบบจำลองเสมือนจริง
นักศึกษา	นายณัฐรักษ์ นฤวร
รหัสประจำตัว	46068010
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ประภาส อุกคภิมาพันธุ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบและสร้างตัวชดเชยค่าทางกลด้วยพลังงานไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิเคราะห์ฟังก์ชันของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในส่วนของความเฉื่อย และความหนืด เพื่อชดเชยและปรับปรุงค่าให้มีค่าตามที่ต้องการในวิทยานิพนธ์ได้ออกแบบตัวชดเชยด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK และสร้างตัวชดเชยคุณสมบัติทางกลผ่านคอมพิวเตอร์ และไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อประยุกต์ใช้เทคนิคดังกล่าวนี้ มาสร้างโพลด์เสมือนจริงสำหรับไดนาโมมิเตอร์ ผลที่ได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ และการประยุกต์ใช้งานเป็นโพลด์เสมือนจริงสามารถให้ผลที่สอดคล้องตามหลักทฤษฎี และสามารถปรับค่าชดเชย ความเฉื่อย และความหนืดได้ตามที่ต้องการ

Thesis Title	The Improvement Characteristics of DC Machine Using Virtual Model
Student	Mr. Natarak Naruvorn
Student ID.	46068010
Degree	Master of Engineering
Program	Instrumentation Engineering
Year	2008
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Prapart Ukakimapurn

ABSTRACT

This thesis presents the designing and implementation the electric compensation for mechanical loss of dc motor. Mathmodel of moment of inertia and viscos friction is analyzed for compensation and improvement to the design. In addition, the thesis design the compensator based on computer and microcontroller. They apply to control the virtual load of dynamometer. The experimental results show the simulation of the compensation and its application as virtual load that relate to theory. Moreover, the technique can adjust the compensation gain on the desire value

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ปรีภษา รศ. ประภาส อุกคิมพันธ์ุ ที่ให้คำชี้แนะช่วยแก้ไขปัญหาดลอดจนองค้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีมา โดยตลอด ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ กฤษณ์ เสมอพิทักษ์ ที่คอยให้การช่วยเหลือเกี่ยวกับแนวทางการ ออกแบบโปรแกรมเมทแลป ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ รศ. ไสว พงศ์สวัสดิ์ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการทำวิจัยมาโดยตลอด

กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และ ครอบครัว และ ผู้พระคุณทุกท่านที่ได้เป็นกำลังใจ และสนับสนุนในการศึกษามาโดยตลอด

ณัฐรักษ์ นฤวร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	1
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานของเครื่องกลไฟฟ้า.....	3
2.1 บทนำ.....	3
2.2 พื้นฐานการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	3
2.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	4
2.4 ประเภทของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	7
2.4.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน.....	7
2.4.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม.....	8
2.4.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม.....	9
2.4.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก.....	11
2.5 แทคโคเจนเนอเรเตอร์.....	12
2.6 การควบคุมความเร็วของดีซีมอเตอร์.....	13
2.6.1 การบังคับแบบเปิดลูป.....	13

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6.1.1 ตัวบ่งชี้ความต้านทานที่ปรับค่าได้.....	13
2.6.1.2 ตัวบ่งชี้แบบทรานสฟอร์มเมอร์ที่ปรับค่าได้.....	15
2.6.1.3 ตัวบ่งชี้แบบSCR (ไทรสเตอร์)	16
2.6.2 การบ่งชี้แบบปีคลูฟ.....	18
2.7 รูปจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	19
2.8 การออกแบบโปรแกรมบนไมโครคอนโทรลเลอร์.....	21
2.8.1 ข้อมูลเบื้องต้นของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ dsPIC.....	21
2.8.2 การออกแบบโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์.....	22
2.9 พัลส์วิดท์โมดูเลชันแอมพลิไฟเออร์(PWMA)	22
2.9.1 การทำงานของพัลส์วิดท์โมดูเลชันแอมพลิไฟเออร์.....	22
2.9.2 ระบบคอนโทรลความเร็วที่ใช้พัลส์วิดท์โมดูเลชันแอมพลิไฟเออร์.....	25
2.10 วงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์.....	27
บทที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพลวัต.....	29
3.1 บทนำ.....	29
3.2 การวิเคราะห์ระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	29
3.3 การจำลองหาตัวชดเชยของระบบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	32
บทที่ 4 การควบคุมแบบ Real-Time โดยใช้โปรแกรม Matlab.....	35
4.1 บทนำ.....	35
4.2 การทำงานของลูฟการควบคุมแบบReal-Time.....	35
4.3 การวิเคราะห์ระบบโดยใช้ โปรแกรม Matlab.....	37
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	39
5.1 การทดลอง.....	39
5.1.1 การทดลองโดยใช้โปรแกรม simulink.....	39
5.1.2 การทดลองกับไดนาโมมิเตอร์และมอเตอร์.....	40
5.2 แผนภูมิการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์.....	42

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.3 แผนภูมิการทำงานของ โปรแกรม MatLab	43
5.4 ผลการทดลอง.....	44
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	48
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	48
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา.....	48
บรรณานุกรม.....	50
ภาคผนวก.....	51
ประวัติผู้เขียน.....	62

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการทำงานของแอมป์ไฟแบบพัลส์วิดท์โมดูเลชั่น.....	26
5.1 แสดงคุณสมบัติของไดนาโมมิเตอร์ที่นำมาทดสอบ.....	41
5.2 แสดงคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่นำมาทดสอบ.....	44

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน 2 ขั้ว.....	3
2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวรและแบบขดลวดสนามแม่เหล็ก.....	4
2.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	6
2.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน.....	7
2.5 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม.....	8
2.6 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม.....	9
2.7 คุณลักษณะความเร็ว-แรงบิดของมอเตอร์ชนิดต่างๆ.....	9
2.8 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร.....	10
2.9 คุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ.....	11
2.10 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก.....	12
2.11 แรงบิด – ความเร็ว.....	12
2.12 แสดงถึงวงจรการบังคับความเร็วของซีรี่มอเตอร์ด้วยตัวความต้านทานและกราฟแสดง คุณสมบัติระหว่างความเร็วต่อแรงบิดของการบังคับแบบนี้.....	14
2.13 แสดงถึงวงจรการบังคับความเร็วของซีรี่มอเตอร์ด้วยตัวความต้านทานและกราฟแสดง คุณสมบัติระหว่างความเร็วต่อแรงบิดของการบังคับแบบนี้.....	14
2.14 แสดงการบังคับซีรี่มอเตอร์ด้วยตัวความต้านทานที่ปรับค่าได้ออกอนุกรมกับฟิล.....	15
2.15 แสดงถึงทรานส์ฟอร์มเมอร์บังคับ โวลต์เตจของอาร์มาเจอร์ของซีรี่มอเตอร์.....	16
2.16 ตัวอย่างการบังคับซีรี่มอเตอร์ด้วย SCR แบบครึ่งคลื่นและแบบเต็มคลื่น.....	17
2.17 ระบบการบังคับแบบลูฟเปิด โดยใช้วิธีการบังคับอาร์มาเจอร์ โวลต์เตจ.....	17
2.18 ระบบการบังคับความเร็วแบบปิดลูฟ.....	19
2.19 รูปจำลองทางไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	19
2.20 dsPIC30F6010 80-Lead Plastic Thin Quad Flat pack (TQFP)	22
2.21 พัลส์วิดท์โมดูเลชันแอมพลิไฟเออร์สำหรับซีรี่มอเตอร์.....	23
2.22 บล็อกไดอะแกรมของระบบคอนโทรลความเร็วแบบ PWM	25
2.23 วงจรสมมูลของซีรี่มอเตอร์ในระบบคอนโทรลแบบ PWM	27
2.24 วงจรขับกระแสตรงของมอเตอร์.....	28
3.1 ไดอะแกรมย่อยของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	29
3.2 ไดอะแกรมของระบบมอเตอร์ไฟตรง.....	30

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบ.....	32
3.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมใช้ในการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	33
3.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	33
4.1 แผนผังของการควบคุมแบบ Real-Time	35
4.2 การ์ด PCI-1711.....	35
4.3 รูปแสดงเทอร์มินอล model ADAM-3968.....	36
4.4 แสดงขาของเทอร์มินอล model ADAM-3968.....	37
4.5 แสดงการควบคุมมอเตอร์แบบ Real-Time ผ่าน โปรแกรม Simulink.....	38
5.1 แสดงบล็อกของระบบโดยใช้โปรแกรม Simulink.....	39
5.2 แสดงบล็อกไคนาโมมิเตอร์.....	39
5.3 แสดงบล็อกโหลดทางกลของไคนาโมมิเตอร์.....	40
5.4 แสดงบล็อกชุดชดเชยความหนืด.....	40
5.5 แสดงบล็อกชุดชดเชยความเฉื่อย.....	40
5.6 แสดงบล็อกการทำงานของระบบเพื่อการทดลอง.....	41
5.7 แสดงภาพถ่ายของระบบที่สร้างขึ้น.....	42
5.8 แสดงแผนภูมิการทำงานของโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์.....	42
5.9 แสดงแผนภูมิการทำงานของโปรแกรม Matlab.....	43
5.10 กราฟขณะต่อโหลดเมื่อปรับ K_B และ $K_J = 0$ เทียบกับ $K_B = 0.3$ และ $K_J = 0.3$	45
5.11 กราฟจากการทดลองในโปรแกรม Matlab เมื่อปรับ K_B และ $K_J = 0$ เทียบกับ $K_B = 0.3$ และ $K_J = 0.3$	45
5.12 กราฟขณะต่อโหลดเมื่อปรับ $K_B = 0$ และ $K_J = 0.3$ เทียบกับ $K_B = 0$ และ $K_J = 0.5$	46
5.13 กราฟจากการทดลองใน โปรแกรม Matlab เมื่อปรับ $K_B = 0$ และ $K_J = 0.3$ เทียบกับ $K_B = 0$ และ $K_J = 0.5$	46
5.14 กราฟขณะต่อโหลดปรับค่า $K_B = 0.3$ และ $K_J = 0$ เทียบกับ $K_B = 0.7$ และ $K_J = 0$	47
5.15 กราฟจากการทดลองใน โปรแกรม Matlab เมื่อปรับ $K_B = 0.3$ และ $K_J = 0$ เทียบกับ $K_B = 0.7$ และ $K_J = 0$	47

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในงานทางด้านอุตสาหกรรม โดยปกติแล้วจะมีการใช้เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงเป็นเครื่องต้นกำลัง ซึ่งในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ก็จะมีโหลดที่แตกต่างกันออกไป บางครั้งโหลดที่นำมาต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอาจจะมีคุณสมบัติทางกลไม่เหมือนกับตัวต้นกำลังเช่น อาจมีโมเมนต์ความเฉื่อย หรือ ความหนืดมากกว่า ตัวต้นกำลัง ทำให้ตัวต้นกำลังไม่สามารถขับโหลดนี้ได้ ซึ่งวิศวกรหรือผู้ที่ใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จะต้องปรับปรุงให้โหลดมีความเฉื่อยหรือความหนืดนี้ให้ลดลงเพื่อให้ตัวต้นกำลังสามารถขับโหลดนี้ได้

ในระบบเชิงกล พารามิเตอร์ของระบบจะถูกออกแบบให้มีค่าตายตัวซึ่งเป็นการยากที่จะไปเปลี่ยนแปลงหรือแก้ไข วิธีการหนึ่งซึ่งสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวคือ ทำการชดเชยระบบโดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงหรือแก้ไขโครงสร้างทางกลและการเชื่อมต่อ เนื่องจากการยากที่จะกำหนดรายละเอียดทางเทคนิคให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยฉบับนี้ต้องการนำเสนอกรณีศึกษาในการนำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมาทำเป็นโหลดทางกล ที่มีการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของเครื่องจักรไฟฟ้ากระแสตรง เชิงไฟฟ้า เพื่อศึกษาถึงผลตอบสนองและคุณสมบัติของโมเมนต์ความเฉื่อยและความหนืด ในงานวิจัยได้เลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมาเป็นกรณีศึกษา การเปลี่ยนแปลงพลังงานทางกลในส่วนของความเร็วและแรงบิดสัมพันธ์กับ พลังงานทางไฟฟ้าที่เป็นแรงดัน

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

การปรับปรุงคุณสมบัติของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงด้วย การชดเชยพลังงานเชิงไฟฟ้านี้หลักการสำคัญคือ การเพิ่มและลดแรงดันที่ป้อนให้กับตัวเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงระดับของการเพิ่มและลดแรงดันนี้ขึ้นอยู่กับ การปรับชุดอัตราขยายค่าโมเมนต์ความเฉื่อยและค่าความหนืดให้แก่โรเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง ส่งผลให้คุณลักษณะของตัวเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงเปลี่ยนแปลงตาม

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยจะควบคุมและเปลี่ยนแปลงระดับค่าแรงดันที่ป้อนให้กับเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง โดยให้การเปลี่ยนแปลงของระดับแรงดันนี้ขึ้นอยู่กับ การปรับบล็อกอัตราขยายความถี่และความหนืดที่ระดับต่างๆกันผ่านระบบควบคุมแบบปิด และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวประมวลผล การสั่งงานสามารถสั่งงานด้วยระบบอัตโนมัติ ผ่านทางคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล

1.5 ขอบเขตการวิจัย

เริ่มต้นด้วยการศึกษาและทดสอบหลักการและข้อจำกัดของความถี่และความหนืดของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงแล้วจึงออกแบบตัวชดเชยเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงมาใหม่ โดยชดเชยนี้จะไปควบคุมระดับความเร็วรอบต่อเวลาของเครื่องจักรกล โดยค่าที่ได้ทั้งสองจะถูกนำมาวิเคราะห์และประมวลผลผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์และคอมพิวเตอร์

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

การทำงานวิจัยฉบับนี้มีขั้นตอนการศึกษาเริ่มจากการค้นคว้าจากบทความของวารสารต่างๆ เกี่ยวกับไดนามิเตอร์และการประยุกต์ใช้งาน ซึ่งจะนำทฤษฎีมาเป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Matlab\Simulink แล้วจึงสร้างชุดต้นแบบไดนามิเตอร์ขึ้นมา แล้วจึงนำมาทดสอบกับมอเตอร์กับมอเตอร์ขนาดต่างๆ หลังจากนั้นจึงวิเคราะห์ผลงานวิจัยที่ได้

บทที่ 2

เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง

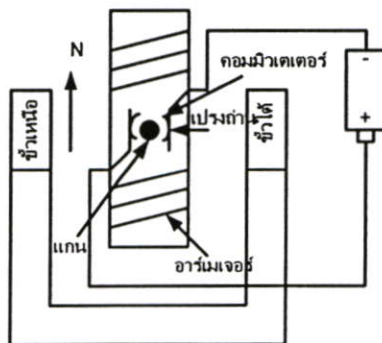
2.1 บทนำ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่านถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย ตั้งแต่ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ขนาดเล็กๆ ในของเล่น อุปกรณ์ เครื่องมือ เครื่องใช้ในชีวิตรประจำวัน ไปจนถึงการใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้แรงบิดคอนเริ่มสตาร์ทสูง และสามารถควบคุมความเร็วได้ในช่วงกว้าง วิธีในการควบคุมความเร็วง่ายและราคาถูกกว่าการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

เป็นที่น่าสังเกตว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีบทบาทในระบบขับเคลื่อนของอุตสาหกรรมสมัยใหม่ (Modern Industrial Drive) แต่คอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่านทำให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่านไม่สามารถใช้กับงานที่ต้องการความเร็วสูงมากๆ ได้ และต้องการบำรุงรักษามากกว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ความก้าวหน้าในการเปลี่ยนกำลังงานเทคนิคการควบคุม และไมโครคอมพิวเตอร์ทำให้การขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับถูกนำมาใช้งานมากขึ้น และมีแนวโน้มว่าการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในโรงงานอุตสาหกรรมจะถูกแทนที่ด้วยการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสสลับ อย่างไรก็ตาม เรายังเห็นการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ในโรงงานกระดาษ โรงงานรีดเหล็ก โรงงานน้ำตาล และที่ยังใช้กันมากคือระบบขนาดเล็ก เช่น หุ่นยนต์ รถไฟฟ้า เป็นต้น

2.2 พื้นฐานการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

โครงสร้างอย่างง่ายของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงประกอบด้วยส่วนประกอบพื้นฐาน คือ สเตเตอร์ โรเตอร์ แปรงถ่าน และคอมมิวเตเตอร์



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน 2 ขั้ว

สเตเตอร์ เป็นส่วนที่อยู่กับที่ สร้างฟลักซ์แม่เหล็กรอบๆ โรเตอร์โดยที่ฟลักซ์แม่เหล็กอาจถูกสร้างมาจากแม่เหล็กถาวรหรือขดลวดสนามแม่เหล็ก

โรเตอร์ หรืออาจเรียกว่า อาร์เมเจอร์ เมื่อมีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับขดลวดของอาร์เมเจอร์ก็จะมีฟลักซ์แม่เหล็กเกิดขึ้น ขั้วของแม่เหล็กกับอาร์เมเจอร์จะดึงดูดกันเมื่อมีขั้วที่ตรงข้ามกันซึ่งเป็นสาเหตุทำให้มอเตอร์หมุน

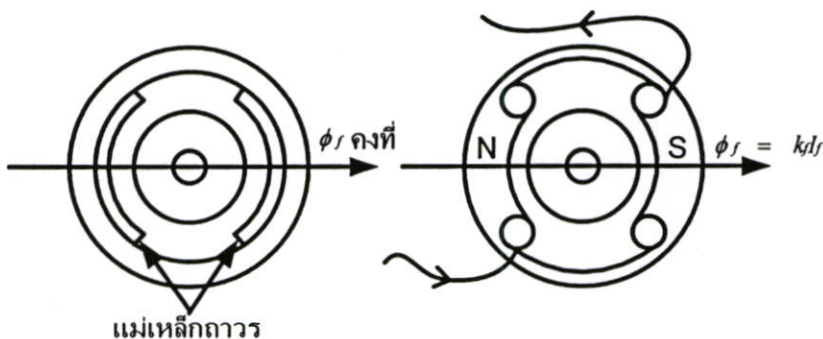
แปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดอาร์เมเจอร์จะกระทำในทางกลโดยผ่านซี่ทองแดงที่เรียกว่าคอมมิวเตเตอร์ ซึ่งจะอยู่บนแกนมอเตอร์ ในขณะที่มอเตอร์หมุนแปรงถ่านที่เป็นคาร์บอนจะสัมผัสกับคอมมิวเตเตอร์ ทำให้กระแสไฟฟ้าสามารถผ่านไปยังแต่ละซี่คอมมิวเตเตอร์ แปรงถ่านกับคอมมิวเตเตอร์เป็นส่วนที่สัมผัสและเสียดสีกันตลอดเวลาจึงต้องคอยดูแลรักษาเนื่องจากการสึกหรอ

2.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงฟลักซ์แม่เหล็กจะถูกสร้างโดยสเตเตอร์ ในกรณีของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร ฟลักซ์แม่เหล็กจะมีค่าคงที่ส่วนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีขดลวดสนามแม่เหล็กกระแสภายในขดลวดสนามแม่เหล็ก I_f จะเป็นตัวควบคุมฟลักซ์แม่เหล็ก ϕ_f ถ้าตัดการอ้อมตัวของแม่เหล็กในแนวเส้นแรง ดังนี้

$$\phi_f = k_f I_f \quad (2.1)$$

เมื่อ k_f - ค่าคงที่สนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวรและแบบขดลวดสนามแม่เหล็ก

แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าของอาร์เมเจอร์

$$T_g(t) = k_t i(t) \quad (2.2)$$

เมื่อ k_t = ค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์ ในวงจรของอาร์เมเจอร์แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Back EMF) เกิดจากการหมุนของขดลวดอาร์เมเจอร์ที่ความเร็ว ω_m ภายในฟลักซ์แม่เหล็ก ϕ_f

$$E_a = k_e \phi_f \omega_m \quad (2.3)$$

เมื่อ k_e = ค่าคงที่แรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์

ในหน่วย SI ค่า k_t และ k_e มีค่าเท่ากันโดยสามารถแสดงสมการกำลังงานไฟฟ้าและกำลังงานกลได้ โดยกำลังงานไฟฟ้าสามารถหาได้จาก

$$P_e = e_a I_a = k_e \phi_f \omega_m I_a \quad (2.4)$$

และกำลังงานกลสามารถหาได้จาก

$$P_m = \omega_m T_{em} = k_t \phi_f \omega_m I_a \quad (2.5)$$

ในสภาวะคงตัว (Steady state)

$$P_e = P_m \quad (2.6)$$

ดังนั้นจะได้สมการเป็น

$$k_t \left[\frac{Nm}{A \times Wb} \right] = k_e \left[\frac{V}{Wb \cdot rad/s} \right] \quad (2.7)$$

ในทางปฏิบัติการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอาร์เมเจอร์คือ การควบคุมแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า V_i แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ E_a ความต้านทานขดลวดอาร์เมเจอร์ R_a และค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์เมเจอร์ L_a

$$V_i = E_a + R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (2.8)$$

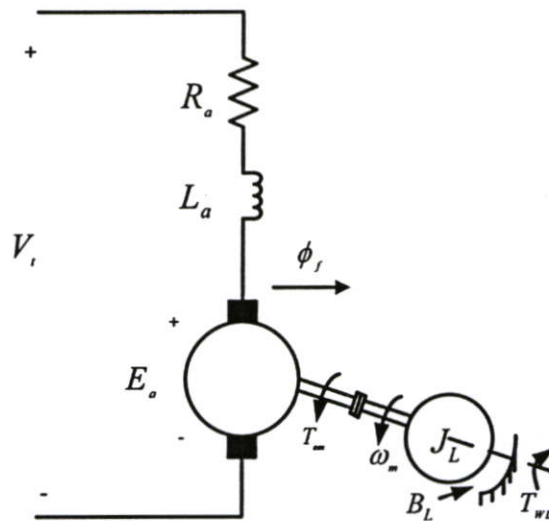
ความสัมพันธ์และผลของ T_{em} กับแรงบิดของโหลด T_{wL} เขียนเป็นสมการ

$$T_{em} = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_{wL}(t) \quad (2.9)$$

เมื่อ J = ผลรวมสมมูลของความเฉื่อยของมอเตอร์กับโหลดรวมกัน

B = ผลรวมสมมูลของความหนืดของมอเตอร์กับโหลดรวมกัน

T_{wL} = แรงบิดทำงานของโหลด



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อพิจารณาภายใต้สภาวะคงตัวสมการเชิงอนุพันธ์จะมีค่าเท่ากับศูนย์

เมื่อ $K_t = k_t \phi_f$

$$T_{em} = K_t I_a \quad (2.10)$$

เมื่อ $K_e = k_e \phi_f$

$$E_a = K_e \omega_m \quad (2.11)$$

$$V_t = E_a + R_a I_a \quad (2.12)$$

$$T_{em} = B_m + T_{wl} \quad (2.13)$$

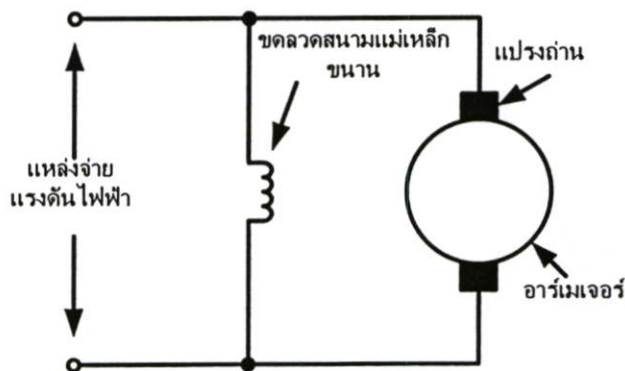
จากสมการที่ 2.11 และ 2.12 สามารถเขียนสมการความเร็วได้เป็น

$$\omega_m = \frac{V_t - R_a I_a}{K_e} \quad (2.14)$$

2.4 ประเภทของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

2.4.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนานจะมีขดลวดสนามแม่เหล็กต่อขนานกับอาร์เมเจอร์ โดยที่กระแสของขดลวดสนามแม่เหล็กต่อขนานกับอาร์เมเจอร์ โดยที่กระแสของขดลวดแม่เหล็กและอาร์เมเจอร์จะเป็นอิสระต่อกัน โดยพื้นฐานแล้วกระแสของอาร์เมเจอร์กับแรงบิดจะเป็นอัตราส่วนกันเมื่อมอเตอร์ทำงานอยู่ที่ความเร็วค่าหนึ่ง และแรงบิดที่ต้องการของโหลดเพิ่มมากขึ้น ความเร็วของมอเตอร์จะลดลงจนกระทั่งกระแสของอาร์เมเจอร์จะเพิ่มขึ้นเพื่อให้ได้แรงบิดที่ต้องการ คุณสมบัติของความเร็วกับแรงบิดจะเป็นเชิงเส้น



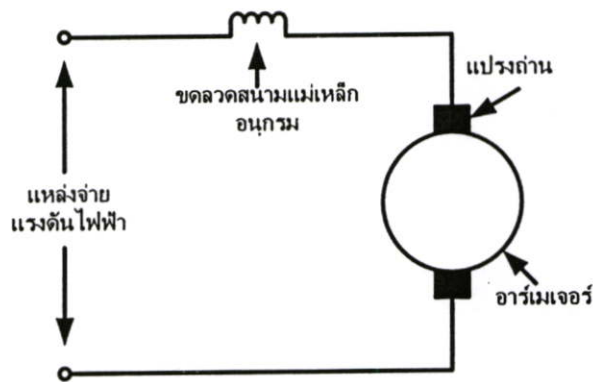
รูปที่ 2.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน

มอเตอร์แบบขนานส่วนใหญ่จะประยุกต์ใช้งานกับงานที่ต้องการความเร็วเกือบคงที่ แต่ไม่จำเป็นต้องใช้แรงบิดคอนสแตนต์สูง ตัวอย่างเช่น พดลม โบลเวอร์ ปัมป์แบบใช้แรงเหวี่ยง เครื่องจักรในงานช่าง

2.4.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม

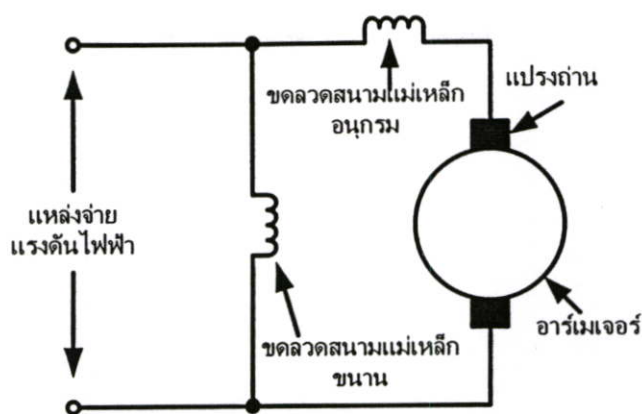
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมจะมีขดลวดสนามแม่เหล็กต่ออนุกรมกับอาร์เมเจอร์ เมื่อกระแสอาร์เมเจอร์เพิ่มขึ้น ฟลักซ์แม่เหล็กเพิ่มขึ้นตามด้วย ฟลักซ์แม่เหล็กจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสอาร์เมเจอร์และแรงบิดก็จะประมาณได้ว่าเป็นสัดส่วนกำลังสองของกระแส เมื่อโหลดต้องการแรงบิดต่ำผลก็คือ ฟลักซ์จะต่ำตามไปด้วย แต่ความเร็วจะเพิ่มสูงขึ้น

เมื่อโหลดมีภาระสูง ฟลักซ์แม่เหล็กจะสูงและความเร็วจะลดลง ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมจะขึ้นกับโหลดและแรงบิดคอนสแตนต์จะมีค่าสูงขึ้น เพราะว่กระแสสูงคอนสแตนต์ทำให้ค่าฟลักซ์สูงตามไปด้วย

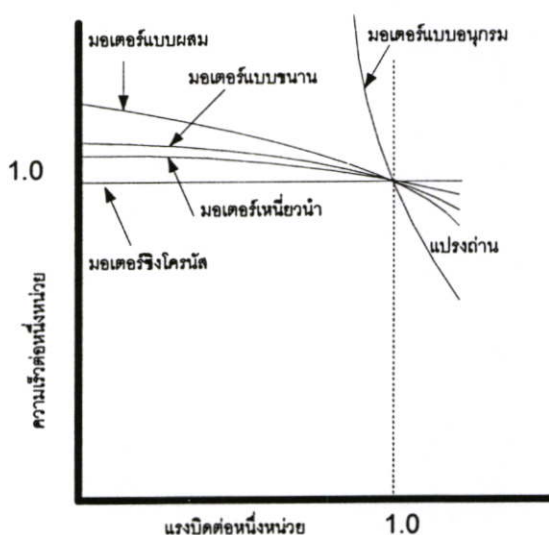


รูปที่ 2.5 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมเหมาะสำหรับใช้งานกับรถไฟฟ้า ปั่นจั่น และงานที่ต้องการแรงบิดคอนสแตนต์สูง โดยที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วไม่ได้มีความสำคัญมากนัก



รูปที่ 2.6 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม



รูปที่ 2.7 คุณลักษณะความเร็ว-แรงบิดของมอเตอร์ชนิดต่างๆ

2.4.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมจะประกอบด้วยขดลวดแม่เหล็กต่ออนุกรมและขนานกับอาร์เมเจอร์ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมมีแรงบิดต่อนสตาร์ทมากกว่าเมื่อเทียบกับแบบขนาน แต่ก็มีค่าน้อยกว่าแบบอนุกรม ขดลวดสนามแม่เหล็กที่ขนานจะมีผลต่อมอเตอร์มากกว่าขดลวดอนุกรม ซึ่งจะทำให้ความเร็วคงที่เมื่อโหลดไม่คงที่ ขดลวดที่ต่ออนุกรมเข้าไปจะช่วยลดปฏิกิริยาจากอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์แบบขนาน

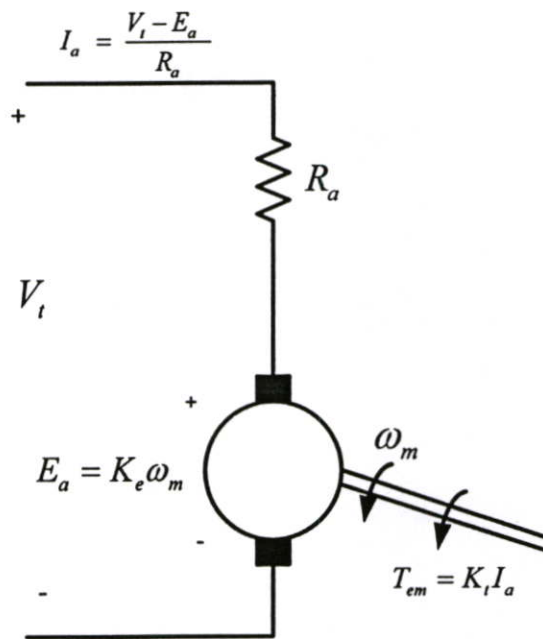
ในกรณีของมอเตอร์แบบอนุกรม หากต่อขดลวดสนามแม่เหล็กที่มีค่าน้อยๆ โดยทั่วไปจะเป็นแบบแม่เหล็กถาวร แม่เหล็กถาวรที่อยู่บนสเตเตอร์จะสร้างฟลักซ์แม่เหล็กที่คงที่ในสภาวะคงตัว สมมติว่าฟลักซ์แม่เหล็กคงที่

$$T_{em} = K_t I_a \quad (2.15)$$

$$E_a = K_e \omega_m \quad (2.16)$$

$$V_t = E_a + R_a I_a \quad (2.17)$$

จากสมการที่ 2.15 ถึงสมการที่ 2.17 สอดคล้องกับวงจรสมมูลในรูปที่ 2.8 และจากสมการข้างบนสามารถหาความเร็วที่สภาวะคงตัว ω_m ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ T_{em}

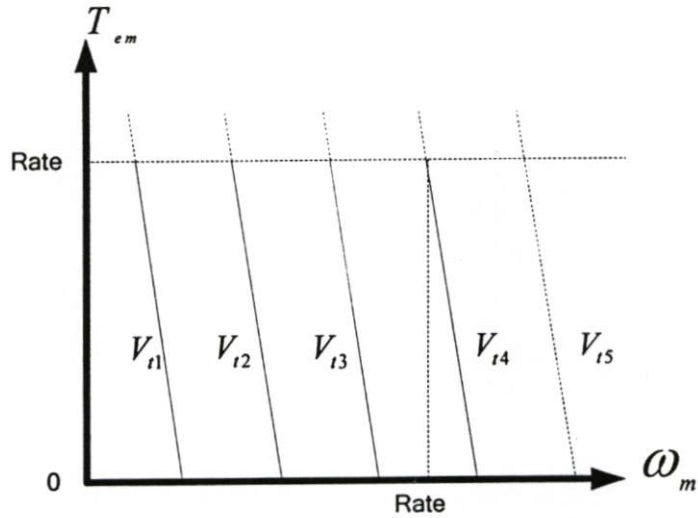


รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแม่เหล็กถาวร

เมื่อ $K_T = k_t \phi_f$ และ $K_E = k_e \phi_f$

$$\omega_m = \frac{1}{K_E} \left(V_t - \frac{R_a}{K_T} T_{em} \right) \quad (2.18)$$

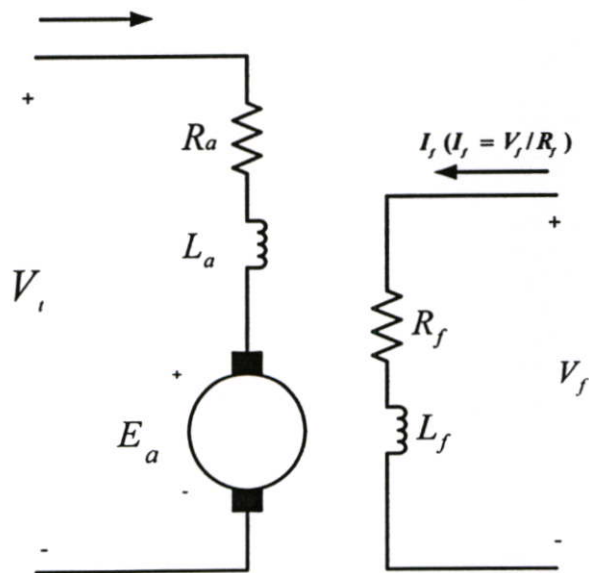
จากสมการที่ 2.18 สามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งแสดงแรงบิดที่เพิ่มขึ้น คุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วที่แรงดันไฟฟ้า V_t ต่างๆ โดยความจริงแล้วต้องเป็นเส้นในแนวตั้ง เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ ($I_a R_a$) กรณีนี้จะส่งผลให้ความเร็วตกแต่ก็เล็กน้อยมาก ในกรณีที่มอเตอร์ขนาดแรงม้าสูง แต่จะส่งผลมากกับมอเตอร์ขนาดเล็ก



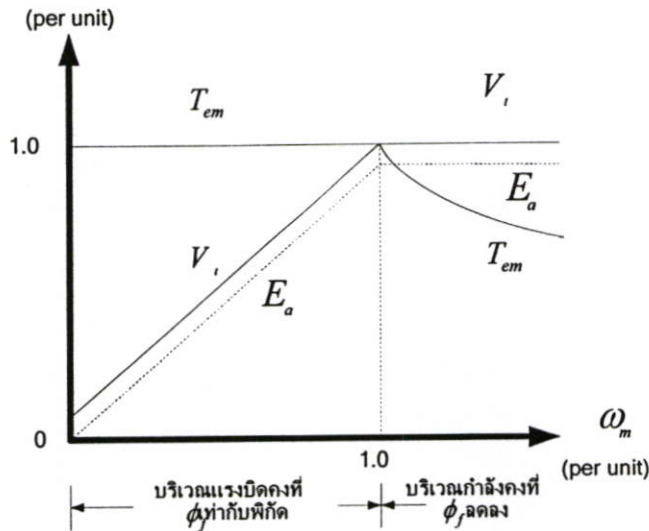
รูปที่ 2.9 คุณลักษณะของแรงบิด-ความเร็วที่แรงดันไฟฟ้าต่างๆ

2.4.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

เพื่อความยืดหยุ่นในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขดลวดสนามแม่เหล็กจะถูกกระตุ้นแยกจากแรงดันไฟฟ้าควบคุม V_f อีกแหล่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ค่าของฟลักซ์แม่เหล็กที่สภาวะคงตัว ϕ_f จะถูกควบคุมโดย I_f ($I_f = V_f / R_f$ เมื่อ R_f คือ ความต้านทานของขดลวดสนามแม่เหล็ก)



รูปที่ 2.10 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก



รูปที่ 2.11 แรงบิด - ความเร็ว

เมื่อ ϕ_f สามารถควบคุมได้สมการที่ 2.18 ก็สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\omega_m = \frac{1}{k_e \phi_f} \left(V_t - \frac{R_a}{k_t \phi_f} T_{em} \right) \quad (2.19)$$

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก แรงดันไฟฟ้า V_t และ ϕ_f สามารถควบคุมเพื่อให้ได้แรงบิดและความเร็วที่ต้องการ คุณลักษณะของแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์แบบกระตุ้นแยกจะเหมือนกับแบบแม่เหล็กถาวร เมื่อฟลักซ์แม่เหล็ก ϕ_f คงที่และเท่ากับพิสัยแรงบิด - ความเร็วของมอเตอร์ แสดงในรูปที่ 2.11

2.5 ทาโคเจนเนอร์เรเตอร์

ทาโคเจนเนอร์เรเตอร์เป็นเครื่องมือที่สามารถแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะเป็นสัดส่วนกับค่าความเร็วในการหมุน ตามสมการ

$$\begin{aligned} G(t) &= K_g \left(\frac{d\theta(t)}{dt} \right) \\ &= K_g \omega(t) \end{aligned} \quad (2.20)$$

โดยที่ $G(t)$ แทนค่าแรงดันเอาต์พุต (โวลต์)
 $\theta(t)$ แทนค่าระยะการเคลื่อนที่เชิงมุม (เรเดียน)

$\omega(\omega)$ แทนค่าความเร็วเชิงมุม (เรเดียน/วินาที)

K_r แทนค่าคงที่ของเทคโนโลยีเนอร์เรเตอร์ (โวลต์/เรเดียน/วินาที)

2.6 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

วิธีการบังคับความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในหลายลักษณะ ในขั้นตอนนี้จะได้กล่าวถึงการบังคับความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบเปิดลูป หมายความว่า การบังคับแบบนี้ไม่การป้อนความเร็วกลับในลูปของการบังคับที่จะทำให้ตัวบังคับรู้ถึงความเร็วของมอเตอร์เพื่อให้ตัวบังคับสามารถที่จะปรับการทำงานของลูปให้เหมาะสมเพื่อรักษาความเร็วของมอเตอร์ให้คงที่

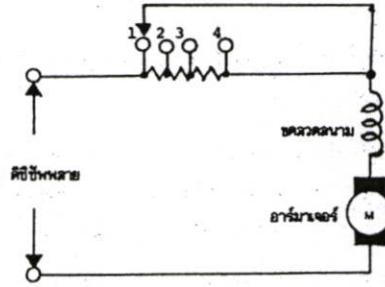
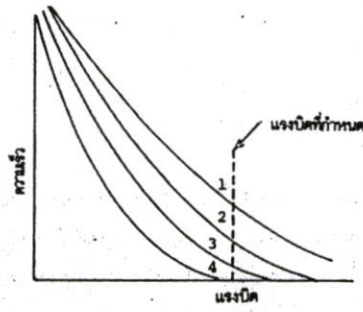
2.6.1 การบังคับแบบเปิดลูป

ตัวบังคับที่ใช้บังคับความเร็วของดีซีมอเตอร์ในลักษณะเปิดลูปแบ่งออกเป็น 3 แบบด้วยกันคือ

2.6.1.1 ตัวบังคับความต้านทานที่ปรับค่าได้ (rheostat)

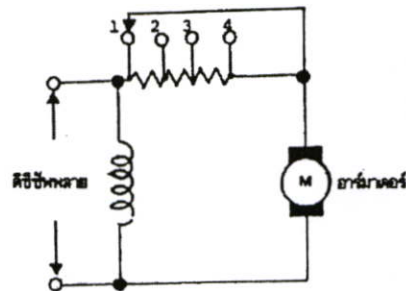
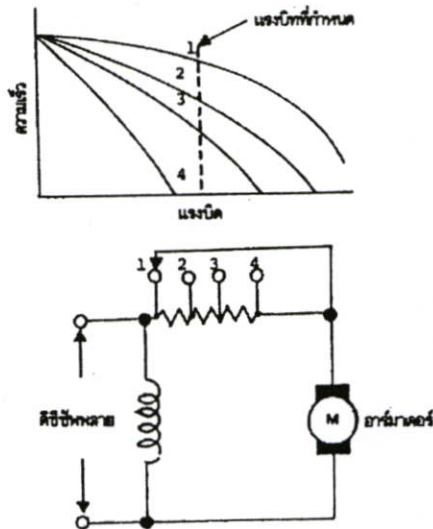
การบังคับแบบนี้เป็นวิธีการบังคับที่ง่ายที่สุดและใช้กันในยุคแรกๆ มีประสิทธิภาพการบังคับความเร็วอยู่ในพิสัย 4 : 1 และให้การเรีกลูเลทความเร็วของมอเตอร์ไม่คิดต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดและโวลต์เตจของสายส่งการบังคับแบบนี้ไม่มีประสิทธิภาพเพราะว่า กำลังไฟสูญเสียไปในตัวความต้านทานในรูป 2.12 แสดงถึงตัวอย่างการบังคับความเร็วของซีรี่มอเตอร์ (series motor) ด้วยตัวบังคับแบบ ความต้านทาน ที่ปรับค่าได้ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กับมอเตอร์ตัวเล็กๆ

การบังคับนี้ให้คุณสมบัติการสตาร์ทดี (ให้แรงบิดสูงที่ความเร็วต่ำ) แต่จะให้ความเร็วสูงจัดมากเมื่อมอเตอร์อยู่ในภาวะที่โหลดน้อยๆ ดังนั้นการบังคับแบบนี้จะเป็นประโยชน์เฉพาะภาวะที่แรงต้าน (friction) คงที่ยกตัวอย่างเช่น การบังคับความเร็วของเครื่องจักรเย็บผ้า เครื่องผสมอาหาร และการบังคับแบบนี้จะให้การเรีกลูเลทความเร็วเลวลงเมื่อความเร็วลดลงทำให้เป็นการยากที่จะบังคับความเร็วให้ได้พิสัยกว้าง



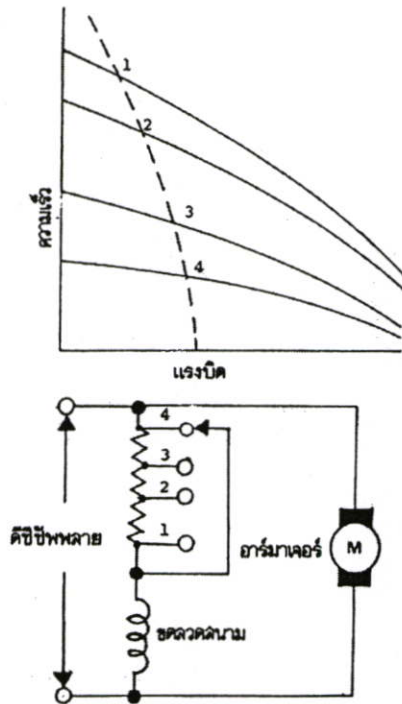
รูปที่ 2.12 แสดงถึงวงจรการบังความเร็วของซีรุ่มอเตอร์ด้วยตัวความต้านทานและกราฟแสดงคุณสมบัติระหว่างความเร็วต่อแรงบิดของการบังคืบแบบนี้

ส่วนการบังคืบความเร็วของซีรุ่มอเตอร์ (shunt motor) ด้วยตัวบังคืบแบบรีโอสตาทแสดงในรูป 2.14 ตัวบังคืบต่ออนุกรมอยู่กับวงจรอาร์มาเจอร์และขดลวดของฟิลด์ถูกกระตุ้นด้วยโวลต์เตจคงที่ (ถ้าเป็นมอเตอร์แบบฟิลด์ที่ได้จากแม่เหล็กถาวรก็ใช้ได้)



รูปที่ 2.13 แสดงถึงวงจรการบังคืบความเร็วของซีรุ่มอเตอร์ด้วยตัวความต้านทานและกราฟแสดงคุณสมบัติระหว่างความเร็วต่อแรงบิดของการบังคืบแบบนี้

ผลของการบังคับแสดงในรูปซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงบิด การบังคับแบบนี้ถ้า เพิ่ม ความต้านทานในวงจรอาร์มาเจอร์มากขึ้นทำให้ความเร็วตกลงด้วยการบังคับแบบนี้จึงเหมาะสำหรับงานที่แรงบิดของโหลดคงที่ต่ำกว่างานที่มีภาวะของโหลดเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง



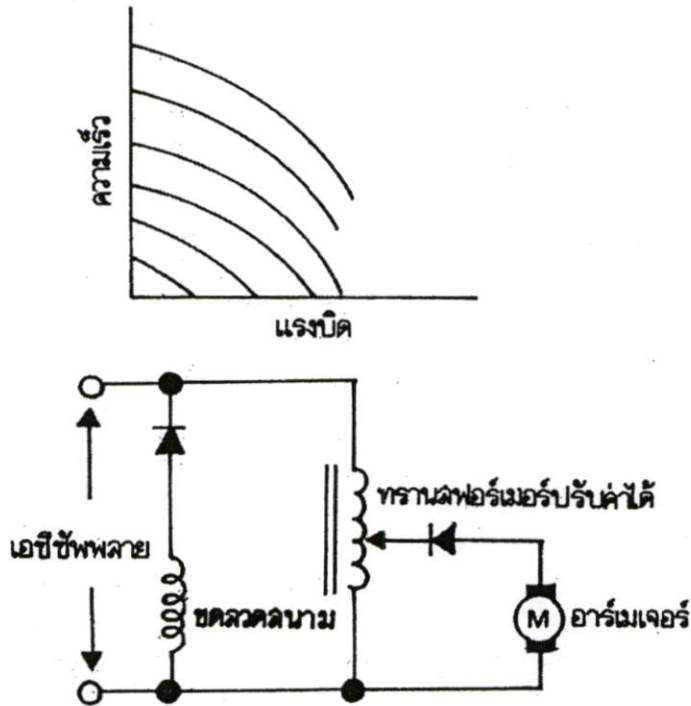
รูปที่ 2.14 แสดงการบังคับขั้นที่มอเตอร์ด้วยตัวความต้านทานที่ปรับค่าได้ต่ออนุกรมกับฟิลด์

ในรูป 2.14 เราจะเห็นว่าขั้นที่มอเตอร์ต่ออยู่กับตัวความต้านทานบังคับการเปลี่ยนแปลงของฟิลด์ วงจรการบังคับแบบนี้มีข้อคืออยู่ที่ว่าความเร็วของมอเตอร์สามารถปรับได้เฉพาะความเร็วที่สูงกว่าความเร็วในตอนที่ยังไม่ได้ใส่ตัวความต้านทานเพื่อบังคับฟิลด์เท่านั้น ส่วนผลเสียของการบังคับแบบนี้คือ แรงบิดคงที่ของมอเตอร์จะลดลงด้วยการเพิ่มความต้านทาน ที่ใส่เข้าไป (ทำให้สนามแม่เหล็กลดลง) ดังนั้นมอเตอร์อาจจะถูกทำให้โอเวอร์โหลดได้ง่ายและวงจรการบังคับนี้ควรจะใช้งานเฉพาะในกรณีเมื่อสภาพของโหลดและการบังคับยืนยันได้ว่าเป็นจริง

2.6.1.2 ตัวบังคับแบบทรานส์ฟอร์มเมอร์ที่ปรับค่าได้ (variac) กับตัวเรกติไฟเออร์

การบังคับแบบนี้สามารถขั้วคีมอเตอร์ได้พิสัยความเร็ว 10:1 และ ให้การเรกติไฟเออร์และประสิทธิภาพที่ดีกว่าการบังคับด้วยรีโอสตาทรูปที่ 2.16 แสดงถึงการบังคับโดยใช้วาริแอก บังคับ โวลต์เตจของขั้นที่มอเตอร์ด้วยการปล่อยกระแสไฟฟ้าให้ฟิลด์คงที่ ผลของคุณสมบัติความเร็ว-แรงบิดได้รับการปรับปรุงดีขึ้นกว่าการบังคับด้วยความต้านทานที่ปรับค่าได้และให้การเรกติไฟเออร์ความเร็วคงที่ได้ดีขึ้นตลอดพิสัยความเร็วที่กว้างกว่า

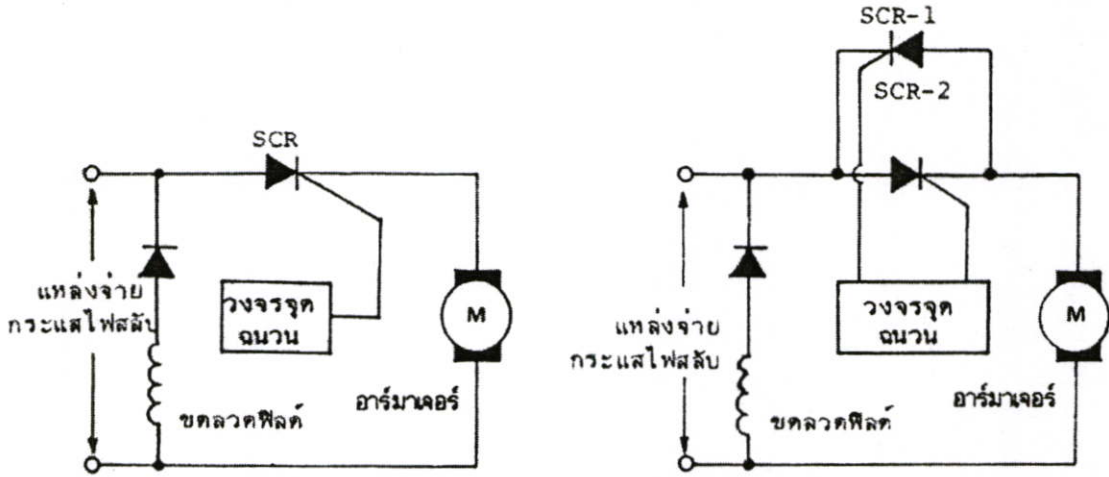
ความเร็ว-แรงบิดได้รับการปรับปรุงดีขึ้นกว่าการบังคับด้วยความต้านทานที่ปรับค่าได้และให้การเรีอกุเลทความเร็วคงที่ได้ดีขึ้นตลอดพิสัยความเร็วที่กว้างกว่า



รูป 2.15 แสดงถึงทรานสฟอร์เมอร์บังคับ โวลต์เตจของอาร์มาเจอร์ของขั้นที่มอเตอร์

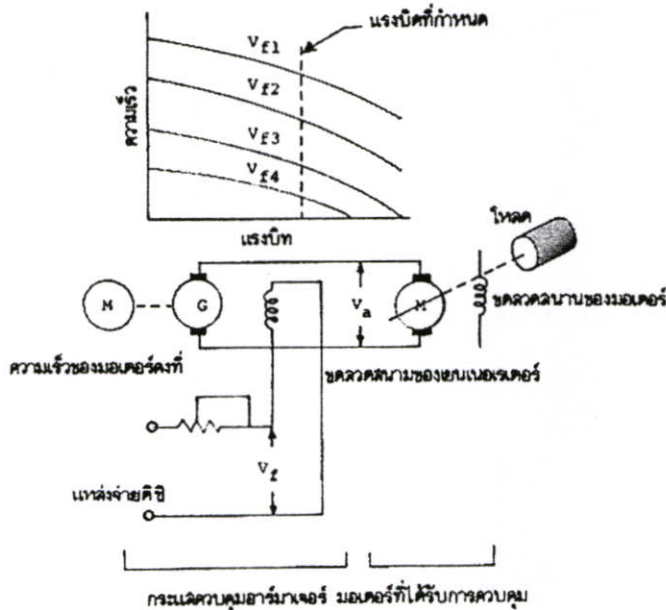
2.6.1.3 ตัวบังคับแบบSCR (ไทรสเตอร์)

ด้วยการทำงานเป็นแบบครึ่งคลื่นจะให้คุณสมบัติคล้ายกับการบังคับด้วยวาริแอกค อย่างไรก็ตามระบบของ SCR ที่ทำงานแบบเต็มคลื่นสามารถให้พิสัยการบังคับความเร็วได้ถึง 20 : 1 เมื่อใช้เทคนิคการชดเชย "I R" (หมายถึงเทคนิคการรับรู้กระแสและป้อนกลับเป็นระบบปิดลูป) ด้วยวิธีการชดเชยการบังคับความเร็วนี้สามารถห้การเรีอกุเลทความเร็วได้ถึง 3% จากไม่มีโหลดถึงภาวะที่มีโหลดเต็มที่ เช่น มอเตอร์มีความเร็วที่กำหนดให้ 1800 รอบต่อนาที การบังคับให้เรีอกุเลทความเร็วเท่ากับ 3% ของความเร็วสูงสุดหมายความว่าความเร็วของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไป 54 รอบต่อนาทีเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลงสมมติว่ามอเตอร์หมุนอยู่ที่ความเร็ว 180 รอบต่อนาที และไม่ได้ต่อโหลด เมื่อต่อกับโหลดตามที่กำหนด ความเร็วของมอเตอร์จะลดลงเป็น $180 - 54 = 126$ รอบต่อนาที ดังนั้นการเรีอกุเลทจะเท่ากับ 30 % ของความเร็วที่ตั้งไว้ (set speed)



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างการบังคับขั้นที่มอเตอร์ด้วย SCR แบบครึ่งคลื่นและแบบเต็มคลื่น

วิธีการบังคับแบบลูฟเปิดที่ค่อนข้างยุ่งยากซึ่งได้แก่ วิธีบังคับอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์-เจนเนอเรเตอร์ดังแสดงในรูป 2.17 มอเตอร์ที่มีความเร็วคงที่จะใช้เป็นตัวขับเคลื่อนเจนเนอเรเตอร์ที่มีโวลต์เตจของฟิวด์ถูกบังคับให้แปรค่าได้ ดังนั้นเจนเนอเรเตอร์จะเป็นตัวผลิตโวลต์เตจที่ปรับค่าได้ง่ายให้กับอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์และผลที่ได้ของคุณสมบัติ แรงบิด-ความเร็วจะดีขึ้นกว่าในรูป 2.16 เนื่องจากการบังคับแบบนี้ให้การเรีกลูเลทที่เป็นอิสระต่อความเร็วที่ได้ตั้งไว้



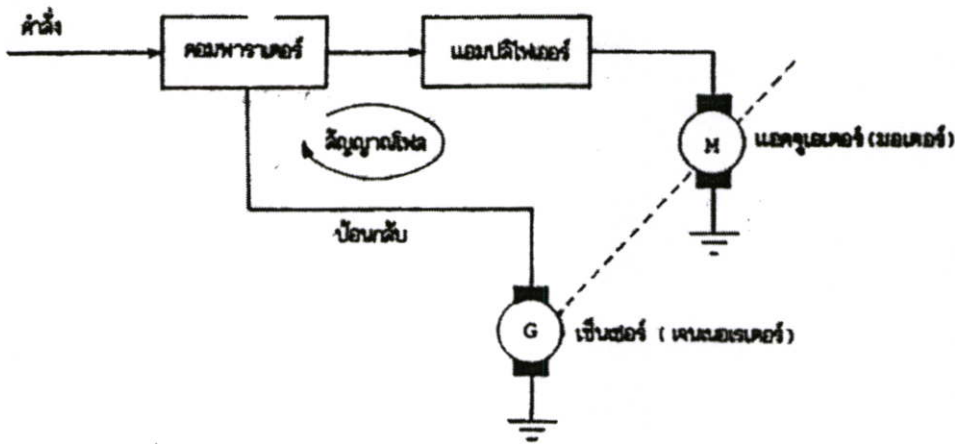
รูปที่ 2.17 ระบบการบังคับแบบลูฟเปิดโดยใช้วิธีการบังคับอาร์มาเจอร์โวลต์เตจ

ผลลัพธ์ที่ได้ของการบังคับแบบนี้ให้คุณสมบัติที่เหนือกว่าการบังคับความเร็วของมอเตอร์วิธีต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว อย่างไรก็ตามเนื่องจากราคาแพงของชุดมอเตอร์เงินเนอร์เรเตอร์และส่วนบังคับฟิลด์ของเงินเนอร์เรเตอร์ทำให้การบังคับความเร็ววิธีนี้ใช้ไม่ได้ผลดีกับการบังคับความเร็วของมอเตอร์ตัวเล็กๆ การประยุกต์ใช้งานส่วนใหญ่จะใช้ในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการบังคับความเร็วของมอเตอร์ตัวใหญ่ ๆ ตั้งแต่ 1 แรงม้าขึ้นไปเพราะว่าคุณสมบัติการขยายกำลังไฟฟ้าของชุดมอเตอร์เงินเนอร์เรเตอร์เหมาะสมใช้ในระบบการบังคับลูปปิดในยุคแรก ๆ เมื่อหลอดสูญญากาศกำลังสูงและเครื่องขยายแม่เหล็กเริ่มนำมาใช้สำหรับการบังคับวิธีการบังคับดังกล่าวมาแล้วข้างต้นเชื่อว่า จะได้รับการพัฒนาเพื่อใช้งานทั้งหมดทุกวิธี วิธีการบังคับเหล่านั้นถือได้ว่าเป็นตัวอย่างของปัญหาที่จะต้องได้พบในการบังคับแบบลูปเปิดของระบบการทำงานที่บังคับด้วยมือในอดีตเราสามารถเห็นได้ว่าในแต่ละกรณีก็มีข้อเสียที่ไม่ต้องการเกิดขึ้นซึ่งเป็นข้อจำกัดให้แต่ละวิธีใช้งานได้เฉพาะอย่างเท่านั้น

2.6.2 การบังคับแบบปิดลูป

แม้ว่าการบังคับเปิดลูปจำนวนมากสามารถใช้งานได้อย่างพอเพียงในปัจจุบันก็ตาม แต่แนวโน้มของความต้องการเร็กละชั้นของความเร็วที่ดีกว่า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้การบังคับแบบปิดลูป (closed-loop control) ในระบบของการบังคับแบบปิดลูปประกอบด้วยแอดคิวิตเตอร์ (มอเตอร์) คอมพาราเตอร์ เครื่องขยายและเซ็นเซอร์ (เงินเนอร์เรเตอร์) รูป 2.18 แสดงถึงส่วนประกอบของระบบการบังคับความเร็วแบบปิดลูปตัวอย่างระบบการบังคับความเร็วแบบปิดลูปนี้เป็นเพียงตัวอย่างหนึ่งของเทคนิคการป้อนกลับจำนวนมาก ตามปกติระบบเซอร์โวคุณภาพสูงที่ทันสมัยในปัจจุบันจะมีลูปการป้อนกลับแยกกันหลายๆ ลูป เช่น ลูปป้อนกลับของโวลท์ กระแสไฟฟ้า ความเร็วและ ตำแหน่ง เป็นต้น

การบังคับความเร็วแบบมีการป้อนกลับเพื่อปิดลูป สามารถกระทำได้ด้วยวงจรร SCR และใช้ทาโคมิเตอร์เป็นตัวป้อนกลับ ระบบนี้สามารถให้พิสัยการปรับความเร็วได้ถึง 100 : 1 เนื่องจากลักษณะการเป็นพัลส์ของการบังคับด้วยเทคนิคของ SCR มอเตอร์ที่มีขนาดต่ำกว่า 2 แรงม้าอาจจะมีเสถียรภาพของความเร็วในพิสัยความเร็วต่ำๆ ไม่ดีเนื่องจากมอเตอร์ขนาดเล็กมีความเฉื่อยต่ำและเนื่องมาจากโหลดด้วย อย่างไรก็ตามมอเตอร์ขนาดเล็กให้ช่วงพิสัยการบังคับความเร็วได้กว้างดี

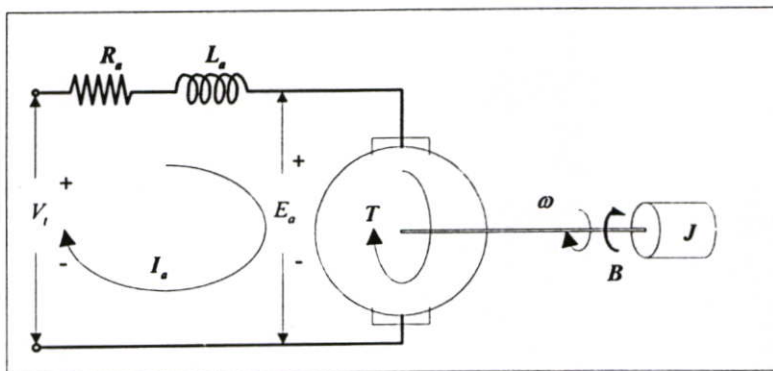


รูปที่ 2.18 ระบบการบังคับความเร็วแบบปิดลูป

ระบบการบังคับแบบเปิดลูปดังได้กล่าวมาแล้ว ผู้ควบคุมระบบเป็นเสมือนตัวเซ็นเซอร์ (sensor) หรือตัวป้อนกลับ ดังนั้นในบางสถานะอาจถือได้ว่าระบบดังกล่าวเป็นเสมือนการบังคับแบบปิดลูปเหมือนกัน แต่การบังคับด้วยผู้ควบคุมไม่เป็นการทำงานอัตโนมัติซึ่งตามปกติแล้วการบังคับแบบเปิดลูปทุกอย่างจะเป็นไปโดยอัตโนมัติทั้งหมด

2.7 รูปจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

พิจารณามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงดังที่แสดงในรูปที่ 2.19 ที่สมมุติให้สนามกระแส I_f เป็นค่าคงที่ และแรงดัน V_a เป็นกระแสที่ได้จากอาร์มาเจอร์ ซึ่งมีความต้านทาน R_a และมีการเหนี่ยวนำเพียงเล็กน้อย ผลที่ได้จากการใส่ค่า V_f จะทำให้อาร์เมเจอร์หมุน ความสัมพันธ์ระหว่าง V_f และ ω สามารถอธิบายได้จากสมการดังนี้



รูปที่ 2.19 รูปจำลองทางไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 2.19 เมื่อ

- V_t : แรงดันอินพุต (V)
- E_a : แรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ (V)
- I_a : กระแสอาร์เมเจอร์ (A)
- T : แรงบิดของมอเตอร์ ($N \cdot m$)
- ω : ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (rad/s)
- R_a : ความต้านของอาร์เมเจอร์ (Ω)
- L_a : ความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์ (H)
- J : โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ ($kg \cdot m^2$)
- B : ความหนืดของมอเตอร์ ($N \cdot m / rad / sec$)

นอกจากนี้ตัวแปรที่ไม่แสดงในรูปที่ 2.21 คือ

- K_T : ค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์ ($N \cdot m / A$)
- K_e : ค่าคงที่แรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ ($V / rad / sec$)

จากรูปที่ 2.21 สามารถแสดงความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ดังนี้

$$V_t = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + E_a \quad (2.21)$$

ซึ่ง E_a คือ แรงดันที่เกิดขึ้นภายในตัวมอเตอร์ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วของมอเตอร์ (ω) คือ

$$E_a = K_e \omega \quad (2.22)$$

ดังนั้นสามารถเปลี่ยนสมการที่ 2.21 ได้เป็น

$$V_t = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + K_e \omega \quad (2.23)$$

จากสมการที่ 2.23 จะแสดงความสัมพันธ์ของกระแส แรงดันของอาร์เมเจอร์และความเร็วของเพลาอาร์เมเจอร์ เมื่อเส้นแรงของฟิลด์เป็นชนิดค่าคงที่ แรงบิดของแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นแก่โรเตอร์ (Rotor) ของมอเตอร์จะเป็นสัดส่วนกับกระแสอาร์เมเจอร์ดังนี้

$$T = K_T I_a \quad (2.24)$$

T คือ แรงบิดที่เกิดขึ้นในมอเตอร์

K_T คือ ค่าคงที่ของแรงบิดมอเตอร์

ส่วนแรงบิดของมอเตอร์ที่ได้จากโหลดที่ค้ำอยู่กับเพลาของมอเตอร์ สามารถอธิบายได้ดังนี้

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (2.25)$$

กำหนดให้ไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้นกับมอเตอร์ ดังนั้นแรงบิดทางไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับแรงบิดทางกล ดังนั้นจะสามารถจัดสมการที่ 2.24 และ 2.25 ใหม่ได้ดังสมการที่ 2.26

$$K_T I_a = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (2.26)$$

2.8 การออกแบบโปรแกรมบนไมโครคอนโทรลเลอร์

เนื่องจากการทำงานของระบบชนิดนี้ จำเป็นต้องอาศัยการประมวลผลของการคำนวณที่มีความไวค่อนข้างมาก และมีหน่วยความจำให้ใช้มากพอสมควร เหล่านี้ทำให้ต้องเลือกใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์แบบดิจิทัล หรือ Digital Signal Processing (dsPIC) ก่อนอื่นจะขอกล่าวข้อมูลเบื้องต้นของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบนี้ก่อน

2.8.1 ข้อมูลเบื้องต้นของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ dsPIC

dsPIC คือชื่อของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ 16 บิต มีชื่ออย่างเป็นทางการสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์อนุกรมใหม่นี้ว่า Digital Signal Controller หรือ DSP นั้นหมายความว่า dsPIC เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ได้รับการออกแบบมาเป็นพิเศษเพื่องานประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสำหรับสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติที่มีความสามารถสูงในการทำงานนั้นจะเลือกรุ่น dsPIC30F6010 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 80 ขา แบบ Thin Quad Flat pack (TQFP) สาเหตุที่ใช้รุ่นนี้เนื่องจากมีโมดูลของ pulse width modulation ถึง 4 คู่ อีกทั้งหน่วยความจำและจำนวนพอร์ทก็มีให้ใช้มากเพียงพอกับความต้องการอีกด้วย ซึ่งคุณสมบัติต่าง ๆ จะกล่าวอยู่ในภาคผนวกค.



รูปที่ 2.20 dsPIC30F6010 80-Lead Plastic Thin Quad Flat pack (TQFP)

2.8.2 การออกแบบโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์

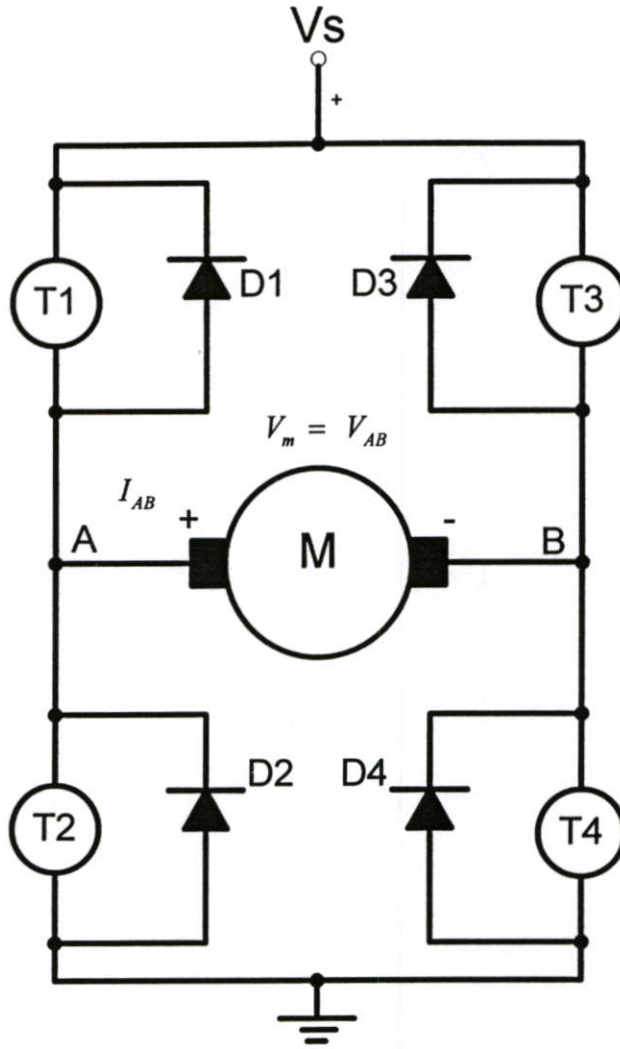
ในส่วนของ การเขียนโปรแกรมนั้นจะใช้ภาษาซีในการเขียน และใช้โปรแกรม MPLAB IDE เป็นตัวคอมไพเลอร์ การเขียนโปรแกรมนั้นจะอยู่ภายใต้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะกล่าวถึงในบทต่อไป เพื่อให้การควบคุมมีประสิทธิภาพที่สุด ซึ่งการออกแบบโปรแกรมนั้นจะเริ่มตั้งแต่มีสัญญาณเข้า กำหนดในโมเดลทางคณิตศาสตร์ จนกระทั่งได้สัญญาณเอาต์พุตออกมา

2.9 พัลส์วิดท์โมดูเลชันแอมพลิไฟเออร์ (PWMA)

แอมพลิไฟเออร์มีหน้าที่ควบคุมกระแสและโวลต์เตจที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ เพื่อให้ได้ค่าความเร็วตามที่ต้องการแอมพลิไฟแบบ PWM สามารถทำงานได้ 3 แบบคือ ไบโพลาร์ ชูนิโพลาร์ และลิมิตชูนิโพลาร์ ซึ่งเราได้อธิบายรายละเอียดในแต่ละแบบเราจะได้ศึกษาปัญหาการสูญเสียในแอมพลิไฟตลอดจนปัญหาการรักษาความถี่ในการสวิทช์ให้ถูกต้อง จากการศึกษาปัญหาการใช้งานกับดีซีมอเตอร์นี้ เราสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสเตป มอเตอร์ และใช้เป็นแอมพลิไฟของลิเนียร์มอเตอร์ได้อีกด้วย

2.9.1 การทำงานของพัลส์วิดท์โมดูเลชันแอมพลิไฟเออร์

แอมพลิไฟแบบ PWM สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดตามลักษณะของการทำงานคือ ไบโพลาร์ชูนิโพลาร์และลิมิตชูนิโพลาร์ สำหรับแบบไบโพลาร์ซึ่งง่ายที่สุดจะดูการทำงานได้ตามรูปที่ 2.23 โดยที่เราจะกำหนดให้มีความถี่การสวิทช์เป็น f_s , t_{on} ที่เกิดขึ้นในส่วนแรกและ t_{off} เกิดในส่วนหลังโดย



รูปที่ 2.21 พัลส์วิดท์โมดูเลชันแอมพลิไฟเออร์สำหรับดีซีมอเตอร์

ไบโพลาร์ จะมี และ T4 นำกระแสระหว่างเฟส on ส่วน T2 และ T3 จะนำกระแสขณะเฟส off จะ
ได้ฟังก์ชันตกคร่อมมอเตอร์เป็น

$$\frac{\omega(s)}{V_m(s)} = \frac{1}{\alpha(s)} \frac{K_T}{sJ} V_m = V_{AB} \begin{cases} V_s & 0 \leq t < t_1 \\ -V_s & t_1 \leq t < t_f \end{cases} \quad (2.27)$$

แบบยูนิโพลาร์ จะลดจำนวนทรานซิสเตอร์ในการสวิตซ์ลงการสวิตซ์ขึ้นอยู่กับ V_{in} เป็นบวก หรือ
ลบเมื่อ V_{in} เป็นบวก T4จะนำกระแสตลอดคาบ ในขณะที่ T1 นำกระแสในช่วงเฟส on และ T2
จะนำกระแสในช่วงเฟส off เมื่อ V_{in} เป็นลบ T2 จะนำกระแสตลอด โดยมี T3 และ T4 สลับกัน
ทำงานเมื่อ V_{in} เป็นบวกได้

$$V_{in} \begin{cases} V_s & 0 \leq t < t_1 \\ 0 & t_1 \leq t < t_f \end{cases} \quad (2.28)$$

การแสดงค่า V_m ในทางลบจะเหมือนกันเพียงแต่ V_m เป็นลบเท่านั้นจากลักษณะของ 2 แบบดังที่กล่าวมานั้นมีประโยชน์เหมือนกัน ซึ่งในแต่ละกรณีจะมีทรานซิสเตอร์คู่หนึ่ง (T1, T2) หรือ (T3, T4) จะหยุดนำกระแสขณะที่อีกคู่นำกระแสซึ่งมีเวลาเก็บสะสมและเวลาที่ปล่อยออกของทรานซิสเตอร์เกิดขึ้นและมันอาจเป็นไปได้ที่ทรานซิสเตอร์ทั้งหมดนำกระแสในเวลาเดียวกัน ซึ่งจะทำให้เกิดการลัดวงจรของซัพพลาย เราจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงภาวะดังกล่าว ซึ่งสามารถทำได้โดยการสร้างช่วง delay time ระหว่างการหยุดและการนำกระแสของทรานซิสเตอร์และด้วยเหตุผลดังกล่าว ความถี่ของการสวิตช์จะถูกจำกัดในวงที่แคบลงแบบที่ 3 ของการทำงานคือแบบ ลิมิตยูนิโพลาร์จะแสดงให้เห็นคือมีความจำเป็น ต้องมีช่วง delay ซึ่งการสวิตช์ขึ้นกับค่า V_m เมื่อ V_m เป็นบวก T4 จะนำกระแสตลอด T1 จะสวิตช์เป็น on ในช่วงเฟส on ดังนั้นในช่วงเฟส on ทั้ง T1 และ T4 จะ on ยังผลแก่โวลต์เดจของมอเตอร์ V_m คือ

$$V_m = V_s \quad 0 \leq t \leq t_1 \quad (2.29)$$

ระหว่างเฟส Off จะมี T4 นำกระแสเพียงตัวเดียวเป็นผลให้ V_m ขึ้นกับ I_{AB} トラバิดที่ $I_{AB} > 0$ ซึ่งเป็นสภาวะปกติ เมื่อ $V_{AB} > 0$ กระแส I_{AB} จะไหลผ่าน D2 และ T4 เป็นผลให้ $V_A = 0$ และ

$$V_m = V_{AB} = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} t_1 \leq t < t_f \\ I_{AB} > 0 \end{array} \right. \quad (2.30)$$

ในกรณีที่ I_{AB} เป็นลบ กระแสจะไหลผ่าน D1 และ D4 เป็นผลให้ $V_A = V_s$ และ

$$V_m = V_{AB} = V_s \quad \left\{ \begin{array}{l} t_1 \leq t < t_f \\ I_{AB} < 0 \end{array} \right. \quad (2.31)$$

ซึ่งจะเกิดขึ้นภายหลังเปลี่ยนขั้ว V_m ในที่สุดถ้าเราสามารถทำให้ $I_{AB} = 0$ (เข้าใกล้ศูนย์จนถือว่าเป็นศูนย์) จะทำให้ ทั้ง D1 และ D4

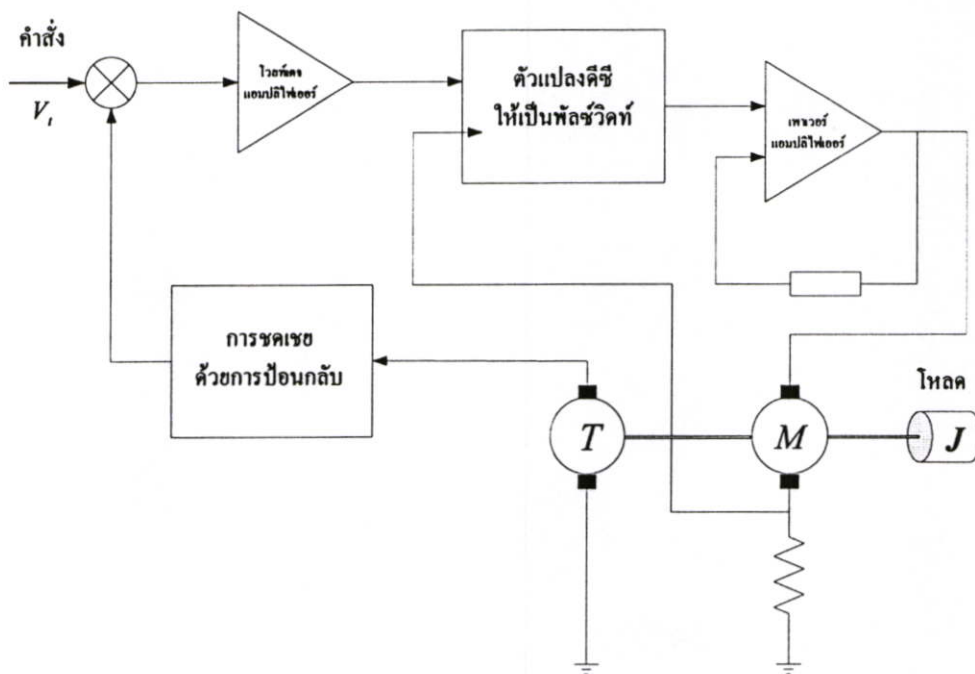
ไม่นำกระแสและโวลต์เดจ V_m จะอยู่ระหว่างค่าศูนย์และ V_s ดังต่อไปนี้

$$0 < V_m < V_s \quad \left\{ \begin{array}{l} t_1 \leq t < t_f \\ I_{AB} = 0 \end{array} \right. \quad (2.32)$$

อย่างไรก็ตามถ้า $I_{AB} > 0$ เป็นสภาวะปกติเมื่อ $V_m > 0$ แบบยูนิโพลาร์และแบบลิมิตยูนิโพลาร์ จะแสดงคุณสมบัติคล้ายกันมาก ซึ่งเราสามารถสรุป Mode การทำงานและผลของโวลต์เดจดังตารางที่ 2.1

2.9.2 ระบบคอนโทรลความเร็วที่ใช้พัลส์วิดท์โมดูเลชันแอมพลิไฟเออร์

PWM สวิตช์ซึ่งแอมพลิไฟเออร์ที่ทำงานด้วยทรานซิสเตอร์จะใช้ในระบบคอนโทรลที่มีประสิทธิภาพสูง ระบบคอนโทรลความเร็วที่มีเพาเวอร์สูง ๆ และในระบบเซอร์โว บล็อกไดอะแกรมของระบบคอนโทรลความเร็วแบบ PWM แสดงได้ในรูปที่ 2.24



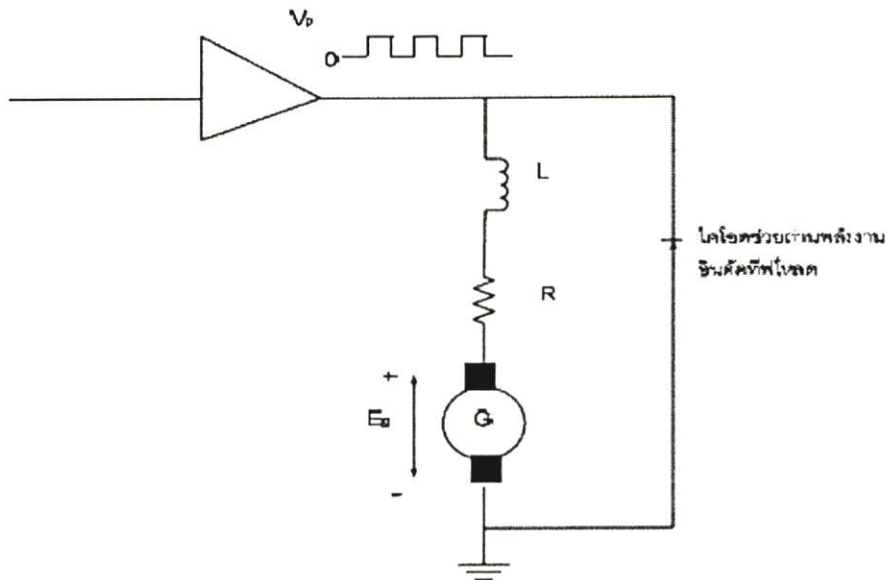
รูปที่ 2.22 บล็อกไดอะแกรมของระบบคอนโทรลความเร็วแบบ PWM

เรามักจะใช้ความถี่ของพัลส์ในระบบ PWM ที่มีค่าสูงกว่า 1 kHz (มักจะมีค่าถึง 10 KHz) และความถี่นี้จะขึ้นอยู่กับความต้องการของผลตอบสนองของระบบต่อแบนด์วิดท์อินคักเต็นซ์ของมอเตอร์และคุณสมบัติการสูญเสียเพาเวอร์ในตัวมอเตอร์ที่ความสูง ในเวลาเดียวกันเราจะต้องคำนึง audio noise ที่เกิดจาก ขดลวด, ฮีทซิงค์ และส่วนของโครงประกอบของตัวมอเตอร์ มันจะดังออกมาเป็นเสียงรบกวนและในการประยุกต์ใช้งานของระบบ PWM นี้เราสามารถเพิ่มความถี่ของพัลส์ให้สูงขึ้นถึงจุดที่เสียงของนอยส์ (noise) นั้น หูคนไม่ได้ยินเสียงนั้น

ตารางที่ 2.1 แสดงการทำงานของแอมพลิไฟแบบพัลส์วิดท์โมดูเลชั่น

ลักษณะการทำงานและ อินพุทโวลต์เดจ	ภาวะทรานซิสเตอร์และโวลต์เดจของมอเตอร์	
	เฟส on	เฟส off
ไบโพลาร์โทมค	T_1, T_4 on T_2, T_3 off $V_m = V_s$	T_2, T_3 on T_1, T_4 off $V_m = -V_s$
ยูนิโพลาร์	T_1, T_4 on T_2, T_3 off $V_m = V_s$	T_2, T_4 on T_1, T_3 off $V_m = 0$
ยูนิโพลาร์	T_2, T_3 on T_1, T_4 off $V_m = -V_s$	T_2, T_4 on T_1, T_3 off $V_m = 0$
ลิมิตยูนิโพลาร์	T_1, T_4 on T_2, T_3 off $V_m = V_s$	T_4 on T_1, T_2, T_3 off $V_m = 0$, if $I_{AB} > 0$ $V_m = V_s$, if $I_{AB} < 0$ $0 < V_m < V_s$, if $I_{AB} = 0$
ลิมิตยูนิโพลาร์	T_2, T_3 on T_1, T_4 off $V_m = -V_s$	T_2 on T_1, T_3, T_4 off $V_m = 0$, if $I_{AB} > 0$ $V_m = -V_s$, if $I_{AB} < 0$ $-V_s < V_m < 0$ if $I_{AB} = 0$

ในการพิจารณาคูสมบัติของโวลต์เดจและกระแสของระบบ PWM ชั้นแรกเราพิจารณาถึงมอเตอร์ในอุดมคติและคุณลักษณะของมอเตอร์ในระบบ PWM วงจรสมมูลย์ของมอเตอร์แสดงได้ในรูปที่ 2.21 ลูกคลื่นของกระแสที่ไหลในมอเตอร์ในระหว่างสวิตซ์ซิ่งโทมค (switching mode) ไม่ได้ขึ้นอยู่กับสวิตซ์ซิ่งเรท (Switching rate) เท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับความเร็วของมอเตอร์ (ω) ผลรวมของอินดักแต้นซ์ (L) ความต้านทานของมอเตอร์ (R_a) และระดับของกระแสใน ไซเกิลสุดท้าย

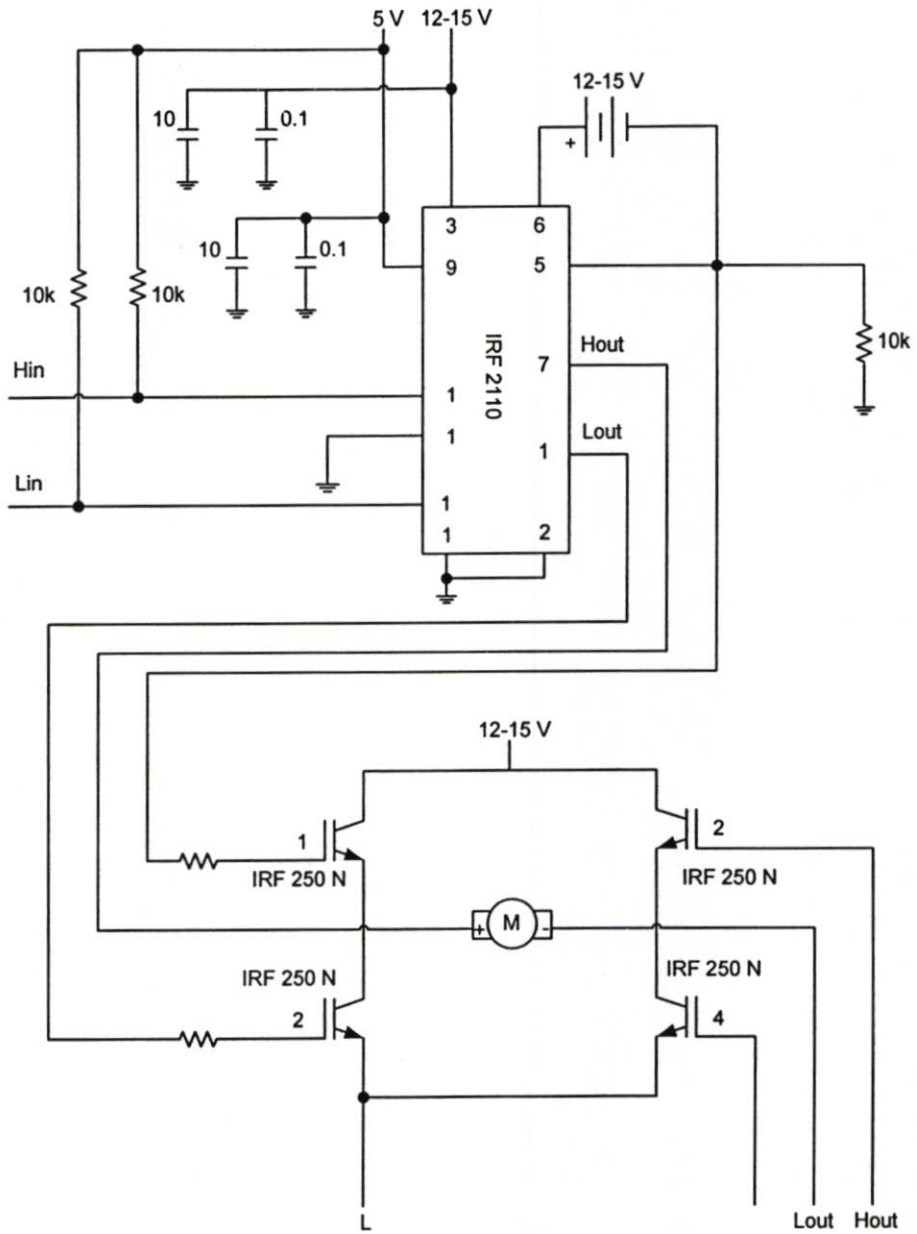


รูปที่ 2.23 วงจรสมมูลของมอเตอร์ในระบบคอนโทรลแบบ PWM

2.10 วงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์

จากรูปที่ 2.24 ในการออกแบบวงจรขับมอเตอร์อาศัยหลักการขับมอเตอร์แบบ 4 ควอดแรนและคำนึงถึงกระแสกับแรงดันทางค่านเอาท์พุทซึ่งในที่นี้เราจำกัดกระแสไว้ไม่เกิน 15 แอมแปร์และแรงดันอยู่ที่ -12 ถึง 12 โวลต์ สำหรับการทำงานของวงจรนี้จะรับสัญญาณอินพุทแบบพัลส์วีธมอดูเลชันความถี่ประมาณ 10 KHz ซึ่งเป็นสัญญาณที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยค่าดีวตี้ไซเคิลจะขึ้นอยู่กับผลของการคำนวณทางคณิตศาสตร์ในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ สัญญาณพัลส์วีธที่ออกมา 1 คู่ จะประกอบไปด้วยสัญญาณแบบ High และ Low ซึ่งสัญญาณทั้งสองนั้นจะเป็นแบบคอมพลิเมนต์ารี่มี deattime ประมาณ 200ns สัญญาณทั้งสองจะถูกส่งเข้าไปที่ตัว Gatedrive เพื่อขยายสัญญาณทางค่านเอาท์พุท จะได้ Hout และ Lout เพื่อไปสั่งการทำงานของตัวสวิทซ์ซึ่ง ซึ่งในโปรเจกนี้ใช้มอสเฟต เนื่องจากความสามารถในการทนต่อกระแส แรงดัน และสามารถสวิทซ์ที่ความถี่สูงๆ ได้มอเตอร์ 1 ตัวใช้สัญญาณพัลส์วีธ 2 คู่ เพื่อให้สามารถเลือกทิศทางของกระแสได้ แรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์นั้นจะอยู่ที่ -12 ถึง 12 โวลต์ ซึ่งตัวที่จะกำหนดขนาดของแรงดันที่จะป้อนให้มอเตอร์ก็คือ สัญญาณพัลส์วีธที่ปรับค่าดีวตี้ไซเคิลได้ตั้งแต่ 0-100% โดยที่

$$V_a = T_{on} / (T_{off} + T_{on}) * V_{battery} = \text{duty cycle} * V_{battery}$$



รูปที่ 2.24 วงจรขับกระแสตรงของมอเตอร์

บทที่ 3

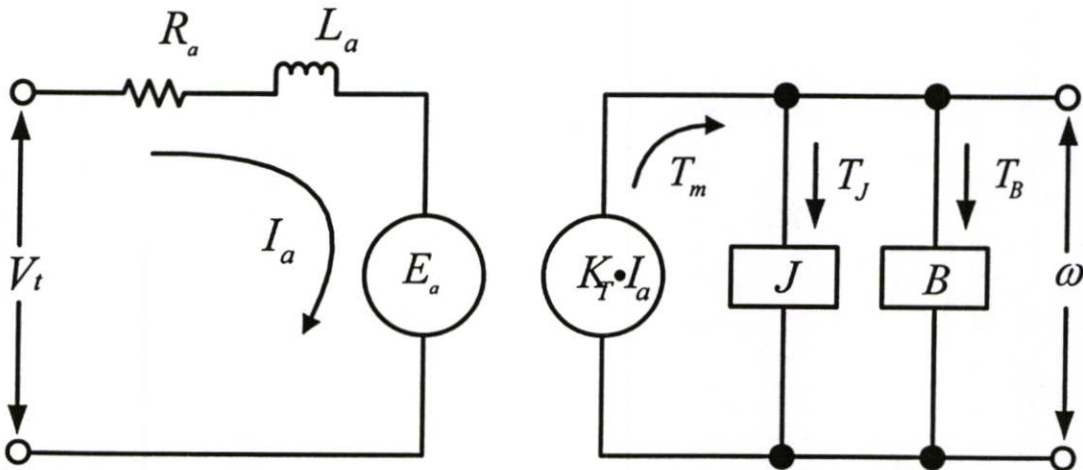
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพลวัต

3.1 บทนำ

การดำเนินงานวิเคราะห์และออกแบบเพื่อควบคุมระบบ จำเป็นต้องอาศัยแบบจำลอง (Models) ซึ่งถือเป็นสิ่งที่มนุษย์สมมติขึ้น เพื่อแทนหรืออธิบายระบบพลวัต (Dynamical Systems) ที่ให้ความสนใจอยู่ในขณะนั้น แบบจำลองที่กล่าวถึงในที่นี้คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Models) เป็นการใช้อยู่ลักษณะทางคณิตศาสตร์ที่มนุษย์คุ้นเคย เขียนแสดงความสัมพันธ์ของสิ่งต่างๆ ที่ประกอบกันขึ้นมาเป็นระบบ ความสัมพันธ์ดังกล่าว มีรูปแบบเป็นสมการหรือความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ซึ่งเขียนขึ้นได้โดยอาศัยความรู้ทางวิทยาศาสตร์แขนงต่างๆ ที่อาจเกี่ยวข้องกับระบบพลวัตนั้น เช่น อาศัยความรู้ทางฟิสิกส์ เป็นต้น

3.2 การวิเคราะห์ระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) เราสามารถเขียนเป็นวงจรที่ประกอบไปด้วยโครงสร้างทั้งทางด้านไฟฟ้าและทางกลได้ดังรูปที่ 3.1 โดยที่เราสามารถแยกโครงสร้างได้ตามสัญญาณดังนี้

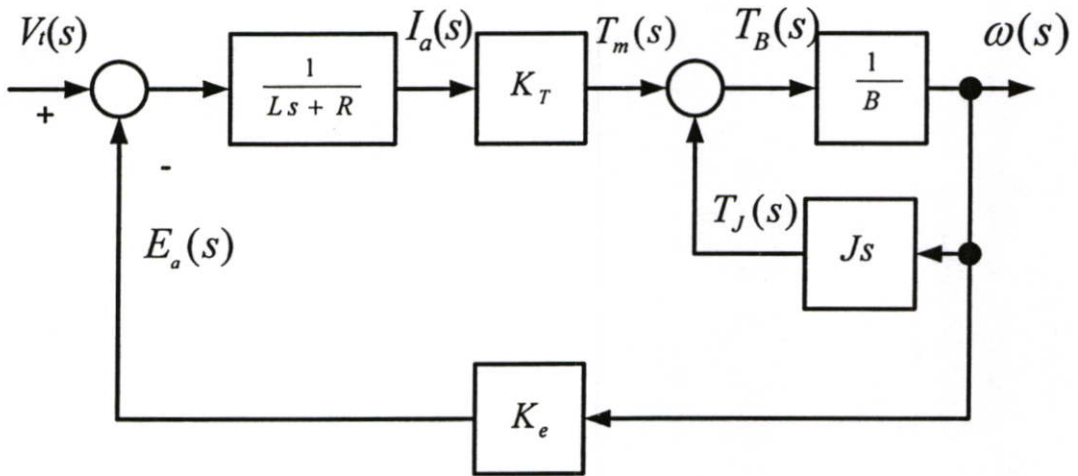


รูปที่ 3.1 โค้ดอะแกรมย่อยของระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

โดยพารามิเตอร์ต่างๆที่แสดงในรูปโค้ดอะแกรมมีความหมายดังต่อไปนี้

$$V_t = \text{แรงดันอินพุต (V)}$$

- R_a = ความต้านทานของอาร์เมเจอร์ (Ω)
 L_a = ความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์ (H)
 E_a = แรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ (V)
 I_a = กระแสอาร์เมเจอร์ (A)
 K_T = ค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์ ($N \cdot m / A$)
 T_m = แรงบิดของมอเตอร์ ($N \cdot m$)
 T_j = แรงบิดของโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ ($N \cdot m$)
 T_B = แรงบิดความหนืดของมอเตอร์ ($N \cdot m$)
 J = โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ ($kg \cdot m^2$)
 B = ความหนืดของมอเตอร์ ($N \cdot m / rad / sec$)
 ω = ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (rad / s)



รูปที่ 3.2 ไคอะแกรมของระบบมอเตอร์ไฟตรง

จากระบบมอเตอร์ไฟตรง เราสามารถเรียกสั้นๆ ได้ว่าเป็นระบบงาน (Plant) โดยเราสามารถหาสมการโอนย้ายคุณลักษณะ (Transfer Function) ของระบบได้ดังนี้

$$E = K_e \omega \quad (3.2)$$

$$T = K_T I_a \quad (3.3)$$

จากกฎของเคอร์ชอฟท์ (KVL)

$$V_i - I_a R_a - L_a \frac{dI_a}{dt} - E_a = 0 \quad (3.4)$$

$$L_a \frac{dI_a}{dt} + I_a R_a = V_i - K_e \omega \quad (3.5)$$

จากกฎของนิวตัน (Newton's Law) จะได้พลังงานทางกลทั้งหมด เป็น

$$T - T_J - T_B - T_L = 0$$

$$K_T \cdot I_a - J \frac{d\omega}{dt} - B \cdot \omega = 0$$

เมื่อ $T_L = 0$

$$J \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega = K_T I_a \quad (3.6)$$

จาก (3.5), (3.6) เมื่อแปลงอยู่ในรูปของลาปลาซ (Laplace Transform) จะได้เป็น

$$(L_a s + R_a) I_a(s) = V_i(s) - K_e \omega(s)$$

$$I_a(s) = \frac{V_i(s) - K_e \omega(s)}{(L_a s + R_a)} \quad (3.7)$$

$$(Js + B) \omega(s) = K_T I_a(s)$$

$$\omega(s) = \frac{K_T \cdot I_a(s)}{(Js + B)} \quad (3.8)$$

เมื่อให้ความเร็ว Rotation Speed (ω) เป็นเอาต์พุตและแรงดัน (V_i) เป็นอินพุต
เมื่อแทนสมการ (3.7) ใน (3.8) แล้วเราจะได้

$$(Js + B) \omega(s) = \frac{K_T \cdot V_i(s) - K_T \cdot K_e \cdot \omega(s)}{(L_a s + R_a)}$$

$$(Js + B) (L_a s + R_a) \omega(s) = K_T \cdot V_i(s) - K_T \cdot K_e \cdot \omega(s)$$

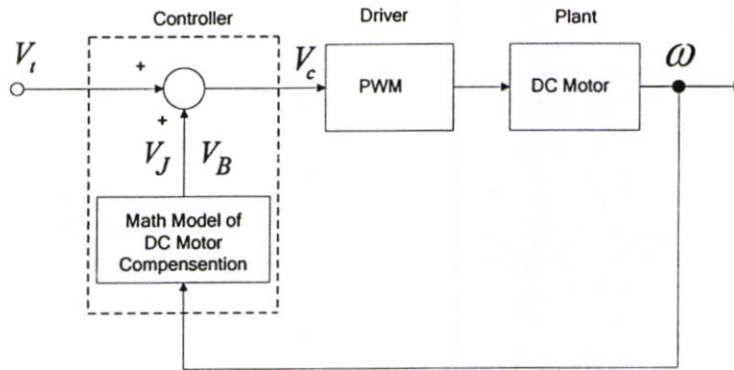
$$[(Js + B)(L_a s + R_a) + (K_T \cdot K_e)] \omega(s) = K_T V_i(s)$$

$$\frac{\omega(s)}{V_i(s)} = \frac{K_T}{(Js + B)(L_a s + R_a) + K_T \cdot K_e} \quad (3.9)$$

และเมื่อกำหนดให้ $K_T = K_e = K$ เราจะได้สมการโอนย้าย (Transfer Function) เป็น

$$\frac{\omega(s)}{V_t(s)} = \frac{K}{(Js + B)(L_a s + R_a) + K^2} \quad (3.10)$$

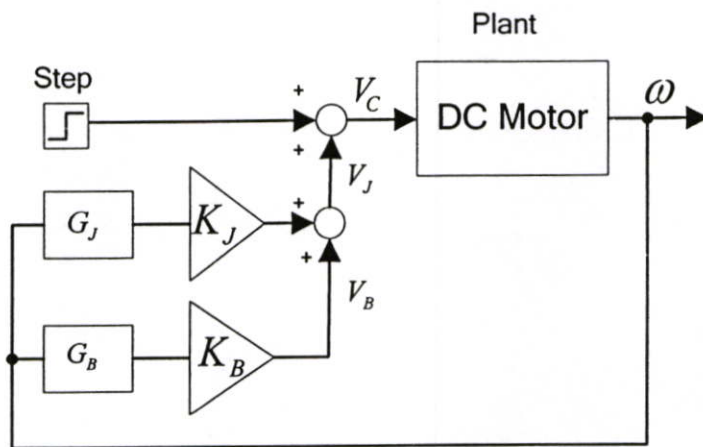
3.3 การจำลองหาตัวชดเชยของระบบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



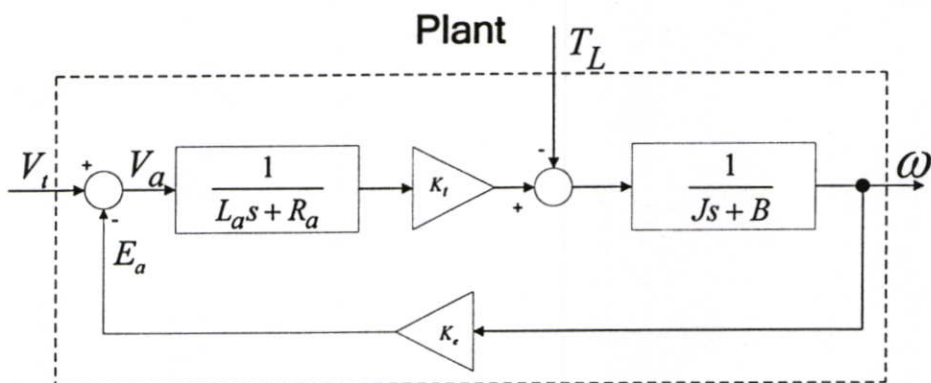
รูปที่ 3.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบ

- เมื่อ V_t แทนสัญญาณคำสั่งบังคับอินพุต
 V_J และ V_B แทนสัญญาณป้อนกลับ
 V_c แทน $(V_t - V_J$ และ $V_B)$ แทน สัญญาณผิดพลาด

สัญญาณคำสั่งบังคับอินพุตจะได้รับการเปรียบเทียบกับสัญญาณป้อนกลับความแตกต่างของค่าทั้งสองได้เป็นสัญญาณเออร์เรอร์ป้อนไปยังมอเตอร์ซึ่งเป็นผลให้เออร์เรอร์ของความเร็วจะได้รับการแก้ไขให้ถูกต้องส่วนประกอบอันแรกในลูฟได้แก่ ชุดคอนโทรลโดยภายในชุดคอนโทรลจะมีตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งรับค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับการปรับปรุงจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แล้วส่งต่อไปยังชุดขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งตัวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีตัวเซ็นเซอร์ความเร็วซึ่งจะเป็นตัวกำเนิดสัญญาณอย่างต่อเนื่องและมีแมกนิจูดของสัญญาณเป็นสัดส่วนกับความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 3.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 3.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากสมการที่ (3.5) จะได้

$$V_t = L_a \frac{dI_a}{dt} + I_a R_a + K_e \omega \quad (3.11)$$

เมื่อ $T_L = 0$

$$T_m = K_t I_a = T_J + T_B = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (3.12)$$

$$\therefore I_a = \frac{1}{K_t} (J \frac{d\omega}{dt} + B\omega) \quad (3.13)$$

เมื่อแทนสมการที่ (3.13) ลงในสมการที่ (3.11) จะได้

$$\begin{aligned} V_t &= \frac{L_a}{K_T} \frac{d}{dt} (J \frac{d\omega}{dt} + B\omega) + R_a \left(\frac{1}{K_T} (J \frac{d\omega}{dt} + B\omega) \right) + K_e \omega \\ &= \frac{L_a}{K_T} J \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{L_a B}{K_T} \frac{d\omega}{dt} + \frac{R_a}{K_T} J \frac{d\omega}{dt} + \frac{R_a B \omega}{K_T} + K_e \omega \end{aligned} \quad (3.14)$$

เมื่อให้ $B = 0$ แล้วแทนในสมการที่ (3.14) จะได้

$$V_J = \frac{L_a}{K_T} J \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{R_a}{K_T} J \frac{d\omega}{dt} \quad (3.15)$$

เมื่อให้ $J = 0$ แล้วแทนในสมการที่ (3.14) จะได้

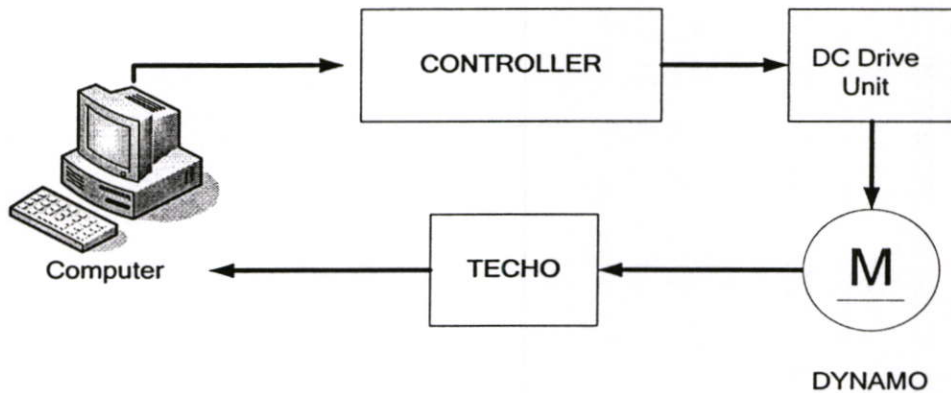
$$V_B = \frac{L_a B}{K_T} \frac{d\omega}{dt} + \frac{R_a B \omega}{K_T} \quad (3.16)$$

บทที่ 4

การควบคุมแบบ Real-Time โดยใช้โปรแกรม Matlab

4.1 บทนำ

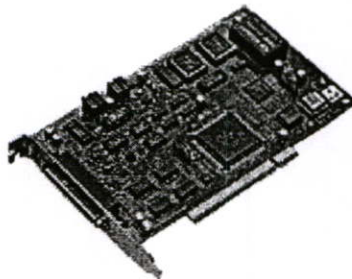
การควบคุมแบบ Real-time โดยการจำลองจาก โปรแกรม simulink ที่มีอยู่ใน Matlab สามารถถูกแสดงจาก แผนผังการควบคุม โดยแสดงถึงภาพต่างๆของการควบคุมในรูปที่ 4.1 โดยการใช้ การ์ด PCI 1711 เป็นตัวแปลงสัญญาณผ่านทางพอร์ต SCSI



รูปที่ 4.1 แผนผังของการควบคุมแบบ Real-Time

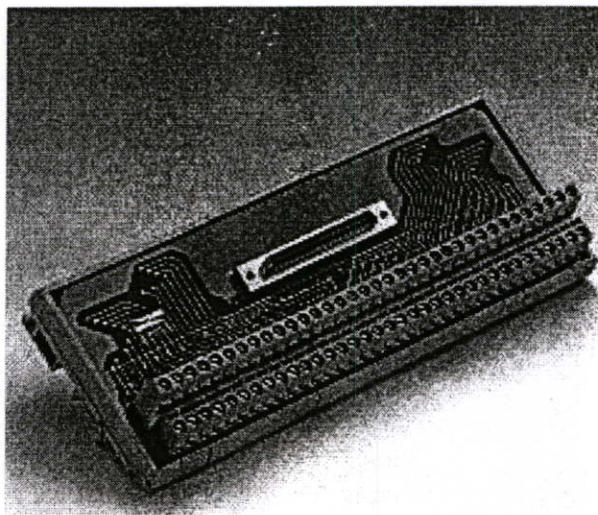
4.2 การทำงานของรูปการควบคุมแบบ Real-Time

จากรูปผังของการควบคุมแบบ Real-Time ทดสอบในคอมพิวเตอร์จะลงโปรแกรม แมท แพลบเพื่อที่จะใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และจะส่งงานผ่าน การ์ด PCI-Bus Multi-Function Data Acquisition model “ PCI 1711”



รูปที่ 4.2 การ์ด PCI-1711

การ์ด PCI-1711 เป็นตัวมัลติ-ฟังก์ชัน เป็นการวัดสำหรับบัส PCI วงจรถูกประยุกต์ให้ผู้ใช้ประโยชน์การวัดและหลายฟังก์ชันควบคุมเช่น 12-bit A/D conversion, D/A conversion, digital input, digital output, และ counter/timer. ลักษณะของการ์ดเป็น automatic channel/gain scanning circuit. วงจรนี้ควบคุม multiplexer switching ระหว่าง sampling บนบอร์ด SRAM เก็บ ค่าเกณฑ์แตกต่างกันและconfigurations สำหรับแต่ละช่องสัญญาณ ออกแบบให้ multi-channel high-speed sampling (ขึ้นถึง 100 kHz) ที่เกณฑ์ต่างกันสำหรับแต่ละช่องสัญญาณการ์ด PCI-1711 มี FIFO บัฟเฟอร์บนบอร์ดซึ่งสามารถ store up to 1 k A/Dsamples. ผู้ใช้สามารถอินาเบิ้ล หรือดีสเอเบิ้ล การขออินเตอร์รัพของFIFOบัฟเฟอร์ช่วงขณะที่ขออินเตอร์รัพที่FIFOเป็นอินาเบิ้ล, ผู้ใช้สามารถเจาะจงการขออินเตอร์รัพจะส่งเมื่อใดก็ตาม หนึ่งแซมปิ้งนั้นมิขึ้น หรือเมื่อFIFOบัฟเฟอร์เป็นhalf full การอินาเบิ้ลการถ่ายโอนข้อมูลไฮสปีดอย่างต่อเนื่องที่การทำนายผลประสิทธิภาพมากขึ้นบนระบบวินโดวส์ การ์ดPCI-1711 เป็นอุปกรณ์ที่โปรแกรมเคาน์เตอร์ได้ที่ช่วยนำทริกเกอร์สำหรับ ชุดแปลงอนาล็อกเป็นดิจิตอลชิปเคาน์เตอร์เป็น82C54 หรือ equivalent ที่ประกอบไปด้วย16-bit เคาน์เตอร์สามชุดบน 10 MHz clock เคาน์เตอร์หนึ่งตัวถูกใช้กรณีตัวเคาน์เตอร์สำหรับการนับที่มาจากช่องสัญญาณอินพุต ตัวที่สองลำดับต่อมาทำเป็นไทเมอร์ 32-bit สำหรับนำสัญญาณทริกเตอร์ และ จากตัวการ์ดจะต้องใช้ร่วมกับเทอร์มินอล โมเดล ADAM-3968 เป็นเทอร์มินอลแบบสตูร์ชันมี 68 พิน สายต่อกับ การ์ด PCI 1711 แบบ SCSI IIใช้รางยึดแบบบอเนกประสงค์ใช้สำหรับการ์ดPC-Lab มี 68-pin connector และส่งสัญญาณไป บล็อกคอนโทรลเลอร์ซึ่งจะใช้คอนโทรลเลอร์ นี้ไปส่งชุด DC Drive Unit ให้ไปควบคุมความเร็วเพื่อส่งกลับมาที่คอมพิวเตอร์อีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 4.3 แสดงเทอร์มินอล model ADAM-3968

A10	58	34	A11
A12	67	33	A13
A14	66	32	A15
A16	55	31	A17
A18	54	30	A19
A110	63	29	A111
A112	62	28	A113
A114	61	27	A115
AIGND	50	26	AIGND
DA0_REF	59	25	DA1_REF
DA0_OUT	58	24	DA1_OUT
AOGND	57	23	AOGND
D10	56	22	D11
D12	55	21	D13
D14	54	20	D15
D16	53	19	D17
D18	52	18	D19
D110	51	17	D111
D112	50	16	D113
D114	49	15	D115
DGND	48	14	DGND
DO0	47	13	DO1
DO2	46	12	DO3
DO4	45	11	DO5
DO6	44	10	DO7
DO8	43	9	DO9
DO10	42	8	DO11
DO12	41	7	DO13
DO14	40	6	DO15
DGND	39	5	DGND
CNT0_CLK	38	4	PACER_OUT
CNT0_OUT	37	3	TRG_GATE
CNT0_GATE	36	2	EXT_TRG
+12V	35	1	+5V

รูปที่ 4.4 แสดงขาของเทอร์มินอล model ADAM-3968

4.3 การวิเคราะห์ระบบโดยใช้ โปรแกรม Matlab

4.3.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์โดย Simulink

การวิเคราะห์ระบบโดยโปรแกรม Simulink สามารถสรุปวิธีการเขียนใช้งาน ได้ดังนี้

1. เปิดโปรแกรม Matlab และ เข้าโปรแกรมโดยคดปุ่ม Simulink (ปุ่มด้านซ้ายของ เครื่องหมาย ? หรือเลือกจากเมนู) จอจะแสดงหน้าต่าง Simulink Library Browser ให้บนจอ

2. เปิดไฟล์เพื่อสร้างแบบจำลองใหม่โดย File / New เลือก Model จอจะแสดงหน้าต่าง สำหรับเขียนโมเดลมาให้ และให้ทำการเลื่อนหน้าต่างไปทางขวาอยู่คู่กับหน้าต่างของ Simulink Library Browser เพื่อความสะดวกในการวาดรูป

3. ทำการวาดผังไดอะแกรมที่ต้องการ โดยเลือก Block จาก Library ต่างๆ เมื่อพบแล้วให้ กดเมาส์ที่รูปแล้วลากมายังหน้าต่างที่จะทำการวาด หลังจากนั้นให้ทำการลากเส้นเชื่อมต่อระบบให้ ครบ

4. ให้กำหนดชื่อบล็อกตามรูป และกำหนดค่าพารามิเตอร์ของทุกบล็อกโดยดับเบิลคลิกที่ บล็อก และกำหนดค่าให้ตรงตามที่ต้องการ

5. คู่มือผลลัพธ์เอาต์พุตได้โดยสั่งที่เมนู Simulation / Start แล้วทำการดับเบิลคลิกที่บล็อก เอาท์พุต คือ Scope หลังจากนั้นให้กดปุ่ม Autoscale หรือปุ่มรูปกล้องส่องทางไกล เพื่อปรับภาพ

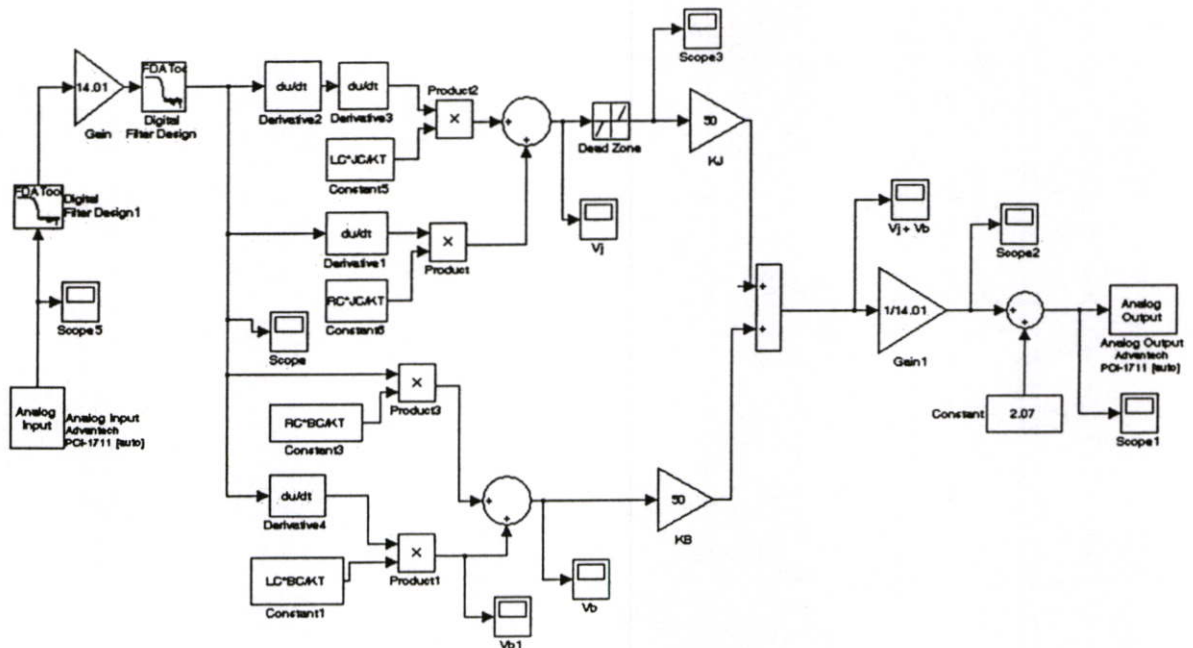
ให้เหมาะสม และเราสามารถทำการปรับค่าสเกลในแนวนอนเพื่อดูรูปสัญญาณให้ชัดเจนยิ่งขึ้น ได้ โดยกดที่ปุ่ม Parameters และให้กำหนดค่าช่วงเวลาของแกนในแนวนอน (Time range) ตามต้องการ

รายละเอียดของบล็อกต่างๆ ที่ใช้วิเคราะห์ในบทความนี้สามารถหาได้จากไลบรารี ซึ่งมีดังนี้

Block Diagram	Library
Constant	Sources
Sum	Math
PID Simulink Extras / Additional	Linear
Transfer function	Continuous
Scope	Sinks

หมายเหตุ

1. บล็อก Sum สามารถเลือก / เพิ่ม เครื่องหมาย + - ได้โดยดับเบิลคลิกที่รูปบล็อก และเปลี่ยนเครื่องหมายโดยใส่ที่ช่อง List of signs
2. การหมุนรูป ทำได้โดยกดปุ่ม Ctrl + R



รูปที่ 4.5 แสดงการควบคุมมอเตอร์แบบ Real-Time ผ่าน Simulink

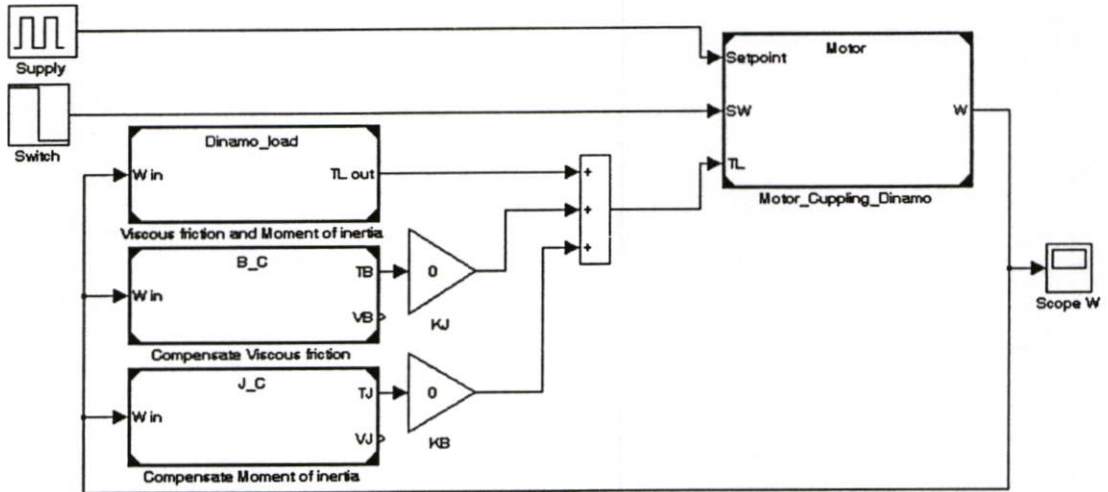
บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

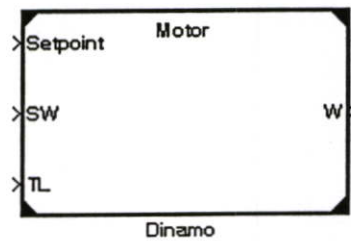
5.1 การทดลอง

5.1.1 การทดลองโดยใช้โปรแกรม simulink

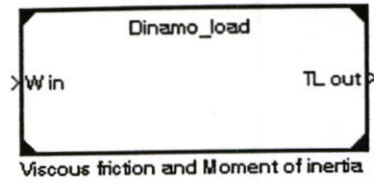
ในการทดลองนี้จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของไดนาโมกับมอเตอร์มาทดสอบในโปรแกรม simulink



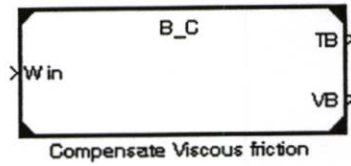
รูปที่ 5.1 แสดงบล็อกของระบบโดยใช้โปรแกรม Simulink



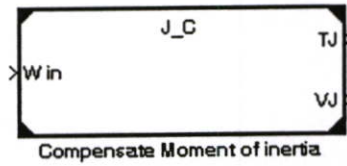
รูปที่ 5.2 แสดงบล็อกไดนาโมมอเตอร์



รูปที่ 5.3 แสดงบล็อกโพลทางกลของไดนาโมมิเตอร์



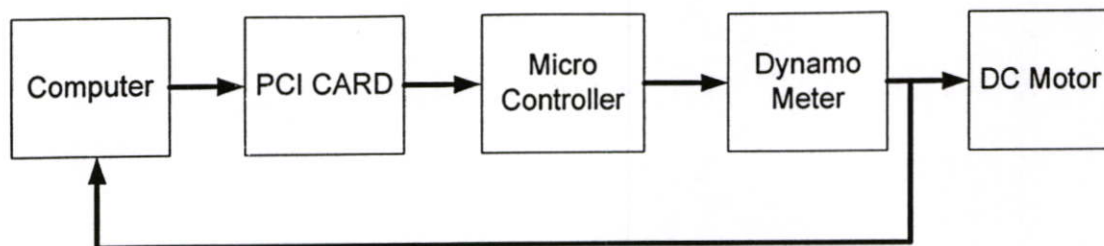
รูปที่ 5.4 แสดงบล็อกชดเชยความหนืด



รูปที่ 5.5 แสดงบล็อกชดเชยความเฉื่อย

5.1.2 การทดลองกับไดนาโมมิเตอร์และมอเตอร์

ในการทดลองได้นำไดนาโมมิเตอร์ที่สร้างขึ้นมาต่อกลับปลั๊กกับเพลลาของมอเตอร์ที่นำมาทดสอบ ซึ่งการทดลองนี้ใช้คีมมอเตอร์ขนาด พิกัดแรงดัน 24 โวลต์ 0.8 แอมป์ 950 รอบต่อนาที ทำการควบคุมโดยชุดควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 5.1

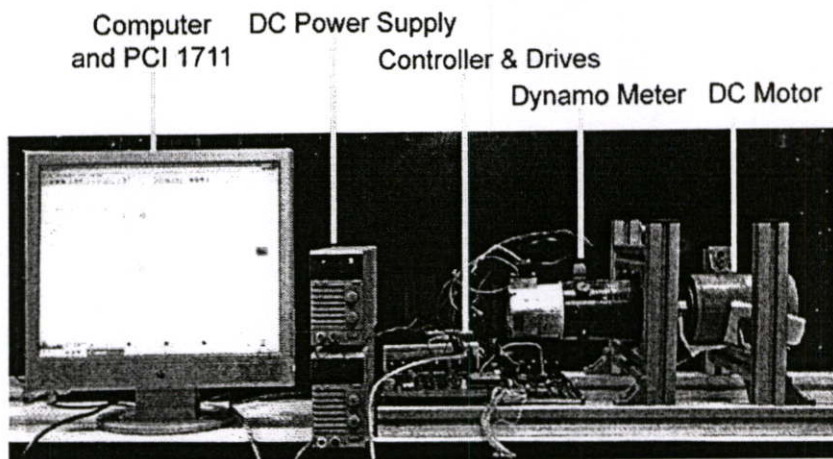


รูปที่ 5.6 แสดงบล็อกการทำงานของระบบเพื่อการทดลอง

มอเตอร์ที่นำมาสร้างไดนาโมมิเตอร์เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงยี่ห้อ SANYO DENKI TYPE R 840T-002W โครงสร้างแบบแม่เหล็กถาวรมีแทกโคเจนเนอเรเตอร์สำหรับวัดความเร็วรอบในตัว และค่าพารามิเตอร์ต่างๆของมอเตอร์มีดังตารางที่ 5.1

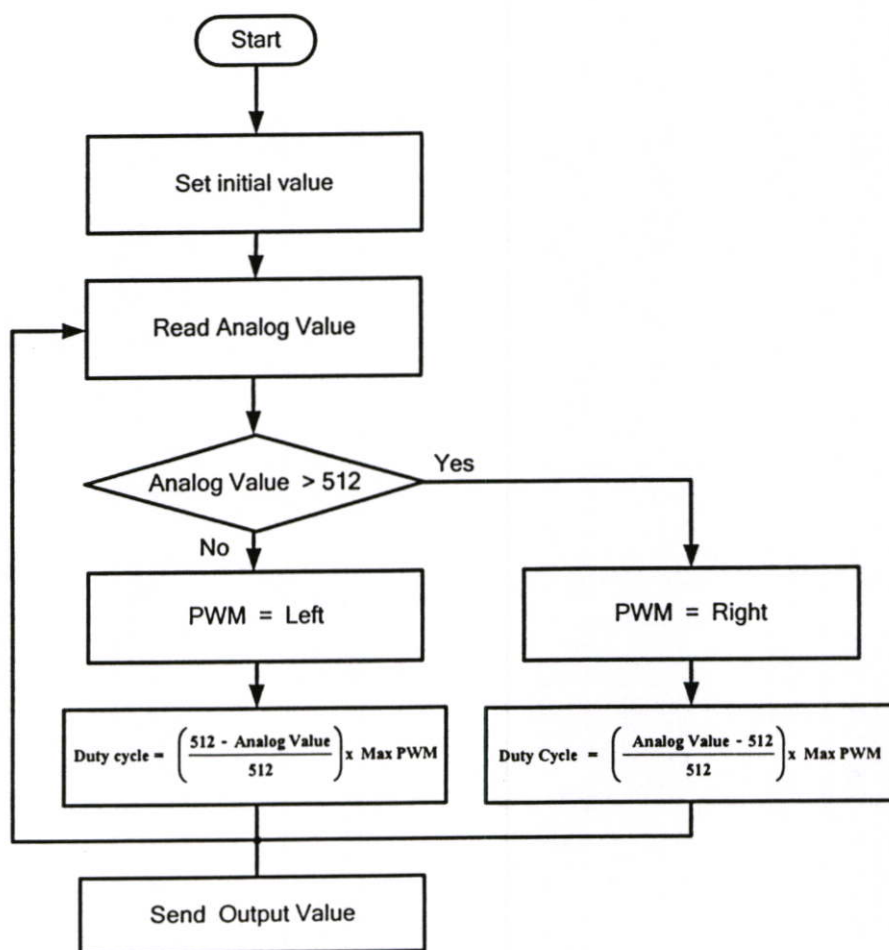
ตารางที่ 5.1 แสดงคุณสมบัติของไดนาโมที่นำมาทดสอบ

คุณสมบัติ	ปริมาณ
กำลัง	400 W
แรงดันสูงสุด	75 V
กระแสสูงสุด	6.6 A
ความเร็วสูงสุด	2,500 rpm
โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์	0.00018532 kg.m ²
ความหนืดของมอเตอร์	0.00318Nm.s/rad
ความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์	0.005 mH
ความต้านทานของอาร์เมเจอร์	1.66
ค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์	0.29098 V/rad/sec
ค่าคงที่แรงดันย้อนกลับของมอเตอร์	0.04 Nm/A



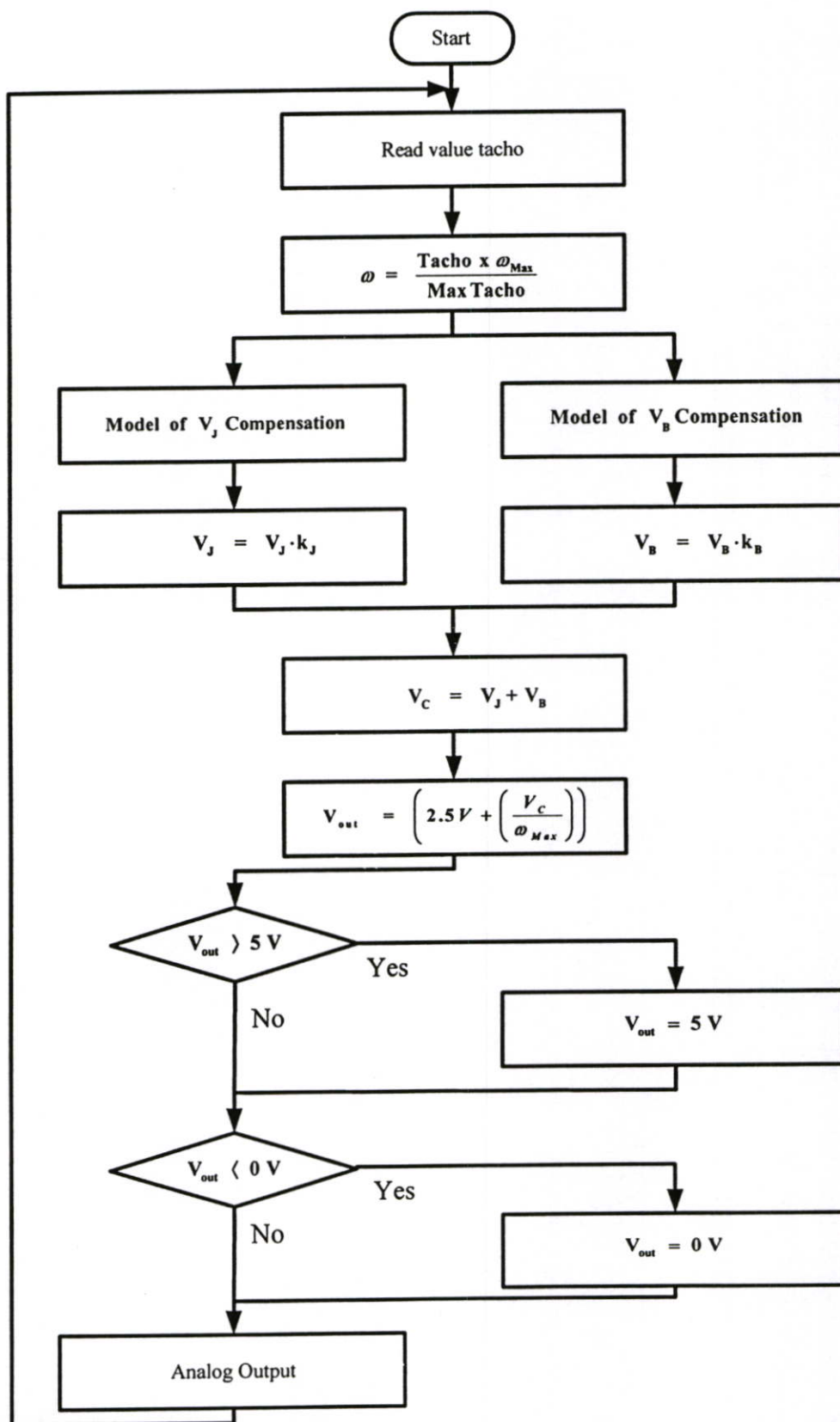
รูปที่ 5.7 แสดงภาพถ่ายของระบบที่สร้างขึ้น

5.2 แผนภูมิการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 5.8 แสดงแผนภูมิการทำงานของโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์

5.3 แผนภูมิการทำงานของ โปรแกรม Matlab



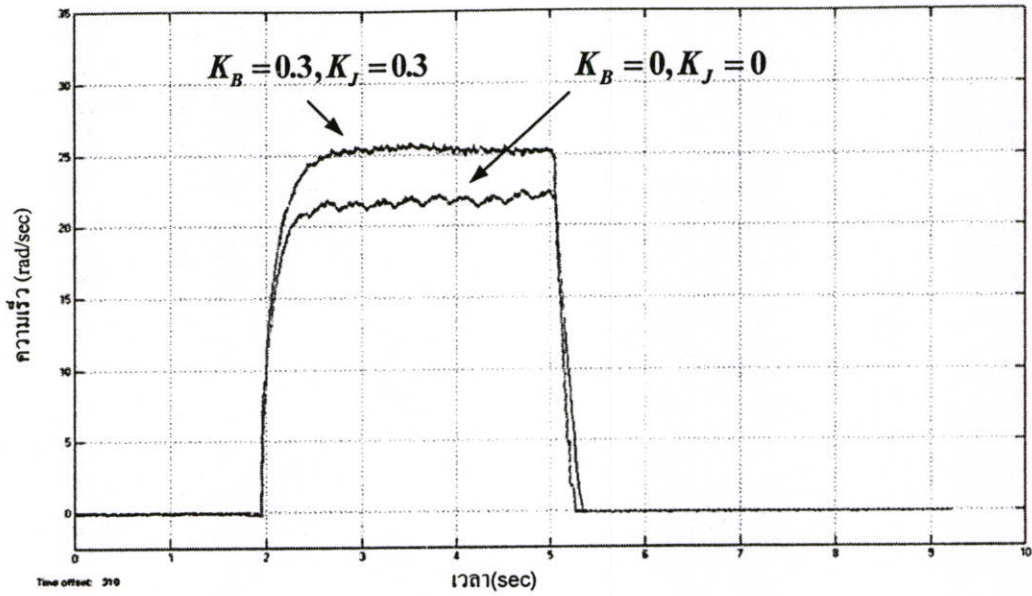
รูปที่ 5.9 แสดงแผนภูมิการทำงานของโปรแกรม Matlab

ตารางที่ 5.2 แสดงคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่นำมาทดสอบ

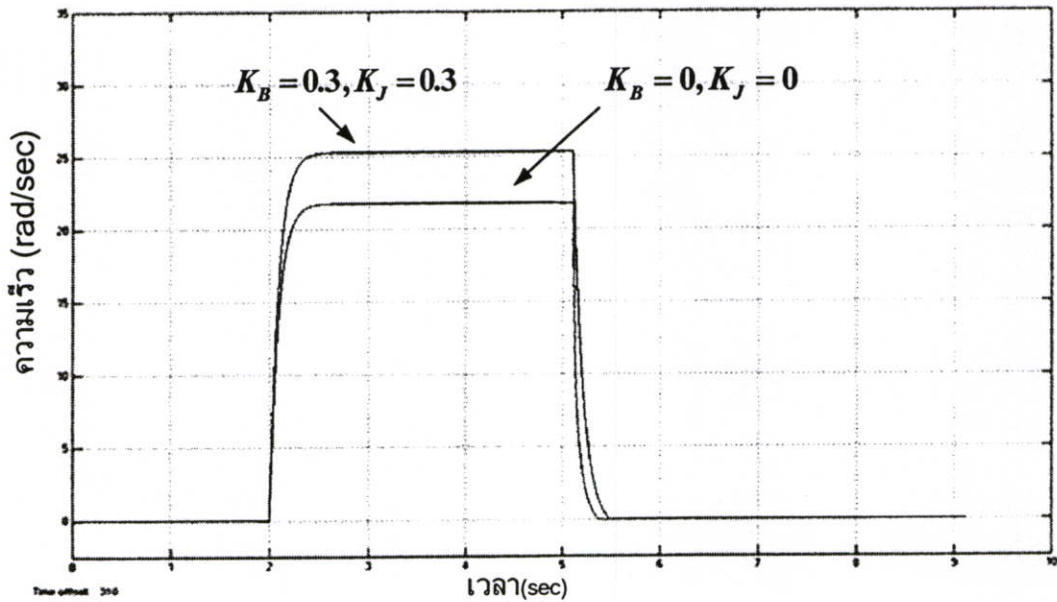
คุณสมบัติ	ปริมาณ
กำลัง	20 W
แรงดันสูงสุด	24 V
กระแสสูงสุด	0.8 A
ความเร็วสูงสุด	950 rpm
โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์	0.00095 kg.m ²
ความหนืดของมอเตอร์	0.00865 Nm.s/rad
ความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์	0.005 mH
ความต้านทานของอาร์เมเจอร์	3.5
ค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์	0.284 V/rad/sec
ค่าคงที่แรงดันย้อนกลับของมอเตอร์	0.2065 Nm/A

5.4 ผลการทดลอง

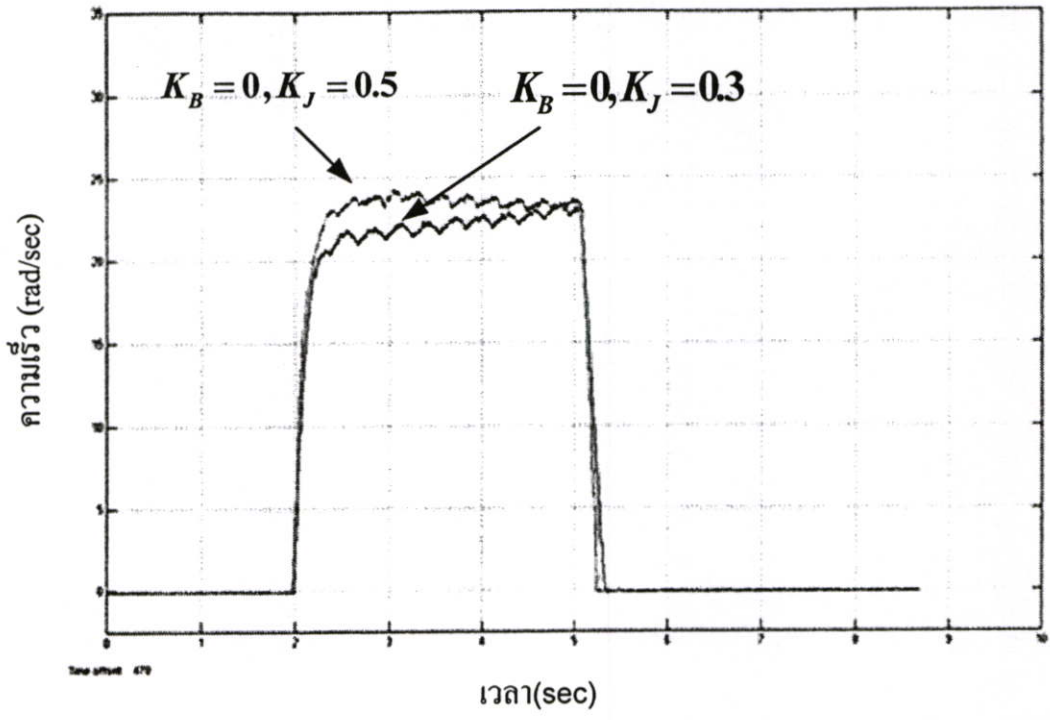
การทดลองหาผลตอบสนองทางไดนามิกของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะแสดงผลโดยแบ่งเป็น ผลตอบสนองทางความเร็วโดยปรับค่า K_t และ K_b ในระดับต่างๆ



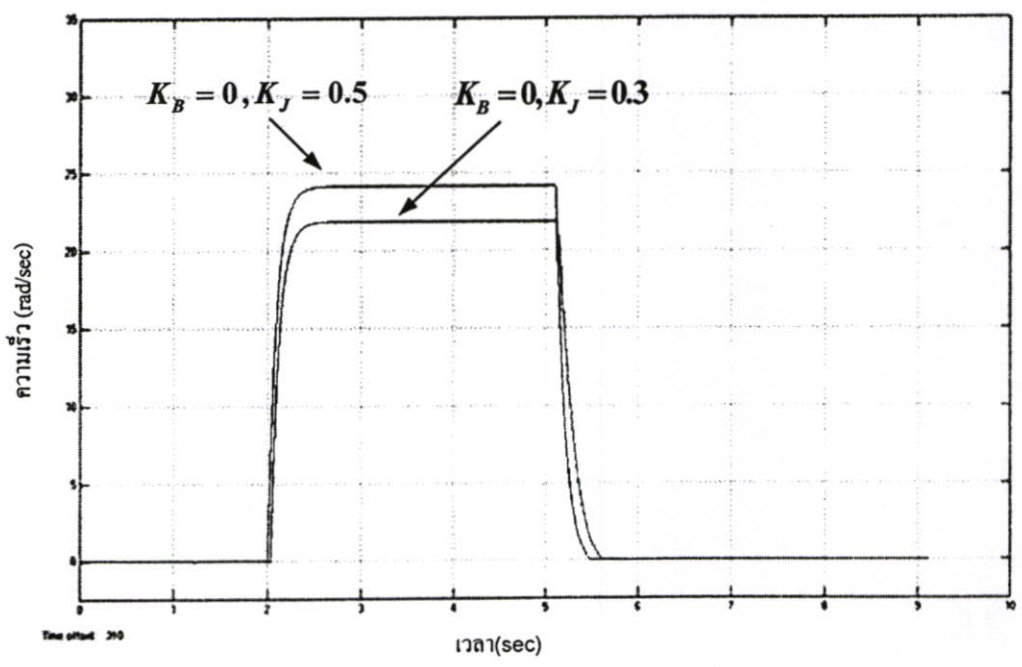
รูปที่ 5.10 กราฟขณะต่อโหลดเมื่อปรับ K_B และ $K_J = 0$ เทียบกับ $K_B = 0.3$ และ $K_J = 0.3$



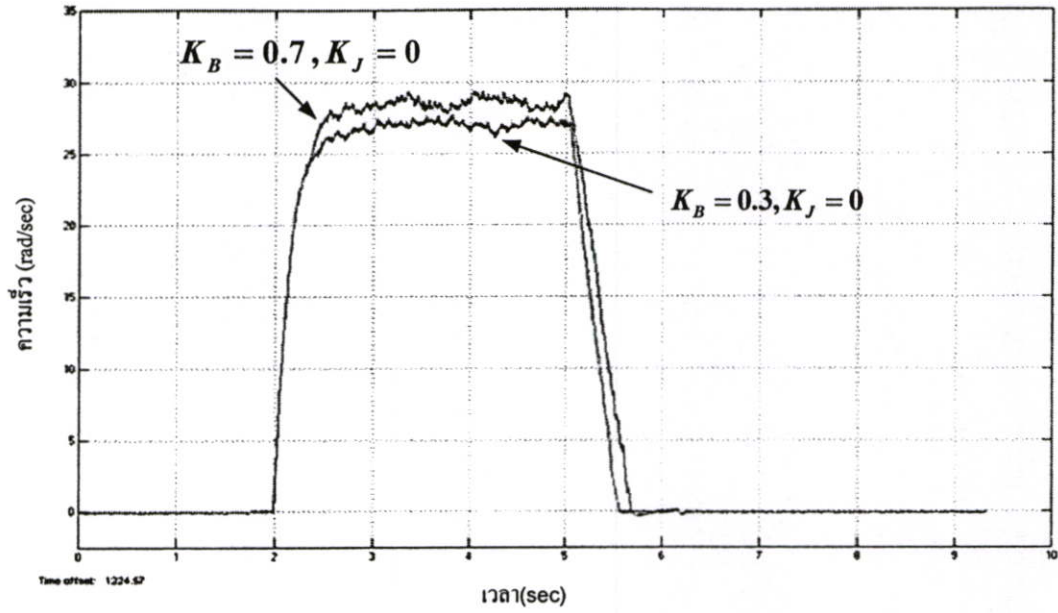
รูปที่ 5.11 กราฟจากการทดลองในโปรแกรม Matlab เมื่อปรับ K_B และ $K_J = 0$
เทียบกับ $K_B = 0.3$ และ $K_J = 0.3$



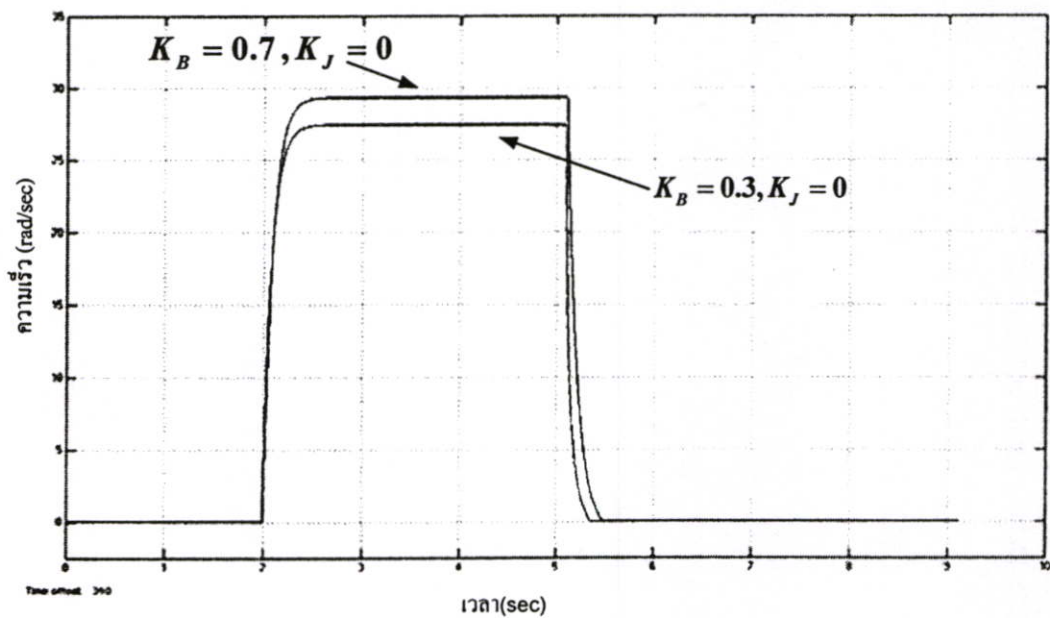
รูปที่ 5.12 กราฟขณะต่อโหลดเมื่อปรับ $K_B = 0$ และ $K_J = 0.3$ เทียบกับ $K_B = 0$ และ $K_J = 0.5$



รูปที่ 5.13 กราฟจากการทดลองในโปรแกรม Matlab เมื่อปรับ $K_B = 0$ และ $K_J = 0.3$ เทียบกับ $K_B = 0$ และ $K_J = 0.5$



รูปที่ 5.14 กราฟขณะต่อโหลดปรับค่า $K_B = 0.3$ และ $K_J = 0$ เทียบกับ $K_B = 0.7$ และ $K_J = 0$



รูปที่ 5.15 กราฟจากการทดลองในโปรแกรม Matlab เมื่อปรับ $K_B = 0.3$ และ $K_J = 0$ เทียบกับ $K_B = 0.7$ และ $K_J = 0$

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

ในบทที่ 5 ได้แสดงผล จากการปรับปรุงเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงจะเห็นได้ว่ากราฟคุณลักษณะของมอเตอร์ที่นำมาทดสอบมีผลตอบสนองเปลี่ยนแปลงตามที่ต้องการได้อย่างต่อเนื่อง จึงแสดงให้เห็นว่าการทำงานของชุดตัวขดเซซที่ได้ออกแบบไว้สามารถทำงานได้ดีเป็นที่น่าพอใจ

การปรับปรุงเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงโดยทั่วไปมิให้เลือกหลายรูปแบบ ตามคุณลักษณะของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีหลักการทำงาน เงื่อนไขในการเลือกใช้งาน โครงสร้าง และราคาที่แตกต่างกัน จึงทำให้ผู้ใช้ทั่ว ๆ ไปไม่สามารถหามาใช้งานได้ง่ายนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงคิดออกแบบไดนาโมมิเตอร์ให้มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ควบคุมการทำงานได้ง่าย สามารถใช้งานได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพและมี ราคาถูก

หลักการสำคัญของการปรับปรุงคุณลักษณะของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงคือ การควบคุมระดับของแรงดันไฟฟ้าขดเซซ ซึ่งวิธีการทั่วไปคือการเปลี่ยนอุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดแวร์เพื่อควบคุมมอเตอร์ โดยจะเห็นได้ว่าความเฉื่อยและความหนืดของมอเตอร์ขึ้นอยู่กับระดับของแรงดันในวงจรขดเซซ

หลักการที่นำมาใช้นี้ เป็น กรณีศึกษาในการนำมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมาทำเป็นโหลดทางกล ที่มีการควบคุมความเฉื่อยและความหนืดของมอเตอร์ เพื่อศึกษาถึงผลตอบสนองและคุณสมบัติทางความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ที่ทำการทดสอบ ในงานวิจัยได้เลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมาเป็นกรณีศึกษาเนื่องจาก มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน การเปลี่ยนแปลงพลังงานทางกลในส่วนของความเร็วและแรงบิดสัมพันธ์กับ พลังงานทางไฟฟ้าที่เป็นแรงดันและกระแสที่เป็นเชิงเส้นจึงทำให้การควบคุมทำได้ง่าย งานวิจัยจะควบคุมและเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของมอเตอร์ ด้วยการควบคุมค่าแรงดันของมอเตอร์ด้วยวงจรขดเซซ โดยควบคุมให้ปริมาณแรงดันที่ระดับต่างๆ ผ่านระบบควบคุมแบบลูปปิด และใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวรับคำสั่งงานจากโมเดลในคอมพิวเตอร์ส่งต่อไปยังชุดขับไคร้เพื่อขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้ปรับเปลี่ยนค่าทางกลตามที่ต้องการ

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

ผลที่ได้จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และผลที่ได้จากการทดสอบจริง สามารถนำไปใช้อธิบายพฤติกรรมทางไฟฟ้าและทางกลของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงได้ เนื่องจากไม่สามารถทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขเดียวกันทั้งหมด เพราะข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือ และ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ จึงส่งผลให้มีข้อจำกัดในการเปรียบเทียบผลการทดสอบ กับผลที่ได้จากการจำลอง แต่สามารถสรุปได้ว่า สามารถใช้ผลที่ได้จากการจำลองโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ อธิบายถึงพฤติกรรมทางไฟฟ้าและทางกลของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงได้ เนื่องจากพฤติกรรมที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลที่ได้จากการทดสอบจากไดนาโมมิเตอร์แนวทางในการพัฒนา โปรแกรมที่สร้างขึ้นยังมีการใช้งานที่ยู่ยากอยู่ในการใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลอง อีกทั้งยังไม่รวมผลอันเนื่องมาจากอุปกรณ์ ที่อาจเกิดแรงดันตกคร่อมขึ้น ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ผลการทดลองกับผลจากการจำลองการทำงานไม่ตรงกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลที่เกิดขึ้นจาก ค่ากำลังสูญเสียทางกลก็มีได้นำมาคิด จึงมีความผิดพลาดของค่าที่ได้อยู่บ้าง หากทำการปรับปรุงและเพิ่มเติมในส่วนของสมการทางคณิตศาสตร์ ให้มีความสมบูรณ์ ของแบบจำลอง ค่าที่ได้ก็จะมีความผิดพลาดน้อยลงซึ่งในกรณีที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้เป็นการนำเสนอ เพื่อใช้เป็นกรณีศึกษาเพื่อนำไปพัฒนาต่อไป

บรรณานุกรม

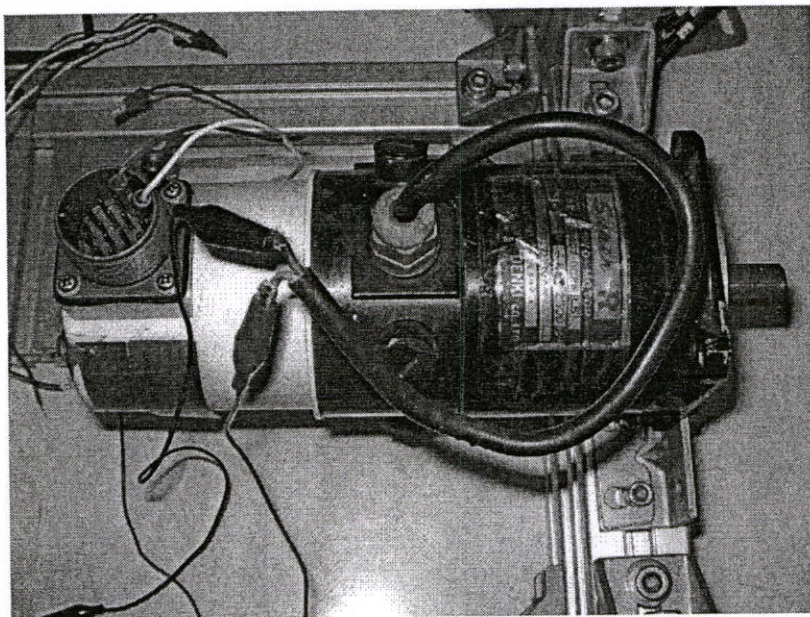
- [1] "A Technique for mechanical adjustment of DC Motor by Virtual Model" "A Technique for mechanical adjustment of DC Motor by Virtual Model" ตีพิมพ์ลงในการประชุม International Conference on Control on Control , Automation and Systems 2007 หน้า 1327 วันที่ 17-20 เดือน ตุลาคม ณ Coex ประเทศเกาหลี
- [2] Li Erping, A L Kidd and P M McEwan, "CAD Design of Current Sensitive Electromagnetic Actuators", Proceedings of 4 th int. Sym. On Short-circuit Currents in Power Systems. Liege, September 1990.
- [3] Thanin Inpradab, Sawai Pongswatd, Ruedee Masuchun, and Prapart Ukakimapurn "Simple Dynamometer for Dynamics Investigation of Induction Motor" ICCAS2005 International Conference on Control, Automatic and Systems, KINTEX, Gyeonggi-Do, Korea June 2-5, 2005.
- [4] The MathWorks Inc., SIMULINK Dynamic System Simulation for MATLAB; User's Guide Verion 2.1 , 1997.
- [5] Eelectric Machinery.5thed.Singapore, Fitzgerald Kingsley, Jr, Umans: McGraw-Hill Book Co.,1992
- [6] Alon Kuperman, Raul Rabinovici,Senior Member, IEEE "Virtual Torque and Inertia Loading of Controlled Electric Drive" IEEE Transactions on Education , Vol.48,No.1,February 2005
- [7] Engineering Mechanics of Solids (2 nd Edition) By Egor P. Popov.
- [8] Mechanics of Solid Materials by Jean Lemaitre, Jean-Louis Chaboche.
- [9] Power Eletronic ; Mohan NED , Third Edition ,John Wiley &Sons,Inc
- [10] Principles of Electric Machines and Power Electric Machines and Power Electronic, Second Edition, P.C.SEN,1997

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

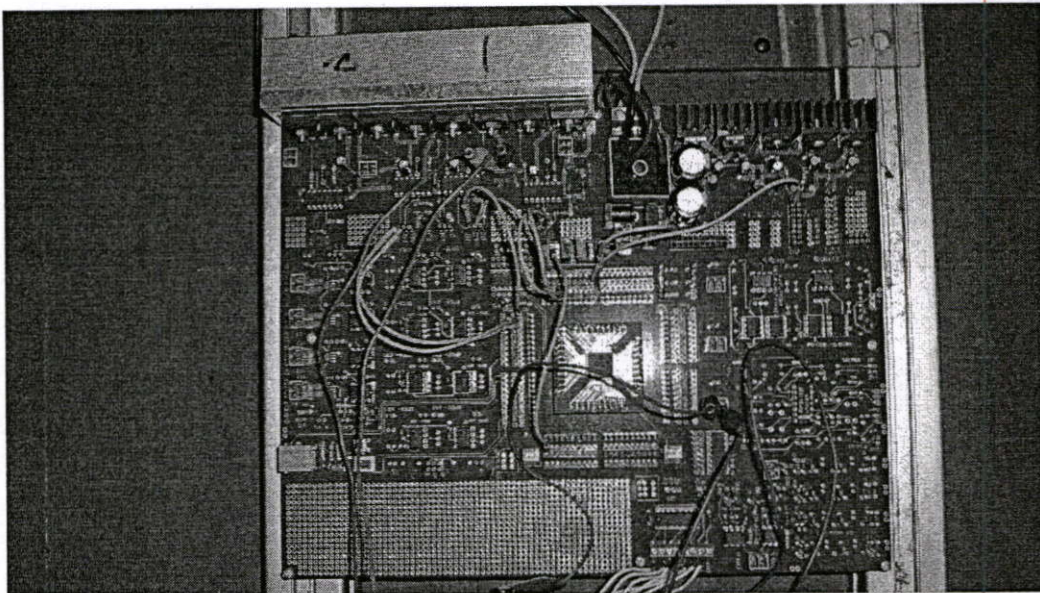
ส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่นำมาสร้างเป็นตัวจับโหลด



รูปที่ ก.1 แสดงตัวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่นำมาสร้างเป็นไดนาโมมิเตอร์

คุณลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่นำมาสร้างไดนาโมมิเตอร์

- เป็นดีซีมอเตอร์ โครงสร้างแบบแม่เหล็กถาวร
- มีแทค โคนเจนเนอเรเตอร์สำหรับวัดความเร็วรอบในตัว
- ขนาดกำลัง 400 วัตต์
- ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที



รูปที่ ก.2 แสดงส่วนชุดควบคุมดีซีมอเตอร์

ในส่วนของชุดควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงประกอบไปด้วย

- ชุดหน่วยประมวลผล dsPIC30F6010-30I/PF
- ชุดเพาเวอร์ซัพพลาย
- ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์
- ชุดขับกระแสดีซีมอเตอร์
- ชุดรับสัญญาณจากแทคโคเจนเนอร์เรเตอร์

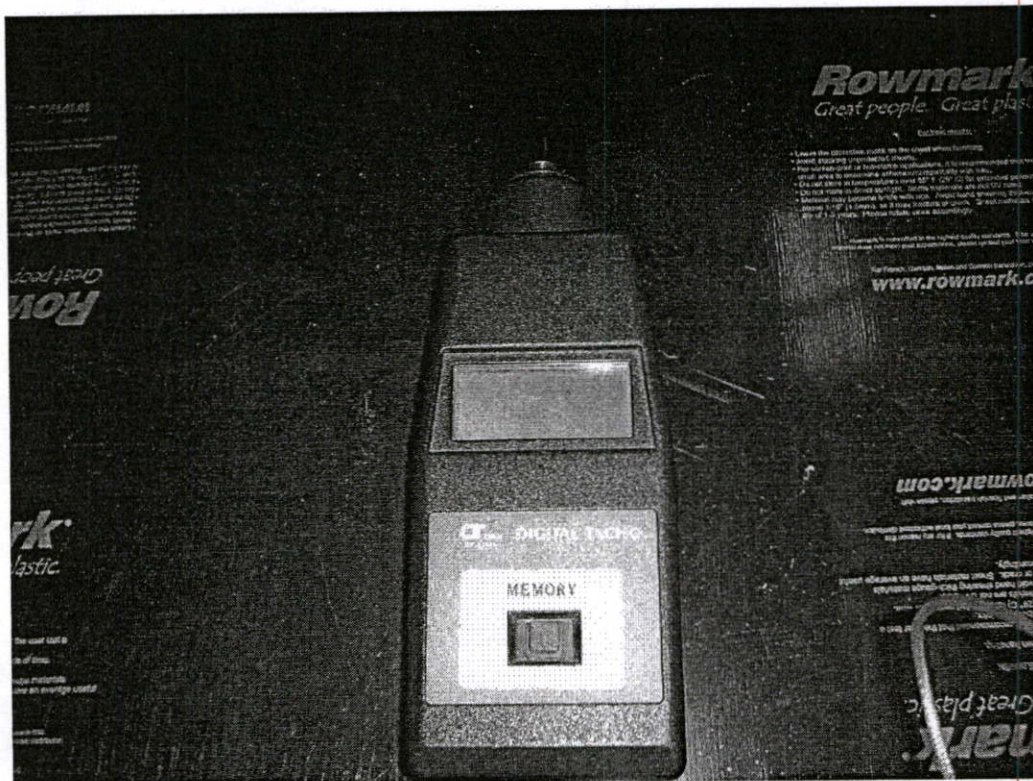


รูปที่ ก.3 แสดง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่นำมาทำเป็น โหลดทดลอง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่นำมาทดสอบ

มอเตอร์ยี่ห้อ “INDEANA GENERAL”

- ใช้แรงดัน 24 V
- ขนาดกระแส 0.8 A
- ความเร็วรอบ 950 รอบต่อนาที



รูปที่ ก.4 แสดงตัววัดความเร็วรอบ ซีห้อ “DIGITAL TACHO”

ภาคผนวก ข.

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ขณะศึกษา

- 1) “A Technique for mechanical adjustment of DC Motor by Virtual Model” ตีพิมพ์ลงในการประชุม International Conference on Control on Control , Automation and Systems 2007 หน้า 1327 วันที่ 17-20 เดือน ตุลาคม ณ Coex ประเทศเกาหลี

A Technique for mechanical adjustment of DC Motor by Virtual Model

Krit Smerpitak, Natarak Naruvorn , Sawai Pongswatd and Prapart Ukakimapurn

Department of Instrumentation Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut 's Institute of Technology
Ladkrabang Ladkrabang, Bangkok ,10520 Thailand

(Tel: 66-2-739-2406; E-mail : sakol_00@hotmail.com, klsawai@kmitl.ac.th)

Abstract: This paper presents a technique to adjust and improve mechanical responses of DC Motor. The proposed technique uses math model for simulation to observe the transience and steady state response in no-load condition. Information derived from the simulation results can be applied to compensate the mechanical loss, inertia, viscous friction by feeding electrical energy. The test results of the compensation technique in this research can adjust and improve the response of speed and torque under reasonable tests. Moreover, this technique can apply to virtual load for Dynamometer.

Keywords: Math Model , Simulation, Mechanical, Virtual, DC Motor, Dynamometer

1. INTRODUCTION

A simple dynamometer using a DC machine is the mechanical load for dynamic breaking [1]. The technique can operate and test only dynamic condition, because it uses a DC motor as a mechanical load which depends on duty cycle of switch. The technique has some problems when the under test motor is smaller than dynamometer. The mechanical loss, inertia and viscous friction are discussed in this paper. We studied and analyzed the math model of DC motor [2] in both no-load and on-load conditions. The model of DC motor is compensated by electrical energy relate the model. The PID controller is used to control and improve the initial and steady state response.

2. MODELING OF DC MOTOR

The equivalent circuit of permanent magnet DC motor can be shown in the Figure 1.

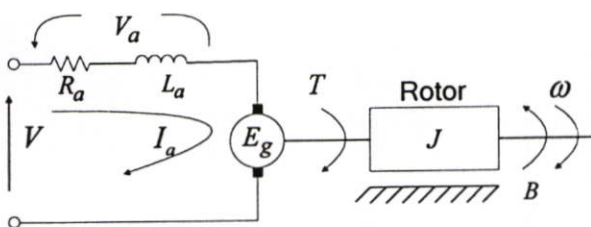


Fig. 1 Equivalent circuit of Permanent magnet DC motor.

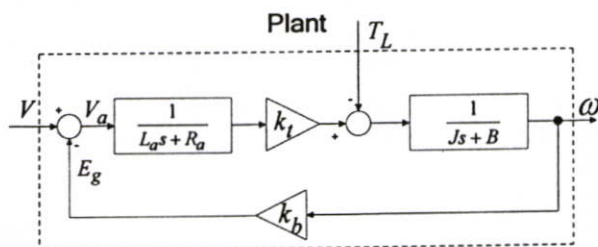


Fig. 2 Block diagram of DC motor

Block diagram of DC motor can be shown in the Figure 2 which has the transfer function as

$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{k_t}{(L_a s + R_a)(J s + B) + k_b k_t} \quad (1)$$

Where

ω is a speed of DC motor

V is a input voltage

J is a moment of inertia

B is a viscous friction

R is a resistance

L is a inductance

The electrical equation of DC motor can be written as

$$V = L_a \frac{dI_a}{dt} + R_a I_a + k_b \omega \quad (2)$$

The mechanical equation in no-load condition $T_L = 0$ can be given by

$$T_m = k_t I_a = T_J + T_B = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (3)$$

$$\therefore I_a = \frac{1}{k_t} (J \frac{d\omega}{dt} + B\omega) \quad (4)$$

When substitutes Eq. (4) into Eq. (2), resulting in

$$\begin{aligned} V &= \frac{L_a}{k_t} \frac{d}{dt} (J \frac{d\omega}{dt} + B\omega) + R_a (\frac{1}{k_t} (J \frac{d\omega}{dt} + B\omega)) + k_b \omega \\ &= \frac{L_a}{k_t} J \frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{L_a B}{k_t} \frac{d\omega}{dt} + \frac{R_a J}{k_t} \frac{d\omega}{dt} + \frac{R_a B\omega}{k_t} + k_b \omega \end{aligned} \quad (5)$$

The proposed technique uses the math model of the DC motor for compensation and adjustment the parameter J and B . From Eq. (5), if we design $B=0$, the voltage V_J to compensate and adjust the parameter J can be written.

$$V_J = \frac{L_a}{k_t} J \frac{d^2\omega}{dt} + \frac{R_a}{k_t} J \frac{d\omega}{dt} \quad (6)$$

If $J = 0$, the voltage V_B to compensate and adjust the parameter B is equal to Eq.(7).

$$V_B = \frac{L_a B}{k_t} \frac{d\omega}{dt} + \frac{R_a B \omega}{k_t} \quad (7)$$

3. DESIGN OF THE SYSTEM

Block diagrams of the proposed technique can be shown in the Figures 3 and 4.

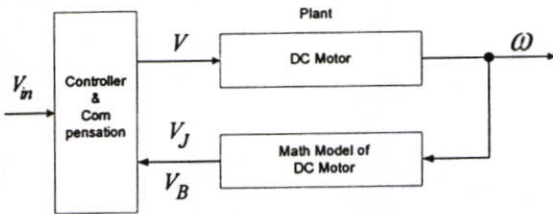


Fig. 3 Block diagram of the system

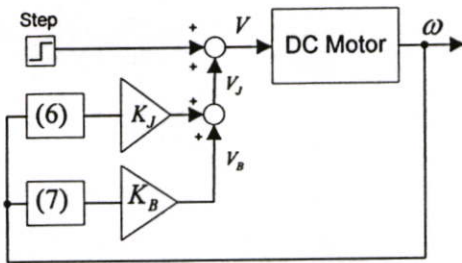


Fig. 4 Block diagram of compensation J and B

Figure 3 and 4 show block diagram of the system, which is compensated moment of inertia and viscous friction by electrical energy. The math model and block diagram for simulation can be written by the Figure 5.

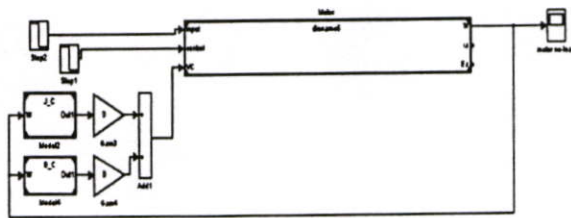


Fig. 5 Simulation block diagram for compensation

Figure 6 shows block diagram for simulation which compensates J and B of the DC motor. The

block diagram compares between not compensate system and compensate system which adjust feedback gain.

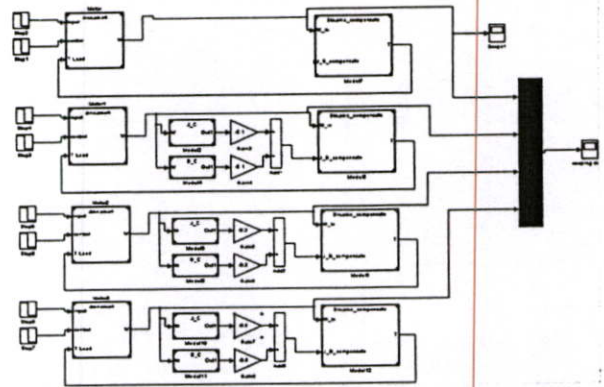


Fig. 6 Block diagram for comparison

4. EXPERIMENTAL RESULTS

The experimental results perform on simulation by Matlab for moment inertia and viscous friction compensation to improve the transience and steady state speed responses.

4.1 The compensation of moment inertia

The system has 2 model of DC motor, the above model is not compensates but the other compensates moment of inertia. The test results show speed response when feedback gain $K_J = 0.3$ and $K_J = 0.5$ respectively.

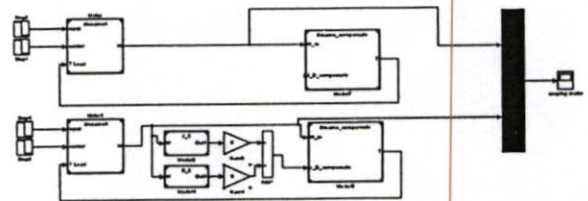


Fig. 7 Block diagram for compensation the moment of inertia

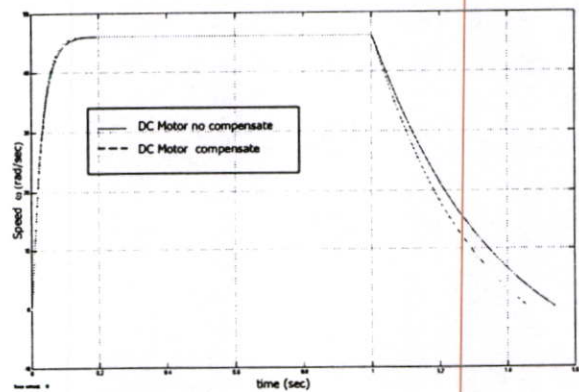


Fig. 8 Speed responses of DC motor when $K_J = 0.3$

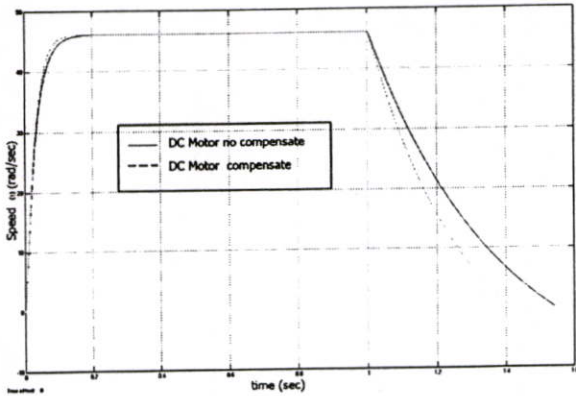


Fig. 9 Speed responses of DC motor when $K_J = 0.5$

Figure 8 shows the speed responses of DC motor, where the dash line represents the response without compensation and solid line is the compensated result $K_J = 0.3$. Figure 9 shows the speed responses when compensation $K_J = 0.5$. Figure 8 and 9 show the speed response that inertia compensation can improve and adjust the transient speed response.

4.2 The compensation of viscous friction

This system performs by adjust the feedback gain which concern to viscous friction of DC motor. The experiment results show 2 feedback gains $K_B = 0.3$ and $K_B = 0.5$ respectively.

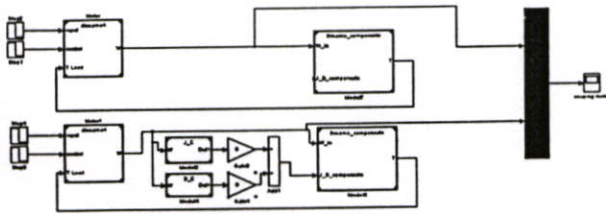


Fig. 10 Block diagram for compensation the viscous friction

The experiments show the speed responses which compensate the viscous friction by 2 feedback gains $K_B = 0.3$ and $K_B = 0.5$ respectively.

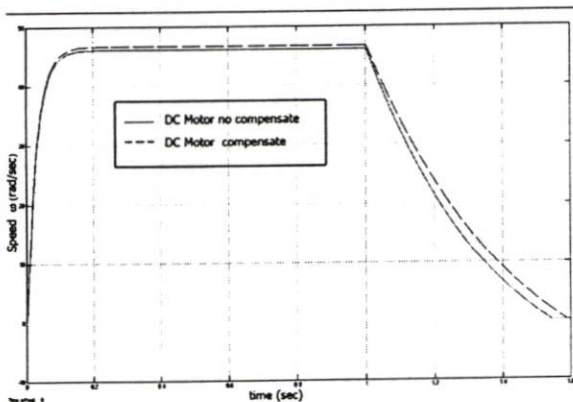


Fig. 11 Speed responses of DC motor when $K_B = 0.3$

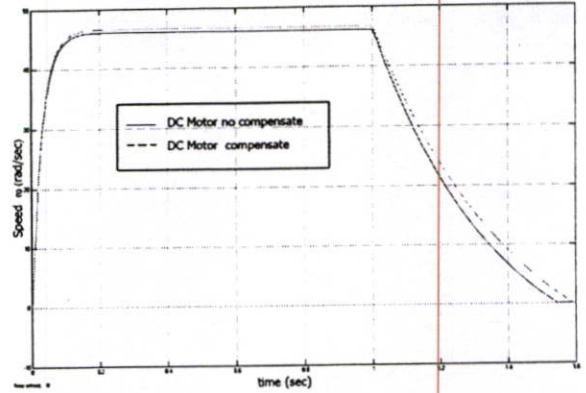


Fig. 12 Speed responses of DC motor when $K_B = 0.5$

Figure 11 and 12 show the speed response of DC motor that is compensated the viscous friction. The test results show the difference speed at steady state. The compensation system can adjust the steady state speed response and has the maximum speed higher than not compensation system.

4.3 The compensation of moment inertia and viscous friction

The system in Figure 13 has 2 model of DC motor, the above model is not compensates but the other compensates moment of inertia and viscous friction. The test results show speed response when feedback gain $K_J = K_B = 0.3$ and $K_J = K_B = 0.5$ respectively.

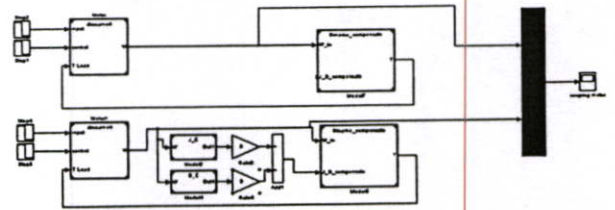


Fig. 13 Block diagram for compensation the moment of inertia and viscous friction

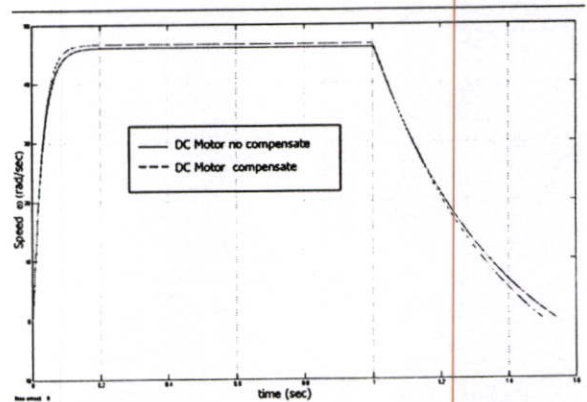


Fig. 14 Speed responses of DC motor when $K_J = K_B = 0.3$

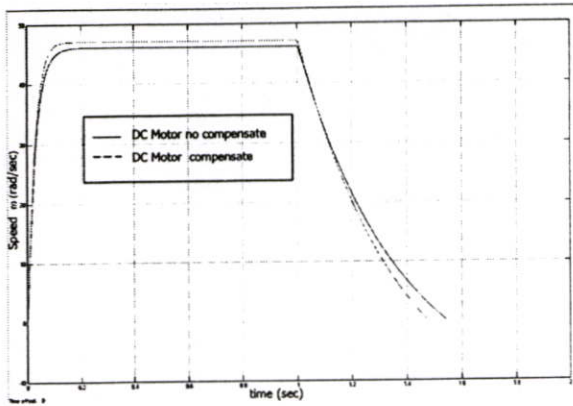


Fig. 15 Speed responses of DC motor $K_J = K_B = 0.5$

The compensation of moment inertia and viscous friction by electrical energy can adjust and improve the speed response. However, the feedback gain is a important for good transience and steady state speed response.

5. CONCLUSION

The technique of this research can adjust and improve speed responses of DC motor. The test results show the good transience and steady state speed response when DC motor is compensated. The technique can apply to Dynamometer which control and adjust the mechanical load by electrical energy.

Motor Parameter
SANYO DENKI CO., TYPE R 840T-002W

Feature	Value
Power	400W
Max. Input Voltage	75 V
Max. Current	6.6 A
Max. Speed	2,500 RPM
Moment of Inertia (J)	0.00018532 kg.m ²
Friction Coefficient (B)	0.00318 Nm.s/rad
Armature Inductance (L_a)	0.005 mH
Armature Resistance (R_a)	1.66 Ω
Voltage Constant (k_b)	0.29098 V.s/rad
Torque Constant (k_t)	0.04 Nm/A

ACKNOWLEDGMENT

I would like to thank all staffs at Department of Instrumentation Engineering, Faculty of Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

REFERENCES

- [1] Thanin Inpradab, Sawai Pongswatd, Ruedee Masuchun, and Prapart Ukakimapurn "Simple Dynamometer for Dynamics Investigation of Induction Motor" ICCAS2005 International Conference on Control, Automatic and Systems, KINTEX, Gyeonggi-Do, Korea June 2-5, 2005.
- [2] Alon Kuperman, Raul Rabinovici, Senior Member, IEEE "Virtual Torque and Inertia Loading of Controlled Electric Drive" IEEE Transactions on Education, Vol.48, No.1, February 2005
- [3] The MathWorks Inc., SIMULINK Dynamic System Simulation for MATLAB; User's Guide Verion 2.1, 1997.

- [4] Principles of Electric Machines and Power Electric Machines and Power Electronic, Second Edition, P.C.SEN, 1997
- [5] Eelectric Machinery. 5thed. Singapore, Fitzgerald Kingsley, Jr, Umans: McGraw-Hill Book Co., 1992

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นาย อนุรักษ์ นฤพร
วัน เดือน ปีเกิด 14 กรกฎาคม 2518 ที่จังหวัดพะเยา
ที่อยู่ 977/22 หมู่12 ซ.บัวเกิด2 ถนนบางนา-ตราด พระโขนง กรุงเทพฯ
10260 โทร 081-8300-165
ประวัติการศึกษา 2543 อดิศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ องครักษ์

ประวัติการทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ.2542-2545 วิศวกร บริษัท คิงส์เอ็นเนอจี จำกัด
พ.ศ.2545-2546 วิศวกร ฝ่ายขาย บริษัท เค แอน พี เอฟ เอ เซ็นเตอร์ จำกัด
พ.ศ.2546-ปัจจุบัน หัวหน้าแผนก วิศวกรฝ่าย ซ่อม อิเล็กทรอนิกส์
บริษัท ริกเคอร์มานันด์(ไทยแลนด์)จำกัด
พ.ศ.2550 นำเสนอผลงานวิจัยเรื่อง A TECHNIQUE FOR MECHANICAL
ADJUSTMENT OF DC MOTOR BY VIRTUAL MODEL , ของงาน
ICCAS 2007 ที่ประเทศเกาหลี