



ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงโหลดทางกล
ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน
STUDY EFFECT OF VARYING MECHANICAL LOAD
ON BRUSHLESS DC MOTOR



นางสาวกมลวรรณ วงศ์วุฒิ รหัส 50383820

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... ๙ มี.ค. 2555
เลขทะเบียน..... 15753466
เลขเรียกหนังสือ..... ผ.ร.
..... ก137๗

2553

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ปีการศึกษา 2553

ชื่อหัวข้อโครงการ ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงโหลดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้า
แบบไร้แปรงถ่าน

ผู้ดำเนินโครงการ นางสาวกมลวรรณ วงศ์วุฒิ รหัส 50383820

ที่ปรึกษาโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพร เรืองสินชัยวานิช

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา 2553

.....

บทคัดย่อ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านหรือเรียกสั้นๆ ว่า “บัสเลส” เริ่มได้รับความนิยมมากจากแวดวงอุตสาหกรรม เพราะในปัจจุบันเป็นยุคของความเร็ว ดินค้ามีการแข่งขันสูงและยังต้องการความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น มอเตอร์ชนิดนี้มีโรเตอร์(Rotor) ซึ่งเป็นแม่เหล็กถาวร ไม่มีขดลวดพัน ไม่มีคอมมิวเตเตอร์(Commutator) และไม่มีแปรงถ่าน (Brushless) ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์สูงขึ้น เนื่องจากไม่มีการสูญเสียในขดลวดทองแดง ไม่ต้องมีการบำรุงรักษาเพราะไม่มีแปรงถ่าน ไม่ทำให้เกิดประกายไฟเพราะไม่มีการเรียงกระแสจากแปรงถ่านผ่านคอมมิวเตเตอร์(Commutator) ไปยังขดลวดทองแดงที่พันอยู่ในตัวโรเตอร์(Rotor) นอกจากนี้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านยังสามารถรับแรงบิดที่ต้องการถึงแม้จะมีความเร็วรอบต่ำก็ตาม โครงการนี้จึงตั้งเห็นว่า มอเตอร์ชนิดนี้นับว่าเป็นมอเตอร์ที่มีความน่าสนใจอย่างยิ่งที่จะนำมาทำเป็นกรณีศึกษา โดยเฉพาะศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงโหลดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

Project title Study Effect of Varying Mechanical Load on Brushless DC Motor
Name Miss. Kamonwan Wongwut ID. 50383820
Project advisor Assistant Professor Mr.Somporn Ruengsinchaiwanich, Ph.D.
Major Electrical Engineering
Department Electrical and Computer Engineering
Academic year 2010

.....

Abstract

Brushless Direct Current motor or “Brushless” has begun to get more popular in industry. Because this is the era of Speed, there is more competitive products in the market and required greater accuracy . This motor has rotor, which is a permanent magnet, with no coil, no commutator and brushless; that give a higher efficiency of the motor. Since there is no loss in the copper coil, no maintenance of the brush, no sparkles because there is no rectifier from the brush pass commutator to the copper coil that wrap around in the rotor. Furthermore, the Brushless DC could also receive the required torque even with the low speed. This project has recognized that this Brushless DC motor is a very interesting type of motor that is to be made as a case study, especially the study of the effect of varying mechanical load on brushless DC motor.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนโครงการขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพร เรืองสินชัยวานิช ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการและขอกราบขอบพระคุณอาจารย์คณะกรรมการทุกท่าน ที่ได้คอยชี้แนะแนวทางตลอดการทำโครงการ นอกจากนี้ยังขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ยืมใช้อุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่างๆ อันประโยชน์ต่อการดำเนินโครงการอย่างยิ่ง

นอกจากนี้คณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้กับผู้เขียนโครงการ ทางผู้เขียนโครงการขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาอย่างหาที่เปรียบมิได้ที่ให้ความรัก ความหวังดี กำลังใจ และคอยสนับสนุนในทุก ๆ ด้านตลอดมา

นางสาวกมลวรรณ วงศ์วุฒิ



สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 แนวทางการดำเนินโครงการ.....	1
1.4 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 แผนการดำเนินงาน.....	2
1.7 งบประมาณ.....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น.....	4
2.1 โครงสร้างและคุณลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน.....	4
2.1.1 Rectangular Commutation หรือ Hall-Effect Commutation.....	5
2.1.2 Sinusoidal Commutation.....	8
2.1.3 Proportional + Integral (PI) Current Loop.....	9
2.2 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน.....	10
2.3 มอสเฟต (MOSFET)	14
2.3.1 คีมอสเฟตแบบแซนแนลเอ็น(N).....	15
2.3.2 การทำงานและคุณสมบัติเบื้องต้น (Basic Operation and Characteristics).....	16
2.4 ประเภทของการควบคุม.....	17
2.5 อุปกรณ์ป้องกัน.....	20

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.5.1	หน้าที่ของเอนโค้ดเดอร์ (encoder).....	20
2.5.2	ชนิดของเอนโค้ดเดอร์ (encoder).....	20
2.6	การเปรียบเทียบมอเตอร์ประเภทต่างๆ.....	24
บทที่ 3	วิธีการดำเนินโครงการ.....	25
3.1	อุปกรณ์การทดลอง.....	25
3.2	รูปแบบโครงการ.....	28
3.3	ขั้นตอนการใช้โปรแกรม STARTER ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์.....	28
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล.....	43
4.1	ผลการทดลองในสถานะมีโหลด (Load).....	36
4.2	ผลการทดลองในสถานะไม่มีโหลด (No Load).....	38
4.3	ตัวอย่างสัญญาณแรงดันที่วัดได้.....	39
4.4	วิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง.....	40
4.4.1	ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของแรงบิดในสถานะมีโหลดกับไม่มีโหลด.....	40
4.4.2	ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของกระแสในสถานะมีโหลดกับไม่มีโหลด.....	41
4.4.3	ผลการทดลองเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโหลดที่ปรับได้เป็น(N-m)กับโหลดที่ปรับได้สูงสุดเป็น(%)ในแต่ละความเร็วรอบ.....	42
4.4.4	ผลการทดลองเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับโหลดที่ปรับได้สูงสุดในแต่ละความเร็วรอบ.....	43
4.4.5	ผลการทดลองเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับโหลดที่ปรับได้สูงสุดในแต่ละความเร็วรอบ.....	44
4.4.6	ผลการทดลองเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ.....	45
4.4.7	ผลการทดลองเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความเร็วรอบ.....	46
4.4.8	ผลการทดลองเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับความเร็วรอบ.....	47

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 บทสรุป.....	48
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	48
5.2 ปัญหาในการทำงานและแนวทางแก้ไข.....	48
5.3 ประเมินผล.....	48
เอกสารอ้างอิง.....	49
ภาคผนวก ก รายละเอียดของชุด Drive และมอเตอร์ Brushless.....	50
ภาคผนวก ข ข้อมูลจากการทดลอง.....	55
ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....	68



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน(AB-AC-BC-BA-CA-CB) ..13	
2.2 แสดงการเปรียบเทียบคุณลักษณะของมอเตอร์ประเภทต่างๆ.....24	



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ภาพหน้าตัดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน 3 เฟส 4 ขั้ว4
2.2	ขบวนการ Rectangular Commutation หรือ Hall-Effect Commutation.....5
2.3	แผนผังเชิงตัวแปรทางเวลาแสดงการหมุนของโรเตอร์ (Rotor).....6
2.4	วงจรควบคุมแบบ PI สำหรับ 2 ใน 3 เฟสของมอเตอร์ เมื่อต่อแบบสตาร์(Star).....9
2.5	ไดอะแกรมการทำงานของมอเตอร์แบบ BLDC..... 11
2.6	แผนผังของขดลวด , เซ็นเซอร์ เทียบกับเวลา..... 12
2.7	วงจรมอสเฟตทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ในการควบคุมลำดับการปิดเปิดสวิตช์ทั้ง 6 ตัว.....13
2.8	บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมเซนเซอร์เลส(Sensorless).....14
2.9	มอสเฟตแบบเอ็น(N) แชนแนลและสัญลักษณ์..... 15
2.10	โครงสร้างคีมอสเฟตแชนแนลเอ็น(N)..... 15
2.11	การทำงานของมอสเฟตแบบเอ็น(N) แชนแนล..... 16
2.12	แสดงคุณลักษณะการทำงานของมอสเฟตเอ็น(N) แชนแนล..... 17
2.13	ระบบควบคุมแบบเปิด(Open loop)..... 18
2.14	ระบบควบคุมแบบปิด(Close loop)..... 18
2.15	การคิดเทค โนมิเตอร์(Tachometer) เข้ากับระบบ.....21
2.16	Absolute Encoder..... 22
2.17	คิสมอง Incremental Encoder..... 23
3.1	ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน.....25
3.2	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง..... 25
3.3	พูลเลย์..... 26
3.4	สายพาน..... 26
3.5	เครื่องจ่ายไฟ (Supply) 26
3.6	คอมพิวเตอร์..... 27
3.7	เชื่อมต่อโหลดเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน..... 27
3.8	รูปแบบโครงงาน..... 28
4.1	เปรียบเทียบความแตกต่างของแรงบิดในสภาวะมีโหลดกับไม่มีโหลด..... 40
4.2	เปรียบเทียบความแตกต่างของกระแสในสภาวะมีโหลดกับไม่มีโหลด..... 41
4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการปรับ โหลด..... 42

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับโหลดที่ปรับได้สูงสุดในแต่ละความเร็วรอบ...43
4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับโหลดที่ปรับได้สูงสุดในแต่ละความเร็วรอบ...44
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ.....45
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความเร็วรอบ.....46
4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับความเร็วรอบ.....47



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

เป็นที่รู้กันโดยทั่วไปว่ามอเตอร์เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในงานต่างๆ การเลือกใช้มอเตอร์ให้เหมาะสมกับงานนับว่าเป็นเรื่องสำคัญยิ่ง แต่ที่สำคัญกว่านั้นก็คือการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพ ไม่ว่าจะเป็นการควบคุมตำแหน่งหรือการควบคุมความเร็วก็ตาม แต่การทราบคุณลักษณะของโหลดมีความสำคัญต่อการออกแบบระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถใช้ศึกษาพฤติกรรมของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าได้และยังสามารถนำมาศึกษาหาคุณสมบัติของมอเตอร์ได้อีกด้วย ดังนั้น โครงการนี้จึงเป็นการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงโหลดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ต้องการศึกษผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงโหลดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor)
2. ต้องการทราบว่า เมื่อมีการเพิ่มโหลดทางกลเข้าไป จะส่งผลให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างไร
3. เพื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงโหลดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor)

1.3 แนวทางการดำเนินโครงการ

1. หาข้อมูลและทำการศึกษาชุดอุปกรณ์ทดสอบโหลดทางกลในส่วนที่จะนำมาทำโครงการนี้
2. ศึกษาคุณสมบัติและคุณลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor)
3. ทำการต่อชุดอุปกรณ์ทดสอบโหลดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor)
4. ทำการทดสอบโหลดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor)

1.7 งบประมาณ

ค่าจัดทำรายงาน	1,000 บาท
รวมเป็นเงินทั้งสิ้น	<u>1,000</u> บาท (หนึ่งพันบาทถ้วน)

หมายเหตุ ขออนุมัติด้วยเฉลี่ยทุกรายการ

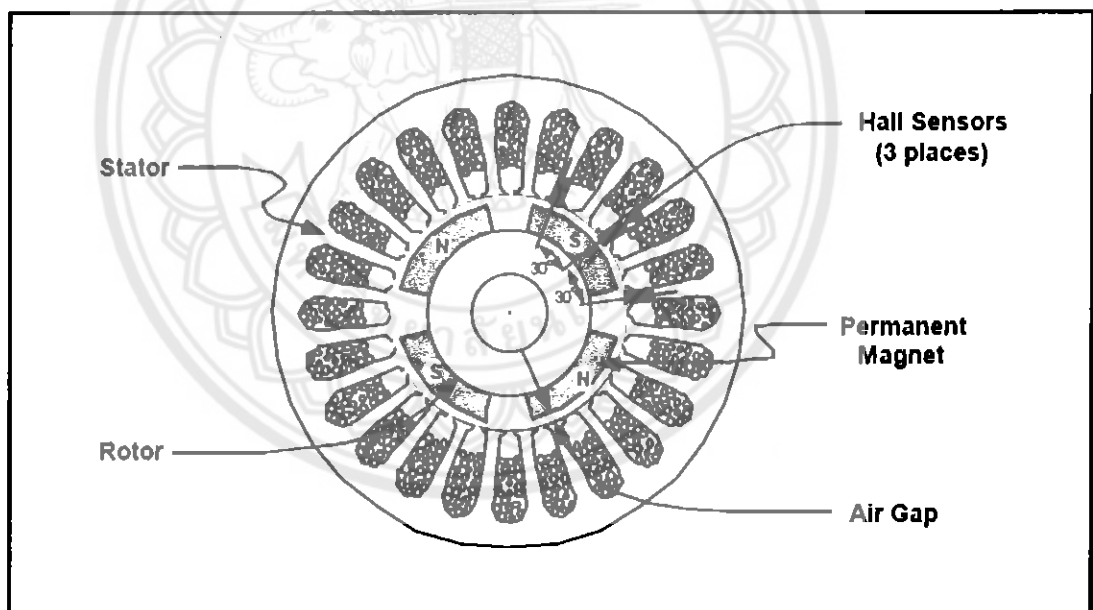


บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

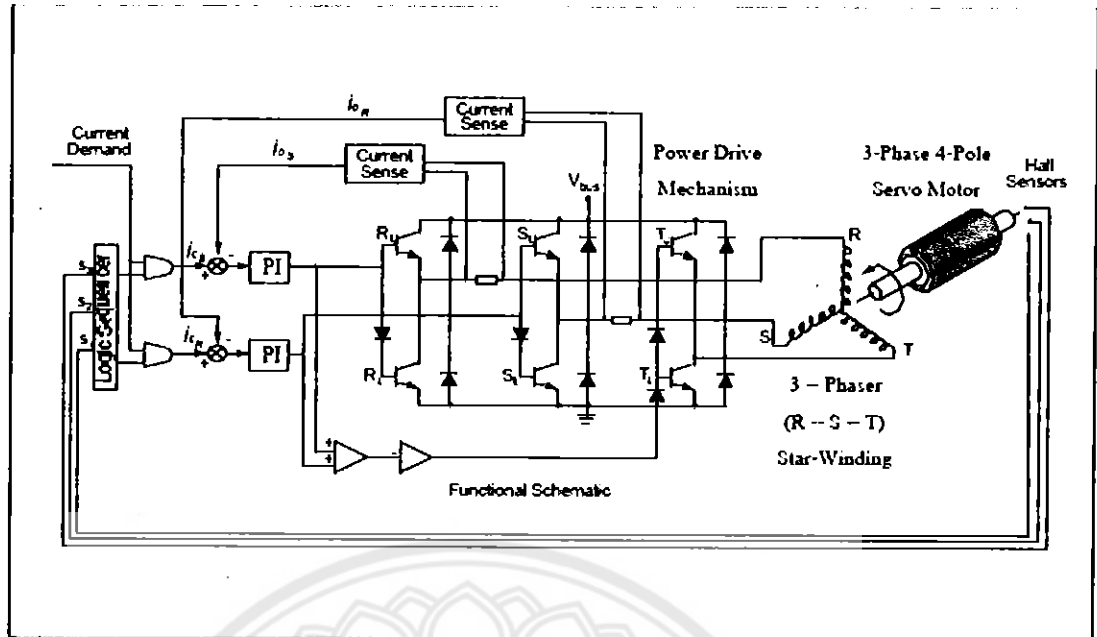
2.1 โครงสร้างและคุณลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

รูปที่ 2.1 แสดงภาพหน้าตัด (Cross-Section) ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor , BLDC Motor) ซึ่งประกอบไปด้วย ขดลวดที่พันอยู่ที่ขั้วของสเตเตอร์ (Stator) และมีช่องอากาศ (Air Gap) ระหว่างสเตเตอร์ (Stator) กับแกนโรเตอร์ (Rotor Core) โดยที่แกนโรเตอร์ (Rotor Core) จะมีแท่งแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnets) จำนวน 4 ชุด ซึ่งการติดตั้งแท่งแม่เหล็กถาวร ทั้ง 4 ชุด ไว้ตามวงรอบโรเตอร์ (Rotor) จะวางให้ขั้วเหนือ (N) และขั้วใต้ (S) สลับกันไปตามวงรอบดังแสดงในรูปที่ 1 กล่าวคือ แม่เหล็กถาวรขั้วเหนือจะอยู่ในตำแหน่งที่ตรงกันข้ามกับขั้วเหนือตลอดเวลา และเช่นเดียวกันสำหรับแม่เหล็กถาวรขั้วใต้จะอยู่ในตำแหน่งที่ตรงกันข้ามกับขั้วใต้เสมอ



รูปที่ 2.1 ภาพหน้าตัดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน 3 เฟส 4 ขั้ว [1]

ส่วนเฟสซึ่งเป็นขดที่ติดตั้งและฝังตามวงรอบของสเตเตอร์ (Stator) นั้น จะมีทั้งสิ้น 24 ขด หรือ 8 ขด ต่อ 1 เฟส หรือ 6 ขด ต่อ 1 ขั้ว โดยมีคุณลักษณะเด่นในการระบายความร้อนที่ดี เมื่อเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน (D.C.Brushed Motors) หรือมอเตอร์ประเภทอื่นๆ



รูปที่ 2.2 ขบวนการ Rectangular Commutation หรือ Hall-Effect Commutation [1]

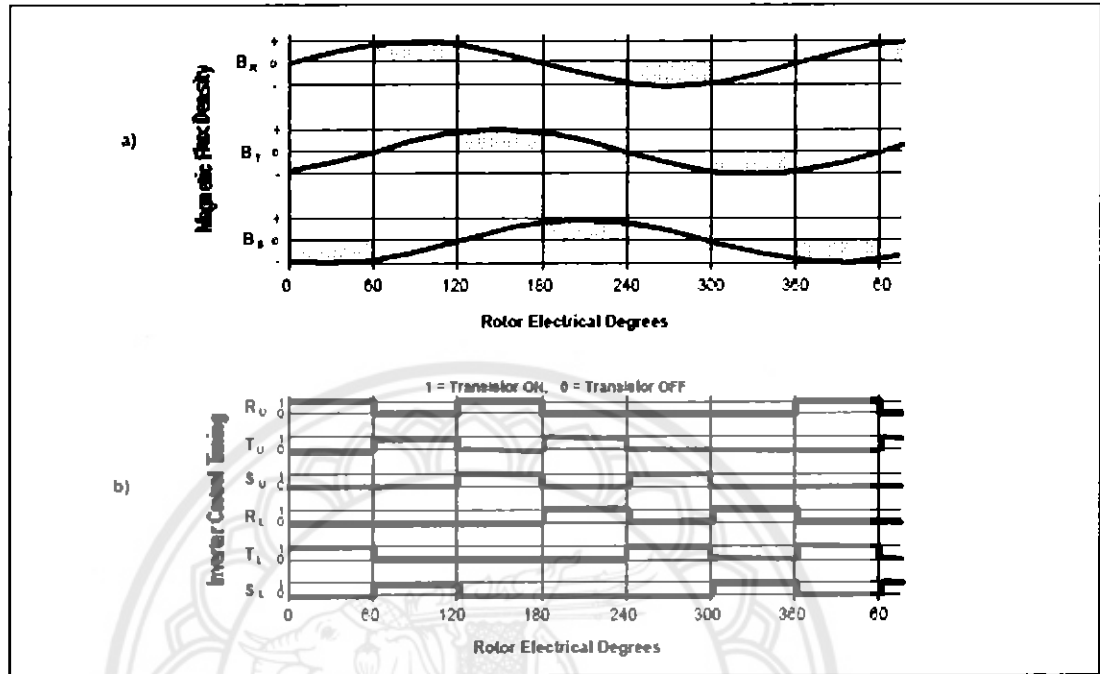
สำหรับมอเตอร์หมุนต่อเนื่อง (Continuously Rotating Motors) หากจะต้องกำเนิดค่าทางแรงบิด หรือทอร์ก นั้น กระแสหมุนเวียนจะต้องได้รับการสับเปลี่ยนต่อเนื่องหลายครั้ง ขึ้นอยู่กับตำแหน่งเชิงมุมสมบูรณ์ (Absolute Angular Position) ของโรเตอร์ (Rotor) และเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน (D.C.Brushed Motors) ซึ่งแปรงถ่านจะทำหน้าที่เป็น Mechanical Commutators ส่วนกรณีของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) นั้น จะต้องมีการประยุกต์ใช้อุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ (Rotor Positioning Sensor) เพื่อตรวจจับตำแหน่งเชิงมุม (Angularity) และขบวนการคอมมิวเตชัน (Commutation) จะถูกกระทำการแบบอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถจำแนกวิธีการอิเล็กทรอนิกส์คอมมิวเตชัน (Electronic Commutation) นี้ ได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ ด้วยกัน คือ

- 1) เร็คแทนกูล่า คอมมิวเตชัน (Rectangular Commutation)
- 2) ไซน์นูซอยคอต คอมมิวเตชัน (Sinusoidal Commutation)

2.1.1 เร็คแทนกูล่าคอมมิวเตชัน (Rectangular Commutation)

จากรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 นั้น อุปกรณ์ที่ใช้บอกตำแหน่งของมอเตอร์ (Hall-Effect Sensors) จำนวน 3 ตัว ถูกติดตั้งไว้ในสเตเตอร์ (Stator) โดยทำมุม 30° ระหว่าง 1 คู่ของอุปกรณ์ที่ใช้บอกตำแหน่งของมอเตอร์ (Hall-Effect Sensors) และเมื่อมีการหมุนของโรเตอร์ (Rotor) สนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) ที่ถูกตรวจจับนั้น จะสลับไป-มาตลอดเวลา (Switching Sequence) ระหว่างแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnets) ขั้วเหนือ-ใต้ที่ใกล้กัน เพราะฉะนั้น การสลับไป-มา

ตลอดเวลา(Switching Sequence) ดังที่กล่าวมา จะถูกนำไปใช้ในขบวนการนำทิศทางกระแสไฟฟ้าในมอเตอร์ไปสู่ขดลวดที่เฟสต่างๆ อย่างมีแบบแผนดังแสดงในรูปที่ 2.3a และ 2.3b



รูปที่ 2.3 แผนผังเชิงตัวแปรทางเวลาแสดงการหมุนของโรเตอร์(Rotor) [1]

นอกเหนือจากนี้ วงจรอิเล็กทรอนิกส์เชิงตรรกะ(Electronic Logic Circuits) จะทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณควบคุมขบวนการไทม์มิ่ง(Timing) และสวิตซิ่ง(Switching) ของรูปที่ 2.3a และ 2.3b กล่าวคือ ในกรณีของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน(Brushless DC Motor) ชนิด 4 ขั้ว (4-Poles) นั้น วงจรอิเล็กทรอนิกส์เชิงตรรกะ(Electronic Logic Circuits) จะสั่งการทำงานในวงจรเป็นจำนวน 6 สเตป(Steps) ต่อวงจรทางไฟฟ้า(Electrical Cycle) หรือ 12 สเตป(Steps) ต่อวงจรทางกล(Mechanical Cycle)

ส่วนวงจรขบวนการควบคุมกระแสไฟฟ้าป้อนกลับนั้น จะถูกกระทำผ่านอนาล็อกพีไอ(Analogue PI) ที่มีค่าความกว้างหรือช่วงขนาดของข้อมูล(Bandwidth) สูง และจะสร้างลูป(Loops) สำหรับเพียง 2 เฟส(2-Phases) จากทั้งหมด 3 เฟส(3-Phases) ก็จะเป็นการพอเพียงต่อการทำงานที่มีการตอบสนองอย่างทันท่วงทีโดยไม่มีปัญหาใดๆหรืออีกนัยหนึ่ง ค่ากระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสที่พันขดจะมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงค่ากระแสไฟฟ้าสั่งการ(Commanded Current หรือ Current Demand) มากที่สุดอย่างรวดเร็วในทันทีทันใด

เหตุผลที่ขดลวดที่พันแต่ละเฟสอีกหนึ่งเฟส(Phase) ที่เหลือไม่มีความจำเป็นจะต้องใช้อนาล็อกพีไอ(Analogue PI) ที่มีค่าความกว้างหรือช่วงขนาดของข้อมูลสูง เพื่อรองรับวงจรขบวนการควบคุมกระแสไฟฟ้าป้อนกลับนั้น เพราะว่าค่ากระแสไฟฟ้าของเฟส(Phase) ที่เหลือนี้ จะ

มีขนาดเท่ากับผลรวมของกระแสไฟฟ้าใน 2 เฟส (2-Phases) ที่ผ่านวงรอบกระแสไฟฟ้าป้อนกลับรวมกัน แต่จะมีทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า(Polarity) เป็นลบ ยกตัวอย่างเช่น กรณีของอาร์-เอส-ที ไตร-เฟสซึ่ง แม็กนิจูด(R-S-T Tri-Phasing Magnitude) ของ $I_r = |I_r| + |I_s|$ โพลาริตี(Polarity) ของ I_r จะมีทิศทางตรงกันข้าม เป็นต้น

จากการที่อนาล็อก พีไอ(Analogue PI) มีคุณสมบัติเด่นประการหนึ่งคือ มีค่าความกว้างหรือช่วงขนาดของข้อมูลสูงนั้น จะส่งผลให้เกิดการเทียบเท่า(Matching) ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าสั่งการทำงาน(Commanded Current ซึ่งส่งผลถึงค่าแรงบิดหรือ Torque) กับค่ากระแสไฟฟ้าจริงๆของ ขดลวดแต่ละเฟส (Actual Phase Current)

ยกตัวอย่าง กรณีของเฟสอาร์(Phase R)ที่ 60 องศาทางไฟฟ้า(Interval $30 \leq \theta \leq 90$) สามารถแสดงสมการคณิตศาสตร์ ค่าแรงบิด(Torque) จากเฟสอาร์(Phase R) ได้ดังนี้

$$T_R = K_r I_r \sin(\theta) \quad (2.1)$$

$$I_r = -I_T \quad (\text{ที่ } I_s = 0)$$

$$K_r = Z B_p r l$$

โดยที่ K_r คือ ค่าแรงบิดคงที่ต่อเฟส (Torque Constant per Phase)

Z คือ จำนวนรอบของขดลวดที่พันในแต่ละเฟสเป็นเลขจำนวนเต็ม

B_p คือ ความหนาแน่นฟลักซ์ในช่องอากาศ มีหน่วยเป็นเทสลา(Teslas)

r คือ รัศมีวงรอบในของสเตเตอร์(Stator) มีหน่วยเป็นเมตร

l คือ ความยาวของลวดตัวนำ(Conductor) มีหน่วยเป็นเมตร

ในกรณีของ Sinusoidally Wound Motor เมื่อต้องการค่าแรงบิดเป็นบวกนั้น ค่าความหนาแน่นฟลักซ์ที่เฟสที(Phase T) จะต้องเป็นลบ กล่าวคือ

$$\begin{aligned} T_T &= K_r I_r \sin(\theta + 240) \\ &= K_r I_r [0.5\sin(\theta) + 0.886\cos(\theta)] \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\text{กรณีที่ } 0 \leq \theta \leq 60$$

และในช่วง $0 \leq \theta \leq 60$ นี้ ค่าแรงบิดสัมฤทธิ์ผลรวม คือ

$$T = T_R + T_T \quad (2.3)$$

$$T = K_r I_r [1.5\sin(\theta) + 0.886\cos(\theta)] \quad (2.4)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ที(T) จะเปลี่ยนแปลงตามมุม(θ) ของโรเตอร์(Rotor) และสามารถก่อให้เกิดสัญญาณกระเพื่อมของแรงบิด(Torque Ripple) ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนประเภทหนึ่ง ได้สูงถึง 13% โดยวิธีเร็กแทนกูล่าคอมมิวเตชัน(Rectangular Commutation) นี้

วิธีแก้ไขปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการเพิ่มวงรอบการควบคุมแบบการป้อนกลับของความเร็วและการป้อนกลับของตำแหน่งให้เป็นการอยู่ภายนอกวง โดยล้อมรอบรูปของกระแสไว้ ซึ่งเป็นการอยู่ภายในรูป

2.1.2 ไซน์ซอชอยดอล คอมมิวเตชัน(Sinusoidal Commutation)

เช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในกรณีของ Sinusoidally Wound Motor (นั่นคือขดลวดที่สเตเตอร์พันแบบ Sine) จะได้ค่า Air Gap Flux Densities ดังต่อไปนี้

$$B_R = B_p \sin(\theta) \quad (2.5)$$

$$B_S = B_p \sin(\theta + 120) \quad (2.6)$$

$$B_T = B_p \sin(\theta + 240) \quad (2.7)$$

โดยที่ B_p คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์ในช่องอากาศ(Peak Air Gap Flux Density)

B_R คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์ที่เฟสอาร์(Phase R Flux Density)

B_S คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์ที่เฟสเอส(Phase S Flux Density)

B_T คือ ค่าความหนาแน่นฟลักซ์ที่เฟสที(Phase T Flux Density)

โดยทั้งหมดมีหน่วยเป็นเทสลา(Teslas) เมื่อรูปกระแส(Current Loop) ได้รับการควบคุมแบบพีไอ(PI Controller) เพื่อควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าในเฟสต่างๆ (I_R I_S I_T Phase Currents) จะได้สมการความสัมพันธ์ทางกระแสไฟฟ้าและแรงบิดดังต่อไปนี้

$$I_R = I_p \sin(\theta) \quad (2.8)$$

$$I_S = I_p \sin(\theta + 120) \quad (2.9)$$

$$I_T = I_p \sin(\theta + 240) \quad (2.10)$$

และ I_p คือ ค่ากระแสสูงสุด(Peak Current)

$$T_R = K_t I_p \sin^2(\theta) \quad (2.11)$$

$$T_S = K_t I_p \sin^2(\theta + 120) \quad (2.12)$$

$$T_T = K_t I_p \sin^2(\theta + 240) \quad (2.13)$$

และค่าแรงบิดสัมฤทธิ์ผลรวมคือ

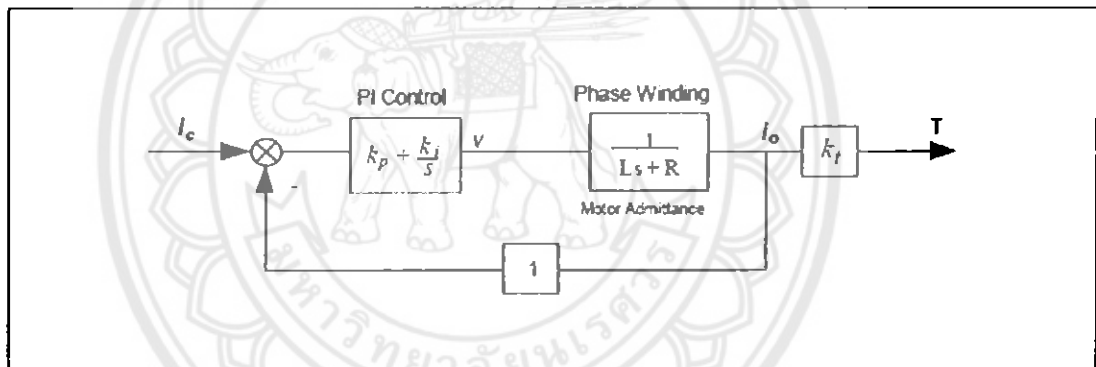
$$T = T_R + T_S + T_T \quad (2.14)$$

$$T = \frac{3}{2} K_t I_p \quad (2.15)$$

ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจน จากสมการของที(T) ว่าไม่มีองค์ประกอบของไซน์(Sine) เพราะฉะนั้นจะไม่มีกระแสเพี้ยน(Ripple) ดังปรากฏในขบวนการคอมมิวเตชัน(Commutation) แบบเร็กแทนกูล่า(Rectangular) แต่อย่างไรก็ตาม ขบวนการไซน์ชอยดอล คอมมิวเตชัน (Sinusoidal Commutation) ต้องใช้ควบคู่กับการตรวจจับตำแหน่ง

2.1.3 Proportional + Integral (PI) Current Loop

จากทฤษฎีของขดลวดที่พันในมอเตอร์นั้น คุณสมบัติของขดลวด(Coil) จะมี 2 องค์ประกอบ คือ ตัวต้านทาน(Resistance,R) และตัวเหนี่ยวนำ(Inductance,L) เมื่อมอเตอร์ทำงานที่ ความเร็วรอบต่ำและแรงบิดสูงนั้น แรงขับเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้าย้อนกลับต่อเฟส(Per-Phase Back EMF)ของมอเตอร์สามารถได้รับการละเว้นไว้ในการคำนวณ เนื่องจากแรงขับเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า ย้อนกลับต่อเฟส(Per-Phase Back EMF) ดังกล่าว มีอิทธิพลต่อด้านการทำงานสวนทางมอเตอร์ น้อยมาก



รูปที่ 2.4 วงจรควบคุมแบบ PI สำหรับ 2 ใน 3 เฟสของมอเตอร์ เมื่อต่อขดลวดแบบสตาร์ [1]

รูปที่ 2.4 แสดงระบบควบคุมแบบพีไอต่อเฟส(Per-Phase PI Controller) ซึ่งใช้สำหรับ 2 ใน 3 เฟส เท่านั้น เนื่องจาก ผลรวมของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการต่อเฟสทั้ง 3 แบบสตาร์นั้น ต้องมีค่าเป็นศูนย์ และระบบรวมของระบบควบคุมแบบพีไอ(PI Controller) จะสอดคล้องกับสมการถ่ายโอน(Transfer Function) แบบระบบลำดับชั้น 2 (Second Order System) ดังแสดงต่อไปนี้

$$\frac{i_o(s)}{i_c(s)} = \frac{\left(\frac{k_p}{L}\right)s + \left(\frac{k_i}{L}\right)}{s^2 + \left(\frac{R+k_p}{L}\right)s + \left(\frac{k_i}{L}\right)} \quad (2.16)$$

โดยมีความถี่ทางธรรมชาติ(Natural Frequency, ω_n) และอัตราส่วนแดมปีง(Damping Ratio, ζ)

เท่ากับ

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_i}{L}} \quad (2.17)$$

$$\zeta = \frac{k_p + R}{2\sqrt{k_i L}} \quad (2.18)$$

เมื่อเทียบกับสมการมาตรฐานของระบบแบบลำดับชั้น 2 (Second Order System)

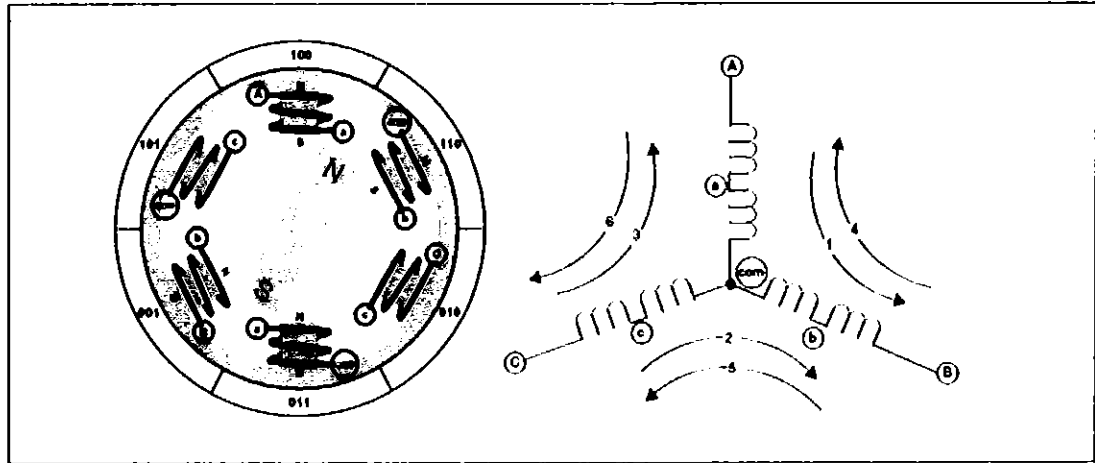
$$\frac{i_o(s)}{i_c(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.19)$$

การออกแบบระบบควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) สำหรับมอเตอร์ที่ทราบค่าตัวต้านทาน (Resistance, R) และตัวเหนี่ยวนำ (Inductance, L) นั้น (โดยมากจะทราบค่าจากตารางข้อมูลของมอเตอร์) คือ การหาค่ากำลังขยาย (Gains ของ k_p และ k_i) ที่เหมาะสมเพื่อได้มาซึ่งการตอบสนองต่อช่วงของข้อมูลที่สูงในระบบควบคุมแบบปิด (Closed-Loop High-Bandwidth Response) สำหรับกระแสไฟฟ้า (และส่งผลถึงแรงบิดเช่นกัน) และโดยมากสามารถได้ช่วงของข้อมูลดังกล่าว มากกว่าเท่ากับ 500 เฮิรตซ์ (≥ 500 Hz) ขึ้นไป

ข้อดีอันเห็นได้ชัดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน คือ การใช้อิเล็กทรอนิกส์คอมมิวเตชัน (Electronic Commutation) แทนแปรงถ่าน (Brushes) แบบที่ใช้กันดั้งเดิมในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน (D.C. Brushed Motors) พร้อมทั้งมีระบบควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) ควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าของเฟส ซึ่งกระแสไฟฟ้านี้เป็นตัวแปรสำคัญส่งผลถึงแรงบิด (Torque) ที่มอเตอร์ผลิตขึ้นมาเพื่อไปขับโหลดต่อไป

2.2 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

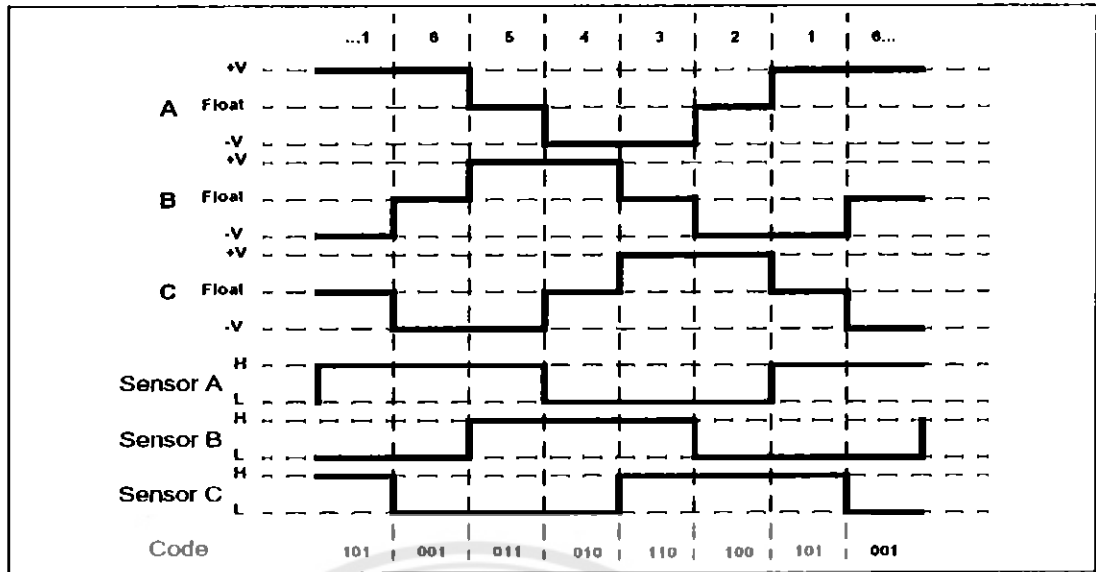
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) จะทำการออกแบบให้มีแม่เหล็กถาวรติดตั้งอยู่บนส่วนที่หมุนของมอเตอร์ ซึ่งก็คือ ตัวโรเตอร์ (Rotor) นั่นเอง และทำการพันขดลวดไว้ที่ขั้ว (Pole) ของสเตเตอร์ (Stator) ที่ขดลวดนี้ จะได้รับการจ่ายกระแสจากอิเล็คทริกแอมป์ไฟเออร์ (Electric Amplifier) หรือชุดไดรฟ์ (Drive) ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะติดต่อกับมอเตอร์ด้วยสัญญาณแรงดันต่ำที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจจับแบบออปติคอน (Optical) หรือแบบฮอลล์เอฟเฟ็คเซนเซอร์ (Hall-effect sensor) อุปกรณ์เหล่านี้จะทำหน้าที่คล้ายเอนโค้ดเดอร์ (Encoder) สิ่งที่แตกต่างกันจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) คือ ไม่สามารถขับเคลื่อนด้วยชุดไดรฟ์ (Drive) แบบธรรมดาทั่วไปได้ ชุดไดรฟ์ (Drive) ที่สามารถขับเคลื่อนได้ จะต้องสามารถสลับทิศทางการไหลของกระแสได้ตามตำแหน่งของโรเตอร์ (Rotor) ด้วยเหตุนี้เอง มอเตอร์ชนิดนี้จึงเหมือนได้รับการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่เป็นแบบกระแสสลับ



รูปที่ 2.5 โค้ดแกรมการทำงานของมอเตอร์แบบ BLDC[4]

การทำงานของมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน ในการทำงานของมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน จะทำงานแบบง่าย ๆ โดยมีแปรงถ่านเป็นตัวคอยสับเปลี่ยนการจ่ายกระแสไฟให้กับขดลวด เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่เหมาะสม มอเตอร์ชนิดนี้จึงมีสายเพียง 2 เส้นเท่านั้น แต่ในมอเตอร์ไร้แปรงถ่านจะมีขดลวดอยู่ 3 ชุด และจะทำงานครั้งละ 2 ชุด สับเปลี่ยนกันเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่เหมาะสม จะเห็นได้ว่ามอเตอร์ไร้แปรงถ่านจะมีสายจำนวน 3 เส้นต่อออกมา ตามรูปที่ 5 คือ ขั้ว A , B และ C

จากภาพที่ 2.5 ด้านขวาแสดงภาคตัดขวางของมอเตอร์ จะเห็นตัวหมุน (Rotor) ที่เป็นแม่เหล็กถาวรอยู่ตรงกลาง และขดลวด A , B และ C อยู่รอบๆ แต่หากเป็นมอเตอร์ที่เปลือกหมุน (Out-runner) จะกลับกันคือ ขดลวดจะอยู่ตรงกลางแล้วมีเปลือกแม่เหล็กเป็นวงกลมอยู่รอบนอกแทนในภาพที่ 2.5 จะมีกระแสไหลผ่านขดลวดจาก A ไป B ตามเส้นทางที่ 1 ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กสำหรับดึงดูดแกนหมุนให้อยู่ระหว่างขั้วของ A และ B หรือมอเตอร์จะวางตัวอยู่ตามรูปที่ 1 และหากให้กระแสไหลตามเส้นทางที่ 6 คือ จากขั้ว A ไปยังขั้ว C จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กระหว่างขั้ว A และ C จะทำให้ตัวหมุนเคลื่อนไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาไปอยู่ระหว่างขั้ว C และ A แทน หรือขั้ว N ประมาณเลข 11 บนหน้าปัดนาฬิกา และหากเปลี่ยนกระแสให้ไหลในเส้นทางที่ 5 คือ จาก B ไปยัง C ต่อไปอีก ตัวหมุนจะหมุนทวนเข็มนาฬิกาต่อไปอีก ขั้ว N จะอยู่ที่ระหว่างขั้ว B และ C หรือที่ประมาณ 9 นาฬิกา ดังนั้นหากให้เกิดการหมุนต่อเนื่อง จะต้องทำการสับขั้วให้กระแสไหลในจังหวะที่เหมาะสมตามลำดับไป ดูได้จากรูปที่ 6 และเมื่อกระทำต่อเนื่องไปจนครบ 6 ขั้น จะเกิดการหมุน 1 รอบพอดี ในระหว่างขั้นต่างๆ นี้ ขั้ว A , B และ C จะถูกสับเปลี่ยนไปมาระหว่างบวกและลบ ทำให้ตัวควบคุมจะต้องใช้เฟต(FET) ต่อกันเป็นบริดจ์(bridge) อย่างน้อย 6 ตัว (3 PFET + 3 NFET) เพื่อให้สามารถสับเปลี่ยนขั้วได้ จึงไม่แปลกใจเมื่อพบว่าระบบความเร็วจะมีเฟต(FET) ตัวเล็กๆ ต่อกันอยู่เป็นชุดๆ อยู่จำนวนมากน้อยตามกระแสที่จ่ายได้



รูปที่ 2.6 แผนผังของขดลวด , เซ็นเซอร์ เทียบกับเวลา[4]

ลำดับจังหวะการเปิดปิดของสวิทซ์ทั้ง 6 ตัว จะถูกกำหนดจากรูปคลื่นสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยกระแสไฟฟ้าของแต่ละเฟสจะไหลแค่ขดลวด 2 ขดเท่านั้น ซึ่งใน 1 คาบจะแบ่งเป็น 6 คอมมิวเตชันสเตต(Commutation States) : 001 , 010 , 011 , 100 , 101 , 110 ซึ่งแต่ละสเตต (States) จะเป็นระยะ 60 องศา

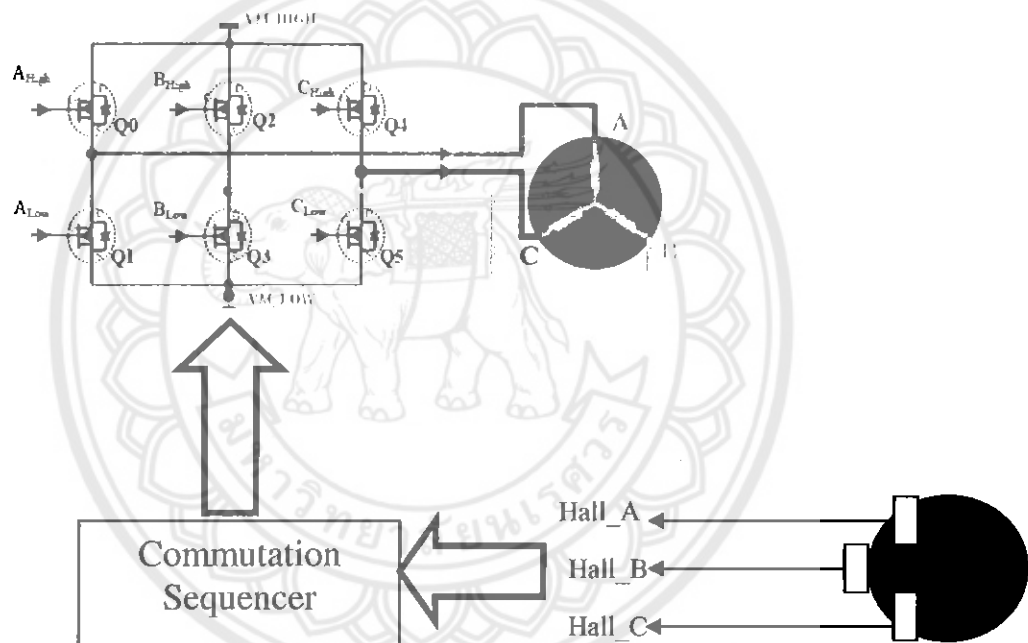
จากรูปที่ 2.6 พบว่าเอาต์พุตของเซ็นเซอร์ทั้ง 3 ตัวจะซ้อนกันซึ่งทำให้เกิดรหัส(code) แบบ 3 บิตที่มี 6 กรณี โดยแต่ละกรณีจะสัมพันธ์กับแต่ละเฟสขั้ว ตัวเลขที่แสดงรอบ ๆ แผนภาพมอเตอร์แสดงถึงรหัส(code) ของตำแหน่งเซ็นเซอร์ ทิศเหนือของแกนหมุนชี้ไปยังตำแหน่งของรหัส(code) คือ เอาต์พุตของตำแหน่งแกนหมุน ตัวเลขที่แสดงเป็นระดับเชิงตรรกะ(Logic level) ของเซ็นเซอร์ โดยบิตที่สำคัญมากที่สุด(Most significant bit) คือ เซ็นเซอร์ C และบิตที่สำคัญน้อยที่สุด(Least significant bit) คือ เซ็นเซอร์ A แต่ละขดลวดขั้วประกอบไปด้วยขั้วมอเตอร์ขั้วแบบ High , Low และ Floating ขดขั้วแต่ละขดจะใช้ขั้วที่ขั้วมอเตอร์แต่ละขั้ว ทั้งนี้จะต้องไม่ขั้วขั้วมอเตอร์แบบ High หรือ Low พร้อมกันสองขั้ว แต่ในปัจจุบันออปติคัลเอนโคเดอร์(Optical encoder) ได้ถูกนำมาใช้สำหรับวัดตำแหน่งในมอเตอร์อย่างแพร่หลาย

โดยสัญญาณจังหวะการเปิด-ปิดของสวิทซ์ทั้ง 6 ตัวสามารถที่จะแสดงได้ดังตารางที่ 1 แสดงการหมุนของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านนี้ โดยสัญญาณควบคุมเฟสเอ_เอช (PhaseA_H) , เฟสบี_เอช(PhaseB_H) และเฟสซี_เอช(PhaseC_H) เป็นสัญญาณที่รับค่าพีคัมเบิลยูเอ็ม(PWM) ส่วนสัญญาณเฟสเอ_แอล(PhaseA_L) , เฟสบี_แอล(PhaseB_L) และเฟสซี_แอล (PhaseC_L) เป็นแค่เปิดหรือปิดเท่านั้น ส่วนค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุต ของแต่ละเฟสสามารถที่จะปรับได้โดยการปรับช่วงเวลาเปิด(Ton) ในแต่ละคาบคงที่ เพราะจะได้ว่า

$$\text{Duty Cycle} = (\text{Ton} / T) * 100 \tag{2.20}$$

ตารางที่ 2.1 แสดงการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน(AB-AC-BC-BA-CA-CB)

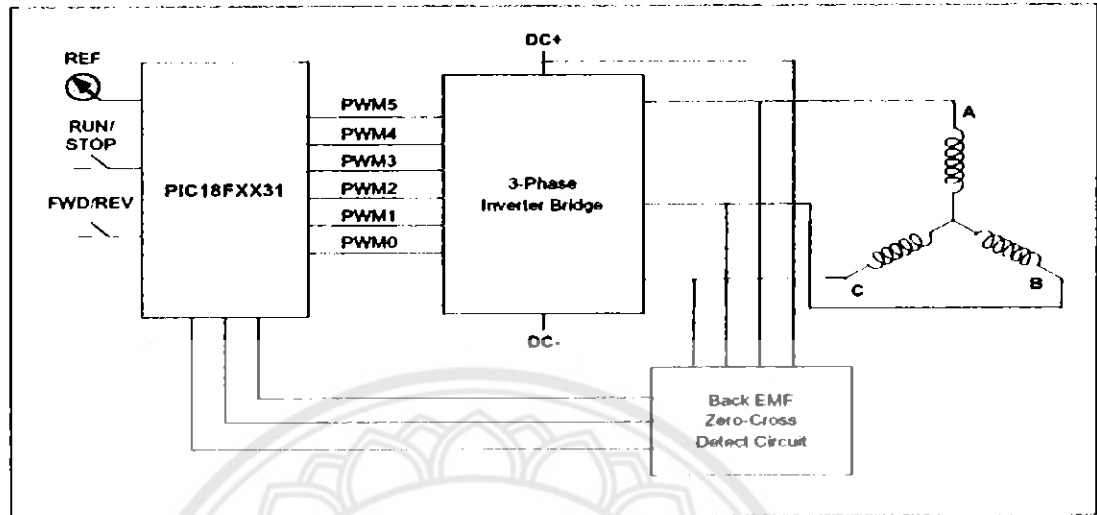
Hall_A	Hall_B	Hall_C	PhaseA_H	PhaseA_L	PhaseB_H	PhaseB_L	PhaseC_H	PhaseC_L
1	0	1	PWM			1		
0	0	1	PWM					1
0	1	1			PWM			1
0	1	0		1	PWM			
1	1	0		1			PWM	
1	0	0				1	PWM	



รูปที่ 2.7 วงจรมอสเฟต ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ในการควบคุมลำดับการปิดเปิดสวิตช์ทั้ง 6 ตัว [4]

จากหลักการทำงานข้างต้น จะเห็นว่าการสับเปลี่ยนขั้ว มีความสัมพันธ์กับตำแหน่งของตัวหมุนเป็นอย่างมาก การสับเปลี่ยนขั้วเพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กที่เหมาะสม จะทำให้ได้แรงบิดที่ดี โดยแรงบิดจะเกิดขึ้นสูงสุด เมื่อตัวหมุนทำมุมกับสนามแม่เหล็ก 90 องศา ดังนั้นในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน มักจะได้ยินคำว่า เซนเซอร์เลส (Sensorless) อีกคำหนึ่ง เพราะการควบคุมมอเตอร์จำเป็นต้องรู้ตำแหน่งของมอเตอร์ หากมีการใช้อุปกรณ์ (Sensor) ช่วยบอกตำแหน่ง เช่น พวกฮอลล์เซนเซอร์ (Hall Sensor) จะใช้จำนวน 3 ตัว เพื่อให้สัญญาณออกมาตามรูปที่ 2.6 จากนั้นจะนำสัญญาณที่ได้ไปกำหนดเวลาสับเปลี่ยนขั้วอีกที การใช้เซนเซอร์ (Sensor) มีข้อดีคือ ตัวควบคุมทำงานง่าย แต่มีข้อยุ่งยากคือ ต้องใช้เซนเซอร์ (Sensor) เพิ่ม และเป็นภาระในการดูแล

ทำให้มีการคิดเทคนิคการตรวจสอบตำแหน่ง โดยไม่ใช่เซนเซอร์(Sensor) ขึ้นมาหรือเรียกว่า เซนเซอร์เลส(Sensorless) นั่นเอง

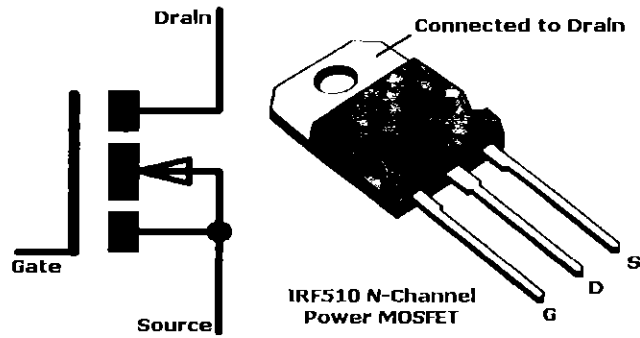


รูปที่ 2.8 บล็อกโคแอกแกรมของการควบคุมเซนเซอร์เลส(Sensorless) [3]

หลักการการทำงานของระบบควบคุมแบบเซนเซอร์เลส(Sensorless Controller) จากลักษณะของมอเตอร์ และการขับที่ละ 2 ขั้ว ขั้วที่ว่างอยู่อีก 1 ขั้ว ในขณะที่มอเตอร์หมุนจะมีสัญญาณออกมา (BEMF) และสามารถนำไปประเมินเพื่อกำหนดตำแหน่งมอเตอร์ได้เช่นเดียวกันกับการใช้ฮอลล์เซนเซอร์(Hall Sensor) ภาพประกอบที่ 2.8 วิธีนี้มีข้อดีคือ ไม่ต้องติดตั้งเซนเซอร์(Sensor) ทำให้สะดวกและประหยัด แต่มีข้อเสียคือ หากมอเตอร์ยังไม่หมุน จะไม่มีสัญญาณ(BEMF) ออกมา ทำให้ตัวควบคุม(Controller) ไม่สามารถตรวจสอบตำแหน่งมอเตอร์ในตอนเริ่มต้นหมุนได้

2.3 มอสเฟต (MOSFET)

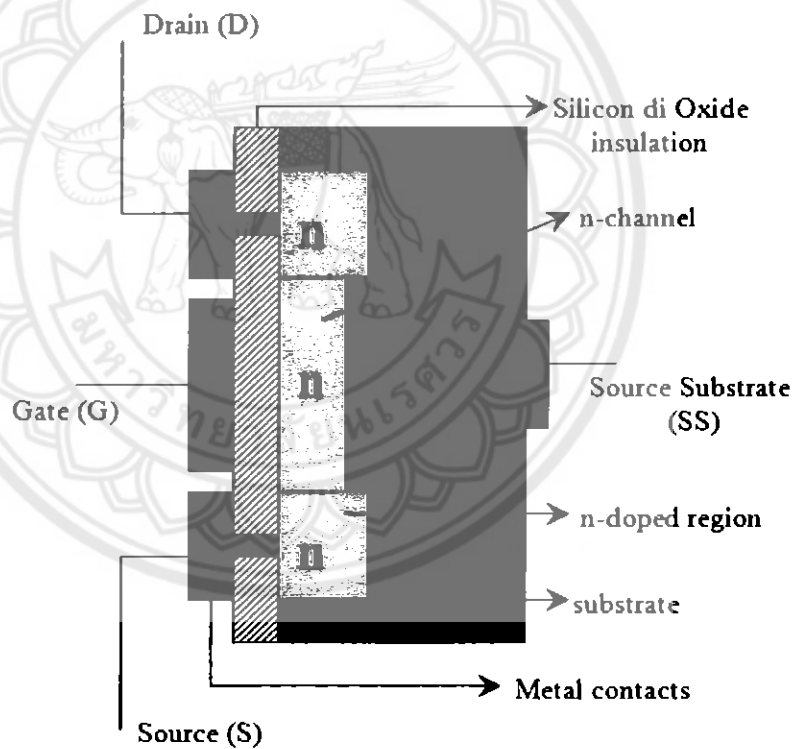
มอสเฟตจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ดีพลีชันและเอนฮานซ์เมนต์ แต่ละประเภทยังแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบแชนแนลเอ็น(N) และ แบบแชนแนลพี(P) มอสเฟตประเภทดีพลีชันหรือดีมอสเฟต (D-MOSFET) ทั้ง 2 แบบจะทำงานได้ 2 โหมด คือ โหมดดีพลีชัน (Depletion Mode) และ โหมดเอนฮานซ์เมนต์ (Enhancement Mode) กล่าวคือ ถ้าจ่ายแรงดันลบให้กับดีมอสเฟตแชนแนล n จะทำงานในโหมดดีพลีชัน แต่ถ้าจ่ายแรงดันบวกจะทำงานในโหมดเอนฮานซ์เมนต์ ส่วนดีมอสเฟตแชนแนลพี(P) ก็จะทำงานคล้ายกันเมื่อ ได้รับแรงดันที่มีขั้วตรงข้ามกับแบบแชนแนลเอ็น(N) ส่วนมอสเฟตประเภทเอนฮานซ์เมนต์หรืออีมอสเฟต (E-MOSFET) มีโครงสร้างบางอย่างคล้ายกับมอสเฟตแบบดีพลีชัน แต่จะทำงานได้เฉพาะโหมดเอนฮานซ์เมนต์เท่านั้น



รูปที่ 2.9 มอสเฟตแบบเอ็น(N) แชนแนลและสัญลักษณ์ [6]

2.3.1 ดิโมสเฟตแบบแชนแนลเอ็น(N)

โครงสร้างของดิโมสเฟตแบบแชนแนลเอ็น(N) เป็นดังรูป



รูปที่ 2.10 โครงสร้างดิโมสเฟตแชนแนลเอ็น(N) [3]

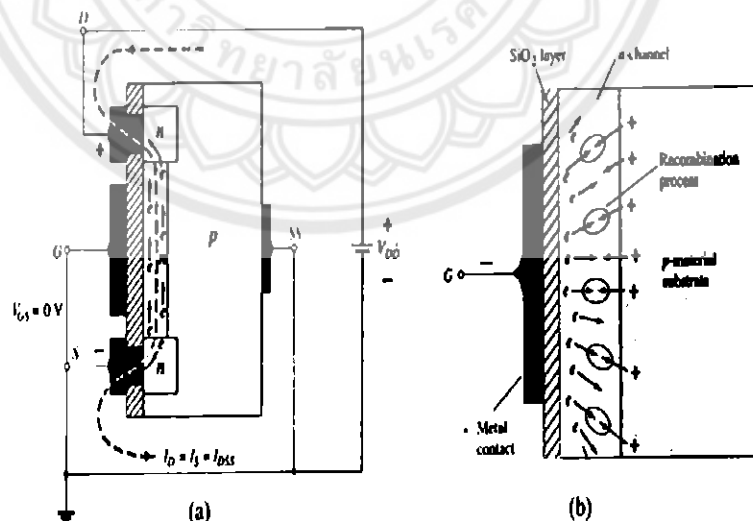
ดิโมสเฟตแบบแชนแนลเอ็น(N) ประกอบขึ้นจากแผ่นผลึกฐานพี (P-substrate) ที่เป็นสารกึ่งตัวนำทำจากซิลิกอนซั้วดี(D) และซั้วเอส(S) ต่อกับบริเวณที่มีการกระตุ้นหรือโด๊ปให้เป็นบริเวณสารกึ่งตัวนำเอ็น(N-doped region) ทั้งสองส่วนนี้จะเชื่อมกับแชนแนลเอ็น(N) สำหรับซั้วจี(G)จะต่อกับวัสดุฉนวนที่เป็น โลหะ โคหิมิซิลิกอน ไดออกไซด์(SiO₂) กั้นแชนแนลเอ็น(N) กับซั้วจี

(G) (ซิลิคอนไดออกไซด์เป็นฉนวนประเภทไดอิเล็กทริก) เมื่อมีสนามไฟฟ้าจ่ายเข้ามาที่ชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์(SiO_2) ก็จะสร้างสนามไฟฟ้าด้านและสร้างชั้นจนวนขึ้นภายในตัวเองเพื่อกันขั้วเกตกับเซนแนล แสดงว่า ไม่มีการต่อโดยตรงระหว่างขั้วจี(G) กับเซนแนลของมอสเฟท ชั้นที่เป็นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์(SiO_2) จะทำให้ Z_i มีค่าสูงตามความต้องการ นอกจากนี้บางครั้งจะต่อแผ่นผลึกจากฐานเข้ากับแหล่งจ่ายจึงมีขั้วเพิ่มขึ้นมาเรียกว่า ขั้วผลึกฐานสับสเตรท (Substrate : SS) ทำให้มีขั้วเพิ่มเป็น 4 ขั้ว และจากข้างต้น จึงสรุปความหมายของคำว่า มอส(MOS) ในชื่อมอสเฟท (ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้าโลหะออกไซด์สารกึ่งตัวนำ) ได้ดังนี้

- โลหะ (Metal, M) หมายถึง บริเวณสำหรับการต่อขั้วดี(D) ขั้วเอส(S) และขั้วจี(G) กับวัสดุฉนวน
- ออกไซด์ (Oxide, O) หมายถึง ซิลิคอน ไดออกไซด์ (SiO_2)
- สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor, S) หมายถึง โครงสร้างพื้นฐานบริเวณแพร่กระจายของสารกึ่งตัวนำชนิดพี(P) และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น(N)

2.3.2 การทำงานและคุณสมบัติเบื้องต้น (Basic Operation and Characteristics)

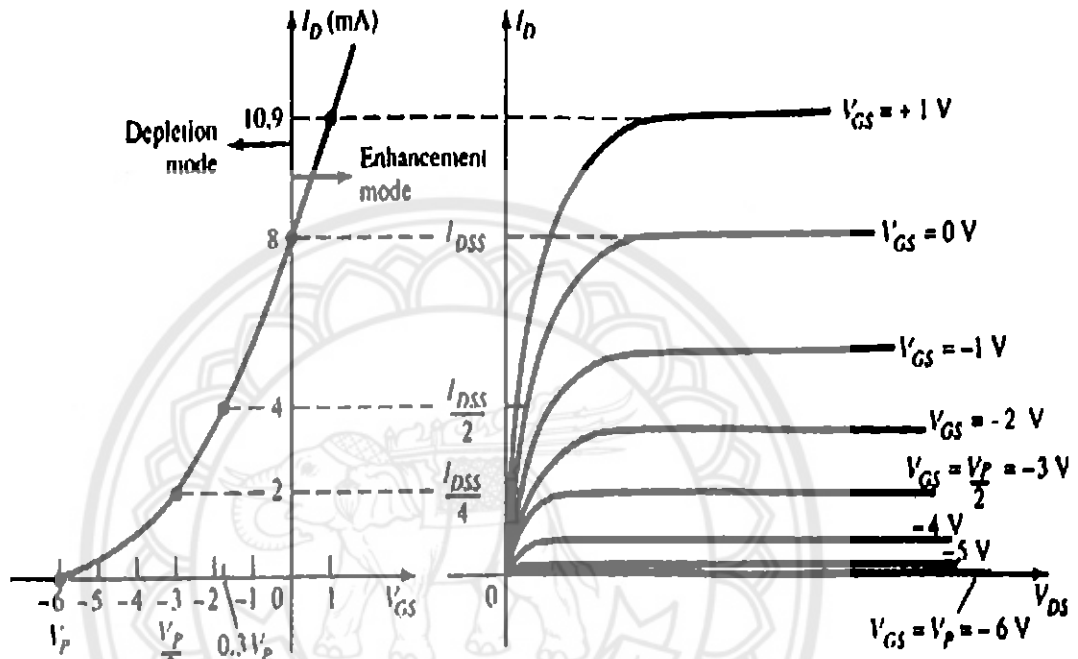
กำหนดให้ V_{GS} ในรูป (a) มีค่าเป็นศูนย์ แล้วจ่าย V_D ที่ขั้วดี(D) และขั้วเอส(S) สามารถดึงคู่อิเล็กตรอนอิสระ(e) ผ่านเซนแนลเอ็น(N) และทำให้กระแส $I_D = I_S = I_{DSS}$ ไหลผ่านเซนแนลเอ็น(N) ได้ (คล้ายกับการไหลของกระแสไฟฟ้าในเซนแนลของเจเพทขณะ $V_{GS} = 0 \text{ V}$)



รูปที่ 2.11 การทำงานของมอสเฟทแบบเอ็น(N) เซนแนล [6]

ถ้าจ่าย V_{GS} ที่มีค่าเป็นลบให้กับขั้วเกต (รูป b) เช่น -1 V ความต่างศักย์ที่ขั้วเกตจะผลักคั้นให้อิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนไปยังแผ่นผลึกฐานพี(P) และดึงคู่อิเล็กตรอนจากแผ่นผลึกฐานพี(P) ทำให้

อิเล็กตรอนและโฮลรวมตัวกันใหม่ (Recombination Process) จึงเกิดการลดจำนวนอิเล็กตรอนอิสระในแชนแนลเอ็น(N) ที่มีไว้สำหรับการนำกระแส เมื่อมีค่า V_{GS} เป็นลบมากเท่าใดก็จะเกิดการรวมตัวกันใหม่มากขึ้นเท่านั้นและอิเล็กตรอนอิสระที่แชนแนลเอ็น(N) ก็จะมีจำนวนลดลง จึงกล่าวได้ว่าถ้า V_{GS} เป็นลบมากขึ้น I_D จะมีค่าน้อยลง เขียนเป็นกราฟคุณลักษณะได้ดังรูปต่อไปนี้ การทำงานขณะ V_{GS} เป็นลบนี้ เราเรียกว่า การทำงานในโหมดคิพลิชั่น



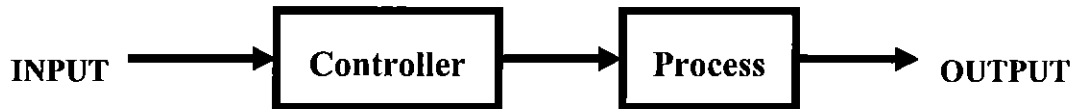
รูปที่ 2.12 แสดงคุณลักษณะการทำงานของมอสเฟตเอ็น(N) แชนแนล [6]

ถ้าจ่าย V_{GS} ที่มีค่าเป็นบวกให้กับขั้วเกตความต่างศักย์ที่ขั้วเกตจะดึงดูดอิเล็กตรอนจากผลึกฐาน p มายังบริเวณชั้น SiO_2 ทำให้พาหะนำกระแสและสภาพนำกระแสของแชนแนลเพิ่มขึ้น ดังนั้นกระแส I_D จึงเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่า I_{DSS} การทำงานขณะ V_{GS} เป็นบวกนี้เราเรียกว่า การทำงานในโหมดเอนฮานซ์เมนต์

2.4 ประเภทของการควบคุม

กฎเกณฑ์ในการจำแนกประเภทของการควบคุมมีหลายกฎเกณฑ์ ซึ่งอาจแบ่งออกได้ตามลักษณะงาน อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุม ดังนั้น จึงเป็นการยากที่จะกล่าวอย่างตายตัวว่า การควบคุมมีกี่ประเภท เพื่อที่ลดความสับสน และให้สอดคล้องกับองค์ประกอบในการควบคุม การแบ่งประเภทของการควบคุมในที่นี้จะแบ่งตามกฎเกณฑ์ 2 ประการ คือ การควบคุมแบบเปิด (Open loop) และการควบคุมแบบปิด (Close loop)

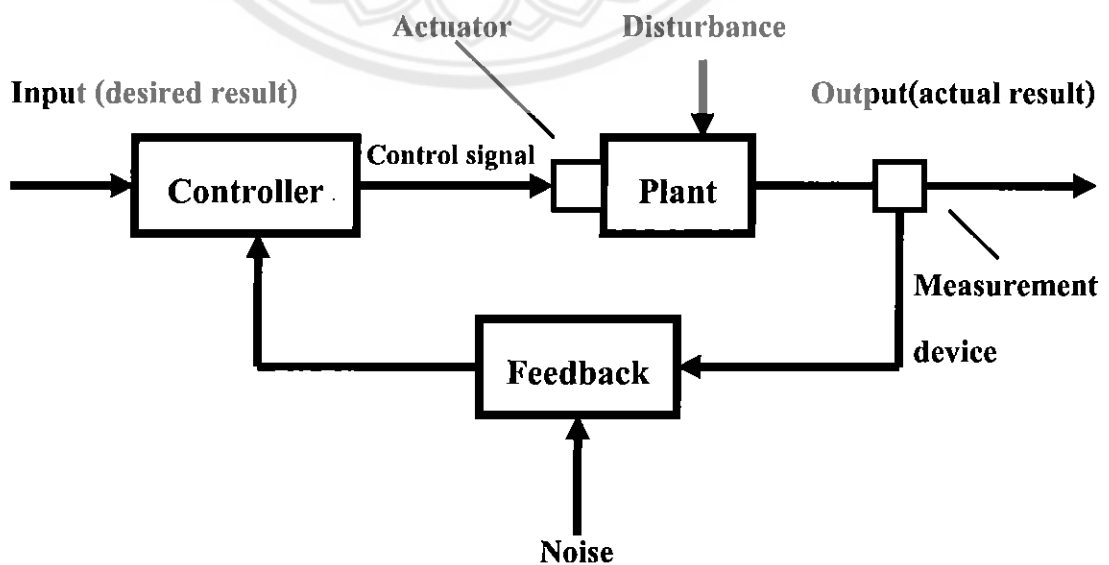
การควบคุมแบบเปิด(Open loop) : เป็นระบบควบคุมที่เอาต์พุตของระบบมีผลต่อการควบคุมเลย นั่นคือ ในกรณีของระบบควบคุมแบบเปิด(Open loop) นั้น เอาต์พุตของระบบจะไม่ถูกวัดหรือถูกป้อนกลับมาเพื่อเปรียบเทียบกับอินพุต ตัวอย่างการควบคุมแบบเปิด(Open loop) ได้แก่ การควบคุมการปิด - เปิดไฟ การควบคุมการเปลี่ยนทิศทางการหมุนของมอเตอร์ การควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อนสายพานลำเลียง การควบคุมเครื่องซักผ้า การควบคุมสัญญาณไฟโฆษณา การควบคุมสัญญาณไฟจราจร เป็นต้น



รูปที่ 2.13 แสดงระบบควบคุมแบบเปิด(Open loop) [2]

ในการควบคุมแบบเปิด(Open loop)นั้น เอาต์พุตไม่ได้นำมาเปรียบเทียบกับอินพุต ดังนั้นความเที่ยงตรงของระบบจะขึ้นอยู่กับ การปรับเทียบ ในทางปฏิบัติแล้วจะสามารถใช้การควบคุมแบบเปิด(Open loop) ได้ถ้าทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของระบบและระบบควบคุมที่ทำงานตามเวลาที่กำหนดไว้เป็นระบบควบคุมแบบเปิด(Open loop)

การควบคุมแบบปิด(Close loop) : เป็นระบบควบคุมแบบหนึ่ง ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตจะมีผลโดยตรงต่อการควบคุม ดังนั้นระบบควบคุมแบบปิด(Close loop) ก็คือ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ นั่นเอง สัญญาณป้อนกลับนี้อาจจะเป็นสัญญาณเอาต์พุตโดยตรงหรือเป็นสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันของสัญญาณเอาต์พุต ซึ่งโครงสร้างอย่างง่ายของระบบแสดงดังรูป



รูปที่ 2.14 ระบบควบคุมแบบปิด(Close loop) [2]

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายแบบ แต่ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมคงเป็นระบบควบคุมแบบ PID ซึ่งการออกแบบสามารถทำได้ทั้งแบบอนาล็อกและแบบดิจิทัล โดยแต่ละอย่างก็มีข้อดีและข้อเสียที่ต่างกัน เช่น เรื่องความละเอียดของการควบคุม การจัดสัญญาณรบกวน ความยากง่ายในการสร้าง แต่ในปัจจุบันตัวควบคุม PID มักเป็นแบบดิจิทัลเนื่องจากความสะดวก และประสิทธิภาพที่คาดเดาได้ง่าย (อัลกอริทึมที่ใช้เขียน) โดยมักถูกสร้างขึ้นโดยใช้เครื่องมือหลายๆแบบ เช่น Microcontroller , DSP , CPLD , FPGA รวมทั้งบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลอีกด้วย

การควบคุมแบบ PID (Proportional Integral Differential) จะประกอบไปด้วยส่วนการควบคุมที่สำคัญด้วยกัน คือ

P Action : เป็นการกำหนดการทำงานของเอาต์พุต (output) ให้เป็นสัดส่วนเปอร์เซ็นต์(%) กับค่า ความผิดพลาด (error) หรือการเปลี่ยนแปลงของค่าที่วัดได้

$$\text{Output} = (\text{error} \times 100) / P_b \quad ; \quad \text{error} = (\text{ค่าที่กำหนด}) - (\text{ค่าที่วัดได้}) \quad (2.21)$$

ในทางปฏิบัติ P Action จะเข้าไปใกล้ค่าหนึ่ง ซึ่งไม่ใช่ค่าที่ถูกกำหนดจริง เรียกว่า ค่าชดเชย (Offset)

I Action : จะใช้ในการแก้ปัญหาค่าชดเชย ระบบควบคุม I Action จะเข้าไปช่วยกำจัดค่าชดเชย ที่ยังคงมีอยู่ในระบบเข้าสู่การกำหนดค่า (Set point) โดยค่าเอาต์พุต(Output) ที่ออกมา จะขึ้นอยู่กับส่วนของเวลาที่กำหนดขึ้นมาตั้งแต่ต้น หากกำหนดให้ส่วนของเวลาน้อย ระบบจะเข้าสู่การกำหนดค่า(Set point) ได้อย่างรวดเร็ว แต่จะเกิดการกระเพื่อมมาก และหากกำหนดให้ส่วนของเวลามาก จะเกิดการกระเพื่อมน้อย แต่จะใช้เวลานานกว่าระบบจะเข้าสู่การกำหนดค่า (Set point)

D Action : ในกรณีที่มีการรบกวนระบบจากภายนอก เป็นผลให้การประมวลผลของระบบมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด เราควรจะใช้การควบคุมแบบ D ซึ่งจะมีการตอบสนองที่รวดเร็ว เป็นผลให้ระบบเข้าสู่การกำหนดค่า(Set point) ได้รวดเร็วขึ้น

ระบบควบคุมแบบ PID สามารถแทนด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์ สำหรับสมการต่อเนื่อง (Continuous) ได้ดังนี้

$$m(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.22)$$

อาจมีคำถามว่า จากสมการข้างต้นเป็นสมการแบบอนาล็อก แล้วเราจะสามารถแปลงไปเป็นสมการดิจิทัลได้อย่างไร แต่ถ้าเราพิจารณาจริงๆแล้ว เราสามารถประยุกต์ใช้การคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Method) เข้าช่วยได้ ก็จะได้สมการดังนี้

$$m(n) = K_c \left[e(n) + \frac{T_s}{T_i} \sum_{i=0}^n e(i) + \frac{T_d}{T_s} (e(n) - e(n-1)) \right] \quad (2.23)$$

2.5 อุปกรณ์ป้อนกลับ (Feedback Device)

อุปกรณ์ป้อนกลับ (Feedback Device) หรือที่นิยมเรียกขานกันในแวดวงอุตสาหกรรมว่า " เอนโค้ดเดอร์ (Encoder) " อุปกรณ์ป้อนกลับเป็นส่วนประกอบสำคัญของระบบควบคุม แบบป้อนกลับ เนื่องจากเป็นตัวที่บอกสถานะของระบบซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการคำนวณหาสัญญาณควบคุมในระบบควบคุม

2.5.1 หน้าที่ของเอนโค้ดเดอร์ (Encoder)

เอนโค้ดเดอร์ จะทำหน้าที่เสมือนกับผู้ตรวจการ โดยจะทำหน้าที่ตรวจวัดความเร็ว (Speed) ตรวจจับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ (Direction of Rotation) และตำแหน่งเพลลาของโรเตอร์ (Shaft Position) แล้วรายงานผลกลับไปยังคอนโทรลเลอร์ เพื่อควบคุมให้ทรานซิสเตอร์กำลังในวงจรกำลังของชุดขับเคลื่อนเซอร์โว เกิดการตัด-ต่อกระแสไฟฟ้าให้สัมพันธ์กับตำแหน่งของโรเตอร์ (Rotor)

2.5.2 ชนิดของเอนโค้ดเดอร์ (Encoder)

หากแบ่งตามลักษณะสัญญาณที่ได้จากตัวป้อนกลับ เราสามารถแบ่งตัวป้อนกลับเป็น 2 แบบ ดังนี้

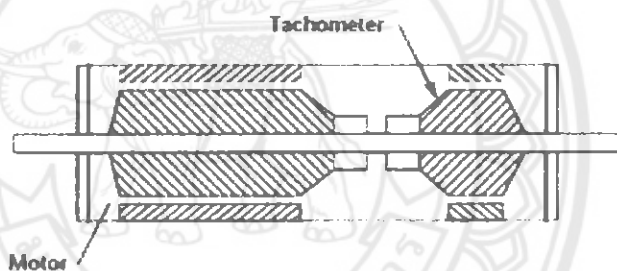
1.) Analog feedback device มักใช้กับระบบควบคุมแบบอนาล็อก แต่หากต้องการใช้กับระบบควบคุมแบบดิจิทัล เราก็จำเป็นต้องใช้วงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อให้สามารถนำไปประมวลผลได้ อุปกรณ์แบบนี้ไม่ค่อยเป็นที่นิยมเนื่องจากต้องการแปลงสัญญาณ (ระบบควบคุมส่วนใหญ่ในปัจจุบันจะเป็นแบบดิจิทัล) รวมทั้งสัญญาณรบกวนต่างๆ อย่างไรก็ตาม งานบางแบบยังมีการใช้งานอุปกรณ์เหล่านี้อยู่ อุปกรณ์แบบนี้ ได้แก่

(1.1) Potentiometer ใช้หลักการของความต้านทานแบบเปลี่ยนค่าได้ ใช้วิธีต่อแกนหมุนของมันเข้ากับแกนหมุนของมอเตอร์ และใช้วงจรแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) เข้ากับโพเทนไทโอมิเตอร์ (Potentiometer) ทำให้เมื่อมอเตอร์หมุนแกนของโพเทนไทโอมิเตอร์ (Potentiometer) ก็จะหมุนไปด้วย นั่นก็คือ ค่าความต้านทานก็จะเปลี่ยนรวมทั้งความต่างศักย์ของวงจร

แบ่งแรงดัน(Voltage Divider) ก็จะเปลี่ยนไปตามการหมุนของมอเตอร์ ส่วนใหญ่มักใช้งานควบคุมตำแหน่ง และเป็นงานทดลองมากกว่า เนื่องจากมีข้อจำกัดหลายอย่างเช่นความถูกต้องและระยะวัดน้อยเกินไป

(1.2) Tachometer สามารถนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ป้อนกลับได้ โดยส่วนมากจะใช้ป้อนกลับอัตราเร็วของมอเตอร์ การทำงานใช้หลักการง่ายคือ นำดีซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรต่อเข้ากับแกนของมอเตอร์ที่ต้องการควบคุม นั่นคือหากมอเตอร์ที่เราต้องการควบคุมเกิดหมุน ดีซีมอเตอร์ก็ให้ค่าความต่างศักย์ออกมา เราสามารถนำค่า ความต่างศักย์นี้ไปใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับให้กับระบบควบคุมได้

ดีซีมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรขนาดเล็กนิยมนำมาใช้เป็นตัวป้อนกลับอัตราเร็วของระบบเซอร์โว โดยจะต้องมีการชดเชยความคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมิรวมทั้งใช้เงิน(Silver) เป็นคอมมิวเตเตอร์(Commutator) เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือเมื่อ ใช้งานที่อัตราเร็วต่ำๆหรือกระแสต่ำๆ ดังนั้น ระบบเซอร์โว(Servo System) จึงนิยมติดตั้ง โทมิเตอร์(Tachometer) เข้ากับระบบเลย ดังรูป



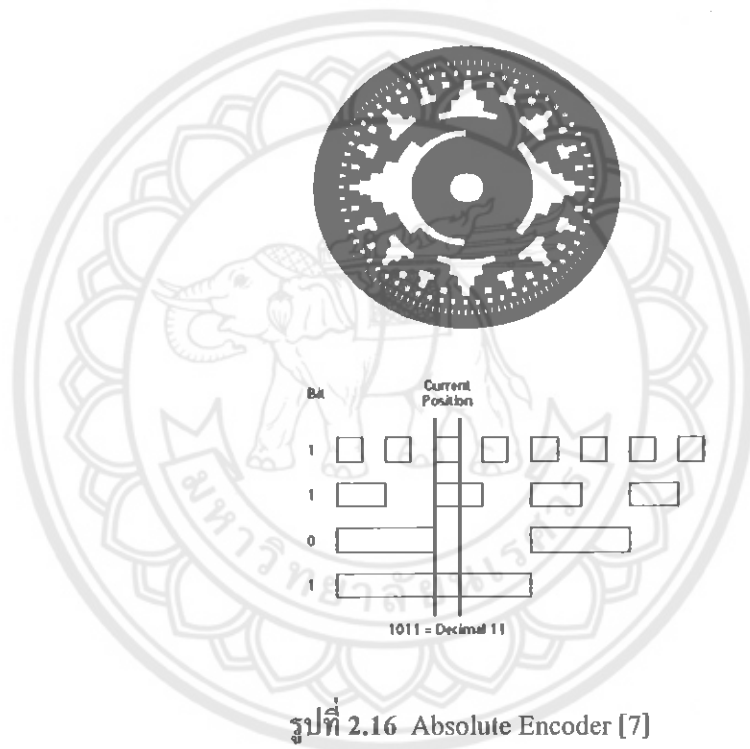
รูปที่ 2.15 การติดตั้ง โทมิเตอร์(Tachometer) เข้ากับระบบ [7]

2.) Digital feedback device อุปกรณ์แบบนี้จะป้อนสัญญาณป้อนกลับที่มีค่าแบบดิจิทัล(แบ่งระดับสัญญาณด้วยเลขจำนวนเต็ม) โดยอาจอยู่ในรูปแบบของสัญญาณต่างๆ เช่น สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม(Square Wave) , สัญญาณรูปไซน์(Sine Wave) หรือค่าตำแหน่งเลข แต่หากผ่านการถอดรหัสแล้วค่าป้อนกลับจะเป็นเลขจำนวนเต็มที่แน่นอนเราจึงเรียกว่าเป็นอุปกรณ์ป้อนกลับแบบดิจิทัล อุปกรณ์เหล่านี้ ได้แก่

(2.1) Optical Encoder ในระบบควบคุมตำแหน่งที่ซึ่งต้องการการป้อนกลับตำแหน่งที่แม่นยำได้ มีการใช้อุปกรณ์ป้อนกลับที่ใช้หลักการต่าง เช่น แม่เหล็ก(Magnetic) , คอนแทค (Contact) , รีซิสทีฟ(Resistive) และออปติคัล(Optical) อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือ อุปกรณ์ที่ใช้หลักการแสง(Optical) แผ่นเกรตติงจะเคลื่อนที่ (หมุน) ระหว่างตัวกำเนิดแสงและตัวรับแสง เมื่อแสงกระทบส่วนของเกรตติงที่โปร่งแสง ตัวรับแสงก็จะได้รับแสง

นั้น เพื่อให้ได้ความละเอียดมากขึ้น ตัวกำเนิดแสงจะเป็นแบบแสงขนาน(Collimate) และมีการปกปิดระหว่างเกรตติงและตัวรับแสง ซึ่งจะทำงานคล้ายกับชัตเตอร์ของกล้องถ่ายรูป การออกแบบแหล่งแสงและการปกปิด จะขึ้นอยู่กับรูปแบบของเอนโค้ดเดอร์ โดยทั่วไปแล้วออปติคัลเอนโค้ดเดอร์ มี 2 ประเภท ดังนี้

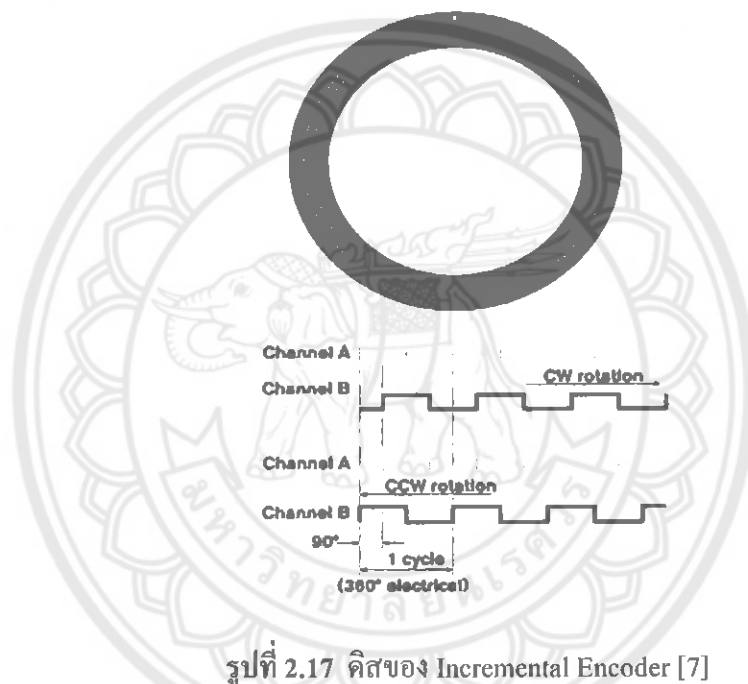
(2.1.1) Absolute Encoder เป็นอุปกรณ์ป้อนกลับตำแหน่งที่ให้สัญญาณออกมาที่แต่ละตำแหน่งของแกน เป็นค่าเฉพาะเจาะจงของตำแหน่ง(แกน) นั้นๆ โดยค่าสัญญาณจะแบ่งเป็นลอจิก 1 และ 0 เมื่อแสงสามารถผ่านเกรตติงได้และไม่ได้ ค่าลอจิกที่ได้จะแทนลำดับการนับของแต่ละหลักในเลขฐานสอง เพื่อให้เข้าใจยิ่งขึ้นขอให้พิจารณาภาพ



รูปที่ 2.16 Absolute Encoder [7]

ความละเอียดของเอนโค้ดเดอร์ชนิดนี้ขึ้นกับจำนวนเท็ค เช่น หากเอนโค้ดเดอร์มี 10 เท็ค นั่นคือ จะมีความละเอียด 2 ยกกำลัง 10 หรือ 1024 ตำแหน่งต่อหนึ่งรอบการหมุน ค่าตำแหน่งที่ได้สามารถอ่านเป็นค่าตำแหน่งได้เลย รูปแบบของโค้ดส่วนมากจะเป็นเลขฐานสอง จุดอ่อนของเอนโค้ดเดอร์ชนิดนี้ นั่นก็คือ ค่าตำแหน่งที่จำกัดหรือมีค่าตำแหน่ง สำหรับหนึ่งรอบการหมุนเท่านั้น แต่เราสามารถแก้ปัญหานี้โดยการเพิ่มจำนวนดิส (Grating) ซึ่งทำให้ได้ระยะตำแหน่งที่เพิ่มขึ้น ข้อดีของเอนโค้ดเดอร์ชนิดนี้ ได้แก่ ไม่ต้องมีการหาค่าตำแหน่งโฮม(Home) เนื่องจากเปิดเครื่องแล้วตำแหน่งจะยังคงเป็นตำแหน่งเดิม สัญญาณรบกวนจะไม่มีผลเนื่องจากตำแหน่งที่เปลี่ยนไปจะขึ้นกับการหมุนเท่านั้น แต่เอนโค้ดเดอร์ประเภทนี้มักมีราคาแพง

(2.1.2) Incremental Encoder เนื่องจากต้นทุนการผลิตมักเป็นตัวแปรสำคัญในงานอุตสาหกรรม โดยเราจะเห็นว่า แอพซูลูทเอนโค้ดเดอร์ จะมีข้อได้เปรียบหลายข้อก็ตามแต่ก็ยังไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากราคาค่อนข้างแพงเพราะการออกแบบระบบดิสก่อนข้างซับซ้อน จึงได้มีการออกแบบเอนโค้ดเดอร์อีกชนิดหนึ่ง นั่นก็คือ อินครีเมนทอลเอนโค้ดเดอร์ ข้อดีของแอพซูลูทเอนโค้ดเดอร์ที่เหนือกว่าอินครีเมนทอลเอนโค้ดเดอร์ ที่เห็นอย่างชัด คือ วิธีการหาตำแหน่งอ้างอิง แต่ราคาของอินครีเมนทอลเอนโค้ดเดอร์มักถูกมาก โดยหลักการทำงานที่ต่างกันอย่างชัดเจน คือการออกแบบดิสและสัญญาณที่ได้ ดิสของอินครีเมนทอลเอนโค้ดเดอร์ แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ดิสของ Incremental Encoder [7]

อินครีเมนทอลเอนโค้ดเดอร์ จะให้สัญญาณสองช่อง (บางครั้งอาจประกอบด้วยสัญญาณ Z ซึ่งใช้ในตำแหน่งอ้างอิง) สัญญาณ คือ A และ B ทิศทางการหมุนจะแทนด้วยการนำหรือตามของสัญญาณทั้งสอง ส่วนค่าตำแหน่งจะใช้วิธีสุ่มสัญญาณทั้งสองโดยอาจนับขึ้นหรือนับลงขึ้นกับทิศทางการหมุน ยกตัวอย่างเช่น นับขึ้นสำหรับการหมุนตามเข็มนาฬิกาหรือนับลงสำหรับการหมุนทวนเข็มนาฬิกา ความละเอียดของการนับขึ้นอยู่กับความละเอียดของเอนโค้ดเดอร์ ซึ่งจะระบุโดยผู้ผลิตอย่างชัดเจน นอกจากนี้การออกแบบวงจรถอดรหัสก็สามารถเพิ่มความละเอียดของการนับได้ ข้อดีอย่างเห็นได้ชัดเช่นกันก็คือ เอนโค้ดเดอร์ชนิดนี้ไม่มีข้อจำกัดเรื่องขอบเขตการนับ นั่นคือ สามารถนับขึ้นลงจนกระทั่งตัวควบคุมของเราไม่สามารถนับได้เนื่องการ โอเวอร์โพล์ของระบบซอฟต์แวร์ ซึ่งเป็นที่มาของชื่อ อินครีเมนทอลเอนโค้ดเดอร์ รวมทั้งราคาเนื่องจากจะเห็นว่า ดิสไม่ซับซ้อน แต่ข้อเสียก็คือ ต้องมีกระบวนการหาตำแหน่งอ้างอิงนั่นเอง

2.6 การเปรียบเทียบมอเตอร์ประเภทต่างๆ (Comparison of Motors)

ข้อแตกต่างในด้านอายุการใช้งานของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบมีแปรงถ่านและมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน คือ มอเตอร์แบบมีแปรงถ่านจะมีอายุการใช้งานจำกัด อันเนื่องมาจากการสึกหรอของแปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ ส่วนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ และมอเตอร์สเตปเปอร์ เป็นมอเตอร์ชนิดที่ไม่ใช้แปรงถ่าน จึงมีอายุการใช้งานที่ยาวนานและทนทานกว่า โดยที่อายุการใช้งานนั้นจะขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานของแบร์ริง ตารางด้านล่างได้นำเสนอผลการเปรียบเทียบคุณลักษณะของมอเตอร์ประเภทต่างๆ ไว้ดังนี้

ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบคุณลักษณะของมอเตอร์ประเภทต่างๆ

	มอเตอร์ สเตปเปอร์	มอเตอร์แบบ มีแปรงถ่าน	มอเตอร์แบบ ไร้แปรงถ่าน
ราคา	ถูก	ปานกลาง	แพง
ความต่อเนื่องในการหมุน	ต่ำ	ดี-ดีมาก	ดี-ดีมาก
ความเร็ว	0-1,500 rpm	0-6,000 rpm	0-10,000 rpm
แรงบิด	สูง (ลดลงตามความเร็ว)	ปานกลาง	สูง
สัญญาณป้อนกลับ	ไม่มี	ตำแหน่ง หรือ ความเร็ว	การสลับทิศกระแส และตำแหน่งหรือ ความเร็ว
การบำรุงรักษา	ไม่มี	ต้องการ	ไม่มี
ความสะอาด	ดีมาก	มีฝุ่นจากแปรงถ่าน	ดีมาก

วิธีการดำเนินโครงการ

ในส่วนของรายละเอียดและหลักการรวมถึงทฤษฎีต่างๆ ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ส่วนในบทนี้ผู้จัดทำจึงได้เริ่มดำเนินการออกแบบวิธีการทดลองและอธิบายเกี่ยวกับรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองในกรณีศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงโหลดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ซึ่งรายละเอียดการออกแบบวิธีการทดลองมีดังนี้

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

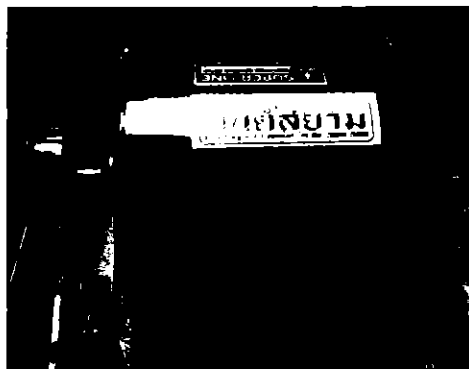
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองมีหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ และเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง มีดังนี้

1. ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน



รูปที่ 3.1 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

2. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor)



รูปที่ 3.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

16753466

ร/ส.

ก/37๗

255๓

3. พูลเลย์ (Pulley)



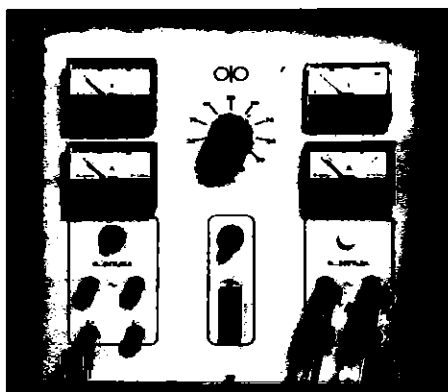
รูปที่ 3.3 พูลเลย์

4. สายพาน



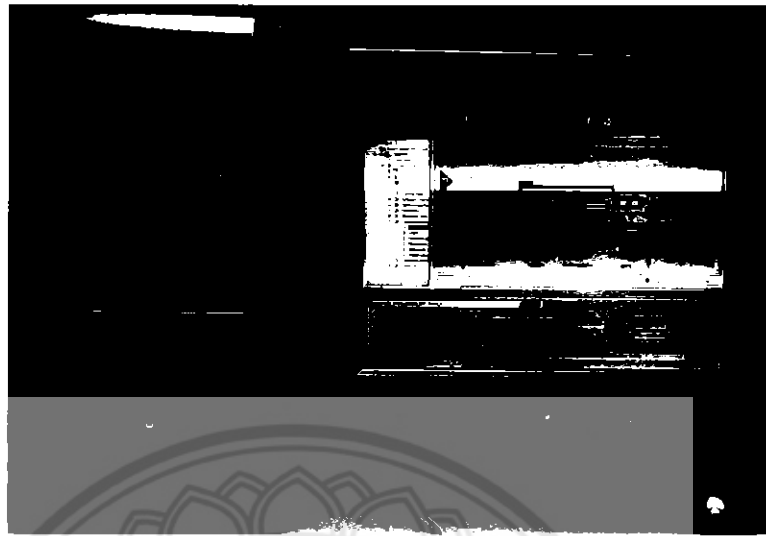
รูปที่ 3.4 สายพาน

5. เครื่องจ่ายไฟ (Supply)



รูปที่ 3.5 เครื่องจ่ายไฟ (Supply)

6. คอมพิวเตอร์ (Computer)



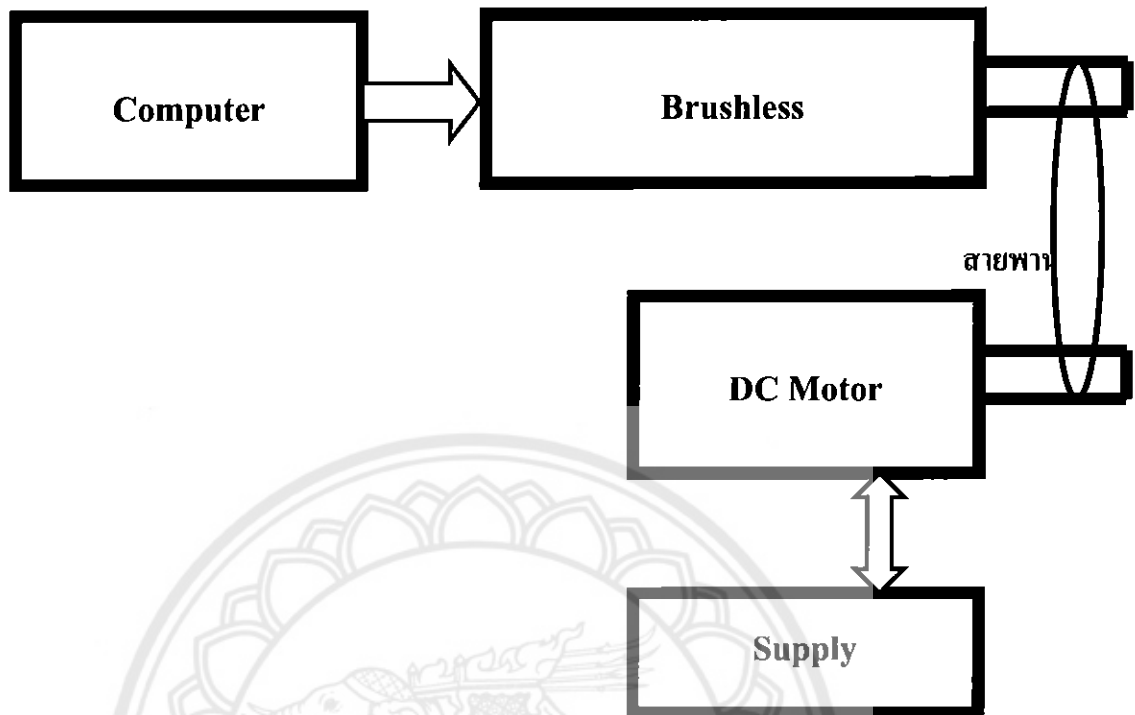
รูปที่ 3.6 คอมพิวเตอร์

7. เชื่อมต่อโหนดเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน



รูปที่ 3.7 เชื่อมต่อ โหนดเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

3.2 รูปแบบโครงงาน



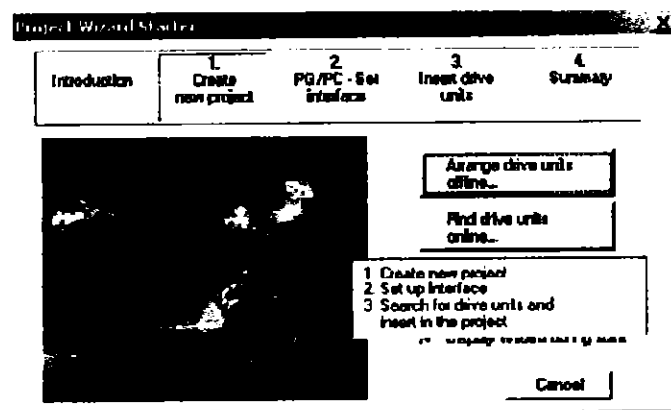
รูปที่ 3.8 รูปแบบโครงงาน

จากรูปที่ 3.8 แสดงรูปแบบโครงงานที่ใช้ในการทดลอง ในกรณีศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงโหลดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน โดยใช้โปรแกรม STARTER เป็นตัวควบคุมการทำงานของมอเตอร์ โดยเป็นการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ จากนั้นนำดีซีมอเตอร์ (DC Motor) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวขับโหลด มาเชื่อมต่อเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านด้วยสายพานและจากนั้นก็ทำการปรับค่าโหลด โดยมีการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงจุดสูงสุดที่โหลดสามารถปรับได้ในแต่ละความเร็วรอบ จากนั้นก็ทำการเก็บข้อมูล โดยการทราบค่าแรงบิด (Torque) ค่ากระแส (Current) ค่าแรงดัน (Voltage) และนำข้อมูลที่ได้ไปเขียนเป็นรูปกราฟ เพื่อที่จะนำมาวิเคราะห์ถึงการเปลี่ยนแปลงโหลดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

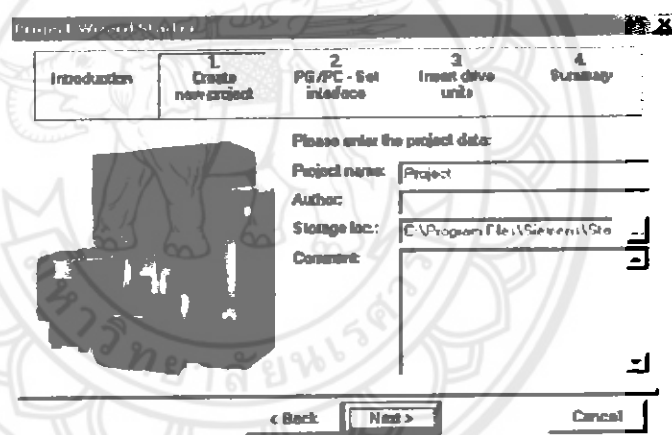
3.3 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม STARTER ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์

เมื่อเรียกโปรแกรมในส่วน “STARTER” ขึ้นมา ไปที่แถบเมนูที่คำว่า “Project” แล้วกดเลือกที่ “New with Wizard”

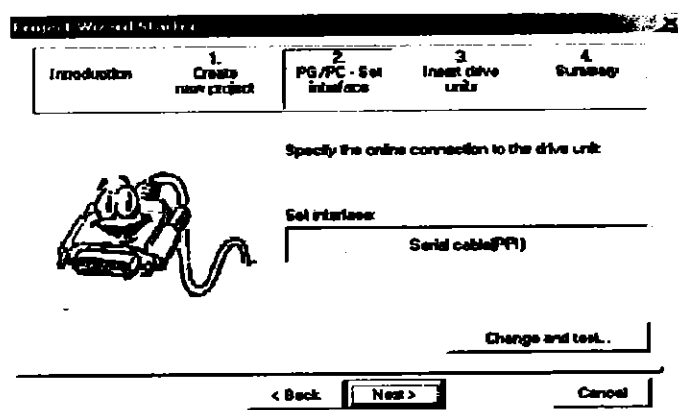
ขั้นตอนที่ 1 : กดเลือก “Find drive units online” ในส่วนของ Create new project



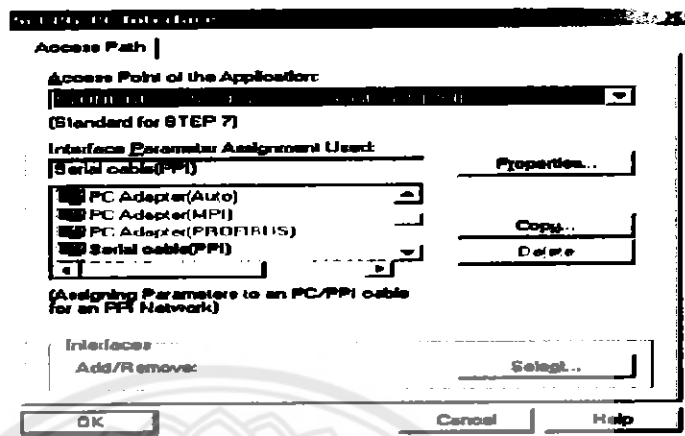
ขั้นตอนที่ 2 : ต่อเนื่องมาจากขั้นตอนที่ 1 ใส่ชื่องานโปรเจ็คตรงที่ช่อง Project name และกรอกข้อมูลที่ช่อง Author กับช่อง Comment (ถ้าจำเป็น) แล้วกดเลือกที่คำว่า “Next”



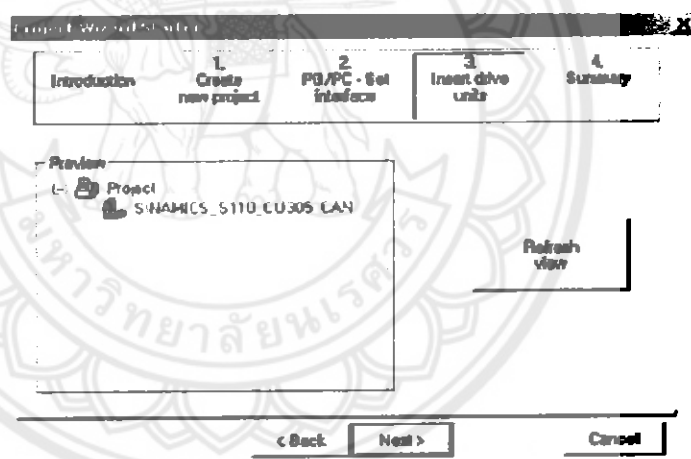
ขั้นตอนที่ 3 : ในตัวอย่างรูปข้างล่างนี้ เป็นการเลือกใช้สาย RS232 ในการเชื่อมต่อสื่อสารข้อมูล ฉะนั้นในช่อง Set interface จึงเลือกที่คำว่า “Serial cable(PPI)”



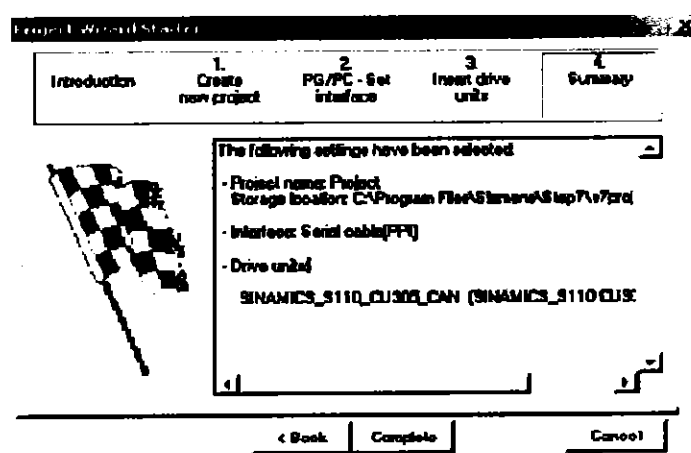
ขั้นตอนที่ 4 : แต่เราสามารถกดเลือกที่ “Change and test” ได้ในกรณีที่ต้องการ Set interface ใหม่ดังรูปข้างล่างนี้



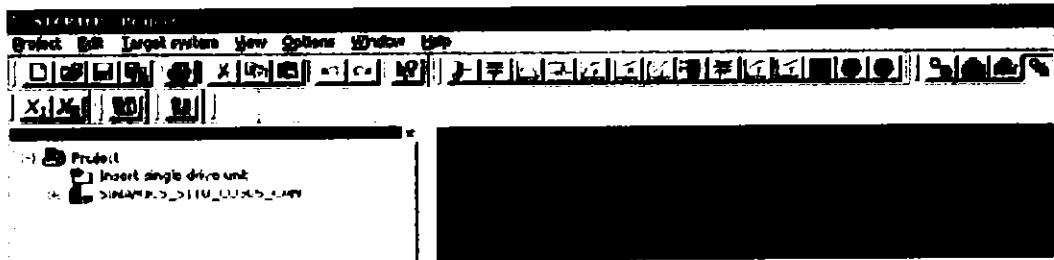
ขั้นตอนที่ 5 : ในส่วนของ Insert drive units กดเลือกที่คำว่า “Next”



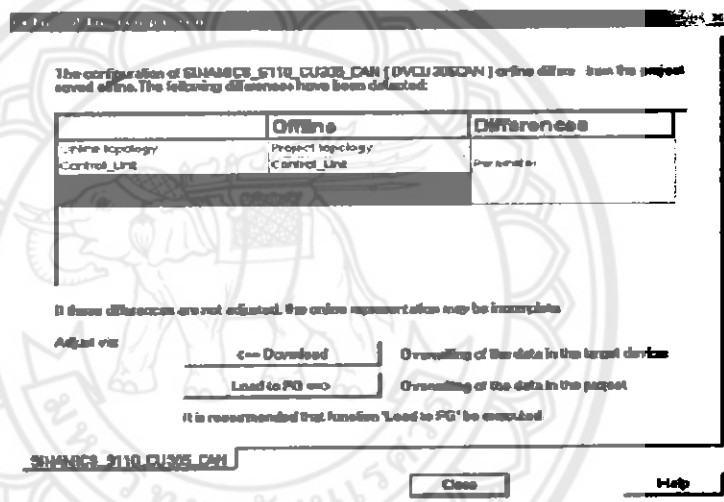
ขั้นตอนที่ 6 : ในส่วนของ Summary กดเลือกที่คำว่า “Complete”



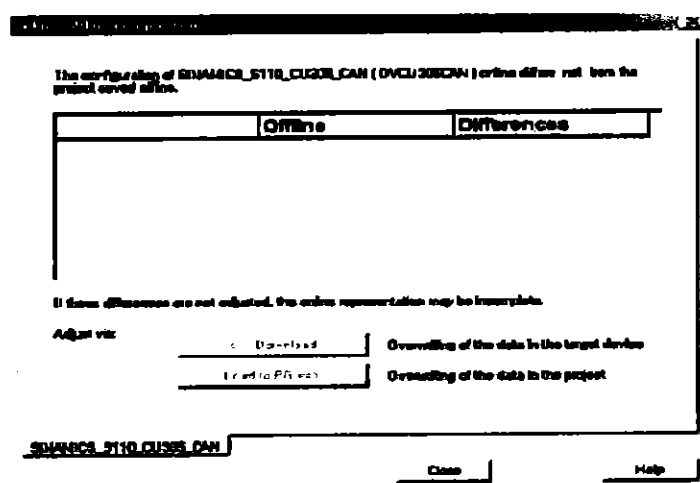
ขั้นตอนที่ 7 : หลังจากกดคำว่า “Finish” จะปรากฏหน้าจอดังรูปข้างล่างนี้



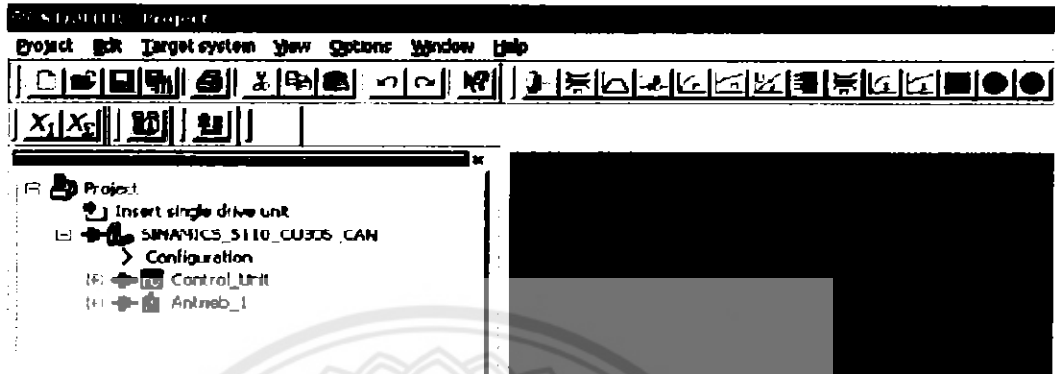
ขั้นตอนที่ 8 : หลังจากทำการ Configuration เรียบร้อยแล้ว ไปที่แถบเมนูที่คำว่า “Project” แล้วกดเลือกที่ “Connect to target system” จะปรากฏหน้าจอดังรูปข้างล่างนี้



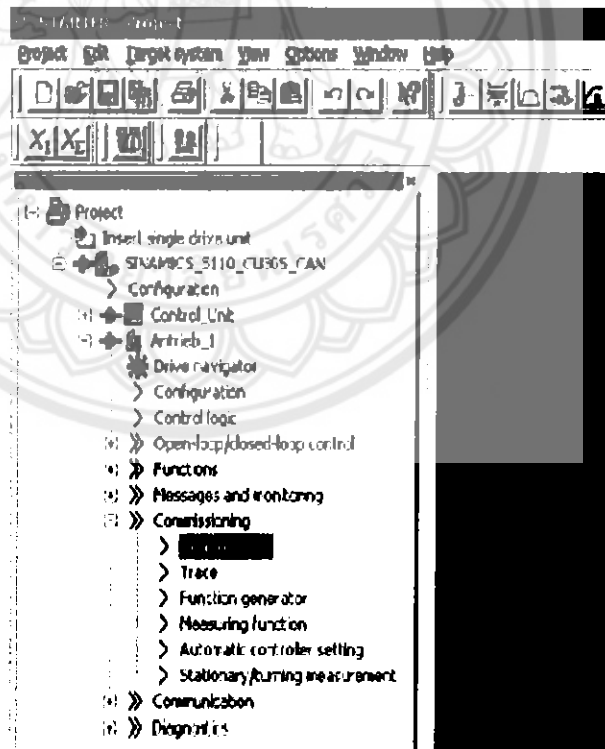
ขั้นตอนที่ 9 : เมื่อกดเลือกที่คำว่า “Load to PG” drive configuration จะโหลดข้อมูลไปที่ STERTEC จะปรากฏหน้าจอดังรูปข้างล่างนี้



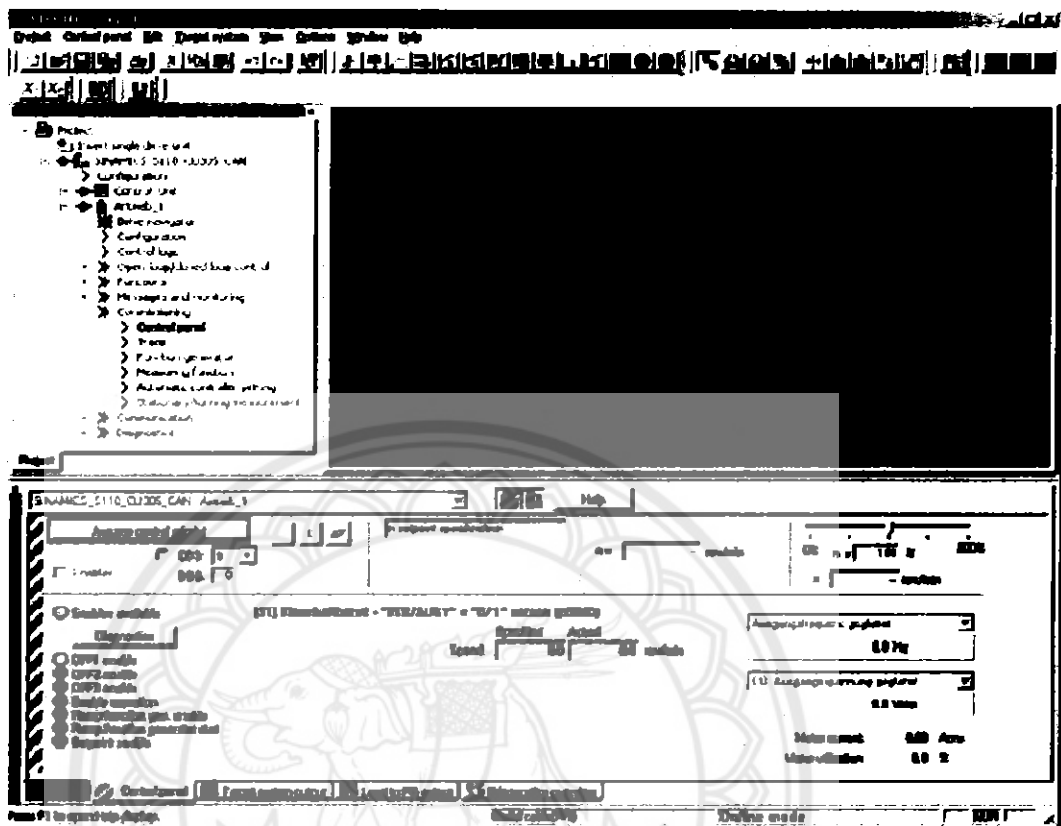
ขั้นตอนที่ 10 : ในส่วนของ STERTER ด้านล่างคำว่า “Configuration” จะแสดงคำว่า “Control_Unit” และ “Drive1” หรือ “Antrieb_1” ดังรูปข้างล่างนี้ แสดงว่าการ Configuration สมบูรณ์แล้ว



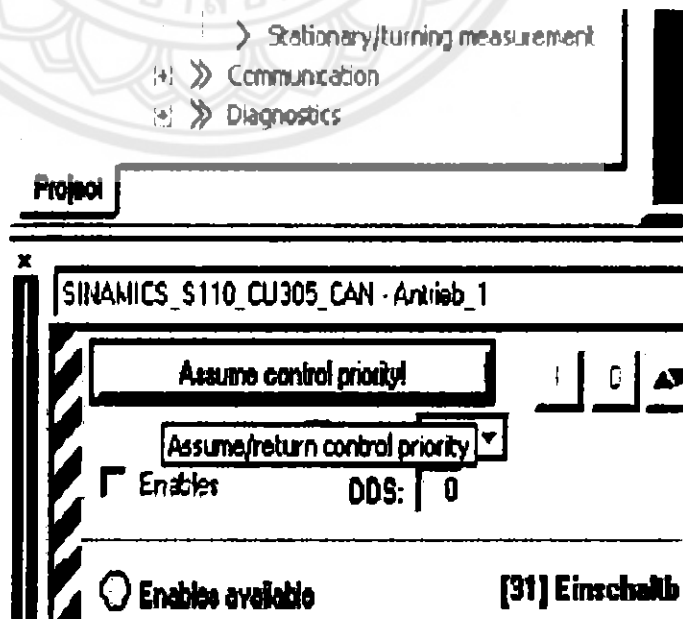
ขั้นตอนที่ 11 : ขณะนี้เราสามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์โดยใช้ “Control panel ” double-click ที่ “Control panel ”



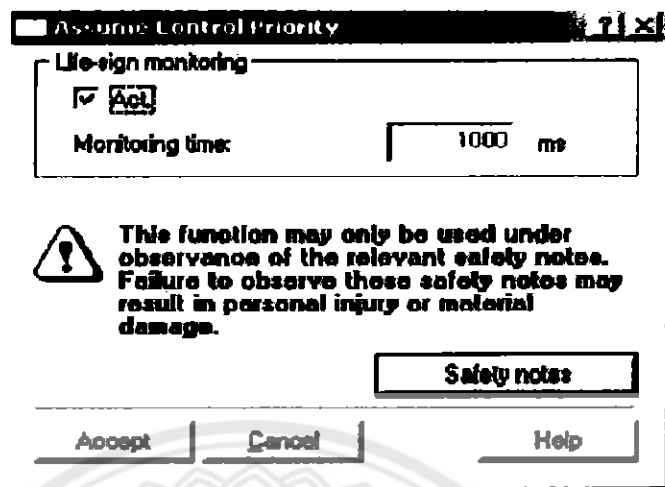
ขั้นตอนที่ 12 : หลังจาก double-click แล้ว จะปรากฏหน้าจอของ Control panel ดังรูปข้างล่างนี้



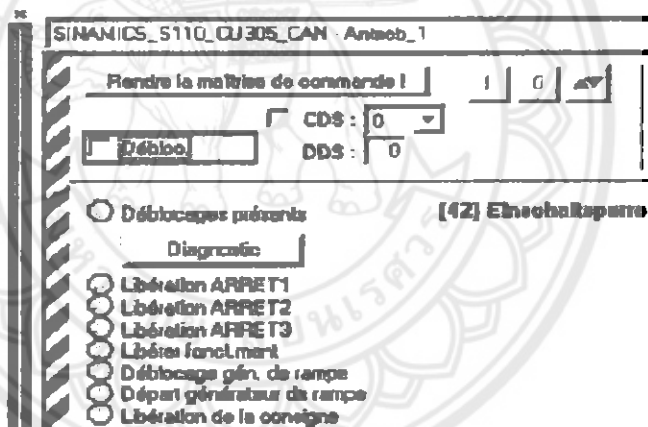
ขั้นตอนที่ 13 : กดเลือกที่คำว่า “Assume control priority!” บนแถบสีเทา



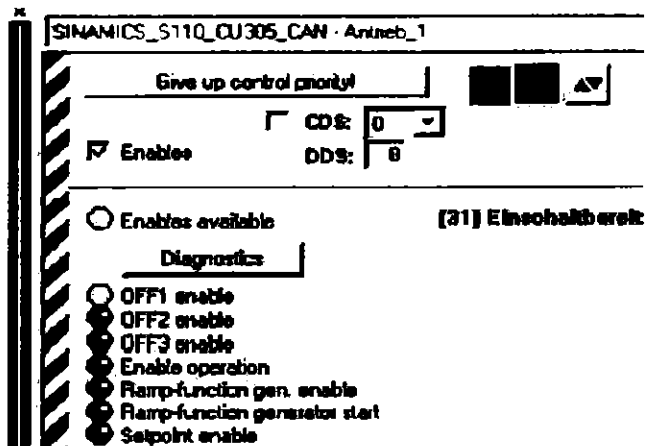
ขั้นตอนที่ 14 : จะปรากฏหน้าจอดังรูปข้างล่างนี้ แล้วกดเลือกที่คำว่า “Accept”



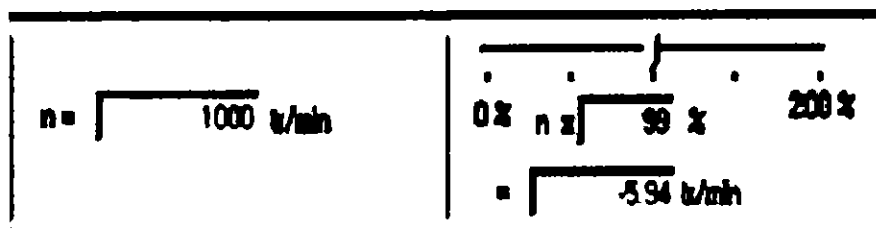
ขั้นตอนที่ 15 : หลังจากกด Accept แล้ว จะปรากฏหน้าจอดังรูปข้างล่างนี้



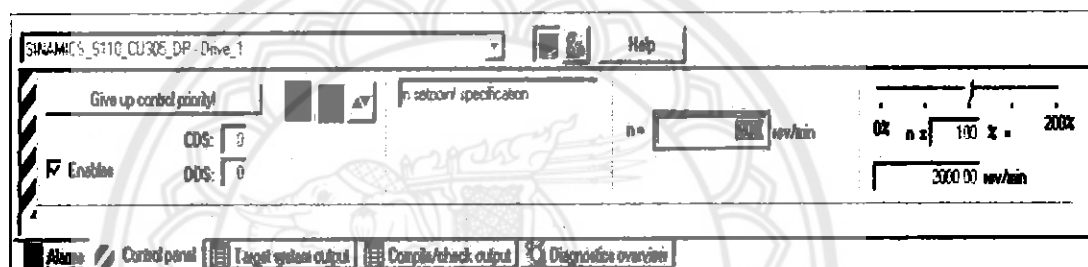
ขั้นตอนที่ 16 : กดเลือกที่คำว่า “Enables”



ขั้นตอนที่ 17 : เลือกใส่ค่าพารามิเตอร์ “n=.....” หรือค่าความเร็ว(speed) แล้วกด Enter



ขั้นตอนที่ 18 : เราสามารถเริ่มเดินเครื่องมอเตอร์ (Start) โดยการเลือกปุ่มสีเขียว ■ และหยุดเครื่องมอเตอร์ (Stop) โดยการเลือกปุ่มสีแดง ■



Press F1 to open Help display.

คลิกปุ่มสีเขียว (Start) เพื่อเริ่มเดินเครื่อง / คลิกปุ่มสีแดง (Stop) เพื่อหยุดเดินเครื่อง / PC Adapter (PROFIBUS) / PC Adapter (PROF) Online mode

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

ในส่วนรายละเอียดของอุปกรณ์และรูปแบบโครงงานที่ใช้ในการทดลองรวมถึงขั้นตอนการใช้โปรแกรมในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ส่วนในบทนี้ผู้จัดทำจึงได้เริ่มดำเนินการเก็บผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดลองในสภาวะมีโหลด (Load)

ปรับค่า Speed ใน โปรแกรม STARTER	ปรับค่า โหลด เป็น %	โหลดที่ ปรับได้ (Nm)	Actual Torque value (Nm)	Actual Speed value (rev/min)	กระแส (Arms)	แรงดัน (Vrms)	ความถี่ (Hz)
200	0%	0	0.07	190.3	0.14	8.5	9.5
	5%	0	0.08	199.0	0.18	9.2	10.0
	10%	0.09	0.11	196.0	0.23	9.7	9.8
	15%	0.14	0.18	196.7	0.40	11.5	9.8
	20%	0.32	0.32	199.9	0.69	14.2	10.0
	25%	0.54	0.46	197.8	0.99	17.0	10.1
	30%	0.62	0.62	198.0	1.34	19.8	10.0
400	0%	0	0.07	395.9	0.15	14.6	19.8
	5%	0	0.08	398.0	0.17	14.9	19.8
	10%	0.06	0.09	398.4	0.20	15.2	19.9
	15%	0.10	0.16	399.8	0.34	16.7	19.9
	20%	0.27	0.27	397.2	0.58	19.0	19.9
	25%	0.48	0.41	399.6	0.90	22.0	20.1
	30%	0.58	0.61	398.2	1.33	25.8	20.0
600	0%	0	0.07	596.8	0.16	20.5	29.9
	5%	0	0.08	597.6	0.17	20.5	29.9

ปรับค่า Speed ใน โปรแกรม STARTER	ปรับค่า โหลด เป็น %	โหลดที่ ปรับได้ (Nm)	Actual Torque value (Nm)	Actual Speed value (rev/min)	กระแส (Arms)	แรงดัน (Vrms)	ความถี่ (Hz)
600	10%	0.02	0.09	599.3	0.20	21.0	30.1
	15%	0.07	0.14	594.0	0.31	22.2	29.8
	20%	0.19	0.22	594.5	0.48	23.8	29.8
	25%	0.35	0.34	596.7	0.74	26.3	29.9
	30%	0.54	0.50	598.3	1.08	29.5	30.1
800	0%	0	0.08	797.4	0.16	26.3	39.8
	5%	0	0.09	798.5	0.19	26.5	40.0
	10%	0.03	0.10	799.8	0.21	26.9	40.0
	15%	0.06	0.13	796.7	0.28	27.6	39.9
	20%	0.15	0.18	797.5	0.39	28.7	39.9
	25%	0.29	0.30	797.6	0.64	31.2	39.9
	30%	0.45	0.41	793.0	0.89	33.3	39.8
1000	0%	0	0.08	997.3	0.18	32.2	50.0
	5%	0	0.09	996.8	0.19	32.3	49.9
	10%	0	0.09	997.0	0.21	32.5	50.0
	15%	0.05	0.12	997.3	0.26	33.2	49.9
	20%	0.11	0.17	997.8	0.36	34.2	50.0
	25%	0.23	0.26	998.7	0.56	36.0	49.9
	30%	0.35	0.35	998.7	0.75	37.9	50.1
	35%	0.53	0.46	999.4	1.01	40.3	49.9
1200	0%	0	0.09	1198.3	0.19	38.0	59.9
	5%	0	0.09	1198.0	0.19	38.1	60.0
	10%	0	0.09	1197.1	0.20	38.2	60.0
	15%	0.03	0.12	1199.0	0.26	38.7	60.1
	20%	0.09	0.16	1201.0	0.35	39.7	59.9

ปรับค่าSpeed ใน โปรแกรม STARTER	ปรับค่า โหลด เป็น %	โหลดที่ ปรับได้ (Nm)	Actual Torque value (Nm)	Actual Speed value (rev/min)	กระแส (Arms)	แรงดัน (Vrms)	ความถี่ (Hz)
1200	25%	0.19	0.24	1199.6	0.51	41.3	60.1
	30%	0.31	0.31	1199.3	0.68	42.9	60.0
	35%	0.45	0.41	1197.6	0.89	45.1	60.0
	40%	0.62	0.53	1198.7	1.16	47.5	59.9
1400	0%	0	0.09	1397.7	0.20	43.8	70.1
	5%	0	0.09	1399.5	0.20	43.8	70.2
	10%	0	0.10	1398.3	0.21	44.0	70.1
	15%	0.03	0.11	1399.8	0.25	44.4	69.9
	20%	0.08	0.15	1399.6	0.33	45.2	70.0
	25%	0.17	0.21	1399.6	0.46	46.6	70.0
	30%	0.27	0.28	1398.4	0.61	48.0	70.2
	35%	0.39	0.37	1398.3	0.80	50.0	70.0
	40%	0.53	0.48	1398.2	1.04	52.1	70.0
	45%	0.71	0.60	1398.5	1.32	54.8	70.1

4.2 ผลการทดลองในสภาวะไม่มีโหลด (No Load)

ปรับค่าSpeed ในโปรแกรม STARTER	แรงบิด หรือ Torque (Nm)	กระแส (Arms)	แรงดัน (Vrms)	ความถี่ (Hz)
200	0.02	0.06	7.7	9.9
400	0.03	0.07	13.6	19.9
600	0.03	0.08	19.8	29.8
800	0.03	0.09	25.9	39.8
1000	0.04	0.10	31.9	49.9
1200	0.04	0.11	37.8	59.9
1400	0.04	0.12	43.1	70.0

4.3 ตัวอย่างสัญญาณแรงดันที่วัดได้

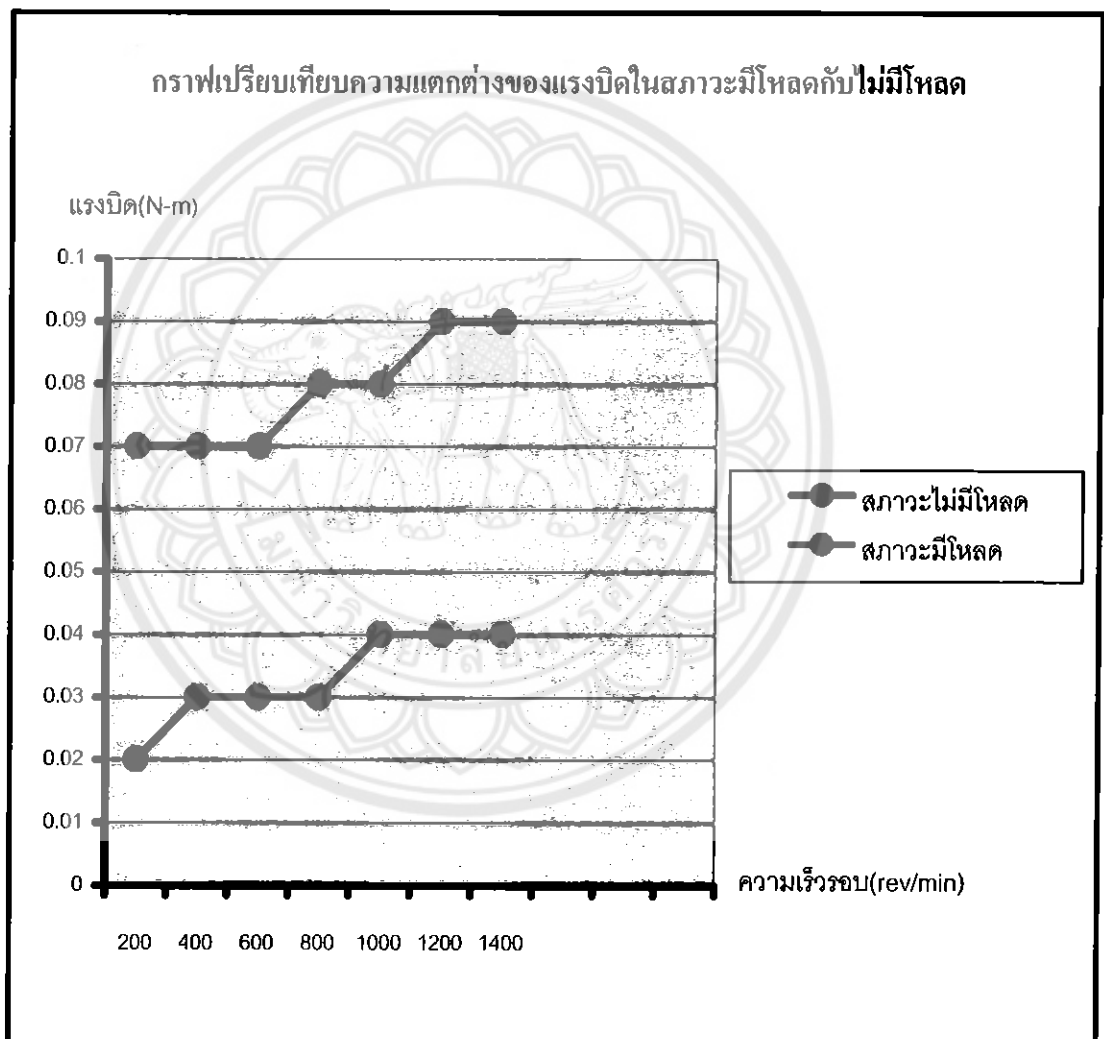


4.4 วิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

4.4.1 ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของแรงบิดในสภาวะมีโหลดกับไม่มีโหลด

จากกราฟรูปนี้จะเป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างของแรงบิดในสภาวะมีโหลดกับสภาวะไม่มีโหลด

จากลักษณะของกราฟจะเห็นได้ว่า ในสภาวะไม่มีโหลดจะมีค่าแรงบิดหรือค่าทอร์กต่ำกว่าในสภาวะมีโหลด แสดงว่า ในสภาวะที่มีโหลดข้อมส่งผลให้มอเตอร์มีค่าทอร์กที่สูงขึ้น

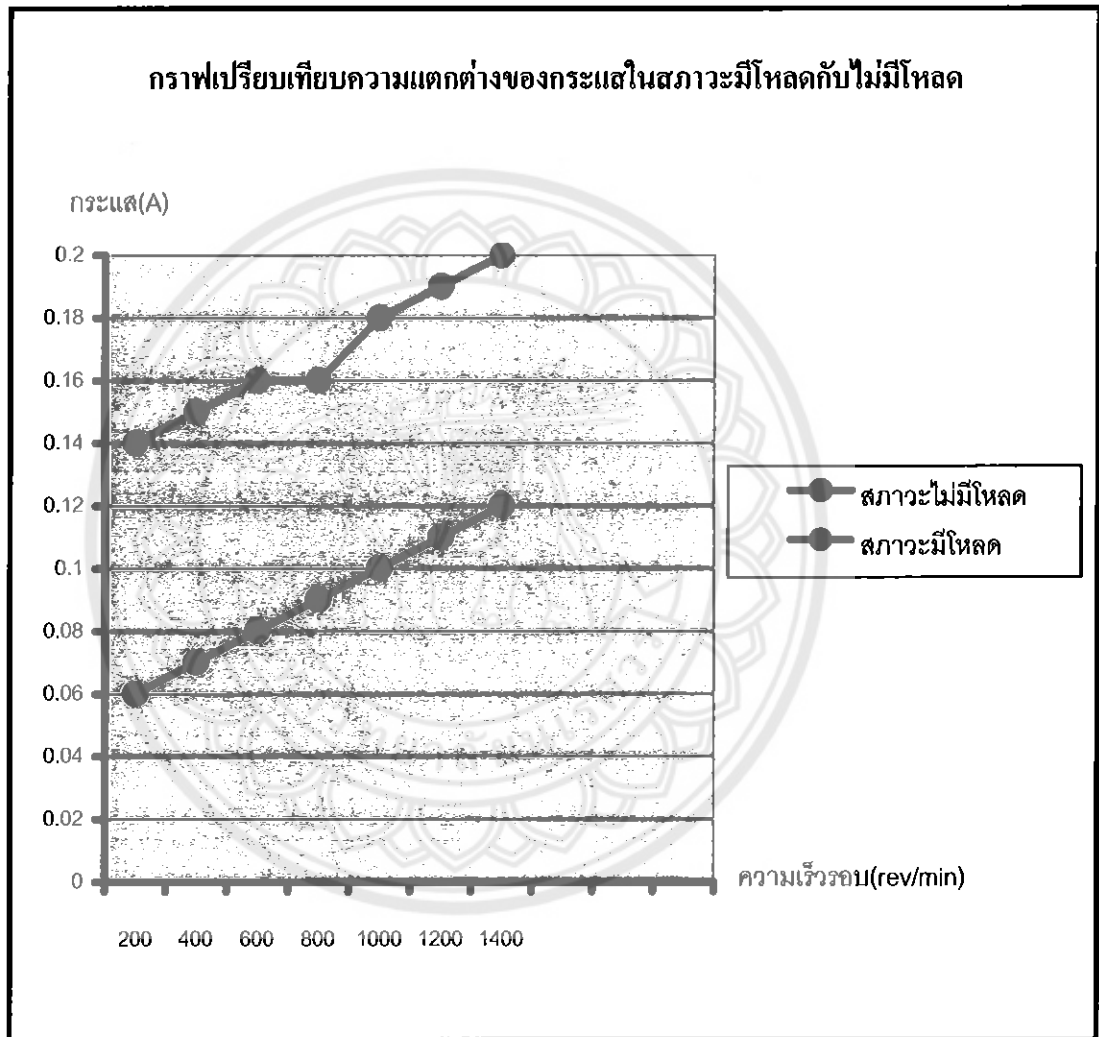


รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบความแตกต่างของแรงบิดในสภาวะมีโหลดกับไม่มีโหลด

4.4.2 ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของกระแสในสภาวะมีโหลดกับไม่มีโหลด

จากกราฟรูปนี้จะเป็นการเปรียบเทียบความแตกต่างของกระแสในสภาวะมีโหลดกับสภาวะไม่มีโหลด

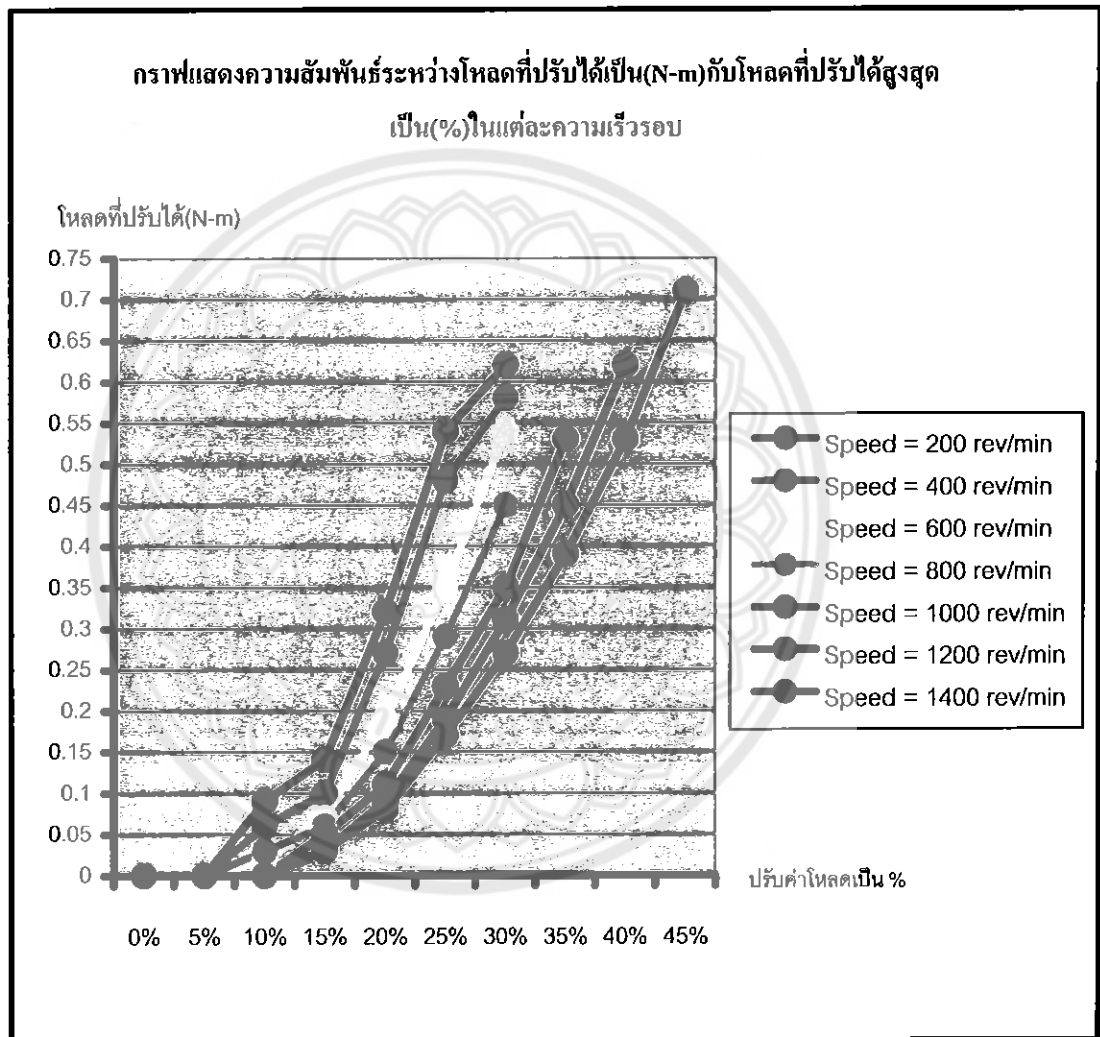
จากลักษณะของกราฟจะเห็นได้ว่า ในสภาวะไม่มีโหลดจะมีค่ากระแส(Current) ต่ำกว่าในสภาวะมีโหลด แสดงว่า ในสภาวะที่มีโหลดย่อมส่งผลให้มอเตอร์มีค่ากระแส(Current) ที่สูงขึ้น



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบความแตกต่างของกระแสในสภาวะมีโหลดกับไม่มีโหลด

4.4.3 ผลการทดลองเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโหลดที่ปรับได้เป็น(N-m) กับโหลดที่ปรับได้สูงสุดเป็น(%)ในแต่ละความเร็วรอบ

จากกราฟรูปนี้จะเป็นการเปรียบเทียบการปรับค่าโหลดที่เป็นเปอร์เซ็นต์(%) ที่เราสามารถปรับได้สูงสุดในแต่ละความเร็วรอบ แล้วจากนั้นค่าโหลดที่เป็นเปอร์เซ็นต์(%) สามารถนำไปเทียบอ่านค่าโหลดที่เป็นนิวตัน-เมตร(N-m) ได้ โดยข้อมูลที่ได้อ่านค่าจากตัวมอเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวขับโหลด

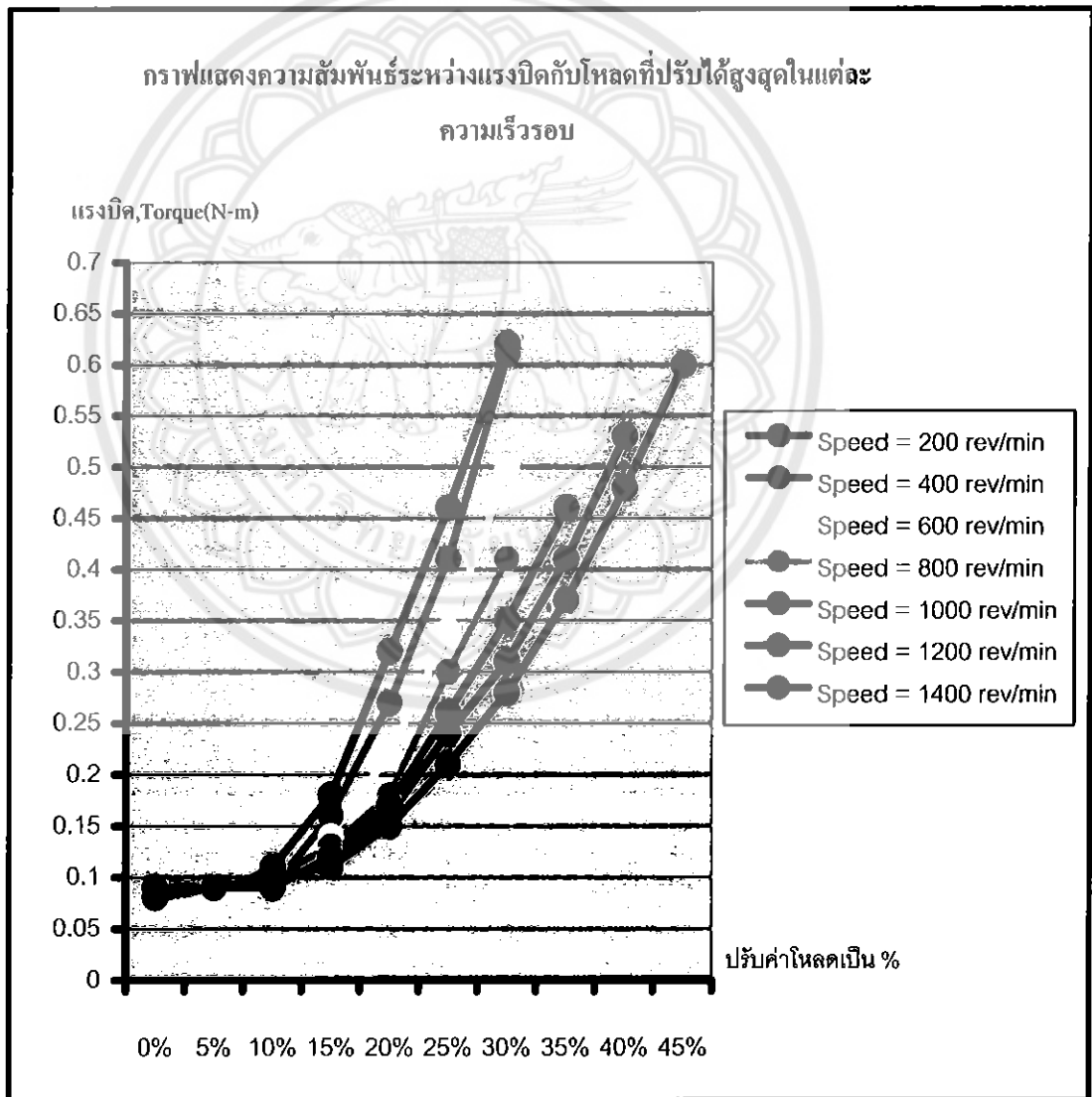


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างโหลดที่ปรับได้เป็น(N-m)กับโหลดที่ปรับได้สูงสุดเป็น(%)ในแต่ละความเร็วรอบ

4.4.4 ผลการทดลองเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับโหลดที่ปรับได้สูงสุดในแต่ละความเร็วรอบ

จากกราฟรูปนี้จะเป็นการเปรียบเทียบการปรับค่าโหลดที่เป็นเปอร์เซ็นต์(%) ที่เราสามารถปรับได้สูงสุดในแต่ละความเร็วรอบ โดยข้อควรระวังในการปรับโหลดนั้นห้ามปรับเกินพิกัดกระแส (Rated Motor Current = 1.40 Arms) ของมอเตอร์ แล้วจากนั้น เราสามารถอ่านค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจริง (Actual Torque value) ได้จากโปรแกรม STARTER ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบ(Speed) ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

เมื่อมอเตอร์มีโหลดมาก แรงบิดจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเร็วรอบลดลง ในทางตรงข้ามกัน ถ้ามอเตอร์มีโหลดลดลง แรงบิดก็จะลดลงตาม แต่ทำให้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้น



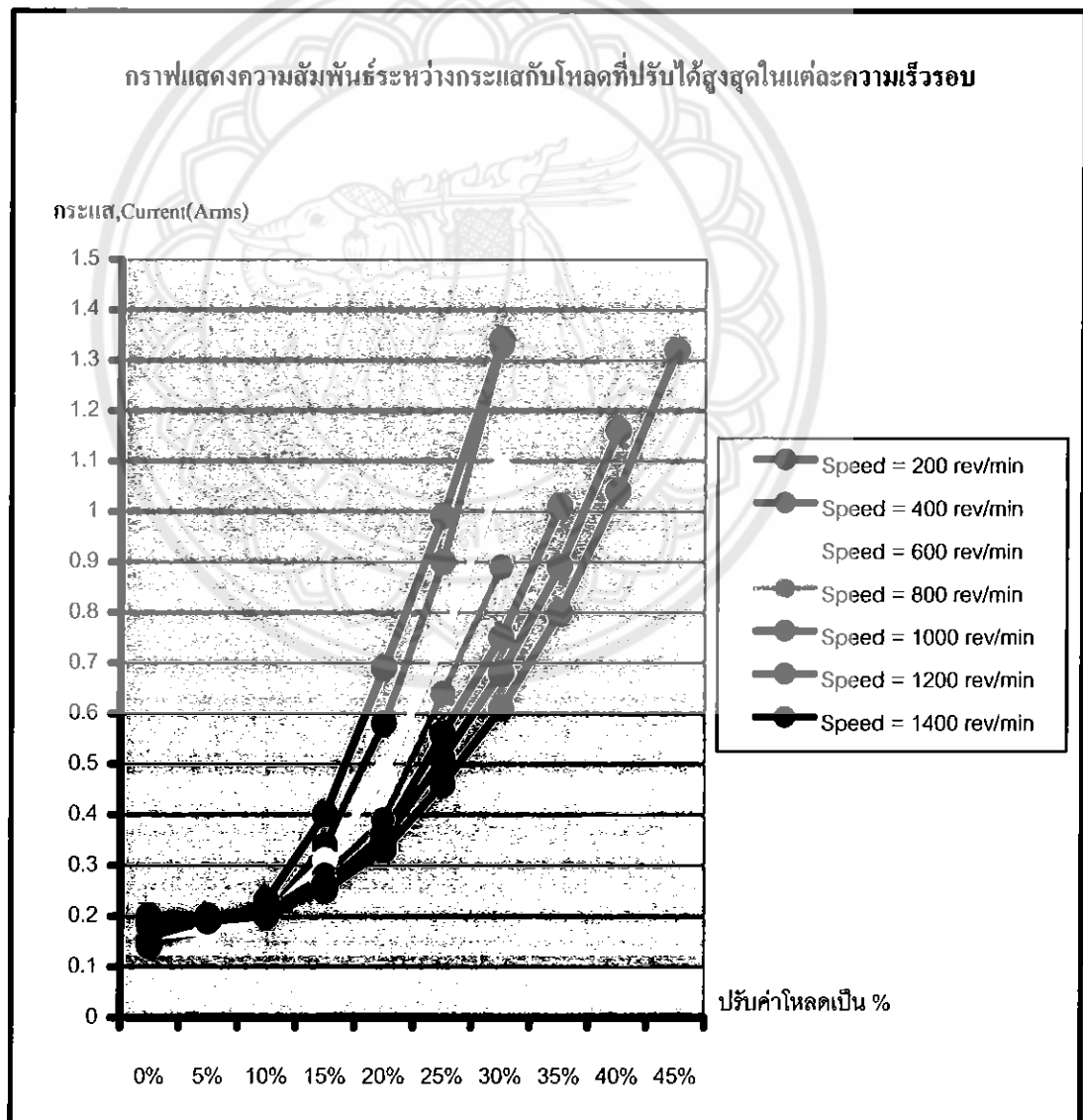
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับ โหลดที่ปรับได้สูงสุดในแต่ละความเร็วรอบ

4.4.5 ผลการทดลองเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับโหลดที่ปรับได้สูงสุดในแต่ละ

ความเร็วรอบ

จากกราฟรูปนี้จะเป็นการปรับค่าโหลดที่เป็นเปอร์เซ็นต์(%) ที่เราสามารถปรับได้สูงสุดในแต่ละความเร็วรอบ โดยข้อควรระวังในการปรับโหลดนั้นห้ามปรับเกินพิกัดกระแส (Rated Motor Current = 1.40 Arms) ของมอเตอร์ แล้วจากนั้น เราสามารถอ่านค่ากระแส(Current) ได้จากโปรแกรม STARTER ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการความเร็วรอบ(Speed) ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

เมื่อมอเตอร์มีโหลดมาก กระแสจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเร็วรอบลดลง ในทางตรงข้ามกัน ถ้ามอเตอร์มีโหลดลดลง กระแสก็จะลดลงตาม แต่จะทำความเร็วรอบเพิ่มขึ้น

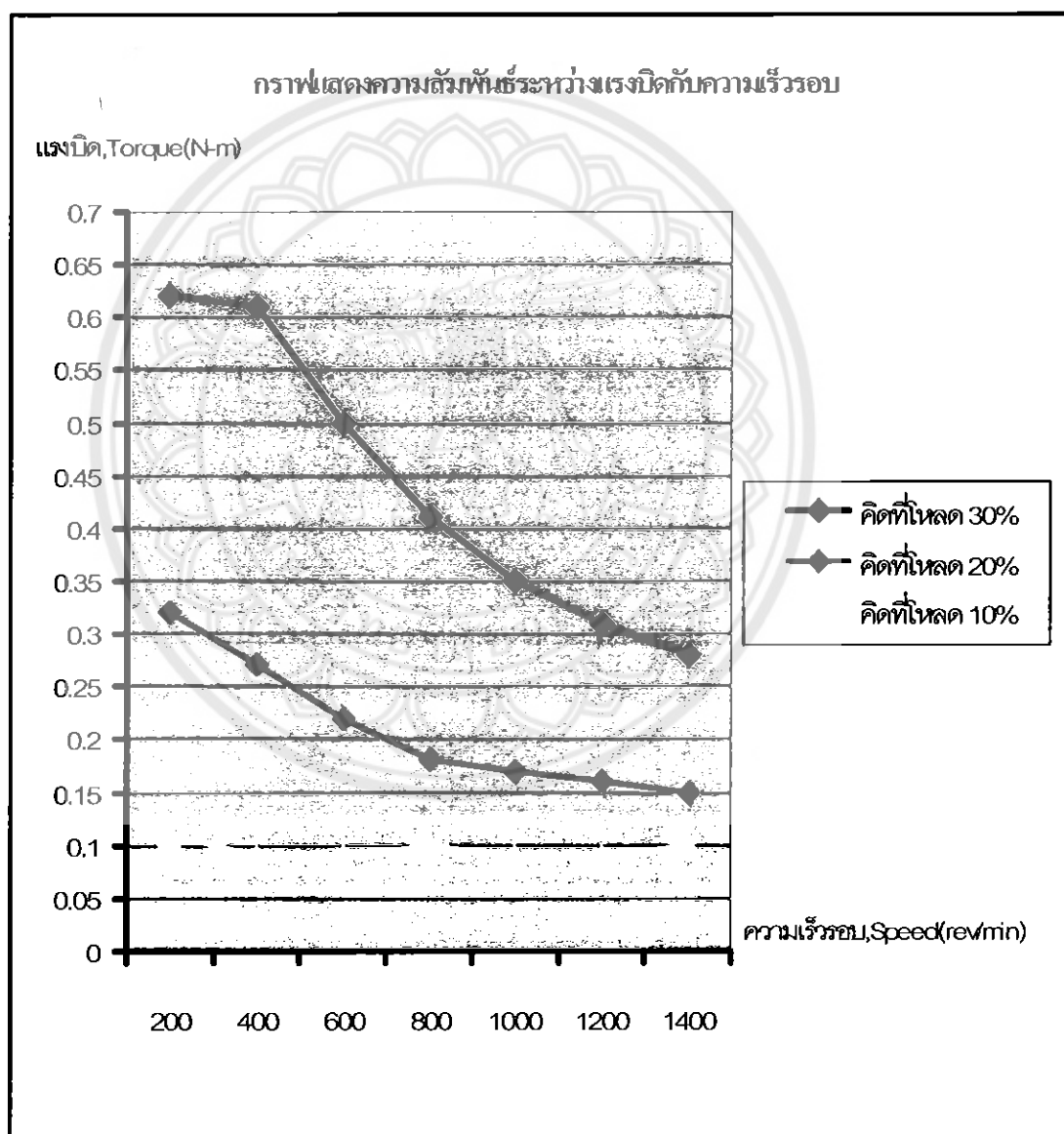


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับโหลดที่ปรับได้สูงสุดในแต่ละความเร็วรอบ

4.4.6 ผลการทดลองเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ

จากกราฟรูปนี้จะเป็นการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 30% , 20% และ 10% โดยแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ

เมื่อพิจารณากราฟข้างต้นที่โหลด 30% จะเห็นได้ว่า แรงบิดจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นก็ต่อเมื่อมีความเร็วรอบที่ลดลง ในทางตรงข้ามกันแรงบิดจะมีค่าลดลงก็ต่อเมื่อมีความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น แต่ถ้าพิจารณาที่โหลด 10% หรือในกรณีที่มีโหลดน้อยๆ จะเห็นได้ว่า แรงบิดจะมีค่าค่อนข้างเกือบคงที่ ในขณะที่ความเร็วรอบมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ

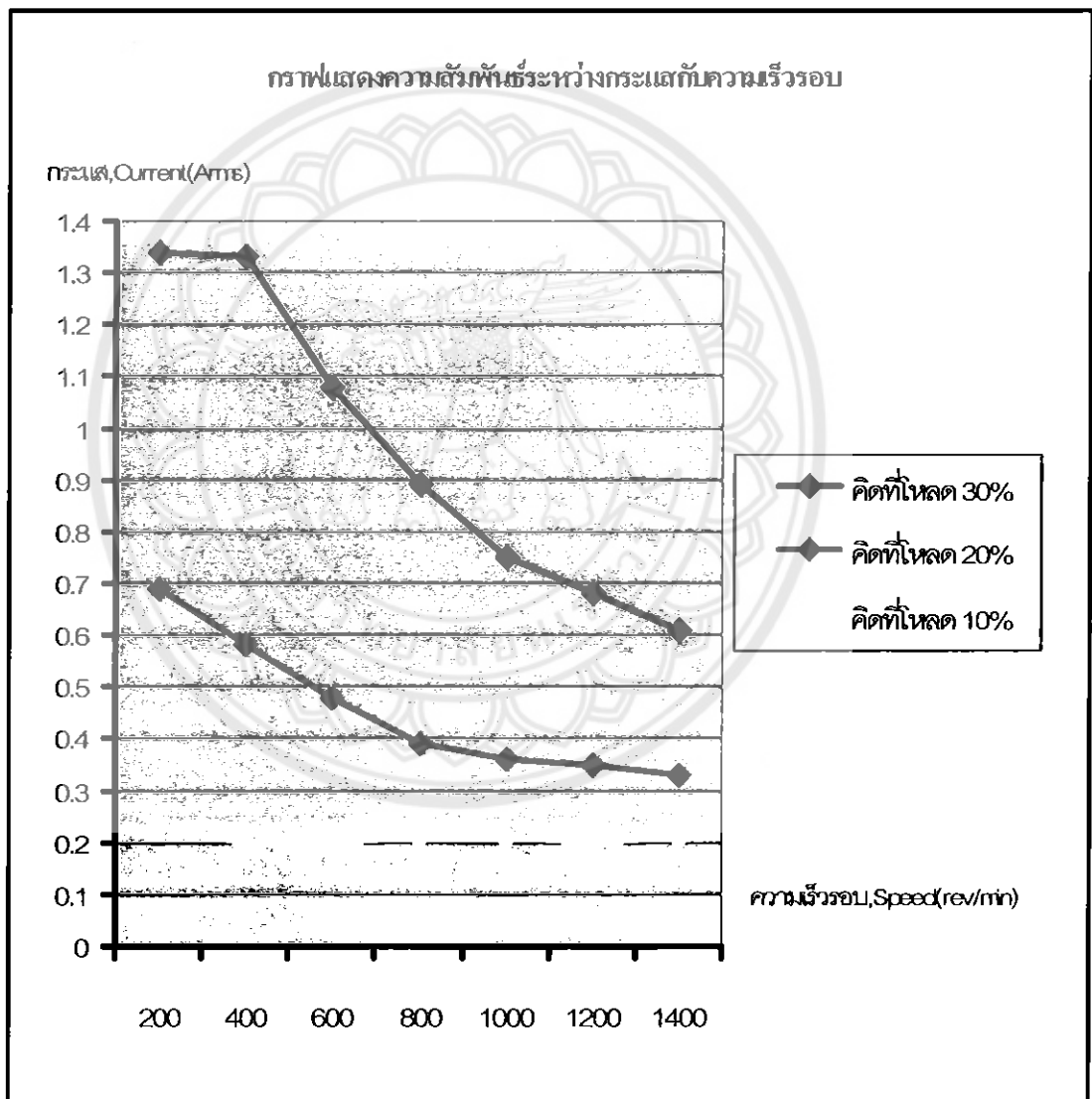


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบ

4.4.7 ผลการทดลองเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความเร็วรอบ

จากกราฟรูปนี้จะเป็นการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 30% , 20% และ 10% โดยแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความเร็วรอบ

เมื่อพิจารณากราฟข้างต้นที่โหลด 30% จะเห็นได้ว่า กระแสจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นก็ต่อเมื่อมีความเร็วรอบที่ลดลง ในทางตรงข้ามกันกระแสจะมีค่าลดลงก็ต่อเมื่อมีความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้น แต่ถ้าพิจารณาที่โหลด 10% หรือในกรณีที่มีโหลดน้อยๆ จะเห็นได้ว่า กระแสจะมีค่าค่อนข้างเกือบคงที่ ในขณะที่ความเร็วรอบมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ

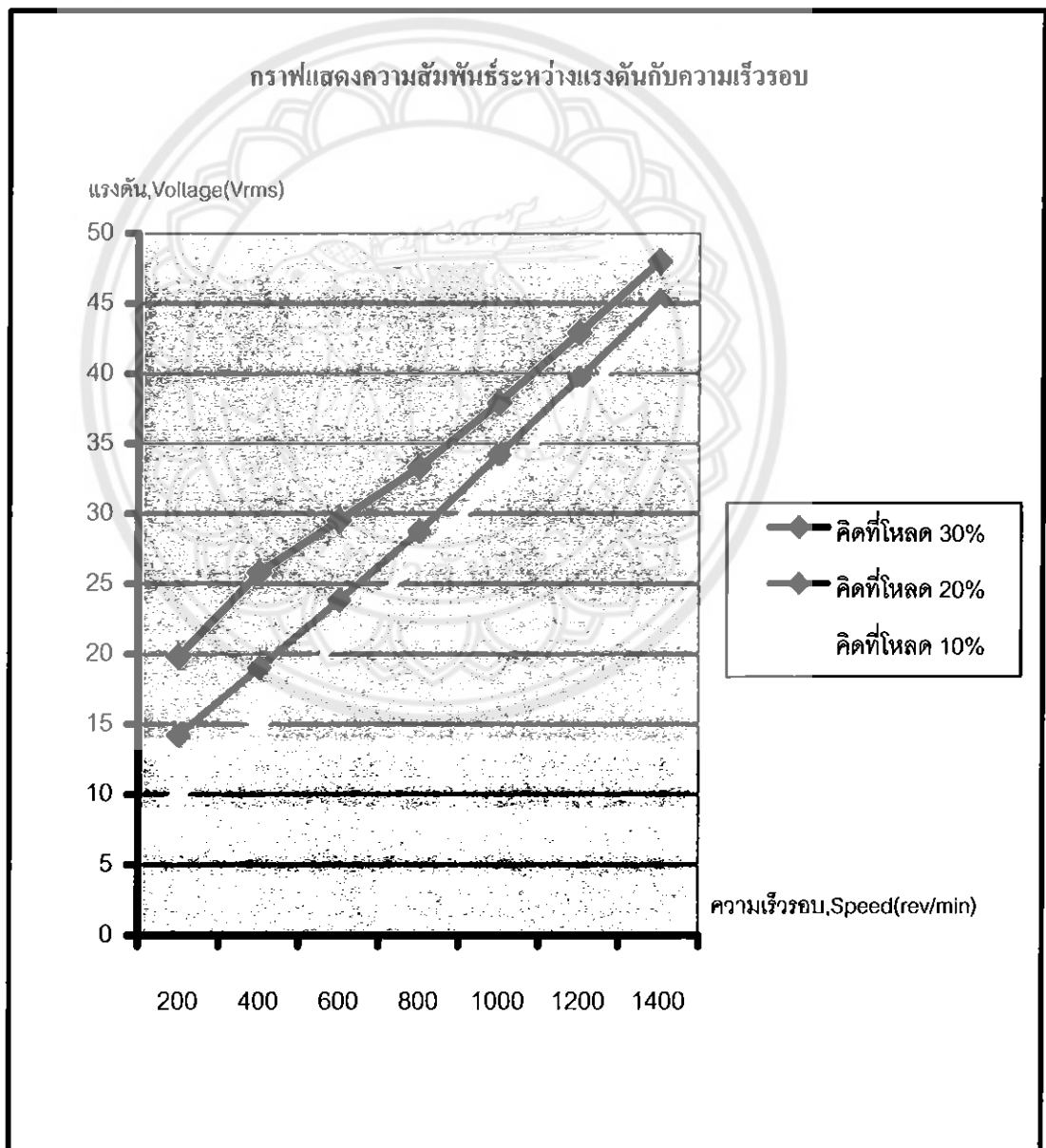


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความเร็วรอบ

4.4.8 ผลการทดลองเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับความเร็วรอบ

จากกราฟรูปนี้จะเป็นการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าโหลดที่ 30% , 20% และ 10% โดยแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับความเร็วรอบ

เมื่อพิจารณากราฟข้างต้นที่โหลด 30% , โหลด 20% และ โหลด 10% จะเห็นได้ว่าแรงดันจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ในขณะที่ความเร็วรอบก็มีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆเช่นกัน ในทางตรงข้ามกัน แรงดันจะมีค่าลดลงก็ต่อเมื่อความเร็วรอบมีค่าลดลงเช่นกัน แต่ถ้าพิจารณาที่โหลด 10% หรือในกรณีที่มีโหลดน้อยๆ จะเห็นได้ว่า กระแสจะมีค่าค่อนข้างเกือบคงที่ ในขณะที่ความเร็วรอบมีค่าเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆ



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับความเร็วรอบ

บทที่ 5

บทสรุป

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลองในโครงการ พร้อมเสนอแนะแนวทางแก้ไข จุดบกพร่องและเสนอแนะแนวทางในการนำโครงการนี้ ไปศึกษาเพิ่มเติมและสามารถพัฒนาต่อยอดให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นต่อไปในอนาคต

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในโครงการนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงโหลดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน จากผลการทดลองในบทที่ 4 จะพบว่า ผลของการเปลี่ยนแปลงโหลด (Load) ในแต่ละความเร็วรอบ (Speed) นั้น จะส่งผลให้แรงบิด (Torque) , กระแส (Current) และแรงดัน (Voltage) เกิดการเปลี่ยนแปลงไปด้วย

5.2 ปัญหาในการทำงานและแนวทางแก้ไข

1. แทนวางมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motors) นั้น มีลักษณะค่อนข้างบาง ไม่ค่อยมีความมั่นคงแข็งแรงมากนัก จึงทำให้มอเตอร์ในขณะสตาร์ท(Start) ตอนที่เชื่อมต่อกับโหลดแล้วเกิดอาการสั่นเล็กน้อย แต่ถ้ายังปรับความเร็วรอบสูงมากขึ้นเท่าไรก็ยิ่งทำให้มอเตอร์เกิดอาการสั่นมากขึ้นเท่านั้น

สาเหตุ แผ่นเหล็กที่ใช้ทำแทนวางมอเตอร์มีขนาดบางเกินไป

ผล เมื่อสตาร์ท(Start) มอเตอร์ในขณะที่เชื่อมต่อกับโหลดแล้วยังปรับความเร็วรอบเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ก็ยิ่งทำให้มอเตอร์เกิดอาการสั่นมากขึ้นเท่านั้น

วิธีแก้ไข ทำแทนวางมอเตอร์ใหม่โดยใช้แผ่นเหล็กที่มีขนาดหนากว่าเดิม

5.3 ประเมินผล

จากการดำเนินงานโครงการเมื่อเทียบกับวัตถุประสงค์ในการทำโครงการ ได้ผลดังนี้

1. ได้รับความรู้เพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของการเปลี่ยนแปลงโหลดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor)
2. สามารถทดสอบการเปลี่ยนแปลงโหลดทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor) ได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Feedback Control System, 2 Edition, Prentice-Hall
- [2] ดร.ปัญญา ยอดโอวาท “เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง 1” , ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ, กรุงเทพฯ, 2546
- [3] พรจิต ประทุมสุวรรณ. พื้นฐานการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: เรือนแก้วการพิมพ์. 2547.
- [4] http://oretano.ieleab.uclm.es/mhidalgo/temas/Brushless/00857a_Control_PIC_esquema.pdf.
สืบค้นเมื่อ 23 สิงหาคม พ.ศ.2553
- [5] http://nara2.homeip.net/~salamai/e_learning/transistor/mosfet.gif. สืบค้นเมื่อ 10 กันยายน พ.ศ.2553
- [6] http://www.cpe.ku.ac.th/~yuen/204471/device/diode_transistor/D_MOSFET.htm สืบค้นเมื่อ 15 กันยายน พ.ศ.2553
- [7] สุชิน เลือซ้อย. Webmaster@9engineer.com สืบค้นเมื่อ 1 ตุลาคม พ.ศ.2553



Motor Motor data

Motor code number: 23733

Motor data:

Par.	Parameter text	Value	Unit
p304(0)	Rated motor voltage	183	Vrms
p305(0)	Rated motor current	1.40	Arms
p311(0)	Rated motor speed	8000.0	rev/min
p314(0)	Motor pole pair number	3	
p318(0)	Motor torque constant	0.46	Nm/A
p322(0)	Maximum motor speed	10000.0	rev/min
p323(0)	Maximum motor current	8.00	Arms

Optional motor data:

Par.	Parameter text	Value	Unit
p307(0)	Rated motor power	0.38	kW
p312(0)	Rated motor torque	0.80	Nm
p316(0)	Motor stall current	1.80	Arms
p319(0)	Motor stall torque	0.86	Nm
p320(0)	Motor rated magnetizing current/short-circuit cur	5.900	Arms
p329(0)	Motor pole position identification current, 1st pha	0.405	Arms
p328(0)	Motor stall torque correction factor	78	%
p327(0)	Optimum motor load angle	90.0	°
p326(0)	Motor reluctance torque constant	0.00	mH
p325(0)	Motor pole position identification current	3.00	Arms
p336(0)	Motor limit current	8.00	Arms

Equip. circ. diag. data:

Par.	Parameter text	Value	Unit
p350(0)	Motor stator resistance, cold	4.20000	Ohm
p358(0)	Motor stator leakage inductance	9.10000	mH

Motor/control parameters:

(0) No calculation

The following picture shows a CU306 mounted on a Power Module 340 and an SMI motor.

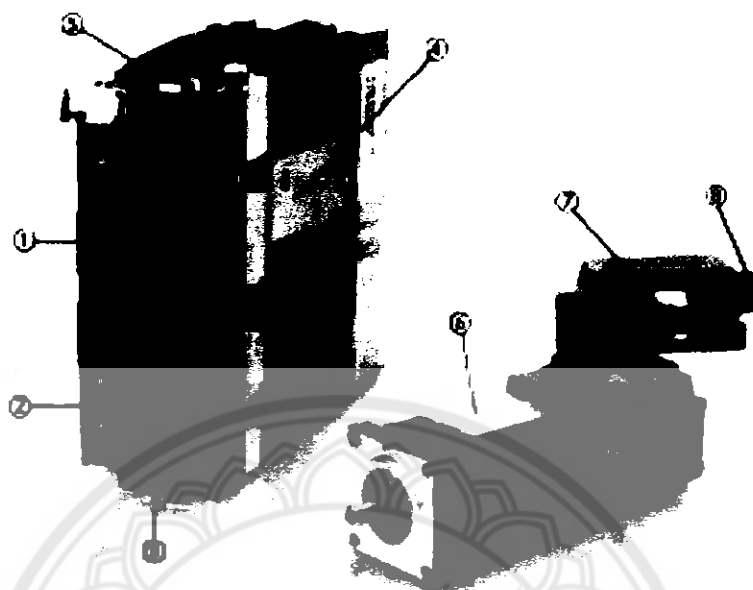


Figure 1-1 S110 on PM and SMI motor

1	CU306 Control Unit
2	X22, serial interface RS232
3	BOP20 (operator panel)
4	Power Module 340 (PM)
5	Interface X100 (DRIVE-CLIQ), X128 (CANopen or PROFIBUS), X23 (encoder)
6	SMI motor (motor with integrated encoder and DRIVE-CLIQ interface)
7	Power connection for motor
8	DRIVE-CLIQ connection for motor

Interfaces

The CU306 uses the internal interface to communicate with the Power Module on which it is fixed. The X126 interface is used to connect the CU306 to a communications system. The CU306 is available with either a PROFIBUS or CANopen interface.

Encoders can be connected either via the DRIVE-CLIQ interface X100 or the integrated encoder interface X23 (TTL or HTL encoder). For more details, refer to the S110 Equipment Manual and S110 Function Manual. A PG/PC can be connected to X126 via the serial interface RS232 or any other suitable interface (PROFIBUS or CANopen).

SINAMICS S110 drive converters for standard positioning tasks



AC/AC drive, modular

IP20

0.12 ... 0.75 kW (0.16 ... 1 HP)	-	-	-	-	-
0.37 ... 1.5 kW (0.5 ... 2.0 HP)	2.2 ... 4 kW (3 ... 5.4 HP)	7.5 ... 15 kW (10.2 ... 20.4 HP)	18.5 ... 30 kW (25.15 ... 40.8 HP)	37 ... 45 kW (50.3 ... 61.2 HP)	95 ... 90 kW (74.8 ... 122.4 HP)

Point-to-point positioning; absolute/relative; broad/rotary axis; flying actual value setting; traversing blocks (max. 16)

Traversing range limits, following error, standstill, motor temperature

BICO technology, technology controller

STO: Safe Torque Off, SOS: Safe Operating Stop, SS1, SS2: Safe Stop 1, Safe Stop 2,

SBC: Safe Brake Control, SIL: Safety-Limited Speed, SSM: Safe Speed Monitor

PROFIBUS DP, CANopen, RS 232

PROFIdrive, PROFiSafe

HTL/TTL; SS; DRIVE-CLIQ

4 DI, 24 V, floating; 4 DDO, 24 V; 1 AI (12 bit); 1 PTC/TX temperature sensor connector

3 F-DI, 24 V; 1 F-DO, 24 V

43 ... 63 Hz

V_{max}

0 ... 300 Hz

Synchronous motors, induction motors

Servo control, speed control, position control

Positioning: 4 ms

Engineering: SIZER, commissioning: STARTER

Pick & place tasks, high-bay racking units, simple handling tasks, positioning rotary tables, positioning adjuster and actuator axes in all machinery construction sectors

Control Units		Power Module PM340	Control Unit CU305	SINAMICS S110
	6SL3040-0JA00-0AA0			
	6SL3040-0JA02-0AA0			
	6SL3054-4AG00-0AA0			
	6SL3054-0AA10-0AA0			

A Power Module PM340 with a mounted Control Unit CU305 form a functional SINAMICS S110 positioning drive.

Power Modules

Rated power kw	Rated output current A	Frame size	PM340 power module	
			Without line filter Order No.	With integrated line filter Order No.
			6SL3210-1SB11-0UA0	6SL3210-1SB11-0AA0
			6SL3210-1SB12-3UA0	6SL3210-1SB12-3AA0
			6SL3210-1SB14-0UA0	6SL3210-1SB14-0AA0
			6SL3210-1SE11-3UA0	-
			6SL3210-1SE11-7UA0	-
			6SL3210-1SE12-2UA0	-
			6SL3210-1SE13-1UA0	-
			6SL3210-1SE14-1UA0	-
			6SL3210-1SE16-0UA0	6SL3210-1SE16-0AA0
			6SL3210-1SE17-7UA0	6SL3210-1SE17-7AA0
			6SL3210-1SE21-0UA0	6SL3210-1SE21-0AA0
			6SL3210-1SE21-8UA0	6SL3210-1SE21-8AA0
			6SL3210-1SE22-5UA0	6SL3210-1SE22-5AA0
			6SL3210-1SE23-2UA0	6SL3210-1SE23-2AA0
			6SL3210-1SE23-8UA0	6SL3210-1SE23-8AA0
			6SL3210-1SE24-5UA0	6SL3210-1SE24-5AA0
			6SL3210-1SE26-0UA0	6SL3210-1SE26-0AA0
			6SL3210-1SE27-5UA0	6SL3210-1SE27-5AA0
			6SL3210-1SE31-0UA0	6SL3210-1SE31-0AA0
			6SL3210-1SE31-1UA0	6SL3210-1SE31-1AA0
			6SL3210-1SE31-5UA0	6SL3210-1SE31-5AA0
			6SL3210-1SE31-8UA0	6SL3210-1SE31-8AA0

200 rev/min=0%

Actual speed value	190.3 rev/min	Output voltage	8.5 Vrms
Speed setpoint	200.0 rev/min	Output current	0.14 Arms
Actual torque value	0.07 Nm	Output frequency	9.5 Hz
Effective power	0.00 kW	Motor temperature	27.8 °C

200 rev/min=5%

Actual speed value	199.0 rev/min	Output voltage	9.2 Vrms
Speed setpoint	200.0 rev/min	Output current	0.18 Arms
Actual torque value	0.08 Nm	Output frequency	10.0 Hz
Effective power	0.00 kW	Motor temperature	34.8 °C

200 rev/min=10%

Actual speed value	186.0 rev/min	Output voltage	9.7 Vrms
Speed setpoint	200.0 rev/min	Output current	0.23 Arms
Actual torque value	0.11 Nm	Output frequency	9.8 Hz
Effective power	0.00 kW	Motor temperature	28.1 °C

200 rev/min=15%

Actual speed value	196.7 rev/min	Output voltage	11.5 Vrms
Speed setpoint	200.0 rev/min	Output current	0.40 Arms
Actual torque value	0.18 Nm	Output frequency	9.8 Hz
Effective power	0.00 kW	Motor temperature	34.3 °C

200 rev/min=20%

Actual speed value	199.9 rev/min	Output voltage	14.2 Vrms
Speed setpoint	200.0 rev/min	Output current	0.69 Arms
Actual torque value	0.32 Nm	Output frequency	10.0 Hz
Effective power	0.01 kW	Motor temperature	29.5 °C

200 rev/min=25%

Actual speed value	202.5 rev/min	Output voltage	17.0 Vrms
Speed setpoint	200.0 rev/min	Output current	0.99 Arms
Actual torque value	0.46 Nm	Output frequency	10.1 Hz
Effective power	0.01 kW	Motor temperature	35.5 °C

200 rev/min=30%

Actual speed value	198.0 rev/min	Output voltage	19.8 Vrms
Speed setpoint	200.0 rev/min	Output current	1.34 Arms
Actual torque value	0.62 Nm	Output frequency	10.0 Hz
Effective power	0.01 kW	Motor temperature	32.6 °C

400 rev/min=0%

Actual speed value	395.9 rev/min	Output voltage	14.6 Vrms
Speed setpoint	400.0 rev/min	Output current	0.15 Arms
Actual torque value	0.07 Nm	Output frequency	19.8 Hz
Effective power	0.00 kW	Motor temperature	35.0 °C

400 rev/min=5%

Actual speed value	398.0 rev/min	Output voltage	14.9 Vrms
Speed setpoint	400.0 rev/min	Output current	0.17 Arms
Actual torque value	0.08 Nm	Output frequency	19.8 Hz
Effective power	0.00 kW	Motor temperature	31.1 °C

400 rev/min=10%

Actual speed value	398.4 rev/min	Output voltage	15.2 Vrms
Speed setpoint	400.0 rev/min	Output current	0.20 Arms
Actual torque value	0.09 Nm	Output frequency	19.9 Hz
Effective power	0.00 kW	Motor temperature	31.1 °C

400 rev/min=15%

Actual speed value	399.8 rev/min	Output voltage	16.7 Vrms
Speed setpoint	400.0 rev/min	Output current	0.34 Arms
Actual torque value	0.18 Nm	Output frequency	19.9 Hz
Effective power	0.01 kW	Motor temperature	34.6 °C

400 rev/min=20%

Actual speed value	397.2 rev/min	Output voltage	19.0 Vrms
Speed setpoint	400.0 rev/min	Output current	0.58 Arms
Actual torque value	0.27 Nm	Output frequency	19.9 Hz
Effective power	0.01 kW	Motor temperature	31.4 °C

400 rev/min=25%

Actual speed value	399.6 rev/min	Output voltage	22.0 Vrms
Speed setpoint	400.0 rev/min	Output current	0.90 Arms
Actual torque value	0.41 Nm	Output frequency	20.1 Hz
Effective power	0.02 kW	Motor temperature	34.9 °C

400 rev/min=30%

Actual speed value	398.2 rev/min	Output voltage	25.8 Vrms
Speed setpoint	400.0 rev/min	Output current	1.33 Arms
Actual torque value	0.61 Nm	Output frequency	20.0 Hz
Effective power	0.03 kW	Motor temperature	34.0 °C

600 rev/min=0%

Actual speed value	596.8 rev/min	Output voltage	20.5 Vrms
Speed setpoint	600.0 rev/min	Output current	0.16 Arms
Actual torque value	0.07 Nm	Output frequency	29.9 Hz
Effective power	0.00 kW	Motor temperature	31.5 °C

600 rev/min=5%

Actual speed value	597.6 rev/min	Output voltage	20.5 Vrms
Speed setpoint	600.0 rev/min	Output current	0.17 Arms
Actual torque value	0.08 Nm	Output frequency	29.9 Hz
Effective power	0.00 kW	Motor temperature	34.7 °C

600 rev/min=10%

Actual speed value	599.3 rev/min	Output voltage	21.0 Vrms
Speed setpoint	600.0 rev/min	Output current	0.20 Arms
Actual torque value	0.09 Nm	Output frequency	30.1 Hz
Effective power	0.01 kW	Motor temperature	31.7 °C

600 rev/min=15%

Actual speed value	594.0 rev/min	Output voltage	22.2 Vrms
Speed setpoint	600.0 rev/min	Output current	0.31 Arms
Actual torque value	0.14 Nm	Output frequency	29.8 Hz
Effective power	0.01 kW	Motor temperature	34.5 °C

600 rev/min=20%

Actual speed value	594.5 rev/min	Output voltage	23.8 Vrms
Speed setpoint	600.0 rev/min	Output current	0.48 Arms
Actual torque value	0.22 Nm	Output frequency	29.8 Hz
Effective power	0.01 kW	Motor temperature	31.7 °C

600 rev/min=25%

Actual speed value	596.7 rev/min	Output voltage	26.3 Vrms
Speed setpoint	600.0 rev/min	Output current	0.74 Arms
Actual torque value	0.34 Nm	Output frequency	29.9 Hz
Effective power	0.02 kW	Motor temperature	34.6 °C

600 rev/min=30%

Actual speed value	598.3 rev/min	Output voltage	29.5 Vrms
Speed setpoint	600.0 rev/min	Output current	1.08 Arms
Actual torque value	0.50 Nm	Output frequency	30.1 Hz
Effective power	0.03 kW	Motor temperature	35.2 °C

800 rev/min=0%

Actual speed value	797.4 rev/min	Output voltage	26.3 Vrms
Speed setpoint	800.0 rev/min	Output current	0.16 Arms
Actual torque value	0.08 Nm	Output frequency	39.8 Hz
Effective power	0.01 kW	Motor temperature	36.3 °C

800 rev/min=5%

Actual speed value	798.5 rev/min	Output voltage	26.5 Vrms
Speed setpoint	800.0 rev/min	Output current	0.19 Arms
Actual torque value	0.09 Nm	Output frequency	40.0 Hz
Effective power	0.01 kW	Motor temperature	34.6 °C

800 rev/min=10%

Actual speed value	799.9 rev/min	Output voltage	26.9 Vrms
Speed setpoint	800.0 rev/min	Output current	0.21 Arms
Actual torque value	0.10 Nm	Output frequency	40.0 Hz
Effective power	0.01 kW	Motor temperature	34.6 °C

800 rev/min=15%

Actual speed value	796.7 rev/min	Output voltage	27.6 Vrms
Speed setpoint	800.0 rev/min	Output current	0.28 Arms
Actual torque value	0.13 Nm	Output frequency	39.9 Hz
Effective power	0.01 kW	Motor temperature	34.1 °C

800 rev/min=20%

Actual speed value	797.5 rev/min	Output voltage	28.7 Vrms
Speed setpoint	800.0 rev/min	Output current	0.39 Arms
Actual torque value	0.18 Nm	Output frequency	39.9 Hz
Effective power	0.01 kW	Motor temperature	34.3 °C

800 rev/min=25%

Actual speed value	797.6 rev/min	Output voltage	31.2 Vrms
Speed setpoint	800.0 rev/min	Output current	0.64 Arms
Actual torque value	0.30 Nm	Output frequency	39.9 Hz
Effective power	0.02 kW	Motor temperature	34.5 °C

800 rev/min=30%

Actual speed value	793.0 rev/min	Output voltage	33.3 Vrms
Speed setpoint	800.0 rev/min	Output current	0.69 Arms
Actual torque value	0.41 Nm	Output frequency	39.8 Hz
Effective power	0.03 kW	Motor temperature	35.1 °C

1000 rev/min=0%

Actual speed value	997.3 rev/min	Output voltage	32.2 Vrms
Speed setpoint	1000.0 rev/min	Output current	0.18 Arms
Actual torque value	0.08 Nm	Output frequency	50.0 Hz
Effective power	0.01 kW	Motor temperature	34.1 °C

1000 rev/min=5%

Actual speed value	986.8 rev/min	Output voltage	32.3 Vrms
Speed setpoint	1000.0 rev/min	Output current	0.19 Arms
Actual torque value	0.09 Nm	Output frequency	49.9 Hz
Effective power	0.01 kW	Motor temperature	34.3 °C

1000 rev/min=10%

Actual speed value	997.0 rev/min	Output voltage	32.5 Vrms
Speed setpoint	1000.0 rev/min	Output current	0.21 Arms
Actual torque value	0.09 Nm	Output frequency	50.0 Hz
Effective power	0.01 kW	Motor temperature	34.3 °C

1000 rev/min=15%

Actual speed value	997.3 rev/min	Output voltage	33.2 Vrms
Speed setpoint	1000.0 rev/min	Output current	0.26 Arms
Actual torque value	0.12 Nm	Output frequency	48.9 Hz
Effective power	0.01 kW	Motor temperature	34.3 °C

1000 rev/min=20%

Actual speed value	997.8 rev/min	Output voltage	34.2 Vrms
Speed setpoint	1000.0 rev/min	Output current	0.36 Arms
Actual torque value	0.17 Nm	Output frequency	50.0 Hz
Effective power	0.02 kW	Motor temperature	34.3 °C

1000 rev/min=25%

Actual speed value	998.7 rev/min	Output voltage	36.0 Vrms
Speed setpoint	1000.0 rev/min	Output current	0.56 Arms
Actual torque value	0.26 Nm	Output frequency	49.9 Hz
Effective power	0.03 kW	Motor temperature	34.7 °C

1000 rev/min=30%

Actual speed value	998.7 rev/min	Output voltage	37.9 Vrms
Speed setpoint	1000.0 rev/min	Output current	0.75 Arms
Actual torque value	0.35 Nm	Output frequency	50.1 Hz
Effective power	0.04 kW	Motor temperature	35.0 °C

1000 rev/min=35%

Actual speed value	999.4 rev/min	Output voltage	40.3 Vrms
Speed setpoint	1000.0 rev/min	Output current	1.01 Arms
Actual torque value	0.46 Nm	Output frequency	49.9 Hz
Effective power	0.05 kW	Motor temperature	36.3 °C

1200 rev/min=0%

Actual speed value	1198.3 rev/min	Output voltage	38.0 Vrms
Speed setpoint	1200.0 rev/min	Output current	0.19 Arms
Actual torque value	0.09 Nm	Output frequency	59.9 Hz
Effective power	0.01 kW	Motor temperature	38.1 °C

1200 rev/min=5%

Actual speed value	1198.0 rev/min	Output voltage	38.1 Vrms
Speed setpoint	1200.0 rev/min	Output current	0.19 Arms
Actual torque value	0.09 Nm	Output frequency	60.0 Hz
Effective power	0.01 kW	Motor temperature	37.0 °C

1200 rev/min=10%

Actual speed value	1197.1 rev/min	Output voltage	38.2 Vrms
Speed setpoint	1200.0 rev/min	Output current	0.20 Arms
Actual torque value	0.09 Nm	Output frequency	60.0 Hz
Effective power	0.01 kW	Motor temperature	36.4 °C

1200 rev/min=15%

Actual speed value	1199.0 rev/min	Output voltage	38.7 Vrms
Speed setpoint	1200.0 rev/min	Output current	0.26 Arms
Actual torque value	0.12 Nm	Output frequency	60.1 Hz
Effective power	0.01 kW	Motor temperature	36.1 °C

1200 rev/min=20%

Actual speed value	1201.0 rev/min	Output voltage	39.7 Vrms
Speed setpoint	1200.0 rev/min	Output current	0.35 Arms
Actual torque value	0.16 Nm	Output frequency	59.9 Hz
Effective power	0.02 kW	Motor temperature	36.1 °C

1200 rev/min=25%

Actual speed value	1199.6 rev/min	Output voltage	41.3 Vrms
Speed setpoint	1200.0 rev/min	Output current	0.51 Arms
Actual torque value	0.24 Nm	Output frequency	60.1 Hz
Effective power	0.03 kW	Motor temperature	36.1 °C

1200 rev/min=30%

Actual speed value	1199.3 rev/min	Output voltage	42.9 Vrms
Speed setpoint	1200.0 rev/min	Output current	0.68 Arms
Actual torque value	0.31 Nm	Output frequency	60.0 Hz
Effective power	0.04 kW	Motor temperature	36.5 °C

1200 rev/min=35%

Actual speed value	1197.6 rev/min	Output voltage	45.1 Vrms
Speed setpoint	1200.0 rev/min	Output current	0.89 Arms
Actual torque value	0.41 Nm	Output frequency	60.0 Hz
Effective power	0.05 kW	Motor temperature	37.5 °C

1200 rev/min=40%

Actual speed value	1198.7 rev/min	Output voltage	47.5 Vrms
Speed setpoint	1200.0 rev/min	Output current	1.16 Arms
Actual torque value	0.53 Nm	Output frequency	59.9 Hz
Effective power	0.07 kW	Motor temperature	38.5 °C

.....

1400 rev/min=0%

Actual speed value	1397.7 rev/min	Output voltage	43.8 Vrms
Speed setpoint	1400.0 rev/min	Output current	0.20 Arms
Actual torque value	0.09 Nm	Output frequency	70.1 Hz
Effective power	0.01 kW	Motor temperature	40.8 °C

1400 rev/min=5%

Actual speed value	1399.5 rev/min	Output voltage	43.8 Vrms
Speed setpoint	1400.0 rev/min	Output current	0.20 Arms
Actual torque value	0.09 Nm	Output frequency	70.2 Hz
Effective power	0.01 kW	Motor temperature	39.1 °C

1400 rev/min=10%

Actual speed value	1398.3 rev/min	Output voltage	44.0 Vrms
Speed setpoint	1400.0 rev/min	Output current	0.21 Arms
Actual torque value	0.10 Nm	Output frequency	70.1 Hz
Effective power	0.01 kW	Motor temperature	39.7 °C

1400 rev/min=15%

Actual speed value	1399.8 rev/min	Output voltage	44.4 Vrms
Speed setpoint	1400.0 rev/min	Output current	0.25 Arms
Actual torque value	0.11 Nm	Output frequency	69.9 Hz
Effective power	0.02 kW	Motor temperature	38.5 °C

1400 rev/min=20%

Actual speed value	1399.6 rev/min	Output voltage	45.2 Vrms
Speed setpoint	1400.0 rev/min	Output current	0.33 Arms
Actual torque value	0.15 Nm	Output frequency	70.0 Hz
Effective power	0.02 kW	Motor temperature	38.3 °C

1400 rev/min=25%

Actual speed value	1399.6 rev/min	Output voltage	46.6 Vrms
Speed setpoint	1400.0 rev/min	Output current	0.46 Arms
Actual torque value	0.21 Nm	Output frequency	70.0 Hz
Effective power	0.03 kW	Motor temperature	38.2 °C

1400 rev/min=30%

Actual speed value	1398.4 rev/min	Output voltage	48.0 Vrms
Speed setpoint	1400.0 rev/min	Output current	0.61 Arms
Actual torque value	0.28 Nm	Output frequency	70.2 Hz
Effective power	0.04 kW	Motor temperature	38.4 °C

1400 rev/min=35%

Actual speed value	1398.3 rev/min	Output voltage	50.0 Vrms
Speed setpoint	1400.0 rev/min	Output current	0.80 Arms
Actual torque value	0.37 Nm	Output frequency	70.0 Hz
Effective power	0.05 kW	Motor temperature	38.9 °C

1400 rev/min=40%

Actual speed value	1398.2 rev/min	Output voltage	52.1 Vrms
Speed setpoint	1400.0 rev/min	Output current	1.04 Arms
Actual torque value	0.48 Nm	Output frequency	70.0 Hz
Effective power	0.07 kW	Motor temperature	39.3 °C

1400 rev/min=45%

Actual speed value	1398.5 rev/min	Output voltage	54.8 Vrms
Speed setpoint	1400.0 rev/min	Output current	1.32 Arms
Actual torque value	0.60 Nm	Output frequency	70.1 Hz
Effective power	0.09 kW	Motor temperature	40.6 °C

สูตรการคำนวณที่เกี่ยวข้อง

1. คำนวณหาค่าแรงบิด (Torque)

$$\tau = \frac{P}{\omega} \quad \text{หรือ} \quad P = \tau\omega$$

$$\text{จาก } \omega = n \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ sec}}$$

โดยที่ n = ความเร็วรอบหรือ Speed (rev/min)

τ = แรงบิดหรือ Torque (N-m)

ω = ความเร็วเชิงมุม (rad/sec)

P = กำลังไฟฟ้าหรือ Power (Watt)

2. คำนวณหาค่าความเร็วรอบ (Speed)

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

โดยที่ n = ความเร็วรอบหรือ Speed (rev/min)

P = จำนวนขั้วแม่เหล็ก

f = ความถี่ (Hz)



ประวัติผู้ดำเนินโครงการ



ชื่อ นางสาวกมลวรรณ วงศ์วุฒิ
ภูมิลำเนา 11 หมู่ 5 ต.เวียง อ.เทิง จ.เชียงราย
ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจาก โรงเรียนเทิงวิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : life_lovecr@hotmail.com

