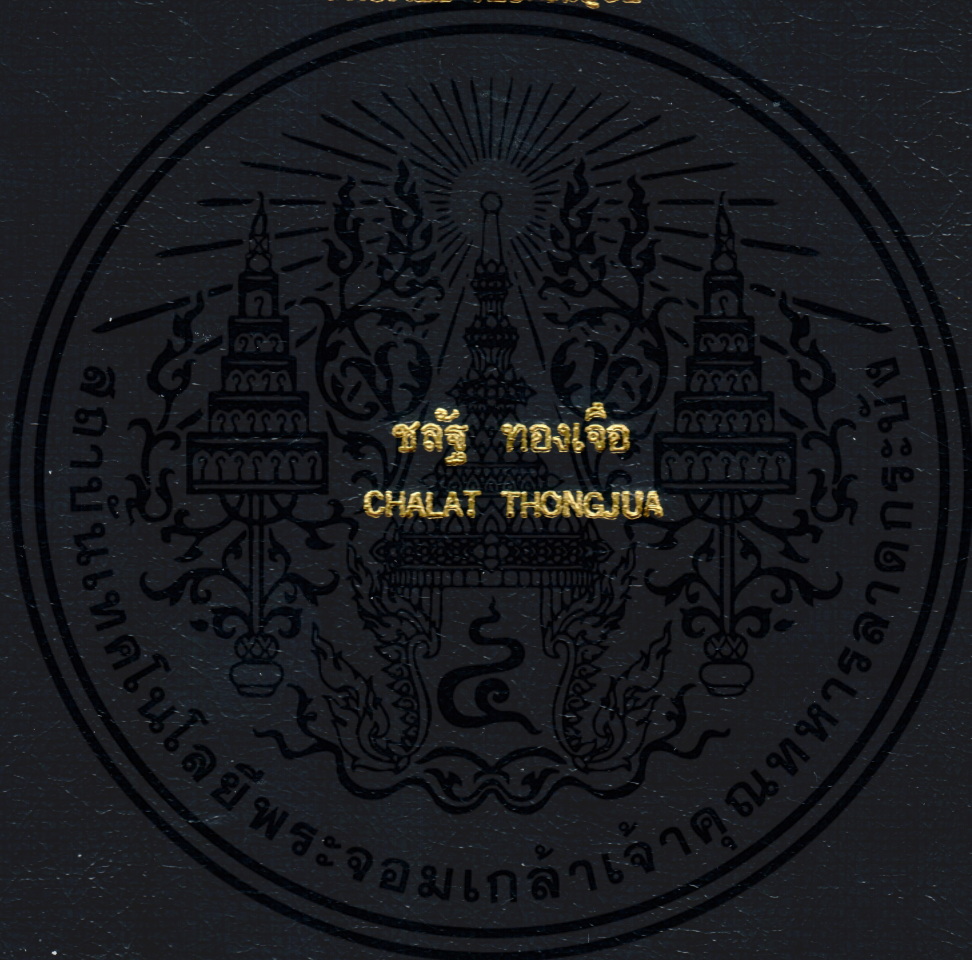


การควบคุมสเต็ปป์มอเตอร์แบบวงเปิด
ด้วยเทคนิคโปรไฟล์ความเร็ว

OPEN-LOOP STEPPING MOTOR CONTROL BY USING VELOCITY
PROFILE TECHNIQUE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-950-8

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิด
ด้วยเทคนิคโปรไฟล์ความเร็ว

OPEN-LOOP STEPPING MOTOR CONTROL BY USING VELOCITY
PROFILE TECHNIQUE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-950-8

เลขหมึก.....
เลขทะเบียน... 38047
วัน, เดือน, ปี 20 พ.ย. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**OPEN-LOOP STEPPING MOTOR CONTROL BY USING
VELOCITY PROFILE TECHNIQUE**

The seal of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang is a circular emblem. It features a central sunburst with rays emanating from a central point. Below the sunburst are three tiered, pagoda-like structures. The entire emblem is surrounded by a decorative border. The Thai text 'สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง' is inscribed around the inner edge of the seal.

CHALAT THONGJUA

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

2000

ISBN 974-622-950-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2000

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKHBANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบวงเปิดด้วยเทคนิค โปรไฟล์ของความเร็ว
OPEN LOOP STEPPING MOTOR CONTROL BY USING
VELOCITY PROFILE TECHNIQUES

ชื่อนักศึกษา นายชลัฐ ทองเจือ


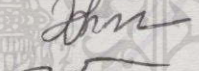
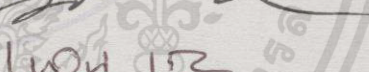
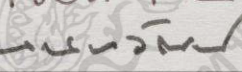
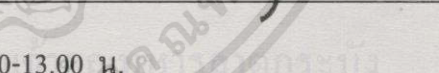
รหัสประจำตัว 39061073

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ดร.นนทวัฒน์ จุลเดชะ

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.ดร. โยธิน เปรมปราชญ์รัชต์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วันชัย	วีรจจา	
ดร.วิจิตร	กิมเรศ	
รศ.พิพัฒน์	เลาหสงคราม	
รศ.ดร.โยธิน	เปรมปราชญ์รัชต์	
ดร.นนทวัฒน์	จุลเดชะ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 30 สิงหาคม 2543 เวลา 12.00-13.00 น.

สถานที่สอบ ณ ตึก 12 ชั้น 4 (ห้อง E12-404)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.บุญวัฒน์ อัครชู)

รักษาราชการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่... ๒๕... เดือน... ๓๑... พ.ศ. ๒๕๔๓...

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การควบคุมสเตรปปีงมอเตอร์แบบวงเปิดด้วยเทคนิค
โปรไฟล์ความเร็ว

นักศึกษา

นายชลัฐ ทองเจือ

รหัสประจำตัว

39061073

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

พ.ศ.

2543

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

ดร.นนทวัฒน์ จุลเดชะ

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม

รศ.ดร.โยธิน เปรมปราชญ์รัตน์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการควบคุมสเตรปปีงมอเตอร์แบบวงเปิดด้วยเทคนิคโปรไฟล์ความเร็ว ที่ให้ผลตอบสนองทางตำแหน่งที่เร็วขึ้น โดยสามารถลดระยะเวลาการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นถึงตำแหน่งเป้าหมายได้ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมแบบความเร็วคงที่ซึ่งอยู่ในช่วงแรงบิดพลูอินหรือแบบอัตราเร่งและอัตราห้วงความเร็วในลักษณะเชิงเส้นแบบเดิม โดยสามารถหาอัตราเร่งและอัตราห้วงความเร็วของมอเตอร์ที่เหมาะสมจากคุณลักษณะของแรงบิดแบบพลวัต ซึ่งเรียกว่าโปรไฟล์ความเร็วของมอเตอร์ จะได้อัตราเร่งและอัตราห้วงความเร็วเป็นแบบเอ็กโปเนนเชียล ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของมอเตอร์แต่ละชนิดที่โหลดคงที่ จากโปรไฟล์ความเร็วจะสามารถรู้ช่วงเวลาที่ต้องใช้ในการสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อป้อนแก่วงจรขับในแต่ละสเตปได้โดยใช้วิธีการคำนวณทางตัวเลข ความเร็วสูงสุดที่มอเตอร์ตอบสนองได้จะสูงขึ้น โดยไม่เกิดการสูญหายของสเตประหว่างการเคลื่อนที่ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานในระบบที่มีการควบคุมแบบวงเปิดให้ใกล้เคียงกับการควบคุมแบบวงปิด มีข้อดีเรื่องลดความยุ่งยากและค่าใช้จ่ายของการออกแบบการควบคุม การทำวิจัยนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8032 ในส่วนของการสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อป้อนให้วงจรขับ การสร้างสัญญาณพัลส์โดยการเขียนโปรแกรมทางซอฟต์แวร์จะมีความยืดหยุ่นมากกว่าทางฮาร์ดแวร์เมื่อความเร็วมีการเปลี่ยนแปลง

Thesis Title	Open - Loop Stepping Motor Control by Using Velocity Profile Technique
Student	Mr.Chalat Thongjua
Student ID.	39061073
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2000
Thesis Advisor	Dr.Nontawat Junladaycha
Thesis Co- Advisor	Assoc.Prof.Dr.Yothin Prempraneerach

ABSTRACT

This thesis presents the open-loop stepping motor control by using velocity profile technique for position response to positioning times can be reduced during point-to-point move when comparing either constant velocity which is in pull-in torque range or linear acceleration and deceleration. This method found appropriate acceleration and deceleration capability from dynamic torque characteristic. The appropriate acceleration and deceleration is called "velocity profile", which is exponential acceleration and deceleration. The velocity profile can be known accuracy switch time to generated pulse signal applied to drive circuit in each step which is solved by numerical method. The maximum frequency is higher than conventional method and without loss of a step which increases efficiency in application of open loop is near close loop control. The merit of open loop control is simplicity and low cost. Microcontroller number 8032 is used to generates pulse signal for drive circuit. The driving pulse is generated by software programming is flexible more than hardware when the velocity is varied.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยได้รับคำปรึกษาและคำแนะนำเกี่ยวกับการดำเนินการศึกษาและวิจัยจาก ดร.นนทวัฒน์ จุลเดช และรองศาสตราจารย์ ดร.โยชิน เปรมปราชญ์ ซึ่ง เป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบ ขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่เป็นผู้ให้กำลังใจในการศึกษาเล่าเรียนและเป็นผู้สนับสนุน ให้ทุกสิ่งทุกอย่างมาโดยตลอด

ขอขอบคุณกองทุน C&C ที่เป็นผู้สนับสนุนเงินทุนการศึกษาแก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณ คุณไกรสร อัญชลีวรพันธุ์ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์และเครื่องมือวัดต่างๆ พร้อมทั้งให้คำปรึกษาและกำลังใจมาตลอด

ขอขอบคุณ คุณประพันธ์ แจ่มเอี่ยม ที่ให้ความช่วยเหลือด้านคอมพิวเตอร์

ขอขอบคุณเพื่อนนักศึกษาและน้องๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและคอยให้กำลังใจมาโดยตลอด

คุณค่าและประโยชน์ที่พึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ บิดา มารดา คุณครูบา อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

ชัชฎ์ ทองเจือ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 แนวคิดการนำเสนอวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานและหลักการของสเตปป์มอเตอร์.....	4
2.1 หลักการทำงานเบื้องต้นของสเตปป์มอเตอร์.....	4
2.2 ประเภทของสเตปป์มอเตอร์.....	6
2.3 ลักษณะการพันขดลวดในสเตปป์มอเตอร์.....	15
2.4 รูปแบบการขับสเตปป์มอเตอร์.....	16
2.5 วงจรขับสเตปป์มอเตอร์.....	18
2.6 การปรับปรุงกระแสบิดค้อท.....	25
2.7 คุณลักษณะแรงบิดของสเตปป์มอเตอร์.....	28
2.8 การวัดแรงบิดของสเตปป์มอเตอร์.....	31
บทที่ 3 การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิดทั่วไป.....	37
3.1 การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิด.....	37
3.2 วิธีการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิด.....	45
บทที่ 4 การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิดด้วยเทคนิคโปรไฟล์ความเร็ว.....	49
4.1 การหาความสามารถของอัตราเร่งและอัตราห้วงความเร็วของมอเตอร์.....	50
4.2 การหาความเร็วที่ป้อนในแต่ละสเตปป์ช่วงของการเร่งความเร็ว.....	57
4.3 การหาความเร็วที่ป้อนในแต่ละสเตปป์ของช่วงการห้วงความเร็ว.....	61

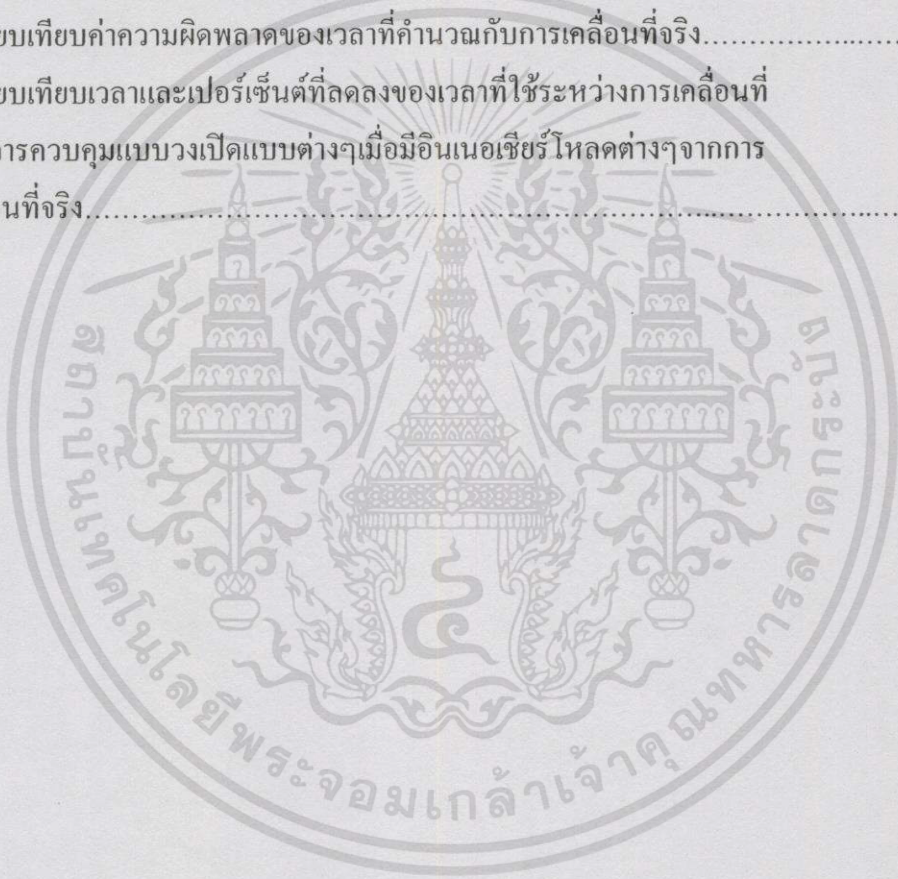
สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.4 โพลีชาร์ทการสร้างโปรไฟล์ความเร็ว.....	64
บทที่ 5 การทดลองการควบคุมและผลการทดลอง.....	67
5.1 รายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย.....	67
5.2 วิธีการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิด.....	69
5.3 การทดลองการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิด.....	80
5.4 ผลการทดลองการควบคุมแบบวงเปิดแบบเดิม.....	84
5.5 ผลการทดลองการควบคุมแบบวงเปิดโดยเทคนิคการหาโปรไฟล์ความเร็ว.....	90
5.6 สรุปผลการทดลอง.....	99
บทที่ 6 วิจารณ์ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	100
6.1 วิจารณ์ผลการทดลอง.....	100
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	102
เอกสารอ้างอิง.....	103
ภาคผนวก.....	104
ประวัติผู้เขียน.....	111

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการถ่ายกระแสแบบกระตุ้นหนึ่งเฟส.....	16
2.2 แสดงการถ่ายกระแสแบบกระตุ้นสองเฟส.....	17
2.3 แสดงการถ่ายกระแสแบบกระตุ้นหนึ่งเฟสสลับสองเฟส.....	17
5.1 แสดงความเฉื่อยไหลคที่หน่วยต่างๆ.....	71
5.2 แสดงความเร็วเริ่มหมุนของมอเตอร์.....	71
5.3 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของเวลาที่คำนวณกับการเคลื่อนที่จริง.....	98
5.4 เปรียบเทียบเวลาและเปอร์เซ็นต์ที่ลดลงของเวลาที่ใช้ระหว่างการเคลื่อนที่ของการควบคุมแบบวงเปิดแบบต่างๆเมื่อมีอินเนอร์โหลคต่างๆจากการเคลื่อนที่จริง.....	98



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงส่วนประกอบแบบง่ายๆของสเตปป์มอเตอร์มูมโรเตอร์เคลื่อนที่ 60 องศา.....	5
2.2 แสดงหลักการควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์.....	5
2.3 แสดงโครงสร้างอย่างง่ายของสเตปป์มอเตอร์ประเภทคาร์ลิกแดนซ์แปรค่าได้ 3 เฟส.....	6
2.4 แสดงตำแหน่งสมดุลเมื่อเฟสที่ 1 ถูกกระตุ้น.....	7
2.5 แสดงแรงบิดรีสตอริง(Restoring torque)ที่มีทิศทวนเข็มนาฬิกา.....	7
2.6 แสดงการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ขณะที่เฟสที่ 1 ถูกเปิดออกและเฟสที่ 2 ถูกจ่ายกระแสทันที.....	8
2.7 แสดงการเคลื่อนที่สเตปป์รอบในมอเตอร์ประเภทคาร์ลิกแดนซ์แปรค่าได้.....	8
2.8 เปรียบเทียบลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กของสเตปป์มอเตอร์ที่มีช่องว่างอากาศแคบและกว้าง.....	9
2.9 แสดงภาพตัดขวางมอเตอร์ประเภทคาร์ลิกแดนซ์แปรค่าได้ 3 เฟสจำนวนซี่ฟัน 2 ซี่ บนแต่ละโพล จำนวนซี่ฟัน โรเตอร์ 20 ซี่ และมุมสเตป 6 องศา.....	10
2.10 แสดงภาพตัดขวางมอเตอร์ประเภทคาร์ลิกแดนซ์แปรค่าได้ 3 เฟสจำนวนซี่ฟัน โรเตอร์ 44 ซี่และจำนวนสเตปต่อรอบ 132 สเตป.....	10
2.11 แสดงภาพตัดขวางมอเตอร์ประเภทคาร์ลิกแดนซ์แปรค่าได้ 4 เฟสจำนวนซี่ฟัน โรเตอร์ 50 ซี่ มุมสเตป 1.8 องศา และจำนวนสเตปต่อรอบ 200 สเตป.....	10
2.12 แสดงโครงสร้างของมอเตอร์ประเภทคาร์ลิกแดนซ์แปรค่าได้ชนิดหลายสแตก.....	11
2.13 แสดงโรเตอร์และสเตเตอร์ของมอเตอร์ประเภทคาร์ลิกแดนซ์แปรค่าได้ 5 สแตก.....	11
2.14 แสดงโครงสร้างของมอเตอร์ประเภทคาร์ลิกแดนซ์แปรค่าได้ชนิด 5 สแตกแบบแกนวิส.....	12
2.15 แสดงโครงสร้างเบื้องต้นของสเตปป์มอเตอร์ประเภทแม่เหล็กถาวร.....	13
2.16 แสดงการต่อวงจรขั้วอย่างง่ายสำหรับสเตปป์มอเตอร์ประเภทแม่เหล็กถาวรสองเฟส.....	13
2.17 แสดงการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เมื่อถูกกระตุ้นในทิศทวนเข็มนาฬิกา.....	13

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 แสดงโครงสร้างของโรเตอร์ของสเตปป์มอเตอร์ประเภทไฮบริดจ์.....	14
2.19 แสดงทิศทางการสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ประเภทไฮบริดจ์.....	14
2.20 แสดงลักษณะการพันขดลวดแบบ โม โนฟีลาร์และไบฟีลาร์.....	15
2.21 แสดงหลักการของวงจรควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ที่มีการพัน ขดลวดแบบต่างๆ.....	15
2.22 แสดงวงจรขั้วยูนิโพลาร์.....	19
2.23 แสดงการใช้วงจรขั้วแบบยูนิโพลาร์ขั้วขดลวดแบบไบฟีลาร์.....	19
2.24 แสดงวงจรขั้วแบบไบโพลาร์.....	21
2.25 แสดงวงจรสมมูลย์ของขดลวดสเตปป์มอเตอร์.....	21
2.26 แสดงวงจรไดโอดซัพเพรสเซอร์.....	22
2.27 แสดงตัวซัพเพรสเซอร์แบบไดโอด-รีซิสเตอร์.....	23
2.28 แสดงซีเนอร์ไดโอดซัพเพรสเซอร์.....	23
2.29 แสดงการเปรียบเทียบผลของการลดลงของกระแสเมื่อใช้ซัพเพรสเซอร์แบบต่างๆ.....	23
2.30 แสดงตัวอย่างวงจรขั้วสเตปป์มอเตอร์ 4 เฟส ที่ใช้ซีเนอร์ไดโอดซัพเพรสเซอร์.....	24
2.31 แสดงตัวอย่างวงจรขั้วที่ใช้ซัพเพรสเซอร์ชนิดตัวเก็บประจุ.....	24
2.32 แสดงวงจรที่มีการปรับปรุงกระแสบัลด์อ์โดยใช้ตัวต้านทาน.....	25
2.33 แสดงหลักการของวงจรขั้วสเตปป์มอเตอร์ที่ใช้แหล่งจ่ายไฟ 2 ชุด.....	26
2.34 แสดงลักษณะสัญญาณแรงดันและกระแสของวงจรขั้ว 2 ระดับแรงดัน.....	26
2.35 แสดงลักษณะวงจรขั้วที่ใช้แหล่งจ่ายไฟ 2 ชุดสำหรับมอเตอร์ 4 เฟส.....	27
2.36 แสดงหลักการของวงจรขั้วแบบพัลส์วิดท์มอดูเลชันPWM.....	27
2.37 แสดงคุณลักษณะของแรงบิดสแตติกของสเตปป์มอเตอร์ขนาด 3 เฟส.....	29
2.38 แสดงกราฟคุณลักษณะT- θ ของสเตปป์มอเตอร์.....	30
2.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพคงแรงบิดกับกระแสที่จ่ายให้กับเฟสต่างๆ ของสเตปป์มอเตอร์(ก) สเตปป์มอเตอร์แบบ 1.8 องศาประเภทรีลัคแตนซ์แปร ค่าได้ (ข) สเตปป์มอเตอร์แบบ 1.8 องศาประเภทไฮบริดจ์.....	30
2.40 แสดงคุณลักษณะทางไดนามิกของสเตปป์มอเตอร์.....	31
2.41 แสดงวิธีการและเครื่องมือที่ใช้ในการวัดT/ θ characteristic.....	32
2.42 แสดงลักษณะกราฟของ T/ θ characteristic.....	33

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.43 แสดงการวัดแรงบิดพลูอิน.....	34
2.44 แสดงการวัดแรงบิดพลูเอาท์ของสเตปป์ังมอเตอร์โดยใช้สเกลสปริง ก. แบบสองสเกล ข. แบบสเกลเดียว.....	35
2.45 แสดงการวัดแรงบิดพลูเอาท์ของสเตปป์ังมอเตอร์โดยใช้สเตรนเกจ.....	36
2.46 แสดง Hysteresis dynamometer	36
3.1 แสดงการควบคุมสเตปป์ังมอเตอร์แบบวงเปิด.....	37
3.2 แสดงวงจรเกออสซิลเลเตอร์.....	39
3.3 แสดงรูปคลื่นสัญญาณต่างๆในวงจรเกออสซิลเลเตอร์.....	39
3.4 แสดงลักษณะของสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมการเร่ง.....	40
3.5 แสดงโปรไฟล์ของอัตราพัลส์การเร่งและหน่วยความเร็วเชิงเส้น.....	41
3.6 แสดงวงจรควบคุมแบบการเร่งและหน่วยความเร็วเชิงเส้น.....	41
3.7 แสดงลักษณะ โปรไฟล์อัตราพัลส์การเร่งและหน่วยความเร็วแบบเอ็็กโปเนนเชียล.....	42
3.8 แสดงวงจรการเร่งและหน่วยความเร็วแบบเอ็็กโปเนนเชียล.....	42
3.9 แสดงลักษณะ โปรไฟล์การเร่งและหน่วยความเร็วแบบความชันขาขึ้นเป็นเอ็็กโปเนนเชียลและความชันขาลงเป็นแบบอินเวอร์สเอ็็กโปเนนเชียล.....	43
3.10 แสดงวงจรของการเร่งและหน่วยความเร็วแบบความชันขาขึ้นเป็นเอ็็กโปเนนเชียลและความชันขาลงเป็นแบบอินเวอร์สเอ็็กโปเนนเชียล.....	43
3.11 แสดงลักษณะการเร่งแบบสัญญาณ โคซายน์.....	44
3.12 แสดงลักษณะการเร่งแบบสัญญาณ พาราโบลาร์.....	44
3.13 แสดงลักษณะการเร่งแบบไฮเปอร์โบลาร์ ก. อัตราพัลส์แบบบวก ข. แบบลบ.....	45
3.14 แสดงหลักการควบคุมแบบความเร็วคงที่.....	46
3.15 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบการเร่งความเร็วเชิงเส้นจนถึงความเร็วช่วงหมุนคงที่ (f_s) ภายในเวลา t_m	47
3.16 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบเอ็็กโปเนนเชียล.....	48
4.1 แสดงลักษณะการกระตุ้นเฟสมอเตอร์โดยอาศัยลักษณะแรงบิดสแตติก.....	51
4.2 แสดงคุณลักษณะของแรงบิด ไคนามิก.....	51
4.3 แสดงการประมาณสมการแทนลักษณะของแรงบิด.....	53
4.4 แสดงกราฟการพล็อตของเวลา t_f ถึง t_m และความเร็ว 0 ถึง f	55

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 แสดงโพรไฟล์ความเร็วของมอเตอร์ในช่วงการเร่งและหน่วงความเร็ว.....	57
4.6 แสดงลักษณะการป้อนสัญญาณพัลส์ในแต่ละช่วงเวลาในการสวิทช์และสเตปที่เคลื่อนที่	60
4.7 แสดงโพล์ชาร์ทการคำนวณหาโพรไฟล์ของการเร่งและหน่วงความเร็ว.....	64
4.8 แสดงโพล์ชาร์ทการเขียนโปรแกรมหาโพรไฟล์ความเร็วตามจำนวนสเตปที่ต้องการให้เคลื่อนที่โดยหาต่อจากโพล์ชาร์ทในรูปที่ 4.7.....	65
4.9 แสดงรูปตัวอย่างของการหาความเร็วที่ป้อนแต่ละสเตปในช่วงการเร่งและหน่วงความเร็ว ก. โพรไฟล์ความเร็วของการเร่งและหน่วงความเร็ว ข. ความเร็วที่ป้อนในแต่ละสเตปของการเร่ง ค. ความเร็วที่ป้อนในแต่ละสเตปของการลดความเร็ว	66
5.1 แสดงรูปสเตปปีงมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	67
5.2 แสดงรูปเอนโค้ดเดอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	68
5.3 แสดงอินเนอร์เซียร์ โหลด 200 กรัม และ 400 กรัม.....	68
5.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมการทำงานสเตปปีงมอเตอร์แบบวงเปิดด้วยเทคนิคโพรไฟล์ความเร็ว.....	69
5.5 แสดงกราฟระหว่างความสามารถความเร็วเริ่มหมุนและความถี่ของระบบ.....	71
5.6 แสดงกราฟแรงบิดไดนามิกกับความเร็วจากบริษัทผู้ผลิต.....	72
5.7 แสดงกราฟจากการประมาณสมการแทนลักษณะแรงบิดพลูเอาท์ของมอเตอร์จากบริษัทผู้ผลิต โดยกำหนดสมการที่ขนาดเปอร์เซ็นต์ต่างๆของแรงบิด 100 เปอร์เซ็นต์.....	72
5.8 แสดงลักษณะสัญญาณจากเอนโค้ดเดอร์.....	74
5.9 แสดงวงจรวัดผลตอบสนองตามโพรไฟล์ความเร็วโดยใช้วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน.....	75
5.10 แสดงบล็อกไดอะแกรมวงจรวัดผลตอบสนองการเคลื่อนที่ทางตำแหน่ง.....	75
5.11 วงจรนับขึ้นและนับลงขนาด 16 บิต.....	76
5.12 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อกแบบ R-2R Ladder.....	76
5.13 แสดงวงจรโดยรวมที่ใช้ในงานวิจัย.....	77
5.14 โพล์ชาร์ทการสร้างสัญญาณพัลส์ตามความเร็วโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8032.....	78

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.15 แสดงการควบคุมแบบความเร็วคงที่ ก. แสดงการเลือกความเร็วเริ่มหมุน ข. โพรไฟล์ความเร็วที่มีความเร็วคงที่ f_s ตลอดการเคลื่อนที่	80
5.16 แสดงโพลีชาร์ทการหาความเร็วที่ให้เวลาการเคลื่อนที่น้อยที่สุดของการควบคุม แบบการเร่งและหน่วงความเร็วเชิงเส้นแบบเดิม.....	83
5.17 ผลการเคลื่อนที่ของการเคลื่อนที่แบบความเร็วคงที่จากการคำนวณกรณีไม่มีอิน เนอร์เชียรีโหลด ก.แสดงเวลาการเคลื่อนที่ 320 มิลลิวินาที ข.แสดง โพรไฟล์ความเร็วแบบความเร็วคงที่ที่ 800 สเตปต่อวินาที.....	84
5.18 แสดงผลการเคลื่อนที่แบบความเร็วคงที่จากทดลองจริงกรณีไม่มีโหลด อินเนอร์เชียรี ช่องสัญญาณ 1 โพรไฟล์ความเร็ว ช่องสัญญาณ 2 แสดงเวลาทาง ตำแหน่ง dx : 323 มิลลิวินาที ช่องสัญญาณ 3 สัญญาณอินพุตพัลส์ จำนวน 256 สเตป.....	84
5.19 ผลการคำนวณการเคลื่อนที่แบบการเร่งและหน่วงความเร็วเชิงเส้นกรณีไม่มี อินเนอร์เชียรีโหลด ก. แสดงความเร็วที่ให้เวลาการเคลื่อนที่น้อยที่สุด 1797 สเตปต่อวินาที ข. แสดงความเร็วที่ใช้ป้อนมอเตอร์ในการเร่งและหน่วงความเร็ว ค.เวลาใช้ในการเคลื่อนที่ 156.659 มิลลิวินาที. ง. แสดงโพรไฟล์ความเร็วที่จำนวน สเตปเคลื่อนที่ 256 สเตป.....	85
5.20 แสดงผลการเคลื่อนที่แบบการเร่งและหน่วงความเร็วเชิงเส้นจากทดลองจริงกรณี ไม่มีโหลดอินเนอร์เชียรี ช่องสัญญาณ 1 โพรไฟล์ความเร็ว ช่องสัญญาณ 2 เวลา ทางตำแหน่ง dx : 157 มิลลิวินาที ช่องสัญญาณ 3 สัญญาณอินพุตพัลส์ จำนวน 256 สเตป.....	85
5.21 แสดงผลการทดลองกรณีอินเนอร์เชียรีโหลด 200 กรัม ก.เวลาทางตำแหน่ง 731.429 มิลลิวินาที ข. แสดง โพรไฟล์ความเร็วแบบความเร็วคงที่ ความเร็ว 350 สเตป/วินาที.....	86
5.22 แสดงผลการเคลื่อนที่จริง ช่องสัญญาณ 1 แสดง โพรไฟล์ความเร็ว ช่องสัญญาณ 2 แสดงเวลาทางตำแหน่ง dx: 733 มิลลิวินาที ช่องสัญญาณ 3 แสดงสเตปอินพุต 256 สเตป.....	86
5.23 แสดงผลการคำนวณกรณีโหลด 200 กรัมจำนวนสเตปเคลื่อนที่ 256 สเตป ก. แสดง ความเร็วที่ให้เวลาการเคลื่อนที่น้อยที่สุด 1502 สเตปต่อวินาที	

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข. แสดงโปรไฟล์ความเร็วการเร่งและหน่วงความเร็ว ค.แสดงเวลาทางตำแหน่ง 215.789 มิลลิวินาที ง.แสดงโปรไฟล์ความเร็ว.....	87
5.24 แสดงผลการเคลื่อนที่จริงของการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้น กรณีอินเนอร์เซียร์โหลด 200 กรัม ช่องสัญญาณ 1 แสดงโปรไฟล์ ความเร็ว ช่องสัญญาณ 2 แสดงเวลาทางตำแหน่ง dx: 217 มิลลิวินาที ช่องสัญญาณ 3 แสดงสเตปอินพุท 256 สเตป.....	87
5.25 แสดงผลการคำนวณ กรณีอินเนอร์เซียร์โหลด 400 กรัม ก. เวลาทางตำแหน่ง 853.333 มิลลิวินาที ข. แสดงโปรไฟล์ความเร็วแบบความเร็วคงที่ ความเร็ว 300 สเตป/วินาที.....	88
5.26 แสดงผลการเคลื่อนที่จริงแบบความเร็วคงที่ 300 สเตปต่อวินาที กรณีอินเนอร์เซียร์โหลด 400 กรัม ช่องสัญญาณ 1 แสดงโปรไฟล์ ความเร็ว ช่องสัญญาณ 2 แสดงเวลาทางตำแหน่ง dx: 853 มิลลิวินาที ช่องสัญญาณ 3 แสดงสเตปอินพุท 256 สเตป.....	88
5.27 แสดงผลการคำนวณกรณีโหลด 400 กรัมจำนวนสเตปเคลื่อนที่ 256 สเตป ก. แสดงความเร็ว 1283 สเตปต่อวินาที ที่ให้เวลาการเคลื่อน ที่น้อยที่สุด ข. แสดงโปรไฟล์ความเร็วการเร่งและหน่วงความเร็ว ค.แสดงเวลาทางตำแหน่ง 266.142 มิลลิวินาที ง.แสดงโปรไฟล์ความเร็ว.....	89
5.28 แสดงผลการเคลื่อนที่จริงของการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้นกรณีอินเนอร์ เซียร์โหลด 400 กรัม ช่องสัญญาณ 1 แสดงโปรไฟล์ความเร็ว ช่องสัญญาณ 2 แสดงเวลาทางตำแหน่ง dx: 267 มิลลิวินาที ช่องสัญญาณ 3 แสดงสเตปอินพุท 256 สเตป.....	89
5.29 แสดงผลการคำนวณกรณีไม่มีอินเนอร์เซียร์โหลด ก. แสดงโปรไฟล์ความเร็ว การเร่งและหน่วงความเร็ว ข. แสดงความเร็วในแต่ละสเตปของการเร่ง และหน่วงความเร็ว ค.แสดงเวลาทางตำแหน่ง 144.005 มิลลิวินาที ง.แสดงโปรไฟล์ความเร็วจำนวนสเตปเคลื่อนที่ 256 สเตป.....	90
5.30 แสดงผลการเคลื่อนที่จริงของการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้นกรณีไม่มีอิน เนอร์เซียร์โหลด ช่องสัญญาณ 1 แสดงโปรไฟล์ความเร็ว ช่องสัญญาณ 2 แสดง เวลาทางตำแหน่ง dx: 147 มิลลิวินาที ช่องสัญญาณ 3 แสดงสเตปอินพุท 256 สเตป.....	90

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.31 แสดงผลการคำนวณกรณีไม่มีอินเนอร์ซีรัโหลด ก. แสดงโปรไฟล์ความเร็วการเร่งและหน่วยความเร็ว ข. แสดงความเร็วในแต่ละสเตปของการเร่งและหน่วยความเร็ว ค.แสดงเวลาทางตำแหน่ง 135.5 มิลลิวินาที ง.แสดงโปรไฟล์ความเร็วจำนวนสเตปเคลื่อนที่ 256 สเตป.....	91
5.32 แสดงผลการเคลื่อนที่จริงของการเร่งและหน่วยความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียลกรณีไม่มีอินเนอร์ซีรัโหลด ช่องสัญญาณ 1 แสดงโปรไฟล์ความเร็ว ช่องสัญญาณ 2 แสดงเวลาทางตำแหน่ง dx: 137 มิลลิวินาที ช่องสัญญาณ 3 แสดงสเตปอินพุท 256 สเตป.....	91
5.33 แสดงผลการคำนวณกรณีอินเนอร์ซีรัโหลด 200 กรัม ก. แสดงโปรไฟล์ความเร็วการเร่งและหน่วยความเร็ว ข. แสดงความเร็วในแต่ละสเตปของการเร่งและหน่วยความเร็ว ค.แสดงเวลาทางตำแหน่ง 226.926 มิลลิวินาที ง.แสดงโปรไฟล์ความเร็วจำนวนสเตปเคลื่อนที่ 256 สเตป.....	92
5.34 แสดงผลการเคลื่อนที่จริงของการเร่งและหน่วยความเร็วแบบเชิงเส้นด้วยเทคนิคโปรไฟล์ ความเร็ว กรณีมีอินเนอร์ซีรัโหลด 200 กรัม ช่องสัญญาณ 1 แสดงโปรไฟล์ความเร็ว ช่องสัญญาณ 2 แสดงเวลาทางตำแหน่ง dx: 227 มิลลิวินาที ช่องสัญญาณ 3 แสดงสเตปอินพุท 256 สเตป.....	92
5.35 แสดงผลการคำนวณกรณีอินเนอร์ซีรัโหลด 200 กรัม ก. แสดงโปรไฟล์ความเร็วการเร่งและหน่วยความเร็ว ข. แสดงความเร็วในแต่ละสเตปของการเร่งและหน่วยความเร็ว ค.แสดงเวลาทางตำแหน่ง 165.005 มิลลิวินาที ง.แสดงโปรไฟล์ความเร็วจำนวนสเตปเคลื่อนที่ 256 สเตป.....	93
5.36 แสดงผลการเคลื่อนที่จริงของการเร่งและหน่วยความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียลด้วยเทคนิคโปรไฟล์ความเร็ว กรณีมีอินเนอร์ซีรัโหลด 200 กรัม ช่องสัญญาณ 1 แสดงโปรไฟล์ความเร็วช่องสัญญาณ 2 แสดงเวลาทางตำแหน่ง dx: 167 มิลลิวินาที ช่องสัญญาณ 3 แสดงสเตปอินพุท 256 สเตป.....	93
5.37 แสดงผลการคำนวณกรณีอินเนอร์ซีรัโหลด 400 กรัม ก. แสดงโปรไฟล์ความเร็วการเร่งและหน่วยความเร็ว ข. แสดงความเร็วในแต่ละสเตปของการเร่งและหน่วยความเร็ว ค.แสดงเวลาทางตำแหน่ง 349.704 มิลลิวินาที ง.แสดงโปรไฟล์ความเร็วจำนวนสเตปเคลื่อนที่ 256 สเตป.....	94

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.38 แสดงผลการเคลื่อนที่จริงของการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้นด้วยเทคนิคโปรไฟล์ความเร็ว กรณีมีอินเนอร์เชียร์โหลด 400 กรัม ช่องสัญญาณ 1 แสดงโปรไฟล์ความเร็ว ช่องสัญญาณ 2 แสดงเวลาทางตำแหน่ง dx: 350 มิลลิวินาที ช่องสัญญาณ 3 แสดงสเตปอินพุท 256 สเตป.....	94
5.39 แสดงผลการคำนวณกรณีอินเนอร์เชียร์โหลด 400 กรัม ก. แสดงโปรไฟล์ความเร็ว การเร่งและหน่วงความเร็ว ข. แสดงความเร็วในแต่ละสเตปของการเร่งและลดความเร็ว ค.แสดงเวลาทางตำแหน่ง 211.835 มิลลิวินาที ง.แสดงโปรไฟล์ความเร็ว จำนวนสเตปเคลื่อนที่ 256 สเตป.....	95
5.40 แสดงผลการเคลื่อนที่จริงของการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียลด้วยเทคนิคโปรไฟล์ความเร็ว กรณีมีอินเนอร์เชียร์โหลด 400 กรัม ช่องสัญญาณ 1 แสดงโปรไฟล์ความเร็วช่องสัญญาณ 2 แสดงเวลาทางตำแหน่ง dx: 233 มิลลิวินาที ช่องสัญญาณ 3 แสดงสเตปอินพุท 256 สเตป.....	95
5.41 แสดงการเกิดการออสซิลเลทระหว่างการเคลื่อนที่จะเห็นว่า ช่องสัญญาณ 1 แสดงโปรไฟล์ความเร็ว ซึ่งความเร็วมอเตอร์ที่ได้ไม่สม่ำเสมอและไม่ถูกต้อง ช่องสัญญาณ 2 แสดงเวลาทางตำแหน่งจะเห็นว่ามอเตอร์ไม่มีการเคลื่อนที่ ช่องสัญญาณ 3 แสดงจำนวนสเตปอินพุทที่ป้อนให้ระหว่างการเคลื่อนที่ 256 สเตป.....	96
5.42 กราฟแสดงการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ระหว่างการเคลื่อนที่ของการควบคุมประเภทต่างๆที่อินเนอร์เชียร์โหลดขนาดต่างๆ.....	97
6.1 แสดงโปรไฟล์ความเร็วของการเร่งแต่ละแบบ.....	100

บทที่ 1

บทนำ

การใช้งานสเตปปีงมอเตอร์ปัจจุบันกว้างขวางขึ้น ทั้งในงานด้านอุตสาหกรรมและเครื่องใช้ส่วนบุคคล เช่น เครื่อง NC , เครื่องกัด, พรีนเตอร์แบบอนุกรม, X-Y พล็อตเตอร์ หัวอ่านดิสก์ไดรว์ อันเนื่องจากการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิต ทำให้สเตปปีงมอเตอร์มีมุมในการหมุนละเอียดขึ้น แรงบิดมีค่ามากขึ้น และสามารถควบคุมแบบระบบวงเปิดได้ โดยไม่เกิดข้อผิดพลาดทางตำแหน่งคือ ไม่มีการสูญหายของสเตป สเตปปีงมอเตอร์ทำงานโดยมีการหมุนเป็นมุมคงที่ในแต่ละสเตป โดยการป้อนกระแสให้ขดลวดในแต่ละเฟสของมอเตอร์ตามลำดับที่ถูกต้องจะทำให้มอเตอร์หมุนได้ ดังนั้นจึงทำการควบคุมได้โดยการใช้สัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณพัลส์ไปควบคุมการจ่ายกระแสให้แต่ละเฟส โดยผ่านวงจรจัดลำดับการป้อนกระแสเฟสอย่างถูกต้องทำให้การควบคุมมอเตอร์ชนิดนี้ง่ายขึ้น เนื่องจากปัจจุบันนี้อุปกรณ์ทางด้านดิจิทัลมีราคาถูกหรือจะนำเอาไมโครโปรเซสเซอร์มาใช้ในการควบคุมได้ โดยทำหน้าที่เป็นตัวสร้างสัญญาณพัลส์และเป็นวงจรจัดลำดับเฟสได้อีกด้วย จึงสามารถควบคุมมอเตอร์แบบวงเปิดได้โดยง่าย ซึ่งไม่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ผิดพลาด เนื่องจากจำนวนสเตปจะเท่ากับจำนวนพัลส์ที่ป้อนให้มอเตอร์ แต่จะมีข้อจำกัดเรื่องความเร็วในการป้อนพัลส์ ต้องมีค่าไม่สูงเกินไป การควบคุมแบบวงเปิดที่ใช้อยู่ เป็นแบบความเร็วคงที่ เป็นความเร็วที่มอเตอร์สามารถเริ่มและหยุดหมุนได้ มีค่าต่ำประมาณ 100 – 400 เฮิร์ตซ์[1] ทำให้มีระยะเวลาในการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นถึงตำแหน่งเป้าหมาย ความเป็นจริงแล้วมอเตอร์สามารถหมุนที่ความเร็วสูงกว่านี้ แต่มอเตอร์ไม่สามารถเปลี่ยนความเร็วไปสู่ความเร็วมากที่สุดได้ทันที ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มความเร็วทีละน้อยๆอย่างเหมาะสมจึงจะทำให้มอเตอร์สามารถหมุนที่ความเร็วสูงสุดได้ ซึ่งจะทำให้ลดระยะเวลาในการเคลื่อนที่ลงได้มากกว่าที่เป็นอยู่[2]

1.1 แนวคิดการนำเสนอวิทยานิพนธ์

การใช้งานสเตปปีงมอเตอร์ส่วนใหญ่จะเป็นการใช้งานควบคุมการเคลื่อนที่ทางตำแหน่ง คือจะเป็นการเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการ การควบคุมสามารถควบคุมได้ทั้งระบบวงเปิดและระบบวงปิด การควบคุมระบบแบบวงปิดจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ในการป้อนกลับของสัญญาณ เพื่อจะได้รู้ตำแหน่งแกนโรเตอร์ของมอเตอร์ ซึ่งตำแหน่งแกนโรเตอร์มีความสัมพันธ์กับแรงบิดสแตติกทำให้รู้การเปลี่ยนแปลงของแรงบิด เมื่อโรเตอร์เคลื่อนที่จากตำแหน่งของขดลวดที่ถูกกระตุ้นไปยังขดลวดที่ถูกกระตุ้นอันต่อไป จะทำให้สามารถกระตุ้นเฟสของสเตปปีงมอเตอร์ตรงตำแหน่งของแรงบิดมากที่สุดได้ และมีความถูกต้องมากขึ้น ส่งผลให้แรงบิดสุทธิที่จะเอาชนะโหลดมีค่ามากที่สุด ทำให้มอเตอร์มีอัตราเร่งมาก ดังนั้นมอเตอร์จึงเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงตำแหน่งเป้าหมายใช้เวลาสั้นๆ แต่ราคาของอุปกรณ์ในการป้อนกลับมีราคาสูงและการควบคุมยังมีความยุ่งยากมากกว่าระบบวงเปิด และในงานบางอย่างไม่จำเป็นต้องควบคุมแบบระบบวงปิด ดังนั้นการควบคุมแบบวงเปิดจึงมีความสำคัญอยู่ ในงานควบคุมบางอย่างที่มีสเตปป์มอเตอร์เป็นเครื่องต้นกำลัง ถ้าเราสามารถหาอัตราเร่งและอัตราห้วงความเร็วในการป้อนพัลส์ของมอเตอร์ได้อย่างเหมาะสม จะทำให้มอเตอร์สามารถหมุนที่ความเร็วสูงสุดได้ใกล้เคียงกับการควบคุมแบบวงปิด ในการควบคุมแบบวงเปิดนั้นเราไม่สามารถรู้ตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงของแรงบิด ในการพิจารณาจึงจำเป็นต้องนำคุณลักษณะแรงบิดแบบไดนามิก ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่มอเตอร์สร้างได้กับความเร็วที่มอเตอร์หมุน มาพิจารณาประกอบกับสมการการเคลื่อนที่ทางไดนามิก จะทำให้รู้ถึงความสามารถในการเร่งและลดความเร็วของมอเตอร์ที่สภาวะโหลดคงที่ค่าหนึ่งได้แล้วใช้วิธีการคำนวณทางตัวเลขแก้หาความเร็วที่จะป้อนในแต่ละสเตปป์ได้สอดคล้องกับคุณลักษณะของแรงบิดแบบไดนามิก ซึ่งเรียกว่า โปรไฟล์ความเร็ว (velocity profile) [2][3] จะทำให้ได้อัตราเร่งและอัตราห้วงความเร็วที่เหมาะสม โดยไม่ต้องใช้วิธีแบบลองผิดลองถูกแบบเดิม[4] การหาโปรไฟล์ความเร็วได้จากการแทนคุณลักษณะแรงบิดแบบไดนามิก เป็นสมการที่มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เป็นจริงมากที่สุด จะส่งผลให้ระยะเวลาในการเคลื่อนที่น้อยและความเร็วสูงสุดในการเคลื่อนที่ได้ใกล้เคียงกับการควบคุมแบบวงปิด แต่การควบคุมแบบวงเปิดมีขีดจำกัดที่ความถี่ของสัญญาณที่ป้อนแกว่จรับ และค่าแรงบิดที่ใช้งานจริงของมอเตอร์ไม่สามารถนำมาใช้ได้ 100% เนื่องจากต้องมีการกำหนดช่วงที่ปลอดภัยในกรณีที่เมื่อโหลดเกิดการเปลี่ยนแปลงขณะทำงานอยู่ ดังนั้นแรงบิดของมอเตอร์ที่นำมาใช้จึงต้องกำหนดช่วงที่ปลอดภัย (safety margin) การกำหนดช่วงที่ปลอดภัยกว้างจะทำให้ระยะเวลาการเคลื่อนที่มาก จึงจำเป็นต้องเลือกระหว่างช่วงที่ปลอดภัยกับเวลาในการออกแบบโปรไฟล์ความเร็ว [1] การควบคุมแบบวงเปิดโดยวิธีในวิทยานิพนธ์นี้จะช่วยลดความยุ่งยากของการหาอัตราเร่งและอัตราห้วงความเร็วที่เหมาะสมกว่าวิธีแบบเดิมที่ใช้การลองผิดลองถูกในการกำหนดอัตราเร่งและอัตราห้วงความเร็วเพื่อให้มอเตอร์ตอบสนองได้ดีที่สุด

1.2 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิด โดยเน้นเรื่องการลดระยะเวลาในการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นถึงตำแหน่งเป้าหมายให้น้อยกว่าการควบคุมแบบวงเปิดแบบเดิมที่มีการควบคุมแบบความเร็วคงที่หรือการควบคุมแบบการเร่งและห้วงความเร็วเชิงเส้น โดยนำคุณลักษณะของแรงบิดแบบไดนามิกมาพิจารณาเพื่อให้ได้โปรไฟล์ความเร็วที่เหมาะสมของการเร่งและห้วงความเร็วของมอเตอร์ที่สภาวะแรงบิด โหลดคงที่ค่าหนึ่ง และใช้อินเตอร์เซียร์โหลดเป็นกรณีศึกษา

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาทั้งหมด 6 บท ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของปัญหาการควบคุมแบบวงเปิดแบบเดิม แนวคิดและหลักการ โดยสังเขปของการควบคุมมอเตอร์โดยใช้เทคนิคการสร้างโปรไฟล์ความเร็วที่เหมาะสม วัตถุประสงค์และขอบเขตวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการงานเบื้องต้นและการควบคุมในวิธีต่าง ๆ ประเภทของสเตรปิ้งมอเตอร์ คุณสมบัติของแรงบิดแบบสเตติกและไดนามิก

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการการควบคุมแบบวงเปิดทั่วไปที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน

บทที่ 4 กล่าวถึงหลักการการควบคุมสเตรปิ้งมอเตอร์แบบวงเปิดโดยการหาความสามารถการเร่งและลดความเร็วของมอเตอร์เมื่อโหลดคงที่ค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า “โปรไฟล์ความเร็ว”

บทที่ 5 การทดลอง ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

บทที่ 6 วิจารณ์ผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

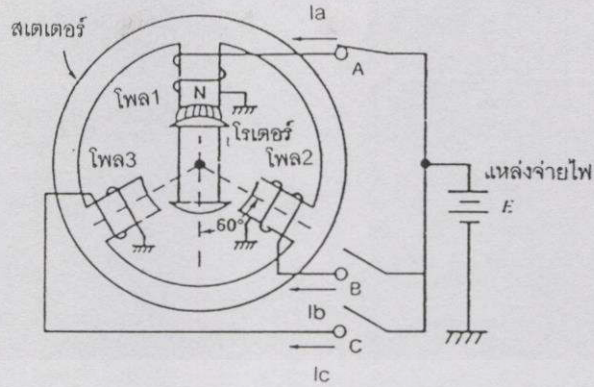


ทฤษฎีพื้นฐานและหลักการทำงานของสเตปป์มอเตอร์

สเตปป์มอเตอร์เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่มีลักษณะพิเศษเป็นตัวต้นกำลังแบบดิจิทัลที่สำคัญอย่างหนึ่ง สามารถทำงานโดยเปลี่ยนพลังงานทางไฟฟ้าเป็นพลังงานกลในรูปของการเคลื่อนที่ ซึ่งมีอินพุทเป็นกลุ่มของแรงดันไบนารี และเอาต์พุทเป็นลักษณะของการเคลื่อนที่เชิงมุมเป็นสเตปป์ที่มีค่ามุมคงที่ โดยการจ่ายแรงดันหรือกระแสแก่ขดลวดแต่ละเฟสตามลำดับอย่างถูกต้อง การนำไปใช้งานเมื่อต้องการการควบคุมการเคลื่อนที่และตำแหน่งที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำ การเคลื่อนที่แต่ละสเตปป์เกี่ยวข้องกับสัญญาณพัลส์แต่ละอันที่จ่ายแก่ขดลวดสเตปป์มอเตอร์ทั้งหมด จำนวนสเตปป์เคลื่อนที่ที่เท่ากับจำนวนสัญญาณพัลส์ที่จ่ายแก่มอเตอร์ สามารถเคลื่อนที่ทั้งตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกาขึ้นอยู่กับการจัดลำดับการจ่ายพัลส์แก่ขดลวด ตัวอย่างการใช้งาน เช่น เป็นอุปกรณ์ในเครื่องมือทางกล, x-y พล็อตเตอร์, พรินเตอร์แบบอนุกรม, เครื่องพิมพ์ดีด, อุปกรณ์ต่อพ่วงทางคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

2.1 หลักการทำงานของเบื้องต้นของสเตปป์มอเตอร์

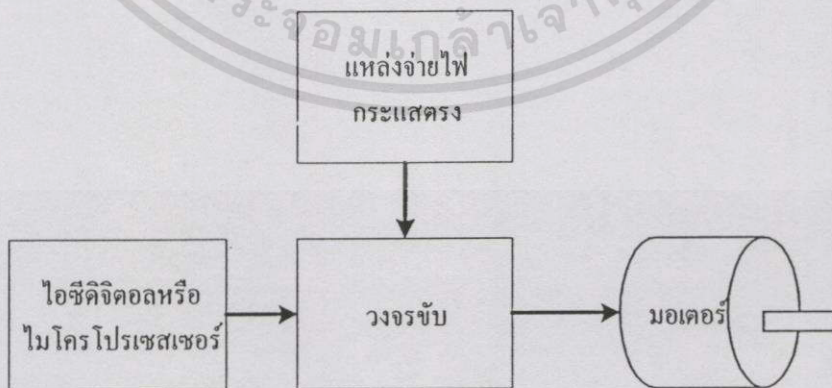
จากรูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบแบบง่ายของสเตปป์มอเตอร์ ประกอบด้วยขั้วโพลสเตปป์มอเตอร์ 3 ขั้วและโรเตอร์ 2 ขั้ว ที่ทำจากเหล็กอ่อน ขดลวดสเตปป์มอเตอร์ถูกต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยผ่านสวิตช์ 3 ตัว A,B,C เมื่อสวิตช์เปิดวงจรมอเตอร์อยู่ที่ตำแหน่งใดๆก็ได้ แต่เมื่อสวิตช์ A ปิดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่สร้างโดยโพล 1 จะดึงดูดโรเตอร์ให้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกับขั้วโพลเหมือนแสดงในรูป แต่เมื่อเราเปิดสวิตช์ที่ A และปิดสวิตช์ที่ B โรเตอร์ก็จะอยู่ในแนวเดียวกับขั้วโพล 2 ดังนั้นมอเตอร์จะหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา (ccw = counter clockwise) 60 องศาเมื่อเปิดสวิตช์ที่ B และปิดสวิตช์ที่ C จะทำให้โรเตอร์อยู่ในแนวเดียวกับขั้วโพล 3 และหมุนทวนเข็มนาฬิกา ดังนั้นเราสามารถทำให้โรเตอร์หมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกาได้ 60 องศาต่อสเตปป์โดยการเปิดและปิดสวิตช์ไปตามลำดับ A,B,C,A,B,C,..... นอกจากนั้นเราสามารถกลับทิศการหมุนได้โดยการกลับลำดับการสวิตช์เป็น A,C,B,A,C,B,..... เพื่อให้ตำแหน่งสุดท้ายของโรเตอร์ยังคงอยู่โดยการยังคงปิดสวิตช์สุดท้ายอยู่ จะทำให้โรเตอร์ยังอยู่ที่ตำแหน่งนี้และเป็นการป้องกันการกระทบกระเทือนจากแรงภายนอก ในสถานะคงตัวนี้มอเตอร์ยังคงถูกล็อกอยู่โดยแรงภายนอกไม่มากเกินไป เรียกว่าโฮลดิ้งทอร์ก (Holding Torque) ของมอเตอร์ ในการเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปยังตำแหน่งต่อไป การเคลื่อนที่ของโรเตอร์จะถูกกระทบกระเทือนโดยอินเนอร์เชีย (Inertia) และแรงเสียดทานภายนอกได้[5]



รูปที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบแบบง่ายของสเตรปปิ้งมอเตอร์มูบโรเตอร์เคลื่อนที่ 60 องศา

ปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและวงจรรวมมากขึ้น ทำให้การใช้งานสเตรปปิ้งมอเตอร์ง่ายและสะดวกขึ้น อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ถูกนำมาใช้เป็นอิเล็กทรอนิกส์สวิตช์ สำหรับควบคุมการจ่ายกระแสให้แก่สเตรปปิ้งมอเตอร์และสัญญาณพัลส์ในการควบคุมก็ได้จากอุปกรณ์ดิจิทัล ไอซีหรือไมโครโปรเซสเซอร์ ซึ่งสะดวกต่อการควบคุม หลักการควบคุมสเตรปปิ้งมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.2 สาเหตุที่ทำให้สเตรปปิ้งมอเตอร์มีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากข้อดีที่ต่างจากมอเตอร์ประเภทอื่นดังต่อไปนี้

1. ไม่ต้องการส่วนป้อนกลับของสัญญาณเพื่อควบคุมตำแหน่งหรือความเร็ว จึงสามารถควบคุมแบบวงเปิดได้ ทำให้วงจรการควบคุมง่ายและต้นทุนต่ำ
2. ไม่มีการสะสมหรือเพิ่มขึ้นของความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเคลื่อนที่
3. สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์ดิจิทัลและคอมพิวเตอร์ได้อย่างดี



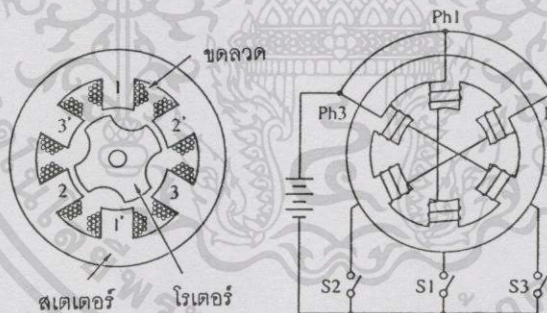
รูปที่ 2.2 แสดงหลักการควบคุมการทำงานของสเตรปปิ้งมอเตอร์

2.2 ประเภทของสเตปปีงมอเตอร์

สเตปปีงมอเตอร์แบ่งออกเป็นหลายประเภทที่สอดคล้องกับลักษณะ โครงสร้างทางกลและหลักเกณฑ์การทำงานดังต่อไปนี้

2.2.1 สเตปปีงมอเตอร์ประเภทค้ำรีลักแตนซ์แปรค่าได้(Variable Reluctance Stepping Motor)

สเตปปีงมอเตอร์ประเภทค้ำรีลักแตนซ์แปรค่าได้หรือเรียกว่า วีอาร์- สเตปปีงมอเตอร์(VR-Stepping Motor)เป็นประเภทสเตปปีงที่ง่ายที่สุด เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจพื้นฐานจะใช้มอเตอร์ที่แสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นมอเตอร์ 3 เฟส มีซี่ฟันสเตเตอร์เท่ากับ 6 ซี่ฟันที่อยู่ตรงข้ามกัน 2 ซี่ทำมุมกัน 180 องศาจะเป็นเฟสเดียวกัน ขดลวดที่พันอยู่บนซี่ฟันแต่ละคู่จะต่อกันแบบอนุกรมหรือขนาน (ในรูปจะเป็นแบบอนุกรม) โรเตอร์มีซี่ฟันเท่ากับ 4 ปกติแล้วแกนของสเตเตอร์และโรเตอร์เป็นแผ่นเหล็กบางๆที่มีส่วนผสมของซิลิกอนวางซ้อนกัน(Laminate silicon steel) แต่โรเตอร์ที่ทำจากแท่งเหล็กซิลิกอนจะเป็นที่นิยมใช้กันมากกว่า วัสดุที่ใช้ทำสเตเตอร์และโรเตอร์ต้องมีค่าซึมซาบทางแม่เหล็ก(Permeability) สูงและให้เส้นแรงเหล็ก(Magnetic flux)ผ่านได้ง่ายเพื่อให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก(Magnetomotive force)สูงสุด

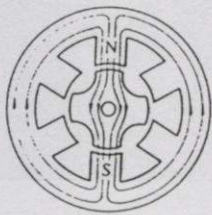


รูปที่ 2.3 แสดง โครงสร้างอย่างง่ายของสเตปปีงมอเตอร์ประเภทค้ำรีลักแตนซ์แปรค่าได้ 3 เฟส

ในรูปที่ 2.3 สมมุติให้ซี่ฟันแต่ละคู่ของสเตปปีงมอเตอร์มีขั้วที่ตรงกันข้ามคือ 1, 2, 3 เป็นขั้วเหนือ (N) และ 1', 2', 3' เป็นขั้วใต้(S) เมื่อแต่ละเฟสถูกกระตุ้นให้ทำงาน

กระแสในแต่ละเฟสจะถูกควบคุมโดยการเปิดและปิดสวิตช์ตามลำดับ ถ้ากระแสถูกจ่ายให้เฟส 1 หรือพูดว่าเฟส 1 ถูกกระตุ้นฟลักซ์แม่เหล็กจะเกิดขึ้นดังรูปที่ 2.4 โดยซี่ฟันโรเตอร์คู่หนึ่งจะมีตำแหน่งตรงกับซี่ฟัน 1 และ 1' ของสเตเตอร์ เมื่อโรเตอร์อยู่ในแนวเดียวกับสเตเตอร์ค่าความต้านทานแม่เหล็ก(Magnetic reluctance)จะมีค่าน้อยที่สุดและที่ตำแหน่งนี้มอเตอร์จะหยุดหรือเรียกว่า

ตำแหน่งสมดุลเมื่อมีแรงภายนอกกระทำกับ โรเตอร์ให้ออกจากตำแหน่งสมดุลในทิศตามเข็มนาฬิกา จะมีแรงบิดที่ต้านแรงบิดภายนอกเรียกว่า แรงบิดรีสตอริง (Restoring torque) ที่มีทิศทวนเข็มนาฬิกา ดังในรูปที่ 2.5

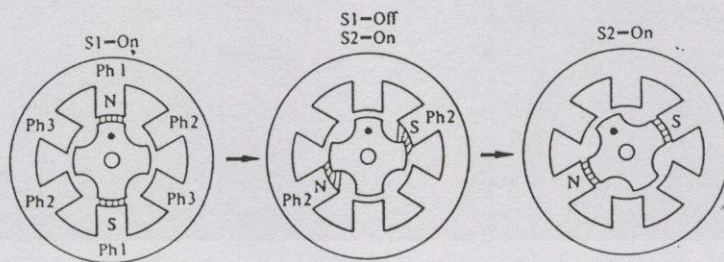


รูปที่ 2.4 แสดงตำแหน่งสมดุลเมื่อเฟสที่ 1 ถูกกระตุ้น

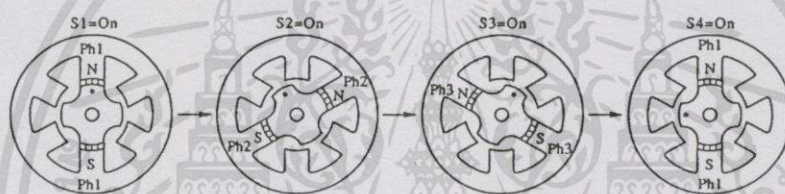


รูปที่ 2.5 แสดงแรงบิดรีสตอริง (Restoring torque) ที่มีทิศทวนเข็มนาฬิกา

ในภาพนี้แรงบิดภายนอกมีทิศตามเข็มนาฬิกาทำให้ โรเตอร์เคลื่อนที่ไปในทิศดังกล่าวด้วยแรงบิดรีสตอริงจะมีทิศทวนเข็มนาฬิกาตรงกันข้ามกับแรงบิดภายนอกเพื่อรักษาค่าตำแหน่งโรเตอร์ให้ตรงกับตำแหน่งซัฟีนของสเตเตอร์มากที่สุด ขณะที่ตำแหน่งซัฟีนของโรเตอร์และสเตเตอร์เบี่ยงเบนไปจากตำแหน่งสมดุลของเฟสที่ถูกกระตุ้นค่าความต้านทานแม่เหล็กจะมีค่ามาก จากรูปที่ 2.6 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของ โรเตอร์ขณะที่เฟสที่ 1 ถูกเปิดออกและเฟสที่ 2 ถูกจ่ายกระแสทันที ค่าความต้านทานแม่เหล็กของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นทันที โรเตอร์จะเคลื่อนที่เป็นสเตปด้วยมุม 30 องศาในทิศทวนเข็มนาฬิกาเพื่อให้ความต้านทานแม่เหล็กมีค่าน้อยที่สุด การเคลื่อนที่ผ่านมุมสเตปเมื่อมีการสวิตช์การกระตุ้นแต่ละครั้งเรียกว่า “สเตป” หลังจากโรเตอร์เคลื่อนที่ครบ 3 สเตป โรเตอร์จะเคลื่อนที่ที่กลับมายังตำแหน่งจุดเริ่มต้นเดิมดังแสดงในรูปที่ 2.7



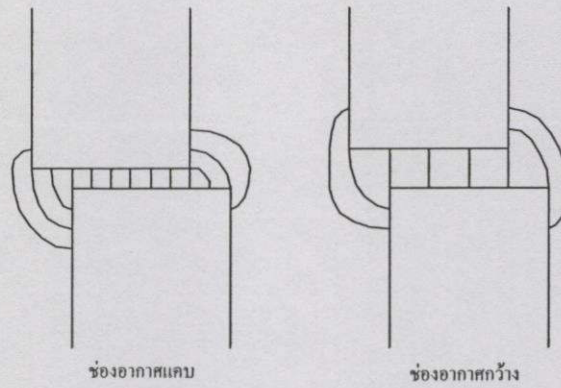
รูปที่ 2.6 แสดงการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ขณะที่เฟสที่ 1 ถูกเปิดออกและเฟสที่ 2 ถูกจ่ายกระแสทันที



รูปที่ 2.7 แสดงการเคลื่อนที่สเตปครบรอบในมอเตอร์ประเภทรีลัคแตนซ์แปรค่าได้

โครงสร้างพื้นฐานของสเตปปี้งมอเตอร์ประเภทรีลัคแตนซ์แปรค่าได้มีลักษณะดังต่อไปนี้

1. ช่องว่างอากาศ (Air gap) ควรแคบที่สุด ซึ่งหมายถึง ช่องว่างระหว่างซี่ฟันโรเตอร์และสเตเตอร์ ในสเตปปี้งมอเตอร์ควรจะแคบที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้เกิดค่าแรงบิด (Torque) สูงสุดและตำแหน่งโรเตอร์มีความเที่ยงตรงสูง ในรูปที่ 2.8 เปรียบเทียบเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างสเตปปี้งมอเตอร์ที่มีช่องว่างอากาศกว้างและแคบ จะเห็นว่าช่องว่างอากาศที่แคบจะให้จำนวนเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetomotive force) หนาแน่นมากกว่าช่องอากาศที่กว้าง หมายความว่า แรงบิดที่ได้ก็จะสูงกว่าด้วย และผลที่ตามมาก็คือ ความเที่ยงตรงของตำแหน่งโรเตอร์ก็จะสูงตามไปด้วย โดยทั่วไปขนาดของช่องว่างอากาศจะมีค่าประมาณ 30 ถึง 100 ไมโครเมตร



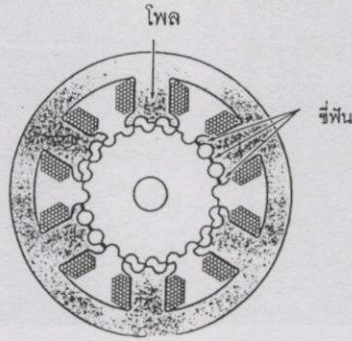
รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กของสเตปป์มอเตอรืที่มีช่องอากาศแคบและกว้าง

2. ขนาดมุมสเตปป์ที่เล็ก โครงสร้างของสเตปป์ประเภทค่ารีตักแดนซ์แปรค่าได้ขนาด 3 และ 4 เฟส และมีขนาดมุมสเตปป์เท่ากันคือ 15 องศาต่อสเตปป์ แต่จะมีโครงสร้างต่างกัน ซึ่งขนาด 3 เฟส มีซี่ฟันของสเตปป์จำนวน 12 ซี่ และโรเตอร์จำนวน 8 ซี่ ส่วนขนาด 4 เฟส จะมีซี่ฟันของสเตปป์จำนวน 8 ซี่ และโรเตอร์จำนวน 6 ซี่

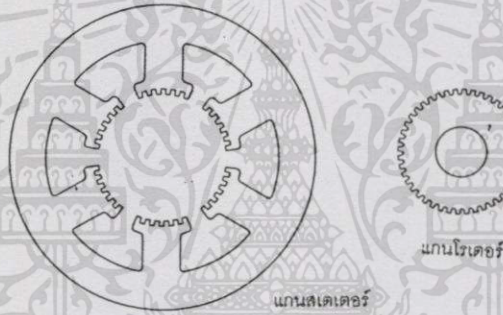
ความสัมพันธ์ของขนาดมุมสเตปป์ (θ_s), จำนวนเฟส (m), จำนวนซี่ฟันของโรเตอร์ (N_r), จำนวนสเตปป์ (S) ได้จากสมการที่ 2.1 ต่อไปนี้

$$s = \frac{360}{\theta_s} = mN_r \quad (2.1)$$

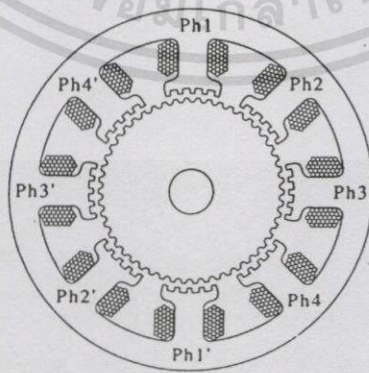
จากสมการที่ 2.1 จะเห็นว่า ถ้าต้องการลดขนาดมุมสเตปป์ (θ_s) จะต้องเพิ่มจำนวนซี่ฟันของโรเตอร์ให้สูงขึ้น แต่ถ้าต้องเพิ่มจำนวนซี่ฟันของโรเตอร์ให้สูงขึ้นจำนวนซี่ฟันของสเตปป์ก็จะต้องเพิ่มตามไปด้วยดังหลักการที่อธิบายผ่านมาแล้ว แต่จะเห็นว่า จำนวนซี่ฟันสเตปป์ไม่ปรากฏในสมการข้างบน ซึ่งที่จริงแล้วสเตปป์มอเตอรืประเภทนี้ที่มีขนาดสเตปป์เล็กจะมีลักษณะโครงสร้างดังภาพที่ 2.9 โดยสเตปป์จะมีลักษณะยื่นออกมาเรียกว่า “โพล” (Pole) โดยที่ปลายของแต่ละ โพลจะมีซี่ฟันจำนวนหนึ่งอยู่ ซึ่งแต่ละซี่ฟันที่อยู่ที่ปลายของโพลนี้จะมีขั้วแม่เหล็กเดียวกันทั้งโพล จากรูปที่ 2.9 จำนวนฟันของโรเตอร์ (N_r) เท่ากับ 20 , m คือ จำนวนเฟสเท่ากับ 3 ในกรณีนี้ มอเตอรืเคลื่อนที่ครบ 1 รอบด้วยจำนวนสเตปป์ $3 \times 20 = 60$ สเตปป์ มุมสเตปป์เป็น $360/60 = 6$ องศา ตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.10 และ 2.11 แสดงอีกลักษณะหนึ่งของสเตปป์มอเตอรืชนิดที่มีความละเอียดของขนาดสเตปป์สูง รูปที่ 2.10 เป็นมอเตอรื 3 เฟส จำนวนซี่ฟันโรเตอร์เพิ่มเป็น 44 ซี่ จำนวนสเตปป์ต่อรอบ 132 สเตปป์ รูปที่ 2.11 มอเตอรื 4 เฟส จำนวนซี่ฟันโรเตอร์เพิ่มเป็น 50 ซี่ มุมสเตปป์ 1.8 องศา จำนวนสเตปป์ต่อรอบ 200 สเตปป์



รูปที่ 2.9 แสดงภาพตัดขวางมอเตอร์ประเภทอาร์ลิกแดนซ์แปรค่าได้ 3 เฟส จำนวนซี่ฟัน 2 ซี่บนแต่ละสเตเตอร์โพล จำนวนซี่ฟัน โรเตอร์ 20 ซี่และมีมุมสเตป 6 องศา



รูปที่ 2.10 แสดงภาพตัดขวางมอเตอร์ประเภทอาร์ลิกแดนซ์แปรค่าได้ 3 เฟส จำนวนซี่ฟัน โรเตอร์ 44 ซี่และมีจำนวนสเตปต่อรอบ 132 สเตป



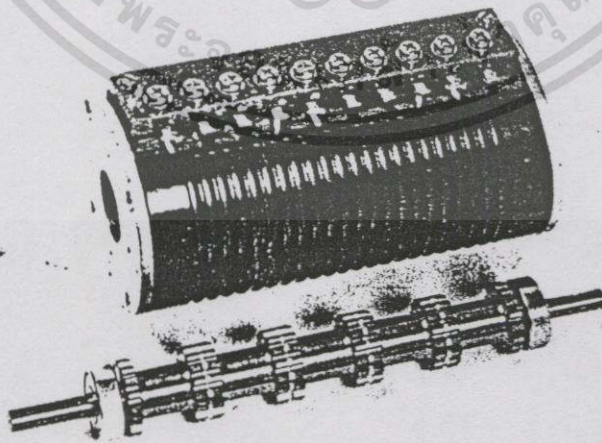
รูปที่ 2.11 แสดงภาพตัดขวางมอเตอร์ประเภทอาร์ลิกแดนซ์แปรค่าได้ 4 เฟส จำนวนซี่ฟัน โรเตอร์ 50 ซี่มุมสเตป 1.8 องศา และจำนวนสเตปต่อรอบ 200 สเตป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สเตปป์มอเตอร์ประเภทค่ารีลักแตนซ์แปรค่าได้ประเภทหลายสเตค ที่ผ่านมาเป็นสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่าได้ชนิดสเตคเดียว คือ จำนวนเฟสทั้งหมดจะอยู่ที่สเตคเดียวกัน ส่วนชนิดหลายสเตคนั้นมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งเป็นประเภท 3 สเตค ถ้ากระตุ้นให้เฟส(สเตค)ที่ 3 ทำงาน ซีพินของโรเตอร์และสเตเตอร์ของเฟสนั้นจะมีตำแหน่งตรงกัน ส่วนเฟสอื่น ๆ ตำแหน่งซีพินของโรเตอร์และสเตเตอร์จะไม่ตรงกัน ซึ่งในภาพนี้จะห่างจากตำแหน่งสมดุลเมื่อเฟสที่ 3 ถูกกระตุ้นเท่ากับ $1/3$ เท่าของระยะซีพิน(Tooth pitch) จากนั้นเปลี่ยนการกระตุ้นจากเฟสที่ 3 ไปเฟสที่ 1 โรเตอร์จะเคลื่อนที่ตามเข็มนาฬิกาเป็นจำนวน 1 สเตป แต่ถ้าการกระตุ้นจากเฟสที่ 3 ไปเฟสที่ 2 โรเตอร์จะเคลื่อนที่ทวนเข็มนาฬิกาเป็นจำนวน 1 สเตป นอกจากนี้ยังมีประเภท 5 สเตค แสดงดังรูปที่ 2.13 ซึ่งจะเป็น 5 เฟสแสดงโครงสร้างดังรูปที่ 2.14 (ก) ออกแบบมาเพื่อนำไปใช้งานด้านนับเมอริคอลลคอนโทรล(Numerical control) ซึ่งในรูปที่ 2.14 (ข) แสดงหลักการของมอเตอร์ประเภทนี้ จะเห็นว่า ซีพินของโรเตอร์จะถูกขนาบด้วยซีพินของสเตเตอร์เพื่อให้ได้ค่าแรงบิดสูงนั่นเอง

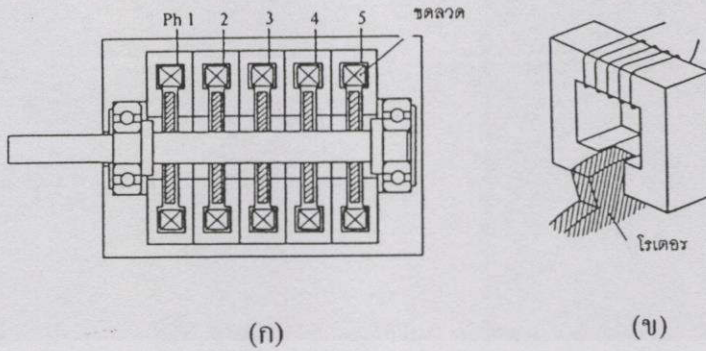


รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างของมอเตอร์ประเภทค่ารีลักแตนซ์แปรค่าได้ชนิดหลายสเตค



รูปที่ 2.13 แสดงโรเตอร์และสเตเตอร์ของมอเตอร์ประเภทค่ารีลักแตนซ์แปรค่าได้ 5 สเตค

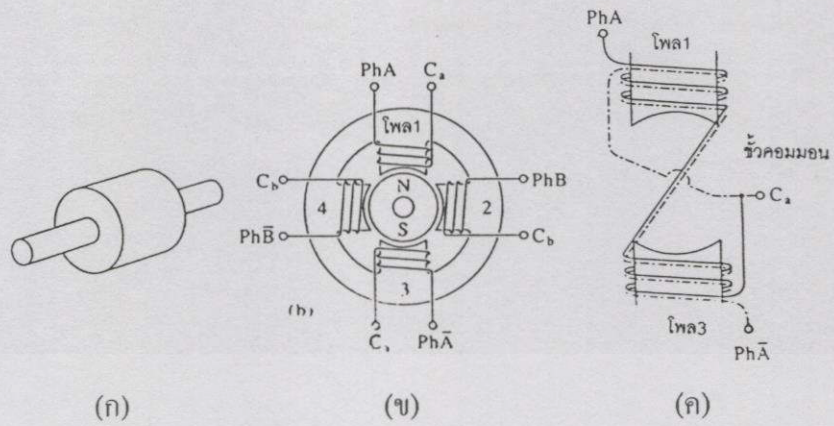
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



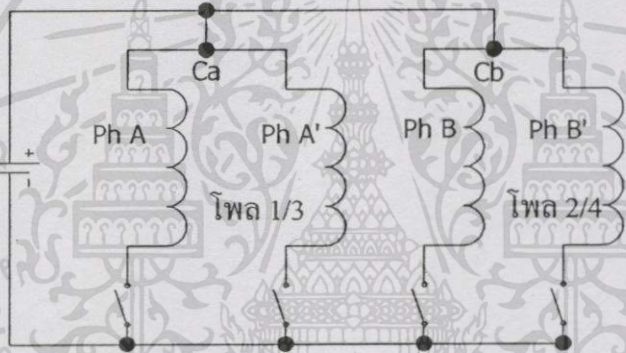
รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างของมอเตอร์ประเภทแม่เหล็กแดนซ์แปรค่าได้ชนิด 5 สเตตแบบเซนวิส

2.2.2 สเตปป์มอเตอร์ประเภทแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet stepping motor หรือ PM stepping motor)

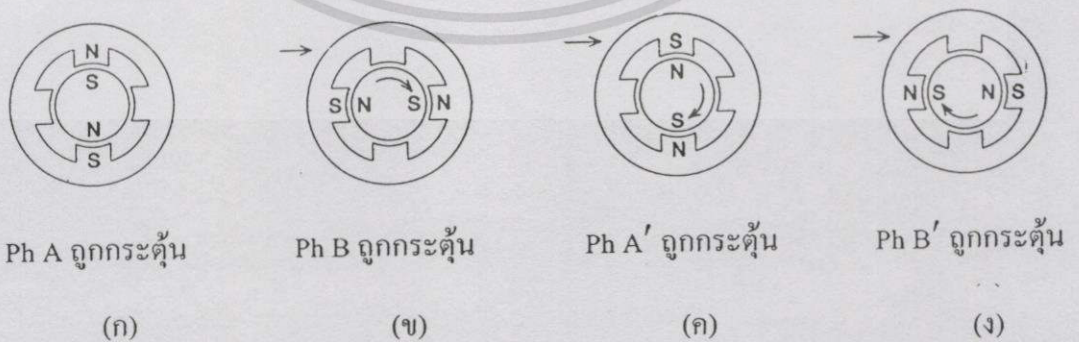
สเตปป์มอเตอร์ประเภทที่โรเตอร์ทำจากแม่เหล็กถาวร ถูกเรียกว่า “สเตปป์มอเตอร์ประเภทแม่เหล็กถาวร” แสดงโครงสร้างเบื้องต้นดังรูปที่ 2.15 ซึ่งใช้โรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวรแบบทรงกระบอก มีสเตเตอร์ 4 โพลหรือซี่ฟัน แต่ละซี่ฟันจะมีขดลวดพันล้อมรอบอยู่ดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ก) และ(ข) ตามลำดับ รูป 2.15 (ค) แสดงการพันขดลวดจริง ซึ่งเรียกว่า “การพันแบบไบไฟลาร์ (Bifilar)” โดยขดลวดสองเส้นวางทับกันถูกพันในลักษณะพันแบบเส้นเดียวบน โพล 1 และ โพล 3 โดยขดลวดสองเส้นนี้ถูกแยกออกจากกันเป็นอิสระที่ปลายแต่ละข้างและที่ปลายหัวอีกข้างหนึ่งที่เขียนว่า Ca, Cb จะต่อเป็นขั้วร่วมต่อกับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟซึ่งแสดงดังรูปการสวิตช์ในรูปที่ 2.16 เมื่อขดลวด Ph A ที่เป็นเส้นที่บ (รูปที่ 2.15(ข)) ถูกกระตุ้น โพล 1 จะเป็นขั้วเหนือ(N) และ โพล 2 จะเป็นขั้วใต้(S) ถ้า Ph A' ถูกกระตุ้นขั้วจะกลับกัน การกระตุ้นขดลวดตามลำดับ Ph A, Ph B, Ph A', Ph B' โรเตอร์จะหมุนตามเข็มนาฬิกาเหมือนแสดงดังรูปที่ 2.17 จะทำให้มีมุมการสเตป 90 องศา ถ้าจำนวนฟันของสเตเตอร์และขั้วแม่เหล็กเพิ่มเป็นสองเท่าจะทำให้มุมการสเตปเป็น 45 องศา มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรจะมีแรงบิดมากกว่ามอเตอร์แบบค่ารีลัคแตนซ์แปรค่าได้เมื่อมีขนาดเท่ากัน



รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างเบื้องต้นของสเตปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 2.16 แสดงการต่อวงจรขั้วอย่างง่ายสำหรับมอเตอร์สองเฟส

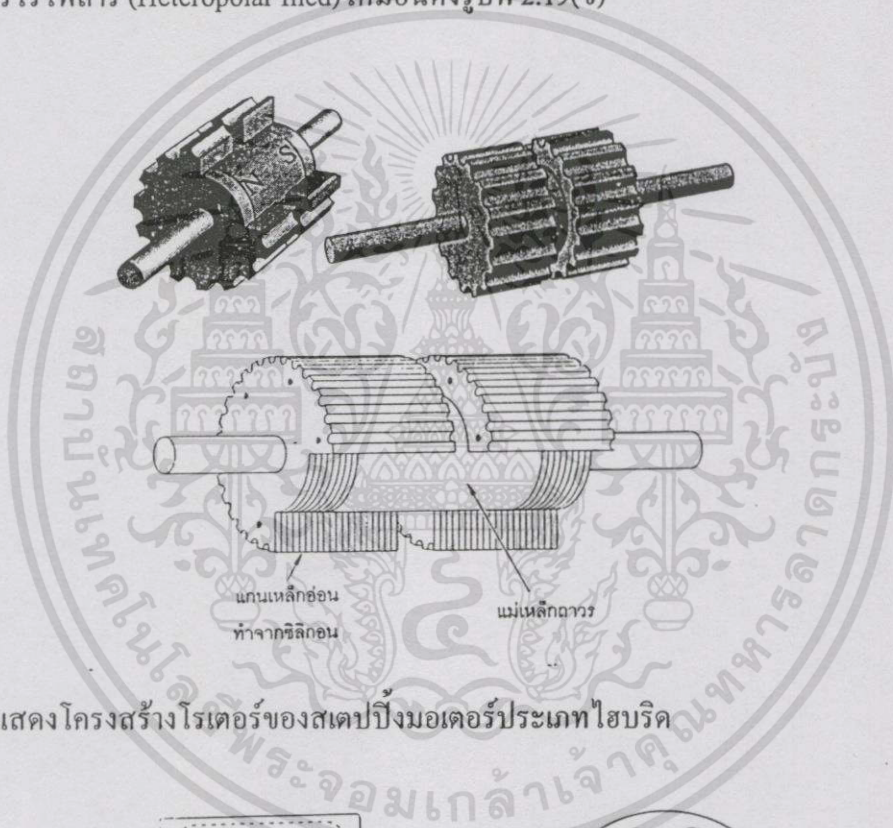


รูปที่ 2.17 แสดงการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เมื่อถูกกระตุ้นในทิศตามเข็มนาฬิกา

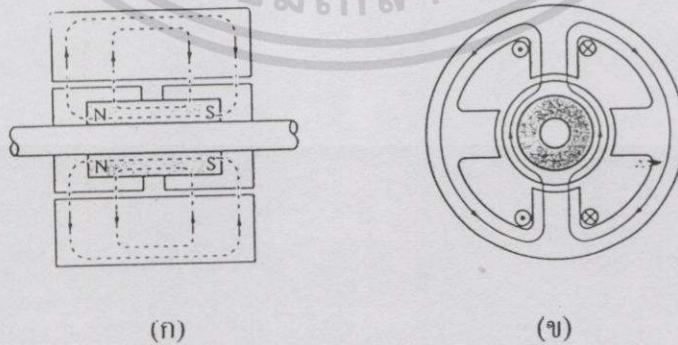
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 สเตปป์มอเตอรืประเภทไฮบริด (Hybrid stepping motor)

สเตปป์มอเตอรืประเภทนี้มีหลักการทํางานผสมผสานกันระหว่างสเตปป์มอเตอรืประเภทแม่เหล็กถาวรกับประเภทคํารีล็คแดนซ์แปรค่าได้ จึงได้ชื่อว่า “สเตปป์มอเตอรืประเภทไฮบริด” เพื่อให้ได้มุมสเตปป์ที่เล็กและมีค่าแรงบิดสูงจากมอเตอรืขนาดเล็ก โครงสร้างของสเตปป์มอเตอรืจะเหมือนกับสเตปป์มอเตอรืประเภทคํารีล็คแดนซ์แปรค่าได้ ส่วนที่สำคัญของสเตปป์มอเตอรืประเภทไฮบริดอยู่ที่โครงสร้างของโรเตอรืแสดงคังรูปที่ 2.18 คือ มีแม่เหล็กรูปทรงกระบอกที่วางตัวตามแนวแกนโรเตอรื มีทิศทางการสร้างสนามแม่เหล็กคังรูปที่ 2.19(ก) โดยแต่ละโพลของแม่เหล็กจะถูกล้อมรอบด้วยซี่เหล็กอ่อนที่ทําจกซิลิกอน ส่วนสนามแม่เหล็กสร้างโดยขดลวดสเตปป์มอเตอรืเป็นสนามแบบเฮเทอรืโพลาร์ (Heteropolar filed) เหมือนคังรูปที่ 2.19(ข)



รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างโรเตอรืของสเตปป์มอเตอรืประเภทไฮบริด



รูปที่ 2.19 แสดงทิศทางการสร้างสนามแม่เหล็กของสเตปป์มอเตอรืประเภทไฮบริด

2.4 รูปแบบการขับสเตปป์มอเตอร์

รูปแบบการขับหรือการกระตุ้นสเตปป์มอเตอร์ (Mode of excitation) คือ การจัดลำดับสัญญาณการกระตุ้นวงจรขับขลวดเพื่อควบคุมทิศทางการหมุนและปรับปรุงประสิทธิภาพของแรงบิดมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบดังนี้

2.4.1. การขับแบบกระตุ้นหนึ่งเฟส (One - phase excitation)

เป็นการขับสเตปป์มอเตอร์แบบจ่ายกระแสให้กับขลวดของสเตปป์มอเตอร์ครั้งละหนึ่งเฟส เปลี่ยนไปตามลำดับ จะได้การเคลื่อนที่แบบเต็มสเตป จุดสมดุลของการหมุนจะอยู่ที่เฟสใดเฟสหนึ่ง วิธีนี้แรงบิดจะน้อย การจ่ายกระแสให้แต่ละเฟสแสดงดังตารางที่ 2.1 และสามารถสั่งให้มอเตอร์หมุนได้ทั้งทิศตามเข็มนาฬิกา และทิศทวนเข็มนาฬิกา

ตารางที่ 2.1 แสดงการจ่ายกระแสแบบกระตุ้นหนึ่งเฟส

step	เฟสที่ถูกจ่ายกระแส			
	$\Phi 4$	$\Phi 3$	$\Phi 2$	$\Phi 1$
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	1	0	0
4	1	0	0	0
ทิศตามเข็มนาฬิกา(cw)	←			
ทิศทวนเข็มนาฬิกา(ccw)				→

หมายเหตุ เลข 1 คือ การจ่ายกระแสให้ขลวดเฟสมอเตอร์

เลข 0 คือ ไม่ได้จ่ายกระแสให้ขลวดเฟสมอเตอร์

CW = CLOCKWISE , CCW = COUNTER CLOCKWISE

2.4.2. การขับแบบกระตุ้นสองเฟส (TWO-PHASE EXCITATION)

การขับสเตปป์มอเตอร์วิธีนี้ใช้วิธีการจ่ายกระแสให้กับสเตปป์มอเตอร์แบบเต็มสเตป จุดสมดุลของการหมุนจะไม่อยู่ที่เฟสใดเฟสหนึ่ง แต่จะอยู่ตรงจุดกึ่งกลางระหว่างเฟสทั้งสอง แรงบิดของมอเตอร์จะมากกว่าแบบกระตุ้นทีละเฟส มีลักษณะการจ่ายกระแสให้แต่ละเฟสดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงการจ่ายกระแสแบบกระตุ้นสองเฟส

step	เฟสที่ถูกจ่ายกระแส			
	$\phi 4$	$\phi 3$	$\phi 2$	$\phi 1$
1	0	0	1	1
2	0	1	1	0
3	1	1	0	0
4	1	0	0	1
ทิศตามเข็มนาฬิกา(cw)	←			
ทิศทวนเข็มนาฬิกา(ccw)	→			

2.4.3.การขับแบบกระตุ้นหนึ่งเฟสสลับสองเฟส (ONE-TWO-PHASE EXCITATION)

เป็นการขับแบบจ่ายกระแสให้เฟสของมอเตอร์แบบหนึ่งเฟสสลับกับการจ่ายแบบสองเฟส วิธีนี้จะเป็นการเคลื่อนที่แบบครึ่งสเตป โดยมีจุดศูนย์กลางของแรงบิดอยู่ที่เฟสใดเฟสหนึ่ง และที่จุดกึ่งกลางระหว่างเฟสทั้งสองวิธีนี้จำนวนสเตปจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าของสองแบบแรก แต่แรงบิดเฉลี่ยจะน้อยกว่าแบบที่ 2 ซึ่งมีลักษณะการจ่ายกระแสให้แต่เฟสดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงการจ่ายกระแสแบบกระตุ้นหนึ่งเฟสสลับสองเฟส

step	เฟสที่ถูกจ่ายกระแส			
	$\phi 4$	$\phi 3$	$\phi 2$	$\phi 1$
1	0	0	0	1
2	0	0	1	1
3	0	0	1	0
4	0	1	1	0
5	0	1	0	0
6	1	1	0	0
7	1	0	0	0
8	1	0	0	1
ทิศตามเข็มนาฬิกา(cw)	←			
ทิศทวนเข็มนาฬิกา(ccw)	→			

2.4 วงจรขับสเตปป์มอเตอร์

สัญญาณกระตุ้นสำหรับสเตปป์มอเตอร์ปัจจุบันจะได้จากไอซีดิจิตอลหรือไมโครโปรเซสเซอร์จะเป็นสัญญาณขนาดกำลังต่ำประเภทตระกูล ทีทีแอล(TTL) 5 โวลต์ 18 มิลลิแอมป์ แต่สเตปป์มอเตอร์ที่ใช้งานจะต้องการกระแสมาก ดังนั้นจำเป็นจะต้องใช้วงจรขับเพื่อเป็นตัวควบคุมการจ่ายกระแสหรือกำลังงานแก่มอเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างวงจรสร้างสัญญาณกระตุ้นกับสเตปป์มอเตอร์ จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

2.4.1. วงจรขับแบบขั้วเดียว (Unipolar drive circuit) วงจรขับแบบนี้เป็นการขับที่ง่ายที่สุดเหมาะกับการใช้งานกับสเตปป์มอเตอร์แบบคาร์ลัคแดนซ์แปรค่าได้ดังแสดงในรูปที่ 2.22 แต่ละเฟสถูกกระตุ้นแยกจากกันเป็นอิสระโดยวงจรขับซึ่งถูกกระตุ้นโดยสัญญาณกระตุ้นขนาดกำลังต่ำจากวงจร สร้างสัญญาณกระตุ้น เรียกว่า “สัญญาณควบคุมเฟส” สัญญาณนี้อาจจะถูกขยายมาก่อนจนถึงระดับสัญญาณที่ต้องการเพื่อขับขานของทรานซิสเตอร์ ขดลวดถูกกระตุ้นโดยการทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานในลักษณะอิ่มตัว (Saturated) ดังนั้นแรงดันแหล่งจ่าย v_s จะตกคร่อมขดลวดและความต้านทานที่อนุกรมกับขดลวดเรียกว่า ตัวต้านทานบังคับ (Forcing resistor) ทำให้เกิดกระแสเต็มพิกัดที่ขดลวดต้องทำตามสมการที่ 2.2 และการพันแบบไบโพลาร์แต่ต้องการใช้วงจรขับแบบยูนิโพลาร์แสดงดังรูปที่ 2.23

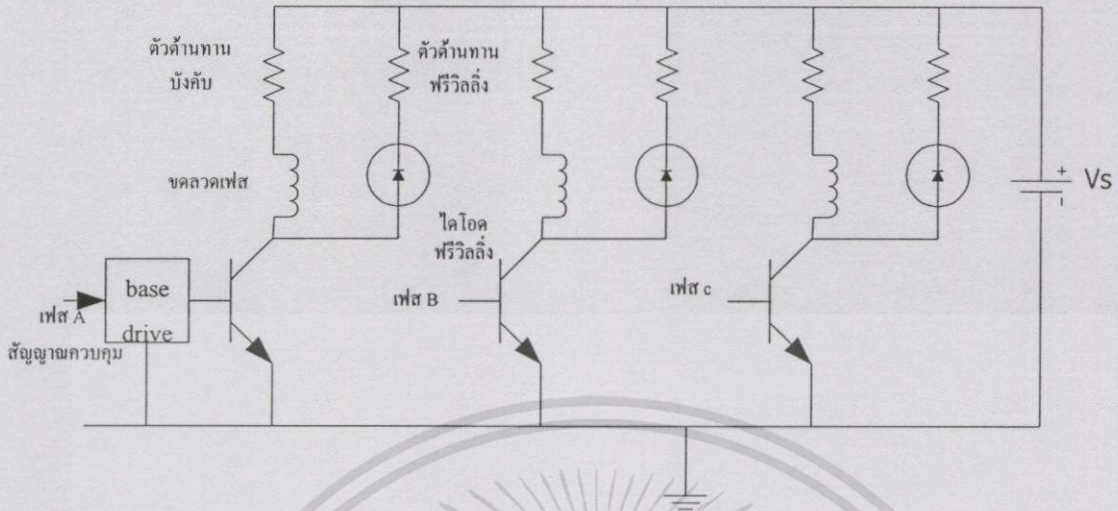
$$v_s = I(r + R) \quad (2.2)$$

v_s = แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงมอเตอร์

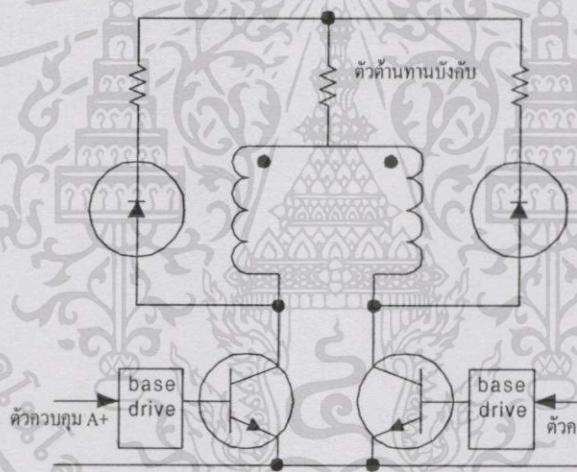
I = กระแสที่จ่ายให้กับขดลวดมอเตอร์

r = ความต้านทานของขดลวดแต่ละเฟส

R = ความต้านทานของตัวต้านทานบังคับ(Forcing resistor) ที่ต่ออนุกรมกับขดลวด



รูปที่ 2.22 แสดงวงจรขั้วยูนิโพลาร์



รูปที่ 2.23 การใช้วงจรขั้วแบบยูนิโพลาร์ขั้วขดลวดแบบ ไบไฟลาร์

โดยทั่วไปแล้วขดลวดจะมีค่าคงที่ของเวลา (Time constant = L/R) ที่มีค่ายาวนาน ซึ่งเป็นตัวที่ทำให้กระแสไหลเพิ่มขึ้นถึงค่ากระแสเฉลี่ยได้ช้าเมื่อมีการหมุนที่ความเร็วสูงๆ ดังนั้นการทำให้กระแสเฉลี่ยไหลได้เร็วคือการทำให้ค่าเวลาคงที่มีค่าน้อยลง โดยการเพิ่มความต้านทานให้ขดลวด เรียกว่าความต้านทานบังคับ (Forcing resistance) ที่เป็นสัดส่วนกับการเพิ่มแรงดันของแหล่งจ่าย เพื่อยังคงให้กระแสเฉลี่ยต่อเฟสเท่าเดิม แต่มีข้อเสียอย่างหนึ่งคือ กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นที่ตัวต้านทานที่ต่อเพิ่มเข้าไปจะมีค่าสูง ผลอีกอย่างหนึ่งที่เกิดตามมากับความเหนี่ยวนำของขดลวดเฟสคือ เมื่อทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแสอย่างทันที กระแสในขดลวดไม่สามารถหยุดไหลทันที แต่จะเกิดแรงดันเหนี่ยวนำชนิดกลับทิศทางขึ้นระหว่างขาของคอลเลกเตอร์และอิมิตเตอร์ซึ่งแรงดันนี้สามารถ

ทำลายชุดขับได้ ซึ่งแก้ไขได้โดยการหาเส้นทางเดินของกระแสใหม่เรียกว่า วงจรฟรีวิลลิง (Freewheeling circuit) ดังในรูปที่ 2.22 ซึ่งกระแสเฟสของขดลวดเมื่อทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแส จะไหลผ่านไดโอดและตัวต้านทานฟรีวิลลิง ถ้ากระแสเฟสไหลขณะทรานซิสเตอร์หยุดทำงานมีค่าเป็น I แรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมทรานซิสเตอร์คือ [2]

$$v_{ce\max} = v_s + R_f I \quad (2.3)$$

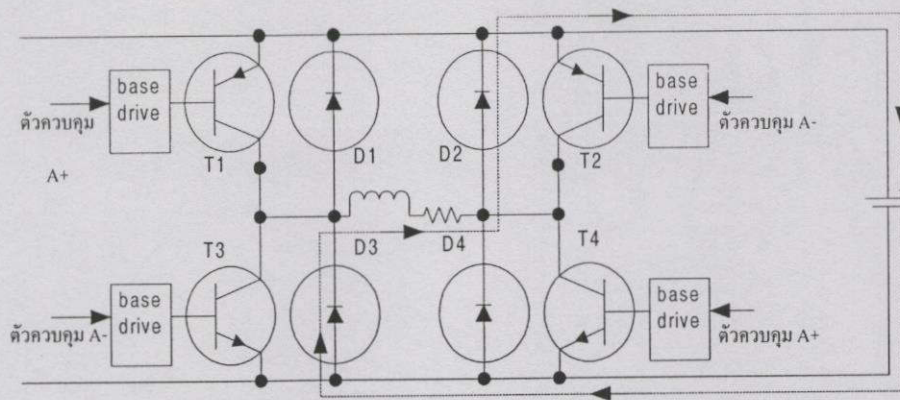
v_s = แรงดันแหล่งจ่าย

$v_{ce\max}$ = แรงดันตกคร่อมขาอิมิตเตอร์-คอลเลกเตอร์สูงสุด

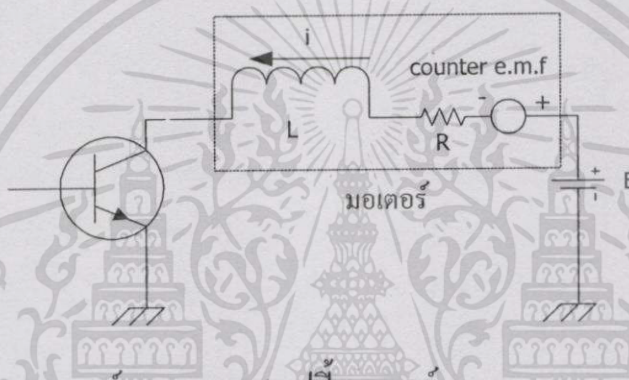
R_f = ความต้านทานฟรีวิลลิง

I = กระแสเฉลี่ยขดลวด

2.4.2. วงจรขับแบบสองขั้ว (Bipolar drive circuit) การขับในลักษณะของหนึ่งเฟสแต่ใช้ทรานซิสเตอร์ 4 ตัวเหมาะสำหรับสเตรปปีงมอเตอร์ประเภทไฮบริดและประเภทแม่เหล็กถาวร เพื่อบังคับทิศทางกระแสของกระแสที่จ่ายแก่ขดลวด สามารถเลือกได้จากการทำงานของทรานซิสเตอร์เป็นคู่ แสดงในรูปที่ 2.24 เมื่อกระตุ้นขดลวดด้วยสัญญาณบวกทรานซิสเตอร์ T1 และ T4 จะทำงาน กระแสจะไหลจากแหล่งจ่ายไฟผ่าน T1 ไปสู่ขดลวดผ่านตัวต้านทานบังคับ (Forcing resistance) ไหลสู่ T4 ผ่านสกราวด์กลับไปยังแหล่งจ่าย ในทางตรงกันข้ามเมื่อกระตุ้นด้วยสัญญาณลบจะทำให้ T2 และ T3 ทำงานโดยกระแสจะไหลกลับทิศทางกับที่กล่าวมา โดยขาเบสของทรานซิสเตอร์ในวงจรบริดจ์ทั้ง 4 ตัวจะทำงานแยกเป็นอิสระต่อกันและทรานซิสเตอร์ตัวบนจะต้องต่ออ้างอิงกับขั้วแหล่งจ่ายที่เป็นบวก โดยอาจจะต่อผ่านวงจรแยกโดยแสง (Optical Isolation) ในวงจรมีไดโอดแบบบริดจ์ 4 ตัวอยู่ในทิศทางแบบย้อนกลับขนานไปกับทรานซิสเตอร์ทั้ง 4 ตัวโดยทำหน้าที่เป็นฟรีวิลลิงไดโอด (Free wheeling diode) เมื่อสถานะที่ T1 และ T4 หยุดนำกระแส กระแสที่ไหลผ่านขดลวดจะเริ่มลดลง โดยกระแสจะไหลผ่านไดโอด D2 และ D3 ไปยังแหล่งจ่ายไฟ ดังนั้นพลังงานที่สะสมอยู่ที่ความเหนี่ยวนำของขดลวดจะถูกจ่ายกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟ นอกจากนี้วงจรขับแบบบริดจ์เป็นวงจรที่มีประสิทธิภาพสูง เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรขับแบบยูนิโพลาร์ที่ผ่านมา เนื่องจากการขับแบบไบโพลาร์ที่ทุกเฟสของมอเตอร์กระแสสามารถไหลได้ 2 ทิศทาง สามารถนำไปใช้ขับมอเตอร์แบบคาร์ลัคแดนซ์แปรค่าได้ ค่ากระแสที่ไหลที่ตัวฟรีวิลลิงไดโอดในวงจรขับแบบไบโพลาร์นี้จะลดลงรวดเร็วกว่าการขับแบบยูนิโพลาร์ เนื่องจากกระแสที่ไหลจะไหลกลับไปยังแหล่งจ่ายซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกัน ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องเพิ่มตัวต้านทานฟรีวิลลิงลงในวงจรขับแบบไบโพลาร์เพื่อให้กระแสลดลง[2]



รูปที่ 2.24 แสดงวงจรขับแบบไบโพลาร์



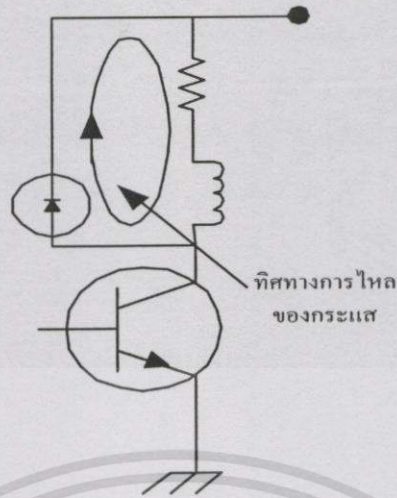
รูปที่ 2.25 แสดงวงจรสมมูลย์ของขดลวดสเตปป์มอเตอร์

2.5 ตัวกำจัดแรงดันเกิน (Suppressors)

ขดลวดของสเตปป์มอเตอร์นั้นเป็นตัวเหนี่ยวนำตัวหนึ่งที่ต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน และเมื่อมอเตอร์หมุนจะทำให้เกิดแรงดันย้อนกลับ (counter e.m.f.) ดังแสดงวงจรสมมูลย์ได้ดังรูปที่ 2.25 และเมื่อทรานซิสเตอร์ในรูปหยุดการทำงานจะเกิดแรงดันยอดแหลม (Spike voltage) เพราะ L (di/dt) และแรงดันนี้จะทำลายทรานซิสเตอร์ได้ ซึ่งมีวิธีการกำจัดแรงดันนี้และป้องกันทรานซิสเตอร์อยู่หลายวิธีดังนี้

2.5.1 ไดโอดชัฟเฟอร์เซอร์ (Diode suppressor)

ใช้ไดโอดต่อขนานกับขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.26 เมื่อทรานซิสเตอร์ของวงจรขับเปิดวงจร กระแสที่เกิดขึ้นจะไหลวนดังลักษณะในวงจรรูปที่ 2.26 โดยจะค่อยๆ ลดลง เป็นการป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นจากแรงดันยอดแหลม เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสในลักษณะทันทีทันใด ที่ขาคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์จะมีแรงดันปรากฏเท่ากับ แรงดันของแหล่งจ่ายรวมกับแรงดันตรงของไดโอด แต่ในวงจรลักษณะนี้กระแสที่ไหลวนค้างอยู่จะนานและอาจเป็นสาเหตุให้เกิดเบรคกิ้งทอร์ก (Breaking torque)



รูปที่ 2.26 แสดงวงจรไดโอดซัพเพรสเซอร์

2.5.2. ไดโอด-รีซิสเตอร์ซัพเพรสเซอร์ (Diode-resistor suppressor)

ตัวต้านทานต่ออนุกรมกับไดโอดดังรูปที่ 2.27 จะสามารถลดเวลาของกระแสที่ไหลวนให้เร็วขึ้นได้ ซึ่งแรงดันตกคร่อมขั้วอิมิตเตอร์-คอลเลคเตอร์เมื่อทรานซิสเตอร์หยุดทำงานคือ

$$V_{ce} = E + IR_s + V_{DF} \quad (2.4)$$

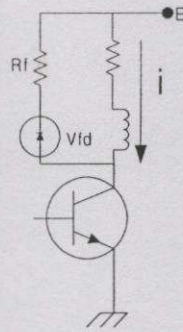
E = แรงดันแหล่งจ่าย

I = กระแสเมื่อเปิดวงจร

R_s = ความต้านทานของตัวต้านทานซัพเพรสเซอร์

V_{DF} = ค่าแรงดันตกคร่อมไดโอดเมื่อไบอัสตรง

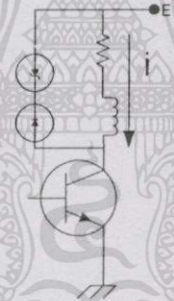
ที่ค่าความต้านทาน R_s สูงจะใช้เวลาการลดลงของกระแสไหลวนรวดเร็วหลังจากวงจรเปิด แต่จะทำให้แรงดันที่ขั้วคอลเลคเตอร์สูงตามขึ้นด้วย นั่นคือ ค่าพิกัดแรงดันของทรานซิสเตอร์จะต้องสูงตามไปด้วย



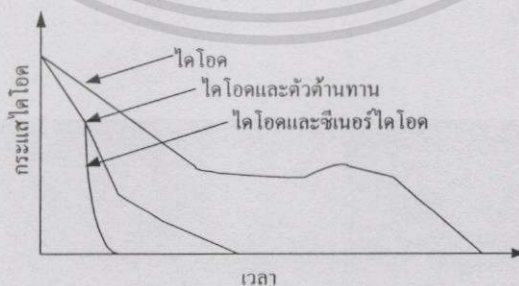
รูปที่ 2.27 แสดงตัวซัพเพรสเซอร์แบบไดโอด-รีซิสเตอร์

2.5.3 ซีเนอร์ไดโอดซัพเพรสเซอร์ (Zener diode suppressor)

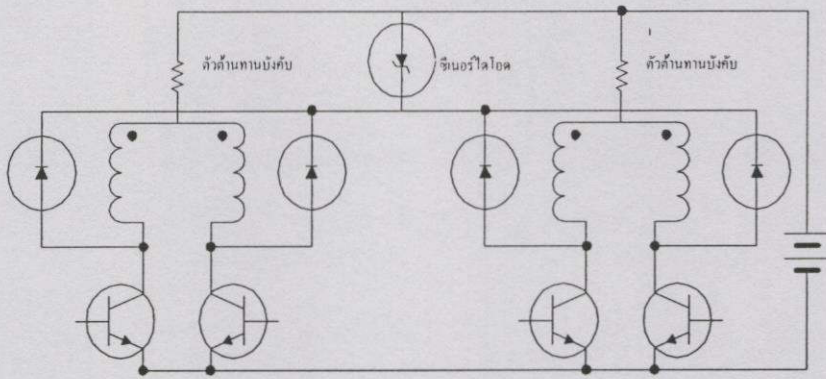
นำซีเนอร์ไดโอดต่ออนุกรมกับไดโอดแบบเดิม ดังรูปที่ 2.28 กระแสไหลวนจะลดลงอย่างรวดเร็ว และแรงดันรวมที่ขาคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์จะเท่ากับแรงดันของแหล่งจ่ายไฟรวมกับแรงดันของซีเนอร์ไดโอด ไม่ขึ้นกับกระแสเหมือนในกรณีของไดโอด-รีซิสเตอร์ซัพเพรสเซอร์ ทำให้ไม่มีปัญหาเรื่องแรงดันพิกัดของทรานซิสเตอร์ รูปที่ 2.29 เปรียบเทียบผลของกระแสไหลวนที่ลดลงเมื่อใช้ซัพเพรสเซอร์แบบต่างๆ และรูปที่ 2.30 แสดงวงจรจับสแตมป์มอเตอร์ 4 เฟส ที่ใช้ซีเนอร์ไดโอดซัพเพรสเซอร์



รูปที่ 2.28 แสดงซีเนอร์ไดโอดซัพเพรสเซอร์



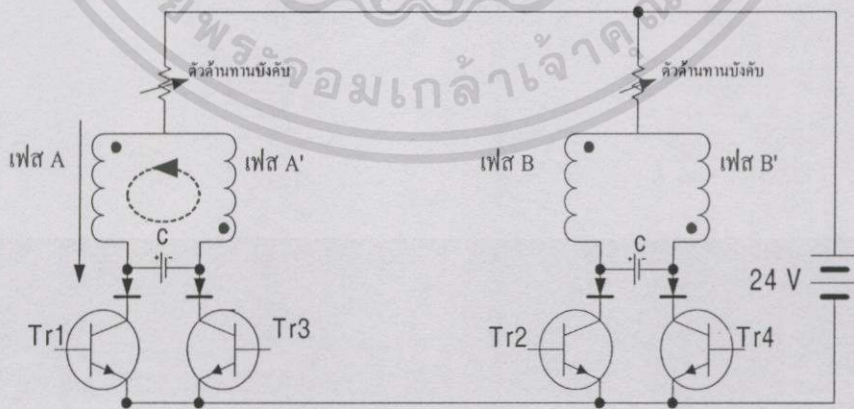
รูปที่ 2.29 แสดงการเปรียบเทียบผลของการลดลงของกระแสเมื่อใช้ซัพเพรสเซอร์แบบต่างๆ



รูปที่ 2.30 แสดงตัวอย่างวงจรขับสเต็ปมอเตอร์ 4 เฟส ที่ใช้ซีเนอร์ไดโอดซัพเพรสเซอร์

2.5.4. ซัพเพรสเซอร์ชนิดตัวเก็บประจุ (Condenser suppressor)

ซัพเพรสเซอร์แบบนี้มักจะใช้กับมอเตอร์ที่พันแบบไบพอลาร์ ซึ่งมีลักษณะดังในรูปที่ 2.31 ซึ่งเป็นวงจรขับของมอเตอร์ชนิด 4 เฟส โดยจะใช้ตัวเก็บประจุต่อคร่อมระหว่างเฟส A กับเฟส A' และเฟส B กับเฟส B' ตัวเก็บประจุนี้จะทำหน้าที่เก็บประจุของกระแสที่ไหลวน เมื่อเฟส A ทำงาน ในขณะที่เฟสอื่นเปิดวงจร จากนั้นเฟส A เปิดวงจร ทิศทางของกระแสไหลวนจะมีลักษณะดังเส้นประ ในรูปที่ 2.31 กระแสนี้จะประจุเข้ากับตัวเก็บประจุเป็นการป้องกันความเสียหายของทรานซิสเตอร์เนื่องจากกระแสดังกล่าว อีกทั้งพลังงานที่อยู่ในตัวเก็บประจุดังกล่าวนี้ยังช่วยทำให้เฟส A' ทำงานเร็วขึ้นเมื่อถูกกระตุ้นให้ทำงานในครั้งต่อไป



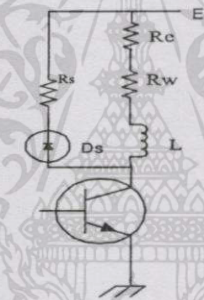
รูปที่ 2.31 แสดงตัวอย่างวงจรขับที่ใช้ซัพเพรสเซอร์ชนิดตัวเก็บประจุ

2.6 การปรับปรุงกระแสบิลด์อัป (Improvement of build-up current)

เมื่อทรานซิสเตอร์ถูกกระตุ้นให้ทำงาน ผลของความเหนี่ยวนำ (Inductance) จะหน่วงกระแสจากภาคจ่ายไฟไปยังทรานซิสเตอร์ เป็นผลให้การตอบสนองการทำงานของวงจรช้าลง จึงมีวิธีการต่างๆ เพื่อที่จะเพิ่มการตอบสนองของวงจรให้สูงขึ้นดังนี้

2.6.1 การใช้ค่าความต้านทานบังคับ (Forcing resistance)

การใช้ค่าความต้านทานต่อเพิ่มเข้าไปยังวงจร ทางขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์ดังรูปที่ 2.32 ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด ในกรณีนี้ค่าเวลาคงที่ (Time constant) ของวงจรภายในสภาวะปกติ (Steady state) จะลดลงจาก L/R_w เป็น $L/(R_c + R_w)$ ในวงจรลักษณะนี้จะมีข้อเสียคือ กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นที่ตัวต้านทานที่ต่อเพิ่มเข้าไปจะมีค่าสูง ตัวอย่างเช่น ความต้านทานของขดลวดแต่ละเฟสเท่ากับ 1.5 โอห์ม กระแสพิคค 4 แอมป์และใช้แหล่งจ่ายไฟ 24 โวลต์ ดังนั้นจะต้องใช้ความต้านทาน R_c เพิ่มเข้าไป 4.5 โอห์มต่อเฟส ดังนั้นกำลังงานสูญเสียที่ R_c จะมีประมาณ $4.5 \times 4^2 = 72$ วัตต์ เมื่อวงจรทำงานในลักษณะการขับที่ละเฟส และเป็นสองเท่าเมื่อขับแบบที่ละสองเฟส

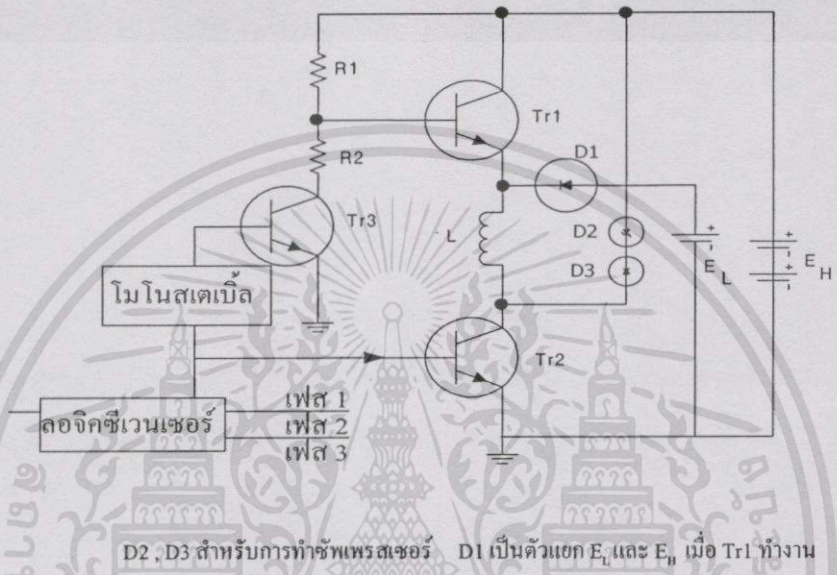


รูปที่ 2.32 แสดงวงจรที่มีการปรับปรุงกระแสบิลด์อัปโดยใช้ตัวต้านทานภายนอก R_c ต่ออนุกรม และ เพิ่มค่าแรงดัน E

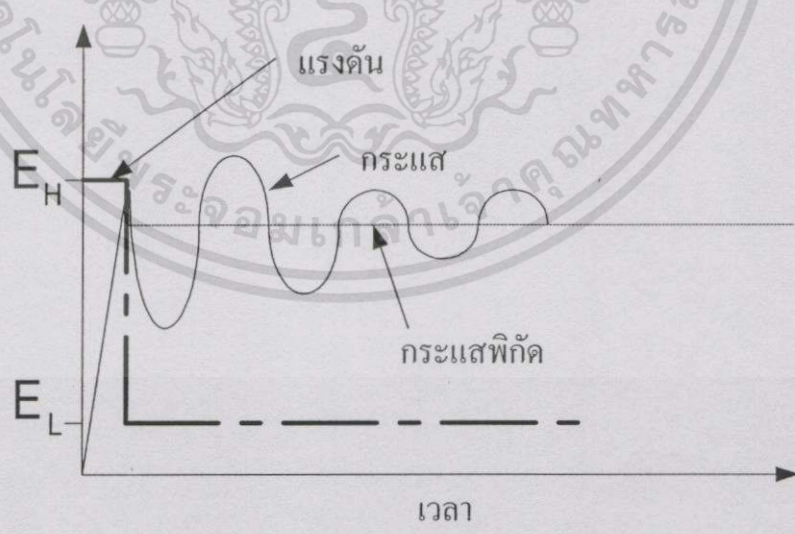
2.6.2 การใช้วงจรแหล่งจ่ายไฟ 2 ชุด (Dual voltage)

เพื่อที่จะลดปัญหาการเกิดกำลังงานสูญเสียของวงจรภาคขับกำลัง และเพิ่มประสิทธิภาพของสเตปป์มอเตอร์ จึงมีการนำวงจรขับสเตปป์มอเตอร์ที่มีแหล่งจ่ายไฟจำนวน 2 ชุดมาใช้งาน ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.33 เมื่อมีสัญญาณพัลส์จ่ายให้กับวงจรจัดลำดับเฟส เอาท์พุทของวงจรจัดลำดับเฟสจะกระตุ้นให้เฟสใดเฟสหนึ่งทำงาน เช่น เฟส 1 ทรานซิสเตอร์ Tr_1 และ Tr_2 จะทำงาน แหล่งจ่ายไฟ E_H ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงจะจ่ายกระแสไปยังขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ ในขณะที่ไดโอด D_1 จะมีไบอัสกลับเพื่อแยกแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง E_H และแรงดันต่ำ E_L ออกจากกัน เนื่องจากใช้แหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงจึงทำให้กระแสบิลด์อัป (Build up current) ตอบสนองอย่างรวดเร็ว (วงจรโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์จะเป็นตัวกำหนดค่าเวลาคงที่ เพื่อหยุดเวลาการทำงานของ

Tr1) เมื่อกระแสในขดลวดของมอเตอร์เริ่มเพิ่มขึ้นเกินพิกัดของมอเตอร์ แหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงจะหยุดจ่ายกระแสให้แก่ขดลวด ในช่วงเวลานี้ไดโอดจะมีไบอัสตรง แหล่งจ่ายไฟแรงดันต่ำจะจ่ายกระแสให้แก่ขดลวดของสเตปป์มอเตอร์แทนซึ่งลักษณะกระแสจะแสดงดังรูปที่ 2.34 ส่วนรูปที่ 2.35 แสดงลักษณะของวงจรที่ใช้แหล่งจ่ายไฟ 2 ชุดสำหรับมอเตอร์ แบบไฮบริดจ์ 4 เฟส มีการขับแบบกระตุ้นสองเฟส

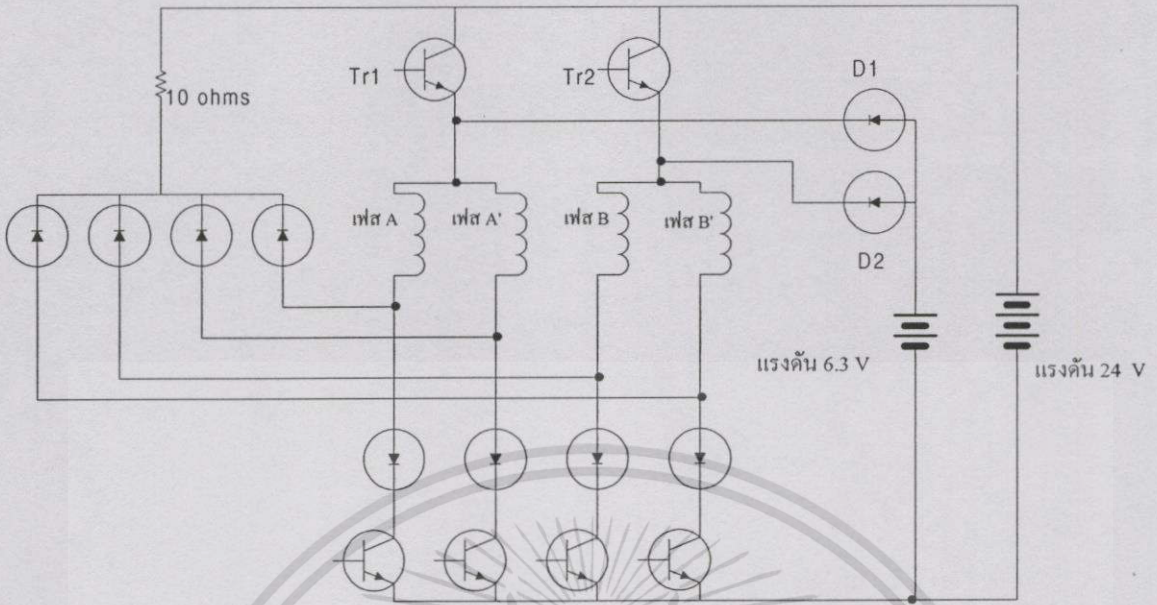


รูปที่ 2.33 แสดงหลักการของวงจรขับสเตปป์มอเตอร์ที่ใช้แหล่งจ่ายไฟ 2 ชุด



รูปที่ 2.34 แสดงลักษณะสัญญาณแรงดันและกระแสของวงจรขับ 2 ระดับแรงดัน

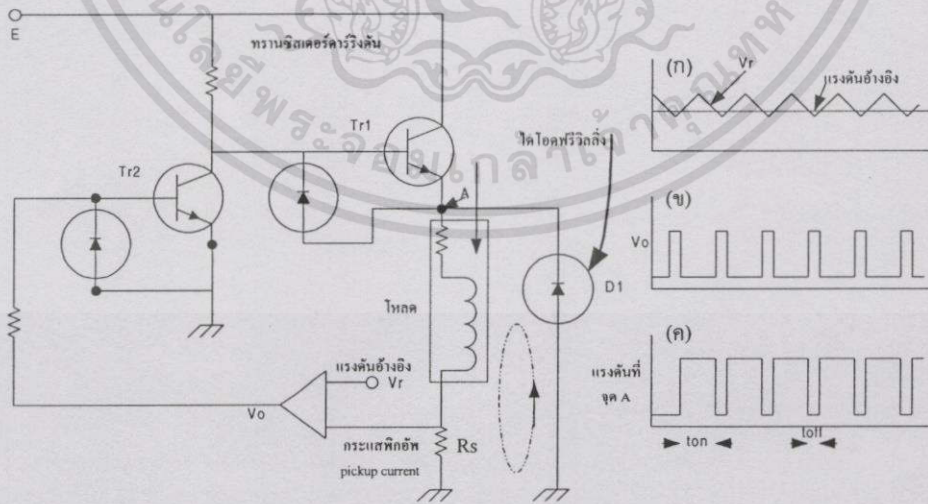
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.35 แสดงลักษณะของวงจรขับที่ใช้แหล่งจ่ายไฟ 2 ชุดสำหรับมอเตอร์ 4 เฟส

2.6.3. วงจรขับแบบพัลส์วิดท์มอดูเลชัน (Pulse-width modulation drive)

การขับแบบพัลส์วิดท์มอดูเลชัน (= PWM) เป็นวงจรขับที่มีประสิทธิภาพสูงที่ให้การตอบสนองของกระแสบิดดัดที่ดีและมีการสูญเสียต่ำ การทำงานเบื้องต้นของวงจรขับแบบนี้แสดงดังรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 แสดงหลักการของวงจรขับแบบพัลส์วิดท์มอดูเลชัน PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันที่ตำแหน่งอุปกรณ์ความต้านทาน R_s สำหรับตรวจจับกระแสของขดลวดหรือโหลด (Load current pick-up) เปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงที่อุปกรณ์โอปแอมป์ที่มีอัตราขยายตัวสูง ถ้าสัญญาณอ้างอิงและแรงดันพิกอ์มีค่าใกล้เคียงกัน สัญญาณจากเอาต์พุต V_o จะมีลักษณะเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม (Square wave) ดังแสดงในรูปที่ 2.36(ข) แต่เนื่องจากอัตราขยายของภาคขยายสูงมากจึงทำให้แรงดันเอาต์พุตออสซิลเลทระหว่างจุดอิ่มตัว (Saturation) และจุดคัทออฟ (cutoff) สัญญาณนี้จะถูกกลับเฟสด้วย TR2 จากนั้นจะส่งไปยังทรานซิสเตอร์ TR1 ซึ่งเป็นอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งหลักเพื่อจ่ายและหยุดจ่ายกระแสให้แก่ขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ ในสถานะ on กระแสจะถูกจ่ายจากแหล่งจ่ายไฟไปยังโหลด ในขณะที่สถานะ off กระแสไหลวนจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.36(ก) ดังนั้นจึงเรียกวจรแบบนี้ว่า วงจรแบบช้อปเปอร์ (Chopper) เมื่อกระแสไหลลดลงต่ำกว่าค่ากระแสที่ต้องการเพียงเล็กน้อยช่วงสถานะ on ของทรานซิสเตอร์ TR2 จะมากกว่าสถานะ off เพื่อเพิ่มกระแสให้กับโหลดเพียงพอ ในทางกลับกันหากกระแสไหลสูงกว่าค่าที่ต้องการ ช่วงสถานะ off จะนานกว่าช่วงสถานะ on เพื่อลดปริมาณกระแสของโหลดให้ต่ำลง

ค่าเฉลี่ยของแรงดันที่จ่ายให้แก่วงจรขับหรือ E_L กำหนดจากสมการดังต่อไปนี้

$$E_L = E \times \text{time - ratio} = E \times \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (2.5)$$

ข้อดีของวงจรขับแบบ PWM หรือ ช้อปเปอร์ คือ ใช้แหล่งจ่ายไฟเพียงชุดเดียว กำลังงานสูญเสียน้อยและสามารถปรับแรงดันที่จะจ่ายให้กับโหลดได้อย่างอัตโนมัติ เพื่อให้กระแสที่ค่าพิกัดที่ต้องการ

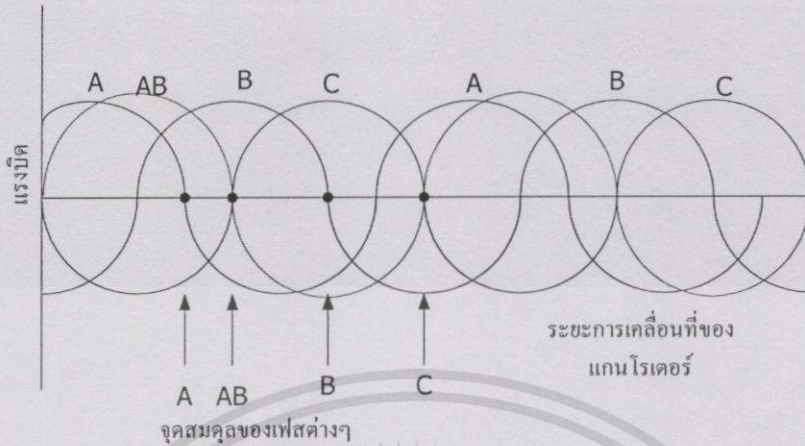
2.7 คุณลักษณะแรงบิดของสเตปป์มอเตอร์

การศึกษาคุณสมบัติของสเตปป์มอเตอร์ เพื่อให้สามารถควบคุมการทำงานให้มีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องศึกษาถึงคุณลักษณะต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับแรงบิดซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.7.1 คุณลักษณะแรงบิดสถตติค (Static torque characteristic)

คุณลักษณะทางสถตติค หมายถึง คุณลักษณะในสถานะที่มอเตอร์หยุดนิ่งไม่มีการเคลื่อนที่แสดงดังรูปที่ 2.37 ตำแหน่งสมดุลของการหมุน คือ จุดซึ่งซีฟีนของโรเตอร์และสเตเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กันอยู่ในแนวเดียวกัน และคงอยู่ที่ตำแหน่งนี้โดยไม่มีการกำหนดจนกว่าจะได้รับสัญญาณการกระตุ้นครั้งต่อไป ที่ตำแหน่งสมดุลของโรเตอร์จะมีค่าแรงบิดเป็นศูนย์ ถ้ามอเตอร์เคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเนื่องจากโหลด (Load) มอเตอร์จะสร้างแรงบิดขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามเพื่อให้สมดุลกับโหลด แรงที่เกิดขึ้นนี้เป็นพลังงานที่สะสมอยู่เมื่อมอเตอร์อยู่ในสถานะหยุดนิ่ง ซึ่งจะมีทิศ

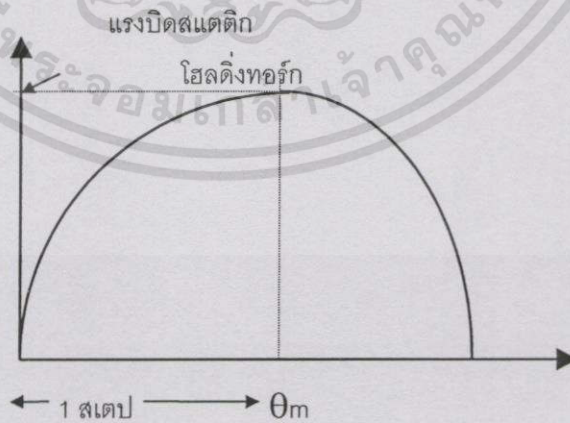
ทางตรงข้ามกับจุดสมดุลเริ่มต้น ผลของแรงบิดกับการเคลื่อนที่ของโรเตอร์จะมีลักษณะคล้ายกับรูปคลื่นไซน์ (Sine wave)



รูปที่ 2.37 แสดงคุณลักษณะของแรงบิดสแตติกของสเตปป์ิงมอเตอร์ขนาด 3 เฟส

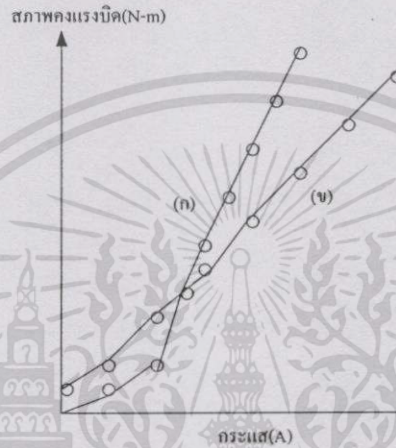
คุณลักษณะทางสแตติกจะแสดงความสัมพันธ์ของสเตปป์ิงมอเตอร์ดังต่อไปนี้

1. คุณลักษณะของแรงบิดสแตติกกับมุมสเตป (T/θ characteristic) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ ถ้ามีแรงภายนอกกระทำกับแกนโรเตอร์ จะเกิดระยะเคลื่อนที่เชิงมุมขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.38 แรงบิดสแตติกสูงสุดที่เกิดขึ้นเรียกว่า สหภาพงแรงบิดหรือโฮลด์ทอร์ก (Holding torque) เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง $\theta = \theta_m$ ถ้าระยะเคลื่อนที่ของโรเตอร์มากกว่า แรงบิดสแตติกจะไม่ส่งผลกระทบในทิศทางของจุดสมดุลเริ่มต้นแต่จะส่งผลกระทบในทิศทางตรงกันข้ามคือ จุดสมดุลอื่นต่อไป



รูปที่ 2.38 แสดงกราฟคุณลักษณะ T-θ ของสเตปป์ิงมอเตอร์

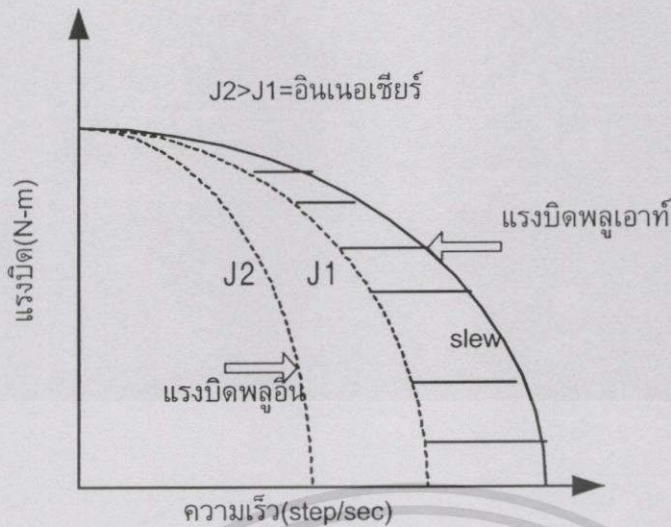
2. คุณลักษณะของแรงบิดกับกระแส (T/I characteristic) รูปที่ 2.39 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดสภาพคงตัวกับกระแสที่จ่ายให้กับเฟสต่างๆของสเตปป์มอเตอร์ ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของโรเตอร์ผ่านจุดสมดุลเริ่มต้น ถ้าแรงเสียดทานมีค่ามากกว่าแรงบิด โรเตอร์จะหยุดก่อนถึงตำแหน่งสมดุล ความไม่แน่นอนของตำแหน่งจากจุดสมดุลคือ ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่ง ซึ่งจะไม่มีการสะสม การลดค่าความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งต้องลดโหลดหรือเพิ่มโวลต์จิ้งทอร์ค



รูปที่ 2.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพคงแรงบิดกับกระแสที่จ่ายให้กับเฟสต่างๆของสเตปป์มอเตอร์ (ก) สเตปป์มอเตอร์แบบ 1.8 องศาประเภทรีลักแตนซ์แปรค่าได้ (ข) สเตปป์มอเตอร์แบบ 1.8 องศา ประเภทไฮบริดจ์

2.7.2 คุณลักษณะทางไดนามิก (Dynamic torque characteristic)

การพิจารณาคุณลักษณะทางไดนามิกของสเตปป์มอเตอร์จะเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของมอเตอร์หรือความสามารถในการสร้างแรงบิดที่สัมพันธ์กับความเร็วตั้งแต่มอเตอร์เริ่มต้นหมุน คุณลักษณะเหล่านี้สามารถดูได้จากคู่มือของบริษัทผู้ผลิตหรือการวัดทางกลที่ง่ายแบบ โพรนิเบรก (Prony brake) แสดงได้ดังรูปที่ 2.40 ซึ่งบอกถึงคุณสมบัติของมอเตอร์ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.40 แสดงคุณลักษณะทางไดนามิกของสเตปป์มอเตอร์

1. แรงบิดพลูอิน (Pull-in torque characteristic) เป็นคุณลักษณะของสเตปป์มอเตอร์ที่แสดงถึงความสามารถในการเริ่มต้นหมุนโดยการพิจารณาความเร็วของการเริ่มต้นจากแรงบิดเสียดทานของโหลด ซึ่งเป็นช่วงที่มอเตอร์สามารถเริ่มต้นหมุนและหยุดหรือเคลื่อนที่กลับทิศทางได้ทันที โดยไม่เกิดการสูญเสียการเคลื่อนที่กับสัญญาณอินพุทที่ป้อนให้ แรงบิดเส้นนี้จะขึ้นอยู่กับอินเนอร์เซียร์ของระบบด้วย เมื่ออินเนอร์เซียร์ของระบบเปลี่ยนลักษณะของกราฟเส้นนี้ก็จะเปลี่ยนไปด้วย

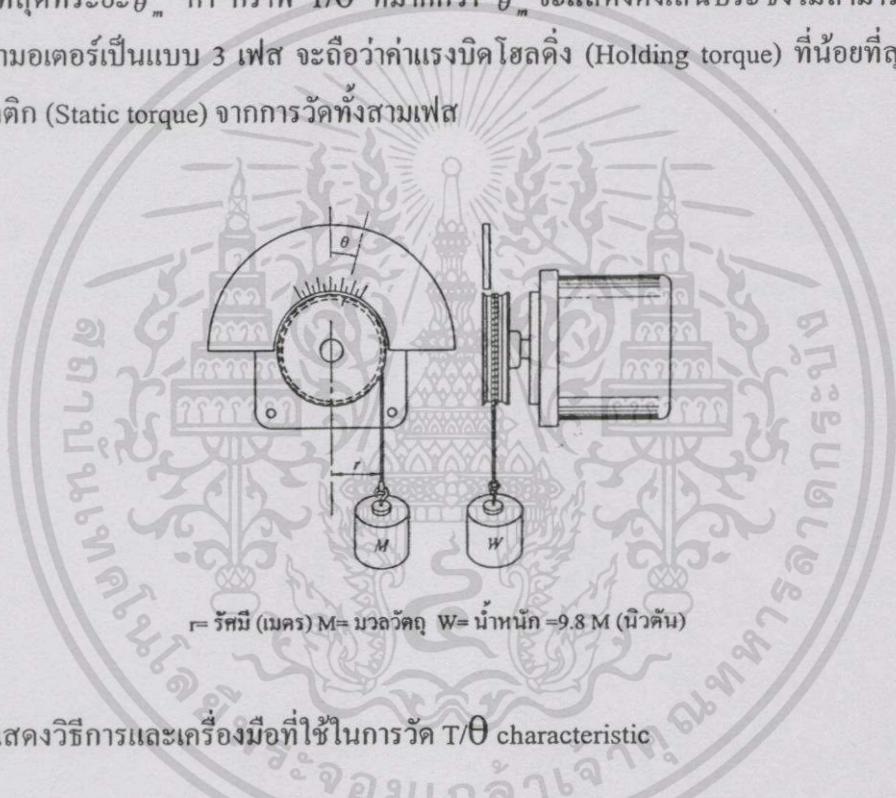
2. แรงบิดพลูเอท์ (Pull-out torque characteristic) เป็นคุณลักษณะของสเตปป์มอเตอร์ที่แสดงถึงความเร็วสูงสุดที่สามารถตอบสนองเมื่อมีแรงบิดโหลดขนาดต่างๆ ซึ่งความเร็วที่อยู่ในช่วงระหว่างแรงบิดพลูอิน และแรงบิดพลูเอท์เรียกว่า ความเร็วช่วงการหมุน (Slewing range) สเตปป์มอเตอร์จะไม่สามารถหยุดหรือเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ทันที และการตอบสนองการทำงานนี้ยังต้องขึ้นอยู่กับชุดวงจรจับด้วย แรงบิดพลูเอท์นี้ไม่ได้ถูกจำกัดการทำงานไว้ที่จุดใดจุดหนึ่งหรือมีทรานเฟอร์ฟังก์ชันเข้ามาเกี่ยวข้องเหมือนในกรณีของมอเตอร์กระแสตรง แต่จะกำหนดการทำงานด้วยเส้นกราฟพลูเอท์นี้ ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยขึ้นอยู่กับการจับ ชุดจับ โดยแรงบิดพลูเอท์นี้จะลดลงเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์สูงขึ้น

2.8 การวัดแรงบิดของสเตปป์มอเตอร์

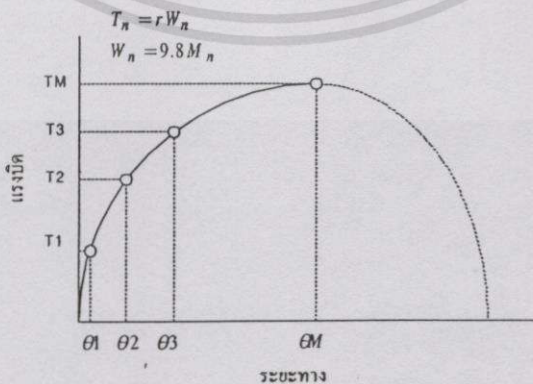
การควบคุมสเตปป์มอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพสูงนั้นต้องเข้าใจคุณลักษณะของมอเตอร์เป็นอย่างดีว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไรบ้าง จึงจะควบคุมมอเตอร์ได้ตามต้องการ ซึ่งคุณลักษณะต่างๆ อาจจะวัดได้หลายวิธีไม่เหมือนกันแล้วแต่ความละเอียดที่ต้องการ ซึ่งจะได้จากบริษัทผู้ผลิตเองหรือโดยวิธีการวัดต่อไปนี้

2.8.1 การวัด ลักษณะของแรงบิดกับการหมุนโรเตอร์ (T/θ characteristic)

เมื่อมอเตอร์ที่จะทำการวัดอยู่นิ่ง โดยการจ่ายกระแสเฟสที่ค่าเฉลี่ยโดยวิธีการกระตุ้นลักษณะหนึ่ง ตำแหน่งของโรเตอร์เมื่อไม่มีการต่อกับโหลดจะเป็นตำแหน่งสมดุลหรือตำแหน่งหยุดนิ่ง (Rest position) เราจะวัดแรงบิดที่กระทำต่อแกนมอเตอร์กับระยะที่แกนโรเตอร์หมุนไปจากจุดสมดุล ดังแสดงในรูปที่ 2.41 แรงภายนอกได้จาก มุเลย์, เชือก, ค้อนน้ำหนักขนาดต่างๆ ดังนั้นเมื่อแรงภายนอกเป็นศูนย์ โรเตอร์จะอยู่ที่จุดสมดุล เมื่อนำค้อนน้ำหนักมาแขวนโดยเพิ่มน้ำหนักขึ้นเรื่อยๆ W_1, W_2, W_3, \dots จะทำให้แกนโรเตอร์เคลื่อนที่ไปตามเข็มนาฬิกาที่ตำแหน่งต่างๆ $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots$ ดังรูปที่ 2.42 ซึ่งจะได้แรงบิด เป็น $T_i = rW_i$ กับระยะเคลื่อนที่ θ_i เมื่อระยะมากขึ้นค่าแรงบิดก็จะมีค่ามากที่สุดที่ระยะ θ_m ค่า กราฟ T/θ ที่มากกว่า θ_m จะแสดงดั่งเส้นประซึ่งไม่สามารถวัดได้ โดยวิธีนี้ ถ้ามอเตอร์เป็นแบบ 3 เฟส จะถือว่าค่าแรงบิดโฮลดิ้ง (Holding torque) ที่น้อยที่สุดคือค่าแรงบิดสแตติก (Static torque) จากการวัดทั้งสามเฟส



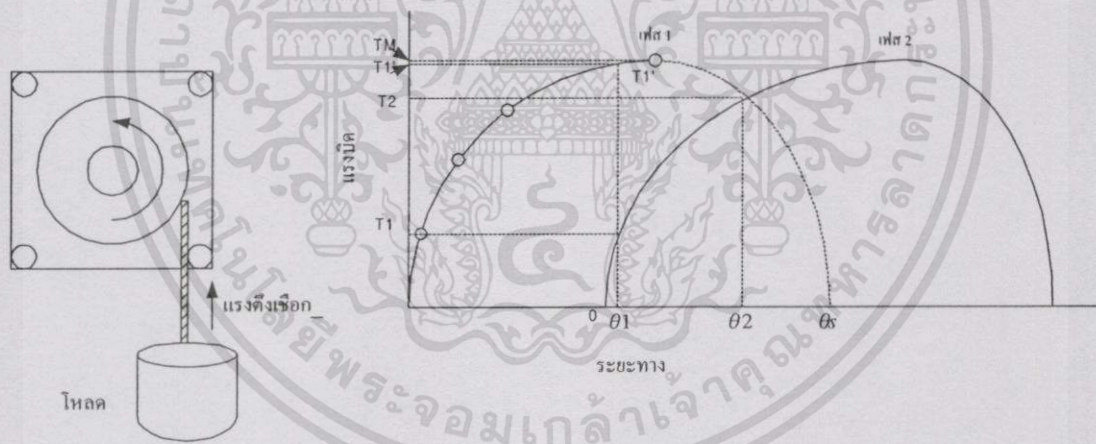
รูปที่ 2.41 แสดงวิธีการและเครื่องมือที่ใช้ในการวัด T/θ characteristic



รูปที่ 2.42 ลักษณะกราฟของ T/θ characteristic

2.8.2 การวัดแรงบิดพลูอิน (Pull-in torque)

แรงบิดพลูอินเป็นลักษณะแรงบิดทางไดนามิกของสเตปป์มอเตอร์ ลักษณะแรงบิดพลูอินหรือแรงบิดเริ่มหมุนเป็นกราฟระหว่างแรงบิดเสียดทานของโหลด (Frictional load torque) กับความเร็วต่างๆของมอเตอร์ที่สามารถเริ่มหมุนและหยุดได้ทันที โดยใช้ขบวนสัญญาณพัลส์ ประมาณ 100 ถึง 200 พัลส์ ในการทดสอบโดยต้องระบุอินเนอร์เชียของระบบ (inertia), ประเภทการคัปปลิง และชนิดของวงจรรับ ขณะวัดด้วย วิธีการวัดแสดงดังรูปที่ 2.43 ซึ่งจะใช้แรงบิดโน้มถ่วงเป็นโหลดที่เป็นแรงภายนอกที่กระทำกับมอเตอร์ (T_1) ทำให้ระยะสมดุลของมอเตอร์มาอยู่ที่ θ_1 ทำให้แรงบิดมอเตอร์เป็น (T_1') ซึ่ง $(T_1') > (T_1)$ ดังนั้น $(T_1') - (T_1)$ คือ แรงบิดเพื่อการเร่งมอเตอร์ เมื่อ T_1 มีค่ามากขึ้น จะทำให้ค่าของ $(T_1') - (T_1)$ มีค่าน้อยลง ดังนั้นค่าของอัตราเร่งสเตปมากที่สุดที่มอเตอร์สามารถเริ่มหมุนได้จะมีค่าต่ำลง การวัดแรงบิดพลูอินโดยการให้แรงบิดภายนอกกับมอเตอร์แล้วทำการหมุนมอเตอร์ที่ความเร็วของสัญญาณพัลส์ต่างๆ แล้วดูว่าความเร็วมากที่สุดเท่าไรที่มอเตอร์สามารถเริ่มหมุนได้ที่ค่าแรงบิดโหลดค่านั้นและความเร็วสูงสุดค่านั้นคือ กราฟของแรงบิดพลูอินที่พล็อตระหว่างแรงบิดโหลดค่านั้นกับความเร็วที่มอเตอร์สามารถเริ่มหมุนได้นั้นเอง



รูปที่ 2.43 แสดงการวัดแรงบิดพลูอิน

2.8.3 การวัดแรงบิดพลูเอาท์

โดยการให้มอเตอร์เริ่มหมุนที่ความเร็วที่มอเตอร์สามารถเริ่มหมุน แล้วค่อยๆเร่งความเร็วขึ้นถึงความเร็วที่ต้องการจากนั้นจึงเพิ่มแรงบิดโหลดที่กระทำกับมอเตอร์จนมอเตอร์หยุดหมุน ค่าแรงบิดโหลดค่านั้นคือ แรงบิดพลูเอาท์ของมอเตอร์ที่ความเร็วที่ต้องการวัด โดยจะกระทำตามวิธีดังกล่าวกับความเร็วต่างๆที่ต้องการวัดได้ ปกติแรงบิดพลูเอาท์ที่ความเร็วต่ำๆจะมีค่าใกล้เคียงกับแรงบิดพลู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิน ซึ่งวิธีการวัดแรงบิดพลูเอ่านั้นจะมีหลายวิธี แต่วิธีที่มีหลักเกณฑ์ง่ายที่สุดจะเป็นวิธีโพรนิเบรก (Prony brake) โดยแรงบิดโหลดจะถูกวัดโดยสเกลสปริง 1 อัน หรือ 2 อัน ดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.44 แรงบิดโหลดจะถูกอธิบายโดยความหมายของสมการ

1. สำหรับสเกลสปริง 2 อัน

$$T_L = R(q_1 - q_2) \quad (\text{นิวตัน-เมตร}) \quad (2.6)$$

R = รัศมีมูเลย์ (เมตร)

q_1 = ค่าที่อ่านได้จากสเกลหนึ่ง(นิวตัน)

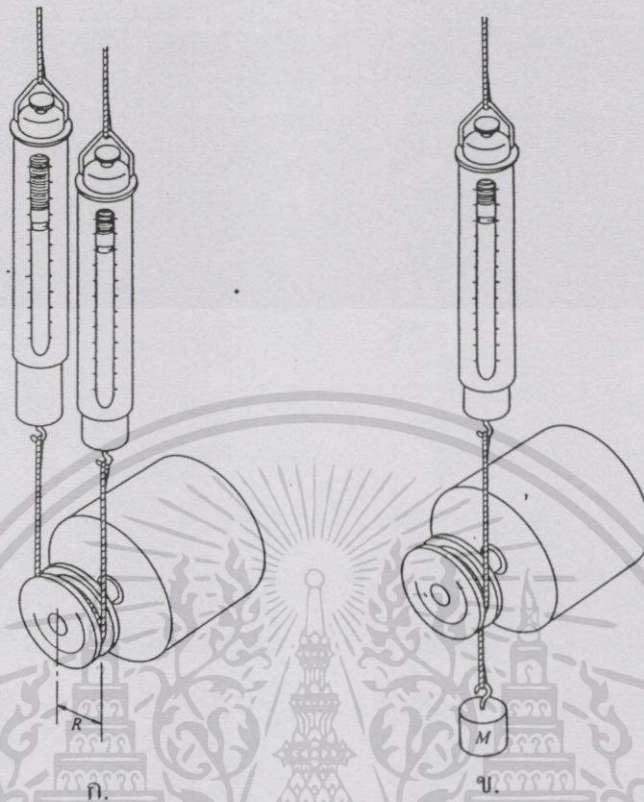
q_2 = ค่าที่อ่านได้จากสเกลสอง(นิวตัน)

2. สำหรับสเกลสปริง 1 อัน

$$T_L = R(9.8M - q) \quad (\text{นิวตัน-เมตร}) \quad (2.7)$$

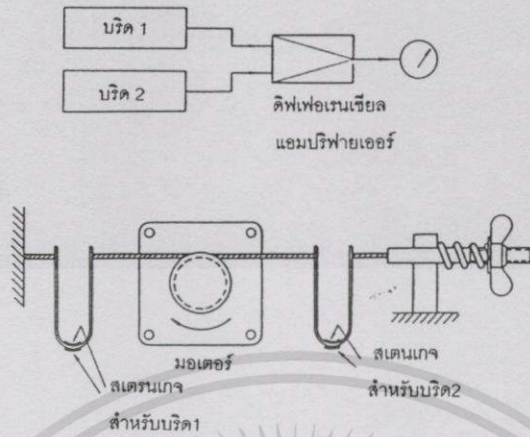
M = น้ำหนักคัมที่แขวน(กิโลกรัม)

q = ค่าที่อ่านได้จากสเกล (นิวตัน)

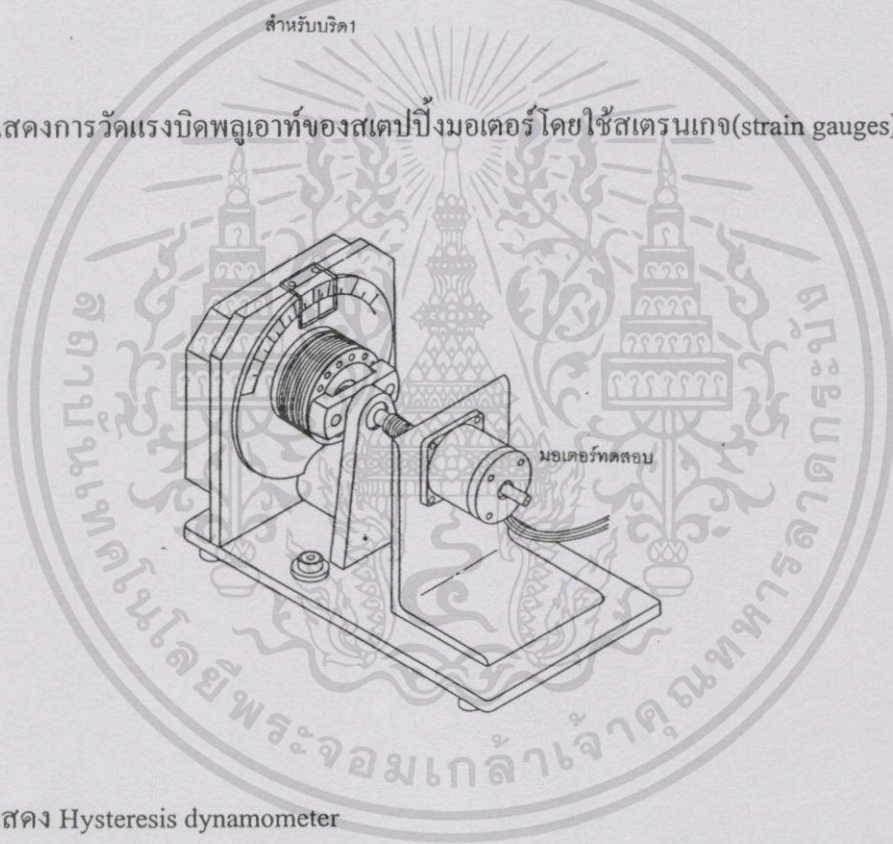


รูปที่ 2.44 แสดงการวัดแรงบิดพลูเอาท่ของสเตปป์มอเตอร์โดยการใช้สเกลสปริง ก. แบบสองสเกล ข. แบบสเกลเดียว

นอกจากนี้อาจใช้สเตรนเกจ (Strain gauges) ในการวัดแรงบิดได้ แสดงดังรูปที่ 2.45 โดยสกรูจะตั้งค่าความตึงของเส้นเชือกเป็นการควบคุมแรงบิดเสียดทานของโหลด และสเตรนเกจถูกต่อในวงจรบริดจ์เพื่ออ่านค่าความแตกต่างของความตึงเชือก T1-T2 เครื่องมือนี้อาจใช้วัดแรงบิดพลูอินได้ และเครื่องมือดังรูปที่ 2.46 คือ ฮิสเตอร์รีซิสไดนาโมมิเตอร์ถูกออกแบบมาเพื่อการวัดแรงบิดไดนามิก (Dynamic torque) โดยสามารถใช้วัดแรงบิดแบบพลูเอาท่ได้ แต่ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้วัดกับมอเตอร์ที่มีขนาดมุมสเตปป์เล็กๆ เพราะว่าฟันเฟืองในเครื่องกลที่สร้างแรงบิดจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ฮิสเตอร์รีซิส (Hyterresis phenomenon)[3]



รูปที่ 2.45 แสดงการวัดแรงบิดพลูเอาท์ของสเตรนเกจมอเตอร์โดยใช้สเตรนเกจ(strain gauges)



รูปที่ 2.46 แสดง Hysteresis dynamometer

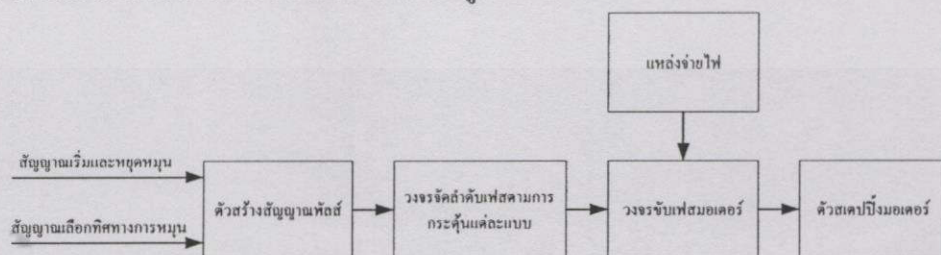
บทที่ 3

การควบคุมสเตรปิ้งมอเตอร์แบบวงเปิดทั่วไป

การใช้งานสเตรปิ้งมอเตอร์ตามความต้องการนั้น สิ่งสำคัญคือการออกแบบการควบคุมการขับเคลื่อนสเตรปิ้งมอเตอร์ โดยผู้ออกแบบระบบจะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น ความเร็วในการหมุนมากที่สุด ค่าแรงบิดของมอเตอร์ การยอมรับความผิดพลาดของตำแหน่ง หรือความถูกต้องแม่นยำของตำแหน่งเคลื่อนที่ และงบประมาณในการออกแบบการควบคุม การนำสเตรปิ้งมอเตอร์ไปใช้งานส่วนใหญ่จะเป็นการควบคุมทางตำแหน่งหรือความเร็ว ซึ่งบางครั้งก็ไม่ต้องการควบคุมความถูกต้องมากนัก ประกอบกับสเตรปิ้งมอเตอร์ มีข้อดีตรงที่ไม่ต้องการการป้อนกลับของสัญญาณ ก็สามารถควบคุมได้จึงสามารถควบคุมแบบวงเปิด (Open loop control) ได้ ซึ่งง่ายและราคาถูกและก็มี ความถูกต้องต่อสัญญาณพัลส์อินพุตดี แต่การควบคุมแบบวงเปิดก็มีข้อจำกัดเรื่องความเร็วในการ หมุน ซึ่งจะอยู่ในช่วงความเร็วต่ำ ดังนั้นจึงมีการนำระบบการควบคุมแบบวงปิด (Close loop control) มาใช้ควบคุมสเตรปิ้งมอเตอร์ ทำให้ประสิทธิภาพการใช้งานดีขึ้น ซึ่งสามารถตรวจสอบ ความถูกต้องทางตำแหน่งได้และความเร็วในการหมุนก็สูงขึ้น แต่ราคาของอุปกรณ์ในการป้อนกลับ ก่อนข้างแพง

3.1 การควบคุมสเตรปิ้งมอเตอร์แบบวงเปิด

การควบคุมสเตรปิ้งมอเตอร์แบบวงเปิดมีข้อดีตรงง่ายและราคาถูก ลักษณะการทำงานดังรูปที่ 3.1 โดยสัญญาณพัลส์ควบคุมจะสร้างจากไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor) หรือไอซีดิจิทัล สัญญาณนี้จะถูกขยายแล้วส่งไปยังชุดขับเพื่อจ่ายกระแสหรือแรงดันแก่ขดลวดของมอเตอร์ แต่ใน การออกแบบจำเป็นจะต้องรู้ข้อจำกัดต่อช่วงเวลาการสวิตช์ของการสร้างสัญญาณพัลส์ โดยข้อจำกัด จะพิจารณาจากพารามิเตอร์ของ ชุดขับ ตัวมอเตอร์ และโหลด เช่น เรื่องความเร็วในการหมุนมากที่สุดที่ค่าโหลดค่าหนึ่งสามารถพิจารณาที่แรงบิดพลูเอาท์ได้

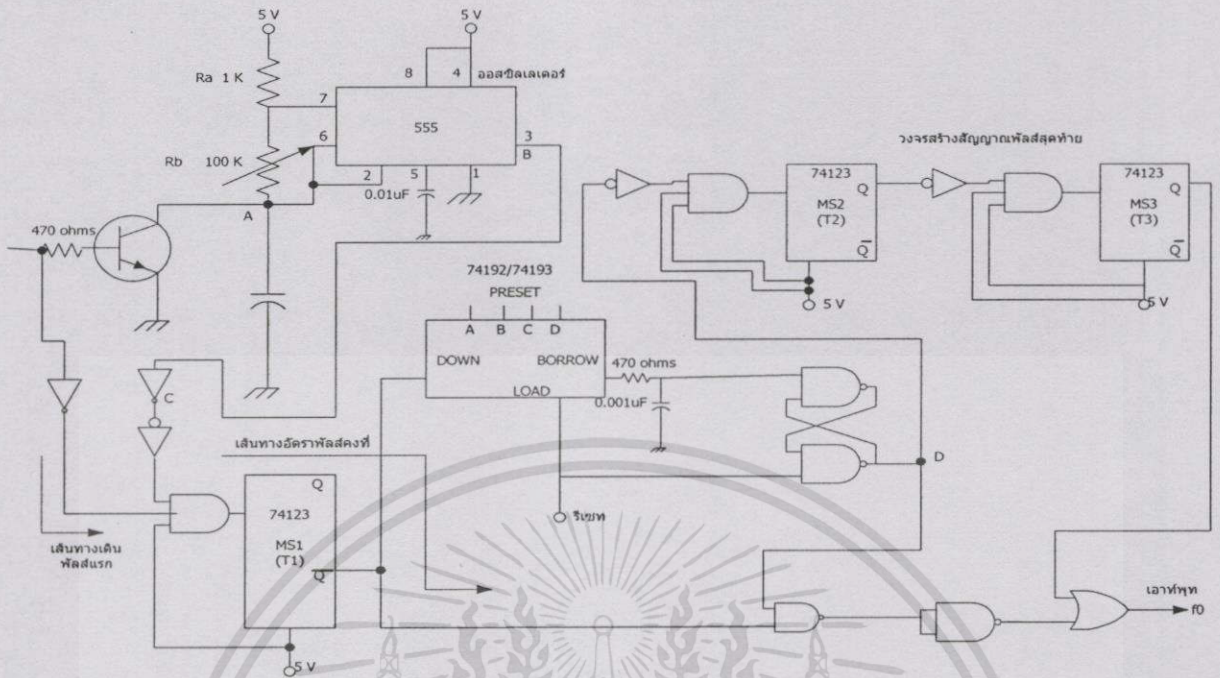


รูปที่ 3.1 แสดงการควบคุมสเตรปิ้งมอเตอร์แบบวงเปิด

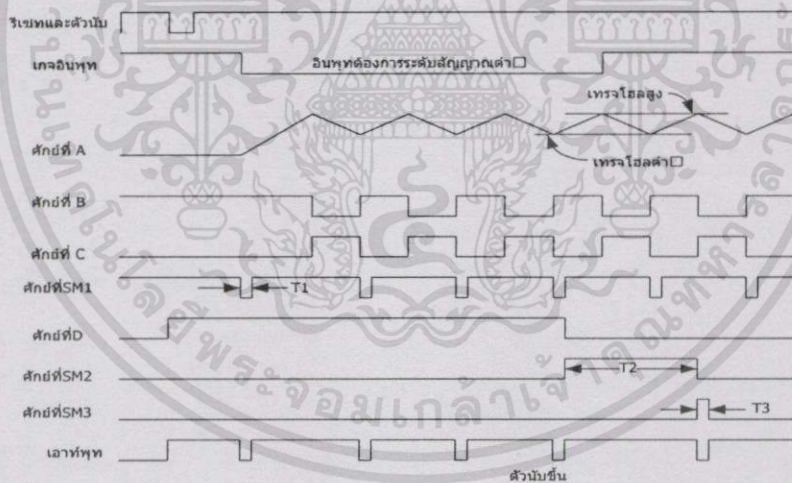
การควบคุมสเตรปปีงมอเตอร์แบบวงเปิดนั้นมอเตอร์จะต้องเริ่มต้นหมุนที่ความเร็วในช่วงแรงบิดพลูอินซึ่งขึ้นอยู่กับค่าแรงบิดโหลด (Load torque) และมอเตอร์ไม่สามารถเปลี่ยนความเร็วมาที่ช่วงความเร็วมากที่สุดได้ในทันที ดังนั้นมอเตอร์จะต้องค่อยๆเพิ่มความเร็วขึ้นตามลำดับจนถึงค่าความเร็วมากที่สุด แต่เวลาของการเร่งความเร็วจะต้องเพียงพอเหมาะสม จึงจะทำให้มอเตอร์เคลื่อนที่ได้ถูกต้องต่อสัญญาณพัลส์อินพุตทั้งหมด และเมื่อต้องการหยุดมอเตอร์จะไม่สามารถหยุดได้ทันที เพราะจะทำให้เกิดการวิ่งเลยตำแหน่งที่ต้องการหยุด ดังนั้นจึงต้องค่อยๆหน่วงความเร็วลงจนช่วงความเร็วที่มอเตอร์สามารถหยุดได้ ช่วงเวลาการสร้างสัญญาณพัลส์ที่เหมาะสมในการควบคุมสเตรปปีงมอเตอร์แบบวงเปิดนี้จะขึ้นอยู่กับโหลดโดยตรงโดยกำหนดให้โหลดคงที่ แต่ในการใช้งานจริงนั้นโหลดอาจมีการเปลี่ยนแปลง การออกแบบจึงต้องถูกกำหนดที่เงื่อนไขที่เลวที่สุด ดังนั้นการออกแบบช่วงเวลาของการสร้างสัญญาณพัลส์ของการควบคุมแบบวงเปิดจึงไม่เหมาะสมกับโหลดทั้งหมดได้ [4] การควบคุมแบบวงเปิดมีเทคนิคการเร่งและหน่วงความเร็วต่างๆดังตัวอย่างต่อไปนี้

3.1.1 เกจออสซิลเลเตอร์ (Gated oscillator)

ตัวควบคุมอินพุตของเกจออสซิลเลเตอร์ (Gated oscillator) จะใช้ไอซี 555 ดังแสดงในรูป 3.2 และรูปคลื่นของวงจรแสดงในรูปที่ 3.3 เมื่อสัญญาณอินพุตมีระดับสัญญาณต่ำ คำสั่งพัลส์สเตปแรกที่มีความกว้าง $T1$ จะถูกจ่ายออกวงจรโมโนสเตเบิล MS1 ขณะเดียวกันแรงดันที่จุด A ก็เพิ่มขึ้น วงจรออสซิลเลเตอร์จะเริ่มทำงานที่ไอซี 555 โดยมีรูปคลื่นสามเหลี่ยมเกิดขึ้นที่จุด A ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ต่อมาสัญญาณพัลส์ที่ใช้เพื่อสั่งให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วที่อยู่ในช่วงการหมุน (Slewing range) จะถูกจ่ายออกมาตรงตำแหน่งที่เป็นจุดต่ำสุดของสัญญาณสามเหลี่ยมและพัลส์ที่จ่ายมีความกว้าง $T1$ ด้วย คาบเวลาของวงจรออสซิลเลทในกรณีนี้คือ $0.7(Ra+Rc)$ จะเห็นชัดเจนจากรูปว่า คาบเวลาการสั่นจะสั้นกว่าช่วงเวลาของพัลส์เอาต์พุตที่ 1 และ 2 ถ้าจำนวนสเตปสำหรับการเคลื่อนที่เท่ากับ N ดังนั้น $N-1$ จะถูกกำหนดขึ้นที่ตัวนับซึ่งใช้ไอซีเบอร์ 74192 และ 74193 เมื่อมีการนับขึ้นจนถึงค่า $N-1$ แล้ว แรงดันที่จุด D จะมีระดับสัญญาณต่ำเพื่อเริ่มการทำงานของวงจรโมโนสเตเบิล MS2 ให้จ่ายพัลส์ที่มีความกว้าง $T2$ และที่เวลา $T2$ สัญญาณพัลส์ที่มีความกว้าง $T3$ จะถูกจ่ายจากวงจรโมโนสเตเบิล MS3 ช่วงเวลา $T2$ จะถูกกำหนดให้มากกว่าคาบเวลาของการสั่นในช่วงที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วช่วงการหมุน ในบางกรณีของแรงเสียดทานของโหลดไม่จำเป็นจะต้องกำหนดให้ช่วงเวลาการสเตปของสเตปสุดท้ายนานกว่าสเตปก่อนหน้า ดังนั้นวงจร MS2 และ MS3 ไม่จำเป็นต้องมี [3]



รูปที่ 3.2 แสดงวงจรเกจอสซิลเลเตอร์ (Gated oscillator)



รูปที่ 3.3 แสดงรูปคลื่นของสัญญาณต่างๆในวงจรเกจอสซิลเลเตอร์

3.1.2 การควบคุมการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้น

อัตราพัลส์ของการควบคุมการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้น จะเปลี่ยนแปลงมีลักษณะ เป็น สมการเชิงเส้นกับเวลาดังในรูปที่ 3.4 ซึ่งเป็นการออกแบบที่ง่ายแต่จะส่งผลกระทบต่อเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จะนานและเป็นการยากที่มอเตอร์จะเร่งความเร็วผ่านจุดรีโซแนนซ์ (Resonance) ของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

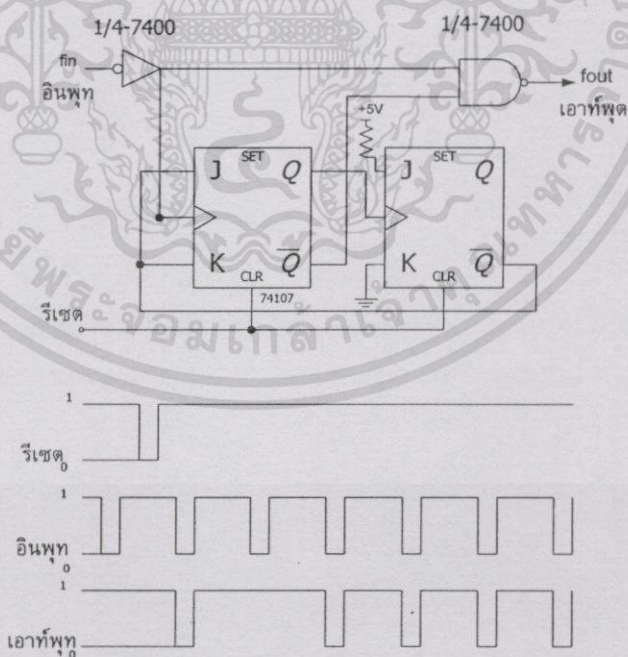
สเตปป์มอเตอร์จะเริ่มหมุนด้วยความเร็วภายในช่วงแรงบิดพลูอิน และเร่งจนถึงความเร็วที่ต้องการ จากนั้นจะหน่วงความเร็วลงกลับมาอยู่ในช่วงแรงบิดพลูอินเพื่อให้มอเตอร์สามารถหยุดได้ ซึ่งจะมีโปรไฟล์ของอัตราพัลส์แสดงในรูปที่ 3.5 และวงจรการสร้างสัญญาณพัลส์แสดงในรูปที่ 3.6 วงจร VCO แบบเชิงเส้น (Linear Voltage control oscillation) ถูกใช้เพื่อสร้างขบวนพัลส์ที่เป็นสัดส่วนต่อแรงดันอินพุต ซึ่งจะได้จากวงจรอินทิเกรต (integrator) ที่สร้างความชันขาขึ้นและขาลงแบบเชิงเส้นที่เหมาะสมกับคำสั่งอินพุตและจากวงจรสำหรับการปรับแรงดันที่น้อยที่สุดเพื่อสร้างความเร็วที่น้อยที่สุด ช่วงเวลาในการกำหนดความชันขาขึ้นและขาลงจะแยกเป็นอิสระต่อกัน เพื่อกำหนดค่าความชันที่เหมาะสมของความชันทั้งสอง แรงดัน V_r ถูกปรับให้มีค่ามากที่สุดโดยตัวต้านทาน R_1 ที่ทำหน้าที่เป็นตัวแบ่งแรงดัน แรงดันเอาต์พุต V_1 จะรวมกับแรงดัน V_2 ที่แสดงถึงความเร็วที่น้อยที่สุด แรงดัน V_2 ถูกกำหนดโดยตัวแบ่งแรงดันที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน R_3, R_4 , และ R_5 ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตของ ไอซี 1 คือ

$$V_3 = V_2 + V_1 \quad (3.1)$$

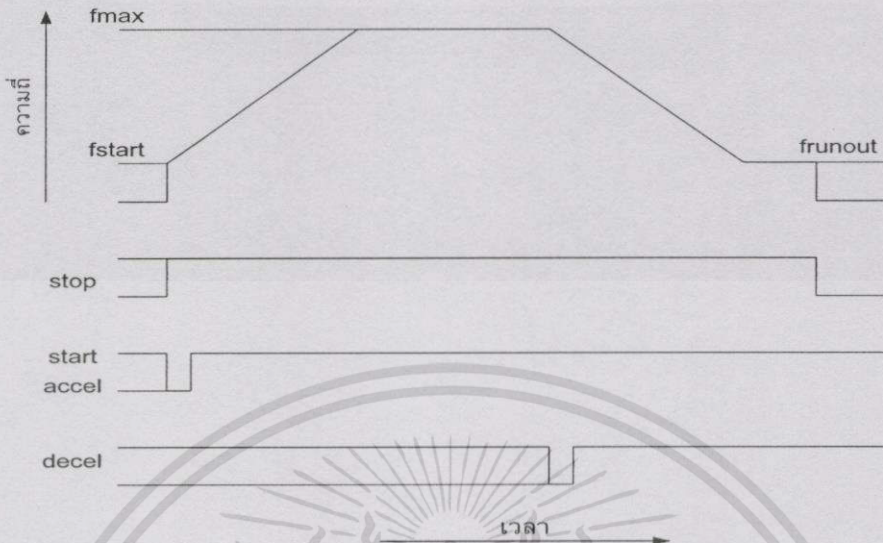
โดยเอาต์พุตของ VCO คือ

$$f = kV_3 \quad (3.2)$$

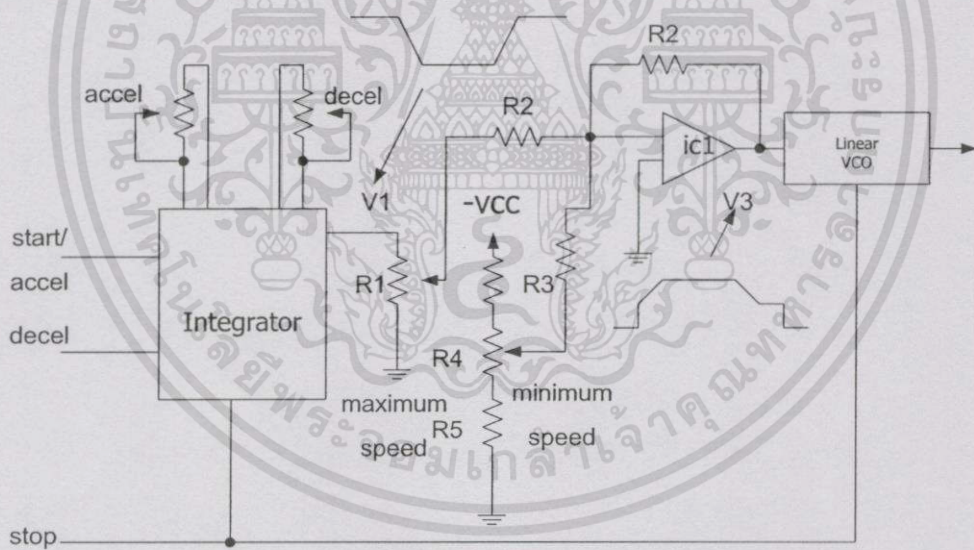
เมื่อ k คือ ค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชันของ VCO แบบเชิงเส้น ใน kHz/V ค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชันนี้จะต้องเลือกให้เหมาะสมกับระบบที่ต้องการ [6]



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของสัญญาณพัลส์ที่ใช้ในการควบคุมการเร่ง



รูปที่ 3.5 แสดง โปรไฟล์ของอัตราพัลส์การเร่งและหน่วงความเร็วเชิงเส้น



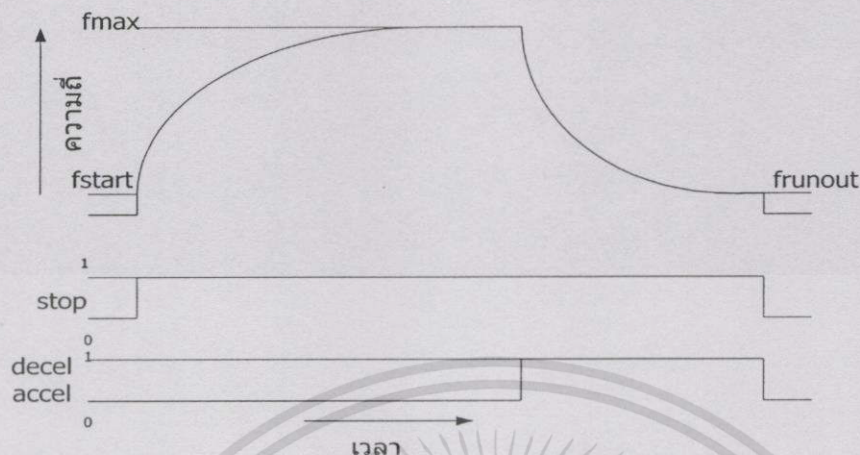
รูปที่ 3.6 แสดงวงจรการควบคุมแบบการเร่งและหน่วงความเร็วเชิงเส้น

3.1.3 การควบคุมแบบความชันขาขึ้นและลงเป็นอีกโพลเนนเชียล

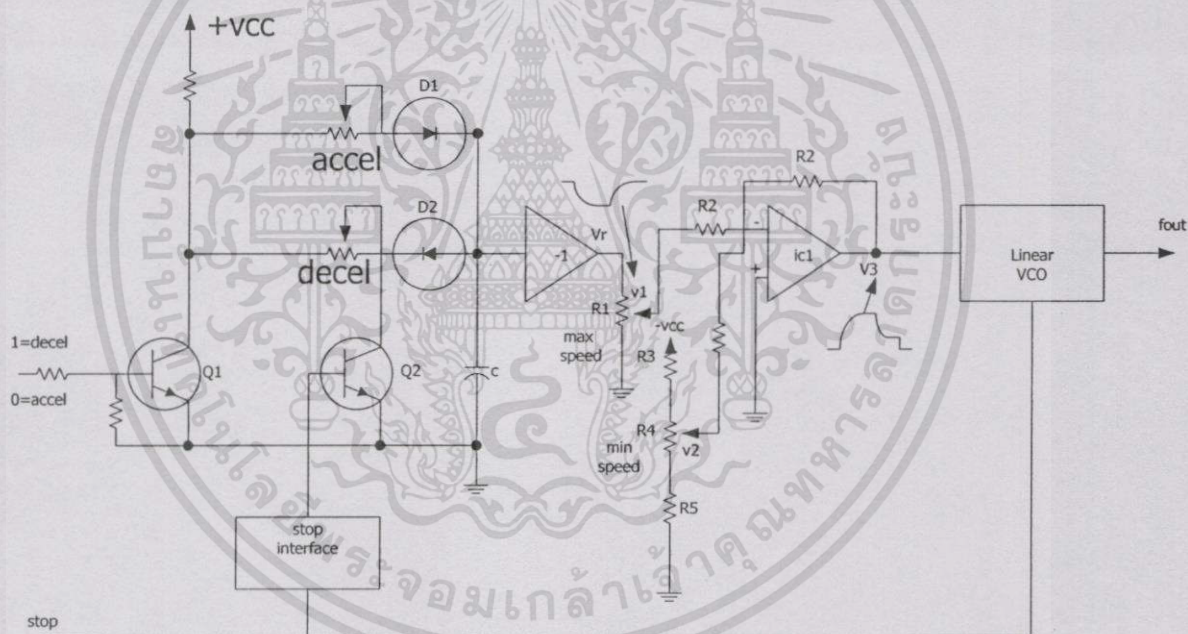
เป็นการออกแบบการควบคุมที่ดีกว่าการควบคุมแบบเชิงเส้น ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงอัตราพัลส์ที่สูงกว่าในช่วงความเร็วต่ำ และจะให้การเปลี่ยนแปลงอัตราพัลส์ต่ำที่ความเร็วสูง ลักษณะโปรไฟล์การเร่งและหน่วงความเร็วแบบความชันขาขึ้นและขาลงเป็นอีกโพลเนนเชียลแสดงในรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และวงจรแสดงดังรูปที่ 3.8 วงจรส่วนสำคัญจะเหมือนกับการเร่งแบบเชิงเส้นยกเว้นแรงดัน V_r ซึ่งใช้กำหนดค่าความชันจะสร้างจากวงจรเน็ตเวิร์ค RC ซึ่งซาร์ทจากแหล่งจ่ายแรงดันคงที่[6]



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะ โปรไฟล์อัตราพัลส์การเร่งและหน่วงความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียล

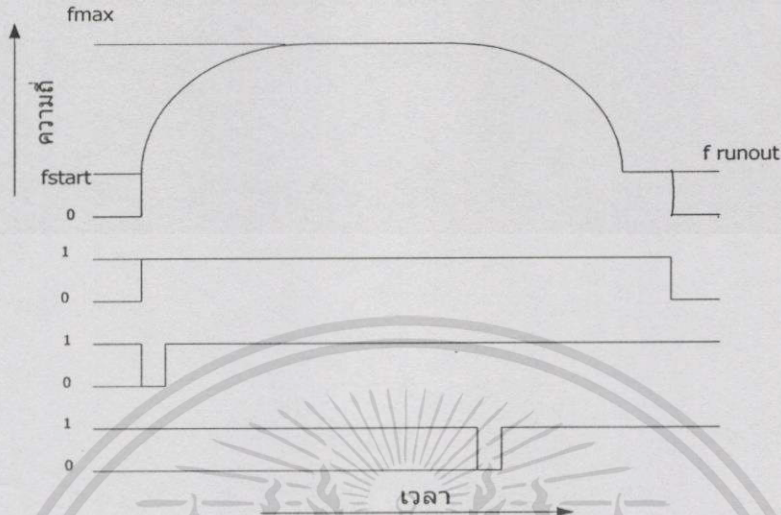


รูปที่ 3.8 แสดงวงจรของการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียล

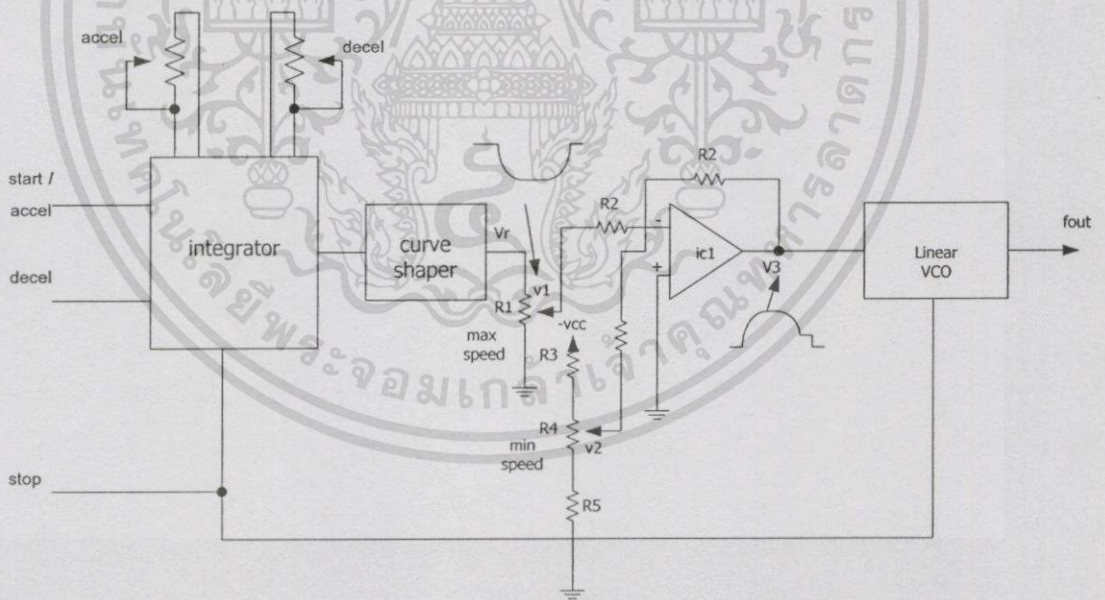
3.1.4 การควบคุมแบบความชันขาขึ้นเป็นแบบเอ็กโปเนนเชียลและความชันขาลงเป็นอินเวอร์สเอ็กโปเนนเชียล

จากลักษณะของอัตราพัลส์ของการเร่งและหน่วงความเร็วแบบความชันเป็นเอ็กโปเนนเชียลในรูปที่ 3.7 มีข้อเสียที่ว่า อัตราการหน่วงความเร็วมีค่ามากที่ช่วงความเร็วสูง ซึ่งสามารถทำให้เกิดความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ได้ในช่วงนี้ วิธีการแก้ปัญหาคือเปลี่ยนเป็นการหน่วงความเร็วแบบอิน

เวอร์สเอ็กโปเนนเชียล (Inverse exponential) หรือเรียกว่าเป็นกระบอกของการหน่วงความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียลเดิม ซึ่งจะได้โปรไฟล์การเร่งและหน่วงความเร็วแสดงดังรูปที่ 3.9 และวงจรแสดงดังรูปที่ 3.10 [6]

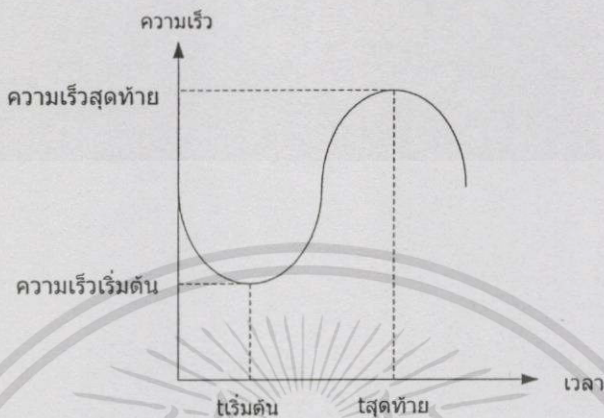


รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะโปรไฟล์การเร่งและหน่วงความเร็วแบบความชันขาขึ้นเป็นเอ็กโปเนนเชียลและความชันขาลงเป็นแบบอินเวอร์สเอ็กโปเนนเชียล

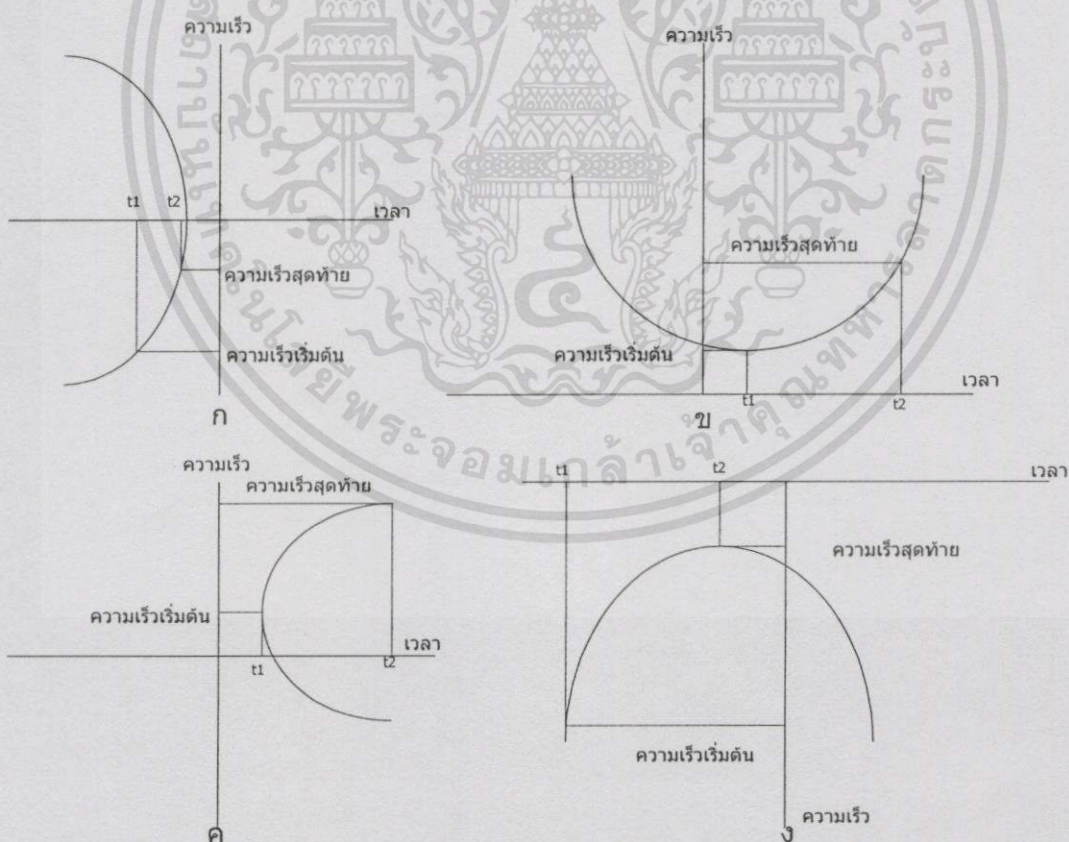


รูปที่ 3.10 แสดงวงจรของการเร่งและหน่วงความเร็วแบบความชันขาขึ้นเป็นเอ็กโปเนนเชียลและความชันขาลงเป็นแบบอินเวอร์สเอ็กโปเนนเชียล

นอกจากการเร่งและหน่วงความเร็วโดยวิธีดังกล่าวแล้วยังมีการเร่งและหน่วงความเร็วแบบอื่นอีก เช่น แบบสัญญาณ โคชานน์ พาราโบลาร์ ไฮเปอร์โบลาร์ แสดงตัวอย่างลักษณะการเร่งดังในรูปที่ 3.11 3.12 3.13 ตามลำดับ ซึ่งจากศึกษาจะพบว่า การเร่งและหน่วงความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียลจะเหมาะสมที่สุดเพราะจะสอดคล้องกับการสร้างแรงบิดของมอเตอร์[4]

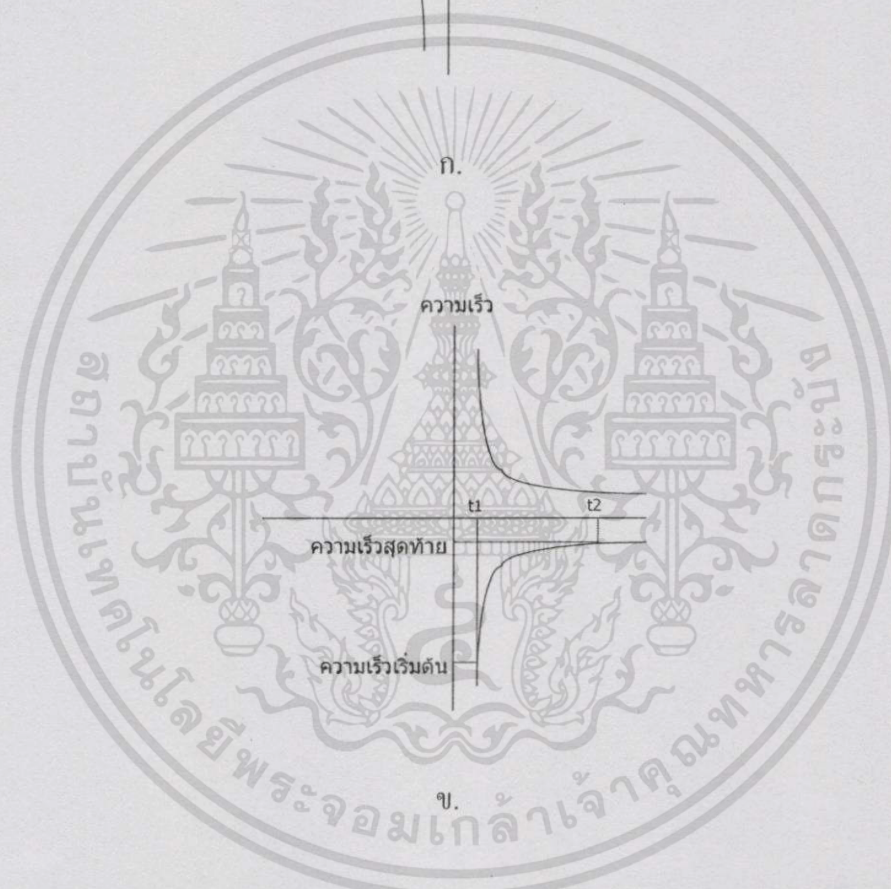
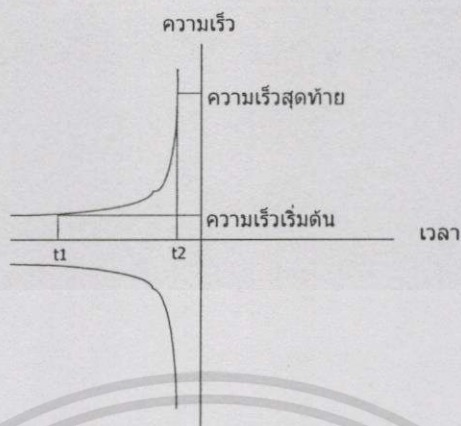


รูปที่ 3.11 แสดงลักษณะการเร่งแบบสัญญาณ โคชานน์



รูปที่ 3.12 แสดงลักษณะการเร่งแบบสัญญาณพาราโบลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะการเร่งแบบไฮเปอร์โบลาร์ ก. อัตราพัลส์แบบบวก ข. อัตราพัลส์แบบลบ

3.2 วิธีการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิด

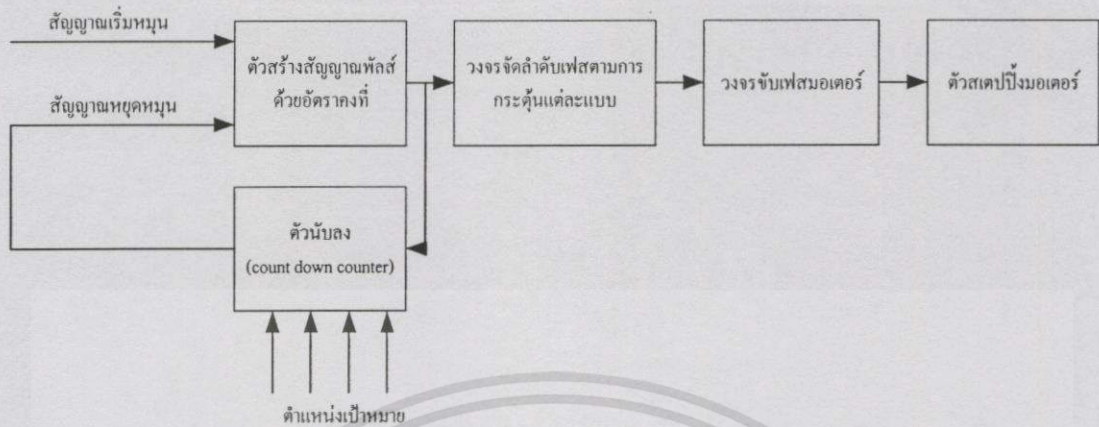
ในส่วนของการออกแบบการควบคุมแบบวงเปิดนั้นจะใช้การควบคุมด้วยวิธีการต่างๆดังนี้

3.2.1 การควบคุมแบบความเร็วคงที่

เป็นการควบคุมสเตปป์มอเตอร์โดยใช้ความเร็วคงที่ค่าหนึ่งตลอดการเคลื่อนที่ จากตำแหน่งเริ่มต้นจนถึงตำแหน่งเป้าหมาย โดยจะเป็นความเร็วที่มอเตอร์สามารถเริ่มหมุนและหยุดได้ทันทีโดยไม่เกิดการผิดพลาดของสเตป ซึ่งจะเป็นความเร็วที่อยู่ในช่วงแรงบิดพลูอินของมอเตอร์ โดยการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกความเร็วในการเคลื่อนที่จะพิจารณาจากค่าแรงบิด โหลดคงที่ที่กระทำกับแกน โรเตอร์ของมอเตอร์ การควบคุมแสดงดังรูปที่ 3.14 [2][3]



รูปที่ 3.14 แสดงหลักการควบคุมแบบความเร็วคงที่

3.2.2 การควบคุมแบบการเร่งและหน่วงความเร็วเชิงเส้น

เป็นการควบคุมในลักษณะการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้น โดยสลับป้อนมอเตอร์จะเริ่มหมุนในช่วงแรงบิดพลูอิน แล้วค่อยๆ เพิ่มความเร็วในลักษณะเชิงเส้นจนถึงความเร็วสูงสุดที่ต้องการที่มอเตอร์สามารถตอบสนองได้โดยไม่เกิดการสูญหายของสลิประหว่างการเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นความเร็วที่อยู่ในช่วงแรงบิดพลูเอาท โดยพิจารณาจากการกำหนดแรงบิด โหลดคงที่ ซึ่งมีการคำนวณดังต่อไปนี้

เมื่อมอเตอร์เคลื่อนที่จะสามารถแทนลักษณะการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ด้วยสมการ

$$T_m = J \frac{d\omega}{dt} + D\omega + T_f \quad (3.3)$$

T_m = แรงบิดของมอเตอร์ที่สร้างขึ้นกำหนดให้มีค่าคงที่ (นิวตันเมตร)

J = ค่าความเฉื่อยทั้งหมดของระบบ(มอเตอร์+โหลด)(กิโลกรัมเมตร²)

ω = ความเร็วเชิงมุมของโรเตอร์(เรเดียน/วินาที)

D = ค่าคงที่การหน่วงแบบเหลว(viscous damping) โดยกำหนด = 0

T_f = แรงบิดเสียดทานของโหลดคงที่เป็นอิสระจากความเร็ว(นิวตันเมตร)

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 3.3 จะได้สมการความเร็วเชิงเส้นที่ขึ้นกับเวลาดังนี้

$$\omega = \frac{(T_m - T_f)}{J} t + \omega_1 \quad (3.4)$$

ω_1 = ความเร็วเชิงมุมก่อนเริ่มการเร่ง

หรือได้สมการของอัตราเร่ง $f = \frac{(T_m - T_f)}{\theta_s J} t + f_1$ (3.5)

f_1 = อัตราเร่งก่อนเริ่มการเร่ง

หรือเมื่อมอเตอร์ถูกเร่งจากความเร็วเริ่มต้น f_1 ซึ่งอยู่ในช่วงแรงบิดพลูอินและเร่งมอเตอร์จนมีความเร็วมากที่สุดที่มอเตอร์ตอบสนองได้ที่ค่าโหลดคงที่ที่กำหนด f_m ซึ่งอยู่ในช่วงแรงบิดพลูเอาท จะได้อัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงเส้นดังสมการที่ (3.6) [7]

$$s = \frac{(f_m - f_1)}{t_0} t + f_1 \tag{3.6}$$

โดย

$$t_0 = \frac{2J \times 2\pi \theta_s (f_m - f_1)}{T_m} \times \text{safety factor of 2} \tag{3.7}$$

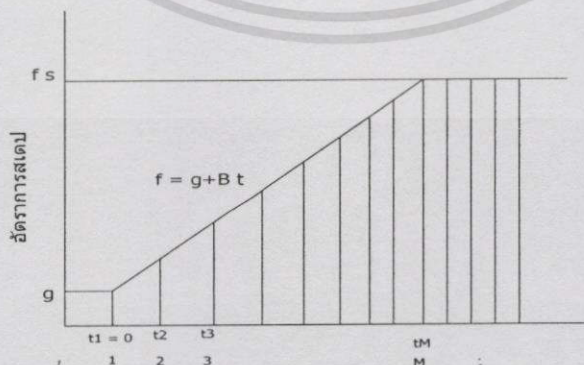
t_0 = ระยะเวลาการเร่ง (วินาที)

θ_s = ขนาดมุมสเตป (เรเดียน)

เมื่อมอเตอร์มีแรงบิด T_m ที่ความเร็ว f_1 และมีค่าแรงบิดเป็นศูนย์ ที่ความเร็ว f_m ดังนั้นจะได้แรงบิดเพื่อการเร่งอินเนอร์เชียรี่เป็นแรงบิดเฉลี่ย

$$\text{แรงบิดเฉลี่ย} = T_m/2$$

โดยค่าความชันของการเร่งและหน่วยความเร็วจะเท่ากัน ทำให้ระยะเวลาของการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นถึงตำแหน่งเป้าหมายมากกว่าที่ควรจะเป็น ซึ่งในความเป็นจริงนั้นช่วงการหน่วงความเร็วควรจะใช้เวลาน้อยกว่าเพราะแรงบิดโหลดจะช่วยด่วงให้มอเตอร์หยุด



รูปที่ 3.15 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบการเร่งความเร็วเชิงเส้นจนถึงความเร็วช่วงหมุนคงที่ (f_s) ภายในเวลา t_m

3.2.3 การควบคุมแบบการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียล

ถ้าค่าการหน่วงแบบเหลือจากสมการที่ 3.3 ถูกนำมาพิจารณาด้วยสมการการเคลื่อนที่จะเขียนเป็น

$$\theta_s J \frac{df}{dt} + \theta_s Df - (T_m - T_f) = 0 \quad (3.8)$$

ถ้าแรงบิดของมอเตอร์ไม่เป็นฟังก์ชันกับความเร็วหรืออัตราการสเตรป ค่าตอบของสมการดิฟเฟอเรนเชียลในสมการที่(3.8) ข้างบนจะได้คำตอบดังนี้

$$f = \frac{T_m - T_f}{\theta_s} - \left(\frac{T_m - T_f}{\theta_s} - f_1 \right) e^{-(D/J)t} \quad (3.9)$$

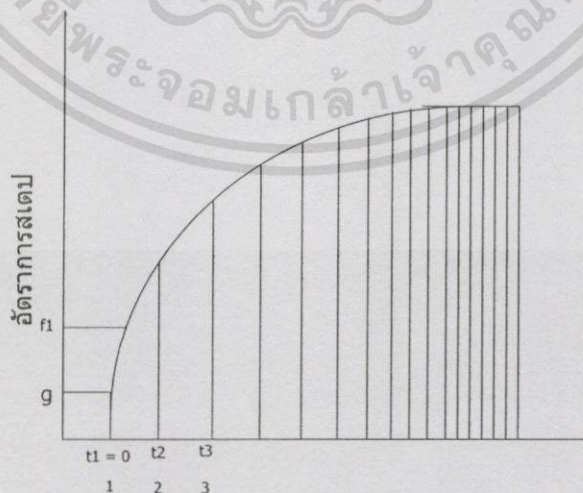
แต่ในความเป็นจริงแล้วแรงบิดมอเตอร์จะลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ดังนั้นคำตอบของสมการที่ (3.8)จะเป็นดังสมการที่ (3.10) และลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเร็วจะแสดงดังรูปที่ 3.16 [3]

เมื่อ

$$T_m = T_{mo} - \alpha f \quad \text{จะได้}$$

$$f = g + \left(\frac{T_{mo} - T_f - g}{D\theta_s + \alpha} \right) \left[1 - e^{-\left(\frac{D\theta_s + \alpha}{J\theta_s} \right)t} \right] \quad (3.10)$$

ส่วนการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียลด้วยเทคนิคการหาโปรไฟล์ความเร็ว (Velocity profile) จะอธิบายต่อไปในบทที่ 4 ซึ่งเป็นการหาอัตราการเร่งและหน่วงความเร็วที่เหมาะสม



รูปที่ 3.16 แสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิดด้วย

เทคนิคโปรไฟล์ความเร็ว

สเตปป์มอเตอร์เป็นตัวต้นกำลังแบบดิจิทัลที่สำคัญอย่างหนึ่ง ทำงานโดยการรับสัญญาณพัลส์เพื่อเปลี่ยนเป็นการเคลื่อนที่ทางกล มีการหมุนเป็นสเตปป์ที่มีค่ามุมคงที่ ข้อดีอย่างหนึ่งของสเตปป์มอเตอร์ที่ดีกว่ามอเตอร์กระแสตรงคือ ความสามารถในการทำงานแบบวงเปิด ที่มีการควบคุมที่ง่ายและให้ความเชื่อถือทางตำแหน่งได้ดี จึงเหมาะนำไปใช้งานต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมทางตำแหน่ง เช่น x-y พล็อตเตอร์, พรินเตอร์ การใช้งานสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิดปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะเป็นการทำงานทางด้านควบคุมตำแหน่งและความเร็ว เป็นการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งเป้าหมาย เรื่องของเวลาที่ใช้ระหว่างเคลื่อนที่เป็นส่วนสำคัญยังมีระยะเวลาน้อยยิ่งดี การควบคุมแบบวงเปิดแบบเดิมนั้นเป็นการควบคุมแบบความเร็วคงที่ ซึ่งเป็นความเร็วที่มอเตอร์สามารถเริ่มและหยุดหมุนโดยทันที แต่มีค่าต่ำมากประมาณ 100–400 Hz [1] โดยขึ้นอยู่กับค่าอินเนอร์เซียของระบบด้วย ทำให้เสียเวลามากระหว่างการเคลื่อนที่ซึ่งเป็นข้อเสียอย่างหนึ่ง จากคุณลักษณะของแรงบิดไดนามิกของมอเตอร์ที่ประกอบด้วยแรงบิดพลูอินและแรงบิดพลูเอาทั ซึ่งถ้ามอเตอร์สามารถหมุนด้วยความเร็วที่สูงเกือบใกล้เคียงกับเส้นโค้งของแรงบิดพลูเอาทัได้ จะลดระยะเวลาระหว่างการเคลื่อนที่ลงได้มาก แต่การเพิ่มและลดความเร็วของมอเตอร์ไม่สามารถทำอย่างทันทีทันใด เพราะจะทำให้เกิดการไม่ซิงโครนัส(nonsynchronous) เกิดการสูญหายของสเตปป์หรือหมุนเลยตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการหยุด ดังนั้นจึงต้องมีการเร่งและหน่วงความเร็วที่ละน้อยตามลำดับอย่างเหมาะสมจึงจะทำให้มอเตอร์เคลื่อนที่โดยไม่เกิดความผิดพลาด

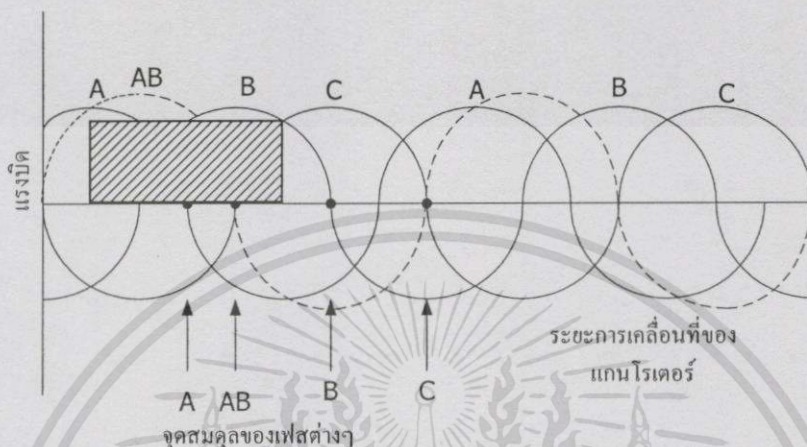
วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิด ที่สามารถลดระยะเวลาที่ใช้ระหว่างการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นถึงตำแหน่งเป้าหมาย โดยหาความสามารถของอัตราเร่งและอัตราหน่วงความเร็วของมอเตอร์ที่เหมาะสมจากคุณลักษณะของแรงบิดแบบไดนามิก ซึ่งเรียกว่าโปรไฟล์ความเร็ว (Velocity profile) ของมอเตอร์ จะได้อัตราเร่งและอัตราหน่วงความเร็วเป็นแบบเอ็กโปเนนเชียล จะมีลักษณะเฉพาะตัวของมอเตอร์แต่ละชนิด จากโปรไฟล์ความเร็วจะสามารถหาช่วงเวลาที่ถูกต้องในการสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อป้อนแก่วงจรจับ ที่สอดคล้องกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดเมื่อความเร็วเปลี่ยนแปลง หาได้โดยใช้วิธีการคำนวณทางตัวเลข ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

4.1 การหาความสามารถของอัตราเร่งและอัตราห่วงความเร็วของมอเตอร์

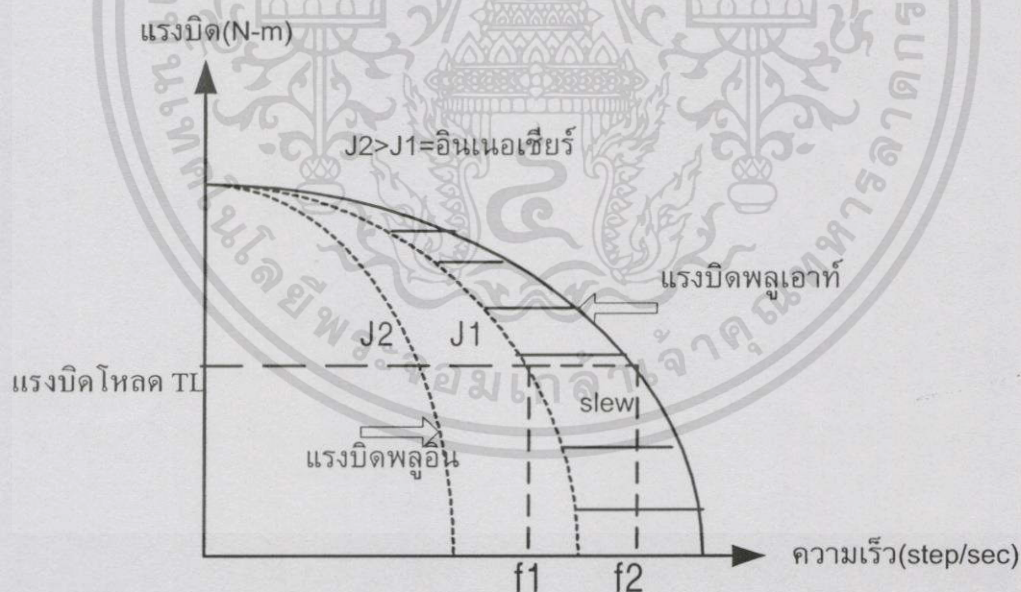
อัตราเร่งและอัตราห่วงความเร็วที่มีการใช้งานอยู่ส่วนใหญ่จะเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งเป็นวิธีการควบคุมที่ง่าย ขึ้นอยู่กับการเลือกขนาดของแรงบิดที่มอเตอร์สร้างได้เพื่อที่จะเอาชนะแรงบิดโหลด ในการควบคุมแบบวงเปิดนั้นไม่สามารถรู้ตำแหน่งของโรเตอร์จึงไม่สามารถกระตุ้นขดลวดตรงตำแหน่งที่สร้างแรงบิดได้มากที่สุดสามารถรู้ได้จากแรงบิดสแตติก ดังนั้นจึงต้องใช้คุณลักษณะของแรงบิดไดนามิกมาพิจารณาแทน ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วในขณะที่มอเตอร์มีการหมุน โดยการเลือกขนาดของแรงบิดที่จะเอาชนะโหลดที่มีค่าน้อยกว่า 100% ของแรงบิดที่มอเตอร์สร้างได้จากกราฟของแรงบิดพลูเอาท် ซึ่งเรียกว่าการกำหนดช่วงที่ปลอดภัย (safety margin) เพราะในทางปฏิบัตินั้นโหลดไม่ได้มีค่าคงที่อาจมีการเปลี่ยนแปลงหรือระบบอาจถูกรบกวนจากสิ่งภายนอกได้ ดังนั้นกรณีที่เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงจะไม่ได้ไม่ทำให้เกิดการสูญหายของสเตป แต่การเลือกช่วงที่ปลอดภัยกว้างจะทำให้ระยะเวลาในการเคลื่อนที่มากดังนั้นจึงต้องเลือกระหว่างเวลาและระยะปลอดภัย[8] การกำหนดอัตราเร่งและอัตราห่วงความเร็วที่เหมาะสมนั้นมีหลายวิธีเช่น เชิงเส้น เอ็กโปเนนเชียล พาราโบลา ซึ่งเป็นการหาโดยการลองผิดลองถูกโดยการเขียนโปรแกรมให้คอมพิวเตอร์คำนวณแล้วแต่ขนาดของโหลดที่ต้องการขับซึ่งมีความยุ่งยาก และจากการศึกษาอัตราเร่งและอัตราห่วงความเร็วที่เหมาะสมจะเป็นแบบเอ็กโปเนนเชียล[1]

ในการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์นั้นสิ่งที่สำคัญคือ การควบคุมให้มอเตอร์สร้างแรงบิดให้สามารถเอาชนะแรงบิดโหลดได้ มอเตอร์จึงจะทำงานได้ตามที่เราต้องการ ซึ่งในการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์ ถ้าเราสามารถควบคุมการกระตุ้นเฟสของขดลวดในจังหวะที่ทำให้สามารถสร้างแรงบิดได้มาก จะทำให้มอเตอร์มีแรงบิดสุทธิมากที่จะเอาชนะแรงบิดโหลด ดังนั้นมอเตอร์จะมีอัตราเร่งสูงทำให้มอเตอร์เคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปอีกตำแหน่งหนึ่งได้เร็ว ซึ่งต้องอาศัยการศึกษาคุณลักษณะของแรงบิดสแตติกดังรูปที่ 4.1 พื้นที่แรเงาคือแรงบิดเฉลี่ยจากการกระตุ้นเฟสหนึ่งไปยังเฟสต่อไป การกระตุ้นโดยวิธีนี้จะต้องอาศัยวิธีการควบคุมแบบวงปิด จึงจะสามารถควบคุมตำแหน่งที่ต้องการได้แต่จะทำให้การออกแบบยุ่งยากและมีราคาแพงเนื่องจากเอนโค้ดเดอร์มีราคาแพง ซึ่งในงานควบคุมบางอย่างก็ไม่จำเป็นต้องควบคุมแบบวงปิด เนื่องจากไม่ต้องการความถูกต้องของตำแหน่งมากนัก จึงสามารถควบคุมแบบวงเปิดได้ แต่ในการควบคุมแบบวงเปิดแบบเดิมนั้นเป็นการควบคุมแบบความเร็วคงที่ตลอดการเคลื่อนที่ซึ่งเป็นความเร็วที่ต่ำมากอยู่ในช่วงแรงบิดพลูอิน ทำให้ระยะเวลาในการเคลื่อนที่มาก เพื่อเป็นการลดขนาดของเวลาตรงนี้ลงโดยที่เรายังควบคุมแบบวงเปิดอยู่สามารถทำได้โดยการเพิ่มความเร็วของมอเตอร์ตามลำดับจนถึงความเร็วมากที่สุดที่ต้องการ ซึ่งอยู่ในช่วงแรงบิดพลูเอาท်จะทำให้ได้ความเร็วมากที่สุดที่มอเตอร์ตอบสนองได้ใกล้เคียงกับการควบคุมแบบวงปิด และเมื่อมอเตอร์เคลื่อนที่จนเกือบถึงตำแหน่งเป้าหมายจึงห่วงความเร็วของมอเตอร์ลงที่ละน้อยจนมอเตอร์มีความเร็วอยู่ในช่วงแรงบิดพลูอิน มอเตอร์จึงจะสามารถหยุดที่ตำแหน่งที่

ต้องการได้โดยไม่เกิดการลื่นไหล โดยความเร็วที่ป้อนให้มอเตอร์จะต้องขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของแรงบิดของมอเตอร์ ซึ่งเรียกว่าแรงบิดไดนามิก ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดย f_1 คือความเร็วช่วงเริ่มหมุนอยู่ในช่วงแรงบิดพลูอิน และ f_2 คือ ความเร็วมากที่สุดที่มอเตอร์ตอบสนองได้อยู่ในช่วงแรงบิดพลูเออร์ท์ เมื่อกำหนดโหลดคงที่ค่าหนึ่ง TL



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะการกระตุ้นเฟสมอเตอร์โดยอาศัยลักษณะแรงบิดสแตติก



รูปที่ 4.2 แสดงคุณลักษณะของแรงบิดไดนามิก

โดยการพิจารณาจากคุณลักษณะของแรงบิด ไดนามิกในช่วงแรงบิดพลูเออร์ท์ดังกล่าว เราสามารถหาความสามารถของการเร่งและหน่วงความเร็วของมอเตอร์ที่ค่าแรงบิด โหลดคงที่ค่าหนึ่ง เรียกว่า โปรไฟล์ความเร็ว (Velocity profile) ซึ่งจะแสดงวิธีการคำนวณหาดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 การหาความสามารถช่วงการเร่งความเร็วของมอเตอร์

สมการการเคลื่อนที่ทางไดนามิกของมอเตอร์ในการเร่งความเร็วมีดังนี้

$$T(f) = J \frac{d\omega}{dt} + D\omega + T_l(f) \quad (4.1)$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (4.2)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (4.3)$$

$$D\omega = 0$$

$$T(f) = T_l(f) + J \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (4.4)$$

$$\text{step-length} = \theta_s = \frac{2\pi}{np} \quad (4.5)$$

1 สเตป มีความยาวเท่ากับ $2\pi/np$ เรเดียน

เมื่อมอเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความถี่ f Hz คือ f สเตป/วินาที

หมายความว่า ใน 1 วินาทีมอเตอร์เคลื่อนที่ได้ f สเตป

\therefore มอเตอร์เคลื่อนที่ได้ระยะทาง $(2\pi/np)*f$ เรเดียน = θ เรเดียน/ 1 วินาที

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{2\pi * f}{np} = \frac{\text{distance}}{\text{times}} \quad (4.6)$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{2\pi}{np} \frac{df}{dt} \quad (4.7)$$

$$T(f) = T_l(f) + \frac{2\pi}{np} J \frac{df}{dt} \quad (4.8)$$

$$\frac{df}{dt} = (T(f) - T_l(f)) * \frac{np}{2\pi J} \quad (4.9)$$

อินทิเกรตสมการที่ (4.9) เพื่อหาเวลาที่ใช้ระหว่างการเคลื่อนที่จากความเร็ว 0-f2 จะได้สมการดังนี้

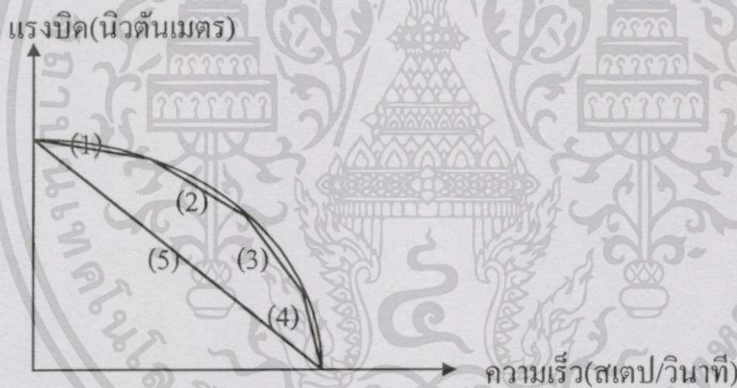
$$\frac{np}{2\pi J} \int_0^t dt = \int_0^{f^2} \frac{1}{T(f) - T_1(f)} df \quad (4.10)$$

$$\frac{np}{2\pi J} t = \int_0^{f^2} \frac{1}{T(f) - T_1(f)} df \quad (4.11)$$

$$t = \frac{2\pi J}{np} \int_0^f \frac{1}{T(f) - T_1(f)} df \quad (4.12)$$

t = เวลาที่ใช้ระหว่างการเร่งความเร็วจาก 0 ถึง f สเตปต่อวินาที

จากลักษณะกราฟของแรงบิดและความเร็วดังรูปที่ 4.2 จะกำหนดสมการขึ้นแทนความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ในแต่ละช่วงความเร็ว ซึ่งจำนวนของสมการที่ใช้แทนความสัมพันธ์ดังกล่าวขึ้นอยู่กับลักษณะของกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงการประมาณสมการแทนลักษณะของแรงบิด

ถ้าจำนวนของสมการแทนแรงบิดในรูปที่ 4.3 มีหลายสมการจะทำให้ค่าที่คำนวณได้จากสมการกับค่าจริงมีค่าความผิดพลาดน้อยลง จากรูปที่ 4.3 ถ้าใช้สมการ(5)สมการเดียวจะเห็นว่าค่าจากสมการจะผิดจากค่าจริงมาก ดังนั้นจึงต้องใช้สมการ (1)+(2)+(3)+(4) แทนลักษณะของกราฟในรูปที่ 4.3 ซึ่งจะมีข้อผิดพลาดจากค่าจริงน้อยกว่า ตัวอย่างการประมาณสมการแทนแรงบิดและความเร็ว ซึ่งนิยมใช้สมการเชิงเส้นแทนแรงบิดในแต่ละช่วงของความเร็ว โดยแสดงสมการแทนความสัมพันธ์ของกราฟดังสมการข้างล่างนี้

$$T_1(f) = T_m \quad (4.13)$$

$$T_2(f) = T_1 - \alpha(f_2 - f_1) \quad (4.14)$$

$$T_{x-1}(f) = T_{x-2} - \alpha(f_n - f_{n-1})$$

$$T_x(f) = T_{x-1} - \alpha(f_n - f_{n-1}) \quad (4.15)$$

สมการที่ (4.13) ความเร็วจะอยู่ในช่วง $0 < f < f_1$ สเตปต่อวินาที

สมการที่ (4.14) ความเร็วจะอยู่ในช่วง $f_1 < f < f_2$ สเตปต่อวินาที

สมการที่ (4.15) ความเร็วจะอยู่ในช่วง $f_{n-1} < f < f_n$ สเตปต่อวินาที

x = จำนวนสมการที่เรากำหนดขึ้นแทนกราฟ

n = จำนวนการแบ่งช่วงความเร็ว

จากสมการที่ (4.12) เมื่อแก้สมการด้านขวามือโดยการแทนแรงบิดมอเตอร์ด้วยสมการที่ (4.13) (4.14) ถึง (4.15) และกำหนดแรงบิดโหลดเป็นค่าคงที่ จะทำให้ได้คำตอบของสมการที่ (4.12) เป็นสมการลอการิทึม(Logarithm) ดังตัวอย่างสมการข้างล่างนี้

$$t_1 = \frac{2\pi J}{np} \left(\frac{1}{T_m - T_l} \right) f \quad \text{เมื่อ } 0 < f < f_1 \text{ สเตปต่อวินาที} \quad (4.16)$$

$$t_2 = t_1 + \frac{2\pi J}{np} (-1) \left(\frac{-1}{\alpha} \right) (\log((T_1 - T_l) - (\alpha \times f_1))) + \left[(-1) \left(\frac{1}{\alpha} \right) (\log((T_1 - T_l) - (\alpha \times f))) \right] \quad (4.17)$$

เมื่อ $f_1 < f < f_2$ สเตปต่อวินาที

$$t_n = t_{n-1} + \frac{2\pi J}{np} (-1) \left(\frac{-1}{\alpha} \right) (\log((T_{x-1} - T_l) - (\alpha \times f_{n-1}))) + \left[(-1) \left(\frac{1}{\alpha} \right) (\log((T_{x-1} - T_l) - (\alpha \times f))) \right] \quad (4.18)$$

เมื่อ $f_{n-1} < f < f_n$ สเตปต่อวินาที

จากนั้นใช้การคำนวณโดยใช้คอมพิวเตอร์หาเวลาระหว่างการเร่งจากความเร็วที่ 0 ถึง ความเร็วมากที่สุดที่มอเตอร์ตอบสนองได้ (f) โดยใช้สมการที่ (4.16) ถึง สมการที่ (4.18) โดยเพิ่มความเร็วในการหาจาก 0 ขึ้นครั้งละหนึ่งสลิปต่อวินาที โดยดูว่าความเร็วนั้นอยู่ในสมการที่แทนความเร็วในช่วงใดบ้างจะหาเวลาได้ดังนี้

t_1 = เวลาในการเร่งจาก 0 ถึง 0 สลิปต่อวินาที

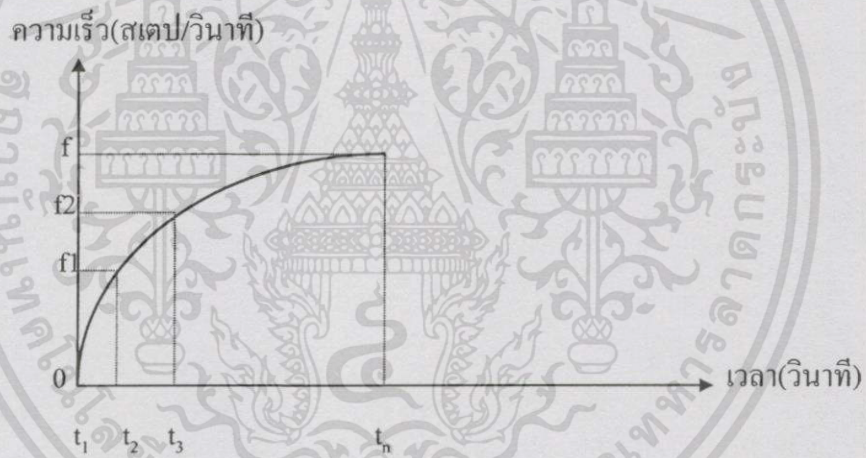
t_2 = เวลาในการเร่งจาก 0 ถึง 1 สลิปต่อวินาที

.

.

.

t_n = เวลาในการเร่งจาก 0 ถึง f สลิปต่อวินาที (ความเร็วมากที่สุดที่มอเตอร์สามารถตอบสนองได้โดยไม่มี การสูญเสียของสลิป) เมื่อนำเวลา จาก t_1 ถึง t_n มาพล็อตกราฟจะได้เวลากับความเร็วดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงกราฟการพล็อตของเวลา t_1 ถึง t_n และความเร็ว 0 ถึง f

ดังนั้นนำเวลาที่ได้มาเก็บไว้ในรูปของเมตริกซ์

$$T = [t_1, t_2, t_3, \dots, t_n]$$

T = ชุดของเวลาที่ใช้ในการเร่งมอเตอร์เมื่อกำหนดแรงบิดโหลดค่าหนึ่งเท่านั้น เมื่อต้องการขับโหลดค่าใหม่จึงต้องทำการคำนวณค่าเวลาชุดนี้ขึ้นมาใหม่

เมื่อกำหนดให้มอเตอร์สามารถเริ่มหมุนที่ความเร็วค่าหนึ่ง f_1 และมอเตอร์สามารถตอบสนองที่ความเร็วมากที่สุด f_2 จะได้เวลาที่ใช้ระหว่างการเร่งแรงบิดโหลดค่าหนึ่งจากความเร็ว f_1 ถึง f_2 ใช้เวลา

$$t = T(f_2+1) - T(f_1+1) \quad \text{วินาที} \quad (4.19)$$

t = เวลาที่ใช้เพื่อการเร่งมอเตอร์

เมื่อรู้เวลาแล้วจึงคำนวณหาช่วงเวลาของการสร้างสัญญาณพัลส์ เพื่อกระตุ้นวงจรขับให้จ่ายกระแสแก่ขดลวดในแต่ละสเตปของการเคลื่อนที่โดยการแก้สมการการเคลื่อนที่ทางไดนามิกเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับสเตปการเคลื่อนที่ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

4.1.2 การหาความสามารถช่วงการหน่วงความเร็วของมอเตอร์

สำหรับการหน่วงความเร็วของมอเตอร์จากความเร็ว f_2 ถึง f_1 นั้นสามารถหาเวลาในการเคลื่อนที่ได้โดยวิธีเดียวกัน โดยหาจากสมการการเคลื่อนที่ทางไดนามิกของมอเตอร์แต่ในการหน่วงความเร็ว นั้น จะต้องกระตุ้นให้มอเตอร์สร้างแรงบิดที่เป็นลบ ดังนั้นต้องพิจารณาแรงบิดของมอเตอร์เป็นลบจึงจะถ่วงแรงบิดโหลด ความเร็วของมอเตอร์จึงจะลดลงได้ทำให้สมการการเคลื่อนที่เป็นดังนี้

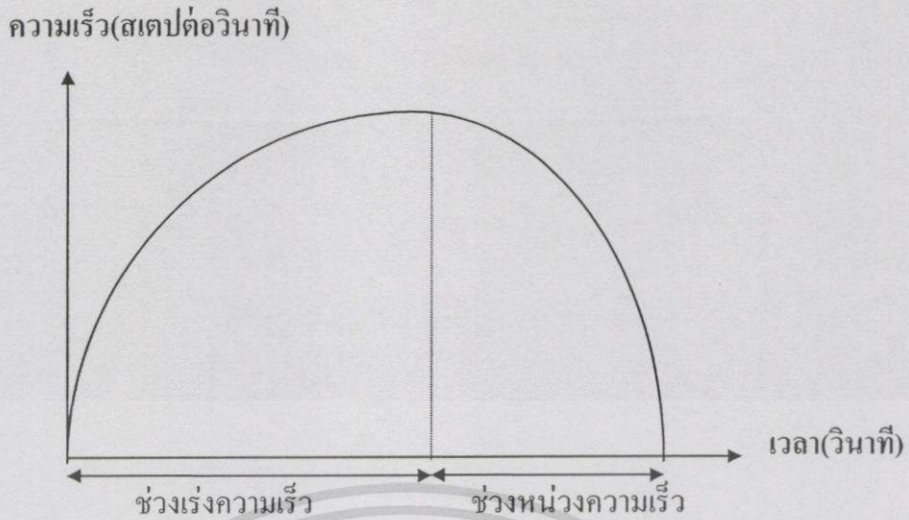
$$-T_b(f) = T_r(f) + J\theta_s \frac{df}{dt} \quad (4.20)$$

ใช้วิธีการคำนวณเหมือนการเร่งความเร็วจะได้สมการเพื่อหาเวลาในการหน่วงความเร็วดังนี้

$$t_d = -\frac{2\pi J}{np} \int_{f_2}^{f_1} \frac{1}{T_b(f) + T_r(f)} df \quad (4.21)$$

โดย t_d = เวลาในการหน่วงความเร็วจาก f_2 ถึง f_1 วินาที

ลักษณะกราฟระหว่างเวลาและความเร็วที่ลดลงจะแสดงดังรูปที่ 4.3 โดยเวลาช่วงการหน่วงความเร็วจะน้อยกว่าช่วงการเร่งความเร็วเนื่องจากโหลดจะเป็นตัวถ่วงมอเตอร์ให้หยุดเร็วขึ้น จากรูปจะเห็นว่า การเร่งและหน่วงความเร็วที่คำนวณโดยวิธีดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นการเคลื่อนที่แบบเอ็กโปเนนเชียล (Exponential acceleration-deceleration) ซึ่งจะเป็นการเร่งและหน่วงความเร็วที่สอดคล้องกับลักษณะแรงบิดไดนามิกของมอเตอร์ จากรูปที่ 4.3 คือ ความสามารถในการเร่งและหน่วงความเร็วของมอเตอร์ เรียกว่า โปรไฟล์ความเร็ว (Velocity profile)



รูปที่ 4.5 แสดงโปรไฟล์ความเร็วของมอเตอร์ในช่วงการเร่งและหน่วงความเร็ว

4.2 การหาความเร็วที่ป้อนในแต่ละสเกลช่วงของการเร่งความเร็ว

เมื่อเรารู้ลักษณะโปรไฟล์ความเร็วของการเร่งและหน่วงความเร็วมอเตอร์แล้ว แต่ปัญหาต่อมาคือการป้อนความเร็วในแต่ละสเกลที่ถูกต้องนั้นควรจะเป็นค่าความเร็วเท่าไรบ้างจากในช่วงระยะเวลาที่คำนวณได้ เพื่อเร่งหรือหน่วงความเร็วในช่วงความเร็วที่เราต้องการ เพื่อหาช่วงเวลาของการสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อกระตุ้นขดลวดเฟสมอเตอร์ โดยเราจะอาศัยความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่เชิงเส้นในการแก้ปัญหาตรงจุดนี้ ซึ่งจากความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่โดยทั่วไป ความเร็วและระยะทางการเคลื่อนที่ที่มีความสัมพันธ์กันดังสมการข้างล่างนี้

$$x = \int_0^t v dt \quad (4.22)$$

x = ระยะทาง (เมตร)

v = ความเร็ว (เมตรต่อวินาที)

t = เวลาในการเคลื่อนที่(วินาที)

จากสมการการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เราสามารถแก้สมการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลาได้เมื่อสมการการเคลื่อนที่เป็นดังนี้

$$T_m = T_l + D\omega + J \frac{d\omega}{dt} \quad (4.23)$$

หรือเขียนในรูปของความเร่ง(สเกลต่อวินาที)

$$T_m = T_l + D\theta_s f + J\theta_s \frac{df}{dt} \quad (4.24)$$

แทนสมการแรงบิดของมอเตอร์ด้วยสมการที่เรากำหนดขึ้น โดยดูว่าความเร็วที่เราต้องการให้มอเตอร์วิ่งอยู่สมการไหนของสมการที่เรากำหนดแทนแรงบิด แล้วนำสมการในช่วงนั้นมาใช้ในการคำนวณเช่นสมการข้างล่างนี้

$$T_m = T_{mo} - \alpha f$$

กำหนดให้ $D=0$ ดังนั้นจะได้

$$J\theta_s \frac{df}{dt} = -\alpha f + T_{mo} - T_l \quad (4.25)$$

$$J\theta_s \frac{df}{dt} = -\alpha f - (T_l - T_{mo}) \quad (4.26)$$

แก้สมการดิฟเฟอเรนเชียลข้างบนจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลา โดยอาศัยการแก้สมการดิฟเฟอเรนเชียลสมการที่ (4.27)

$$m \frac{dv}{dt} = -kv - b \quad (4.27)$$

เมื่อแก้สมการแล้วจะได้คำตอบ [9] ดังสมการที่ (4.28)

$$v = ue^{-\lambda t} - \frac{b}{\lambda m} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (4.28)$$

$$u = v(t_0) = v(0) = \text{ความเร็วที่เวลาเริ่มต้น } t=0$$

โดย

$$\lambda = \frac{k}{m}$$

จัดรูปสมการที่ (4.26) ให้เหมือนสมการที่ (4.27) โดยกำหนดตัวแปรต่างๆดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m = J\theta_s$$

$$k = \alpha$$

$$b = (T_l - T_{mo})$$

$$\lambda = \frac{\alpha}{J\theta_s}$$

$$u = g$$

ดังนั้นจะได้คำตอบของสมการที่ (4.26) เป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาดังสมการที่(4.29)

$$f = g \exp\left(-\frac{\alpha t}{J\theta_s}\right) - \left(\frac{T_l - T_{mo}}{\alpha}\right) \left(\frac{J\theta_s}{J\theta_s}\right) * \left(1 - \exp\left(-\frac{\alpha t}{J\theta_s}\right)\right) \quad (4.29)$$

ทำการอินทิเกรตสมการ(4.29) โดยอาศัยความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.22) จะทำให้รู้จำนวนสเตปที่ใช้ในช่วงเวลาระหว่างการเร่งความเร็วดังสมการที่ (4.30)

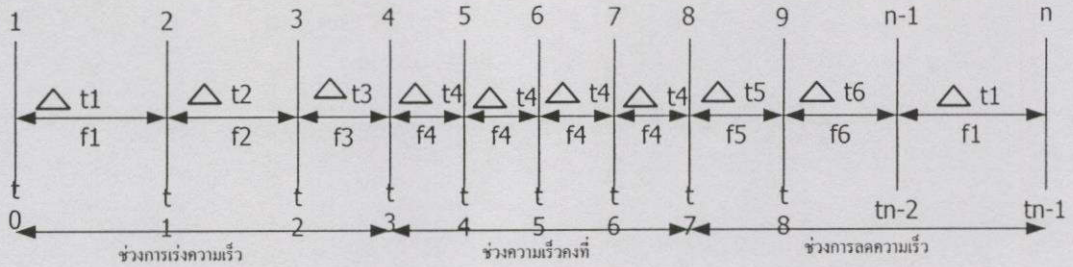
$$\int f dt = x = \frac{J\theta_s}{\alpha} \left(g + \left(\frac{T_l - T_{mo}}{\alpha}\right) \left(\frac{J\theta_s}{J\theta_s}\right) * \left(1 - \exp\left(-\frac{\alpha t}{J\theta_s}\right)\right) - \left(\frac{T_l - T_{mo}}{\alpha}\right) \left(\frac{J\theta_s}{J\theta_s}\right) t \right) \quad (4.30)$$

$$x = \left(\frac{T_{mo} - T_l}{\alpha}\right) t + \left(g - \left(\frac{T_{mo} - T_l}{\alpha}\right) \right) * \left(\frac{J\theta_s}{\alpha}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{\alpha t}{J\theta_s}\right)\right) \quad (4.31)$$

x = จำนวนสเตปที่ใช้ระหว่างการเร่งความเร็วจากความเร็ว f_1 ถึง f_2 ในช่วงเวลา t วินาที

สมการที่ (4.31) แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาที่มอเตอร์เคลื่อนที่ในแต่ละสเตป โดยสามารถหาความเร็วที่มอเตอร์เคลื่อนที่หรือช่วงเวลาในการสวิทช์เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ในการกระตุ้นให้มอเตอร์เคลื่อนที่ในแต่ละสเตปดังนี้

จากลักษณะของการป้อนสัญญาณพัลส์กระตุ้นมอเตอร์ในแต่ละสเตป จะมีความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาในการสวิทช์และจำนวนสเตปที่เคลื่อนที่ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะการป้อนสัญญาณพัลส์ในแต่ละช่วงเวลาในการสวิทช์และสเตปที่เคลื่อนที่

จากรูปที่ 4.6 เราสามารถหาค่า g ในสมการที่ (4.31) ได้ โดยกำหนดให้

$$x = 1$$

ดังนั้นจะได้เวลาในการเคลื่อนที่สเตปแรกเป็น

$$t = \frac{1}{f_1} \tag{4.32}$$

f_1 = ความเร็วในการเริ่มหมุนที่อยู่ในช่วงแรงบิดพลูอิน (Pull-in torque)

แทนเวลาจากสมการที่ (4.32) ของการเคลื่อนที่ในสเตปแรก และ $x=1$ ลงในสมการที่ (4.31) จะได้

$$g = \frac{1 - \left(\frac{T_{mo} - T_l}{\alpha f_1} \right)}{\left(1 - \exp \frac{-\alpha t}{J\theta_s} \right)} \left(\frac{\alpha}{J\theta_s} \right) + \left(\frac{T_{mo} - T_l}{\alpha} \right) \tag{4.33}$$

ทำการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างสเตปต่อไปที่เคลื่อนที่กับเวลาในแต่ละสเตปที่เคลื่อนที่ โดยเขียนโปรแกรมให้คอมพิวเตอร์คำนวณทางตัวเลขแก้สมการที่ (4.31) เพื่อหาเวลาในแต่ละสเตปที่เคลื่อนที่ โดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการ (4.34)

$$x(t_x) - x = 0; x = 1, \dots, m \tag{4.34}$$

$$t_0 = 0$$

X = สเตปในการเคลื่อนที่

$X=1, 2, 3, \dots, m$

m = จำนวนสเตปทั้งหมดที่ใช้ระหว่างการเร่งความเร็วจาก f_1 ถึง f_2

ดังนั้นช่วงเวลาของการสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อป้อนแก่สเตปปิ้งมอเตอร์ในแต่ละสเตปช่วงการเร่งคือ

$$\Delta t_x = t_x - t_{x-1} \quad (4.35)$$

ดังนั้นความเร็วที่ป้อนในแต่ละสเตป คือ

$$f_x = \frac{1}{\Delta t_x} \quad (4.36)$$

f_x คือ ความเร็วที่ป้อนให้สเตปปิ้งมอเตอร์ในแต่ละสเตปเพื่อเร่งมอเตอร์จากความเร็ว f_1 ถึง f_2

4.3 การหาความเร็วที่ป้อนในแต่ละสเตปของช่วงการหน่วงความเร็ว

เนื่องจากการหน่วงความเร็วแรงบิดของมอเตอร์จะต้องถูกกระตุ้นในช่วงที่แรงบิดเป็นลบ มอเตอร์จึงจะสามารถหน่วงความเร็วลงได้ ดังนั้นในการคำนวณสมการการเคลื่อนที่สำหรับการหาความเร็วที่ป้อนในแต่ละสเตปช่วงการหน่วงความเร็วของมอเตอร์ที่ค่าแรงบิดโหลดค่าหนึ่งดังสมการต่อไปนี้

$$-T_b(f) = T_l(f) + J\theta_s \frac{df}{dt} \quad (4.37)$$

$$-T_b(f) - T_l(f) = J\theta_s \frac{df}{dt} \quad (4.38)$$

เมื่อแทน

$$T_b(f) = T_{mo} - \alpha f$$

จะได้สมการเป็น

$$J\theta_s \frac{df}{dt} = -T_{mo} + \alpha f - T_l(f) \quad (4.39)$$

$$J\theta_s \frac{df}{dt} = -(-\alpha f) - (T_{mo} + T_l(f)) \quad (4.40)$$

จากการแก้สมการดิฟเฟอเรนเชียลเหมือนในช่วงการเร่ง จะได้คำตอบเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาดังสมการต่อไปนี้

$$f_d = g \exp\left(\frac{\alpha t}{J\theta_s}\right) + \left(\frac{T_{mo} + T_l}{\alpha}\right) \left(1 - \exp\left(\frac{\alpha t}{J\theta_s}\right)\right) \quad (4.41)$$

จากนั้นทำการอินทิเกรตสมการ(4.41) จะได้จำนวนสเตปที่ใช้ในการหน่วงความเร็วดังสมการที่ (4.42)

$$x_d = \left(\frac{T_{mo} + T_l}{\alpha}\right) t - \left(\frac{J\theta_s}{\alpha}\right) * \left(g_d - \left(\frac{T_{mo} + T_l}{\alpha}\right)\right) \left(1 - \exp\left(\frac{\alpha t}{J\theta_s}\right)\right) \quad (4.42)$$

x_d = จำนวนสเตปในการหน่วงความเร็ว

หาค่าความเร็วเริ่มต้นของการหน่วงความเร็ว g_d โดยการแทน $x = 1$ และ แทน $t = 1/f_2$ จะได้ดังสมการที่(4.43)

$$g_d = \frac{\left(1 - \left(\frac{T_{mo} + T_l}{\alpha f_2}\right)\right) \left(\frac{-\alpha}{J\theta_s}\right)}{\left(1 - \exp\left(\frac{\alpha}{J\theta_s f_2}\right)\right)} + \left(\frac{T_{mo} + T_l}{\alpha}\right) \quad (4.43)$$

จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างสเตปที่เคลื่อนที่ในช่วงการหน่วงความเร็วกับเวลาที่เคลื่อนที่แต่ละสเตปของช่วงเวลาในการหน่วงความเร็ว โดยการคำนวณทางตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์จะใช้สมการที่ (4.42) โดยอาศัยความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.44)

$$x_d(t_d) - d = 0; d = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4.44)$$

x_d = สเตปในการหน่วงความเร็ว

d = เลขจำนวนเต็ม = 1, 2, 3,n

n = จำนวนสเตปทั้งหมดในการหน่วงความเร็ว

ให้
ดังนั้น

$$f_{slew} = f_2$$

$$t_o = \frac{1}{f_{slew}} \quad (4.45)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

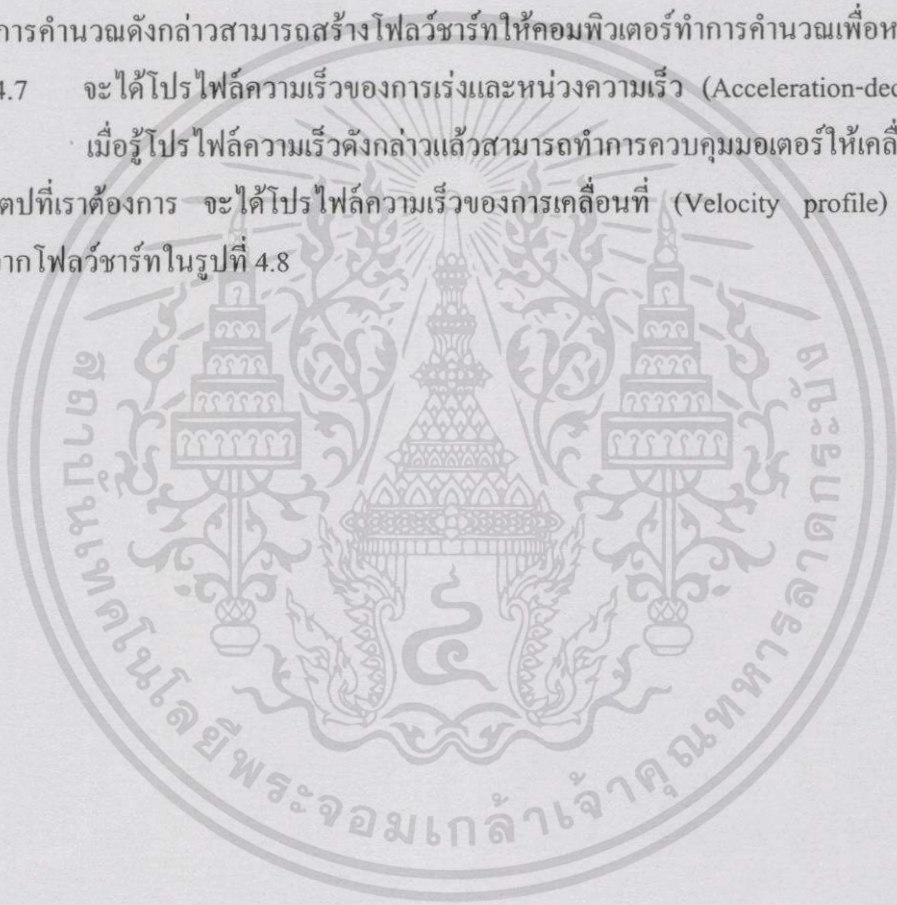
จากนั้นหาช่วงเวลาการสร้างสัญญาณพัลส์ดังสมการที่ (4.46)

$$\Delta t_d = t_d - t_{d-1} \quad (4.46)$$

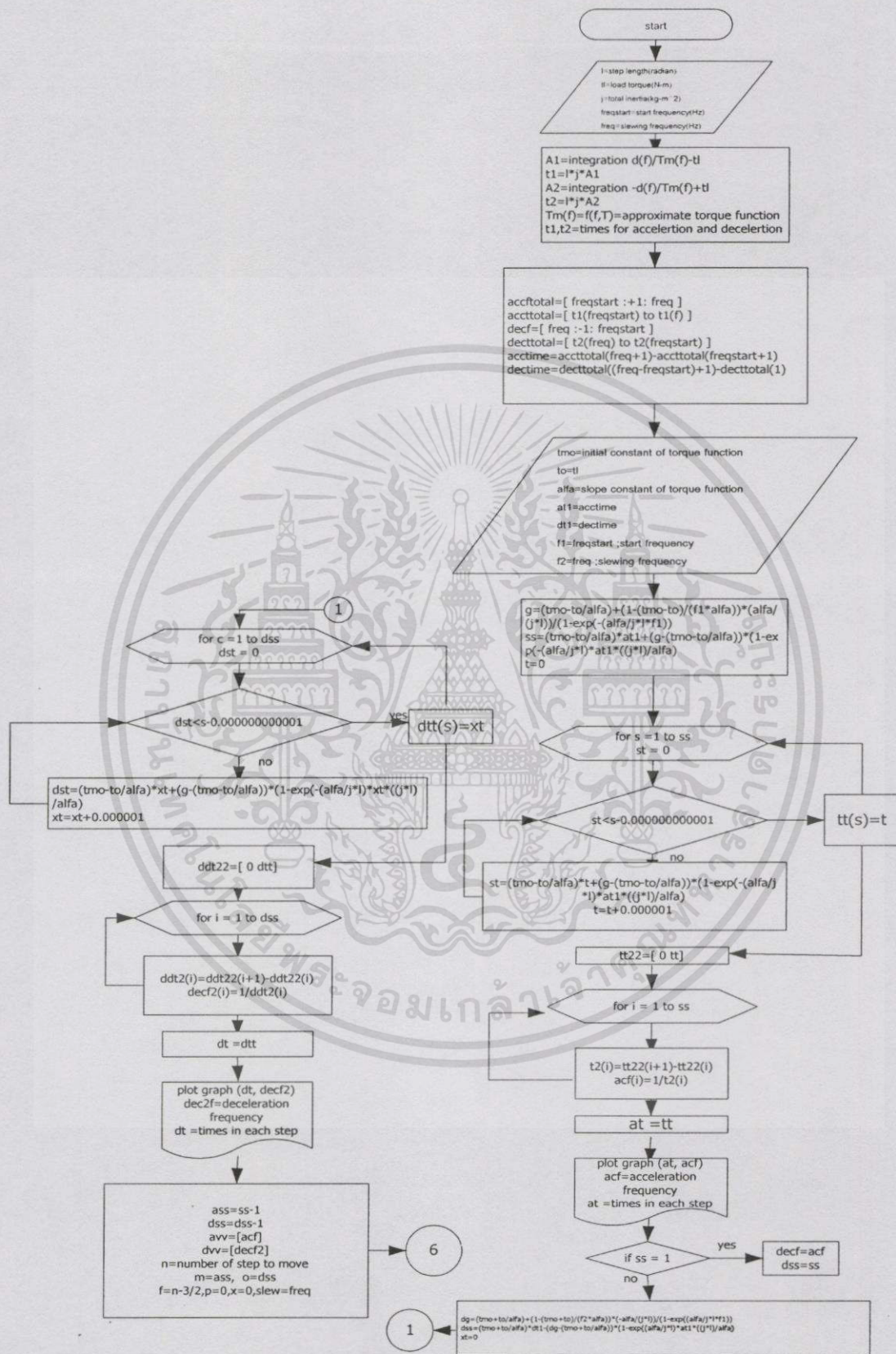
หรือความเร็วในการป้อนแต่ละสเตปคือ

$$f_d = \frac{1}{\Delta t_d} \quad (4.47)$$

จากการคำนวณดังกล่าวสามารถสร้างโฟลว์ชาร์ทให้คอมพิวเตอร์ทำการคำนวณเพื่อหาค่าต่างๆ ดังรูปที่ 4.7 จะได้โปรไฟล์ความเร็วของการเร่งและหน่วงความเร็ว (Acceleration-deceleration profile) เมื่อรู้โปรไฟล์ความเร็วดังกล่าวแล้วสามารถทำการควบคุมมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ตามจำนวนสเตปที่เราต้องการ จะได้โปรไฟล์ความเร็วของการเคลื่อนที่ (Velocity profile) โดยพิจารณาจากโฟลว์ชาร์ทในรูปที่ 4.8

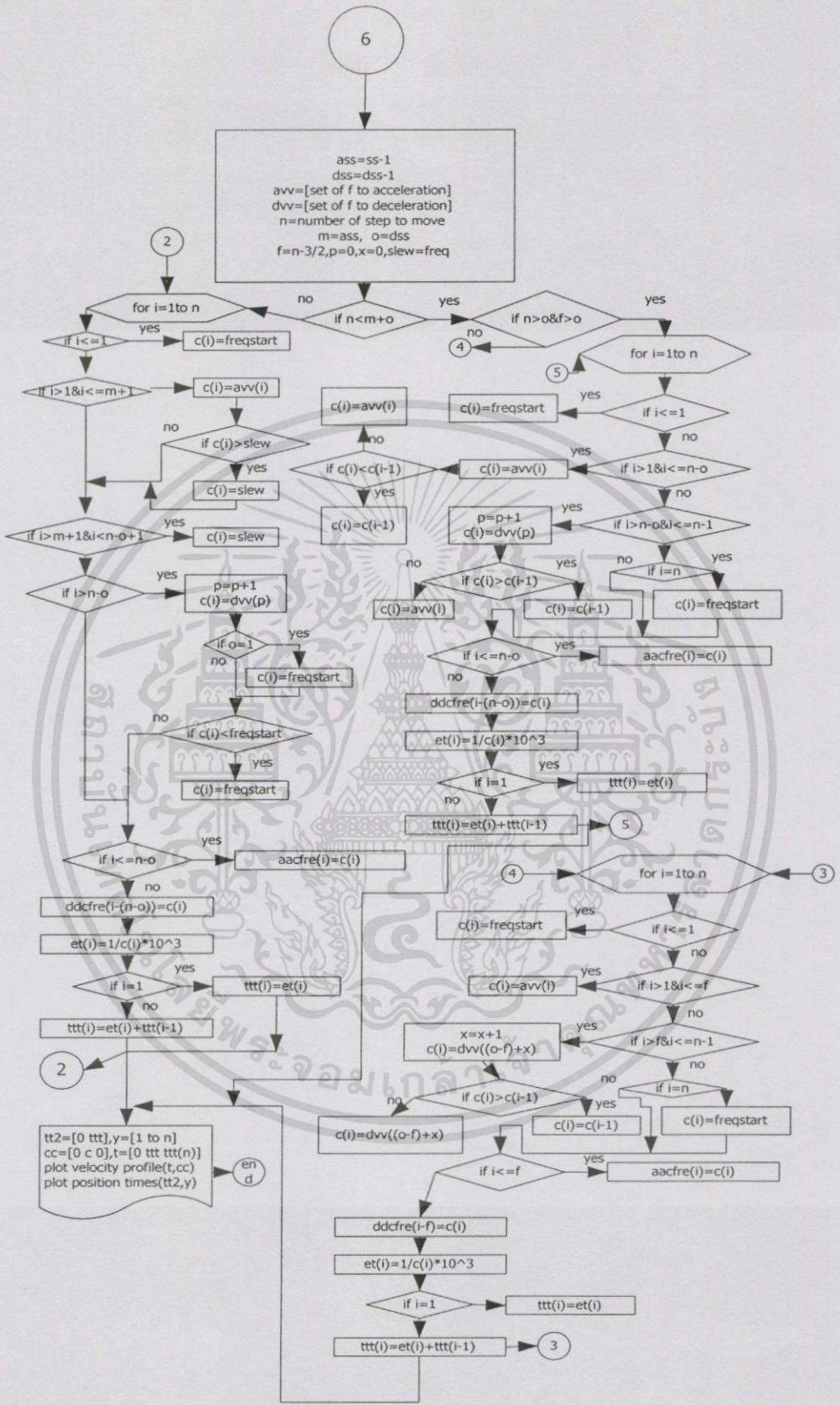


4.4 โพลีชาร์ทการสร้างโปรไฟล์ความเร็ว



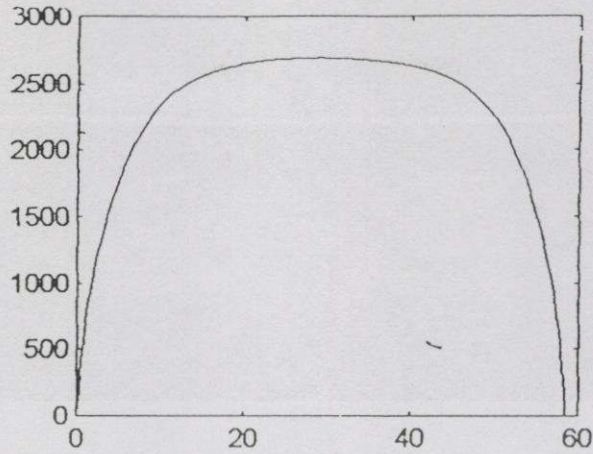
รูปที่ 4.7 แสดงโพลีชาร์ทการคำนวณหาโปรไฟล์ของการเร่งและหน่วงความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

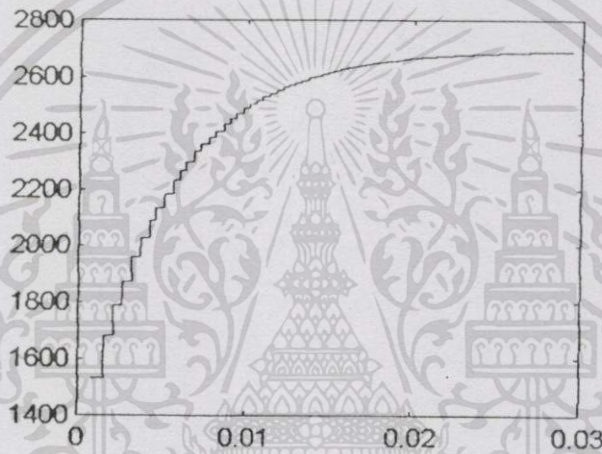


รูปที่ 4.8 แสดงโพล์ชาร์ทการเขียนโปรแกรมการหาโปรไฟล์ความเร็วตามจำนวนสเตปที่ต้องการให้เคลื่อนที่โดยหาต่อจากโพล์ชาร์ทในรูปที่ 4.7

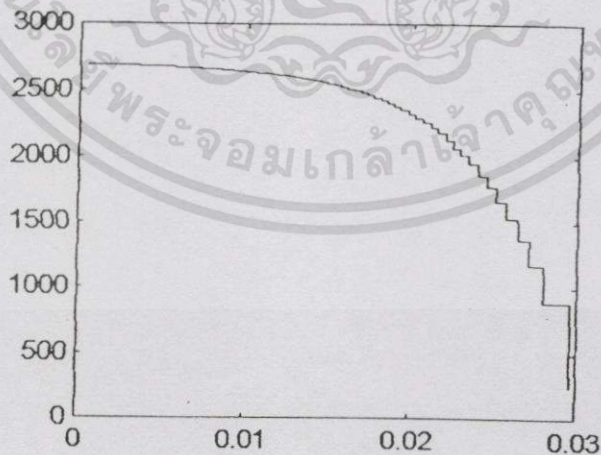
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.



ข.



ค.

รูปที่ 4.9 แสดงรูปตัวอย่างของการหาความเร็วที่ป้อนแต่ละสเตปในช่วงการเร่งและหน่วงความเร็ว

ก. โพรไฟล์ความเร็วของการเร่งและหน่วงความเร็ว ข. ความเร็วที่ป้อนในแต่ละสเตปของ

การเร่งความเร็ว ค. ความเร็วที่ป้อนในแต่ละสเตปของการหน่วงความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองการควบคุมและผลการทดลอง

5.1 รายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย

รายละเอียดของสเตปป์มอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

ความยาวสเตป 1.8 องศา

แรงดันต่อเฟส 60 โวลต์

กระแสเฉลี่ยต่อเฟส 0.5 แอมป์

ค่าความต้านทานขดลวดต่อเฟส 120 โอห์ม

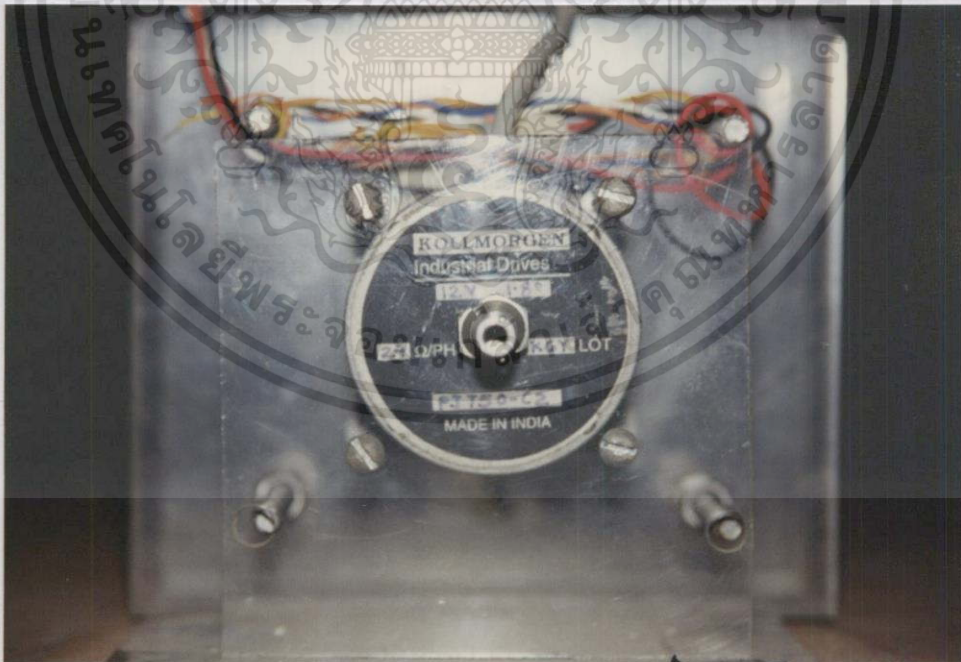
ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดต่อเฟส 19.5 มิลลิเฮนรี

ค่าความเฉื่อยของโรเตอร์ 56.4×10^{-2} ออนซ์-นิ้ว²

เมื่อต้องการให้มอเตอร์เคลื่อนที่จำนวน 256 สเตป

วงจรขับเป็นแบบยูนิโพลาร์ 4 เฟส

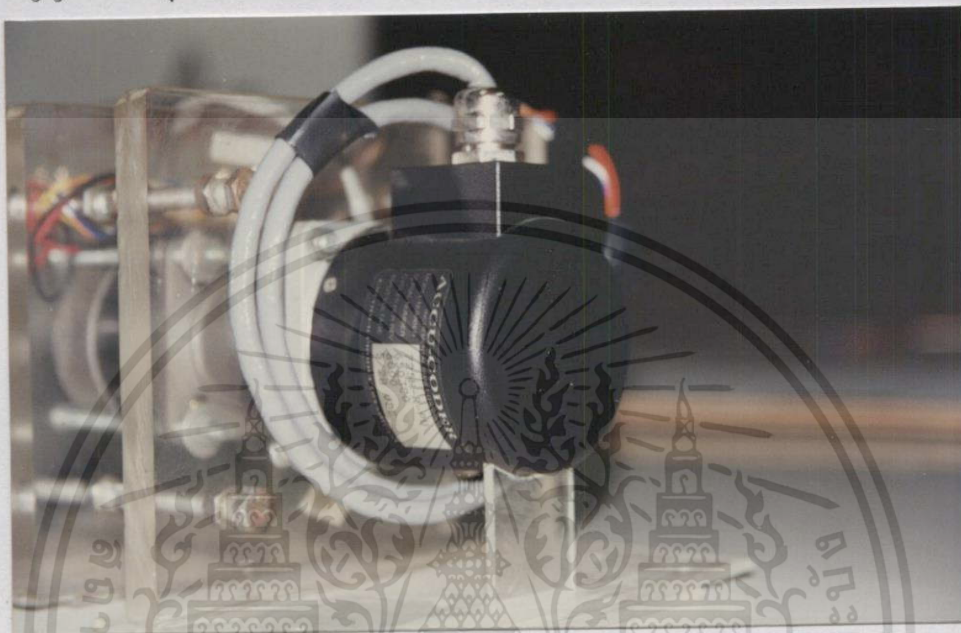
มอเตอร์เป็นประเภทไฮบริดจ์ 4 เฟส



รูปที่ 5.1 แสดงรูปสเตปป์มอเตอร์ประเภทไฮบริดจ์ 4 เฟสที่ใช้ในการทดลอง

รายละเอียดของเอนโค้ดเดอร์

ค่าความเฉื่อยของเอนโค้ดเดอร์ 5.2×10^{-4} ออนซ์-นิ้ว-วินาที²
 แรงบิดเสียด (frictional torque) ของเอนโค้ดเดอร์ 1.0 ออนซ์-นิ้ว
 จำนวนพัลส์ต่อรอบ 6000 ต่อรอบ
 สัญญาณเอาต์พุตเป็น 3 ช่อง



รูปที่ 5.2 แสดงรูปเอนโค้ดเดอร์ที่ใช้ในการทดลอง

รายละเอียดของภาระ โหลดที่ใช้ในการวิจัยได้กำหนดเป็นอินเนอร์เซียโหลด อินเนอร์เซีย
 โหลดที่ 200 กรัม และ 400 กรัมแสดงได้ดังรูปที่ 5.3

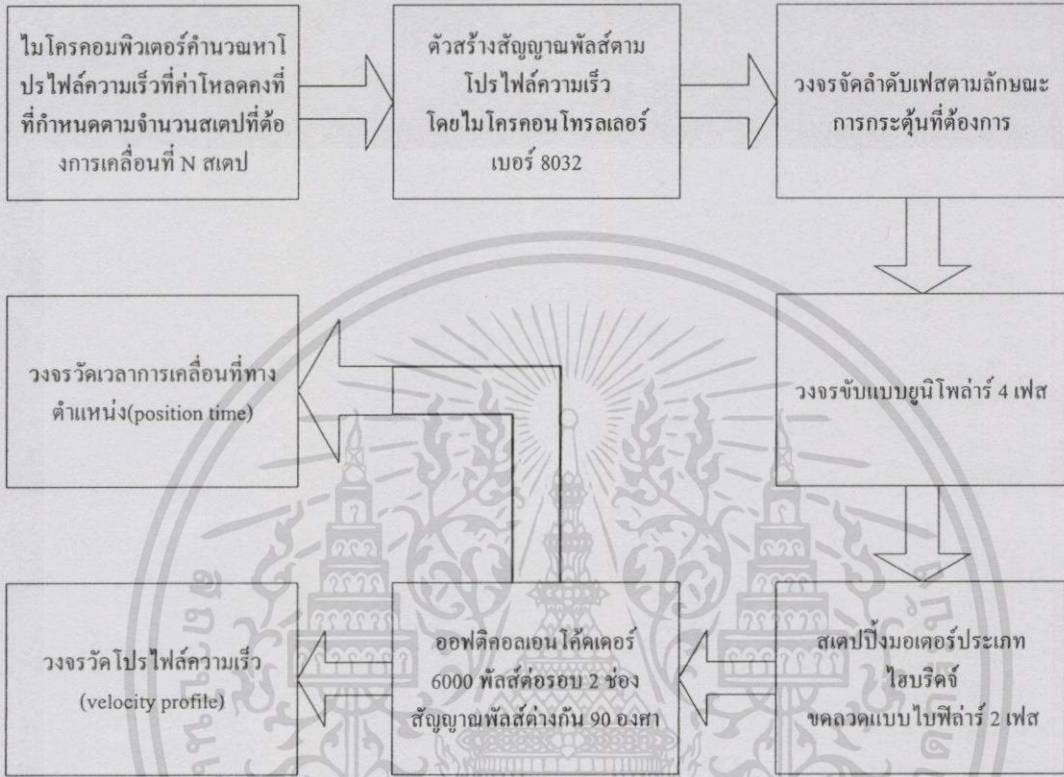


รูปที่ 5.3 แสดงอินเนอร์เซียโหลด 200 กรัม และ 400 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 วิธีการควบคุมสเตรปิ้งมอเตอร์แบบวงเปิด

การควบคุมการทำงานของสเตรปิ้งมอเตอร์แบบวงเปิดด้วยเทคนิคโปรไฟล์ความเร็วแสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมการทำงานของสเตรปิ้งมอเตอร์แบบวงเปิดด้วยเทคนิคโปรไฟล์ความเร็ว(วงจรจับเป็นของบริษัท KOLLMORGEN ขนาดแรงดัน 35 โวลต์ ความถี่สูงสุดในการตอบสนองต่อสัญญาณพัลส์ 25 กิโลเฮิร์ต)

5.2.1 รายละเอียดของตัวพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณของระบบ

การควบคุมการทำงานของสเตรปิ้งมอเตอร์ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการออกแบบควบคุมระบบเปิดเพื่อทดสอบการทำงานของมอเตอร์ตามลักษณะของโปรไฟล์ความเร็วที่ได้คำนวณไว้เมื่อกำหนดภาระโหลดคงที่ ซึ่งมีรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ใช้ในระบบดังนี้

จากสมการการเคลื่อนที่ของมอเตอร์

$$T_m = J\theta_s \frac{df}{dt} + D\theta_s f + T_l \quad (5.1)$$

T_m = แรงบิดมอเตอร์โดยการแทนเป็นสมการเชิงเส้น (นิวตัน-เมตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = \text{สัมประสิทธิ์การหน่วงแบบเหลว} = 0$$

$$\theta_s = \text{ขนาดมุมสเตป} = 1.8 \text{ องศา} = 0.031416 \text{ เรเดียน}$$

$$f = \text{ความเร็วมอเตอร์ (สเตปต่อวินาที)}$$

$$T_f = \text{แรงบิดเสียดทานโหลดคงที่ (นิวตัน-เมตร)}$$

ซึ่งในระบบนี้จะเป็นแรงเสียดทานจากเอนโค้ดเดอร์มีค่าเท่ากับ $1 \text{ Oz-in}/141.612 = 0.00706 \text{ N-m}$

$$J = \text{ความเฉื่อยรวมของระบบ กิโลกรัม-เมตร}^2$$

ประกอบด้วยความเฉื่อยของโรเตอร์มอเตอร์, ความเฉื่อยของแกนเอ็นโค้ดเดอร์, ความเฉื่อยโหลดมีค่าต่างๆดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความเฉื่อยของโรเตอร์มอเตอร์จากคู่มือ} &= 56.4 \times 10^{-2} \text{ Oz-in}^2 \\ &= 56.4 \times 10^{-2} / 386 \text{ Oz-in-sec}^2 \\ &= 56.4 \times 10^{-2} / (386 \times 141.612) \text{ Kg-m}^2 \\ &= 1.031 \times 10^{-5} \text{ Kg-m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ความเฉื่อยของแกนเอ็นโค้ดเดอร์จากคู่มือ} &= 5.2 \times 10^{-4} \text{ Oz-in-sec}^2 \\ &= 5.2 \times 10^{-4} / 141.612 \text{ Kg-m}^2 \\ &= 3.672 \times 10^{-6} \text{ Kg-m}^2 \end{aligned}$$

ความเฉื่อยโหลดเมื่อมีการกำหนด ที่ 200 กรัม และ 400 กรัม รัศมี 2.4 และ 3 เซ็นติเมตร ตามลำดับจากสมการการคำนวณความเฉื่อยของวัตถุแบบทรงกระบอกตัน ดังสมการที่ 5.2

$$\begin{aligned} \text{ความเฉื่อย } J &= \frac{WR^2}{2} \text{ ปอนด์-นิ้ว}^2 & (5.2) \\ &= 0.0013 WR^2 \text{ ปอนด์-นิ้ว-วินาที}^2 \end{aligned}$$

โดย

$$1 \text{ กิโลกรัม} = 1000 \text{ กรัม} = 2.204 \text{ ปอนด์}$$

$$1 \text{ เมตร} = 100 \text{ เซ็นติเมตร} = 39.3707 \text{ นิ้ว}$$

$$8.85073 \text{ ปอนด์-นิ้ว-วินาที}^2 = 1 \text{ กิโลกรัม-เมตร}^2$$

ดังนั้น

$$\text{ความเฉื่อยโหลด} = J = \frac{WR^2}{2} = \frac{W \cdot 2.204}{1000} \times \frac{R^2 \cdot 39.3707^2}{10000} \times 0.0013 & (5.3)$$

$$= 5.02 \times 10^{-8} WR^2 \text{ Kg-m}^2 \quad (5.4)$$

ดังนั้น

$$\text{ความเฉื่อยรวมของระบบ} = 1.031 \times 10^{-5} + 3.672 \times 10^{-6} + 5.02 \times 10^{-8} WR^2 \text{ Kg-m}^2 \quad (5.5)$$

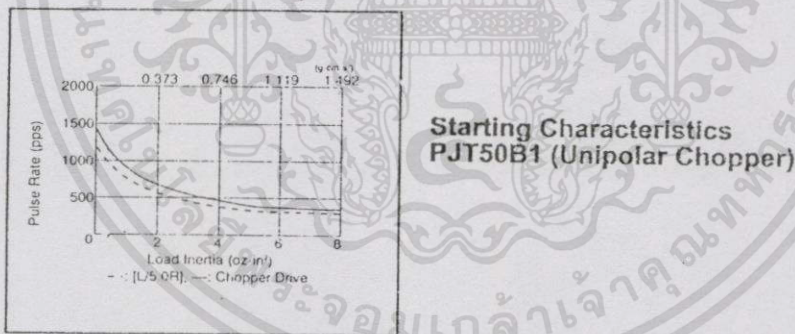
W = น้ำหนักความเฉื่อยโหลด (กรัม) โดยกำหนด = 200 และ 400 กรัม

R = รัศมีความเฉื่อยโหลด (เซ็นติเมตร) โดยการวัด = 2.4 และ 3 เซ็นติเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 แสดงความเฉื่อยโหลดที่หน่วยต่างๆ

ขนาดความเฉื่อยโหลด(กรัม)	ความเฉื่อยรวมระบบ(กิโลกรัม-เมตร ²)	ความเฉื่อยรวมระบบ(ออนซ์-นิ้ว ²)
0	0.000013982	0.764287
200	0.0000718124	3.92543
400	0.000194702	10.6428

จากข้อมูลของมอเตอร์จากบริษัทผู้ผลิตที่แสดงในรูปที่ 5.5 ซึ่งแสดงค่าความเฉื่อยกับความเร็วในการเริ่มหมุนทำให้เรารู้ความเร็วในการเริ่มหมุนของมอเตอร์ ดังตารางที่ 5.2 นี้



รูปที่ 5.5 แสดงกราฟระหว่างความสามารถความเร็วเริ่มหมุนและความเฉื่อยของระบบ

ตารางที่ 5.2 แสดงความเร็วเริ่มหมุนของมอเตอร์

ขนาดความเฉื่อยโหลด(กรัม)	ความเร็วเริ่มหมุน(สเตปต่อวินาที)
0	800
200	350
400	300

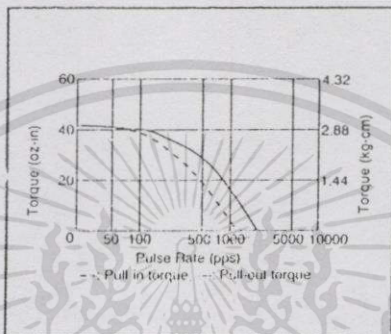
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟแสดงลักษณะแรงบิดไดนามิกของมอเตอร์จากบริษัทผู้ผลิตที่ประกอบด้วยแรงบิดพลูอิน และแรงบิดพลูเออร์ที่แสดงในรูปที่ 5.6 เราจะประมาณสมการขึ้นแทนความสัมพันธ์แรงบิดพลูเออร์ กับความเร็วดังแสดงในรูปที่ 5.7 ซึ่งจะแบ่งความเร็วเป็น 2 ช่วง คือ

ช่วงที่ 1 จากความเร็ว 0 ถึง 200 สเตปต่อวินาที

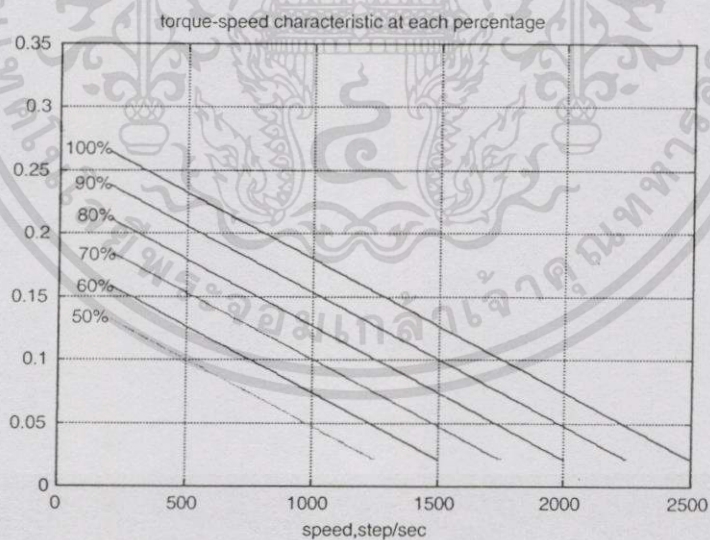
ช่วงที่ 2 ที่ ความเร็ว 200 สเตปต่อวินาที ถึง ความเร็วมากที่สุดที่มอเตอร์หมุนได้ของขนาด เพอร์เซ็นต์ต่างๆของแรงบิดจริงจากกราฟของบริษัทผู้ผลิต

PJT50B1 (L/5.0R)



รูปที่ 5.6 แสดงกราฟแรงบิด ไดนามิกกับความเร็วจากบริษัทผู้ผลิต

นิวตัน-เมตร



ความเร็ว(สเตปต่อวินาที)

รูปที่ 5.7 แสดงกราฟจากการประมาณสมการแทนลักษณะแรงบิดพลูเออร์ที่ของมอเตอร์จากบริษัทผู้ผลิต โดยกำหนดสมการที่ขนาดเพอร์เซ็นต์ต่างๆของแรงบิด 100 เพอร์เซ็นต์

สมการแทนลักษณะของกราฟแรงบิดพลูเอท์กับความเร็วที่ขนาดเปอร์เซ็นต์ต่างๆของแรงบิดสูงสุดจากกราฟของผู้ผลิต โดยกำหนดเป็น 2 ช่วงดังนี้

กรณี 100%. $T = 0.2648$ นิวตัน-เมตร ที่ ความเร็ว 0 to 200 Hz

$T = 0.287856 - 0.00011528 * (f)$ นิวตัน-เมตร ที่ ความเร็ว 200 to 2497 Hz

กรณี 90 %. $T = 0.23832$ นิวตัน-เมตร ที่ ความเร็ว 0 to 200 Hz

$T = 0.261376 - 0.00011528 * (f)$ นิวตัน-เมตร ที่ ความเร็ว 200 to 2267 Hz

กรณี 80 %. $T = 0.21184$ นิวตัน-เมตร ที่ ความเร็ว 0 to 200 Hz

$T = 0.234896 - 0.00011528 * (f)$ นิวตัน-เมตร ที่ ความเร็ว 200 to 2037 Hz

กรณี 70 %. $T = 0.18536$ นิวตัน-เมตร ที่ ความเร็ว 0 to 200 Hz

$T = 0.208416 - 0.00011528 * (f)$ นิวตัน-เมตร ที่ ความเร็ว 200 to 1807 Hz

กรณี 60 %. $T = 0.15888$ นิวตัน-เมตร ที่ ความเร็ว 0 to 200 Hz

$T = 0.181936 - 0.00011528 * (f)$ นิวตัน-เมตร ที่ ความเร็ว 200 to 1578 Hz

กรณี 50 %. $T = 0.1324$ นิวตัน-เมตร ที่ ความเร็ว 0 to 200 Hz

$T = 0.155456 - 0.00011528 * (f)$ นิวตัน-เมตร ที่ ความเร็ว 200 to 1348 Hz

การควบคุมสเปคปั๊มมอเตอร์ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้สมการเชิงเส้นแทนลักษณะของแรงบิดของมอเตอร์เพราะจะง่ายต่อการแก้สมการดิฟเฟอเรนเชียลของสมการการเคลื่อนที่ของมอเตอร์โดยในกรณีการควบคุมแบบวงเปิดนั้นเราจะต้องเลือกเปอร์เซ็นต์ของแรงบิดให้น้อยกว่า 100 % ของการสร้างแรงบิดจริงของมอเตอร์ เนื่องจากในขณะที่มอเตอร์กำลังเคลื่อนที่นั้นโหลดอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือระบบอาจถูกรบกวนจากสิ่งแวดล้อมภายนอก และเพื่อป้องกันไม่ให้มอเตอร์เกิดการสูญหายของสเปคระหว่างเคลื่อนที่ การเลือกเปอร์เซ็นต์ของแรงบิดที่น้อยกว่า 100 เปอร์เซ็นต์นี้เรียกว่า การเลือกช่วงที่ปลอดภัย (Safety margin) โดยกรณีศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้การเลือกค่าที่ปลอดภัยที่ 80 % โดยจะใช้สมการแทนแรงบิดที่ 80 % ของแรงบิดจริงของมอเตอร์คือ

กรณี 80 %: $T = 0.21184$ นิวตัน-เมตร ที่ ความเร็ว 0 to 200 Hz และ

$T = 0.234896 - 0.00011528 * (f)$ นิวตัน-เมตร ที่ ความเร็ว 200 to 2037 Hz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากลักษณะของแรงบิดพลูเอาท์ที่แสดงถึงความเร็วสูงสุดที่มอเตอร์สามารถหมุนได้โดยไม่เกิดการสลิปของสเตปเมื่อกำหนดโหลดคงที่ค่าหนึ่ง ดังนั้นค่าความเร็วสูงสุดที่มอเตอร์หมุนได้จะเท่ากับ 1976 สเตปต่อวินาที เมื่อกำหนดแรงบิดเสียดทานของโหลดจากเอ็นโค้ดเดอร์ในการศึกษาครั้งนี้เท่ากับ 0.00706 นิวตัน-เมตร ซึ่งจะกำหนดให้เป็นค่าคงที่ ซึ่งคำนวณได้จาก

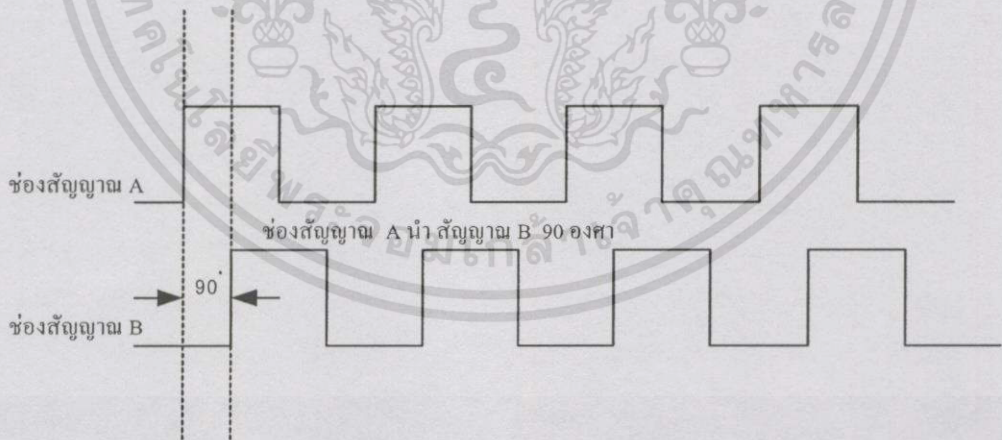
$$f = \frac{0.234896 - 0.00706}{0.00011528} = 1976 \text{ สเตปต่อวินาที} \quad (5.6)$$

นั่นคือ ความเร็วสูงสุดที่มอเตอร์ตอบสนองได้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ 1976 สเตปต่อวินาที

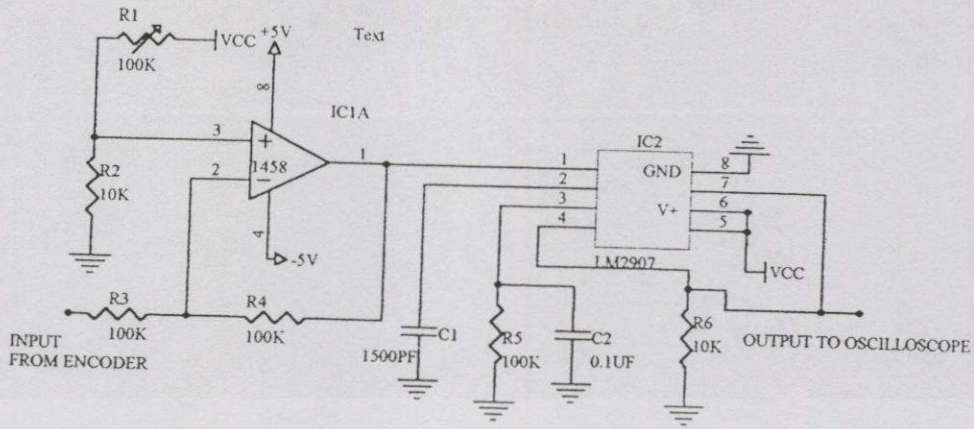
ดังนั้นเมื่อรู้ความเร็วในการเริ่มหมุนและความเร็วสูงสุดที่มอเตอร์ตอบสนอง ต่อไปเราก็จะหาโปรไฟล์ความเร็วเมื่อกำหนดอินเนอร์เซียร์โหลดต่างๆตามการคำนวณในบทที่ 4 ซึ่งจะได้ผลการคำนวณและการเคลื่อนที่จริงดังแสดงในผลการทดลองต่อไป

5.2.2 การวัดผลตอบสนองของการเคลื่อนที่ตามโปรไฟล์ความเร็ว

วงจรวัดการเคลื่อนที่ตามโปรไฟล์ความเร็วนั้นจะรับสัญญาณอินพุทจากออปติคัลเอ็นโค้ดเดอร์ซึ่งคัปปลิงอยู่กับแกนมอเตอร์ จะมีลักษณะสัญญาณเป็นพัลส์สี่เหลี่ยม 2 ช่องสัญญาณ โดยมีมุมองศาหน้ากัน (lead angle) 90 องศา แล้วนำสัญญาณนี้ 1 ช่องไปเข้าวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน (F to V converter) ลักษณะของสัญญาณเอ็นโค้ดเดอร์แสดงในรูปที่ 5.8 และวงจรแสดงดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.8 แสดงลักษณะสัญญาณจากเอ็นโค้ดเดอร์



รูปที่ 5.9 แสดงวงจรวัดผลตอบสนองตาม โพรไฟล์ความเร็วโดยใช้วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน

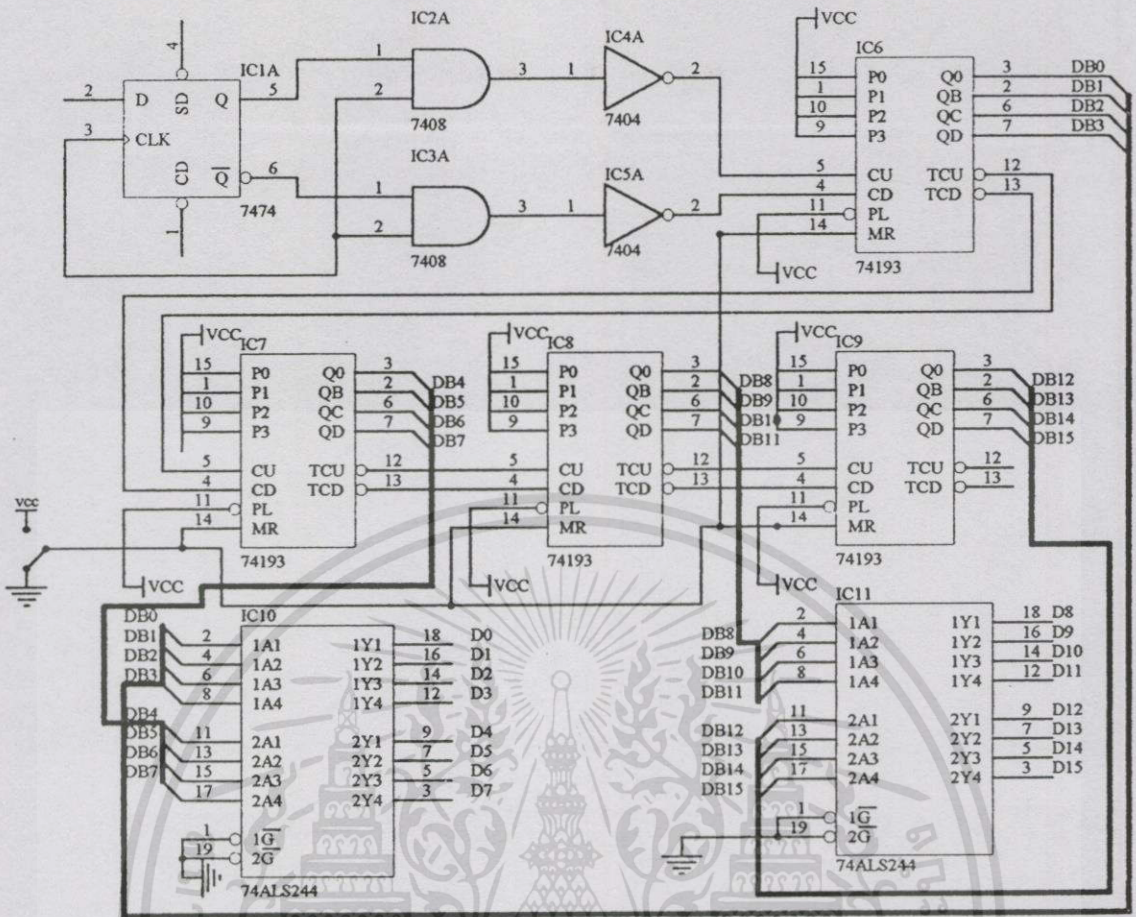
5.2.3 การวัดผลตอบสนองการเคลื่อนที่ทางตำแหน่ง

การวัดผลตอบสนองการเคลื่อนที่ทางตำแหน่งเมื่อมอเตอร์มีการเคลื่อนที่ได้ระยะทางตรงตามจำนวนพัลส์ที่ป้อนให้หรือไม่ โดยใช้วงจรวัดแสดงดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 5.10 จะใช้สัญญาณอินพุตจากเอนโคเดอร์ 2 ช่องสัญญาณ (ที่มีมุมมองต่างกัน 90 องศาเหมือนแสดงในรูปที่ 5.8) ส่งไปยังวงจรนับขึ้นนับลงขนาด 16 บิตแสดงดังรูปที่ 5.11 โดยมีไอซี ดิฟลิปฟล็อป (D - Flipflop) เป็นส่วนแยกทิศทางหมุนเพื่อทำการนับขึ้นเมื่อมอเตอร์หมุนตามเข็มนาฬิกาหรือนับลงเมื่อหมุนทวนเข็มนาฬิกาแล้วนำสัญญาณที่นับได้ไปเข้าวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (D/A converter) โดยใช้วงจรแบบ R-2R Ladder แสดงดังรูปที่ 5.12

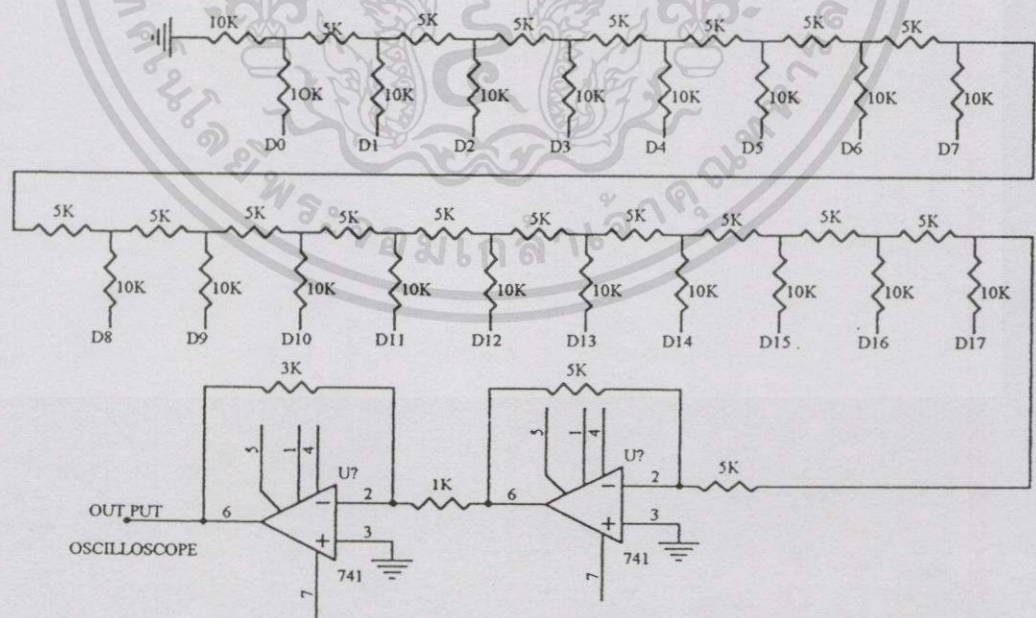


รูปที่ 5.10 แสดงบล็อกไดอะแกรมวงจรวัดผลตอบสนองการเคลื่อนที่ทางตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

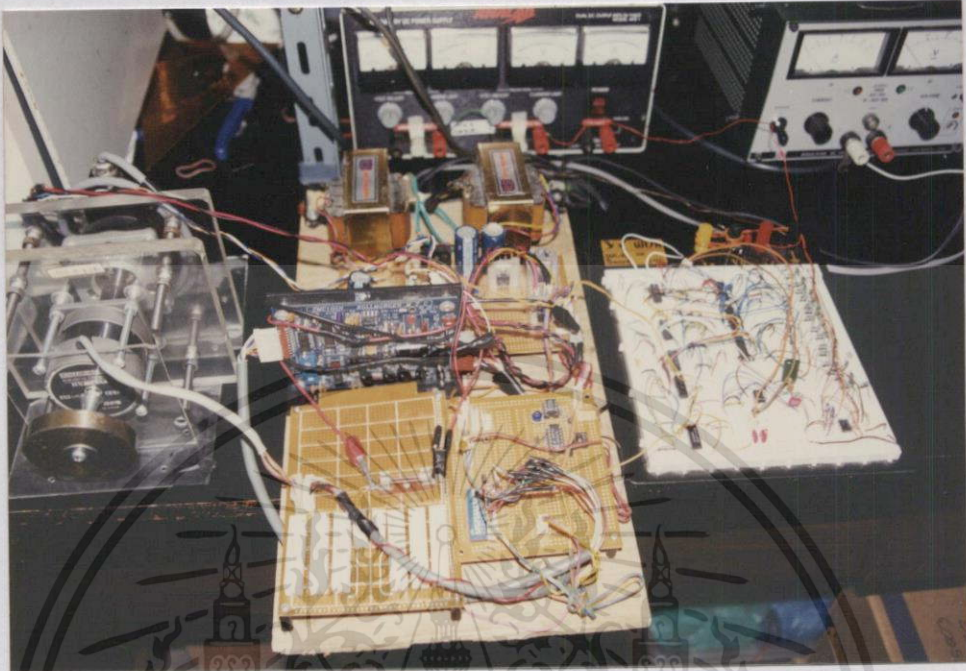


รูปที่ 5.11 วงจรนับขึ้นและนับลงขนาด 16 บิต



รูปที่ 5.12 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกแบบ R-2R Ladder

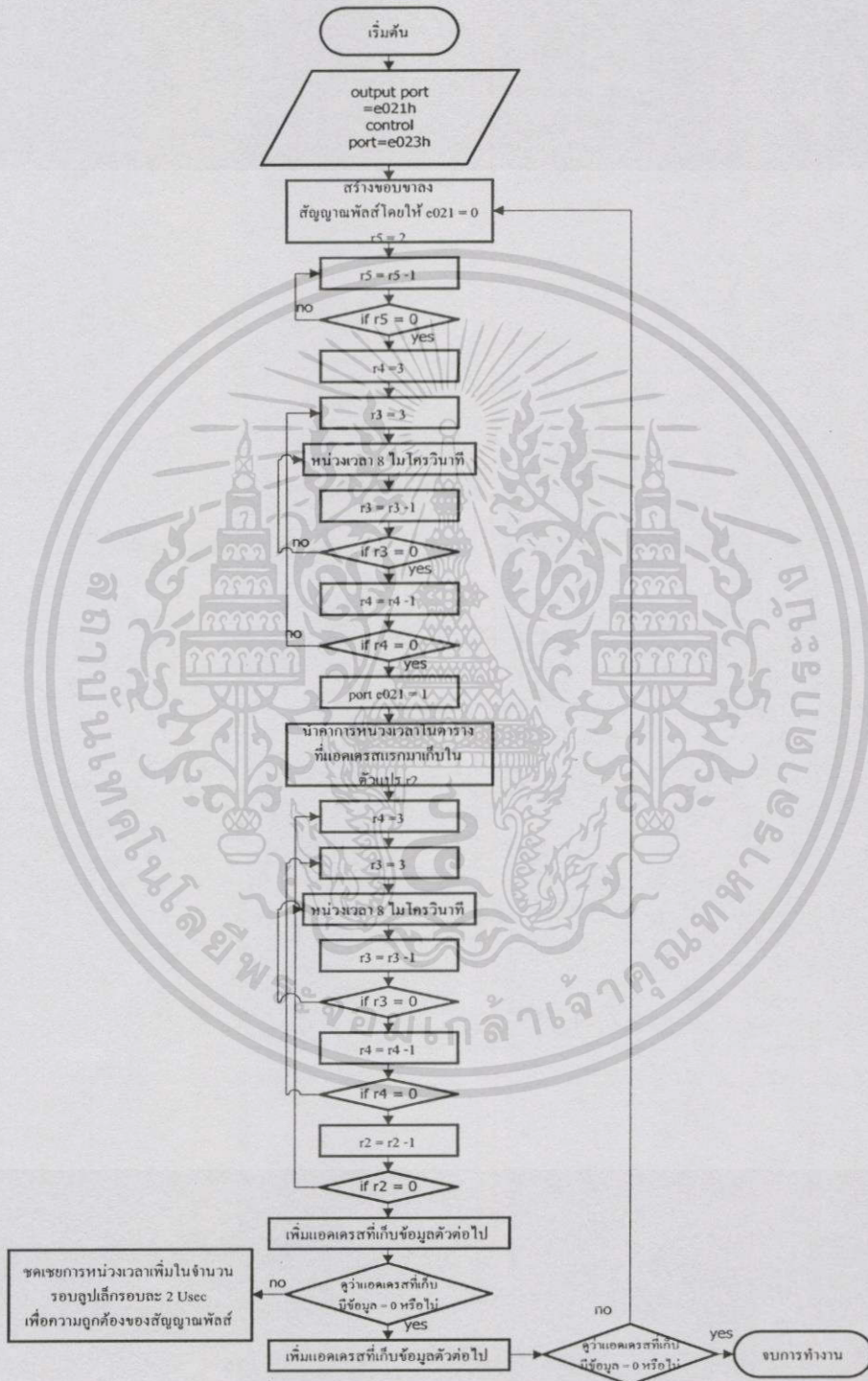
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.13 วงจร โดยรวมที่ใช้ในงานวิจัย

5.2.4 การสร้างสัญญาณพัลส์ตามความเร็วที่ต้องการ

การสร้างสัญญาณพัลส์ตามความเร็วที่ต้องการที่ได้จากการหาโปรไฟล์ความเร็วที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8032 โดยเขียนโปรแกรมตามไฟล์ชาร์ทข้างล่างนี้



รูปที่ 5.14 ไฟล์ชาร์ทการสร้างสัญญาณพัลส์ตามความเร็วโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8032

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.14 เป็นการสร้างสัญญาณพัลส์ตามความเร็วที่ต้องการ โดยการคำนวณ ดังนี้
เมื่อกำหนดให้มอเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว f สเตปต่อวินาที
ดังนั้น

$$t = \frac{1}{f} \text{ วินาที} \quad (5.7)$$

t = เวลาเพื่อการห้วงเวลาในการสร้างสัญญาณพัลส์
เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8032 ที่ใช้คริสตัลในการสร้างสัญญาณนาฬิกาด้วยความถี่
11.059 เมกกะเฮิร์ตซ์ [10]

ดังนั้น 1 แมชชีนไซเคิล (Machine cycle) ใช้คล็อก 12 ลูก จะกินเวลานาน

$$12 \times \left[\left(\frac{1}{11.059} \right) (10^6) \right] = 1.082 \text{ ไมโครวินาที} \quad (5.8)$$

ดังนั้นจะได้สมการเพื่อหาค่าตัวแปรที่ใช้ในการวนลูปเพื่อห้วงเวลาดังนี้

$$t \times 10^6 = [\text{สมการของโปรแกรมที่มีตัวแปรเพื่อการวนลูป}] \times 1.082 \text{ ไมโครวินาที} \quad (5.9)$$

$$[\text{ค่าตัวแปรเพื่อการวนลูป}] = \frac{t \times 10^6}{1.082} \times [\text{สมการของโปรแกรม}] \quad (5.10)$$

เนื่องจากค่าของตัวแปรเพื่อการวนลูปที่ได้บางค่าจะเป็นเลขทศนิยม เช่น 5.6 ซึ่งโปรแกรมจะ
ต้องทำการห้วงเวลาโดยวิ่งวนลูป 5.6 รอบ จึงจะได้ความเร็วตามที่ต้องการ แต่ในความเป็นจริง
โปรแกรมไม่สามารถวิ่งวนลูปเป็นค่าทศนิยมได้ ถ้ามีการปัดเป็นเลขจำนวนเต็มเลยจะทำให้
ความเร็วที่ได้มีค่าผิดพลาดมาก ดังนั้นจึงต้องมีการชดเชยรอบที่เป็นส่วนทศนิยมโดยเขียน
โปรแกรมแยกลูปออกมา โดยหาเวลาที่วิ่งวน 1 ลูป คูณกับทศนิยมของรอบที่เหลือ จะได้เวลาค่า
หนึ่งซึ่งเราจะต้องนำมาห้วงเวลาต่อโดยเขียนโปรแกรมการห้วงเป็นลูปที่ 2 โดยให้ขนาดของ
เวลาต่อรอบมีขนาดน้อยที่สุดประมาณ 1-2 ไมโครวินาที แล้วคำนวณหาค่าตัวแปรของการวนลูปตัว
ที่ 2 ต่อโดยคำนวณจากลูปที่มีการชดเชยนี้ โดยลูปนี้ตัวแปรที่คำนวณได้จะถูกปัดให้เป็นเลขจำนวน
เต็ม แต่จากที่อธิบายข้างต้นก็ยังทำให้ความเร็วที่ต้องการมีค่าผิดพลาดอยู่ดี โดยความเร็วที่ได้จะช้า
กว่าค่าที่เป็นจริง แต่จะมีค่าผิดพลาดน้อยลงกว่าเดิมมาก

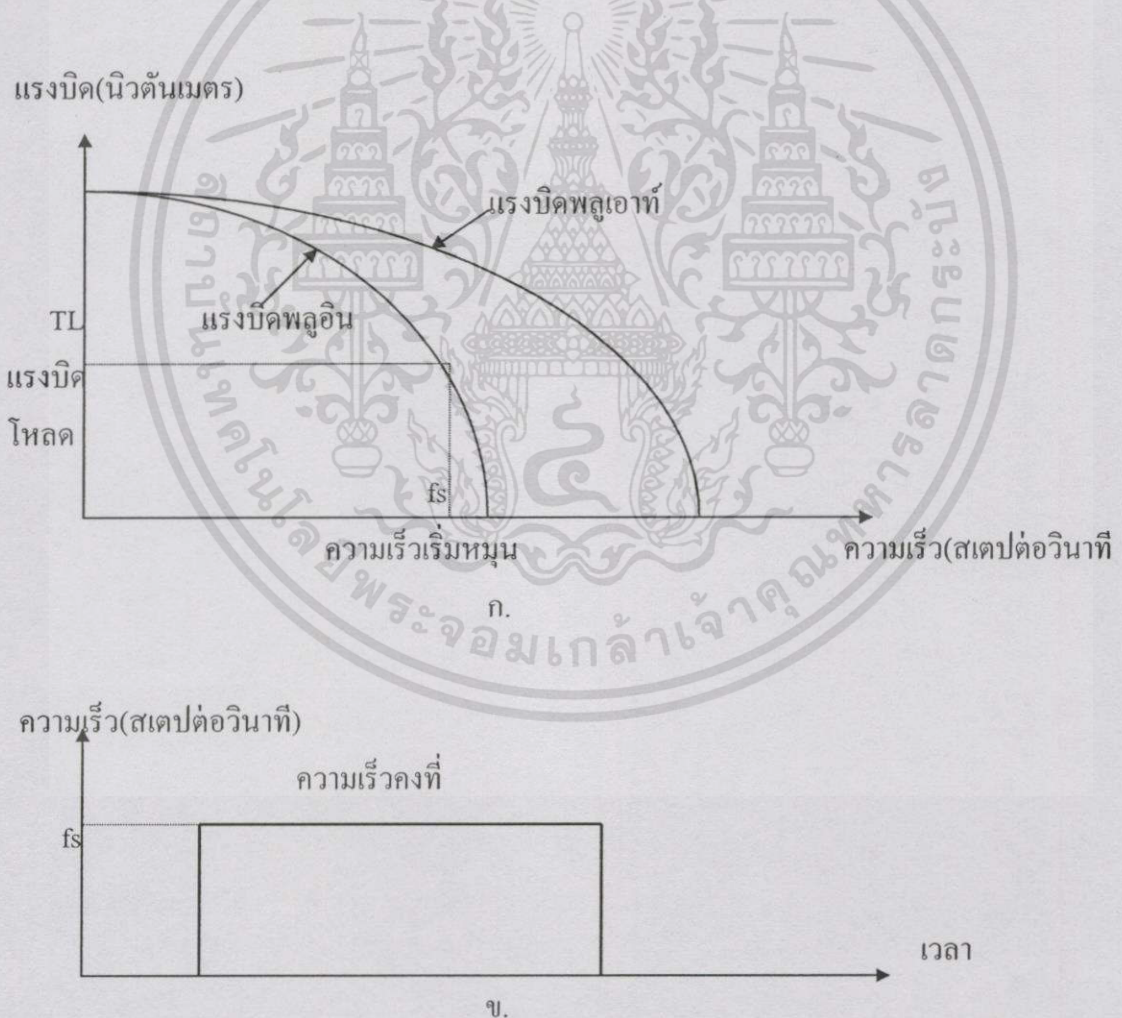
5.3 การทดลองการควบคุมสเตรปิ้งมอเตอร์แบบวงเปิด

การศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการเปรียบเทียบการควบคุมสเตรปิ้งมอเตอร์แบบวงเปิดโดยวิธีเดิม และวิธีแบบการหาโปรไฟล์ความเร็ว โดยจะพิจารณาถึงเรื่องของเวลาที่ใช้ระหว่างการเคลื่อนที่ จากตำแหน่งเริ่มต้นถึงตำแหน่งเป้าหมาย โดยกำหนดเป็นจำนวนสเตรปป์ที่ต้องการให้เคลื่อนที่[11]

5.3.1 การควบคุมแบบวงเปิดแบบเดิม

5.3.1.1 การควบคุมแบบความเร็วคงที่

เป็นการควบคุมแบบความเร็วที่ใช้ตลอดการเคลื่อนที่มีความเร็วค่าเดียว เป็นความเร็วในช่วงที่มอเตอร์สามารถเริ่มหรือหยุดหมุนและสามารถเปลี่ยนทิศทางได้ทันที เป็นความเร็วในช่วงแรงบิดพลูอิน โดยพิจารณาจากค่าแรงบิดโหดของระบบขึ้นอยู่กับค่าอินเนอร์เซียโหดที่มอเตอร์ขับเคลื่อนด้วย โดยดูจากกราฟของผู้ผลิต แต่บางครั้งเวลาใช้งานจริงอินเนอร์เซียร์ของระบบที่เราใช้กับของบริษัทที่วัดไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงต้องมีกราฟใหม่ ลักษณะของการเคลื่อนที่จะเป็นดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 แสดงการควบคุมแบบความเร็วคงที่ ก. แสดงการเลือกความเร็วเริ่มหมุน ข. โปรไฟล์ความเร็วที่มีความเร็วคงที่ f_s ตลอดการเคลื่อนที่

5.3.1.2 การควบคุมแบบการเร่งและหน่วงความเร็วเชิงเส้นโดยการหาความเร็วที่ให้เวลาในการเคลื่อนที่น้อยที่สุด

เป็นวิธีที่นิยมใช้งานกันมากในปัจจุบัน และมีความปลอดภัยของการเคลื่อนที่สูงโดยไม่ทำให้เกิดการสูญหายของสเตรป แต่ระยะเวลาของการเคลื่อนที่จะมาก ซึ่งจำนวนสเตรปที่ใช้ในการเร่งและหน่วงความเร็วจะมีจำนวนเท่ากัน ซึ่งรายละเอียดของการควบคุมแบบนี้มีดังนี้

จากสมการการเคลื่อนที่ของมอเตอร์

$$T_m = T_l + J\theta_s \frac{df}{dt} + D\theta_s f \quad (5.11)$$

กำหนดให้ $D = 0$ เมื่อ T_l เป็นแรงบิดโหลดมีค่าคงที่ จะได้อัตราเร่งเป็น

$$a = \frac{T_m - T_l}{J\theta_s} \quad \text{สเตรปต่อวินาที}^2 \quad (5.12)$$

ดังนั้นเมื่อกำหนดให้มอเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเริ่มต้น f_s ซึ่งเป็นความเร็วเริ่มต้นค่าเดียวกับการเคลื่อนที่แบบความเร็วคงที่ ซึ่งอยู่ในช่วงแรงบิดพลูอิน และมอเตอร์สามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วมากที่สุด f_m ซึ่งอยู่ในช่วงแรงบิดพลูเอาท์เมื่อมีแรงบิดโหลด T_l

แต่เนื่องจากแรงบิดของมอเตอร์ไม่ได้มีค่าคงที่จะเปลี่ยนแปลงโดยลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น แต่ในการควบคุมแบบความเร็วคงที่การออกแบบจะต้องกำหนดให้แรงบิดมอเตอร์มีค่าคงที่จึงจะหาอัตราเร่งได้ ดังนั้นจึงต้องหาค่าความเร็วที่มีค่าแรงบิดมอเตอร์ที่เหมาะสมที่ทำให้ระยะเวลาของการเคลื่อนที่น้อยที่สุดโดยใช้สมการที่ (5.13) และการคำนวณเพื่อหาค่าความเร็วในแต่ละสเตรปของการเร่งและหน่วงความเร็วโดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการที่ (5.14) และ (5.15) ดังนี้

$$t = \frac{f_m - f_s}{a} \quad (5.13)$$

$$s = \frac{t \times (f_m + f_s)}{2} \quad (5.14)$$

$$s = \frac{v^2 - f_s^2}{2a} \quad (5.15)$$

เมื่อ $t =$ เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่

- s = จำนวนสเตปทั้งหมดที่ใช้เพื่อการเร่งความเร็วจาก f_s ถึง f_m
 a = อัตราเร่งของมอเตอร์
 v = ความเร็วในแต่ละสเตปที่ใช้เพื่อการเร่ง
 θ_s = ขนาดมุมสเตป (เรเดียน)

โดยการคำนวณหาความเร็วที่ให้ระยะเวลาการเคลื่อนที่น้อยที่สุดจะใช้สมการที่ (5.13) โดยอัตราเร่งจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อกำหนดให้แรงบิดมอเตอร์เปลี่ยนแปลงตามความเร็ว โดยนำค่าแรงบิดที่ความเร็วต่างๆมาทำการคำนวณ ดังนั้นจะหาเวลาที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการเคลื่อนที่เมื่อกำหนดจำนวนสเตปที่ต้องการให้มอเตอร์เคลื่อนที่ได้ โดยจำนวนสเตปที่ใช้ในการหน่วงความเร็วจะเท่ากับจำนวนสเตปที่ใช้เพื่อการเร่งความเร็ว ดังนั้นจะรู้เวลาที่ใช้เพื่อการเร่งและหน่วงความเร็วและจำนวนสเตปที่ใช้เคลื่อนที่ที่ความเร็วมากที่สุดจะเท่ากับจำนวนสเตปทั้งหมดที่ต้องการเคลื่อนที่ลบออกด้วยจำนวนสเตปที่ใช้ในการเร่งและหน่วงความเร็ว ดังนั้นจะรู้เวลาที่เคลื่อนที่ที่ความเร็วมากที่สุดดังสมการที่ (5.16) และเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ทั้งหมดแสดงดังสมการที่ (5.17)

$$t = \frac{S_{con}}{f_m} \quad (5.16)$$

$$tt = \frac{S_{con}}{f_m} + \text{เวลาในการเคลื่อนที่ของการเร่งและหน่วงความเร็ว} \quad (5.17)$$

S_{con} = ระยะทางที่เหลื่อเพื่อการหมุนที่ความเร็วสูงสุด

tt = เวลาที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการเคลื่อนที่เมื่อกำหนดจำนวนสเตปที่ต้องการ

ส่วน โปรแกรมการคำนวณค่าต่างๆของการควบคุมแบบการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้น โดยการหาความเร็วที่ให้เวลาการเคลื่อนที่น้อยที่สุด แสดงดัง โพลีชาร์ท ในรูปที่ 5.16

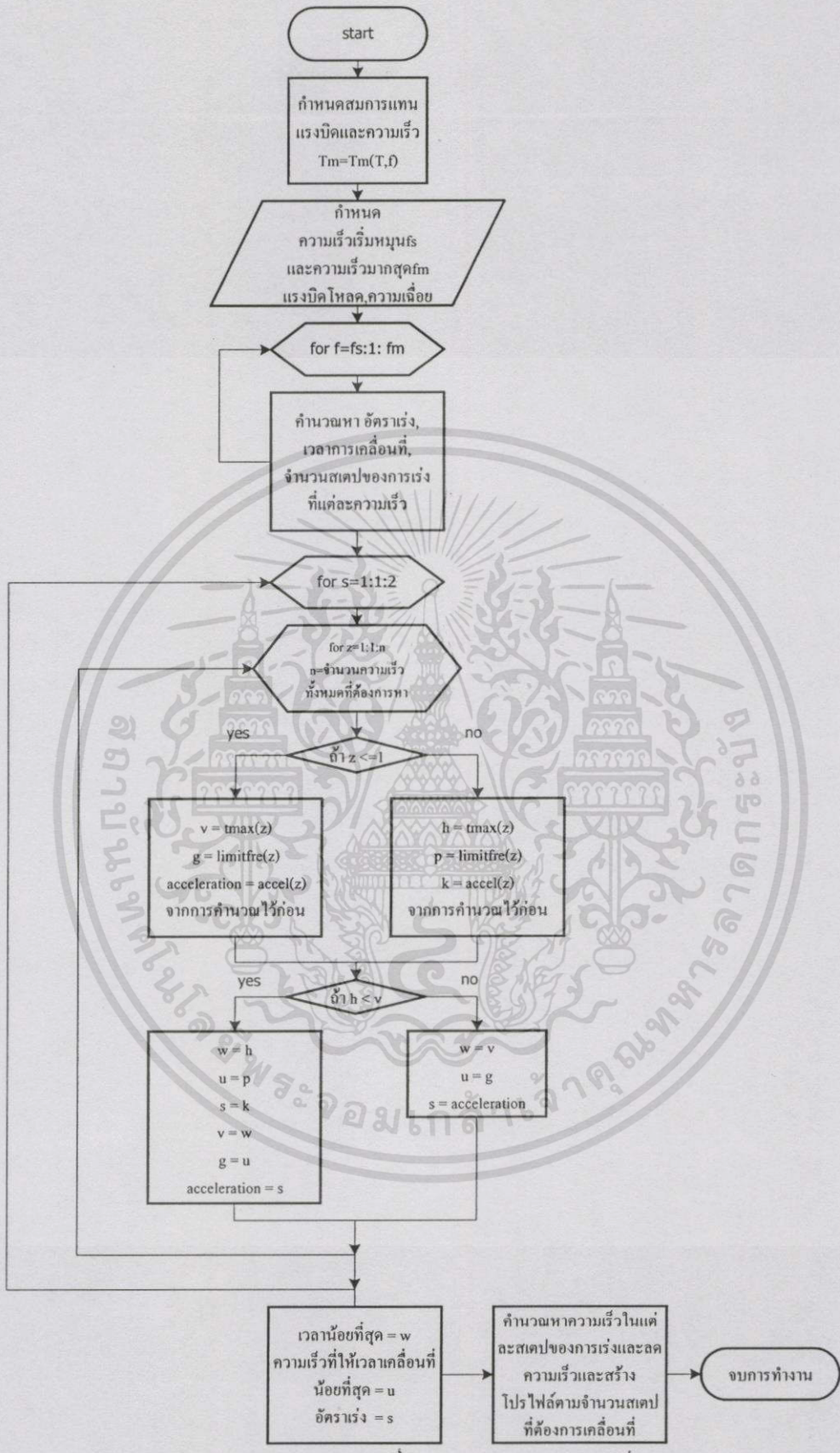
5.3.2 การควบคุมแบบวงเปิดโดยใช้เทคนิคการหาโปรไฟล์ความเร็ว

5.3.2.1 การควบคุมแบบการเร่งและหน่วงความเร็วเชิงเส้น

เป็นการควบคุมที่มีลักษณะการคำนวณเหมือนการควบคุมในหัวข้อ 5.3.1.2 แต่จะมีการใช้เทคนิคการหาเวลาที่ใช้ในการเร่งตามหัวข้อ 4.1.1 และแก้สมการที่ (5.13) หาอัตราเร่ง ใช้สมการที่ (5.14) หาจำนวนสเตปที่ใช้ในการเร่ง และใช้สมการที่ (5.15) หาความเร็วที่ป้อนให้แต่ละสเตปในการเร่งความเร็ว ส่วนในการหน่วงความเร็วจะหาเวลาในการหน่วงความเร็วตามหัวข้อ 4.1.2 แล้วทำการคำนวณเหมือนการเร่งทุกอย่าง

5.3.2.2 การควบคุมแบบการเร่งและหน่วงความเร็วแบบอ็อกโปเนนเชียล

เป็นการควบคุมที่ใช้เทคนิคการหาเวลาที่ใช้ในการเร่งและหน่วงความเร็วตามหัวข้อ ในบทที่ 4 ดังที่ได้อธิบายมาแล้ว



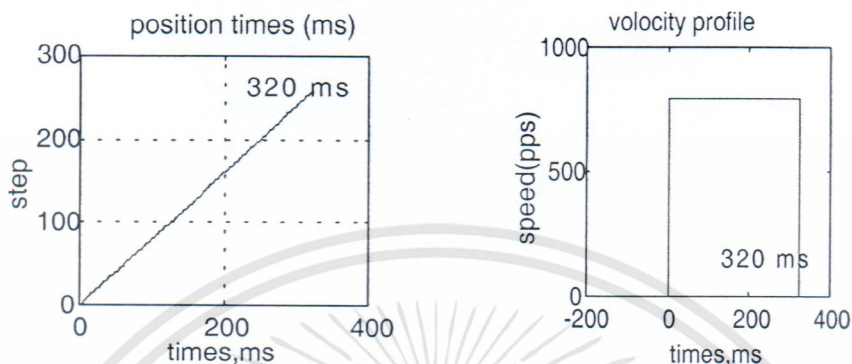
รูปที่ 5.16 แสดงโฟลว์ชาร์ตการหาความเร็วที่ให้เวลาการเคลื่อนที่น้อยที่สุดของการควบคุมแบบ การเร่งและหน่วงความเร็วเชิงเส้นแบบเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ผลการทดลองแบบวงเปิดแบบเดิม

5.4.1 ผลการทดลองกรณีไม่มีอินเนอร์เชียร์โหลด

5.4.1.1 ผลการเคลื่อนที่แบบความเร็วคงที่จากการคำนวณ

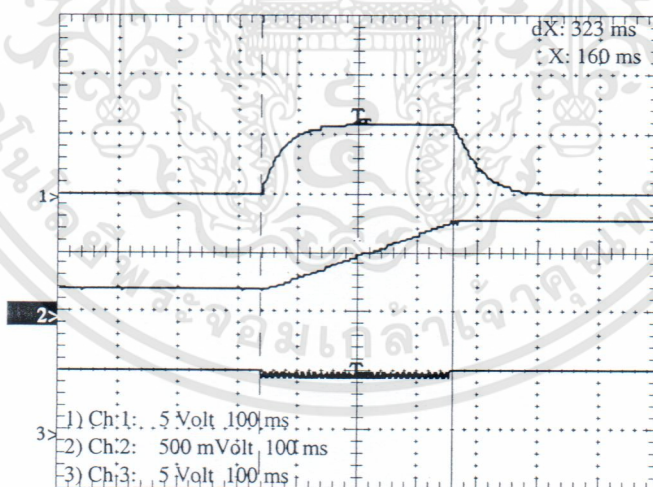


ก.

ข.

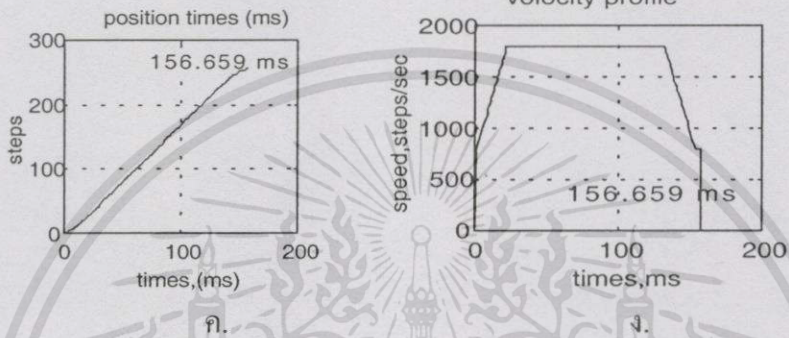
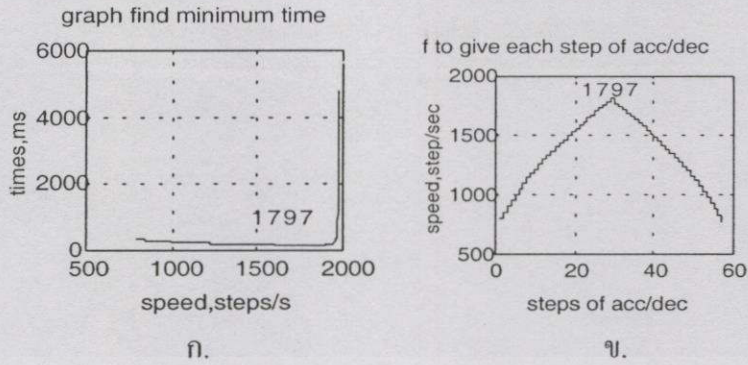
รูปที่ 5.17 ผลการทดลองของการเคลื่อนที่แบบความเร็วคงที่กรณีไม่มีอินเนอร์เชียร์โหลด ก. แสดง เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ 320 มิลลิวินาที ข. แสดง โปรไฟล์ความเร็วแบบความเร็วคงที่ ที่ 800 สเตปต่อวินาที

5.4.1.2 ผลการเคลื่อนที่แบบความเร็วคงที่จากการทดลองจริง



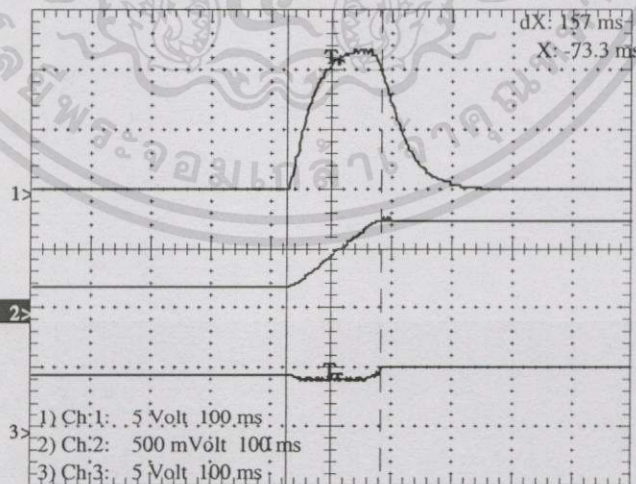
รูปที่ 5.18 แสดงผลการเคลื่อนที่แบบความเร็วคงที่จากทดลองจริงกรณีไม่มีโหลดอินเนอร์เชียร์ ช่อง สัญญาณ 1 โปรไฟล์ความเร็ว ช่องสัญญาณ 2 เวลาทางตำแหน่ง dx : 323 มิลลิวินาที ช่อง สัญญาณ 3 สัญญาณอินพุทพัลส์ จำนวน 256 สเตป

5.4.1.3 ผลการเคลื่อนที่แบบการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้นจากการคำนวณ



รูปที่ 5.19 ผลการคำนวณการเคลื่อนที่แบบการเร่งและหน่วงความเร็วเชิงเส้นกรณีไม่มีอินเนอร์เซีย โหลด ก. แสดงความเร็วที่ให้เวลาการเคลื่อนที่น้อยที่สุด 1797 สเตปต่อวินาที ข. แสดงความเร็วที่ใช้ป้อนมอเตอร์ในการเร่งและหน่วงความเร็ว ค. เวลาใช้ในการเคลื่อนที่ 156.659 ms. ง. แสดงโปรไฟล์ความเร็วที่จำนวนสเตปเคลื่อนที่ 256 สเตป

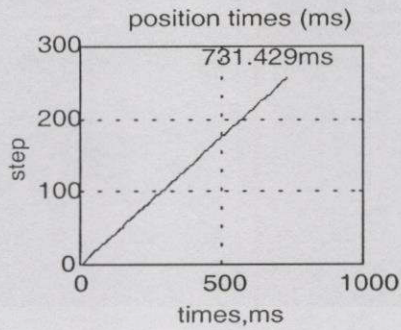
5.4.1.4 ผลการเคลื่อนที่แบบการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้นจากทดลองจริง



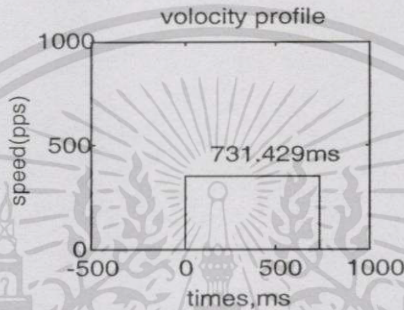
รูปที่ 5.20 แสดงผลการเคลื่อนที่แบบการเร่งและหน่วงความเร็วเชิงเส้นจากทดลองจริงกรณีไม่มีโหลดอินเนอร์เซีย ช่องสัญญาณ 1 โปรไฟล์ความเร็ว ช่องสัญญาณ 2 เวลาทางตำแหน่ง dx : 157 มิลลิวินาที ช่องสัญญาณ 3 สัญญาณอินพุทพัลส์ จำนวน 256 สเตป

5.4.2 ผลการทดลองกรณีอินเนอร์ซีเรียโหลด 200 กรัม

5.4.2.1 ผลการเคลื่อนที่แบบความเร็วคงที่จากการคำนวณ



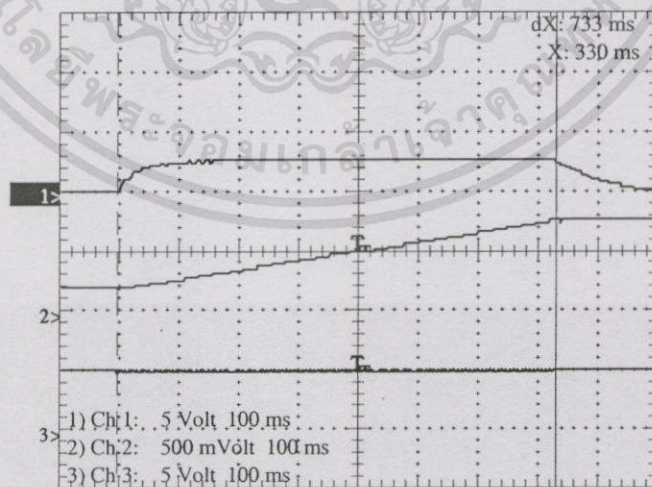
ก.



ข.

รูปที่ 5.21 แสดงผลการทดลองกรณีอินเนอร์ซีเรียโหลด 200 กรัม ก. เวลาทางตำแหน่ง 731.429 มิลลิวินาที ข. แสดงโปรไฟล์ความเร็วแบบความเร็วคงที่ ความเร็ว 350 สเตป/วินาที

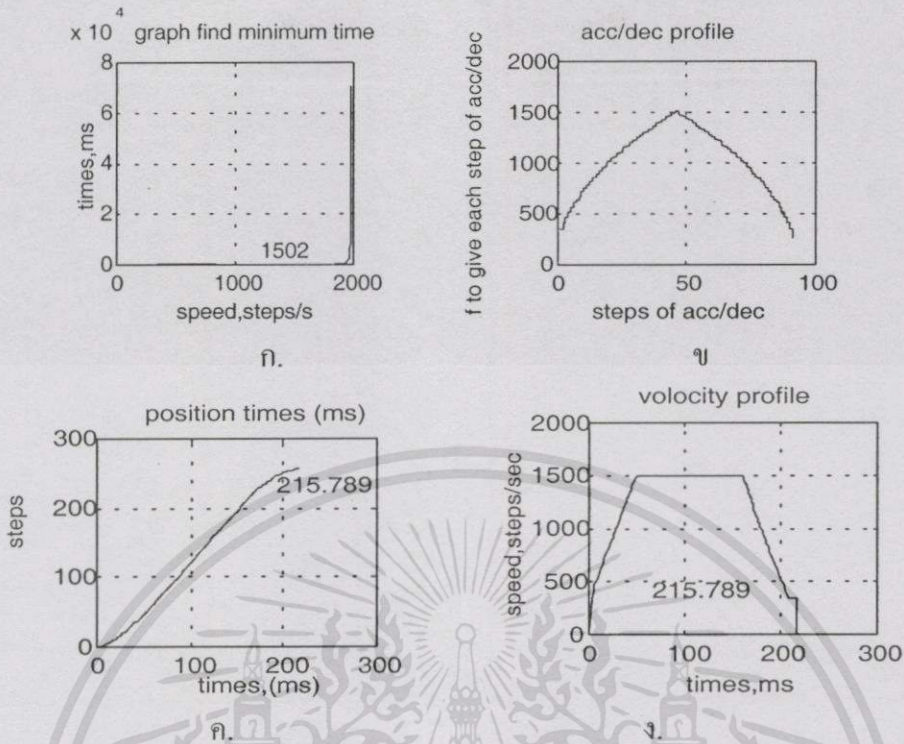
5.4.2.2 ผลการเคลื่อนที่แบบความเร็วคงที่จากการทดลองจริง



รูปที่ 5.22 แสดงผลการเคลื่อนที่จริง ช่องสัญญาณ 1 แสดงโปรไฟล์ความเร็ว ช่องสัญญาณ 2 แสดงเวลาทางตำแหน่ง dx: 733 มิลลิวินาที ช่องสัญญาณ 3 แสดงสเตปอินพุต 256 สเตป

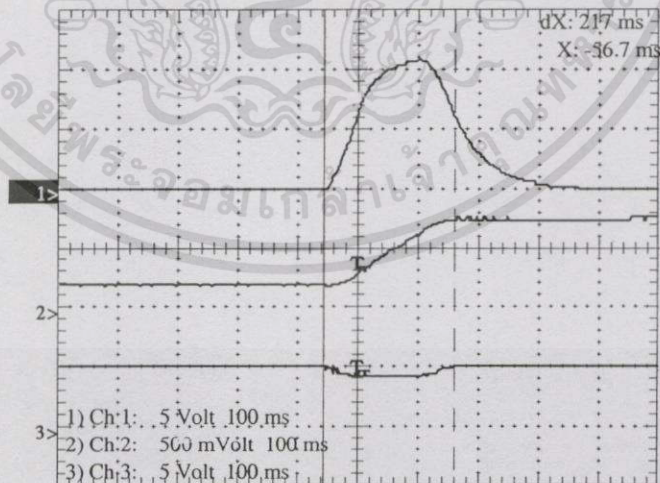
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2.3 ผลการเคลื่อนที่แบบการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้นจากการคำนวณ



รูปที่ 5.23 แสดงผลการคำนวณกรณีโหลด 200 กรัมจำนวนสเตปเคลื่อนที่ 256 สเตป ก. แสดงความเร็วที่ให้เวลาการเคลื่อนที่น้อยที่สุด 1502 สเตปต่อวินาที ข. แสดงโปรไฟล์ความเร็ว การเร่งและหน่วงความเร็ว ค.แสดงเวลาทางตำแหน่ง 215.789 มิลลิวินาที ง.แสดงโปรไฟล์ความเร็ว

5.4.2.4 ผลการเคลื่อนที่แบบการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้นจากการทดลองจริง

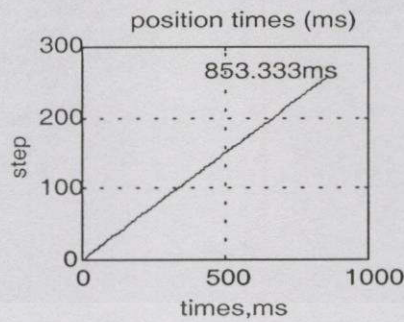


รูปที่ 5.24 แสดงผลการเคลื่อนที่จริงของการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้นกรณีอินเนอร์เซียร์ โหลด 200 กรัม ช่องสัญญาณ 1 แสดงโปรไฟล์ความเร็ว ช่องสัญญาณ 2 แสดงเวลาทางตำแหน่ง dx: 217 มิลลิวินาที ช่องสัญญาณ 3 แสดงสเตปอินพุต 256 สเตป

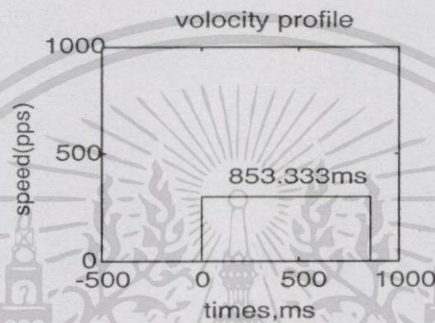
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.3 ผลการทดลองกรณีอินเนอร์ซีเรียโหลด 400 กรัม

5.4.3.1 ผลการเคลื่อนที่แบบความเร็วคงที่จากการคำนวณ



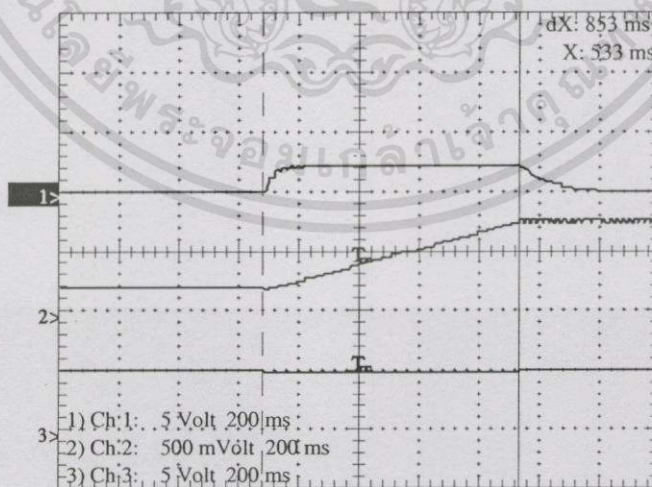
ก.



ข.

รูปที่ 5.25 แสดงผลการคำนวณ กรณีอินเนอร์ซีเรียโหลด 400 กรัม ก. เวลาทางตำแหน่ง 853.333 มิลลิวินาที ข. แสดงโปรไฟล์ความเร็วแบบความเร็วคงที่ ความเร็ว 300 สเตป/วินาที

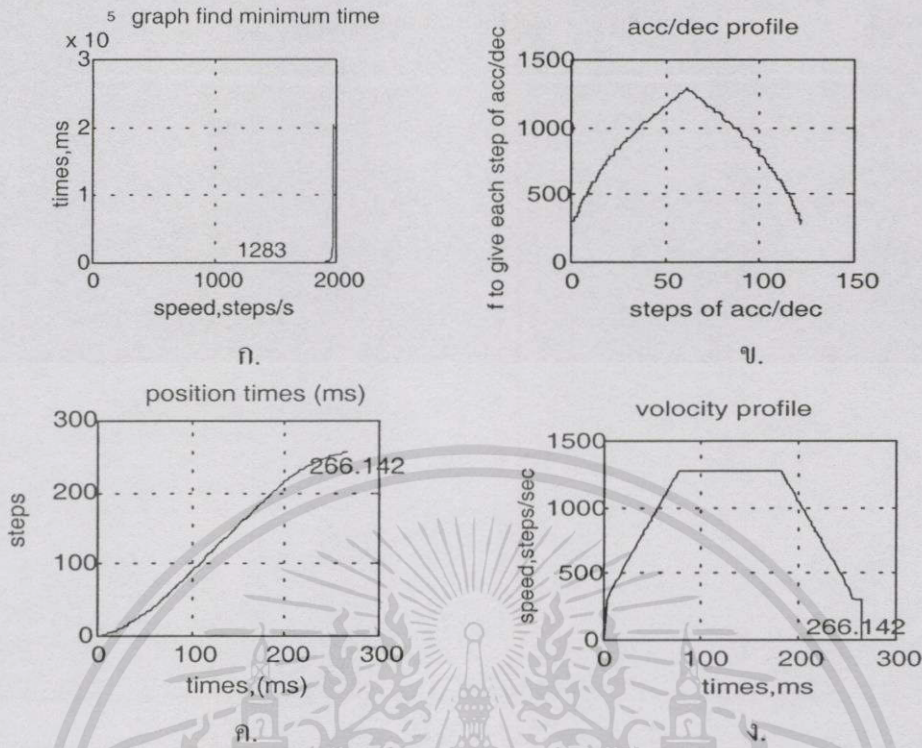
5.4.3.2 ผลการเคลื่อนที่แบบความเร็วคงที่จากการทดลองจริง



รูปที่ 5.26 แสดงผลการเคลื่อนที่จริงแบบความเร็วคงที่ 300 สเตปต่อวินาที กรณีอินเนอร์ซีเรียโหลด 400 กรัม ช่องสัญญาณ 1 แสดงโปรไฟล์ความเร็ว ช่องสัญญาณ 2 แสดงเวลาทางตำแหน่ง dx: 853 มิลลิวินาที ช่องสัญญาณ 3 แสดงสเตปอินพุต 256 สเตป

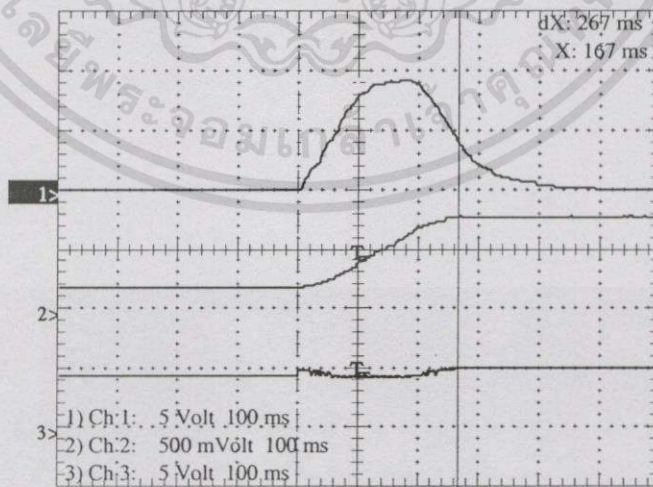
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.3.3 ผลการเคลื่อนที่แบบการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้นจากการคำนวณ



รูปที่ 5.27 แสดงผลการคำนวณกรณีโหลด 400 กรัมจำนวนสเตปเคลื่อนที่ 256 สเตป ก. แสดงความเร็ว 1283 สเตปต่อวินาที ที่ให้เวลาการเคลื่อนที่น้อยที่สุด ข. แสดงโปรไฟล์ความเร็ว การเร่งและหน่วงความเร็ว ค.แสดงเวลาทางตำแหน่ง 266.142 มิลลิวินาที ง.แสดงโปรไฟล์ความเร็ว

5.4.3.4 ผลการเคลื่อนที่แบบการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้นจากการทดลองจริง



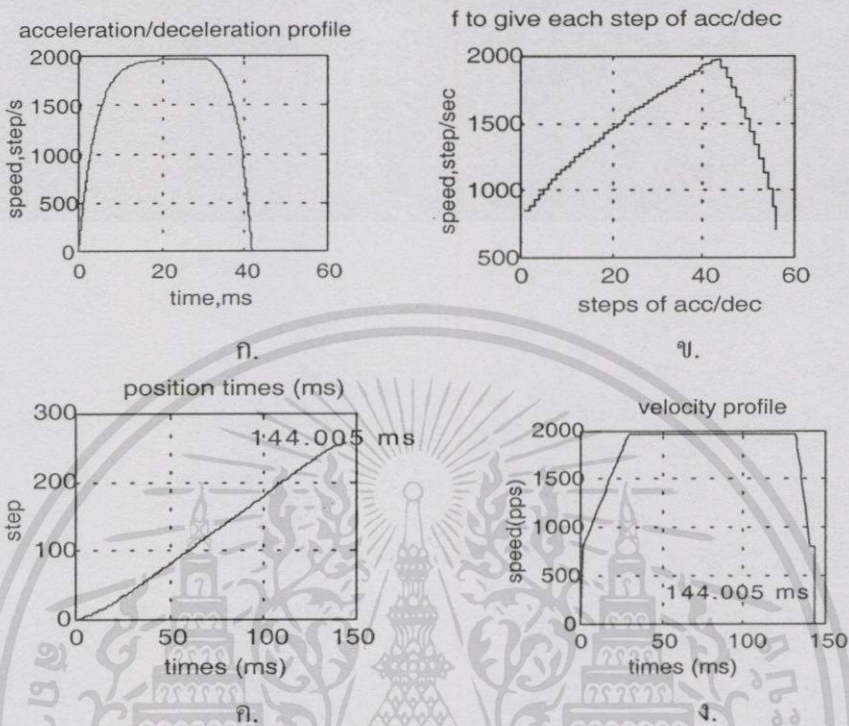
รูปที่ 5.28 แสดงผลการเคลื่อนที่จริงของการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้นกรณีอินเนอร์เซียร์ โหลด 400 กรัม ช่องสัญญาณ 1 แสดงโปรไฟล์ความเร็ว ช่องสัญญาณ 2 แสดงเวลาทางตำแหน่ง dx: 267 มิลลิวินาที ช่องสัญญาณ 3 แสดงสเตปอินพุท 256 สเตป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 ผลการทดลองการควบคุมแบบวงเปิดโดยเทคนิคการหาโปรไฟล์ความเร็ว

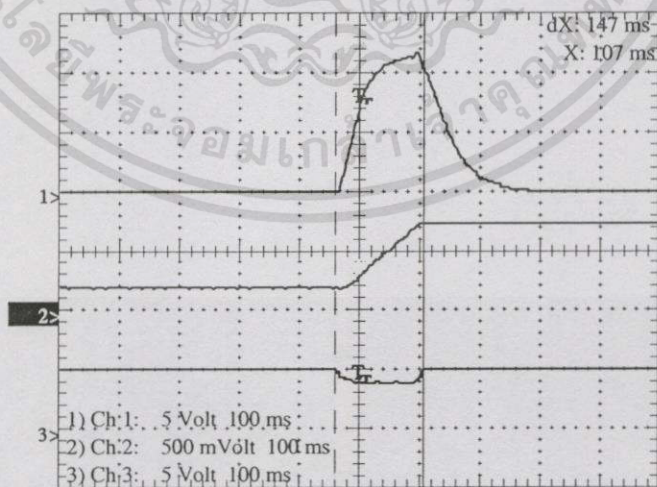
5.5.1 ผลการทดลองกรณีไม่มีอินเทอร์ล็อก

5.5.1.1 ผลการเคลื่อนที่แบบการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้นจากการคำนวณ



รูปที่ 5.29 แสดงผลการคำนวณกรณีไม่มีอินเทอร์ล็อก ก. แสดงโปรไฟล์ความเร็วการเร่งและหน่วงความเร็ว ข. แสดงความเร็วของการเร่งและหน่วงความเร็ว ค. แสดงเวลาทางตำแหน่ง 144.005 มิลลิวินาที ง. แสดงโปรไฟล์ความเร็วจำนวนสเตปเคลื่อนที่ 256 สเตป

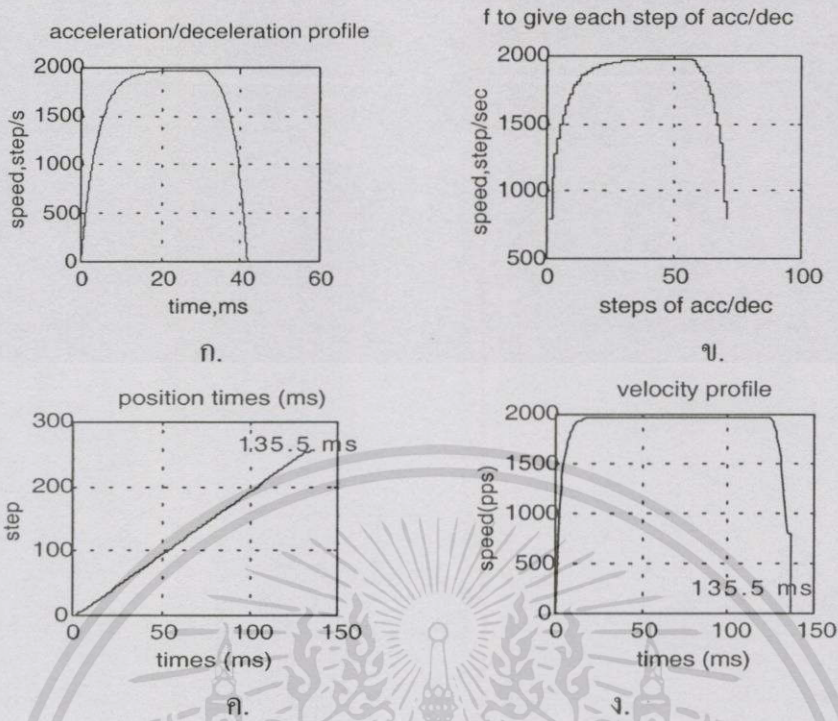
5.5.1.2 ผลการเคลื่อนที่แบบการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้นจากการทดลองจริง



รูปที่ 5.30 แสดงผลการเคลื่อนที่จริงของการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้นกรณีไม่มีอินเทอร์ล็อก ช่องสัญญาณ 1 แสดงโปรไฟล์ความเร็ว ช่องสัญญาณ 2 แสดงเวลาทางตำแหน่ง dx: 147 มิลลิวินาที ช่องสัญญาณ 3 แสดงสเตปอินพุท 256 สเตป

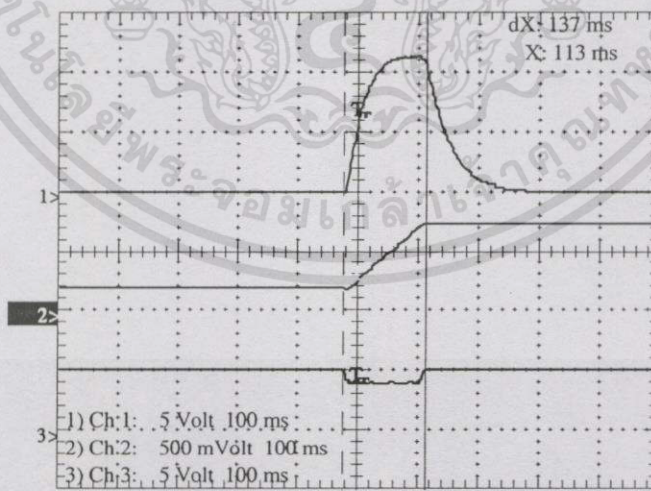
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.1.3 ผลการเคลื่อนที่แบบการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียลจากการคำนวณ



รูปที่ 5.31 แสดงผลการคำนวณกรณีไม่มีอินเนอร์เซอร์โหลด ก. แสดงโปรไฟล์ความเร็วการเร่งและหน่วงความเร็ว ข. แสดงความเร็วในแต่ละสเต็ปของการเร่งและหน่วงความเร็ว ค. แสดงเวลาทางตำแหน่ง 135.5 มิลลิวินาที ง. แสดงโปรไฟล์ความเร็วจำนวนสเต็ปเคลื่อนที่ 256 สเต็ป

5.5.1.4 ผลการเคลื่อนที่แบบการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียลจากการทดลองจริง

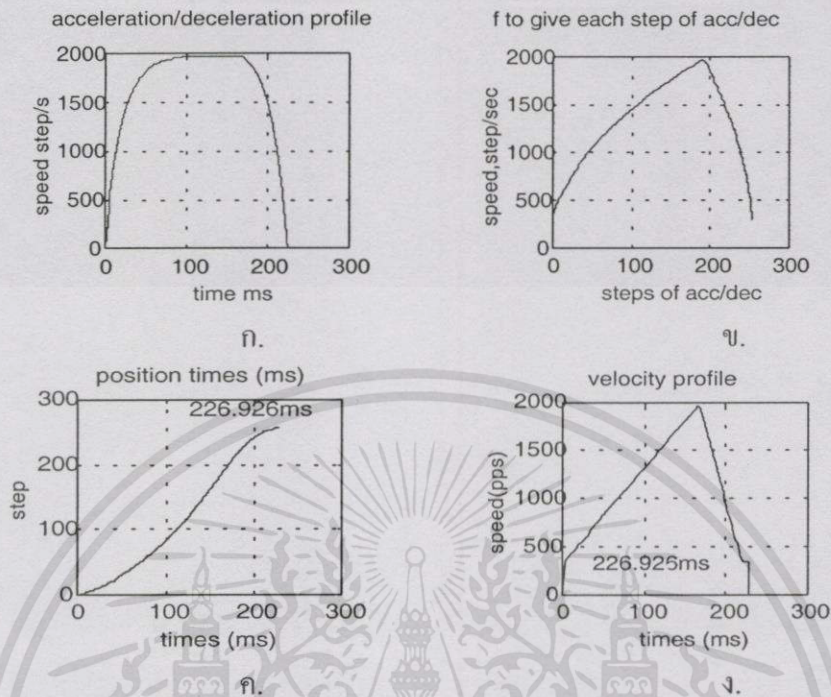


รูปที่ 5.32 แสดงผลการเคลื่อนที่จริงของการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียล กรณีไม่มีอินเนอร์เซอร์โหลด ช่องสัญญาณ 1 แสดงโปรไฟล์ความเร็ว ช่องสัญญาณ 2 แสดงเวลาทางตำแหน่ง dx: 137 มิลลิวินาที ช่องสัญญาณ 3 แสดงสเต็ปอินพุต 256 สเต็ป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

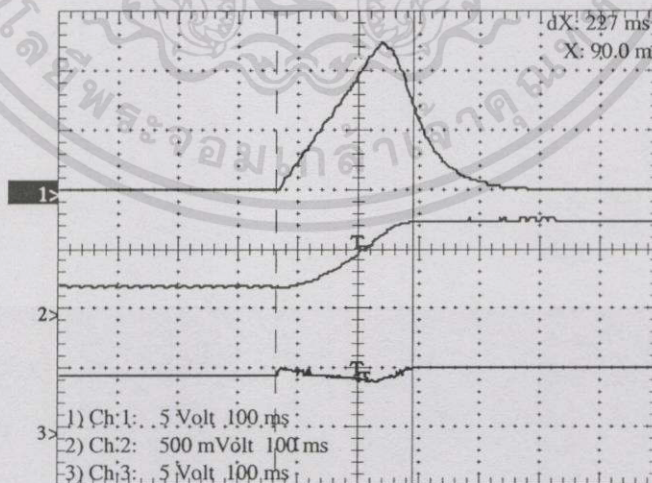
5.5.2 ผลการทดลองกรณีอินเนอร์เซอร์โหลด 200 กรัม

5.5.2.1 ผลการเคลื่อนที่แบบการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้นจากการคำนวณ



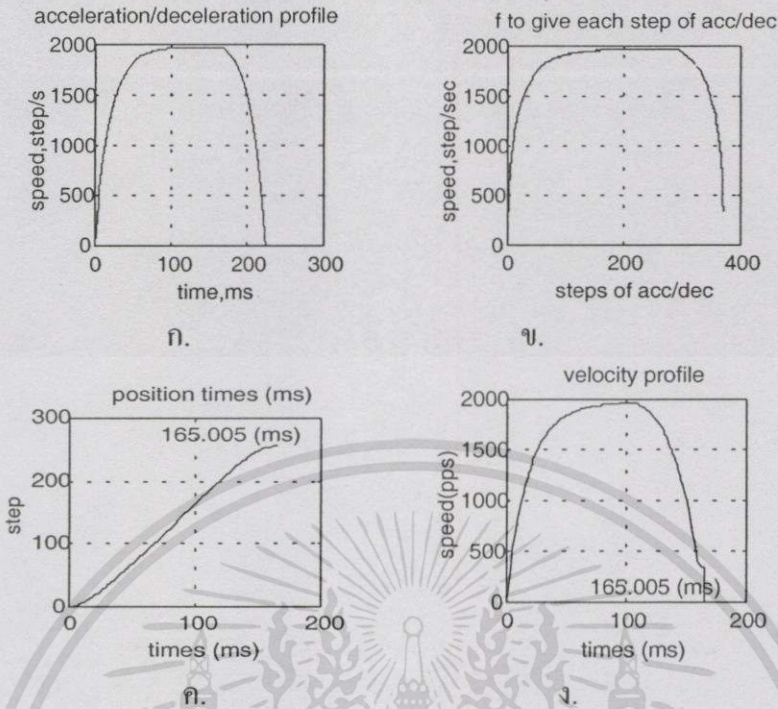
รูปที่ 5.33 แสดงผลการคำนวณกรณีอินเนอร์เซอร์โหลด 200 กรัม ก. แสดงโปรไฟล์ความเร็วการเร่งและหน่วงความเร็ว ข. แสดงความเร็วในแต่ละสเตปของการเร่งและหน่วงความเร็ว ค. แสดงเวลาทางตำแหน่ง 226.926 มิลลิวินาที ง. แสดงโปรไฟล์ความเร็วจำนวนสเตปเคลื่อนที่ 256 สเตป

5.5.2.2 ผลการเคลื่อนที่แบบการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้นจากการทดลองจริง



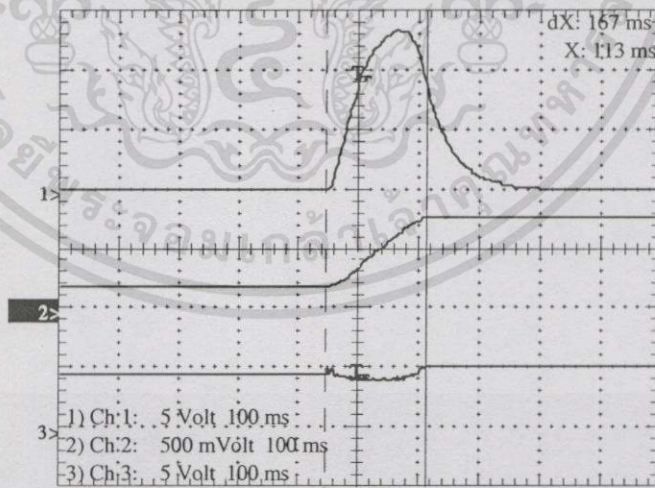
รูปที่ 5.34 แสดงผลการเคลื่อนที่จริงของการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้นด้วยเทคนิคโปรไฟล์ความเร็ว กรณีอินเนอร์เซอร์โหลด 200 กรัม ช่องสัญญาณ 1 โปรไฟล์ความเร็ว ช่องสัญญาณ 2 เวลาทางตำแหน่ง dx: 227 มิลลิวินาที ช่องสัญญาณ 3 สเตปอินพุต 256 สเตป

5.5.2.3 ผลการเคลื่อนที่แบบการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียลจากการคำนวณ



รูปที่ 5.35 แสดงผลการคำนวณกรณีอินเนอร์เซียรีโหลด 200 กรัม ก. แสดงโปรไฟล์ความเร็วการเร่งและหน่วงความเร็ว ข. แสดงความเร็วในแต่ละสเตปของการเร่งและหน่วงความเร็ว ค. แสดงเวลาทางตำแหน่ง 165.005 มิลลิวินาที ง.แสดงโปรไฟล์ความเร็วจำนวนสเตปเคลื่อนที่ 256 สเตป

5.5.2.4 ผลการเคลื่อนที่แบบการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียลจากการทดลองจริง

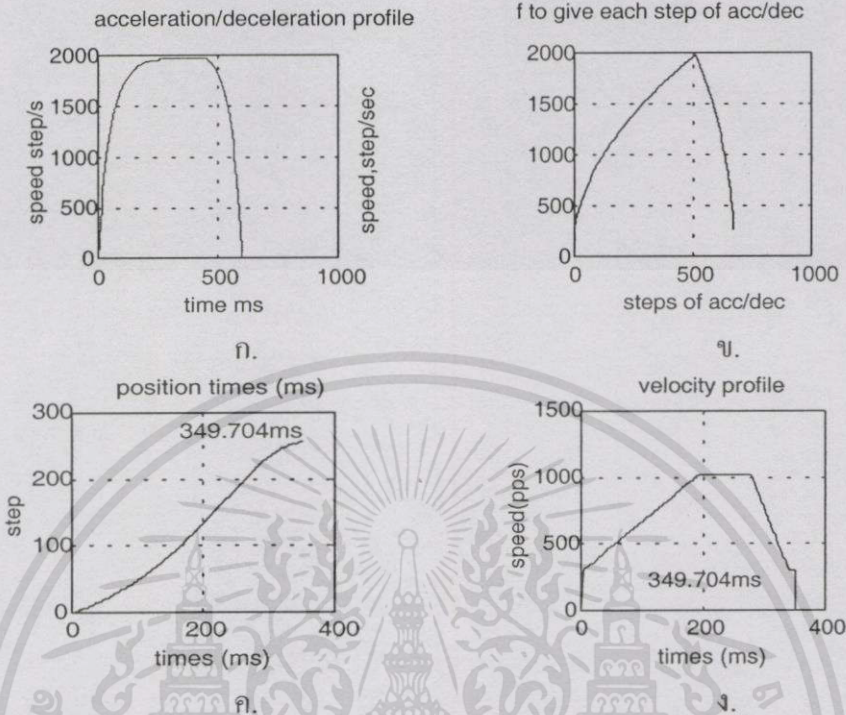


รูปที่ 5.36 แสดงผลการเคลื่อนที่จริงของการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียล ด้วยเทคนิคโปรไฟล์ความเร็ว กรณีอินเนอร์เซียรีโหลด 200 กรัม ช่องสัญญาณ 1 แสดงโปรไฟล์ความเร็วช่องสัญญาณ 2 แสดงเวลาทางตำแหน่ง dx: 167 มิลลิวินาที ช่องสัญญาณ 3 แสดงสเตปอินพุท 256 สเตป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

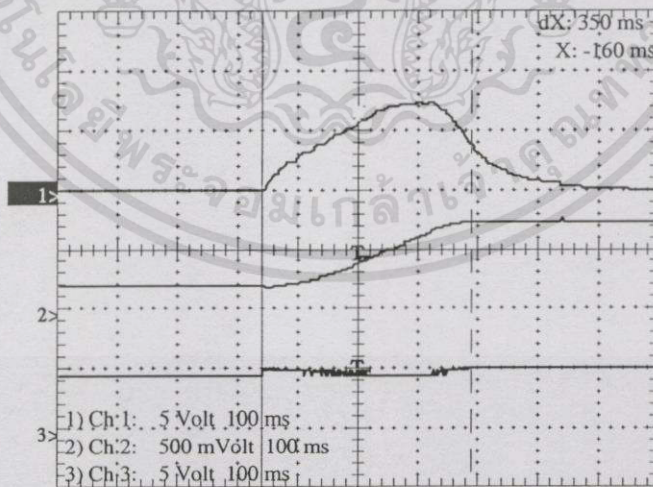
5.5.3 ผลการทดลองกรณีอินเนอร์เชียร์โหลด 400 กรัม

5.5.3.1 ผลการเคลื่อนที่แบบการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้นจากการคำนวณ



รูปที่ 5.37 แสดงผลการคำนวณกรณีอินเนอร์เชียร์โหลด 400 กรัม ก. แสดงโปรไฟล์ความเร็วการเร่งและหน่วงความเร็ว ข. ความเร็วในแต่ละสเต็ปของการเร่งและหน่วงความเร็ว ค.แสดงเวลาทางตำแหน่ง 349.704 มิลลิวินาที ง. โปรไฟล์ความเร็วจำนวนสเต็ปเคลื่อนที่ 256 สเต็ป

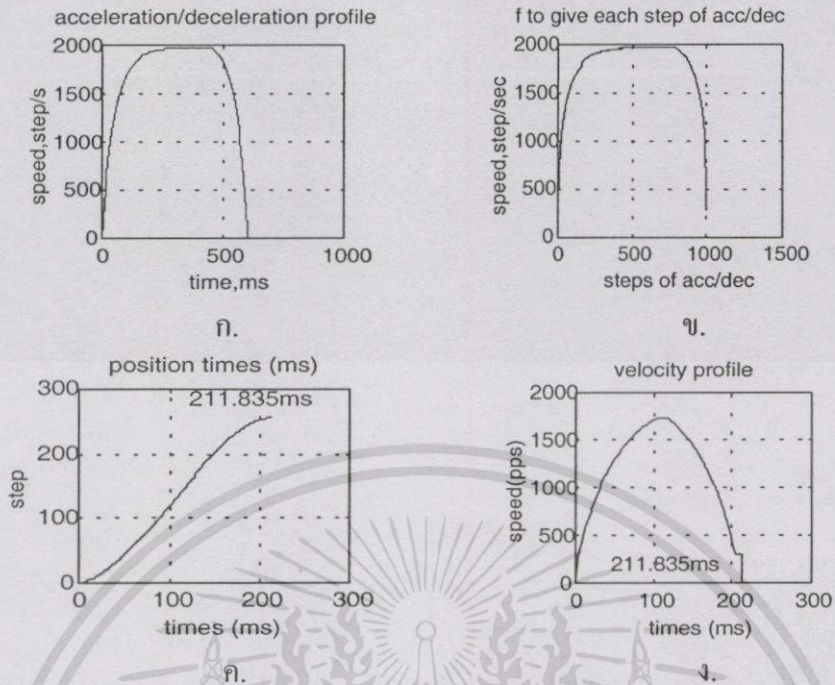
5.5.3.2 ผลการเคลื่อนที่แบบการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้นจากการทดลองจริง



รูปที่ 5.38 แสดงผลการเคลื่อนที่จริงของการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้นด้วยเทคนิคโปรไฟล์ความเร็ว กรณีมีอินเนอร์เชียร์โหลด 400 กรัม ช่องสัญญาณ 1 แสดงโปรไฟล์ความเร็ว ช่องสัญญาณ 2 แสดงเวลาทางตำแหน่ง dx: 350 มิลลิวินาที ช่องสัญญาณ 3 แสดงสเต็ปอินพุต 256 สเต็ป

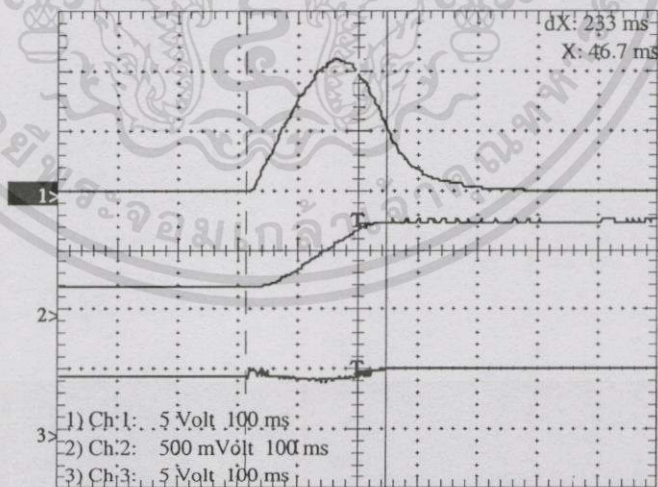
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5.3.3 ผลการเคลื่อนที่แบบการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียลจากการคำนวณ

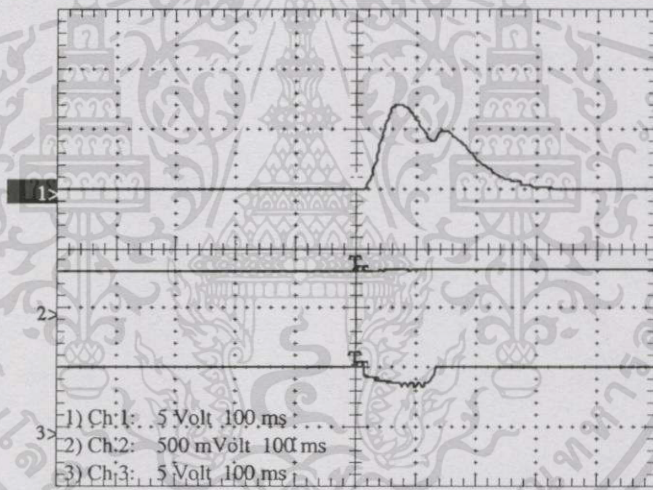
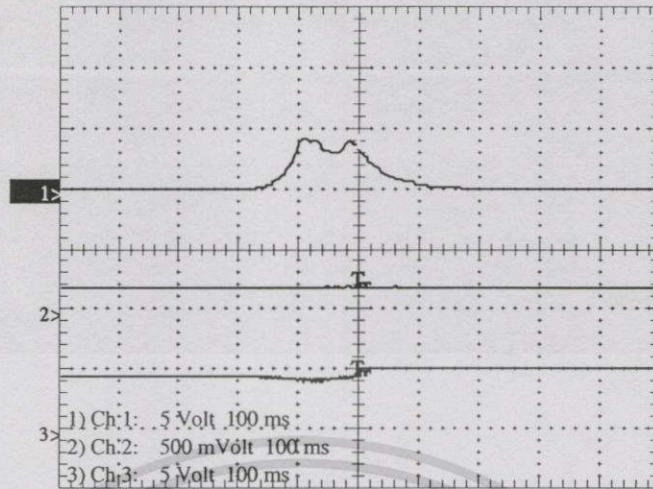


รูปที่ 5.39 แสดงผลการคำนวณกรณีอินเนอร์เซียร์โหลด 400 กรัม ก. แสดงโปรไฟล์ความเร็วการเร่งและหน่วงความเร็ว ข. แสดงความเร็วในแต่ละสตาปของการเร่งและหน่วงความเร็ว ค. แสดงเวลาทางตำแหน่ง 211.835 มิลลิวินาที ง. แสดงโปรไฟล์ความเร็วจำนวนสตาปเคลื่อนที่ 256 สตาป

5.5.3.4 ผลการเคลื่อนที่แบบการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียลจากการทดลองจริง



รูปที่ 5.40 แสดงผลการเคลื่อนที่จริงของการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียล ด้วยเทคนิคโปรไฟล์ความเร็ว กรณีมีอินเนอร์เซียร์โหลด 400 กรัม ช่องสัญญาณ 1 แสดงโปรไฟล์ความเร็วช่องสัญญาณ 2 แสดงเวลาทางตำแหน่ง dx: 233 มิลลิวินาที ช่องสัญญาณ 3 แสดงสตาปอินพุต 256 สตาป



รูปที่ 5.41 แสดงการเกิดการอสซิลเลทระหว่างการเดินทางที่จะเห็นว่า ช่องสัญญาณ 1 แสดงโปรไฟล์ความเร็ว ซึ่งความเร็วมอเตอร์ที่ได้ไม่สม่ำเสมอและไม่ถูกต้อง ช่องสัญญาณ 2 แสดงเวลาทางตำแหน่งจะเห็นว่ามอเตอร์ไม่มีการเคลื่อนที่ ช่องสัญญาณ 3 แสดงจำนวนสเตปอินพุทที่ป้อนให้ระหว่างการเดินทางที่ 256 สเตป



1 = โหลด 0 กรัม

2 = โหลด 200 กรัม

3 = โหลด 400 กรัม

ชุด 1 = การควบคุมแบบความเร็วคงที่

ชุด 2 = การควบคุมแบบการเร่งและหน่วงความเร็วเชิงเส้น

ชุด 3 = การควบคุมแบบการเร่งและหน่วงความเร็วเชิงเส้น โดยการหาโปรไฟล์ความเร็ว

ชุด 4 = การควบคุมแบบการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียล โดยการหาโปรไฟล์ความเร็ว

รูปที่ 5.42 กราฟแสดงการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ระหว่างเคลื่อนที่ของการควบคุมประเภทต่างๆที่อินเนอร์เซียโหลดขนาดต่างๆ

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบค่าความแตกต่างของเวลาที่ได้จากการคำนวณกับการเคลื่อนที่จริงเมื่อเคลื่อนที่เป็นระยะ 256 สเตป

ประเภทการควบคุม การเคลื่อนที่แบบ	เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่เมื่อมีโหลดอินเนอร์เซียร์ต่างๆ								
	0 กรัม			200 กรัม			400 กรัม		
	จำนวน (ms)	ทดลอง จริง (ms)	% ที่ แตก ต่าง	จำนวน (ms)	ทดลอง จริง (ms)	% ที่ แตก ต่าง	จำนวน (ms)	ทดลอง จริง (ms)	% ที่ แตก ต่าง
1. ความเร็วคงที่	320	323	0.9	731.4	733	0.2	853.3	853	-0.03
2. การเร่งและหน่วงความเร็วเชิงเส้นโดยหาความเร็วที่ให้เวลาการเคลื่อนที่น้อยที่สุด	156.6	157	0.2	215.8	217	0.5	266.1	267	0.3
3. การเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้นโดยใช้เทคนิคการหาโปรไฟล์ความเร็ว	144.0	147	2.03	226.9	227	0.3	349.7	350	0.1
4. การเร่งและหน่วงความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียลโดยใช้เทคนิคการหาโปรไฟล์ความเร็ว	135.5	137	1.09	165.0	167	1.2	211.8	233	9.08

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบเวลาและเปอร์เซ็นต์ที่ลดลงของเวลาที่ใช้ระหว่างการเคลื่อนที่ของการควบคุมแบบวงเปิดแบบต่างๆเมื่อมีอินเนอร์เซียร์โหลดต่างๆจากการเคลื่อนที่จริงเมื่อเคลื่อนที่เป็นระยะ 256 สเตป

ประเภทการควบคุม การเคลื่อนที่แบบ	เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่เมื่อมีโหลดอินเนอร์เซียร์ต่างๆ(ms)					
	0 กรัม	% ที่ลดลง	200 กรัม	% ที่ลดลง	400 กรัม	% ที่ลดลง
1. ความเร็วคงที่	323	0	733	0	853	0
2. การเร่งและหน่วงความเร็วเชิงเส้นโดยหาความเร็วที่ให้เวลาการเคลื่อนที่น้อยที่สุด	157	51.39	217	70.39	267	68.70
3. การเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้นโดยใช้เทคนิคการหาโปรไฟล์ความเร็ว	147	54.49	227	69.03	350	58.97
4. การเร่งและหน่วงความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียลโดยใช้เทคนิคการหาโปรไฟล์ความเร็ว	137	57.59	167	77.22	233	72.68

5.6 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิดโดยใช้เทคนิคการหาโปรไฟล์ความเร็วจะให้ลักษณะของโปรไฟล์ความเร็วสำหรับการเคลื่อนที่เป็นแบบเอ็กโปเนนเชียล และมีระยะเวลาของการเคลื่อนที่จากจำนวนสเตปป์ที่ต้องการให้เคลื่อนที่น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การควบคุมแบบอื่นๆ และจากลักษณะของผลตอบสนองของการเคลื่อนที่แบบต่างจะเห็นว่ามอเตอร์เคลื่อนที่ได้ถูกต้องโดยไม่มีอาการออสซิลเลท (Oscillate) หรือเกิดการผิดพลาดทางตำแหน่ง เมื่อกำหนดให้ช่วงที่ปลอดภัย (Safety margin) โดยการนำค่าแรงบิดของมอเตอร์มาใช้ที่ 80 เปอร์เซ็นต์ของแรงบิดจริงที่มอเตอร์สร้างได้ และพบว่าเมื่อค่าของอินเนอเชียร์โหลดเพิ่มขึ้นจะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์ของเวลาในการเคลื่อนที่ที่ลดลงจะมีค่ามากขึ้นด้วย นั่นแสดงว่าเมื่อค่าอินเนอเชียร์ของระบบเพิ่มการควบคุมแบบวงเปิดโดยใช้เทคนิคการหาโปรไฟล์ความเร็วจะช่วยทำให้ระยะเวลาของการเคลื่อนที่น้อยลงได้มากเมื่อเปรียบเทียบกับ การควบคุมแบบวงเปิดแบบเดิม เพราะในการควบคุมแบบเดิมนั้นเมื่อค่าอินเนอเชียร์รวมของระบบเพิ่มความเร็วในการเริ่มหมุนจะยังมีค่าน้อยลง ทำให้ระยะเวลาการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น

จากการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะเห็นว่า การควบคุมแบบวงเปิดโดยใช้เทคนิคโปรไฟล์ความเร็วจะช่วยลดระยะเวลาของการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นถึงตำแหน่งเป้าหมายลงได้มากเมื่อเปรียบเทียบกับ การควบคุมแบบวงเปิดแบบเดิมและความเร็วสูงสุดที่มอเตอร์ตอบสนองได้ก็มีค่าเข้าใกล้กับการควบคุมแบบวงปิดที่เป็นความเร็วที่อยู่บนกราฟของแรงบิดพลูเอาท ซึ่งลักษณะของโปรไฟล์ความเร็วที่ได้มีลักษณะของการเร่งและหน่วงความเร็วเป็นแบบเอ็กโปเนนเชียล อัตราเร่งจะมีความชันมากในช่วงความเร็วต่ำและความชันมีค่าน้อยลงเมื่อมีความเร็วสูงๆ ซึ่งเป็นการควบคุมที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิด

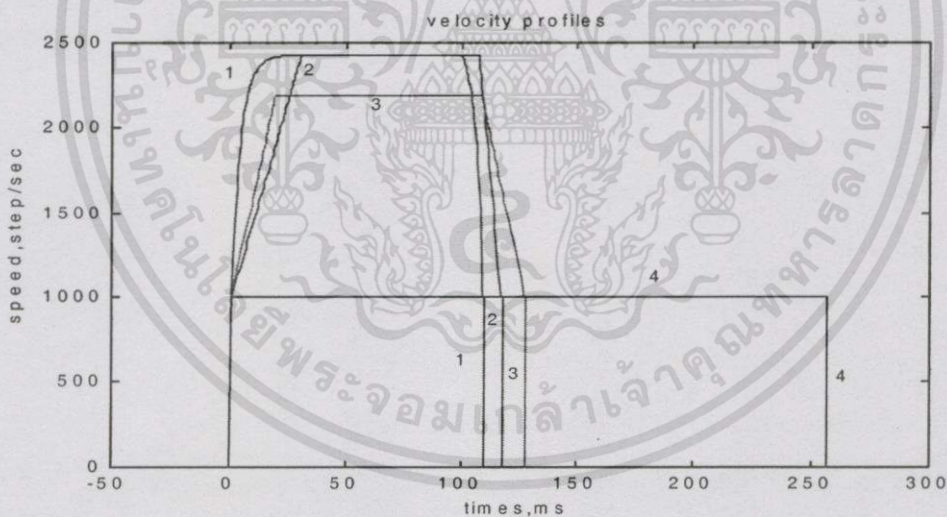
บทที่ 6

วิจารณ์ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 วิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองการควบคุมสเตรปปีงมอเตอร์แบบวงเปิดมีวิธีการควบคุมที่ง่ายและราคาถูก และ ความน่าเชื่อถือของการควบคุมทางด้านตำแหน่งก็อยู่ในระดับที่น่าพอใจ ถึงแม้ความเร็วที่ป้อนจะมีค่าต่ำกว่าที่มอเตอร์สามารถตอบสนองได้จริง เพราะต้องป้องกันการสูญหายของสเตรปเพื่อให้แน่ใจว่า มอเตอร์เคลื่อนที่ได้ถูกต้องทุกสเตรปตลอดการเคลื่อนที่

จากการทดลองควบคุมสเตรปปีงมอเตอร์แบบวงเปิด โดยวิธีการป้อนความถี่พัลส์ด้วยวิธีต่างๆ พบว่า การควบคุมมอเตอร์ด้วยเทคนิคการสร้างโปรไฟล์ความเร็ว ซึ่งได้จากการพิจารณาคูณลักษณะเฉพาะของแรงบิดพลูเอาท่าและความเร็วของมอเตอร์แต่ละตัวที่บ่งบอกถึงความสามารถของการ สร้างแรงบิดที่ความเร็วต่างๆ พบว่าการควบคุมแบบวงเปิด โดยวิธีการเร่งและหน่วงความเร็วแบบ เอ็กโปเนนเชียลที่ได้จากการหาโปรไฟล์ความเร็ว จะมีระยะเวลาการเคลื่อนที่น้อยที่สุด และไม่เกิด การสูญหายของสเตรป ดังแสดงในรูปที่ 6.1



- 1=การเร่งและหน่วงความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียล โดยเทคนิคการหาโปรไฟล์ความเร็ว
- 2=การเร่งและหน่วงความเร็วแบบ เชิงเส้น โดยเทคนิคการหาโปรไฟล์ความเร็ว
- 3=การเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้น โดยหาความเร็วที่ทำให้ระยะเวลาการเคลื่อนที่น้อยที่สุด
- 4=การเร่งและหน่วงความเร็วแบบ ความเร็วคงที่ ที่อยู่ในช่วงแรงบิดพลูอิน

รูปที่ 6.1 โปรไฟล์ความเร็วของการเร่งแต่ละแบบ

การควบคุมด้วยเทคนิคนี้จะให้ระยะเวลาการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นถึงตำแหน่งเป้าหมาย (point to point move) น้อยกว่าการควบคุมแบบวงเปิดด้วยการป้อนความเร็วคงที่หรือการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้น เพราะความเร็วที่ป้อนในแต่ละสเตปจะสอดคล้องกับการสร้างแรงบิดของมอเตอร์มากกว่าวิธีอื่น จะสังเกตได้อย่างชัดเจนช่วงเริ่มการเคลื่อนที่จะมีความชันของอัตราเร่งมากเพราะแรงบิดของมอเตอร์ช่วงนี้มีค่ามาก และความชันของอัตราเร่งความเร็วจะมีค่าน้อยมากเมื่อมอเตอร์มีความเร็วใกล้ค่าสูงสุดที่มอเตอร์สามารถตอบสนองได้เพราะแรงบิดช่วงนี้มีค่าน้อย จะต่างกับการเคลื่อนที่แบบการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้น จะมีอัตราเร่งคงที่ทำให้ความเร็วที่เพิ่มในแต่ละสเตปของช่วงเริ่มหมุนช้าและการเพิ่มความเร็วในช่วงความเร็วใกล้ถึงค่าสูงสุดมีการเปลี่ยนแปลงสูงกว่าที่ควรจะเป็น ซึ่งไม่สอดคล้องกับการสร้างแรงบิดของมอเตอร์ ดังนั้นช่วงนี้อาจจะทำให้มอเตอร์เกิดการไม่ซิงโครนัส (nonsynchronous) กับอินพุทพัลส์ และเกิดการสูญเสียของสเตปได้ง่ายถ้าการกำหนดอัตราเร่งและอัตราหน่วงความเร็วไม่เหมาะสมจึงเป็นข้อเสียของการควบคุมแบบเชิงเส้นอย่างหนึ่ง ดังนั้นถ้าต้องการออกแบบการเร่งแบบเชิงเส้นจะต้องกำหนดอัตราเร่งและอัตราหน่วงความเร็วที่มีค่าต่ำซึ่งก็คือต้องกำหนดระยะเวลาของการเคลื่อนที่ให้มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้เวลาของการเคลื่อนที่มากกว่าการเร่งแบบเอ็กโปเนนเชียลมากขึ้นอีก และในการทำวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดให้ช่วงที่ปลอดภัย (Safety margin) ของมอเตอร์อยู่ที่ 80 เปอร์เซ็นต์ คือการใช้ค่าแรงบิดของมอเตอร์ที่ 80 เปอร์เซ็นต์ของแรงบิดจริงที่มอเตอร์สร้างได้ เนื่องจากเมื่อนำค่าแรงบิดที่ 90 เปอร์เซ็นต์ของมอเตอร์มาลองทดสอบทำให้มอเตอร์เกิดการเคลื่อนที่ผิดปกติขึ้น โดยจะเกิดการออสซิลเลทในบางค่าของอินเนอร์เชียร์โหลด ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดช่วงที่ปลอดภัยกว้างส่งผลให้ความเร็วสูงสุดที่มอเตอร์ตอบสนองได้มีค่าลดลง ดังนั้นในการใช้งานจริงควรจะมีการวัดแรงบิดพลูเอาท์ของมอเตอร์ในสถานะที่เราใช้งานจริงอีกครั้งเพื่อความถูกต้องของการควบคุม

จากผลการทดลองของการควบคุมแบบเชิงเส้นจะพบว่า การควบคุมแบบเชิงเส้นโดยการหาความเร็วที่ทำให้ระยะเวลาของการเคลื่อนที่น้อยที่สุดจะมีเวลาน้อยกว่าการควบคุมแบบเชิงเส้นโดยเทคนิคการหาโปรไฟล์ความเร็วเมื่ออินเนอร์เชียร์โหลดเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเห็นว่าความเร็วสูงสุดที่มอเตอร์ใช้เพื่อการหมุนมีค่าน้อยกว่าความเร็วสูงสุดที่มอเตอร์สามารถตอบสนองได้ นั่นคือแรงบิดที่ใช้ที่ความเร็วนี้ทำให้มีอัตราเร่งมากกว่า ดังนั้นในการควบคุมแบบเชิงเส้นโดยการใช้เทคนิคการหาความเร็วที่ทำให้ระยะเวลาการเคลื่อนที่น้อยที่สุดจะดีกว่าการควบคุมแบบเชิงเส้นโดยใช้เทคนิคการหาโปรไฟล์ความเร็ว เมื่อระบบมีค่าอินเนอร์เชียร์โหลดเพิ่มขึ้น

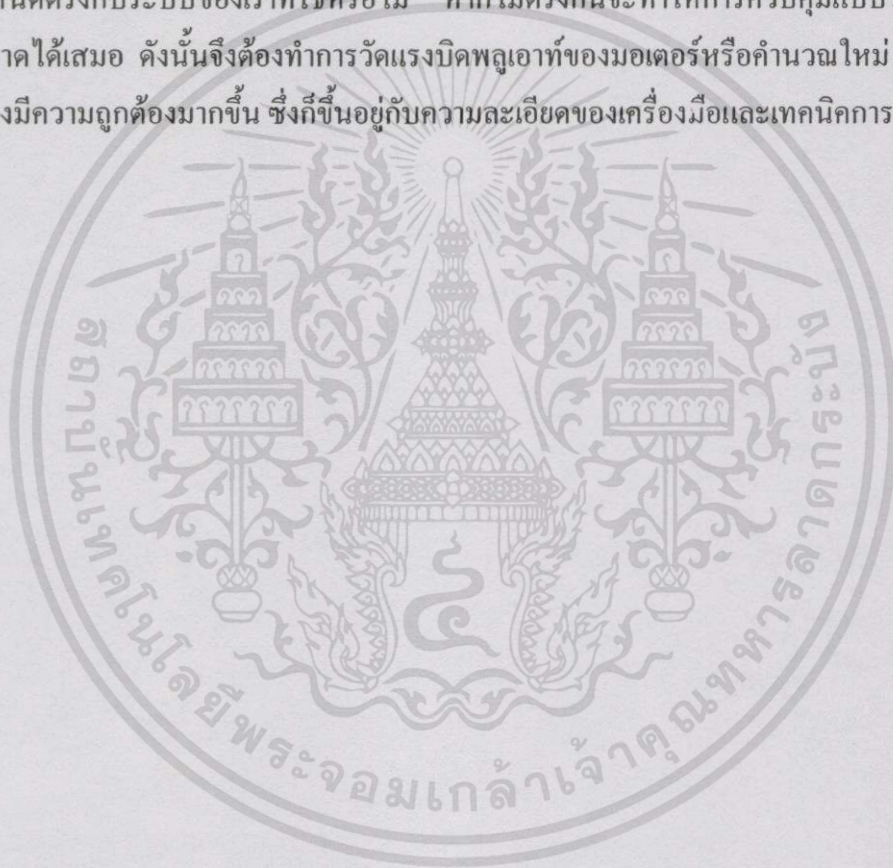
ดังนั้นการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียลจะมีความเหมาะสมมากกว่าการเร่งและหน่วงความเร็วแบบเชิงเส้นหรือแบบความเร็วคงที่ซึ่งเป็นวิธีแบบเดิม และวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะสามารถสร้างโปรไฟล์ความเร็วที่เหมาะสมกับการใช้งานของมอเตอร์แต่ละตัวได้โดยไม่เกิดการสูญเสียของสเตป ไม่เกิดความยุ่งยากเหมือนวิธีแบบเดิมที่ใช้วิธีแบบซุ่ม และวิธีการควบคุมก็ง่ายมีความยืดหยุ่น เมื่อแรงบิดโหลดของระบบเปลี่ยนไปก็สามารถทำการคำนวณใหม่ได้โดยไม่ยุ่งยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพียงเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรในโปรแกรมการสร้างพัลส์ใหม่เท่านั้น ซึ่งจะดีกว่าการควบคุมโดยวิธีทางฮาร์ดแวร์อย่างเดียว ทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

การควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบวงเปิดนั้น การควบคุมสามารถเกิดความผิดพลาดได้ในแต่ละสเตปของการเคลื่อนที่หากแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นไม่ตรงกับความเร็วที่เราต้องการให้มอเตอร์หมุน ดังนั้นความสำคัญของการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบวงเปิดจึงขึ้นอยู่กับความถูกต้องของการวัดแรงบิด การนำข้อมูลของทางบริษัทผู้ผลิมาใช้จะต้องพิจารณาพารามิเตอร์ของระบบที่ทางบริษัทกำหนดตรงกับระบบของเราที่ใช้หรือไม่ หากไม่ตรงกันจะทำให้การควบคุมแบบวงเปิดเกิดการผิดพลาดได้เสมอ ดังนั้นจึงต้องทำการวัดแรงบิดพลูเอาท์ของมอเตอร์หรือคำนวณใหม่ จะทำให้การทดลองมีความถูกต้องมากขึ้น ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับความละเอียดของเครื่องมือและเทคนิคการวัดด้วย



เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Miyamoto and C. Goedel, "A Microprocessor-Based Time Optimal Control of A Variable-Reluctance Step Motor", IEEE transactions on Industrial Electronics, Vol. IE-29, No.3, August 1982.
- [2] P.P. Acarnley, "Stepping Motor ; A Guide to Modern Theory and Practice", IEE Control Engineering Series 19, 2nd Edition, Peter Peregrinus Ltd., London, 1984.
- [3] T. Kenjo, "Stepping Motors and Their Microprocessor Controls", Department of Electrical Engineering and Power Electronics, University of Industrial Technology, Kanagawa, Japan, 1990.
- [4] W.D. Page, G. Singh, B.C. Kuo, "Application of a Computer Control to a Study of Open-Loop Acceleration of Step Motors", IEEE Transactions of Industrial Electronics and Control Instrumentation, Vol. IECI-22, No.2, May 1975.
- [5] T. Wildi, "Electrical Machines, Drives and Power Systems", Practice Hall, 2nd edition, 1991.
- [6] B.C. Kuo, "Step Motors and Control Systems", University of Illinois at Urbana Champaign, SRL Publishing, 1979.
- [7] A. Kent Stiffler, "Design with Microprocessors for Mechanical Engineers", Mechanical and Nuclear Engineering Department Mississippi State University, McGraw-Hill, Inc., 1992.
- [8] B.C. Kuo and R.H. Brown, "The Step Motor Time-Optimal Control Problem", Proceeding Annual Symposium on Incremental Motion Control System and Device, Department of Electrical and Computer Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, 1987.
- [9] G. James, "Modern Engineering Mathematics," Addison Wesley, pp. 660-665, 1994.
- [10] สมยศ จุณณะปิยะ, "การประยุกต์ใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51", คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พิมพ์ครั้งที่ 2, พ.ศ. 2541.
- [11] ชลรัฐ ทองเจือ, นนทวัฒน์ จุลเคชะ, โยธิน เปรมปราชญ์, "การควบคุมสแตปปีงมอเตอร์แบบวงเปิดด้วยเทคนิคโปรไฟล์ความเร็ว," วิศวสารลาดกระบัง, ปีที่ 17 ฉบับที่ 1, มีนาคม พ.ศ. 2543.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิดด้วยเทคนิค โปรไฟล์ความเร็ว

Open-Loop Stepping Motor Control by Using Velocity Profile Technique

ชลัฐ ทองเจือ นนทวัฒน์ จุลเคชะ โยธิน เปรมปราณีรัชต์

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิด ที่สามารถลดระยะเวลาระหว่างการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นถึงตำแหน่งเป้าหมายได้เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมแบบความเร็วคงที่ซึ่งอยู่ในช่วงแรงบิดพลู-อินท์หรือแบบอัตราเร่งและอัตราลดความเร็วในลักษณะเชิงเส้นแบบเดิม โดยสามารถหาอัตราเร่งและอัตราลดความเร็วของมอเตอร์ที่เหมาะสมจากคุณลักษณะของแรงบิดแบบพลวัตร ซึ่งเรียกว่าโปรไฟล์ความเร็วของมอเตอร์ จะได้อัตราเร่งและอัตราลดความเร็วเป็นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของมอเตอร์แต่ละชนิดที่โหลดคงที่ จากโปรไฟล์ความเร็วจะสามารถรู้ช่วงเวลาที่ต้องใช้ในการสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อป้อนแก่วงจรขับในแต่ละสเตปป์ได้โดยใช้วิธีการคำนวณทางตัวเลข ความเร็วสูงสุดที่มอเตอร์ตอบสนองได้จะสูงขึ้น โดยไม่เกิดการสูญหายของสเตปป์ระหว่างการเคลื่อนที่

Abstract

This paper presents the open-loop stepping motor control to positioning times can be reduced during point-to-point move when comparing either constant velocity which is in pull-in torque range or linear acceleration and deceleration. This method found appropriate acceleration and deceleration capability from dynamic torque characteristic. The appropriate acceleration and deceleration is called 'velocity profile', which is exponential acceleration and deceleration. The velocity profile can be known accuracy switch time to generated pulse signal applied to drive circuit in each step which is solved by numerical method. The maximum frequency is higher than conventional method and without loss of step.

1. บทนำ

สเตปป์มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนกำลังแบบดิจิทัลที่ต่ำคณูอย่างหนึ่ง สามารถทำงานโดยการรับสัญญาณพัลส์เพื่อเปลี่ยนเป็นการเคลื่อนที่ทางกล มีการหมุนเป็นสเตปป์ที่มีค่ามุมคงที่ ข้อดีอย่างหนึ่งของสเตปป์มอเตอร์ที่ดีกว่า

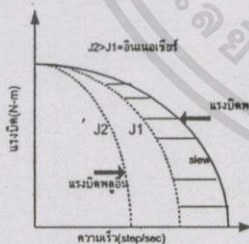
มอเตอร์กระแสตรงคือ ความสามารถในการทำงานแบบวงเปิด ที่มีการควบคุมที่ง่ายและให้ความเชื่อถือทางด้านตำแหน่งได้ดี จึงเหมาะนำไปใช้งานต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมทางตำแหน่งที่ต้องการความถูกต้อง เช่น x-y พล็อตเตอร์, พรีนเตอร์, เครื่องมือทางกล, เครื่องพิมพ์ดีด

การใช้งานสเตรปมอเตอร์แบบวงเปิดในปัจจุบัน จะเป็นการควบคุมแบบป้อนความเร็วคงที่ซึ่งเป็นความเร็วที่อยู่ในช่วงของแรงบิดพลู-อินท์[3]ซึ่งเป็นความเร็วที่มอเตอร์สามารถเริ่มและหยุดหมุนหรือเปลี่ยนทิศทาง การเคลื่อนที่โดยทันทีได้ แต่มีค่าต่ำประมาณ 100-400 เฮิร์ตซึ่งสามารถแก้ไขให้สูงขึ้น โดยการปรับปรุงวงจรขับ [6]ขึ้นอยู่กับค่าอินเนอร์เซียของระบบด้วย ทำให้เสียเวลา มาก จึงเป็นข้อเสียอย่างหนึ่ง

บทความนี้นำเสนอวิธีการควบคุมสเตรปมอเตอร์แบบวงเปิดด้วยเทคนิคของโปร ไฟล์ความเร็ว โดยสามารถหาอัตราเร่งและอัตราลดความเร็วของมอเตอร์ที่เหมาะสม จากคุณลักษณะของแรงบิดแบบพลวัต จะได้อัตราเร่งและอัตราลดความเร็วแบบเอ็ก โพรเนนเชียลซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัวของมอเตอร์แต่ละชนิดที่ไหลคดงที่ จากโปรไฟล์ความเร็วจะสามารถรู้ช่วงเวลาที่ถูกต้องการสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อป้อนแก่วงจรขับในแต่ละสเตรปได้

2. ความหมายคุณลักษณะของแรงบิดพลวัต

การใช้งานมอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพนั้นเราต้องรู้คุณลักษณะต่างๆที่มีความสัมพันธ์กันเช่น กระแสกับแรงบิด , แรงบิดสถิตย์(static torque)และที่สำคัญคือแรงบิดแบบพลวัต(dynamic torque)ของมอเตอร์ที่ประกอบด้วยแรงบิดพลูอินและพลูเอาต์ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 คุณลักษณะของแรงบิดพลวัต

แรงบิดพลูอิน(pull-in torque) คือ อธิบายถึงคุณลักษณะของแรงเสียดทานแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถเริ่มและหยุดหมุนได้ทันที ที่ระบุความเร็วต่างๆ โดยไม่เกิดการสูญหายของสเตรป แรงบิดนี้ขึ้นอยู่กับอินเนอร์เซียของระบบ เมื่ออินเนอร์เซียเปลี่ยนลักษณะของกราฟเส้นนี้จะเปลี่ยนไปด้วย

แรงบิดพลูเอาต์(pull-out torque) คือ คุณลักษณะของแรงบิดไหลคดมากที่สุดที่มอเตอร์สามารถเอาชนะและหมุน

ได้ที่ความเร็วที่ระบุต่างๆก่อนเกิดการสูญเสียการซิงโครไนซ์ (synchronous)กับจำนวนพัลส์ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของการขับ ชุดขับ และชนิดของการควบคุม

แรงบิดสองอย่างนี้ได้จากบริษัทผู้ผลิตหรือจากการวัดทางกลที่ง่ายแบบโพรนิเบรก(prony brake)[4]

3. การหาความสามารถของอัตราเร่งและอัตราลดความเร็วของมอเตอร์

การควบคุมแบบวงเปิดนั้นมอเตอร์ต้องเริ่มหมุนด้วยความเร็วในช่วงพลูอินซึ่งมีค่าต่ำ แต่ในการควบคุมแบบวงเปิดเดิมจะให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็วนี้ตลอด ทำให้ระยะเวลาระหว่างการเคลื่อนที่มาก เราสามารถลดเวลาตรงนี้ได้ โดยการเร่งความเร็วขึ้นจนถึงความเร็วที่สูงเกือบใกล้ถึงขอบเส้นโค้งของช่วงพลูเอาต์และเมื่อใกล้ถึงตำแหน่งเป้าหมายจึงลดความเร็วลงให้อยู่ในช่วงพลูอิน มอเตอร์ก็สามารถหยุดได้ แต่การเพิ่มและลดความเร็วของมอเตอร์ไม่สามารถทำอย่างทันทีทันใด เพราะจะทำให้เกิดการสูญหายของสเตรปหรือหมุนเลขตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการหยุด ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดอัตราเร่งและลดความเร็วอย่างเหมาะสม[3] มีหลายวิธีเช่น เริงเส้น พาราโบลา เอ็กโปเนนเชียล -ซึ่งจากการศึกษาที่เหมาะสมจะเป็นแบบเอ็กโปเนนเชียล[2] แต่ที่นิยมใช้เป็นแบบเริงเส้นซึ่งง่ายต่อการควบคุม โดยกำหนดแรงบิดที่มอเตอร์สร้างได้มีค่าคงที่ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากแรงบิดที่ความเร็วเริ่มสเตรปแล้วลดลงเป็นศูนย์ที่ความเร็วสูงสุดที่มอเตอร์ตอบสนองได้[4,5]

เนื่องจากไม่สามารถรู้จำนวนสเตรปที่เคลื่อนที่ได้ถูกต้องตามจำนวนพัลส์ที่ป้อนให้หรือในกรณีที่มีมอเตอร์และไหลคดมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเพื่อป้องกันการสูญหายของสเตรป จึงต้องกำหนดเปอร์เซ็นต์ของแรงบิดที่น้อยกว่า 100 % ที่มอเตอร์สร้างได้จริงมาใช้ซึ่งเรียกว่าช่วงปลอดภัย (safety margin) แต่การเลือกระยะปลอดภัยกว้างจะทำให้ระยะเวลาในการเคลื่อนที่มากดังนั้นจึงต้องเลือกระยะเวลาและระยะปลอดภัย[1] ในการควบคุมแบบวงเปิดเราไม่สามารถระบุค่านวลวดตรงตำแหน่งที่มอเตอร์สร้างแรงบิดมากที่สุดได้ จึงจำเป็นต้องนำคุณลักษณะแรงบิดพลวัตมาพิจารณา แก้สมการหาเวลาการสวิตซ์ในแต่ละสเตรปโดยใช้วิธีการคำนวณทางตัวเลขดังนี้

3.1 การคำนวณช่วงการเร่งความเร็ว

$$T(f) = T_1(f) + D\omega + J \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (1)$$

$$D\omega = 0, \theta_s = \frac{2\pi}{np}$$

เมื่อมอเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความถี่ \$f\$ ธรรมดา คือมอเตอร์เคลื่อนที่
ได้ระยะทาง \$(2\pi/np) * f\$ ระยะเวลา = \$\theta\$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{2\pi * f}{np} = \frac{\text{distance}}{\text{times}} \quad (2)$$

$$t = \frac{2\pi J}{np} \int_0^f \frac{1}{T(f) - T_1(f)} df \quad (3)$$

จากลักษณะกราฟแรงบิด กำหนดสมการขึ้นแทนความ
สัมพันธ์ระหว่างแรงบิดมอเตอร์และความเร็ว ดังนี้

$$T(f) = T_m \quad (4)$$

$$T(f) = T_m - \alpha(f_2 - f) \quad (5)$$

สมการ(4)คือแรงบิดมอเตอร์ในช่วงความถี่ \$0 < f < f_1\$ Hz

สมการ(5)คือแรงบิดมอเตอร์ในช่วงความถี่ \$f_1 < f < f_2\$ Hz จาก

สมการ (3) คำนวณหาเวลา ดังนี้

\$t_1\$ = เวลาในการเร่งจาก 0 ถึง 0 Hz

\$t_2\$ = เวลาในการเร่งจาก 0 ถึง 1 Hz

\$t_n\$ = เวลาในการเร่งจาก 0 ถึง \$f\$ Hz (ความถี่สูงสุดที่มอเตอร์
สามารถตอบสนองได้โดยไม่มีการสูญหายของสเตป)

$$T = [t_1, t_2, t_3, \dots, t_n]$$

\$T\$ = เซตของเวลาที่ใช้ในการเร่งที่แรงบิดไหลลดค่าหนึ่ง

$$t = T(f_1+1) - T(f_1) \quad (6)$$

\$t\$ = เวลาในการเคลื่อนที่จากความเร็วเริ่มต้น (\$f_1\$) ถึงความเร็ว
สูงสุดที่มอเตอร์ตอบสนองได้ (\$f_2\$) จากนั้นหาจำนวนส
เตปในการเร่งโดยใช้ความสัมพันธ์สมการเคลื่อนที่ทั่วไป

$$x = \int v dt \quad (7)$$

\$x\$ = ระยะทาง, \$v\$ = ความเร็ว

หาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา [4] โดยการ
แก้สมการการเคลื่อนที่ที่ลวัตร์ดังนี้

$$T(f) = T_1(f) + D\theta_s f + J\theta_s \frac{df}{dt}, D\theta_s f = 0 \quad (8)$$

แก้สมการดิฟเฟอเรนเชียลข้างบน [7] จะให้ความสัมพันธ์

$$f = f(J, T_m, T_1, \alpha) \quad (9)$$

$$x(t) = \int f dt \quad (10)$$

$$x(t_2) - x = 0 \text{ โดย } x = 1, 2, 3, \dots, m \quad (11)$$

\$m\$ = จำนวนสเตปที่ใช้ระหว่างการเร่งความเร็ว จาก \$f_1\$ ถึง \$f_2\$
แก้สมการที่(11)หาเวลา \$t_x\$ โดยการคำนวณทางตัวเลข

$$t_0 = 0 \quad (12)$$

$$\Delta t_x = t_x - t_{x-1} \quad (13)$$

สมการที่(13) คือ ความเร็วที่ป้อนในแต่ละสเตปเพื่อการเร่ง
3.2 การคำนวณช่วงการลดความเร็ว

การลดความเร็วแรงบิดของมอเตอร์ต้องเป็นลบทำให้สม
การการเคลื่อนที่เป็นดังนี้

$$-T_b(f) = T_1(f) + J\theta_s \frac{df}{dt} \quad (14)$$

คำนวณเหมือนการเร่งความเร็วจะได้สมการเพื่อหาเวลา
และความเร็วที่ป้อนมอเตอร์ดังสมการข้างล่างนี้

$$t_d = -\frac{2\pi J}{np} \int_{f_2}^{f_1} \frac{1}{T_b(f) + T_1(f)} df \quad (15)$$

$$f_d = f(J, T_m, T_b, \alpha, t_d) \quad (16)$$

$$x_d(t) = \int f_d dt \quad (17)$$

$$x_d(t_d) - d = 0 \text{ โดย } d = 1, 2, 3, \dots, i \quad (18)$$

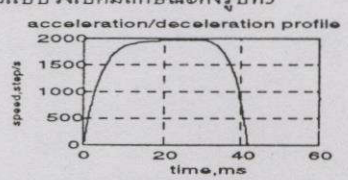
$$t_0 = \frac{1}{f_2} \quad (19)$$

$$\Delta t_d = t_d - t_{d-1} \quad (20)$$

$$f_d = \frac{1}{\Delta t_d} \quad (21)$$

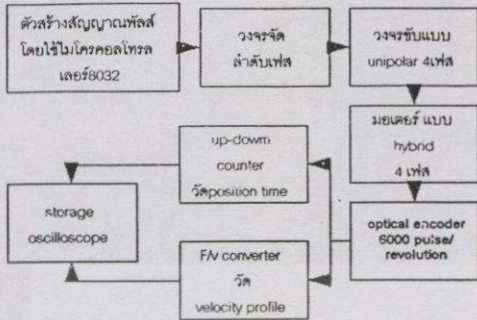
\$i\$ = จำนวนสเตปในการลดความเร็วจาก \$f_2\$ ถึง \$f_1\$

สมการ(21) คือความเร็วสำหรับป้อนให้มอเตอร์ซึ่งเวลาที่
ใช้จะน้อยกว่าการเร่งความเร็ว จากการคำนวณความ
สามารถของการเร่งและลดความเร็วของมอเตอร์ที่ค่าแรง
บิดไหลลดค่าหนึ่ง จะมีลักษณะเป็นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล
(exponential acceleration and deceleration) ดังรูปที่ 2 เรียก
ว่าโปรไฟล์ความเร็ว นำโปรไฟล์ที่ได้ไปใช้เพื่อป้อนให้
มอเตอร์ในแต่ละสเตปตามจำนวนของสเตปที่ต้องการตาม
เงื่อนไขของการเลือกตั้งโพลาร์ซาร์ทในรูปที่ 4 และระบบ
ควบคุมแบบวงเปิดมีลักษณะดังรูปที่ 3



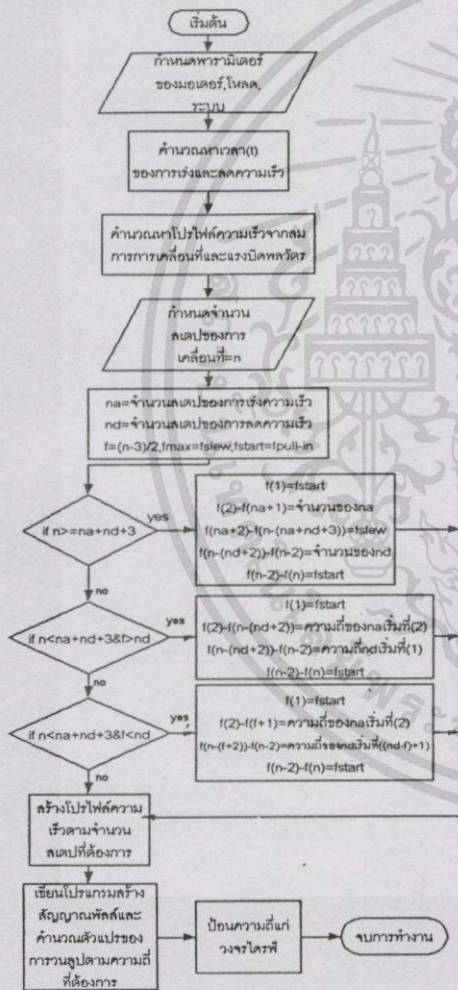
รูปที่ 2 แสดงโปรไฟล์ความเร็วของการเร่งและลดความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 บล็อกไออะแกรมการควบคุมแบบวงเปิด

4. โพลีชาร์ทการสร้างโปรไฟล์ความเร็ว



รูปที่ 4 แสดงโพลีชาร์ทการหาโปรไฟล์ความเร็ว

5. รายละเอียดต่างๆของสเปคปั๊มมอเตอร์ดังนี้

ความยาวสเปค 1.8 องศา จำนวน 200 สเตปต่อรอบ แรงดัน/เฟส 60 V กระแสเฉลี่ย/เฟส 0.5 A ค่าความต้านทานขดลวด/เฟส 120 Ω ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด/

เฟส 19.5 mH ค่าความเฉื่อยของโรเตอร์ $56.4 \times 10^{-2} \text{ oz-in}^2$ แรงบิดฝืด(frictional torque)ของเอนโค้ดเดอร์ 1.0 oz-in = 0.00706 N-m ค่าความเฉื่อยของเอนโค้ดเดอร์ $5.2 \times 10^{-4} \text{ oz-in-sec}^2$ อินเนอเชียร์รวมของระบบ 0.000013982 Kg-m² จำนวนสเตปเคลื่อนที่ 256 สเตป วงจรขับเป็นแบบยูนิโพลาร์ 4 เฟส กำหนด safety margin 5% คือแรงบิดที่นำมาใช้จริง 95% ของแรงบิดที่มอเตอร์สร้างได้จริงจากการวัดแรงบิดพลูอาท์โดยวิธีพรอนีเบรก(prony brake) สมการแทนแรงบิดเป็นแบบเชิงเส้น 2 สมการ

6. การทดลองป้อนความเร็วที่ได้จากโปรไฟล์ความเร็วแก่สเปคปั๊มมอเตอร์

6.1 การเคลื่อนที่แบบเคิม

6.1.1 แบบความเร็วคงที่ คือความเร็วในช่วงพลูอินที่มอเตอร์สามารถเริ่มหมุนได้ที่ค่าโหดคงที่ที่ระบุไว้

6.1.2 แบบการเร่งและลดความเร็วเชิงเส้น โดยใช้เทคนิคการหาความเร็วที่ทำให้ระยะเวลาระหว่างการเคลื่อนที่น้อยที่สุด(minimum times)[3] หาได้จากสมการข้างล่างนี้

$$a = \frac{T_m - T_l}{J} \tag{22}$$

$$t = \frac{v-u}{a}, s = \frac{t \times (v+u)}{2} \tag{23}$$

โดย T_m คือ แรงบิดที่ความเร็วใดๆในช่วงเริ่มหมุนถึงความเร็วมากที่สุดที่มอเตอร์ตอบสนองได้ที่ทำให้เวลาในการเคลื่อนที่น้อยที่สุด $u =$ ความเร็วเริ่มหมุน, $v =$ ความเร็วที่ให้เวลาน้อยที่สุด(สเตปต่อวินาที)

เมื่อรู้จำนวนสเตปทั้งหมดในการเร่งจะหาความเร็วที่ใช้ป้อนมอเตอร์ในแต่ละสเตปดังสมการข้างล่างนี้

$$s = \frac{v^2 - u^2}{2a} \tag{24}$$

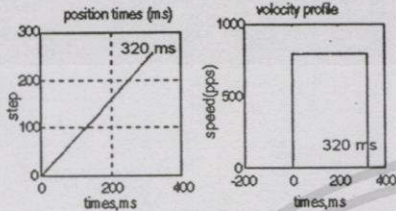
$s =$ จำนวนสเตปในการเร่ง และแก่สมการที่ 24 หาก a เป็นแต่ละสเตปที่เคลื่อนที่จาก 1 ถึง s สเตปเพื่อป้อนแก่มอเตอร์ ซึ่งการลดความเร็วก็ใช้สมการที่ 24 เหมือนกันแต่ a ต้องเป็นลบและจำนวนสเตปเท่ากับการเร่งความเร็ว

6.2 การเคลื่อนที่โดยใช้เทคนิคโปรไฟล์ความเร็ว

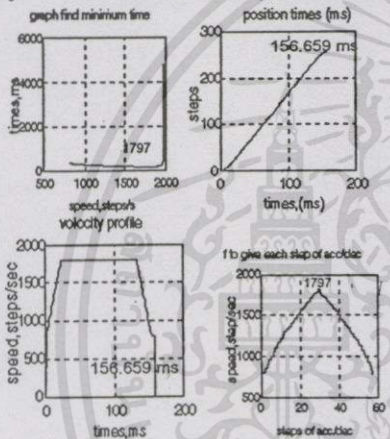
6.2.1. แบบการเร่งและลดความเร็วเชิงเส้น โดยการหาช่วงเวลาของการเร่งและลดความเร็วจากสมการที่ 3 และ 15 ตามลำดับจากนั้นใช้สมการที่ 23 และ 24 หาความเร็วที่ใช้ป้อนแต่ละสเตปของการเร่งและลดความเร็ว

6.2.2 แบบการเร่งและลดความเร็วเอ็กโปเนนเชียล มีการคำนวณคงในหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2

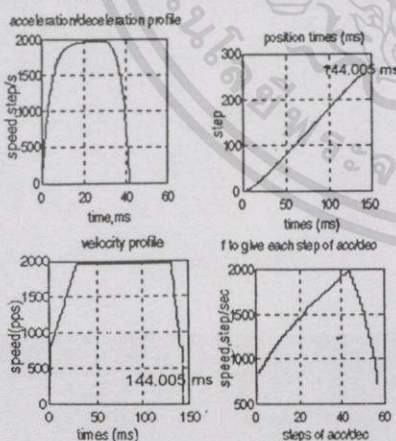
7. ผลการทดลองควบคุมสเปคปีมอเตอร์



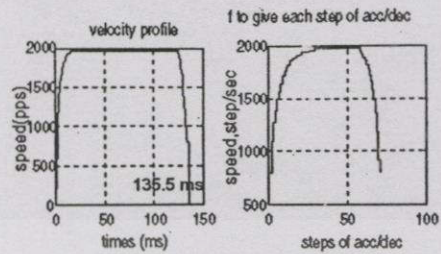
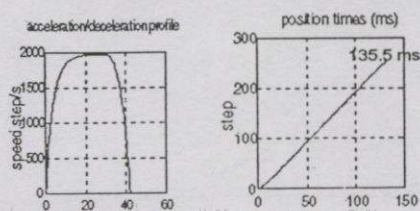
รูปที่ 5 โปรไฟล์ความเร็วแบบความเร็วเชิง



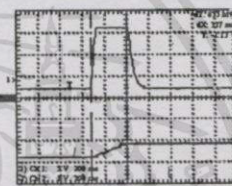
รูปที่ 6 โปรไฟล์ความเร็วแบบการเร่งและลดความเร็วเชิงเส้นโดยหาความเร็วที่ให้เวลาการเคลื่อนที่น้อยที่สุด



รูปที่ 7 โปรไฟล์ความเร็วการเร่งและลดความเร็วแบบเชิงเส้นโดยใช้เทคนิคการหาโปรไฟล์ความเร็วก่อน



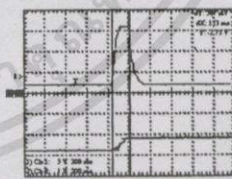
รูปที่ 8 โปรไฟล์ความเร็วการเร่งและลดความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียลโดยใช้เทคนิคการหาโปรไฟล์ความเร็วโปเนนเชียลโดยใช้เทคนิคการหาโปรไฟล์ความเร็วรูปที่ 5,6,7,8 แสดงผลการทดลองของเวลาทางตำแหน่งที่จำนวนสเตปการเคลื่อนที่ 256 สเตปและโปรไฟล์ความเร็วจากการคำนวณในหัวข้อที่ 6



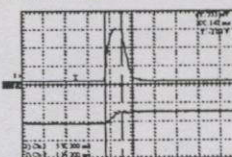
รูปที่ 9 โปรไฟล์ความเร็วแบบความเร็วเชิงเวลาที่ dx:327 ms



รูปที่ 10 โปรไฟล์ความเร็วแบบการเร่งและลดความเร็วเชิงเส้นโดยการหาความเร็วที่ให้เวลาการเคลื่อนที่น้อยที่สุดเวลาการเคลื่อนที่ dx:160 ms



รูปที่ 11 โปรไฟล์ความเร็วการเร่งและลดความเร็วแบบเชิงเส้นโดยใช้เทคนิคการหาโปรไฟล์ความเร็ว เวลาการเคลื่อนที่ dx:153 ms



รูปที่ 12 โปรไฟล์ความเร็วการเร่งและลดความเร็วแบบเอ็กโปเนนเชียลโดยใช้เทคนิคการหาโปรไฟล์ความเร็ว เวลาการเคลื่อนที่ dx : 147 ms

รูปที่ 9,10,11,12 ช่องสัญญาณ 1 แสดงโปรไฟล์ความเร็ว

ช่องสัญญาณ 2 แสดงผลเวลาการเคลื่อนที่จากการทดลอง

ตารางที่ 1 แสดงผลระยะเวลากการเคลื่อนที่

ประเภทการป้อนความเร็วแบบต่างๆ	ระยะเวลาจากการคำนวณ(ms)	ระยะเวลาจากการเคลื่อนที่จริง(ms)
1. แบบความเร็วคงที่แบบวิธีเดิม	320	327 (ข้างอิง)
2. แบบการเร่งและลดความเร็วแบบจริงกันแบบเดิม	156.659	160 (ลดลง 51.07%)
3. แบบการเร่งและลดความเร็วจริงเห็นโดยหาไปหาค่าความเร็ว	144.005	153 (ลดลง 53.21%)
4. แบบการเร่งและลดความเร็วอีกไปบนเครื่องโดยหาไปหาค่าความเร็ว	135.5	147 (ลดลง 55.04%)

8. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองควบคุมสเปคปีงมอเตอร์แบบวงเปิดโดยวิธีการป้อนความเร็วด้วยวิธีต่างๆ จะได้ผลของเวลาตั้งตารางที่ 1 พบว่าการเร่งและลดความเร็วแบบเอ็กไปบนเซ็ลจะมีระยะเวลาการเคลื่อนที่น้อยที่สุดเพราะความเร็วที่ป้อนในแต่ละสเปคจะสอดคล้องกับการสร้างแรงบิดของมอเตอร์มากกว่าวิธีอื่น จะสังเกตได้อย่างชัดเจนช่วงเริ่มการเคลื่อนที่จะมีความชันของกราฟมากเพราะแรงบิดของมอเตอร์ช่วงนี้มีค่ามาก และความชันของความเร็วที่เพิ่มจะมีค่าน้อยมากเมื่อมอเตอร์มีความเร็วใกล้ค่าสูงสุดที่มอเตอร์สามารถตอบสนองได้เพราะแรงบิดช่วงนี้มีค่าน้อย จะค่างกับการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น จะมีอัตราเร่งคงที่ที่ทำให้ความเร็วที่เพิ่มในแต่ละสเปคของช่วงเริ่มหมุนช้ากว่าที่ควรจะเป็นและการเพิ่มความเร็วในช่วงความเร็วใกล้ถึงค่าสูงสุดมีการเปลี่ยนแปลงสูงกว่าซึ่งไม่สอดคล้องกับการสร้างแรงบิดของมอเตอร์ ดังนั้นช่วงนี้อาจจะทำให้มอเตอร์เกิดการสูญหายของสเปคได้ง่าย

9. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณโครงการ ReCCIT ที่ให้ความช่วยเหลือแก่ผู้ทำการวิจัยด้านเครื่องมือวัดต่างๆ

10. เอกสารอ้างอิง

[1] B.C. Kuo, R.H. Brown, "The Step Motor Time-Optimal Control Problem," Proceeding Annual Symposium on Incremental Motion Control System and Devices, Department of Electrical and Computer Engineering University of Illinois at Urbana- Champaign, Urbana, Illinois, 1987.

[2] W.D. Page, G. Singh, B.C. Kuo, "Application of a Computer Control to a Study of Open-Loop Acceleration of Step Motors," IEEE Trans. Industrial Electronic and control Instrumentation, Vol. IECI-22, No.2, May 1975.

[3] P.P. Acarnley, "Stepping Motor: A Guide to Modern Theory and Practice," IEE Control Engineering Series, No.19, 2nd Edition, Peter Peregrinus Ltd., London, UK, 1984.

[4] T. Kenjo, "Stepping Motors and Their Microprocessor Controls," Department of Electrical Engineering and Power Electronics, University of Industrial Technology, Kanagawa, Japan, 1990.

[5] A. K. Stiffler, "Design with Microprocessors for Mechanical Engineers," Mechanical and Nuclear Engineering Department Mississippi State University, McGraw-Hill, Inc., 1992.

[6] P.J. Lawrenson, A. Hughes, P.P. Acarnley, "Improvement and Prediction of Open-Loop Starting/Stopping rates of Stepping Motors," Proceeding IEE, Vol. 124, No.2, February 1977.

[7] G. James, "Modern Engineering Mathematics," Addison Wesley, pp. 660-665, 1994.

11. ภาคผนวก

f = ความเร็วในการเคลื่อนที่ (สเปค/วินาที)

f_x, f_d = ความเร็วแต่ละสเปคของการเร่งและลดความเร็ว

t_x, t_d = เวลาของการเร่งและลดความเร็ว (วินาที)

x, x_d = จำนวนสเปคของการเร่งและลดความเร็ว (สเปค)

$\Delta t_x, \Delta t_d$ = ช่วงเวลาการสวิตซ์ของการเร่งและลดความเร็ว

J = อินเนอเช็ยร์รวมของระบบ (กิโกลรัม-เมตร²)

T, T_m, T_h = แรงบิดมอเตอร์ (นิวตัน-เมตร), T_l = แรงบิดโหลด

(นิวตัน-เมตร), T_{max} = ค่าแรงบิดสูงสุดของสมการแรงบิด

(นิวตัน-เมตร), α = ค่าความชันคงที่ของสมการแรงบิด

θ_s = ความยาวสเปค(เรเดียน), p = จำนวนฟันโรเตอร์

D = สัมประสิทธิ์การหน่วงแบบความหนืดคงที่

ω = ความเร็วเชิงมุม(เรเดียน/วินาที), n = จำนวนเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นาย ชลรัฐ ทองเจือ เกิดเมื่อวันที่ 15 เมษายน พ.ศ. 2514 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก ปีการศึกษา 2537 จากนั้นเข้าศึกษาต่อที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้