

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542



การศึกษาพารามิเตอร์และคุณลักษณะของสเตปปีงมอเตอร์

STUDY PARAMETER AND CHARACTERISTIC OF STEPPING MOTOR



ศศ. พิชิต ล้ายอง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 36999
วัน, เดือน, ปี..... 30 ต.ค. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2542

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาพารามิเตอร์และคุณลักษณะของสเตปปีงมอเตอร์

ผู้จัดทำ

1. นายธนศ เหลือมทองหลวง
2. นายธนศ แซ่ห่อ
3. นายอนุชา สุวิบัว



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.พิชิต ถ้ายอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาพารามิเตอร์และคุณลักษณะของสเตปป์ิงมอเตอร์

นายธนศ เหลือมทองหลาง

นายธนศ แซ่หล้า

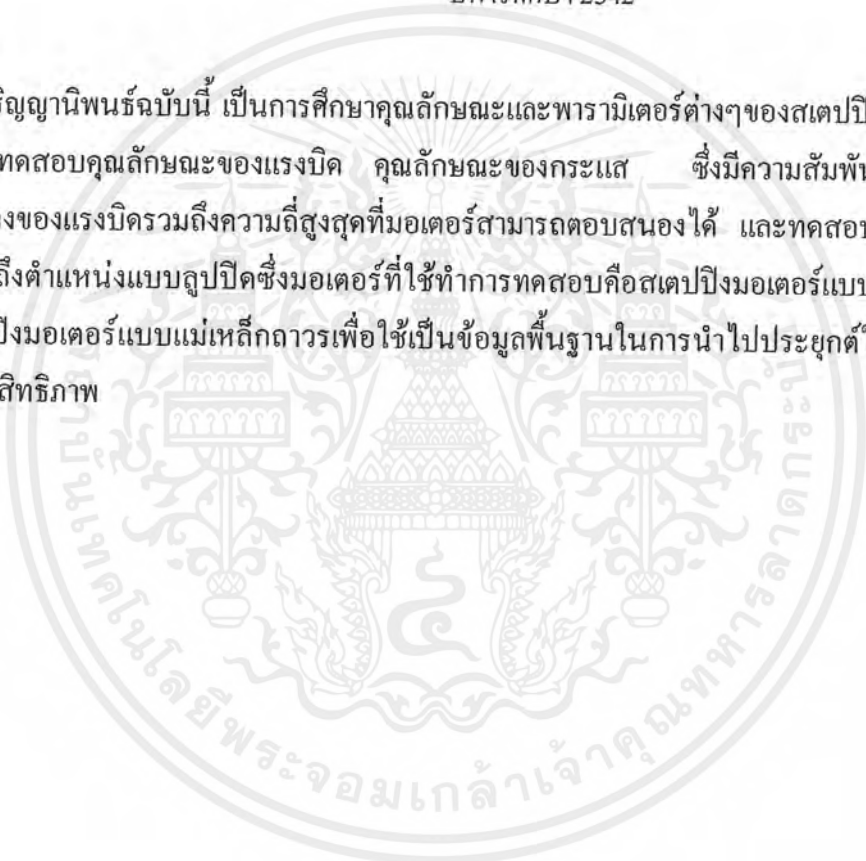
นายอนุชา สุวิบัว

ผศ. พิชิต ถ้ายอง อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2542

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาคุณลักษณะและพารามิเตอร์ต่างๆของสเตปป์ิงมอเตอร์ โดยทำการทดสอบคุณลักษณะของแรงบิด คุณลักษณะของกระแส ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดรวมถึงความถี่สูงสุดที่มอเตอร์สามารถตอบสนองได้ และทดสอบการควบคุมการเข้าถึงตำแหน่งแบบลูปปิดซึ่งมอเตอร์ที่ใช้ทำการทดสอบคือสเตปป์ิงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์ และสเตปป์ิงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



STUDY PARAMETER AND CHARACTERISTIC OF STEPPING MOTOR

Thanate Luamtonglang

Thanate Saclam

Anucha Suvibua

Asst.Prof. Pichit Lamyong Advisor

1999

ABSTRACT

The purpose of this thesis is present study parameter and parameter and characteristic of stepping motor, current characteristic and torque change, maximum frequency of motor can operate and testing close loop control in to position. Type of motor for testing are hybride stepping motor and permanent magnet stepping motor. For use database come applied job efficiently.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	IV
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ชนิดของสเตปป์ิงมอเตอร์และวงจรขับ	3
2.1 หลักการทำงานของสเตปป์ิงมอเตอร์	3
2.2 ประเภทของสเตปป์ิงมอเตอร์	4
2.2.1 สเตปป์ิงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Stepping Motor)	4
2.2.2 สเตปป์ิงมอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้ (Variable Reluctance Stepping Motor)	5
2.2.3 สเตปป์ิงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์ (Hybrid Stepping Motor)	6
2.3 วงจรขับสำหรับสเตปป์ิงมอเตอร์	8
2.3.1 การใช้ตัวต้านทานต่ออนุกรมกับวงจรขับ	9
2.3.2 การใช้วงจรขับแบบใช้แรงดันไฟฟ้าสองระดับ	10
2.3.3 การใช้วงจรขับแบบชอปเปอร์	11
2.3.4 การใช้วงจรขับแบบบริดจ์	12
2.4 การกระตุ้น (stepping motor Excitation)	14
บทที่ 3 ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า, โครงสร้างและคุณลักษณะทางไดนามิกของสเตปป์ิงมอเตอร์	19
3.1.1 กรณีที่แกนเหล็กมีค่าความซึมซาบของตัวกลางของแกนเหล็กมีค่านันต์	19
3.1.2 กรณีค่าความซึมซาบของตัวกลางมีค่าคงที่(constant permeability)	23
3.1.3 การรักษาสภาพความอิ่มตัวของแม่เหล็ก (treatment of magnetic saturation)	24
3.1.4 ผลกระทบจากความอิ่มตัวของแม่เหล็กต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพ (effect of saturation to improve efficiency)	27
3.1.5 ผลกระทบของค่าความเหนี่ยวนำร่วม (mutual inductance)	29
3.2 ทฤษฎีการสร้างแรงบิดในไฮบริดจ์สเตปป์ิงมอเตอร์	30
3.2.1 ผลของแม่เหล็กถาวรมีผลต่อแรงบิดอย่างไร	32
3.3 โครงสร้างของซี่ฟัน, จำนวนของซี่ฟัน, สเตปป์ต่อรอบ, และจำนวน โพล	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1 โครงสร้างของซีพิน	33
3.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนซีพิน, สเตปต่อรอบ และจำนวนของเฟส	35
3.4 คุณลักษณะของแรงบิดมีความสัมพันธ์กับความเร็วของสเตปปีงมอเตอร์	36
3.4.1 คุณลักษณะของแรงบิดพูลเอาท	36
3.4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมแรงบิดและความเร็ว	37
3.4.3 คุณลักษณะของแรงบิดพูลอิน	39
3.5 เรโซแนนซ์และการขาดเสถียรภาพ (resonance and instability)	39
3.5.1 เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำ	39
3.5.2 การขาดเสถียรภาพที่ย่านความถี่กลาง	39
3.5.3 ผลของการเปลี่ยนพารามิเตอร์มีผลทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ	40
3.5.4 การแกว่งตัวที่ย่านความถี่สูง	40
บทที่ 4 การทดสอบและการวัดคุณลักษณะของแรงบิด	42
4.1 การวัดคุณลักษณะทางสถิตย	42
4.1.1 คุณลักษณะของแรงบิดกับมุมสเตป	42
4.1.2 คุณลักษณะของแรงบิดกับกระแส	43
4.2 การวัดคุณลักษณะทางไดนามิก	44
4.2.1 คุณลักษณะของแรงบิดพูลอิน	44
4.2.2 คุณลักษณะของแรงบิดพูลเอาท	45
4.3 สมการการเคลื่อนที่และอัตราเร่ง	46
4.3.1 อัตราเร่ง (Acceleration)	46
4.3.2 การลดอัตราเร่ง (Deceleration)	48
4.3.3 การคำนวณจำนวนพัลส์ไปจนถึงอัตราการหมุนที่คงที่	49
4.3.4 การลดอัตราเร่งแบบเชิงเส้น	50
4.3.5 การเร่งอัตราเร่งแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล	51
บทที่ 5 การควบคุมการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์แบบวงจรถัด	54
5.1 บทนำ	54
5.2 วงจรแหล่งจ่ายแรงดัน	54
5.3 วงจรชุดเอนโค๊ดเดอร์	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4 หลักการทำงานของวงจรเอนโค้ดเดอร์	57
บทที่ 6 การทดลองและผลการทดลอง	62
6.1 การทดสอบคุณลักษณะของแรงบิดกับมุมสเตป	62
6.2 การทดสอบคุณลักษณะของแรงบิดกับกระแส	66
6.3 การทดสอบคุณลักษณะการสตาร์ทหรือคุณลักษณะของแรงบิดพลูอิน	71
6.4 การทดลองคุณลักษณะของการหมุนหรือคุณลักษณะของแรงบิดพลูเอาท	78
6.5 การทดลองการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบลูปเปิด	82
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	83
ภาคผนวก	
เอกสารอ้างอิง	



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงการหมุนเป็นสเตป	3
รูปที่ 2.2 แสดงการหมุนแบบต่อเนื่อง	3
รูปที่ 2.3 แสดง โครงสร้างของสเตปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรสี่เฟส	4
รูปที่ 2.4 แสดง โครงสร้างของสเตปปีงมอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทาน สนามแม่เหล็กได้	5
รูปที่ 2.5 แสดงตำแหน่งของสถานะที่สมดุลเมื่อเกิดการกระตุ้นที่เฟสใดเฟสหนึ่ง	6
รูปที่ 2.6 แสดง โครงสร้างของสเตปปีงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์	7
รูปที่ 2.7 แสดงรูปการวาง โรเตอร์ตามยาวเพื่อใช้สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กขั้วเดียวกัน	7
รูปที่ 2.8 แสดงหลักการทํางานของสเตปปีงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์	8
รูปที่ 2.9 แสดงวงจรสมมูลย์ของสเตปปีงมอเตอร์	8
รูปที่ 2.10 แสดงการใช้ความต้านทานต่ออนุกรมกับขดลวดของสเตปปีงมอเตอร์	9
รูปที่ 2.11 แสดงการเพิ่มตัวเก็บประจุในแต่ละส่วนของวงจรจำกัดแรงดัน	10
รูปที่ 2.12 แสดงวงจรขับสเตปปีงมอเตอร์แบบแรงดัน ไฟฟ้าสองระดับ	11
รูปที่ 2.13 แสดงวงจรขับแบบชอปเปอร์	12
รูปที่ 2.14 แสดงวงจรขับแบบบริดจ์ สำหรับการขับแบบสองภาวะขั้ว	13
รูปที่ 2.15 แสดงรูปคลื่นแรงดัน ไฟฟ้าและกระแสของการขับสเตปปีงมอเตอร์ แบบสองภาวะขั้ว	13
รูปที่ 2.16 แสดงวงจรขับแบบบริดจ์อีกแบบหนึ่งที่ใช้แหล่งจ่ายไฟเดียว	14
รูปที่ 2.17 แสดงแผนภูมิเวลาของการกระตุ้นแบบต่าง ๆ	15
ก) การกระตุ้นแบบหนึ่งเฟส	
ข) การกระตุ้นแบบสองเฟส	
ค) การกระตุ้นแบบฮาล์ฟสเตป	
รูปที่ 2.18 แสดงความแตกต่างผลตอบสนองของการกระตุ้นแบบหนึ่งเฟส (ในรูป a) และการกระตุ้นแบบสองเฟส (ในรูป b)	16
รูปที่ 2.19 แสดงกระแสที่เกิดการออสซิลเลทในวงจรปิด	16
รูปที่ 2.20 แสดงการตอบสนองของสเตปปีงมอเตอร์ต่อการกระตุ้นแบบ 1 เฟส	17
รูปที่ 2.21 แสดงผลตอบสนองของการกระตุ้นแบบ 2 เฟส	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.1 แสดงชั้นเหล็กถูกดูดด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า	20
รูปที่ 3.2 แสดง โมเดลของสเตปป์มอเตอร์	20
รูปที่ 3.3 แสดงถึงพื้นที่ของชั้นเหล็กที่ซ้อนกัน	21
รูปที่ 3.4 แสดงถึงสนามแม่เหล็กที่ซี่ฟันของ โรเตอร์โดยมีการเคลื่อนที่เป็น Δx ภายในช่วงเวลา Δt	22
รูปที่ 3.5 แสดง <i>magnetic energy, co-energy</i> ที่ตำแหน่งสองตำแหน่ง (a) $x = x_0$ (b) $x = x_0 + \Delta x$	25
รูปที่ 3.6 พื้นที่แรงแสดงถึงพลังงานแม่เหล็กต่อปริมาตร	28
รูปที่ 3.7 แสดงถึง โมเดลของสเตปป์มอเตอร์เมื่อเกิดความเหนี่ยวนำร่วม	30
รูปที่ 3.8 แสดงถึงรูปแบบของสเตปป์มอเตอร์ที่มีการต่อแบบสองเฟส	31
รูปที่ 3.9 แสดงถึง โครงสร้างของซี่ฟันของสเตเตอร์และ โรเตอร์ที่เหมือนกัน	33
รูปที่ 3.10 แสดงถึง โครงสร้างของซี่ฟันของ โรเตอร์และสเตเตอร์ที่แตกต่างกัน	33
รูปที่ 3.11 (a) แสดงความกว้างของซี่ฟันของ โรเตอร์และสเตเตอร์เท่ากัน (b) แสดงความกว้างของซี่ฟันของสเตเตอร์ยาวกว่าของ โรเตอร์	34
รูปที่ 3.12 แสดงถึงกราฟคุณลักษณะของแรงบิดเปรียบเทียบกับความเร็ว	36
รูปที่ 3.13 แสดงถึงผลกระทบของ K_p ต่อแรงบิดพูลเอาท	38
รูปที่ 3.14 แสดงถึงผลกระทบของ I_r ต่อแรงบิดพูลเอาท	38
รูปที่ 4.1 แสดงวิธีทดสอบการวัดคุณลักษณะของแรงบิดกับมุมสเตป	42
รูปที่ 4.2 แสดงกราฟคุณลักษณะของแรงบิดกับมุมสเตป	43
รูปที่ 4.3 แสดงคุณลักษณะของแรงบิดกับกระแส	44
รูปที่ 4.4 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลง โมเมนต์ความเฉื่อยกับความถี่ในการสตาร์ท	44
รูปที่ 4.5 แสดงย่านความถี่ที่สเตปป์มอเตอร์ไม่สามารถสตาร์ทได้	45
รูปที่ 4.6 แสดงวิธีการวัดแรงบิดพูลเอาทแบบหนึ่งสเกลและสองสเกล	45
รูปที่ 4.7 แสดงอัตราเร่งแบบเชิงเส้นจาก ω_1 ถึง ω_2	47
รูปที่ 4.8 แสดงพัลส์ไทม์มิ่งของอัตราเร่งแบบเชิงเส้น	48
รูปที่ 4.9 แสดงการเร่งอัตราเร่ง ไปจนถึงอัตราการหมุนที่คงที่	49

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.10 แสดงจำนวนพัลส์ในการลดอัตราเร่ง	51
รูปที่ 4.11 แสดงถึงการประมาณแรงบิดพลูเอาท်แบบเชิงเส้น	52
รูปที่ 4.12 แสดงถึงอัตราเร่งของพัลส์แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล	53
รูปที่ 5.1 แสดงวงจรแหล่งจ่ายแรงดัน	55
รูปที่ 5.2 แสดงวงจรขับและวงจรแหล่งจ่ายแรงดัน	55
รูปที่ 5.3 แสดงวงจรเอนโค้ดเดอร์	56
รูปที่ 5.4 แสดงแผ่นจานต์	57
รูปที่ 5.5 แสดงสเตปมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	58
รูปที่ 5.6 แสดง โครงสร้างภายในสเตปมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	59
รูปที่ 5.7 แสดงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการทดลอง	59
รูปที่ 5.8 แสดงแหล่งจ่ายแรงดันและชุดขับ	60
รูปที่ 5.9 แสดง การทดสอบคุณลักษณะทางสถิตย์	60
รูปที่ 5.10 แสดงการทดลองคุณลักษณะทางไดนามิกส์	61
รูปที่ 5.11 แสดงการทดลองแบบดูปิด	61
รูปที่ 6.1 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดต่อมุมสเตปขนาด 1.8 องศา ต่อสเตป รัศมีพุ่งเฉลี่ย 0.045 เมตร	63
รูปที่ 6.2 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดต่อมุมสเตปขนาด 2 องศา ต่อสเตป รัศมีพุ่งเฉลี่ย 0.04 เมตร	64
รูปที่ 6.3 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดต่อมุมสเตปขนาด 7.5 องศา ต่อสเตป รัศมีพุ่งเฉลี่ย 0.04 เมตร	65
รูปที่ 6.4 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดและกระแสมุมสเตป 1.8 องศาต่อสเตป รัศมีพุ่งเฉลี่ย 0.025 เมตร ที่มุม 0.5 องศา	66
รูปที่ 6.5 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดและกระแสมุมสเตป 1.8 องศาต่อสเตป รัศมีพุ่งเฉลี่ย 0.025 เมตร ที่มุม 0.25 องศา	67
รูปที่ 6.6 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดและกระแสมุมสเตป 2 องศาต่อสเตป รัศมีพุ่งเฉลี่ย 0.04 เมตร ที่มุม 0.5 องศา	68
รูปที่ 6.7 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดและกระแสมุมสเตป 2 องศาต่อสเตป รัศมีพุ่งเฉลี่ย 0.04 เมตร ที่มุม 1.5 องศา	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 6.8 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดและกระแสหมุนสเตป 7.5 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เล่ย์ 0.045 เมตร ที่มุม 3 องศา	69
รูปที่ 6.9 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดและกระแสหมุนสเตป 7.5 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เล่ย์ 0.045 เมตร ที่มุม 6 องศา	70
รูปที่ 6.10 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดพูลอินมุมสเตป 1.8 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เล่ย์ 0.025 เมตร	73
รูปที่ 6.11 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดพูลอินมุมสเตป 1.8 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เล่ย์ 0.045 เมตร	74
รูปที่ 6.12 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดพูลอินมุมสเตป 2 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เล่ย์ 0.04 เมตร	75
รูปที่ 6.13 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดพูลอินมุมสเตป 2 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เล่ย์ 0.06 เมตร	76
รูปที่ 6.14 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดพูลอินมุมสเตป 7.5 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เล่ย์ 0.04 เมตร	77
รูปที่ 6.15 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดพูลเอาท์มุมสเตป 1.8 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เล่ย์ 0.025 เมตร	79
รูปที่ 6.16 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดพูลเอาท์มุมสเตป 2 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เล่ย์ 0.04 เมตร	80
รูปที่ 6.17 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดพูลเอาท์มุมสเตป 7.5 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เล่ย์ 0.04 เมตร	81

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 6.1 แสดงผลการทดลองแรงบิดต่อมุมสเตปขนาด 1.8 องศา ต่อสเตป รัศมีพู่เลี้ยว 0.045 เมตร	62
ตารางที่ 6.2 แสดงผลการทดลองแรงบิดต่อมุมสเตปขนาด 2 องศา ต่อสเตป รัศมีพู่เลี้ยว 0.04 เมตร	63
ตารางที่ 6.3 แสดงผลการทดลองแรงบิดต่อมุมสเตปขนาด 7.5 องศา ต่อสเตป รัศมีพู่เลี้ยว 0.04 เมตร	64
ตารางที่ 6.4 แสดงผลการทดลองแรงบิดและกระแสมุมสเตป 1.8 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เลี้ยว 0.025 เมตร ที่มุม 0.5 องศา	66
ตารางที่ 6.5 แสดงผลการทดลองแรงบิดและกระแสมุมสเตป 1.8 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เลี้ยว 0.025 เมตร ที่มุม 0.25 องศา	67
ตารางที่ 6.6 แสดงผลการทดลองแรงบิดและกระแสมุมสเตป 2 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เลี้ยว 0.04 เมตร ที่มุม 0.5 องศา	67
ตารางที่ 6.7 แสดงผลการทดลองแรงบิดและกระแสมุมสเตป 2 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เลี้ยว 0.04 เมตร ที่มุม 1.5 องศา	68
ตารางที่ 6.8 แสดงผลการทดลองแรงบิดและกระแสมุมสเตป 7.5 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เลี้ยว 0.045 เมตร ที่มุม 3 องศา	69
ตารางที่ 6.9 แสดงผลการทดลองแรงบิดและกระแสมุมสเตป 7.5 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เลี้ยว 0.045 เมตร ที่มุม 6 องศา	69
ตารางที่ 6.10 แสดงผลการทดลองแรงบิดพูลอินมุมสเตป 1.8 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เลี้ยว 0.025 เมตร	72
ตารางที่ 6.11 แสดงผลการทดลองแรงบิดพูลอินมุมสเตป 1.8 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เลี้ยว 0.045 เมตร	73
ตารางที่ 6.12 แสดงผลการทดลองแรงบิดพูลอินมุมสเตป 2 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เลี้ยว 0.04 เมตร	74
ตารางที่ 6.13 แสดงผลการทดลองแรงบิดพูลอินมุมสเตป 2 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เลี้ยว 0.06 เมตร	75
ตารางที่ 6.14 แสดงผลการทดลองแรงบิดพูลอินมุมสเตป 7.5 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เลี้ยว 0.04 เมตร 4	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 6.15 แสดงผลการทดลองแรงบิดพูลเอาท์มุมสเตป 1.8 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เล่ย์ 0.025 เมตร	79
ตารางที่ 6.16 แสดงผลการทดลองแรงบิดพูลเอาท์มุมสเตป 2 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เล่ย์ 0.04 เมตร	80
ตารางที่ 6.17 แสดงผลการทดลองแรงบิดพูลเอาท์มุมสเตป 7.5 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เล่ย์ 0.04 เมตร	81
ตารางที่ 6.18 แสดงตารางเวลาและความถี่ที่ใช้ขับสเตปปีงมอเตอร์ ขนาด 1.8 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เล่ย์ 0.025 เมตร มวลลูกน้ำหนัก 200 กรัม ความถี่พูลอิน 600 Hz ความถี่พูลเอาท์ 1350 Hz	82
ตารางที่ 6.19 แสดงตารางเวลาและความถี่ที่ใช้ขับสเตปปีงมอเตอร์ ขนาด 2 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เล่ย์ 0.04 เมตร มวลลูกน้ำหนัก 200 กรัม ความถี่พูลอิน 157 Hz ความถี่พูลเอาท์ 280 Hz	83
ตารางที่ 6.20 แสดงตารางเวลาและความถี่ที่ใช้ขับสเตปปีงมอเตอร์ ขนาด 7.5 องศาต่อสเตป รัศมีพู่เล่ย์ 0.04 เมตร มวลลูกน้ำหนัก 60 กรัม ความถี่พูลอิน 65 Hz ความถี่พูลเอาท์ 75 Hz	84

บทที่ 1

บทนำ

สเตปป์มอเตอร์คืออุปกรณ์ที่เคลื่อนที่เป็นสเตปโดยการกระตุ้นด้วยวิธีการทางแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลอินพุตซึ่งเป็นพัลส์ไปเป็นการเคลื่อนที่แบบอนาลอกที่เอาท์พุท สเตปป์มอเตอร์บางครั้งถูกเรียกว่าสเตปป์มอเตอร์หรือสเตปป์เปอร์มอเตอร์ ซึ่งสเตปป์มอเตอร์จะเคลื่อนที่เมื่อถูกกระตุ้น โดยแรงดันหรือกระแสซึ่งโดยมากจะเป็น ไฟฟ้ากระแสตรง เอาท์พุทของสเตปป์มอเตอร์จะมีจำนวนเท่ากับจำนวนของคำสั่งอินพุต ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์ โดยเมื่อป้อนแต่ละพัลส์ให้กับสเตปป์มอเตอร์แล้วสเตปป์มอเตอร์จะมีการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น 1 สเตป

สเตปป์มอเตอร์มีมาประมาณ 40 กว่าปีมาแล้วสมัยก่อนการใช้งานสเตปป์มอเตอร์มีประสิทธิภาพต่ำสู่อีมอเตอร์และคีมอเตอร์ไม่ได้ แต่เมื่อไม่นานมานี้มีการนำคิจิตอลคอมพิวเตอรืมาใช้จึงได้เปลี่ยนรูปแบบการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ใหม่ โดยใช้การควบคุมด้วยไมโครโพรเซสเซอร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งช่วยให้ใช้งานสเตปป์มอเตอร์ได้สะดวกขึ้นและมีประโยชน์ในการใช้สอยมากขึ้น ปัจจุบันนี้สเตปป์มอเตอร์ได้ถูกนำมาใช้ในอุปกรณ์ที่ใช้งานร่วมกับคอมพิวเตอรื เช่น พรินเตอร์ คิสค์ไครฟ์ และนอกจากนี้ยังถูกใช้งานใน อุปกรณ์ที่ใช้การควบคุมเชิงตัวเลข (numerical control) การควบคุมกระบวนการ (process control) และการควบคุมอุปกรณ์ทางเครื่องมืองด (machine tool control) เป็นต้น

การควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์โดยทั่วไป ใช้วงจรจับซึ่งให้สเตปป์มอเตอร์ตอบสนองต่อสัญญาณพัลส์ซึ่งทำให้มอเตอร์เคลื่อนที่เป็นจังหวะต่อเนื่องกันไป การเคลื่อนที่ลักษณะนี้ทำให้เกิดการออสซิลเลทระหว่างสเตปของการเคลื่อนที่ ทำให้สเตปป์มอเตอร์สั่นระหว่างใช้งาน ส่วนของปริญญาณิพนธ์นี้เป็นการศึกษาถึงคุณสมบัติและพารามิเตอร์ต่างๆของสเตปป์มอเตอร์ เช่น คุณลักษณะของแรงบิด พารามิเตอร์ไคบั้งที่มีผลต่อแรงบิด ผลของการขาดเสถียรภาพที่ความถี่สูง พารามิเตอร์ไคบั้งที่ทำให้สเตปป์มอเตอร์ขาดเสถียรภาพ การควบคุมการเข้าถึงตำแหน่งแบบวงจรมืด นอกจากนี้ยังศึกษาถึงการควบคุมแบบวงจรมืดซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในเรื่องของแรงบิดและการตอบสนองต่อความถี่ของสเตปป์มอเตอร์ให้สูงขึ้นด้วย ซึ่งใช้เป็นพื้นฐานในการนำสเตปป์มอเตอร์ไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์ในการทำปริญญาโท

ในปัจจุบันได้มีการนำสเตปป์มอเตอร์มาใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น โดยเฉพาะในงานที่ต้องการความแม่นยำทางด้านตำแหน่งสูง เช่นเครื่องนิวเมอริคอลลคอนโทรล, พรินเตอร์ เป็นต้น ทั้งนี้เพราะสเตปป์มอเตอร์มีความเที่ยงตรงแม่นยำทางด้านตำแหน่งสูงจึงง่ายต่อการควบคุม ดังนั้นในโครงการนี้จะทำการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติและพารามิเตอร์ต่างๆของสเตปป์มอเตอร์และสร้างเป็นชุดทดลองขึ้นมา เพื่อให้ผู้ที่ต้องการศึกษาสเตปป์มอเตอร์ได้ศึกษาและเข้าใจถึงคุณสมบัติและพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญของสเตปป์มอเตอร์เพื่อใช้เป็นพื้นฐานและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งาน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1. ศึกษาว่ามีพารามิเตอร์ใดบ้างที่มีผลต่อแรงบิด และม็องค์ประกอบใดบ้างที่ทำให้สเตปป์มอเตอร์ขาดเสถียรภาพเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่จะนำไปประยุกต์ในการปรับปรุงเสถียรภาพของระบบต่อไป
2. ศึกษาถึงคุณสมบัติของแรงบิดเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่จะช่วยเพิ่มความถูกต้องแม่นยำในการควบคุมตำแหน่ง
3. สามารถใช้เป็นพื้นฐานความรู้เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานควบคุมที่ต้องการความละเอียดของตำแหน่งสูงได้

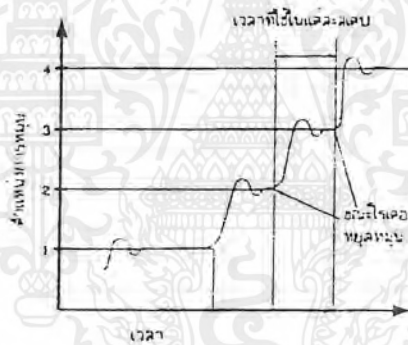
บทที่ 2

ชนิด, วงจรขับ และการขับสเตปมอเตอร์

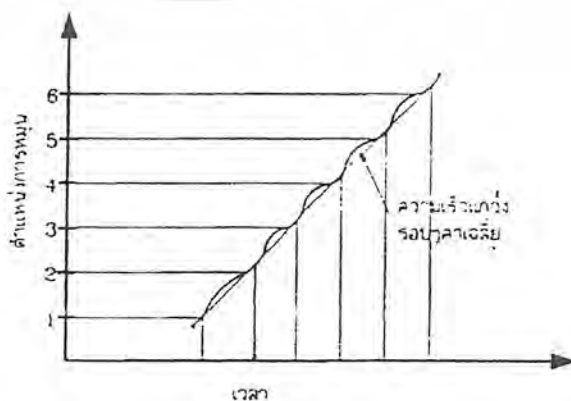
2.1 หลักการทำงานของสเตปมอเตอร์

สเตปมอเตอร์เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิดหนึ่งที่เปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลเป็นการเคลื่อนที่ทางกล จึงเหมาะสำหรับการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ทางดิจิทัลหรือคอมพิวเตอร์ การทำงานของสเตปมอเตอร์โดยส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับสัญญาณพัลส์ (Pulse) กระตุ้นที่ป้อนให้กับขดลวดเฟสของมอเตอร์ในลำดับที่ถูกต้องด้วยวงจรจัดลำดับลอจิกและกระแสที่พอเพียงด้วยวงจรขับ

การทำงานของสเตปมอเตอร์ตามอัตราเร็วของแต่ละสเตปจะแบ่งออกเป็น 2 โหมด การทำงาน คือ โหมดของการหมุนเป็นสเตป (Discrete Mode) และโหมดของการหมุนแบบต่อเนื่อง (Slewing Mode)



รูปที่ 2.1 แสดงการหมุนเป็นสเตป



รูปที่ 2.2 แสดงการหมุนแบบต่อเนื่อง

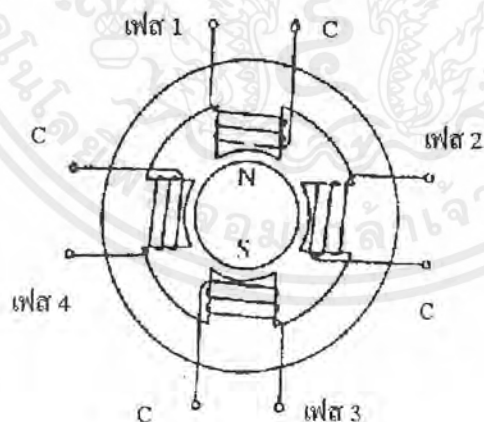
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.1 แสดงลักษณะการหมุนแบบสเตปซึ่งมีเวลาหยุดนิ่งก่อนที่จะเปลี่ยนสเตปถัดไป ดังนั้นหากมีการเพิ่มอัตราเร็วในแต่ละสเตปให้เร็วขึ้นและเป็นไปอย่างต่อเนื่อง การหมุนของสเตปปีงมอเตอร์ก็จะต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2.2 ในการนำสเตปปีงมอเตอร์ไปใช้งานไม่ว่าจะเป็นโหมดการทำงานแบบโคหรือเป็นสเตปปีงมอเตอร์แบบไหน ควรจะมีการศึกษาคุณลักษณะต่าง ๆ เช่น แรงบิด การตอบสนองต่อความถี่สูงสุด และความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดกับค่าของกระแส ทั้งนี้เพื่อให้สามารถควบคุมการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

2.2 ประเภทของสเตปปีงมอเตอร์

2.2.1 สเตปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Stepping Motor)

สเตปปีงมอเตอร์ชนิดนี้จะใช้แม่เหล็กถาวรเป็นโรเตอร์ และมีซี่ฟันของสเตเตอร์ล้อมรอบรูปที่ 2.3 เป็นตัวอย่างสเตปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรสี่เฟส โดยที่โรเตอร์เป็นทรงกระบอก สเตเตอร์มีซี่ฟันสี่ซี่ โดยที่แต่ละซี่จะมีขดลวดพันโดยรอบ เพื่อทำให้เกิดการสร้างแม่เหล็กเมื่อต้องการให้ สเตปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรมีขนาดมุมสเตป (Step) เล็กลง จะต้องเพิ่มจำนวนขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์และหรือจำนวนซี่ฟันของสเตเตอร์ แต่ก็มีขีดจำกัดในการเพิ่มจำนวนขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ ทั้งนี้เนื่องจากการสร้างแม่เหล็กถาวรให้มีโครงสร้างแบบมีขั้วแม่เหล็กหลาย ๆ ขั้วนั้นทำได้ยาก



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างของสเตปปีงมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรสี่เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะทั่วไปของมอเตอร์แบบนี้ก็คือ โรเตอร์จะถูกยึดอยู่กับที่แม้ว่าจะไม่มีการกระตุ้นเฟส ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าดีเทนท์แมคคาไนคซึม (Detent Mechanism) ข้อเสียของสเตปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรคือมีขนาดมูมสเตปป์ใหญ่ ทำให้มีความละเอียดของสเตปป์ต่อรอบน้อยมากเนื่องจากว่า โครงสร้างของโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร การสร้างแม่เหล็กถาวรให้มีหลายขั้วทำได้ยากดังที่กล่าวมาแล้ว ทำให้ไม่สามารถสร้างสเตปป์ให้มีขนาดเล็กลงได้ สเตปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างขนาดเล็กทำให้ค่าของแรงบิดที่ได้ต่อหน่วยปริมาตรมีค่าต่ำ ถ้าต้องการปรับปรุงประสิทธิภาพในเรื่องของแรงบิด แม่เหล็กถาวรที่ใช้จะต้องทำมาจากสารแม่เหล็กที่มีสภาพความเป็นแม่เหล็กสูง

2.2.2 สเตปป์มอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้ (Variable Reluctance Stepping Motor)

สเตปป์มอเตอร์ชนิดนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า วีโออาร์สเตปป์มอเตอร์ (VR Stepping Motor) โดยโครงสร้างมีโรเตอร์และสเตเตอร์ที่ทำจาก โลหะซิลิคอน (Silicon) ซึ่งเป็นสารแม่เหล็กที่มีสภาพความซึมซาบทางแม่เหล็ก (Permeability) สูงและสามารถให้เส้นแรงแม่เหล็กไหลผ่านได้มาก โดยโรเตอร์จะติดอยู่กับแกนของมอเตอร์ และสเตเตอร์จะติดอยู่กับโครงของตัวมอเตอร์



รูปที่ 2.4 แสดง โครงสร้างของสเตปป์มอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานสนามแม่เหล็กได้

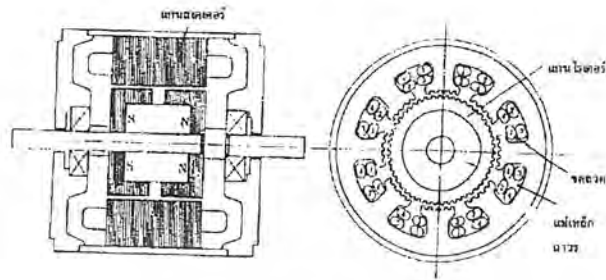
รูปที่ 2.4 เป็นรูปตัดขวางของสเตปป์มอเตอร์ซึ่งเป็นมอเตอร์สามเฟส โดยที่โรเตอร์มีซี่ฟันสี่ซี่ และสเตเตอร์จะมีซี่ฟันหกซี่ อยู่ในตำแหน่งตรงข้ามและทำมุม 180 องศา ต่ออนุกรมหรือขนานกันก็ได้ แต่ในรูปต่อในลักษณะอนุกรม จะเห็นว่าฟันของสเตเตอร์สองซี่ที่มีเฟสเดียวกันจะมีซี่ฟันเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งแรงไว้สำหรับการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กตรงข้ามซึ่งกันและกัน ส่วนรูปที่ 2.5 แสดงตำแหน่งของสถานะที่สมดุลย์เมื่อเกิดการกระตุ้นที่เฟสโคเฟสหนึ่งของมอเตอร์

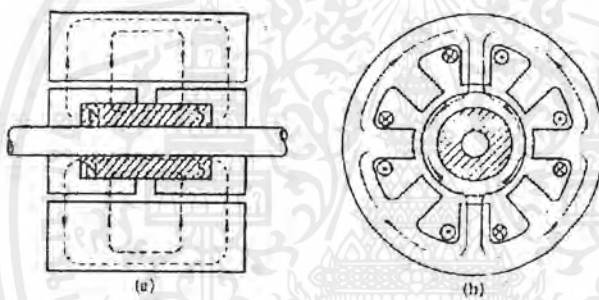


รูปที่ 2.5 แสดงตำแหน่งของสถานะที่สมดุลย์เมื่อเกิดการกระตุ้นที่เฟสโคเฟสหนึ่ง

2.2.3 สเตปปีงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์ (Hybrid Stepping Motor) เป็นสเตปปีงมอเตอร์ที่มีโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร การใช้ชื่อว่าไฮบริดจ์ได้มาจากการรวมหลักสำคัญของมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร และแบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้เข้าด้วยกัน สเตปปีงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์จะมีโครงสร้างของสเตเตอร์คล้ายกับ โครงสร้างของสเตปปีงมอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานแม่เหล็กได้ ซึ่งจะมีขดลวดอยู่สองขด และขดลวดทั้งสองจะพันอยู่ที่ขั้วเดียวกันในลักษณะของสองภาวะขั้ว (Bipolar) ซึ่งจะทำให้ขั้วแม่เหล็กมีความต่างกันขณะที่มีการกระตุ้นแต่ละครั้ง แสดงได้ดังรูปที่ 2.6 ลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่งของสเตปปีงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์ก็คือ ตัวโรเตอร์จะเป็นแม่เหล็กถาวร รูปร่างทรงกระบอกตามยาวอยู่ในแกนเหล็กของโรเตอร์ เพื่อใช้สร้างสนามแม่เหล็กขั้วเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยที่แต่ละขั้วของแม่เหล็กจะถูกล้อมรอบด้วยฟันเหล็กอ่อน ฟันของโรเตอร์กับสเตเตอร์จะอยู่ในตำแหน่งที่เหลื่อมกันอยู่ 90 องศา

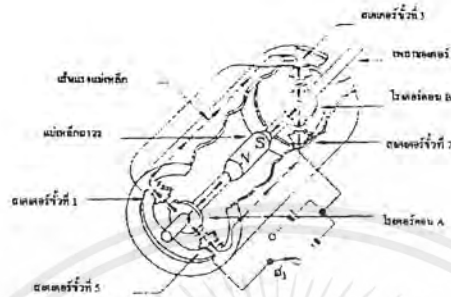


รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของสเตปป์ิงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์



รูปที่ 2.7 แสดงรูปการวางโรเตอร์ตามยาวเพื่อใช้สำหรับสร้างสนามแม่เหล็กขั้วเดียวกัน

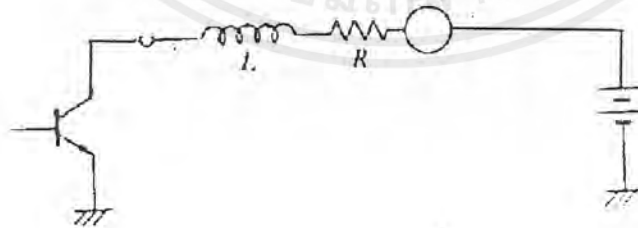
หลักการทํางานของสเตปป์ิงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์ ที่แตกต่างจากสเตปป์ิงมอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็ก ได้ก็คือ แรงบิดที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กจะไม่ขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของซี่ฟันซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.8 ข้อดีของสเตปป์ิงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์คือมีขนาดของสเตปเล็กทำให้มีควมละเอียดของสเตป ต่อรอบสูง นอกจากนี้ยังมีค่าของแรงบิดสูงกว่าสเตปป์ิงมอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้ แต่สเตปป์ิงมอเตอร์แบบแปรค่าความต้านทานของสนามแม่เหล็กได้ จะมีแรงเฉื่อยทางกลน้อยกว่า



รูปที่ 2.8 แสดงหลักการทำงานของสเต็ปมอเตอร์แบบไฮบริดจ์

2.3 วงจรขับสำหรับสเต็ปมอเตอร์

การพิจารณาถึงหลักการในการออกแบบวงจรขับกำลังให้กับขดลวดของสเต็ปมอเตอร์นั้น จะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบหลายอย่างด้วยกัน เนื่องจากการหมุนของสเต็ปมอเตอร์จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (Back emf) ซึ่งจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าโดยสามารถเขียนวงจรสมมูลย์ (Equivalent circuit) ในหนึ่งเฟสของสเต็ปมอเตอร์ได้ดังในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงวงจรสมมูลย์ของสเต็ปมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไป สเตปปีงมอเตอร์ได้ถูกออกแบบให้ทนความร้อนได้สูงถึง 100 องศาเซลเซียส แต่ในการใช้งานจริงจะถูกใช้งานที่ร้อนไขต่ำกว่าจุดอ้อมตัวที่กำหนดมา ในการขับสเตปปีงมอเตอร์นั้นต้องเลือกใช้อุปกรณ์ที่กินกระแสสูง เนื่องจากชุดขดลวดในแต่ละเฟสของสเตปปีงมอเตอร์จะต้องมีการนำและหยุดนำกระแสอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับทรานซิสเตอร์กำลังจากแรงดันยอดแหลม (Spike Voltage) ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสในขดลวด (Inductive Turn Off Spike Voltage) และการเสียดสภาพฉนวนของแรงดัน ซึ่งการออกแบบวงจรขับและวงจรป้องกันสามารถทำได้ดังนี้

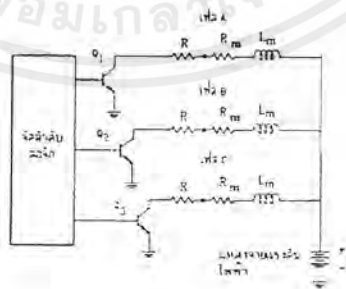
2.3.1 การใช้ตัวต้านทานต่ออนุกรมกับวงจรขับ

การต่อความต้านทานอนุกรมกับวงจรขับ เป็นรูปแบบธรรมดาและราคาถูกสุด ในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ คือการต่อความต้านทานอนุกรมเข้ากับชุดขดลวดแต่ละเฟสของสเตปปีงมอเตอร์ การเพิ่มความต้านทานภายนอกทำให้ค่าเวลาคงตัวของวงจรลดลงไป ทำให้เวลาของการเพิ่มและลดระดับของกระแสลดลง

ข้อเสียของการต่อความต้านทานอนุกรมคือการสูญเสียกำลังงาน ค่าความต้านทานภายนอกมีมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้ระบบไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ ลักษณะการต่อความต้านทานอนุกรมมีผลดังต่อไปนี้คือ

(ก) ค่าความต้านทานทั้งหมด จะถูกแทนที่ด้วยความต้านทานตัวเดียวระหว่างแหล่งจ่ายแรงดัน

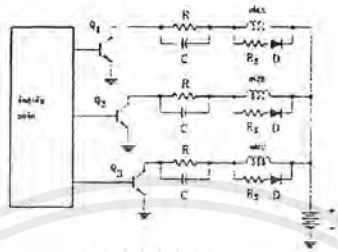
ไฟฟ้าทางค้ำอินพุทกับตัวสเตปปีงมอเตอร์ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงการใช้ความต้านทานต่ออนุกรมกับขดลวดของสเตปปีงมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) ความต้านทานอนุกรมจะขนานกับตัวเก็บประจุ ในการเพิ่มตัวเก็บประจุในแต่ละส่วนของโครงข่ายของวงจรจำกัดแรงดัน สามารถช่วยรักษาระดับของแรงดันให้ คงที่โดยเฉพาะเมื่อวงจรทำงานมาใกล้ขีดจำกัดสูงสุดของแรงดันที่ทรานซิสเตอร์ทนได้



รูปที่ 2.11 แสดงการเพิ่มตัวเก็บประจุในแต่ละส่วนของวงจรจำกัดแรงดัน

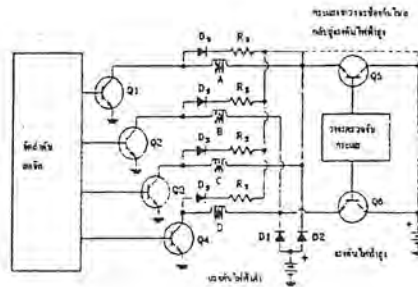
ในรูปที่ 2.11 แสดงวงจรขั้วกำลังซึ่งใช้ไดโอด-ความต้านทาน และมีการต่อตัวเก็บประจุขนานกับความต้านทาน ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของแรงบิดพูลเอาท (ค) ประสิทธิภาพของระบบจะเพิ่มขึ้น ถ้ามีการต่อความต้านทานร่วมกับโหลด (Common Load) ขนานกับทรานซิสเตอร์ระหว่างการใช้ความเร็วสูง วิธีการนี้จะช่วยให้การเปลี่ยนระดับของกระแสเร็วขึ้น แต่จะมีข้อเสียอยู่ที่มีการสูญเสียกำลังมาก

2.3.2 การใช้วงจรขั้วแบบใช้แรงดันไฟฟ้าสองระดับ

เป็นวิธีการขั้วที่มีประสิทธิภาพกว่ารูปแบบของการต่อความต้านทานอนุกรม ซึ่งใช้แรงดันไฟฟ้าระดับสูงสำหรับการยกกระแสระดับกระแสและตัดต่อไปยังแรงดันไฟฟ้าระดับต่ำ เมื่อถึงอัตรากระแสที่ต้องการหรือถึงเวลาที่กำหนด กระแสที่อยู่ในขดลวดจะไหลผ่านไดโอด D_1 โดยแรงดันไฟฟ้าระดับต่ำจะทำงานแทน วิธีการนี้เรียกว่าการขั้วแบบแรงดันไฟฟ้าคู่หรือการขั้วแบบสองระดับ

เมื่อพิจารณาการลดลงของเวลาในการเปลี่ยนระดับกระแสของระบบการขั้วแบบสองระดับเปรียบเทียบกับแบบการต่อความต้านทานอนุกรม แรงดันไฟฟ้าคกรวมขดลวดจะยังคงอยู่ทั้งหมดจนกระทั่งกระแสเพิ่มขึ้นจนถึงระดับกระแสที่ต้องการ แม้ว่าค่าเวลาคงตัวจะไม่ลดลงเหมือนในแบบการต่อความต้านทานอนุกรม ค่าการยกกระแสก่อนข้างจะมีลักษณะเป็นเชิงเส้นหลังจากแรงดันไฟฟ้าระดับสูงจะตัดต่อไปสู่แรงดันไฟฟ้าระดับต่ำ กระแสจะตกลงและเกิดแรงดันย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงวงจรจับสลับปีงมอเตอร์แบบแรงดันไฟฟ้าสองระดับ

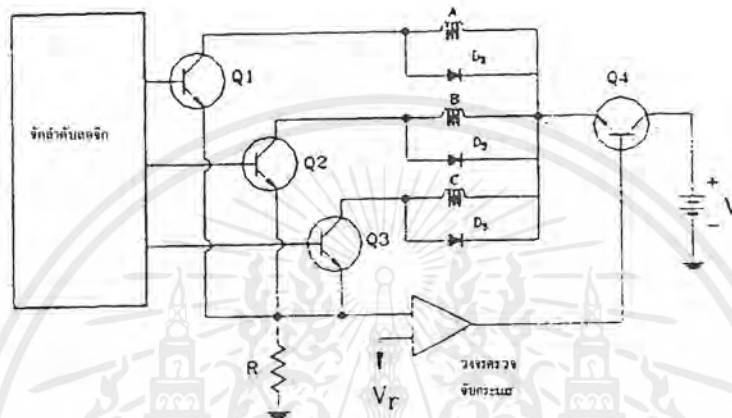
ขณะที่ทรานซิสเตอร์ Q5 และ Q6 ไม่ทำงาน ไดโอด D1 และ D2 ของแรงดันไฟฟ้าระดับต่ำ นำกระแสอยู่ เมื่อแรงดันไฟฟ้าระดับสูงทำงาน ทรานซิสเตอร์ Q5 และ Q6 นำกระแส ไดโอด D1 ต้องหยุดนำกระแสทันที และแหล่งจ่ายไฟของแรงดันไฟฟ้าระดับต่ำจะกลายเป็นระบบภายนอก การทำงานจะเป็นลักษณะนี้สลับกันไปตลอดช่วงการทำงาน โดยทั่วไป ไดโอดกระแสสูงจะมีค่าเวลาในการคืนตัวช้า ดังนั้นในกรณีนี้จึงมีความจำเป็นต้องใช้ไดโอดชนิดคืนตัวเร็ว (Fast Recovery Diode) เพื่อให้เกิดกระแสย้อนกลับ (Current Spike) ในขณะที่มีแหล่งจ่ายไฟอยู่ในระดับที่ปลอดภัย โดยที่แหล่งจ่ายไฟที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำ ควรออกแบบให้มีระดับกระแสที่เพียงพอในการต้านกระแสย้อนกลับ

2.3.3 การใช่วงจรจับแบบชอปเปอร์

เป็นวงจรจับอีกแบบหนึ่งที่ใช้กับมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง คือ ใช้การมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation) หรือการมอดูเลตความถี่ (Frequency Modulation) ควบคุมกระแสเฉลี่ยที่ให้กับสลับปีงมอเตอร์ วงจรจับแบบชอปเปอร์อย่างง่าย ๆ แสดงได้ดังรูปที่ 2.13 เมื่อเฟสใดเฟสหนึ่งของมอเตอร์ทำงาน ทรานซิสเตอร์ Q4 จะเปิดและปิดไปสู่แรงดันไฟฟ้า ระดับสูงตลอดเวลา การใช้แหล่งจ่ายไฟที่มีแรงดันไฟฟ้าสูง เป็นสาเหตุให้กระแสในแต่ละเฟสเพิ่มระดับขึ้นอย่างทันทีทันใด เช่นเดียวกับในวงจรจับแบบแรงดันไฟฟ้าสองระดับ คือมีวงจรตรวจระดับกระแสเพื่อจะปรับตั้งค่าการหยุดทำงานของทรานซิสเตอร์ Q4 เมื่อกระแสมาถึงระดับที่ต้องการ และเมื่อกระแสลดลงต่ำกว่ากระแสขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold Current) ทรานซิสเตอร์ Q4 จะทำงานอีกครั้งหนึ่ง การทำงานของวงจรมีแนวโน้มให้กระแสเฉลี่ยคงอยู่ในระดับที่ต้องการ ในกรณีนี้ความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการตัดช่วงจะอยู่ระหว่างหนึ่งถึงสามสิบลิลิตร ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าเวลาคงตัวของการผันขดลวดของมอเตอร์และฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) ของวงจรตรวจระดับกระแส ความถี่ของการตัดช่วงมักจะปรับตั้งอยู่สูงกว่าช่วงที่กำหนดเพื่อหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำซึ่งเกิดจากการสั่นของมอเตอร์



รูปที่ 2.13 แสดงวงจรขับเคลื่อนแบบชอปเปอร์

2.3.4 การใช้วงจรขับเคลื่อนแบบบริดจ์

ประสิทธิภาพในการใช้งานของสเตรปมอเตอร์จะสูงขึ้น ถ้าควบคุมการไหลของกระแสให้ไหลได้สองทิศทาง ซึ่งช่วยให้แรงบิดเพิ่มขึ้นอีก 20-35% ของการใช้วงจรขับเคลื่อนมีกระแสไหลทางเดียว วงจรขับเคลื่อนแบบบริดจ์มีสองชนิด คือ แบบมีแหล่งจ่ายไฟเดียว และแบบมีแหล่งจ่ายไฟสองแหล่ง ซึ่งจะมีคุณลักษณะในการทำงานดังต่อไปนี้

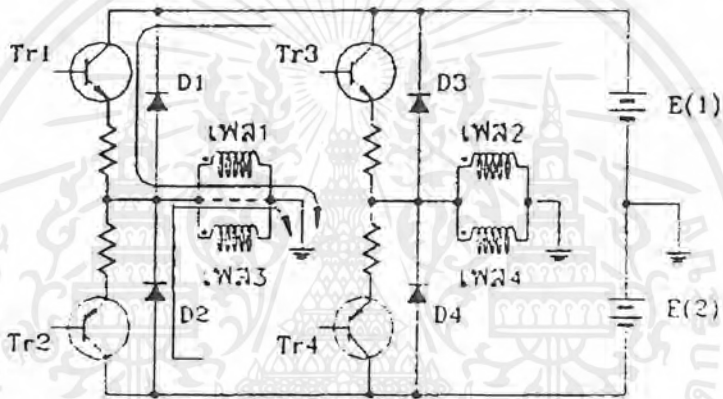
(ก) การต่อขดลวดของมอเตอร์ ถ้ามอเตอร์มี 8 ขั้ว กระแสสลับจะสามารถไหลผ่านได้เหมือนกับมอเตอร์สองเฟส

(ข) การป้องกันอันตรายอันอาจเกิดจากทรานซิสเตอร์ "ทำงาน" ในขณะที่ทรานซิสเตอร์อีกตัวหนึ่งยังนำกระแสอยู่ ทำได้โดยการใส่วงจรหน่วงเวลา คือ ค่าความต้านทานเข้าไประหว่างทรานซิสเตอร์ทั้งสอง

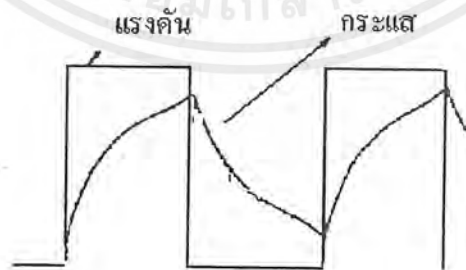
(ค) การใช้ไดโอดเพื่อป้องกันแรงดันย้อนแหลม โดยไดโอดจะถูกใส่ขนาดเข้าไปกับทรานซิสเตอร์กำลัง เพื่อจำกัดแรงดันย้อนแหลม เมื่อทรานซิสเตอร์ "หยุดทำงาน" การทำงานของได

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โอดจะแตกต่างจากแบบสภาพชั่วเดียว ถ้า Tr1 นำกระแสซึ่งแสดงโดยเส้นทึบ เมื่อ Tr1 “หยุดทำงาน” และ Tr2 “ทำงาน” กระแสไม่ได้ไหลกลับทิศทางแควจะไหลวนผ่านไดโอด D2 และจ่ายไฟ E(2) ซึ่งแสดงโดยเส้นประ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าแหล่งจ่ายไฟ E(2) ขณะนี้จะถูกเก็บประจุ หรือถ้าพิจารณาในเทอมของกำลังงานจากสนามแม่เหล็กจะถูกป้อนกลับเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟในขณะที่การขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสภาพชั่วเดียว กำลังงานจากสนามแม่เหล็กจะถูกใช้ไปในขดลวดความต้านทานภายนอกและซีเนอร์ไดโอด ทำให้การขับเคลื่อนแบบสองภาวะชั่วมีข้อดีกว่า



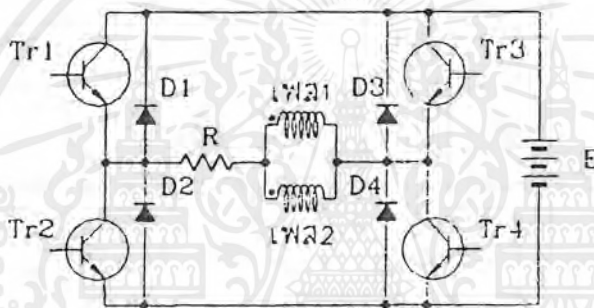
รูปที่ 2.14 แสดงวงจรขับเคลื่อนแบบบริดจ์ สำหรับการขับเคลื่อนแบบสองภาวะชั่ว



รูปที่ 2.15 แสดงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าและกระแสของการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสองภาวะชั่ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสในทิศทางกลับสำหรับการขับแบบสภาวะชั่วเดียว ต้องใช้วงจรจำกัดแรงดันเกินเพื่อ
 หน่วงกระแสหลังจาก “หยุดทำงาน” ของทรานซิสเตอร์ แต่สำหรับการขับแบบสองภาวะชั่วจะให้
 แรงดันไฟฟ้าเพื่อให้กระแสไหลกลับทิศทาง หลังจากกระแสที่เหลืออยู่หลังจากทรานซิสเตอร์หยุด
 ทำงานกลายเป็นศูนย์ และจะมีกระแสชุดใหม่เพิ่มขึ้นผ่านทรานซิสเตอร์ Tr2 ในทิศทางตรงกันข้าม
 ดังนั้น รูปคลื่นของกระแสจะไม่เป็นตัวชี้กำลัง แต่ขึ้นอยู่กับแรงดันย้อนกลับที่เกิดจากการเคลื่อนที่
 ของโรเตอร์



รูปที่ 2.16 แสดงวงจรขับแบบบริดจ์อีกแบบหนึ่งซึ่งใช้แหล่งจ่ายไฟเดียว

รูปแบบอีกอย่างหนึ่งของการขับแบบสองภาวะชั่ว แสดงได้ในรูปที่ 2.16 ในกรณีนี้จะใช้
 แหล่งจ่ายไฟเดียวแต่ใช้ทรานซิสเตอร์สำหรับแต่ละเฟส ความต้านทานจะถูกต่อขนานกับขดลวด
 เพื่อการเพิ่มระดับกระแสที่เร็วขึ้น วงจรหน่วงเวลาจะใช้เพื่อป้องกันทรานซิสเตอร์นำกระแสเหลื่อม
 กัน (Overlap)

2.4 การกระตุ้น (Stepping Motor Excitation)

แบบที่นิยมใช้มีอยู่ 3 แบบ คือ

1. การกระตุ้นเฟสเดียว (One Phase Excitation)
2. กระตุ้น 2 เฟส (Two Phase Excitation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กระตุ้นครึ่งสเตป (Half Step Excitation)

ก.

Four-phase motor

	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Phase1	■				■				■
Phase2		■				■			
Phase3			■				■		
Phase4				■				■	

ข.

Four-phase motor

Clock state	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Phase1	■	■			■	■			■
Phase2		■	■			■	■		
Phase3			■	■			■	■	
Phase4	■			■	■			■	■

ค.

Clock state (A)	R	1		2		3		4		5	
Clock state (B)	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Phase1	■	■				■	■	■			
Phase2		■	■	■				■	■	■	
Phase3				■	■	■				■	■

รูปที่ 2.17 แสดงแผนภูมิเวลาของการกระตุ้นแบบต่าง ๆ

ก) การกระตุ้นแบบหนึ่งเฟส

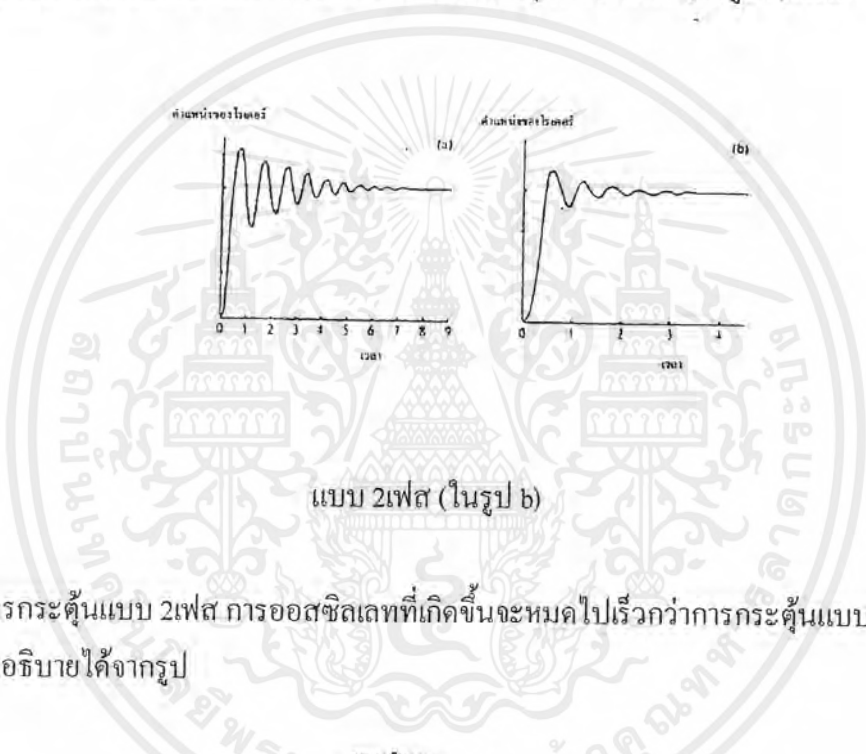
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ข) การกระตุ้นแบบสองเฟส
- ค) การกระตุ้นแบบฮาล์ฟสเตป

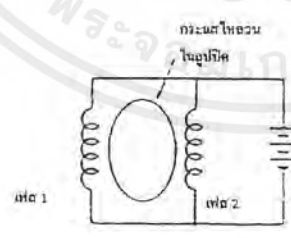
ข้อแตกต่างระหว่างการกระตุ้นแบบ 1 เฟส และ 2 เฟส

ความแตกต่างระหว่างการกระตุ้นแบบ 1 เฟส และ 2 เฟส มีลักษณะต่างกันตรงผลการตอบสนองชั่วขณะ (Transient Response)

รูปที่ 2.18 แสดงความแตกต่างผลตอบสนองของการกระตุ้นแบบ 1 เฟส (ในรูป a) และการกระตุ้น



การกระตุ้นแบบ 2 เฟส การออสซิลเลทที่เกิดขึ้นจะหมดไปเร็วกว่าการกระตุ้นแบบเฟสเดียว ซึ่งสามารถอธิบายได้จากรูป



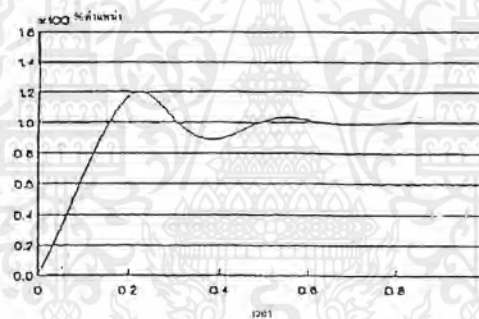
รูปที่ 2.19 แสดง กระแสที่เกิดการออสซิลเลทในวงจรปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีการกระตุ้นแบบ 2 เฟส ดูปที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 เฟสที่ถูกกระตุ้นจะมีการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น เมื่อมีการออสซิลเลทเกิดขึ้น ซึ่งเกิดในองค์ประกอบของกระแสในช่วงออสซิลเลท ไม่ใช่องค์ประกอบในช่วงที่คงที่ องค์ประกอบในช่วงออสซิลเลทนี้เองจะสร้าง Holding Torque ขึ้น ดังนั้นการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ที่เกิดการออสซิลเลทขึ้น เป็นผลทำให้เกิดกระแสออสซิลเลทเกิดขึ้นในช่วงที่คงที่ในแต่ละเฟส ซึ่งองค์ประกอบของกระแสในเฟส 1 และเฟส 2 จะมีทิศทางตรงข้ามกันนั้นแรงบิดที่สร้างจากองค์ประกอบของกระแสออสซิลเลทจะมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของโรเตอร์นั่นเอง ซึ่งลักษณะนี้จะไม่เกิดในการกระตุ้นแบบ 1 เฟส

การกระตุ้นแบบ 1 เฟส

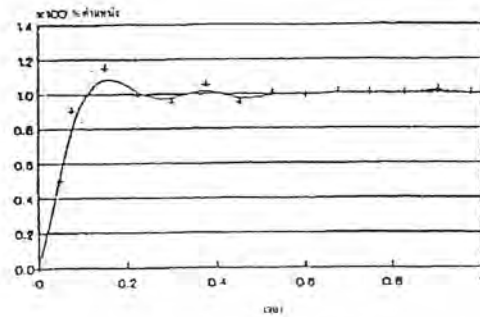
การกระตุ้นแบบนี้จะมีแรงบิดน้อยที่สุดทั้งในขณะที่เริ่มเคลื่อนที่และเคลื่อนที่อยู่มี Over Shoot สูง เข้าสู่ตำแหน่งแต่ละสเต็ปช้าแต่เมื่อเข้าสู่สภาวะ Steady State แล้วจะ ไม่มีการออสซิลเลท



รูปที่ 2.20 แสดงผลตอบสนองของสเต็ปมอเตอรืต่อการกระตุ้นแบบ 1 เฟส

การกระตุ้นแบบ 2 เฟส

การกระตุ้นแบบนี้มีแรงบิดขณะเริ่มต้นสูง มี Over Shoot ต่ำและมีออสซิลเลทเล็กน้อยในสภาวะ Steady State



รูปที่ 2.21 แสดงผลตอบสนองของการกระตุ้นแบบ 2 เฟส

การกระตุ้นแบบฮาล์ฟสเตป

สำหรับ สเตปปีงมอเตอร์ ที่ใช้การกระตุ้นแบบฮาล์ฟสเตป จะทำให้มุมมองขาในแต่ละสเตป จะมีค่าลดลงจากค่าที่กำหนดไว้ครึ่งหนึ่ง จากค่ามุมมองขาที่กำหนดไว้ที่ สเตปปีงมอเตอร์ตัวนั้น การกระตุ้นแบบนี้จะรวมข้อดีของทั้ง 2 แบบ ข้างต้นไว้ โดยขณะเริ่มต้นจะกระตุ้นแบบ 2 เฟส ทำให้ได้แรงบิด เริ่มต้นสูงที่สุดและเมื่อเข้าสู่ (Steady State) จะกระตุ้นเพียงเฟสเดียว ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดการออกซิลเลท แต่ข้อเสียของการกระตุ้นแบบนี้จะมีลักษณะเช่นเดียวกับ การกระตุ้นแบบหนึ่งเฟส กล่าวคือในสภาวะคงตัว ค่าแรงบิดจะมีค่าน้อย

บทที่ 3

ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า, โครงสร้างและพารามิเตอร์ต่างๆของสเตปป์มอเตอร์

ในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎีพื้นฐานของสนามแม่เหล็กในสเตปป์มอเตอร์ ผลของค่าความซึมซาบของตัวกลาง(Permeability) พารามิเตอร์ใดบ้างที่มีผลต่อการเกิดสนามแม่เหล็กและแรงบิดในสเตปป์มอเตอร์ ผลของความอ้อมตัวทางแม่เหล็กต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพ คุณลักษณะของแรงบิด พารามิเตอร์ที่มีผลต่อแรงบิด ผลของการขาดเสถียรภาพที่ความถี่สูงๆและมีพารามิเตอร์ใดบ้างที่ทำให้สเตปป์มอเตอร์ขาดเสถียรภาพ

3.1.1 กรณีที่แกนเหล็กมีค่าความซึมซาบของตัวกลางของแกนเหล็กมีค่าอนันต์

ในการพิจารณาจะวิเคราะห์ห้ถึงตำแหน่งของขั้วเหล็กในสนามแม่เหล็กดังแสดงดังรูปที่ 3.1 และแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังรูปที่ 3.2 มีกระแสไหลในขดลวดทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กและมีแรงกระทำกับขั้วเหล็ก โดยที่ขั้วเหล็กนี้อาจจะพิจารณาเป็นขั้วพื้นของโรเตอร์ในตัวของสเตปป์มอเตอร์ กำหนดให้ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในอากาศ B_g (magnetic flux density) พิจารณาจากรูปเป็น $\frac{g}{2}$ จากกฎการไหลของกระแสในลูปปิดจะได้ว่า

$$\oint H \cdot dl = nI \quad (3.1)$$

สมการทางซ้ายมือสามารถเขียนได้ใหม่เป็นดังนี้

$$\oint H \cdot dl = H_g \left(\frac{g}{2} \right) + H_g \left(\frac{g}{2} \right) + H_l l = H_g g + H_l l \quad (3.2)$$

เมื่อ H_g คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กในช่องว่างอากาศ

H_l คือความเข้มสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก

l คือทางเดินแม่เหล็กทั้งหมดในแกนเหล็ก

เมื่อค่าความซึมซาบของตัวกลางของแกนเหล็กมีค่ามากดังนั้น H_l จึงมีค่าน้อยมากให้ $H_l = 0$

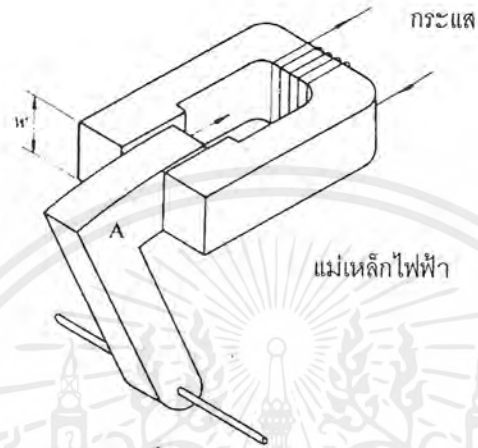
ค่าความซึมซาบของตัวกลางของแกนเหล็กมีค่าอนันต์ดังนั้น $B = \mu H_l = \infty$ ซึ่งจะได้ H_g เป็น

$$H_g = \frac{nI}{g} \quad (3.3)$$

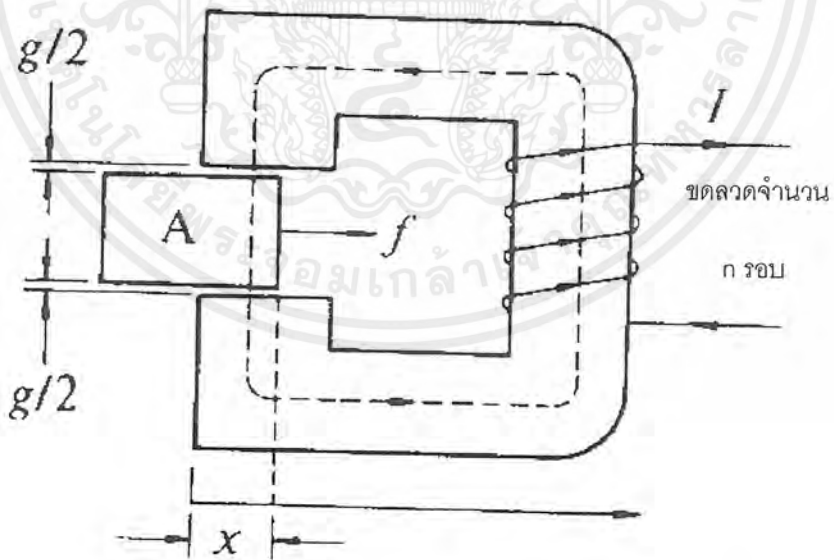
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในช่องว่างอากาศเป็น

$$B_g = \frac{\mu_0 nI}{g} \quad (3.4)$$

เมื่อ μ_0 คือค่าความซึมซาบของตัวกลางในช่องว่างอากาศ



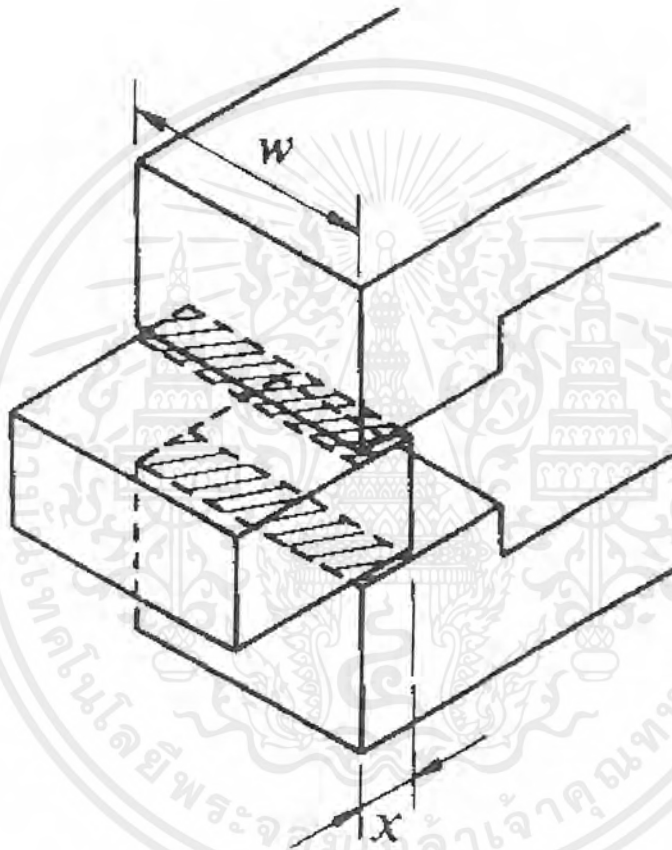
รูปที่ 3.1 แสดงชั้นเหล็กถูกดูดด้วยแรงของแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 3.2 แสดง โมเดลของสเตปปีงมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูป 3.3 ถ้าค่าความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กมีค่าสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กสามารถหาค่าของเส้นแรงแม่เหล็ก โดยการคูณค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก



รูปที่ 3.3 แสดงถึงพื้นที่ของชิ้นเหล็กที่ซ้อนกัน

$$\Phi = \frac{xw\mu_0 nI}{g} \quad (3.5)$$

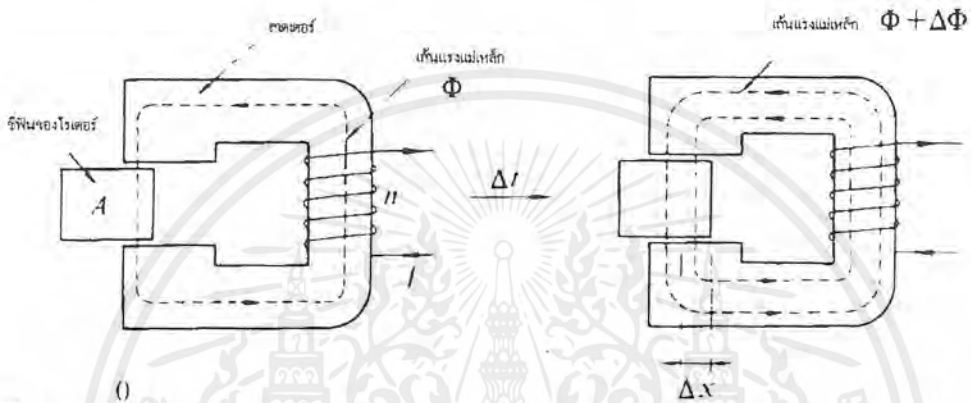
เส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องขดลวดเป็น

$$\psi = n\Phi = \frac{xw\mu_0 n^2 I}{g} \quad (3.6)$$

สมมติให้มีระยะทางเพิ่มขึ้นเป็น Δx เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่เป็น Δt แล้วการเคลื่อนที่ของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกี่ยวข้องขดลวด ดังแสดงในรูป 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta\Psi = \frac{w\mu_0 n^2 I}{g} \Delta x \quad (3.7)$$



รูปที่ 3.4 แสดงถึงสนามแม่เหล็กที่ขั้วของโรเตอร์โดยมีการเคลื่อนที่เป็น Δx และช่วงเวลา Δt

แรงดันเหนี่ยวนำในขดลวดเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่ค้ำอยู่ในขดลวดตัวนำมีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาทำให้เกิดการเหนี่ยวนำศักดาไฟฟ้าตามกฎของฟาราเดย์

$$e = -\frac{\Delta\Psi}{\Delta t} = -\frac{w\mu_0 n^2 I \Delta x}{g \Delta t} \quad (3.8)$$

เครื่องหมายลบในสมการ(3.8)หมายถึงทิศทางของแรงดันเหนี่ยวนำตรงข้ามกับทิศทางกระแส เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์จะสมมติให้ความต้านทานของขดลวดเป็นศูนย์จะได้สมการเป็นดังนี้

$$\Delta P_i = \frac{B_g}{\mu_0} gw \Delta x \quad (3.9)$$

งานที่ทำคือการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าส่วนหนึ่งไปเป็นพลังงานกลและพลังงานไฟฟ้าอีกส่วนหนึ่งจะทำให้พลังงานแม่เหล็กที่สะสมในช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะได้พลังงานแม่เหล็กที่สะสมในช่องว่างอากาศเป็น

$$\Delta W_m = \frac{1}{2} \frac{B_g^2}{\mu_0} gw \Delta x \quad (3.10)$$

จากการเปรียบเทียบสมการ(3.9)และ(3.10)พบว่ากำลังไฟฟ้าครึ่งหนึ่งถูกเปลี่ยนให้เป็นพลังงานแม่เหล็กที่สะสมในช่องว่างอากาศส่วนพลังงานไฟฟ้าอีกครึ่งหนึ่งเปลี่ยนเป็นงานทางกลซึ่งงานทางกลคือแรงคูณกับระยะทางจะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f\Delta x = \frac{1}{2} \frac{B_g^2}{\mu_0} gw\Delta x \quad (3.11)$$

ตัด Δx ออกทั้งสองข้าง

$$f = \frac{1}{2} \frac{B_g^2}{\mu_0} gw \quad (3.12)$$

นำค่า B_g จากสมการ(3.4)มาแทนลงในสมการ(3.12)จะได้

$$f = \frac{1}{2} \frac{w\mu_0 n^2 l^2}{g} \quad (3.13)$$

พลังงานแม่เหล็กในช่องว่างอากาศคือ W_m

$$W_m = \frac{1}{2} \frac{B_g^2}{\mu_0} gxw \quad (3.14)$$

จากการเปรียบเทียบสมการ(3.12)และ(3.14)จะได้แรงเป็น

$$f = \frac{dW_m}{dx} \quad (3.15)$$

โดยสมมติให้ระหว่างที่เกิดการเคลื่อนที่ที่จะต้องให้กระแสคงที่ซึ่งจากสมการ(3.15)สามารถเขียนอธิบายได้เป็น

$$f = \left(\frac{\partial W_m}{\partial x} \right)_{I = \text{constant}} \quad (3.16)$$

สมการ(3.16)นี้ใช้ได้ในทุกกรณีทั่วๆ ไปกรณีทั่วๆ ไปซึ่งเป็นกรณีที่ความต้านทานของขดลวดไม่เป็นศูนย์ส่วนวิธีอื่นเราจะกำหนดให้เส้นแรงแม่เหล็กคงที่ขณะที่มีการเคลื่อนที่ซึ่งได้สมการเป็น

$$f = - \left(\frac{\partial W_m}{\partial x} \right)_{\phi = \text{constant}} \quad (3.17)$$

3.1.2 กรณีค่าความซึมซาบของตัวกลางมีค่าคงที่(constant permeability)

ในกรณีที่ค่าความซึมซาบของตัวกลางในแกนเหล็กมีค่าอนันต์ พบว่าจะเกิดสนามแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศเท่านั้นแต่เมื่อค่าความซึมซาบของตัวกลางมีค่าไม่เป็นอนันต์พบว่าพลังงานแม่เหล็กจะไม่เกิดเฉพาะที่ช่องว่างอากาศเท่านั้นแต่ยังเกิดที่แกนเหล็กและช่องว่างอากาศด้วย ดังนั้นในการวิเคราะห์ถึงตำแหน่งเนื่องจากผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจึงเป็นเรื่องยาก แต่เราจะพิจารณาถึงพารามิเตอร์ของแรงภายใต้การสมมติที่ว่าค่าความซึมซาบของตัวกลางไม่เป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็ก ถ้าขดลวดอินดักแตนซ์ (L) ในรูปที่3.3มีเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคดล้อม จะได้สมการเป็น

$$\Psi = LI \quad (3.18)$$

พลังงานแม่เหล็กในระบบ (W_m) ในระบบแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2 \quad (3.19)$$

ถ้าชิ้นเหล็กเคลื่อนที่ไประยะทาง Δx ใช้ระยะเวลาเป็น Δt ค่าอินดักแตนซ์จะเพิ่มขึ้นเป็น (ΔL) ค่าแรงดันเหนี่ยวนำ (induce emf) ในขดลวดเป็น

$$e = -\frac{\Delta\Psi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(LI)}{\Delta t} \quad (3.20)$$

แต่ถ้าแหล่งจ่ายเป็นแหล่งจ่ายกระแสระยะทางที่เคลื่อนที่ไปจากสมการที่ (3.20) จะได้แรงดันเหนี่ยวนำเป็น

$$e = -I \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad (3.21)$$

ซึ่งแรงดันที่แหล่งจ่ายจะมีขนาดเท่ากับแรงดันเหนี่ยวนำแต่มีทิศทางตรงกันข้ามดังในสมการ(3.21) ซึ่งจะได้กำลังไฟฟ้าเป็น

$$\Delta P_i = I |e| \Delta t = I^2 \Delta L \quad (3.22)$$

พลังงานแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นจะได้เป็น

$$\Delta W_m = \frac{1}{2} I^2 \Delta L \quad (3.23)$$

จากการเปรียบเทียบสมการ (3.22) และ (3.23) พบว่าสมการ(3.23)จะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของสมการ (3.22) โดยพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดจะแบ่งเป็นสองส่วนคือพลังงานในสนามแม่เหล็กและงานทางกลอย่างละครึ่ง

$$\Delta P_o = f \Delta x = \frac{1}{2} I^2 \Delta L \quad (3.24)$$

ซึ่งจะได้แรงเป็น

$$f = \frac{1}{2} I^2 \frac{\Delta L}{\Delta x} \quad (3.25)$$

ในวิธีการข้างต้นนี้จะสมมติให้ความต้านทานของขดลวดเป็นศูนย์และแหล่งจ่ายเป็นแหล่งจ่ายกระแส

3.1.3 การรักษาสภาพความอิ่มตัวของแม่เหล็ก (treatment of magnetic saturation)

โดยทั่วไปแกนเหล็กในสเตปป์มอเตอร์จะเกิดความอิ่มตัวในแกนเหล็กถ้ามอเตอร์ถูกออกแบบให้ใช้งานในช่วงลิเนียร์ ซึ่งเป็นคุณลักษณะของ $(B/H \text{ curve})$ แรงบิดที่ได้จะมีค่าน้อยดังนั้นในการประยุกต์ใช้งานต้องการแรงบิดที่มากขึ้นดังนั้นจึงต้องใช้สเตปป์มอเตอร์ตัวใหญ่ขึ้นด้วยเหตุนี้จึงต้องพิจารณาถึงค่าความอิ่มตัวในแกนเหล็ก

ในการวิเคราะห์จะใช้รูปที่ 3.3 แรง (f) ที่เกิดจากซี่ฟันหรือชิ้นเหล็กเกิดจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเนื่องจากมีกระแสไหลในขดลวดจาก x_0 ถึง $x_0 + \Delta x$ ที่เวลา Δt ในกรณีนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นแรงแม่เหล็กคดโค้งขดลวด (flux linkage) เป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง x และกระแส i และแสดงได้เป็น $\Psi(x, i)$ ในการวิเคราะห์นี้ถ้ากระแส i รักษาระดับกระแสที่ค่า I ระหว่างที่มีการเคลื่อนที่ ดังนั้นจะได้กำลังไฟฟ้าเป็น

$$\Delta P_i = Iv\Delta t = I \frac{\Delta\Psi}{\Delta t} = I\Delta\Psi \tag{3.26}$$

จะได้งานทางกลที่เกิดขึ้นเป็น

$$\Delta P_o = f\Delta x \tag{3.27}$$

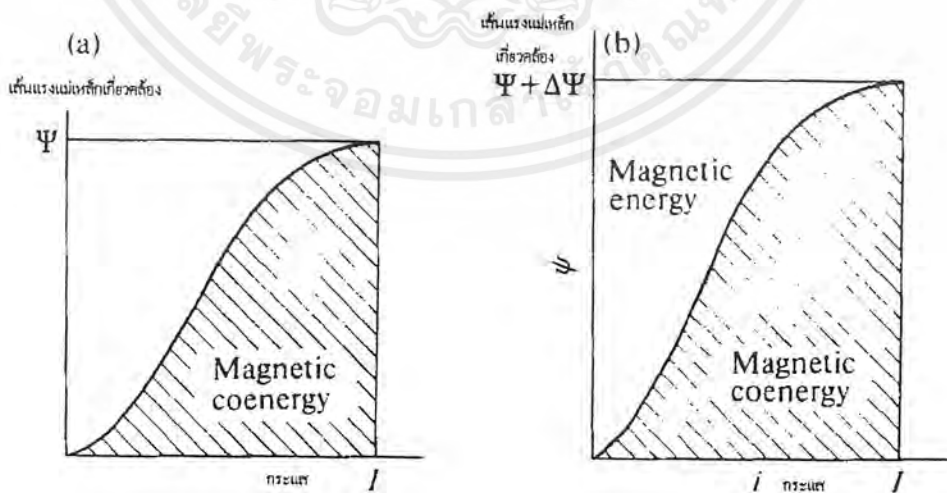
การเพิ่มขึ้นของพลังงานแม่เหล็กในระบบระหว่างที่มีการเคลื่อนที่แสดงได้ดังนี้

$$\Delta W_m = \int_0^{\Psi+\Delta\Psi} i d\Psi(x_0 + \Delta x, i) - \int_0^{\Psi} i d\Psi(x_0, i) \tag{3.28}$$

ในสมการนี้กระแส i จะเปลี่ยนแปลงจาก 0 ถึง I และเส้นแรงแม่เหล็กคดโค้งจะเปลี่ยนแปลงจาก 0 ถึง $\Psi + \Delta\Psi$ ในแต่ละเทอมทางขวามือแสดงถึงลักษณะทางกายภาพได้ดังนี้

เทอมแรก พลังงานแม่เหล็กของระบบซึ่งเกิดที่ขั้วเหล็กที่อยู่ตำแหน่ง $x = x_0 + \Delta x$ ซึ่งเกิดที่ขั้วเหล็กที่อยู่ตำแหน่ง $x = x_0$ การอินทิเกรตจะได้งานซึ่งเกี่ยวข้องกับเส้นแรงแม่เหล็กคดโค้งจาก 0 ถึง $\Psi + \Delta\Psi$ ซึ่ง x คงที่ที่ตำแหน่ง $x_0 + \Delta x$ (ดูในรูป 3.5b)

เทอมที่สอง พลังงานแม่เหล็กของระบบซึ่งเกิดที่ขั้วเหล็กที่อยู่ตำแหน่ง $x = x_0$ การอินทิเกรตจะได้งานซึ่งเกี่ยวข้องกับเส้นแรงแม่เหล็กคดโค้งจาก 0 ถึง Ψ ซึ่ง x คงที่ที่ตำแหน่ง x_0 ในรูป 3.5a



รูป 3.5 แสดง magnetic energy, co-energy ที่ตำแหน่งสองตำแหน่ง

(a) $x = x_0$ (b) $x = x_0 + \Delta x$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอินทิเกรตในแต่ละส่วนจะได้ดังนี้

เทอมแรก

$$\int_0^{\Psi+\Delta\Psi} i d\Psi = I(\Psi + \Delta\Psi) + \int_0^I \Psi(x_0, i) di \quad (3.29)$$

เทอมที่สอง

$$\int_0^{\Psi} i d\Psi = I\Psi - \int_0^I \Psi(x_0, i) di \quad (3.30)$$

เทอมที่สองทางขวามือมีสองสมการซึ่งอยู่ในรูปแบบ *magnetic co-energy* (ดูในรูป 3.5) นำลงไปแทนในสมการ (3.28) จะได้

$$\Delta W_m = I\Delta\Psi - \left\{ \int_0^I \Psi(x_0 + \Delta x, i) di - \int_0^I \Psi(x_0, i) di \right\} \quad (3.31)$$

ซึ่งเทอมที่สองเป็นการเปลี่ยนแปลงใน *magnetic co-energy* ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ ดังนั้นสมการ (3.31) อาจเขียนได้ใหม่เป็น

$$\Delta W_m = I\Delta\Psi - \Delta \int_0^I \Psi(x, i) di \quad (3.32)$$

ซึ่งเทอมแรกทางขวามือคือกำลังไฟฟ้าคงแสดงในสมการ (3.26) อาจเขียนสมการ (3.32) ได้ใหม่ดังนี้

$$\Delta P_i = \Delta W_m + \Delta \int_0^I \Psi(x, i) di \quad (3.33)$$

อาจเขียนได้ใหม่เป็น

$$\Delta P_i = \Delta W_m + \Delta P_o \quad (3.34)$$

จากการเปรียบเทียบสมการ (3.33) และ (3.34) จะได้ความสัมพันธ์ของงานทางกลเป็น

$$\Delta P_o = f\Delta x = \Delta \int_0^I \Psi(x, i) di \quad (3.35)$$

จากนั้นจะได้แรงเป็น

$$f = \frac{\partial \int_0^I \Psi(x, i) di}{\partial x} = \left[\frac{\partial (\text{magnetic coenergy})}{\partial x} \right]_{I = \text{constant}} \quad (3.36)$$

และแรงบิดก็พิจารณาลักษณะเดียวกันกับแรงดังนั้นจะได้แรงบิดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = \frac{\partial \int_0^I \Psi(\theta, i) di}{\partial \theta} = \left[\frac{\partial (\text{magnetic coenergy})}{\partial \theta} \right]_{I = \text{constant}} \quad (3.37)$$

เมื่อ θ คือ ตำแหน่งของมุมโรเตอร์
มีสมการพื้นฐานที่สำคัญในการคำนวณแรงและแรงบิดในสเตปิงมอเตอร์เมื่อเกิดผลของสถานะความอิ่มตัวของแม่เหล็ก (Magnetic Saturation) เมื่อระบบมีขดลวด n ขดจะได้แรงบิดเป็น

$$T = \frac{\partial}{\partial \theta} \sum_{i=1}^n \int_0^I \Psi(\theta, i) di \quad (3.38)$$

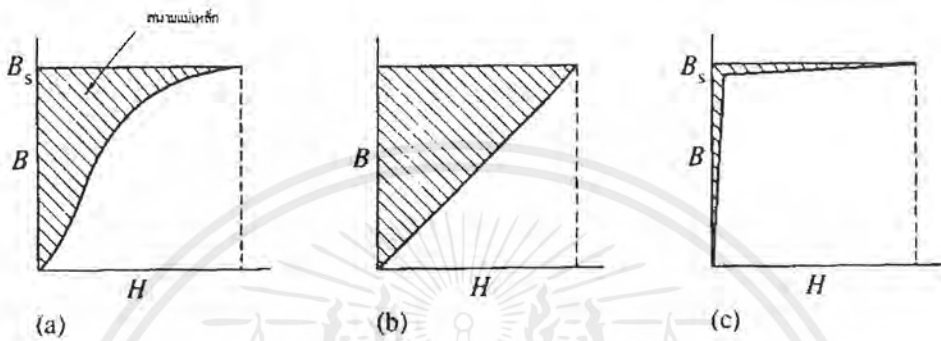
3.1.4 ผลกระทบจากความอิ่มตัวทางแม่เหล็กต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพ (effect of saturation to improve efficiency)

การพิจารณา ผลกระทบเนื่องจากความอิ่มตัวทางแม่เหล็กโดยพิจารณาดังรูปที่ 3.6 พบว่าขนาดของช่องว่างอากาศจะมีขนาดเล็กมาก ในการวิเคราะห์ให้ช่องว่างอากาศเป็นศูนย์ ลักษณะโครงสร้างคือเป็นชิ้นเหล็กสี่เหลี่ยม มีคุณลักษณะเป็นไปตามกราฟ B/H ระดับที่ทำให้เกิดการอิ่มตัวแสดงที่จุด B_s สมมติให้ค่าเฉลี่ยค่าความซึมซาบของตัวกลางมีค่าสูงกว่า ค่าความซึมซาบของตัวกลางในช่องว่างอากาศแต่ยังมีค่าน้อยกว่าค่าความซึมซาบของตัวกลางในแกนสเตเตอร์ดังสมการ

$$\mu_0 \ll \frac{B_s}{H} \ll \text{permeability of stator core} \quad (3.39)$$

ภายใต้เงื่อนไขนี้ พลังงานแม่เหล็กที่สะสมในระบบมีค่าน้อย พลังงานไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเป็นพลังงานทางกลอธิบายได้ดังนี้ ในที่ว่างค่าความซึมซาบของตัวกลางเป็นค่าคงที่ พลังงานแม่เหล็กที่สะสมต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรเป็น $\frac{B^2}{2\mu}$ ข้อแรก จะพบว่าพลังงานแม่เหล็กในแกนสเตเตอร์มีค่าต่ำ เนื่องจากสมมติให้ค่าความซึมซาบของตัวกลางมีค่าสูง ข้อสอง ปริมาตรของช่องว่างอากาศมีค่าน้อยทำให้พลังงานแม่เหล็กที่ช่องว่างอากาศมีค่าน้อยด้วยพบว่าปัญหาคือการประมาณพลังงานแม่เหล็กในชิ้นเหล็กซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็ก โดยสมมติให้วัสดุที่นำมาทำเป็นชิ้นเหล็ก (iron piece) มีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นตามคุณลักษณะของกราฟ B-H (B-H curve) โดยปกติแล้วพลังงานแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรคือ $\int_0^B H dB$ และค่าของการอินทิเกรตจะเท่ากับพื้นที่ที่แรเงาตามรูป 3.6

จากรูป 3.6a แสดงถึงความสัมพันธ์ของกราฟ B/H โดยทั่วไป รูป 3.6b แสดงถึงความสัมพันธ์ของกราฟ B/H ที่เป็นเชิงเส้น รูป 3.6c แสดงถึงเมื่อเกิดสถานะอิ่มตัวพื้นที่ที่แรเงาจะมีขนาดเล็กมากซึ่งหมายถึงพลังงานแม่เหล็กที่สะสมในที่ว่างมีค่าน้อยด้วย



รูปที่ 3.6 แสดงพื้นที่แรเงาแสดงถึงพลังงานแม่เหล็กต่อปริมาตร

ต่อไปเราจะพิจารณาว่าพลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานทางกลได้อย่างไร เส้นแรงแม่เหล็กซึ่งอยู่ในแกนเหล็กสเตเตอร์และที่ขั้วเหล็ก (iron piece) แต่ละอันที่ซ้อนทับกันจะได้

$$\phi = B_s x w \quad (3.40)$$

เส้นแรงแม่เหล็กที่คล้องขดลวด (flux linkage) เป็น

$$\Psi = n B_s x w \quad (3.41)$$

เมื่อ โรเตอร์เคลื่อนที่จะได้แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็น

$$-e = n B_s w \frac{dx}{dt} \quad (3.42)$$

งานที่ทำต่อเวลาหรือพลังงานไฟฟ้าคือ

$$-eI = In B_s w \frac{dx}{dt} \quad (3.43)$$

จากที่เคยพบมาพลังงานไฟฟ้าอาจจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปพลังงานแม่เหล็กและงานทางกล แต่อย่างไรก็ตามพลังงานแม่เหล็กในกรณีนี้มีค่าเพียงเล็กน้อยสามารถตัดทิ้งได้ ส่วนใหญ่แล้วพลังงานไฟฟ้าจะเปลี่ยนเป็นพลังงานทางกลขาออกได้เสีย ซึ่งงานทางกลที่ทำกับขั้วเหล็ก (โรเตอร์) คือแรงคูณกับความเร็ว จะได้

$$f \frac{dx}{dt} = In B_s w \frac{dx}{dt} \quad (3.44)$$

ดังนั้นจะได้แรงเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f = \ln B_s w \quad (3.45)$$

เมื่อความสัมพันธ์ของ $B-H$ เป็นเชิงเส้น ค่าสุดท้ายของความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กเป็น B_s จะได้แรงเป็น

$$f = \frac{1}{2} \ln B_s w \quad (3.46)$$

พิจารณาสมการ (3.45) จากกฎของ *magnetic co-energy* ซึ่งค่า *co-energy* ต่อหน่วย ปริมาตรในชั้นเหล็ก (โรเตอร์) คือ $\int_0^B B dH = B_s H$ และ ค่า *co-energy* ในขณะที่หยุดนิ่งมีค่าเพียงเล็กน้อยสามารถตัดทิ้งได้

จากการเปรียบเทียบสมการ (3.45) และ (3.46) หากต้องการปรับปรุงแรงบิดในสเตปป์ิงมอเตอร์พบว่าวัสดุที่ใช้ทำแกนเหล็กต้องเป็นไปตามคุณลักษณะของกราฟ $B-H$ ในลักษณะที่เป็นเชิงเส้น โดยเหล็กที่ใช้ทำโรเตอร์จะต้องมีค่าความอิ่มตัวแม่เหล็กสูงจะทำให้ได้แรงบิดที่มากขึ้น และความยาวของช่องว่างอากาศจะต้องสั้นที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งที่ช่องว่างอากาศนี้จะเป็นที่เก็บสะสมพลังงานแม่เหล็ก

จากการวิเคราะห์ที่ผ่านมามีให้ความต้านทานของขดลวดเป็นศูนย์และทำการดิฟเฟอเรนทิเอทเพื่อหาแรงและแรงบิดจะทำได้ง่าย แต่เมื่อพิจารณาค่าความสูญเสียจะต้องคิดค่าความต้านทานของการพันขดลวดด้วย ในการขับสเตปป์ิงมอเตอร์ในสภาวะปกติพบว่าพลังงานแม่เหล็กในแต่ละเฟสจะส่งไปมาระหว่างตัวมอเตอร์กับแหล่งจ่ายพลังงาน โดยในวงจรขับบางวงจรพลังงานแม่เหล็กจะย้อนกลับไปสู่แหล่งจ่ายพลังงานผ่านฟีดแบ็คไดโอด (Feedback Diode) แต่บางวงจรพลังงานแม่เหล็กที่สูญเสียไปอาจอยู่ในรูปของพลังงานความร้อนในขดลวดและส่วนต่างๆ ของวงจร ดังนั้นถ้าหากพลังงานแม่เหล็กสะสมในระบบลดลง ค่าความสูญเสียก็น้อยลง ซึ่งเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบให้ดีขึ้น จากผลกระทบของความอิ่มตัวแม่เหล็ก ในปัจจุบันนี้ ในการออกแบบสเตปป์ิงมอเตอร์จะใช้แกนเหล็กซิลิคอนมาทำโรเตอร์และสเตเตอร์ ซึ่งจะช่วยให้แรงบิดสถิตย์ดีขึ้น

3.1.5 ผลกระทบของค่าความเหนี่ยวนำร่วม (mutual inductance)

ในการขับแบบสองเฟสและฮาล์ฟสเตปป์ิงจะต้องการให้ค่าความเหนี่ยวนำร่วมมีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำร่วมจะทำให้ความเที่ยงตรงของตำแหน่งลดลงเมื่อพิจารณาแบบเชิงเส้น และพิจารณาถึงผลของค่าความเหนี่ยวนำร่วมจะได้แรงบิดเป็นดังนี้ พิจารณาในรูป 3.7 เมื่อแหล่งกำเนิดพลังงานและแหล่งกำเนิดกระแส จะได้แรงดันเหนี่ยวนำในแต่ละเฟสเป็น

$$e_1 = -I_1 \frac{\Delta L_1}{\Delta t} - I_2 \frac{\Delta M}{\Delta t} \quad (3.47)$$

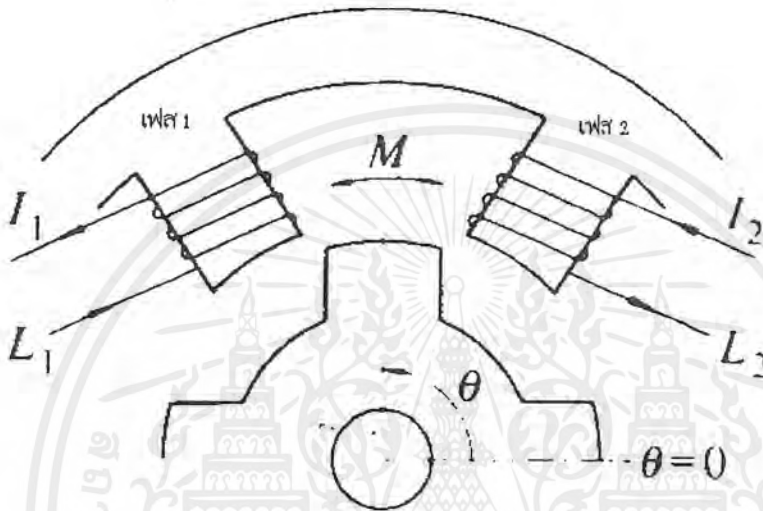
$$e_2 = -I_2 \frac{\Delta L_2}{\Delta t} - I_1 \frac{\Delta M}{\Delta t} \quad (3.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ L_1 คือ ค่าความเหนี่ยวนำของเฟสหนึ่ง

L_2 คือ ค่าความเหนี่ยวนำของเฟสสอง

M คือ ค่าความเหนี่ยวนำร่วมของทั้งสองเฟส



รูปที่ 3.7 แสดงถึง โมเดลของสเตปป์มอเตอร์เมื่อเกิดความเหนี่ยวนำร่วม

กำลังไฟฟ้าจากที่ท่าโดยแหล่งจ่ายพลังงานทั้งสองแหล่งจ่ายระหว่างช่วงเวลาที่เพิ่มขึ้นเป็น

$$\Delta P_i = I_1^2 \Delta L_1 + I_2^2 \Delta L_2 + 2I_1 I_2 \Delta M \quad (3.49)$$

พลังงานที่เพิ่มขึ้นในระบบเป็น

$$\Delta W_m = \frac{1}{2} (I_1^2 \Delta L_1 + I_2^2 \Delta L_2) + I_1 I_2 \Delta M \quad (3.50)$$

จากสมการ(3.49)และ (3.50) พบว่าครึ่งหนึ่งของกำลังไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดจะเปลี่ยนรูปพลังงานเป็นการเพิ่มขึ้นของพลังงานแม่เหล็ก เนื่องจากครึ่งหนึ่งของกำลังไฟฟ้าถูกเปลี่ยนไปเป็นกำลังทางกลขาออก(mechanical output)ซึ่งแรงบิดจะให้เป็น

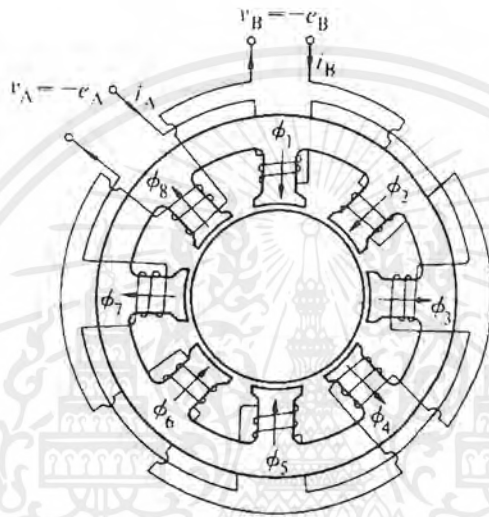
$$T = \frac{1}{2} I_1^2 \frac{\partial L_1}{\partial \theta} + \frac{1}{2} I_2^2 \frac{\partial L_2}{\partial \theta} + I_1 I_2 \frac{\partial M}{\partial \theta} \quad (3.51)$$

3.2 ทฤษฎีการสร้างแรงบิดในไฮบริดจ์สเตปป์มอเตอร์

ในที่นี้จะพิจารณามอเตอร์แบบสองเฟส โดยมีลักษณะของโพลเป็นไปตามรูปที่3.8 ขดลวดสเตเตอร์ต่อแบบไบโพลาร์ โดยขดลวดของโพลที่ 1,3,5,7ต่ออนุกรมรวมเป็นเฟสเอ และขดลวดบนโพล 2,4,6,8 ต่ออนุกรมรวมเป็นเฟสบี สามารถวิเคราะห์ได้ง่ายๆ โดยไม่คิดผลของความต้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทานของขดลวด, กระแสไหลวน (eddy current) , ค่าความเหนี่ยวนำร่วม (mutual induction) , และผลของฮิสเตอร์รีซิส (hysteresis) และสมบัติให้วงจรแม่เหล็กในสเตปิงมอเตอร์เป็นเชิงเส้น ซึ่งกระแสในสเตเตอร์จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็ก โดยที่เส้นแรงแม่เหล็กนี้ไม่ขึ้นกับแม่เหล็กภายในตัวมอเตอร์ส่วนกระแสในสเตเตอร์จะแปรผันตรงกับแรงดันของแหล่งจ่ายไฟ



รูปที่ 3.8 แสดงถึงรูปแบบของสเตปิงมอเตอร์ที่มีการต่อแบบสองเฟส

กฎของการแปรรูปพลังงาน(energy conversion)

$$\text{พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งจ่าย} = \text{กำลังกลขาออก} + \text{อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานแม่เหล็ก} \quad (3.52)$$

จากสมการ(3.52)จะเขียนได้เป็น

$$-(e_A i_A + e_B i_B) = T \frac{d\theta}{dt} + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} i_A^2 L_A + \frac{1}{2} i_B^2 L_B \right) \quad (3.53)$$

เมื่อ e_A คือแรงดันเหนี่ยวนำในเฟสเอ

e_B คือแรงดันเหนี่ยวนำในเฟสบี

i_A คือกระแสในเฟสเอ

i_B คือกระแสในเฟสบี

L_A คือค่าความเหนี่ยวนำในเฟสเอ

L_B คือค่าความเหนี่ยวนำในเฟสบี

T คือแรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติให้วงจรแม่เหล็กเป็นเชิงเส้นและค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างทั้งสองเฟสมีค่าน้อยมากไม่นำมาพิจารณา ทำให้สามารถแยกองค์ประกอบของแรงบิดได้ทั้งเฟสเอและเฟสบีได้เป็น

$$T = T_A + T_B \quad (3.54)$$

$$-e_A i_A = T_A \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} i_A^2 L_A \quad (3.55)$$

$$-e_B i_B = T_B \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} i_B^2 L_B \quad (3.56)$$

3.2.1 ผลของแม่เหล็กถาวรมีผลต่อแรงบิดอย่างไร

แรงดันที่ขั้วของแต่ละเฟสเป็นผลรวมขององค์ประกอบสองอย่างคือ หนึ่ง แรงดันที่สร้างจากแม่เหล็กถาวรซึ่งสร้างแรงแม่เหล็กคดโค้งขดลวด ทำให้มีกระแสไหลผ่านอินดักเตนซ์ของแต่ละเฟส จากสมการ (3.55) สำหรับเฟสเอเขียนได้ใหม่เป็น

$$-(e_{gA} + e_{LA}) i_A = T_A \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} i_A^2 L_A \quad (3.57)$$

เมื่อ e_{LA} คือ แรงดันเหนี่ยวนำเนื่องจากมีกระแสไหลในเฟสเอ

$$e_{LA} = -\frac{d}{dt} (i_A L_A) \quad (3.58)$$

แทนค่า e_{LA} ในสมการ(3.58)แทนลงในสมการ (3.57) จะได้

$$-e_{gA} i_A + i_A \frac{d}{dt} (i_A L_A) = T_A \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} i_A^2 L_A \quad (3.59)$$

$$i_A \frac{d}{dt} (i_A L_A) - \frac{1}{2} \frac{d}{dt} i_A^2 L_A = i_A^2 \frac{dL_A}{dt} + L_A i_A \frac{di_A}{dt} - \frac{1}{2} L_A \frac{di_A^2}{dt} - \frac{1}{2} i_A^2 \frac{dL_A}{dt} \quad (3.60)$$

ซึ่งตัดเทอมที่สองและเทอมที่สามจะได้เป็น

$$\frac{1}{2} i_A^2 \frac{dL_A}{dt} = \frac{1}{2} i_A^2 \frac{dL_A}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (3.61)$$

แทนค่าความสัมพันธ์นี้ในสมการ (3.57) จะได้แรงบิดของเฟสเอเป็น

$$T_A = -\frac{e_{gA} i_A}{\theta} + \frac{1}{2} i_A^2 \frac{dL_A}{d\theta} \quad (3.62)$$

$$\text{เมื่อ} \quad \theta = \frac{d\theta}{dt} \quad (3.63)$$

เทอมที่สองทางขวาของสมการ(3.62)แสดงถึงแรงบิดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของเฟสอินดักเตนซ์กับตำแหน่งของโรเตอร์ซึ่งเป็นพื้นฐานของวีอาร์สเตปปีงมอเตอร์ แต่ในสเตปปีงมอเตอร์แบบไฮบริดการเปลี่ยนแปลงของเฟสอินดักเตนซ์จะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจะไม่นำมาพิจารณาซึ่งจะได้แรงบิดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = -\frac{(e_{gA}i_A + e_{gB}i_B)}{\theta} \quad (3.64)$$

แรงดันเหนี่ยวนำในแต่ละเฟสเป็น

$$e_{gA} = n(-\phi_1 + \phi_3 - \phi_5 + \phi_7) \quad (3.65)$$

$$e_{gB} = n(-\phi_1 + \phi_4 - \phi_6 + \phi_8) \quad (3.66)$$

เมื่อ

n = จำนวนรอบของแต่ละโพล

Φ_k = เส้นแรงแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรในแต่ละเฟส

3.3 โครงสร้างของซี่ฟัน, จำนวนของซี่ฟัน, สเตคต้อรอบ, และจำนวนโพล

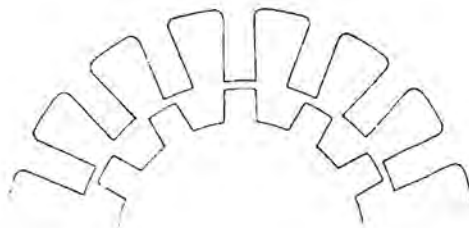
3.3.1 โครงสร้างของซี่ฟัน

โครงสร้างพื้นฐานของซี่ฟันของสเตคต้อโรเตอร์ แบ่งได้เป็นสามชนิด ชนิดที่หนึ่งดังแสดงในรูป 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงถึง โครงสร้างของซี่ฟันของสเตเตอร์และ โรเตอร์ที่เหมือนกัน

จำนวนซี่ฟันของ โรเตอร์และสเตเตอร์จะตรงกันและเท่ากัน จะเก็บและคายพลังงานที่เวลาเดียวกัน โครงสร้างแบบนี้ส่วนใหญ่พบในวีอาร์มอเตอร์แบบหลายสเตค (multistack vr motor) ชนิดที่สองแสดงดังในรูป 3.10 จำนวนซี่ฟันของ โรเตอร์และสเตเตอร์จะต่างกัน โครงสร้างแบบนี้พบใน วีอาร์มอเตอร์แบบสเตคเดียว (single stack vr motor) ในมุมสเตคกว้างๆ



รูปที่ 3.10 แสดงถึง โครงสร้างของซี่ฟันของ โรเตอร์และ สเตเตอร์ที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดที่ตามแสดงในรูป3.11 ซี่ฟันของสเตเตอร์จะจัดอยู่ในกลุ่มของ โพล, ขณะที่ซี่ฟันของโรเตอร์เป็นการแบ่งส่วนที่เหมือนกันอยู่รอบนอก โครงสร้างแบบนี้จะพบในวีอาร์มอเตอร์แบบสแตคเดียวในมอเตอร์แบบต่างๆและในไฮบริดจ์สแตคปิ้งมอเตอร์



รูปที่ 3.11 (a)แสดงถึงความกว้างของซี่ฟันของ โรเตอร์และสเตเตอร์เท่ากัน (b)ความกว้างของซี่ฟันของสเตเตอร์ยาวกว่าของโรเตอร์

ในไฮบริดจ์สแตคปิ้งมอเตอร์บางตัวมีจำนวนซี่ฟันของ โรเตอร์และสเตเตอร์ต่างกันดังในรูป 3.11(b) โรเตอร์มีซี่ฟัน50ซี่ และสเตเตอร์มีซี่ฟัน48ซี่ ในการออกแบบสแตคปิ้งมอเตอร์จะต้องกำหนดอัตราส่วนซี่ฟันต่อสลอตซึ่งอัตราส่วนซี่ฟันต่อสลอตนี้เป็นปัญหาที่สำคัญมากมีผลกระทบต่อคุณลักษณะของแรงบิดสถิตย์และคุณลักษณะทางไดนามิกอีกด้วยและยังเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการกำหนดค่าอินดักแตนซ์ของแต่ละเฟส

โครงสร้างของซี่ฟันไฮบริดจ์สแตคปิ้งมอเตอร์และวีอาร์มอเตอร์มีคุณลักษณะดังนี้

- 1.ความกว้างของซี่ฟันต่ออัตราส่วนของระยะห่างของซี่ฟันใกล้ 0.5
- 2.ความลึกของร่องสลอตในสเตเตอร์(d) ประมาณครึ่งหนึ่งของ ระยะห่างของซี่ฟัน
- 3.อัตราส่วนของ $\frac{t}{\lambda}$ ของโรเตอร์อยู่ในช่วง0.38ถึง0.45
- 4.ลักษณะของสลอตในโรเตอร์เป็นครึ่งวงกลม และลักษณะของสลอตในสเตเตอร์เป็นแบบครึ่งวงกลมหรือแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก(rectangular)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ความยาวของช่องว่างอากาศจะต้องมีขนาดเล็ที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยปกติแล้วจะมีความยาวเป็น 0.05 มิลลิเมตร แต่สำหรับกรณีพิเศษจะมีความยาวเป็น 0.02 มิลลิเมตร

3.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนซี่ฟัน, สเตปต่อรอบ และจำนวนของเฟส

ให้จำนวนของเฟสเป็น m , จำนวนซี่ฟันของโรเตอร์เป็น N_r และสเตปต่อรอบเป็น s จะได้สมการดังนี้

$$s = mN_r \quad (3.67)$$

สมการ(3.68) ใช้กับการกระตุ้นแบบหนึ่งเฟสหรือสองเฟส แต่ในการกระตุ้นแบบครึ่งสเตปจะได้สมการเป็น

$$s = 2mN_r \quad (3.68)$$

พิจารณาโครงสร้างของซี่ฟัน ผลต่างของซี่ฟันของสเตเตอร์ และซี่ฟันของโรเตอร์ในโครงสร้างของซี่ฟันแบบที่สองในรูปที่ 3.10 จะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$q = |N_r - N_s| \quad (3.69)$$

เมื่อ N_r คือ จำนวนซี่ฟันของโรเตอร์

N_s คือ จำนวนซี่ฟันของสเตเตอร์

$$q = \frac{N_s}{m} \quad \text{จำนวนซี่ฟันของสเตเตอร์ต่อเฟส} \quad (3.70)$$

นำค่า $m = \frac{N_s}{q}$ ในสมการ(3.70) แทนในสมการ (3.69) จะได้

$$s = \frac{N_r N_s}{q} \quad (3.71)$$

นำค่า ความสัมพันธ์ของสมการ(3.68) แทนลงในสมการ(3.71) จะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$s = \frac{N_r N_s}{N_r - N_s} \quad (3.72)$$

จากสมการ (3.69), (3.70) และ(3.72) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง q , S , และ M เป็น

$$s = m(m+1)q \quad , N_r > N_s \quad (3.73)$$

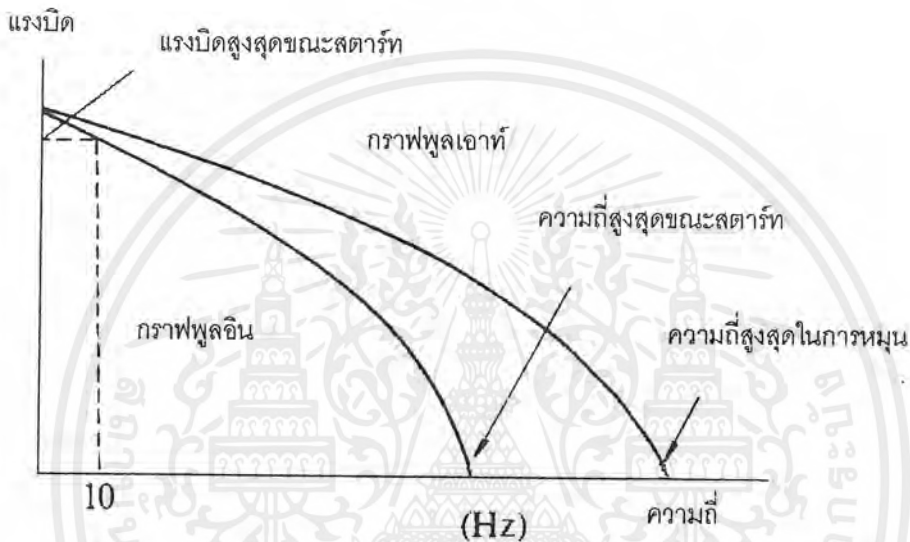
$$s = m(m-1)q \quad , N_r < N_s \quad (3.74)$$

มุมสเตป (step angle) เป็น

$$\theta_s = \frac{360^\circ}{s} \quad (3.75)$$

3.4 คุณลักษณะของแรงบิดมีความสัมพันธ์กับความเร็วของสเตปิ่งมอเตอร์

จากรูปที่ 3.12 อัตราการสเตป แปรผันตรงกับความเร็ว ซึ่งสเตปต์ออบบขึ้นอยู่กับโครงสร้างของซีพิน, จำนวนเฟส, และโหมคการกระตุ้น กราฟสองกราฟในรูปคือกราฟแรงบิดพลอินและกราฟแรงบิดพลเอาท ซึ่งรู้จักในชื่อกราฟของการหมุน



รูปที่ 3.12 แสดงถึงกราฟคุณลักษณะของแรงบิดเปรียบเทียบกับความเร็ว

3.4.1 คุณลักษณะของแรงบิดพลเอาท

กราฟแรงบิดพลเอาทเทียบกับความเร็วแสดงถึงค่าสูงสุดของแรงเสียดทานของโหลดซึ่งสเตปิ่งมอเตอร์สามารถหมุนได้โดยไม่สูญเสียซึ่ง โครนิซึมที่อัตราการสเตปที่กำหนด สมการที่แสดงถึงแรงบิดของมอเตอร์ที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วคงตัว (steady speed) คือ

$$T = \frac{N_r n \phi_m}{\sqrt{(r^2 + \omega^2)}} V \sin(\rho + v) - \frac{n^2 N_r \phi_m^2 \omega r}{r^2 + \omega^2 L^2} \quad (3.76)$$

เมื่อ $v = \tan^{-1}\left(\frac{r}{\omega L}\right) \quad (3.77)$

r คือผลรวมของความต้านทานของขดลวดกับความต้านทานจากวงจรภายนอกและในสมการ(3.76)

ρ เป็นมุมแรงบิดของโรเตอร์ซึ่งแรงบิดพลเอาท T_p จะหาได้เมื่อ $\rho + v = \frac{\pi}{2}$

$$T_p = \frac{n N_r \Phi_m V}{\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}} - \frac{n^2 N_r \Phi_m \omega r}{r^2 + \omega^2 L^2} \quad (3.78)$$

จากสมการที่(3.78)ถ้าค่า $\omega = 0$ จะได้ค่าสูงสุดของแรงบิดสถิตเป็น (maximum static torque)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_M = \frac{nN_r \Phi_M V}{r} = nN_r \Phi_M I_M \quad (3.79)$$

เมื่อ I_M คือกระแสสูงสุดในแต่ละเฟส
จะได้ ค่าคงที่ของมอเตอร์เป็น (motor constant)

$$k_p = \frac{n\Phi_M}{L(V/r)} = \frac{n\Phi_M}{LI_M} \quad (3.80)$$

ค่าคงที่ของแรงบิดเป็น (torque constant)

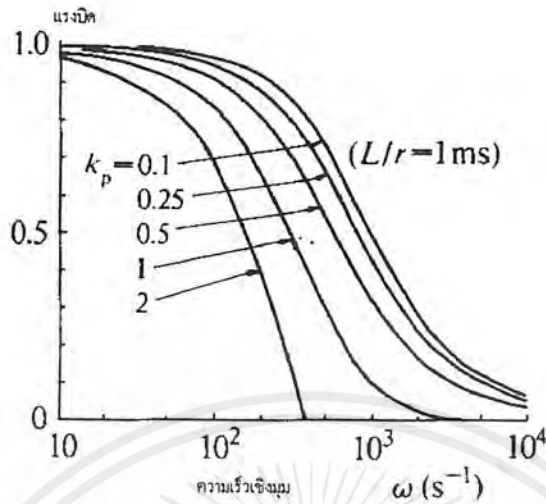
$$k_T = 2nN_r \Phi_M \quad (3.81)$$

ความถี่ธรรมชาติเป็น (natural angular frequency)

$$\omega_{np} = \sqrt{\frac{N_r k_T I_0}{J}} \quad (3.82)$$

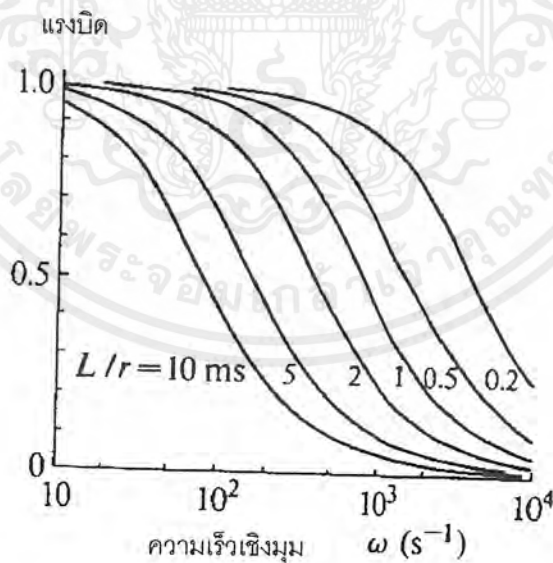
3.4.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมแรงบิดและความเร็ว

เมื่อมอเตอร์มีการเคลื่อนที่พบว่าพารามิเตอร์ 2 ชนิดที่ใช้ควบคุมแรงบิดและความเร็วของสเตปป์มอเตอร์คือ 1. ค่าคงที่เวลาของสเตเตอร์ $\left(\frac{L}{r}\right)$ 2. ค่าคงที่ของมอเตอร์ k_p ในรูป 3.13 ผลของค่าคงที่ของมอเตอร์กับกราฟของแรงบิด โดยค่าคงที่ของเวลาเป็น 1ms จากกราฟพบว่าถ้า ค่าคงที่ของแรงบิด ลดลงค่าแรงบิดจะเพิ่มขึ้น ส่วนใหญ่แล้วสเตปป์มอเตอร์แบบไฮบริดจะมีค่าคงที่ของแรงบิดอยู่ในช่วง 0.2-0.6 ถ้าค่าคงที่ของแรงบิดสูงขึ้นแรงบิดจะลดลงและจะทำให้การหน่วงดีขึ้น



รูปที่ 3.13 แสดงถึงผลกระทบของ k_p ต่อแรงแบคพูลเอาท

ผลของการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของเวลาโดยการเปลี่ยนความต้านทานอนุกรมโดยการเปลี่ยนระดับแรงดัน โดยที่รักษาระดับกระแสให้คงเดิม ดังรูปที่ 3.14 แสดงถึงสเตปิงมอเตอร์แบบไฮบริดจ์ที่ค่า $k_p = 0.5$ ถ้าความต้านทานเพิ่มขึ้นแรงแบคจะเพิ่มขึ้นแต่จะเกิดค่าความสูญเสียเนื่องจากความร้อนก็จะเพิ่มขึ้นการหน่วงก็จะลดลง



รูปที่ 3.14 แสดงถึงผลกระทบของ L/r ต่อแรงแบคพูลเอาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 คุณสมบัติของแรงบิดพูลอิน

กราฟของแรงบิดพูลอินเทียบกับความเร็ว แสดงถึงค่าสูงสุดของแรงบิดเนื่องจากแรงเสียดทานของโหลด โดยที่มอเตอร์เริ่มหมุนได้โดยไม่เสียสเตป ในการวิเคราะห์จะต้องพิจารณาถึงผลของแรงเฉื่อยและแรงเสียดทานเนื่องจากโหลด

3.5 เรโซแนนซ์และการขาดเสถียรภาพ (resonance and instability)

ปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งของแรงบิดพูลเอาท์ คือ เรโซแนนซ์และการขาดเสถียรภาพจะเกิดขึ้นเมื่อสเตปปีงมอเตอร์มีความเร็วเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นปรากฏการณ์การแกว่งตัวของสเตปปีงมอเตอร์ขณะที่ขับเคลื่อนสเตปปีงมอเตอร์ในสภาวะปกติ ซึ่งบางครั้งขนาดของการแกว่งตัวเพิ่มขึ้นจนอาจทำให้สเตปปีงมอเตอร์สูญเสียสเตป

ผลของเรโซแนนซ์และการขาดเสถียรภาพแยกได้เป็น 3 กรณี

1. เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำ
2. การขาดเสถียรภาพที่ย่านความถี่กลาง
3. การแกว่งตัวที่ย่านความถี่สูง

อย่างไรก็ตามภาวะการขาดเสถียรภาพนี้อาจจะเกิดขึ้นขณะที่เริ่มสตาร์ทได้ซึ่งเกิดเมื่อสเตปปีงมอเตอร์ที่ต่อโหลดภาระบางค่าแล้วไม่สามารถสตาร์ทได้ที่อัตราการสเตปปกติ คือสตาร์ทแล้วมอเตอร์เสียสเตปซึ่งผลของการขาดเสถียรภาพนี้จะเกิดในกราฟของแรงบิดพูลเอาท์ด้วย

3.5.1 เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำ

เมื่อเริ่มสตาร์ทสเตปปีงมอเตอร์ที่ความถี่ต่ำๆและทำการเพิ่มความถี่อย่างช้าๆ เรโซแนนซ์แรกจะเกิดที่ฮาร์โมนิคย่อยของความถี่ธรรมชาติซึ่งเกิดที่บริเวณความถี่ 100Hz การแกว่งตัวจะเกิดที่บริเวณความถี่ต่ำกว่า 200Hz ซึ่งเรียกการแกว่งตัวในช่วงความถี่นี้ว่า เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่ำ

3.5.2 การขาดเสถียรภาพที่ย่านความถี่กลาง

เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นอยู่ในย่าน 500-1500Hz ผลของการแกว่งตัวที่ย่านความถี่นี้เรียกว่า เรโซแนนซ์ที่ย่านความถี่กลาง หรือ การขาดเสถียรภาพที่ย่านความถี่กลาง ซึ่งเป็นผลมาจากการขาดเสถียรภาพในตัวมอเตอร์หรือการขาดเสถียรภาพที่วงจรขับ ลักษณะของการแกว่งตัวที่ย่านความถี่นี้จะแตกต่างจากย่านการแกว่งตัวที่ย่านความถี่ธรรมชาติ พบว่าการขาดเสถียรภาพที่ย่านความถี่กลางนี้เป็นปัญหาที่สำคัญมากในการขับเคลื่อนสเตปปีงมอเตอร์ ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องหลีกเลี่ยงการขาดเสถียรภาพของระบบ

องค์ประกอบและลักษณะที่สำคัญที่ทำให้เกิดการขาดเสถียรภาพที่ย่านความถี่กลาง

1. ความถี่ที่ทำให้เกิดการแกว่งตัวอาจจะมีหลายความถี่

2. บางครั้งการขับสเปปิงมอเตอร์ที่สภาวะปกติ อาจจะมีการแกว่งตัวเกิดขึ้น ซึ่งการแกว่งตัวนี้จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนกระทั่งถึงจุดๆ หนึ่งก็จะทำให้สเปปิงมอเตอร์สูญเสียสเปปได้ แม้ว่าเวลาอาจจะผ่านไปหลายนาทีแล้วก็ตาม

3. การขาดเสถียรภาพของระบบขึ้นอยู่กับ ชนิดของวงจรขับและ โหมตการกระตุ้น

4. ในการขับสเปปิงมอเตอร์ที่ย่านความถี่สูงๆ ผลของเรโซแนนซ์จะมีผลต่อตำแหน่งการหมุนของสเปปิงมอเตอร์

5. ถ้ามีความเฉื่อยเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการขาดเสถียรภาพได้ง่ายขึ้น

3.5.3 ผลของการเปลี่ยนพารามิเตอร์มีผลทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ

1. แรงบิดจากโหลด (load torque) ถ้าแรงบิดจากโหลดเพิ่มขึ้นจะทำให้ความถี่ที่ทำให้สเปปิงมอเตอร์สูญเสียสเปปลดลง

2. ความเฉื่อยจากโหลด (moment inertia) ถ้าความเฉื่อยจากโหลดเพิ่มขึ้นจะทำให้ความถี่ที่ทำให้สเปปิงมอเตอร์สูญเสียสเปปลดลง

3. ความต้านทานอนุกรม ถ้ามีความต้านทานอนุกรมสูงจะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของวงจรขับแต่ถ้ามีความต้านทานอนุกรมสูงจะทำให้เกิดความสูญเสียเนื่องจากความร้อน

3.5.4 การแกว่งตัวที่ย่านความถี่สูง

ถ้าความถี่ของการขับสเปปิงมอเตอร์เพิ่มขึ้นมาเรื่อยๆ ซึ่งความถี่สูงกว่าการขาดเสถียรภาพที่ย่านความถี่กลาง อยู่ในช่วง 2500-4000Hz แต่พบว่าไม่สามารถขับสเปปิงมอเตอร์ได้ที่ย่านความถี่นี้ ในการประยุกต์ใช้งาน ต้องการที่จะลดการแกว่งตัวของโรเตอร์ให้เร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้และต้องการอัตราเร่ง (β) ที่เร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ทั้งยังต้องการลดผลของการหน่วง (α) ซึ่งค่าทั้งหมดนี้จะทำให้ระบบโดยรวมดีขึ้น จะได้สมการหาค่าอัตราเร่งสูงสุดเป็น

$$\beta_{\max} = \frac{J}{4} \sqrt{\frac{E}{J+1}} \quad (3.83)$$

จะได้สมการค่าการหน่วงโดยอัตราเร่งสูงสุดเป็น

$$\alpha = \sqrt{\frac{E}{J+1}} \quad (3.84)$$

หากต้องการให้ค่าการหน่วงมีค่ามาก และต้องการให้เกิดการสั่นน้อยจะต้องให้ค่าอัตราส่วนของแรงเฉื่อยที่ต้องการเป็น

$$J^2 - 8J - 16 = 0 \quad (3.85)$$

หรือ

$$J = 4(1 + \sqrt{2}) \approx 9.66 \quad (3.86)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของการหน่วงที่เหมาะสม (D) จะเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D = \frac{J+2}{2(J+1)} \sqrt{\frac{J}{J+1}} \sqrt{(E_m J_{do})} = 0.54 \sqrt{E_m J_{do}} \quad (3.87)$$

โดยเงื่อนไขที่สำคัญที่ทำให้สัมประสิทธิ์ของการหน่วงไม่เกิด(dip)จะได้สมการดังนี้

$$D > \frac{1}{8} \frac{J \varpi_n^2 k_p}{R/L} \quad (3.88)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

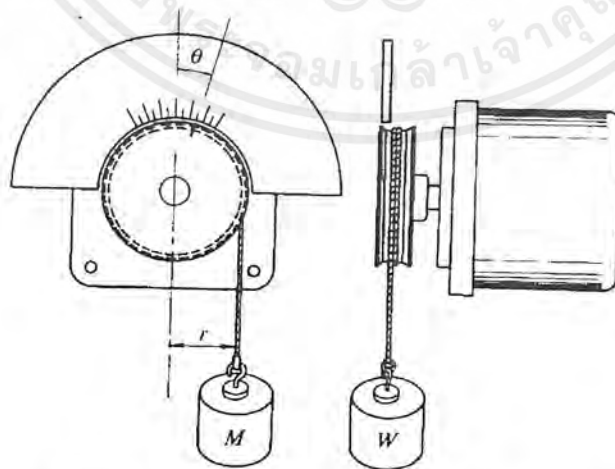
การทดสอบและการวัดคุณลักษณะของแรงบิด

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการวัดคุณลักษณะของแรงบิดของสเตปป์มอเตอร์ ลักษณะของกราฟแรงบิดของสเตปป์มอเตอร์ สมการการเคลื่อนที่และอัตราเร่ง ซึ่งจะนำค่าที่ได้จากการทดลองคุณลักษณะของแรงบิดมาคำนวณหาจำนวนพัลส์และความกว้างของจำนวนพัลส์ที่เหมาะสมในการเร่งความเร็วและลดความเร็วเพื่อให้สเตปป์มอเตอร์ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วและไม่เสียสเตป

4.1 การวัดคุณลักษณะทางสถิตย์

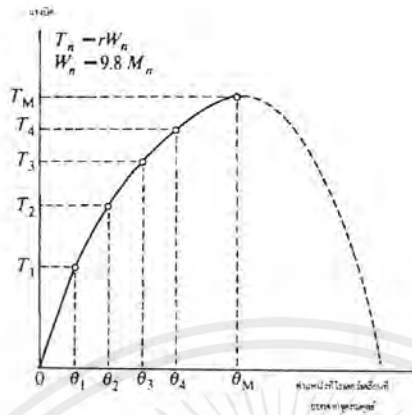
4.1.1 คุณลักษณะของแรงบิดกับมุมสเตป

คุณลักษณะของแรงบิดกับมุมสเตปจะทำโดยการจ่ายกระแสให้กับสเตปป์มอเตอร์เพียงเฟสใดเฟสหนึ่งค้างไว้ โดยที่โรเตอร์ต้องไม่มีโหลดและต้องอยู่ในตำแหน่งที่สมดุล ซึ่งการวัดคุณลักษณะชนิดนี้จะเป็นการวัดความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่เพลาและตำแหน่งเพลลาของโรเตอร์ที่เคลื่อนที่ไปจากจุดสมดุล จากรูป 4.1 แรงบิดที่เพลาเกิดจากน้ำหนักของฟู่ฝ้าย เชือกและลูกน้ำหนัก เมื่อไร้โหลด โรเตอร์จะอยู่ที่จุดสมดุล เมื่อต่อโหลดและค่อยๆเพิ่มน้ำหนักทีละน้อย ตำแหน่งเพลลาของโรเตอร์จะค่อยๆเคลื่อนที่ห่างจากจุดสมดุล จากรูป 4.2 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับตำแหน่งที่เพลลาของโรเตอร์ที่เคลื่อนที่ห่างจากจุดสมดุลซึ่งเส้นประนั้นไม่สามารถวัดตำแหน่งที่เพลลาของโรเตอร์ที่เคลื่อนที่ห่างจากจุดสมดุลได้เนื่องจากแรงบิดที่เกิดจากผลของอำนาจแม่เหล็กถาวรในโรเตอร์ไม่สามารถเอาชนะแรงบิดภายนอกจากผลของลูกน้ำหนักได้



รูปที่ 4.1 แสดงวิธีทดลองการวัดคุณลักษณะของแรงบิดกับมุมสเตป

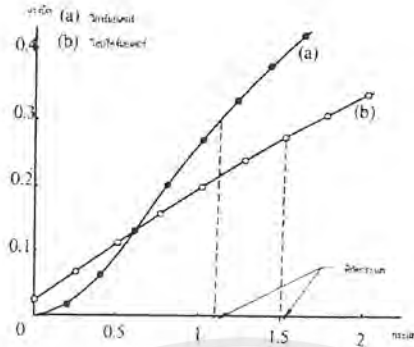
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงกราฟคุณลักษณะของแรงบิดกับมุมสเตป

4.1.2 คุณลักษณะของแรงบิดกับกระแส

โดยทั่วไปแล้วค่าแรงบิดสถิตย์สูงสุดจะเพิ่มขึ้นตามกระแส กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดสถิตย์กับกระแส เรียกว่าคุณลักษณะของแรงบิดกับกระแส จากรูป 4.3 เป็นการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแสของวีอาร์สเตปปีงมอเตอร์และไฮบริดจ์สเตปปีงมอเตอร์ซึ่งสเตปปีงมอเตอร์ทั้งสองตัวมีมุมสเตปเป็น 1.8 องศาต่อสเตปพบว่าในไฮบริดจ์สเตปปีงมอเตอร์มีแรงบิดเกิดขึ้นถึงแม้ว่าจะยังไม่ได้กระแสคูล์ เนื่องจากผลของแม่เหล็กถาวรในโรเตอร์ และในย่านกระแสสูงๆ การเพิ่มของแรงบิดจะเพิ่มขึ้นทีละน้อยเนื่องจากผลของค่าความอิมิตัวในแกนเหล็ก

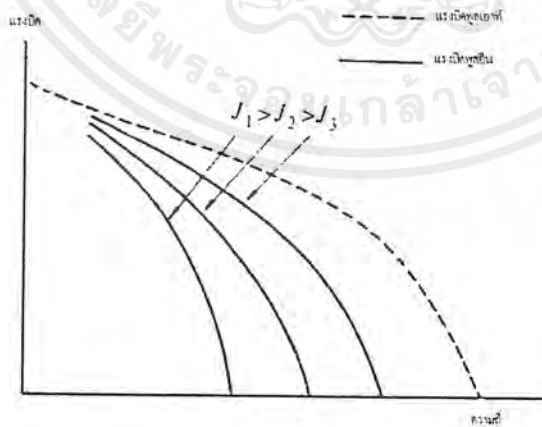


รูปที่ 4.3 แสดงคุณลักษณะของแรงบิดกับกระแศ

4.2 การวัดคุณลักษณะทางไดนามิก

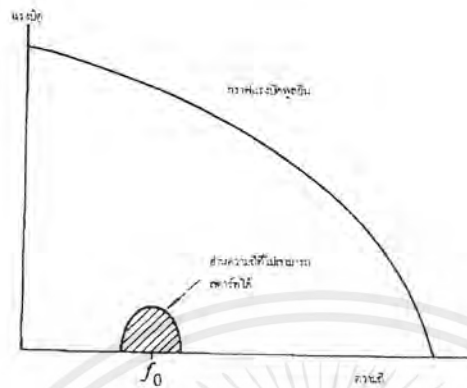
4.2.1 คุณลักษณะของแรงบิดพลูอิน

คุณลักษณะของแรงบิดพลูอินหรือคุณลักษณะการสสารท์เป็นการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดเนื่องจากผลของ โทลด์กับการเปลี่ยนแปลงความถี่โดยที่สเตปป์ิงมอเตอร์สามารถสสารท์และสต่อปได้โดยไม่เสียสเตป พบว่าเมื่อ โมเมนต์ความเฉื่อยเพิ่มขึ้นจะทำให้ความถี่ในการสสารท์สเตปป์ิงมอเตอร์ลดลงดังรูป 4.4 และจากรูป 4.5 พบว่าจะมีความถี่อยู่ช่วงหนึ่งที่ทำให้สเตปป์ิงมอเตอร์ไม่สามารถสสารท์ได้เนื่องจากผลของการออสซิลเลท



รูปที่ 4.4 แสดงผลของการเปลี่ยนแปลง โมเมนต์ความเฉื่อยกับความถี่ในการสสารท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

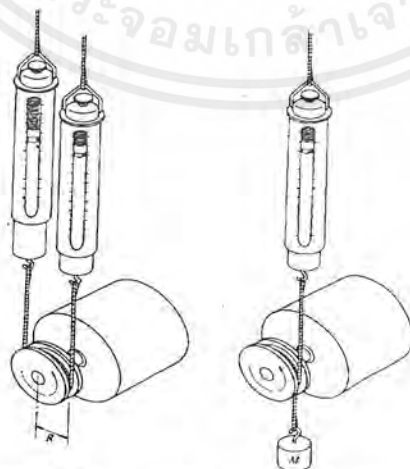


รูปที่ 4.5 แสดงย่านความถี่ที่สเตปป์มอเตอร์ไม่สามารถสตาร์ทได้

4.2.2 คุณสมบัติของแรงบิดพูลเอาท

การวัดแรงบิดพูลเอาททำได้โดยเริ่มสตาร์ทสเตปป์มอเตอร์ที่ย่านความถี่พูลอินแล้วค่อยๆเพิ่มความถี่อย่างช้าๆจนกระทั่งสเตปป์มอเตอร์เสียสเตปป์ ที่ความถี่สุดท้ายก่อนที่สเตปป์มอเตอร์เสียสเตปป์คือความถี่ในการหมุน จากนั้นทำการต่อโหลดแล้วเริ่มสตาร์ทที่ความถี่พูลอินแล้วค่อยๆเพิ่มความถี่อย่างช้าๆจนกระทั่งสเตปป์มอเตอร์เสียสเตปป์ ที่ความถี่สุดท้ายก่อนที่สเตปป์มอเตอร์เสียสเตปป์คือความถี่ในการหมุนและแรงบิดที่เกิดจากผลของโหลดคือแรงบิดพูลเอาท

วิธีการวัดแรงบิดพูลเอาทมีหลายวิธีแต่ส่วนใหญ่จะนิยมใช้เชือกและฟู่เกลย์โดยใช้วิธีหนึ่งสเตลและสองสเตลดังรูป 4.6 และแรงบิดสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.6 แสดงวิธีการวัดแรงบิดพูลเอาทแบบหนึ่งสเตลและสองสเตล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีสองสเกล

$$T_L = R(q_1 - q_2) \quad (4.1)$$

R คือรัศมีของฟู่เลย์ (เมตร)

q_1 คือค่าที่อ่านจากสเกลหนึ่ง (นิวตัน)

q_2 คือค่าที่อ่านได้จากสเกลสอง (นิวตัน)

วิธีหนึ่งสเกล

$$T_L = R(9.8M - q) \quad (4.2)$$

M คือมวลของลูกน้ำหนัก (กิโลกรัม)

4.3 สมการการเคลื่อนที่และอัตราเร่ง

เมื่อป้อนพลัสให้กับสเกลปีงมอเตอร์และสเกลปีงมอเตอร์สามารถหมุนได้โดยไม่เสียดสเกล จะได้สมการการเคลื่อนที่ที่เป็นดังนี้

$$T_M = J \frac{d\omega}{dt} + D\omega + T_f \quad (4.3)$$

J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์กับ โหลด

ω คือความเร็วเชิงมุม

D คือค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน

T_f คือแรงบิดเนื่องจากผลของโหลด

T_M คือแรงบิดของมอเตอร์

แต่เพื่อความสะดวกจะจัดเทอมให้อยู่ในรูปของความถี่จะได้สมการดังนี้

$$T_M = \theta_s J \frac{df}{dt} + \theta_s Df + T_f \quad (4.4)$$

θ_s คือมุมสเกล

f คือความถี่

4.3.1 อัตราเร่ง (Acceleration)

ในการทำการเร่งความเร็วให้สเกลปีงมอเตอร์โดยก่อนที่จะทำการเร่งอัตราเร่งมอเตอร์จะต้องหมุนโดยไม่สูญเสียสเกล ในการพิจารณาถึงการเร่งอัตราเร่งมี 2 ชนิดคือ

อัตราเร่งแบบเชิงเส้น (Linear Acceleration) อัตราเร่งแบบนี้จะไม่พิจารณาเทอมของค่าคงที่ของแรงเสียดทานจากสมการ(4.3)จะได้ความสัมพันธ์ของสมการแรงบิดเป็น

$$T_M - T_f = J \frac{d\omega}{dt} \quad (4.5)$$

ถ้าแรงบิดของมอเตอร์เป็นค่าคงที่ความเร็วอยู่ในย่านที่พิจารณาทำการอินทิเกรตสมการ(4.3)จะได้

$$\omega = \left\{ \frac{(T_M - T_f)}{J} \right\} t + \omega_s \quad (4.6)$$

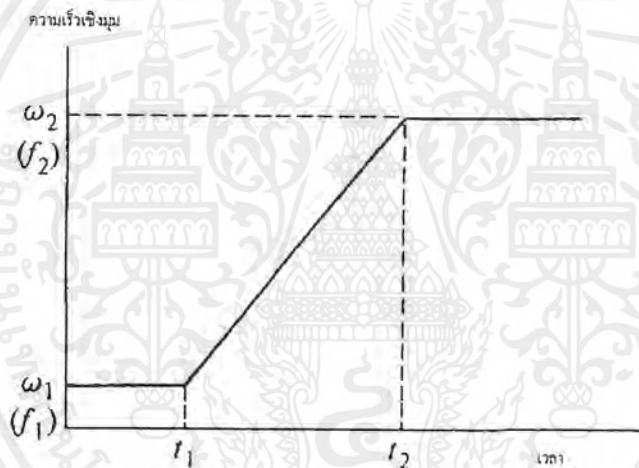
หรือได้ความถี่เป็น

$$f = \frac{T_M - T_f}{\theta_s J} t + f_i \quad (4.7)$$

เมื่อ ω_1 คือมุมความเร็วก่อนที่จะทำการเร่งอัตราเร่ง

f_i คือความถี่ก่อนที่จะทำการเร่งอัตราเร่ง

หากสเตปป์มอเตอร์สามารถเร่งอัตราเร่งเป็นอัตราเร่งที่คงที่ จะเรียกอัตรเร่งแบบนี้ว่า อัตราเร่งแบบเชิงเส้น



รูปที่ 4.7 แสดงอัตราเร่งแบบเชิงเส้นจาก ω_1 ถึง ω_2

อัตราเร่งแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential Acceleration) อัตราเร่งแบบนี้จะพิจารณาผลของค่าคงที่ของแรงเสียดทานซึ่งจะได้สมการของแรงบิดเป็น

$$\theta_s J \frac{df}{dt} + \theta_s Df - (T_M - T_f) = 0 \quad (4.8)$$

ถ้าแรงบิดของสเตปป์มอเตอร์ไม่ใช่ฟังก์ชันของอัตรการสเตปป์จะได้แรงบิดเป็น

$$f = \frac{T_M - T_f}{\theta_s} - \left(\frac{T_M - T_f}{\theta_s s} - f_i \right) e^{-(D/J)t} \quad (4.9)$$

เมื่อ f_i คือความถี่ก่อนเร่งอัตราเร่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การลดอัตราเร่ง (Deceleration)

ขณะที่สเตรปปีงมอเตอร์กำลังหมุนอยู่ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง ทันใดนั้นหยุดจ่ายไฟให้กับสเตรปปีงมอเตอร์ ทำให้สเตรปปีงมอเตอร์อาจจะหยุดหมุนทันทีหรืออาจจะยังคงหมุนต่อสักหน่อยแล้วจึงหยุดการที่สเตรปปีงมอเตอร์ยังคงหมุนต่อไปก็เนื่องจากผลของโมเมนต์ความเฉื่อย ดังนั้นหาต้องการให้สเตรปปีงมอเตอร์สามารถหมุนและหยุดหมุนได้ตามตำแหน่งที่ต้องการจำเป็นที่จะต้องลดอัตราเร่งที่เหมาะสมกับโมเมนต์ความเฉื่อยและผลของแรงบิดเนื่องจากโหลดจะได้สมการของการเคลื่อนที่เป็นอย่างนี้

$$\theta_s J \frac{df}{dt} + \theta_s Df + (T_f - T_M) = 0 \quad (4.10)$$

เมื่อไม่คิดผลของค่าคงที่ของแรงเสียดทานจะ ได้ความถี่ในการลดอัตราเร่งแบบเป็นเชิงเส้นเป็น

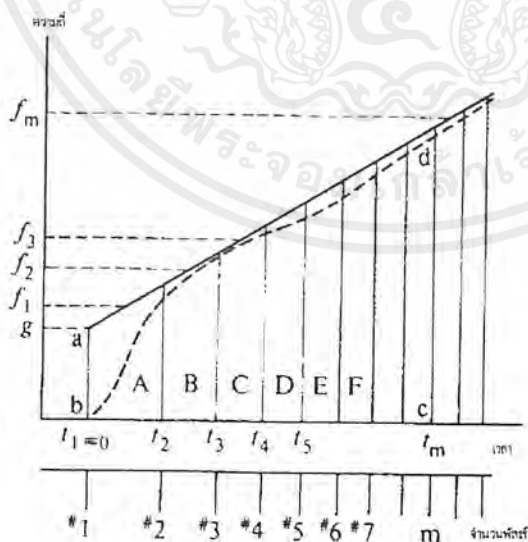
$$f_s = \frac{T_f - T_M}{\theta_s J} t \quad (4.11)$$

เมื่อ f_s คือความถี่ก่อนที่จะลดอัตราเร่ง

ทฤษฎีในการเร่งอัตราเร่งแบบเชิงเส้น

1. การสเตรปปีงมอเตอร์จะต้องสเตรปที่ความถี่ย่านแรงบิดพลูอิน
 2. สเตรปปีงมอเตอร์สามารถเร่งอัตราเร่งได้ไม่เกินย่านแรงบิดพลูเอาท์
- จากความสัมพันธ์ข้างต้นจะทำให้ได้ความถี่เป็น

$$f = g + \beta t \quad (4.12)$$



รูปที่ 4.8 แสดงพัลส์ใหม่มีงของอัตราเร่งแบบเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.8 เส้นทึบแสดงถึงความเร็วที่ตั้งให้สเคปปีงมอเตอร์หมุนส่วนเส้นประแสดงถึงความเร็วที่สเคปปีงมอเตอร์สามารถหมุนได้จริงและจะได้พัลส์ไทมมิ่งเป็นดังนี้

$$t_1 \equiv 0, t_2, t_3, \dots, t_m, \dots \quad (4.13)$$

ถ้าสำหรับแต่ละคาบเวลาของแต่ละพัลส์คือพื้นที่ใต้เหลี่ยมคางหมู ซึ่งสี่เหลี่ยมคางหมูแต่ละรูปคือการเคลื่อนที่แต่ละสเคปของสเคปปีงมอเตอร์

$$\Delta t_m = t_{m+1} - t_m \quad (4.14)$$

จะ ได้ความถี่ของพัลส์หรืออัตราการสเคปเป็นดังนี้

$$f_m = 1/\Delta t_m \quad (4.15)$$

ค่านี้เหมือนกับค่าจากสมการ(4.12)โดยให้ $t = \Delta t_1/2$ ซึ่ง Δt_1 คือความแตกต่างของพัลส์แรก เป็น $1/f_1$ จากสมการ(4.12)จะได้เป็น

$$f_i = g + \beta \frac{\Delta t_1}{2} = g + \beta \frac{1}{2f_1} \quad (4.16)$$

$$g = f_i - \frac{\beta}{2f_1} \quad (4.17)$$

พื้นที่ใต้เหลี่ยมคางหมุดังในรูป 4.8 คือพัลส์ไทมมิ่งซึ่งจะได้ไทมมิ่งเป็นดังนี้

$$t_m = \frac{(\sqrt{g^2 + 2(m-1)\beta}) - g}{\beta} \quad (4.18)$$

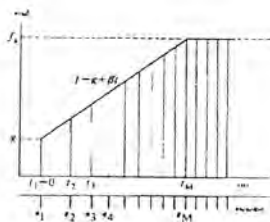
และช่วงเวลาของแต่ละพัลส์เป็นดังนี้

$$\Delta t_m = t_{m+1} - t_m = \frac{2}{\sqrt{(g^2 + 2m\beta)} + \sqrt{(g^2 + 2(m-1)\beta)}} \quad (4.19)$$

และได้ความถี่ของการเคลื่อนที่แต่ละสเคปเป็นดังนี้

$$f_m = \frac{(\sqrt{(g^2 + 2m\beta)} + \sqrt{(g^2 + 2(m-1)\beta)})}{2} \quad (4.20)$$

4.3.3 การคำนวณจำนวนพัลส์ไปจนถึงอัตราการหมุนที่คงที่



รูปที่ 4.9 แสดงการเร่งอัตราเร่งไปจนถึงอัตราการหมุนที่คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 แสดงถึงความเร็วของคำสั่งและพัลส์โทมมิ่ง ซึ่งจะต้องพิจารณาตามเงื่อนไขดังนี้ ความถี่ของการเริ่มสตาร์ทที่เป็น f_l และเพิ่มความถี่ไปจนถึงอัตราการหมุนที่คงที่เป็น f_s สำหรับการลดอัตราเร่งแบบเชิงเส้นก็จะพิจารณาเหมือนกับการเร่งอัตราเร่งแบบเชิงเส้น

$$f_s = g + \beta t_M = \sqrt{g^2 + 2(M-1)\beta} \quad (4.21)$$

จะได้อัตราเร่งเป็นดังนี้

$$\beta = \frac{f_s^2 - g^2}{2(M-1)} = \frac{2(f_s^2 - f_l^2)}{\sqrt{(2M-3)^2 + \left(\frac{f_s}{f_l}\right)^2 - 1} + (2M-3)} \quad (4.22)$$

ดังนั้นจะได้พัลส์โทมมิ่ง, ช่วงเวลาที่ห่างกันของแต่ละพัลส์และความถี่เป็นดังนี้

$$t_m = \frac{2(m-1)}{\sqrt{(f_s^2 - 2(M-m)\beta) + \sqrt{(f_s^2 - 2(M-1)\beta)}}} \quad (4.23)$$

$$\Delta t_m = \frac{2}{\sqrt{(f_s^2 - 2(M-m-1)\beta) + \sqrt{(f_s^2 - 2(M-m)\beta)}}} \quad (4.24)$$

$$f_m = 1/\Delta t_m \quad (4.25)$$

4.3.4 การลดอัตราเร่งแบบเชิงเส้น

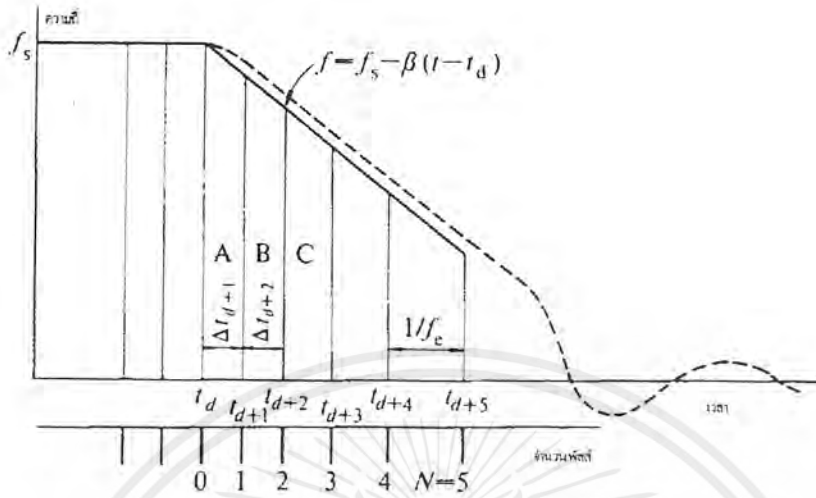
ปกติแล้วจำนวนพัลส์สำหรับการลดอัตราเร่งจะมีจำนวนน้อยกว่าจำนวนพัลส์ตอนเร่งอัตราเร่ง สำหรับการคำนวณจำนวนพัลส์ที่ใช้สำหรับการลดอัตราเร่งแบบเชิงเส้น โดยใช้ผลของสมการ (4.26) ซึ่งรูปของการลดอัตราเร่งแบบเชิงเส้นดังรูป 4.10

สมการที่ใช้ลดอัตราเร่งเป็นดังนี้

$$\gamma = \frac{2(f_s^2 - f_l^2)}{\sqrt{\left((2N-1)^2 + \left(\frac{f_s}{f_l}\right)^2 - 1\right) + (2N-1)}} \quad (4.26)$$

เมื่อ f_l คืออัตราการสลับสุดท้าย

f_s คืออัตราการหมุน



รูปที่ 4.10 แสดงจำนวนพัลส์ในการลดอัตราเร่ง

ซึ่งจะใช้อัตราเร่งลดอัตราเร่ง จำนวนหาช่วงเวลาระหว่างพัลส์และอัตราของพัลส์เป็นดังนี้

$$\Delta t_{d+n} = \frac{2}{\left\{ \left(\sqrt{f_s^2 - 2n\gamma} \right) + \sqrt{f_s^2 - 2(n-1)\gamma} \right\}} \quad (4.27)$$

$$f_{d+n} = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{f_s^2 - 2n\gamma} + \sqrt{f_s^2 - 2(n-1)\gamma} \right\} \quad (4.28)$$

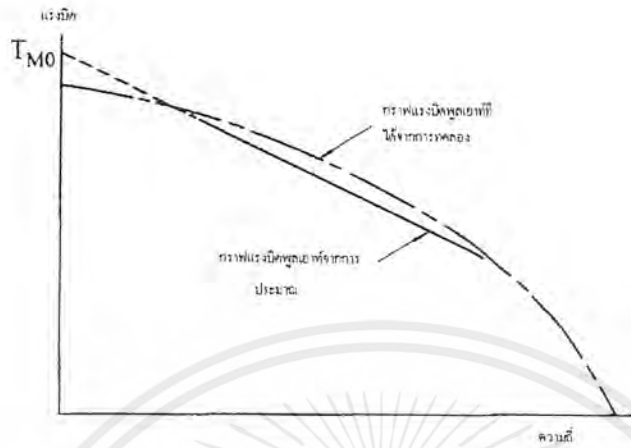
เมื่อ d เป็นจำนวนพัลส์สุดท้ายที่ทำให้สเตปปีงมอเตอร์หมุนไปจนถึงย่านการหมุน

4.3.5 การเร่งอัตราเร่งแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล

ปกติแล้วแรงบิดพูลเอาท์จะลดลงเมื่ออัตราเร่งสเตปเพิ่มขึ้น ดังนั้นแรงบิดพูลเอาท์จะเป็นตัวจำกัดการเพิ่มอัตราเร่งและอัตราเร่งของโหลดความสัมพันธ์ของสเตปปีงมอเตอร์หลังการเริ่มหมุนมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$J\theta_s \frac{df}{dt} + D\theta_s f + T_0 \langle T_{pull-out} \quad (4.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดงถึงการประมาณแรงบิดพูลเอ้าท์แบบเชิงเส้น

จะได้แรงบิดโดยประมาณเป็นดังนี้

$$T_M = T_{M0} - \alpha f \quad (4.30)$$

และจะได้สมการการเคลื่อนที่ที่เป็น

$$J\theta_s \frac{df}{dt} + D\theta_s f + T_0 = T_{M0} - \alpha f \quad (4.31)$$

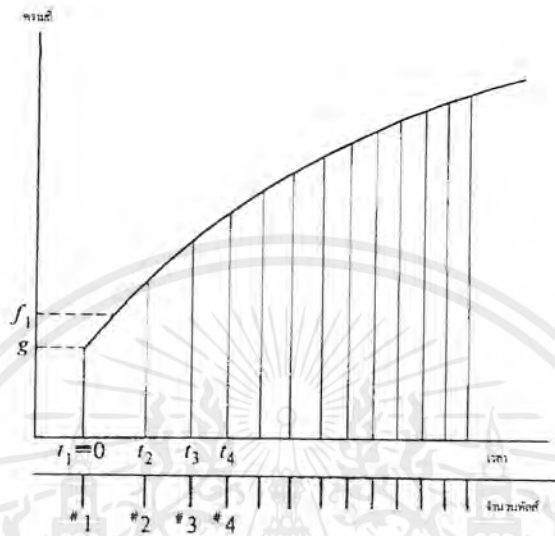
สามารถเขียนได้ใหม่เป็นดังนี้

$$J\theta_s \frac{df}{dt} + (D\theta_s + \alpha)f - (T_{M0} - T_0) = 0 \quad (4.32)$$

ผลคำตอบของสมการนี้จะให้ความถี่เป็นดังนี้

$$f = g + \left(\frac{T_{M0} - T_0}{D\theta_s + \alpha} - g \right) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{D\theta_s + \alpha}{J\theta_s} t \right) \right\} \quad (4.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงถึงอัตราเร่งของพัลส์แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล

เวลาของพัลส์คำนวณโดยใช้สมการดังนี้

$$X(t_m) - m = 0 \quad (4.34)$$

เมื่อ $m=1,2,3,\dots$

จะได้ช่วงเวลาแต่ละพัลส์และความถี่เป็นดังนี้

$$\Delta t_m = t_{m+1} - t_m \quad (4.35)$$

$$f_m = \frac{1}{\Delta t_m} \quad (4.36)$$

ซึ่งจะได้สมการการเร่งอัตราเร่งแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลเป็นดังนี้

$$\beta_{initial} = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{t=0} = \left\{ \left(\frac{T_{M0} - T_0}{K} - g \right) \left(\frac{K}{J\theta_s} \right) \exp\left(-\frac{K}{J\theta_s} ft \right) \right\} \quad (4.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การควบคุมแบบวงจรมืดและวงจรที่ใช้ในการทดลอง

5.1 บทนำ

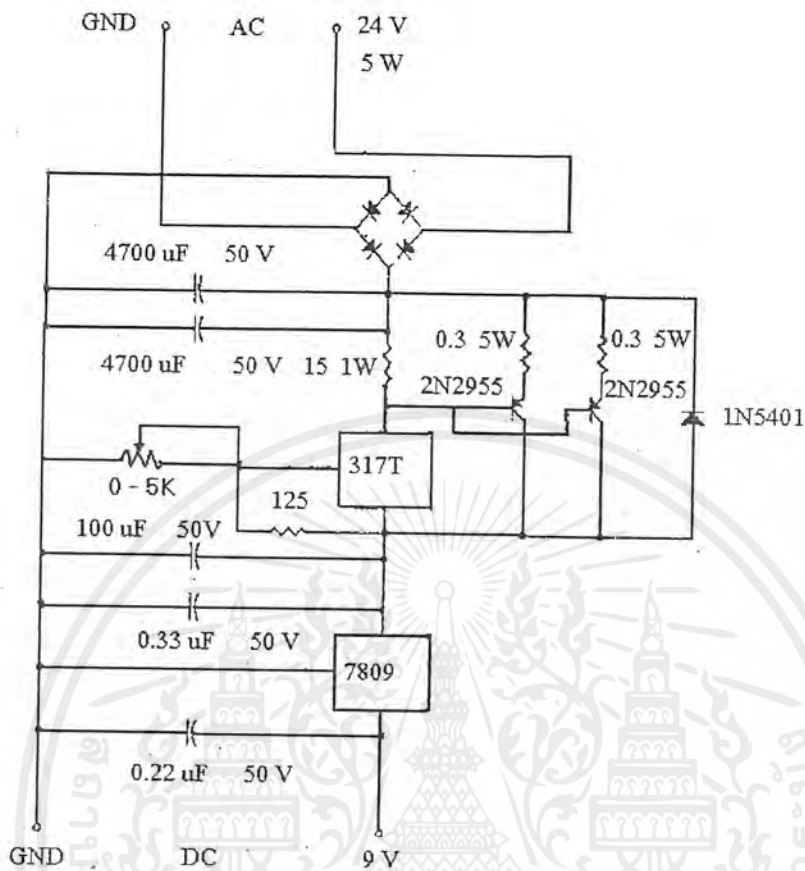
ข้อดีอย่างหนึ่งของสเตปป์มอเตอร์คือสามารถทำงานในระบบซึ่งเป็นวงจรมืดได้ ซึ่งสะดวกในการควบคุมตำแหน่งและการควบคุมความเร็ว แต่การควบคุมแบบวงจรมืด มีความถูกต้องแม่นยำในการควบคุมตำแหน่งและเสถียรภาพในการทำงานไม่ดีพอ เนื่องจากหลักการทำงานของสเตปป์มอเตอร์คือทำตามคำสั่งของอินพุตพัลส์ทุกคำสั่ง ดังนั้นจุดสุดท้ายของคำสั่งควบคุมจำนวนสเตปป์หรือระยะทางทั้งหมดที่เคลื่อนที่ได้ในระบบซึ่งมีการทำงานแบบวงจรมืด ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ถูกจำกัด

ประสิทธิภาพของสเตปป์มอเตอร์ขึ้นอยู่กับ การควบคุมและวงจรมืด โดยธรรมชาติของการควบคุมและวงจรมืด ประสิทธิภาพจะถูกจำกัดเมื่อไม่มีการป้อนกลับ ซึ่งไม่สามารถจะรู้ได้ว่าคำสั่งพัลส์ขาดหายไปเท่าไร การตอบสนองต่อความถี่มีการออสซิลเลชันมากน้อยแค่ไหน เมื่อไรความถี่ของอินพุตพัลส์มากเกินไปจนสเตปป์มอเตอร์ไม่สามารถตอบสนองได้

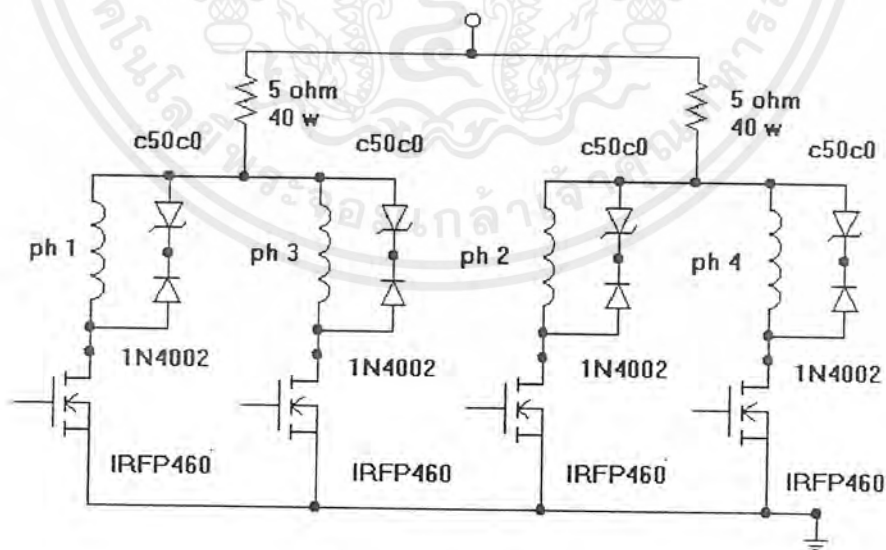
ประสิทธิภาพของสเตปป์มอเตอร์สามารถปรับปรุงให้เพิ่มขึ้นได้อย่างมากโดยใช้การป้อนกลับทางตำแหน่ง หรือการป้อนกลับทางความเร็ว เพื่อให้ได้การสวิตช์ที่เหมาะสมในแต่ละเฟสสำหรับการควบคุมแบบวงจรมืด ประสิทธิภาพไม่ได้เพิ่มเฉพาะความถูกต้องแม่นยำของการควบคุมตำแหน่งเท่านั้น แต่ยังเพิ่มประสิทธิภาพของการตอบสนองความถี่ให้สูงขึ้นได้ และนอกจากนี้ยังช่วยให้สเตปป์มอเตอร์มีการเคลื่อนที่ราบเรียบขึ้นด้วย

5.2 วงจรแหล่งจ่ายแรงดัน

เนื่องจากการเลือกใช้สเตปป์มอเตอร์ นั้นจะต้องคำนึงถึงแรงดันและกระแสประกอบกับได้เลือกใช้วงจรในส่วนของกำลังเป็น ไอซี ดังนั้นจึงเป็นการสะดวกมากที่จะเปลี่ยนขนาดของสเตปป์มอเตอร์จึงได้ทำการสร้างวงจรแหล่งจ่ายแรงดันซึ่งสามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 5 แอมแปร์ และมีส่วนที่จ่ายแรงดัน 9 โวลต์คงที่สำหรับเลี้ยงวงจรควบคุมส่วนของวงจรทั้งหมดแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงวงจรแหล่งจ่ายแรงดัน



รูปที่ 5.2 แสดงวงจรขับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 แสดงแผ่นงานตัดซึ่งทำด้วยมือ

5.4 หลัก การทำงานของวงจรมอนอค็อคเตอร์

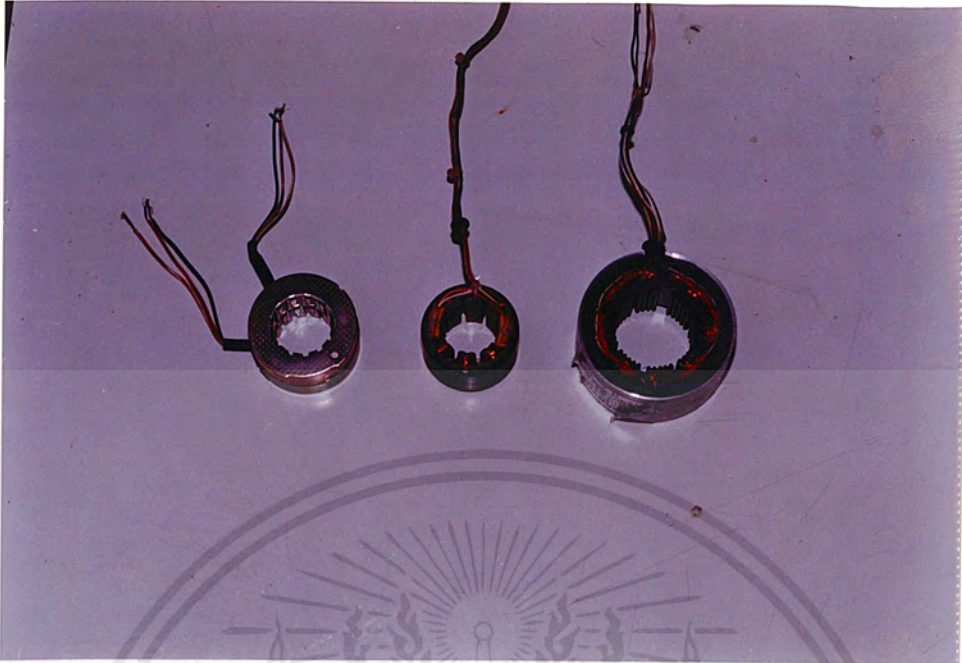
ตัวอุปโตทรานซิสเตอร์ที่ใช้มีโครงสร้างแบบตัวยู โดยมีตัวรับและตัวส่งอยู่ในตัวเดียวกัน การทำงานในส่วนนี้จะทำงานหลังจากที่สเตปป์มอเตอร์ได้หมุนโดยที่แผ่นงานจะถูกหมุนไปพร้อมกับสเตปป์มอเตอร์ด้วย เพราะได้ทำการติดตั้งแผ่นงานที่เพลลาของสเตปป์มอเตอร์ สำหรับการทดลองนี้จะขับสเตปป์มอเตอร์โดยไม่ต่อโหลด เมื่อแผ่นงานตัดอุปโตทรานซิสเตอร์จะทำให้เกิดสัญญาณพัลส์และถูกจัดลักษณะสัญญาณให้ดีขึ้นปราศจากสัญญาณรบกวนไปยังวงจรมอนอสเตเบิล ซึ่งใช้ ไอซี #555 การตั้งเวลาของวงจรมอนอสเตเบิลซึ่งจะต้องคำนึงถึงความเร็วสูงสุดในการหมุนของสเตปป์มอเตอร์ด้วย ไม่ให้นานเกินไปหรือเร็วเกินไปเพราะจะทำให้จำนวนพัลส์ของการตรวจสอบป้อนกลับไม่ตรงกับความเป็นจริง ในส่วนของเอาท์พุทของวงจรมอนอสเตเบิลได้ต่อส่วนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงผลคือ LED ไขว้ 1 ตัว เพื่อเป็นการแสดงผลของการตัดผ่านของแผ่นงานซึ่งจะกระพริบตามการหมุนของสเตปปีงมอเตอร์ จากนั้นจึงนำสัญญาณเอาต์พุตนี้ต่อผ่านเข้าไปประมวลผลต่อด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยการตั้งพอร์ทที่ขา 3 ของ ไอซี #555 นี้เป็นพอร์ทอินพุต สำหรับการประมวลผลเป็นหน้าที่ในส่วนของโปรแกรม

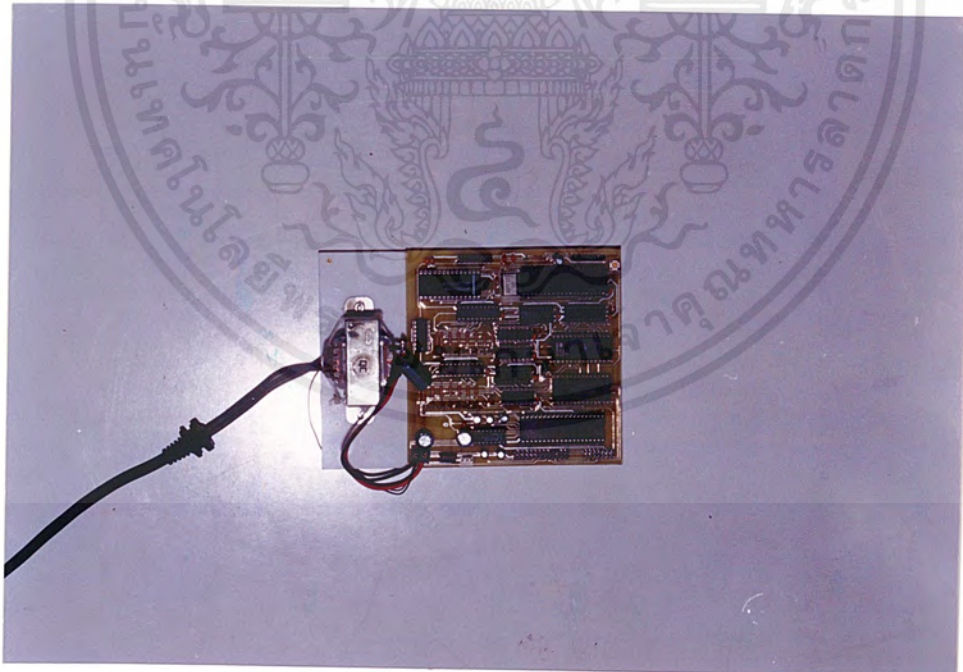


รูปที่ 5.5 แสดงสเตปปีงมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

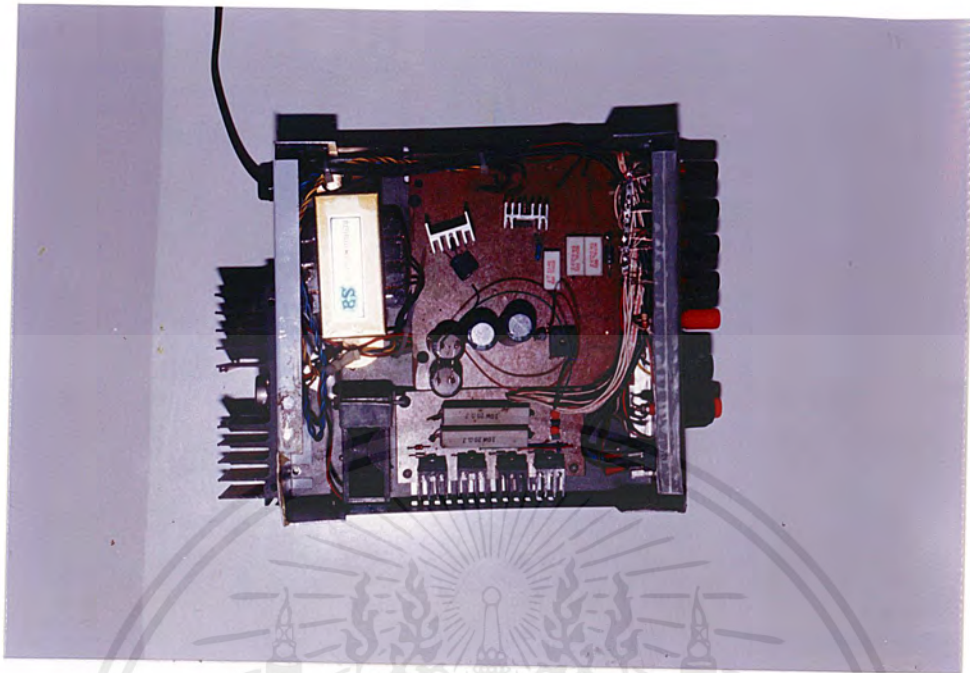


รูปที่ 5.6 แสดงโครงสร้างภายในสเตปปีงมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

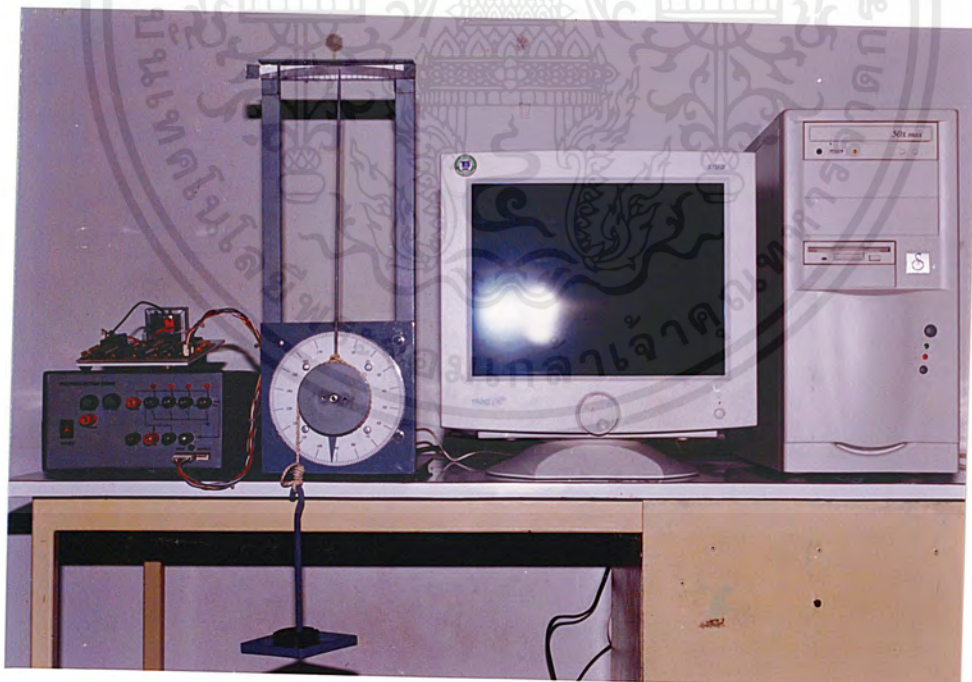


รูปที่ 5.7 แสดงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

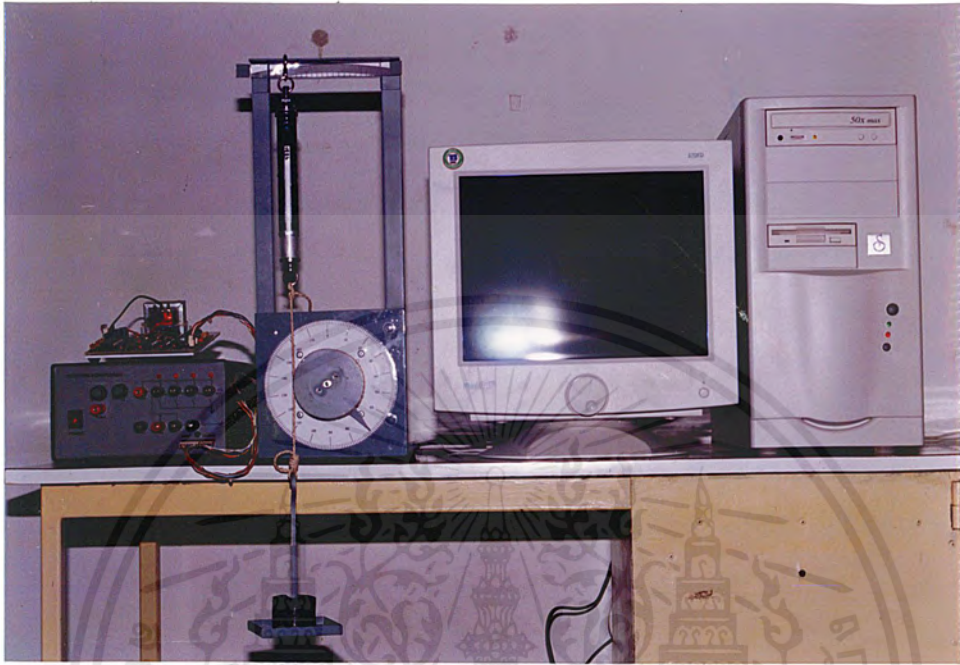


รูปที่ 5.8 แสดงแหล่งจ่ายแรงดันและชุดขับ

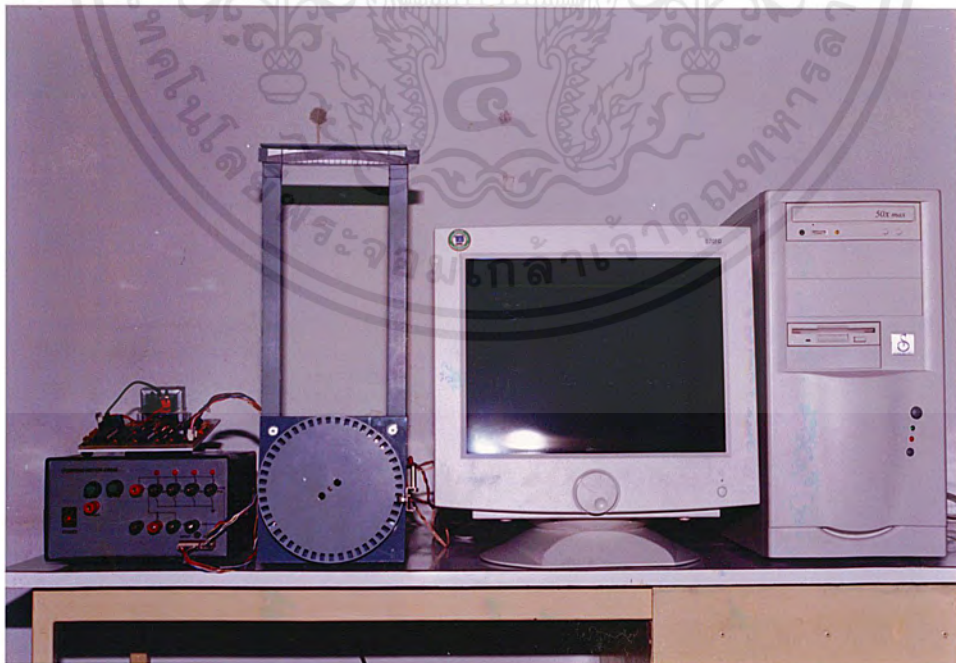


รูปที่ 5.9 แสดงการทดสอบคุณลักษณะทางสถิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 แสดงการทดลองคุณลักษณะทางไดนามิกต์



รูปที่ 5.11 แสดงการทดลองแบบลูปปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การทดลองและผลการทดลอง

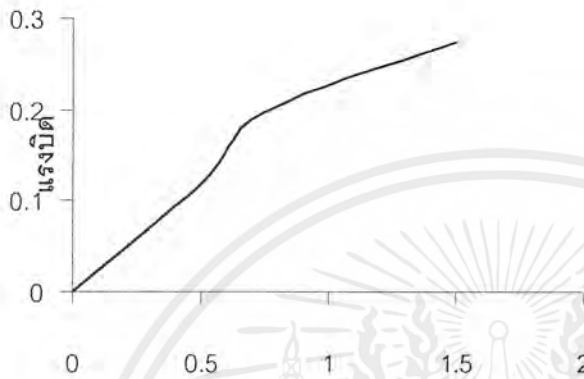
6.1 การทดสอบคุณลักษณะของแรงบิดกับมุมสเกล (T/θ Characteristic)

- 1.จ่ายกระแสให้กับสเกลปริงมอเตอร์เพียงหนึ่งเฟส โดยที่ขณะนี้ยังไม่ต่อ โหลดให้กับสเกลปริงมอเตอร์ ตำแหน่งของเข็มชี้อยู่ที่จุดสมมูลย์
- 2.ทำการต่อ โหลด โดยค่อยๆเพิ่มมวลของลูกน้ำหนักทีละน้อยสังเกตตำแหน่งของเข็มชี้ว่าเคลื่อนที่ออกจากจุดสมมูลย์เป็นอย่างไร
- 3.บันทึกผลค่าของมวลของลูกน้ำหนักแต่ละค่าที่ทำให้เข็มชี้เคลื่อนที่ออกห่างจากจุดสมมูลย์
- 4.ทำตามข้อ1ถึงข้อ3 ไปเรื่อยๆจนกระทั่งถึงมวลของลูกน้ำหนักค่าหนึ่งที่ไม่สามารถทำการวัดตำแหน่งของเข็มชี้ได้
- 5.นำผลการทดลองที่ได้ไปวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับมุมสเกล

ตารางที่ 6.1 แสดงผลการทดลอง T/θ มุมสเกล $1.8^\circ/\text{สเกล}$ รัศมีพู่เลี้ยว = 0.045 เมตร

มวล (กรัม)	มุม (องศา)	แรงบิด (นิวตัน-เมตร)
0	0	0
200	0.1	0.0882
300	0.25	0.1323
400	0.35	0.1764
500	0.5	0.2205
600	0.6	0.2646
700	1	0.3087
800	1.75	0.3528
900	2	0.3569
1000	2.25	0.3575

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

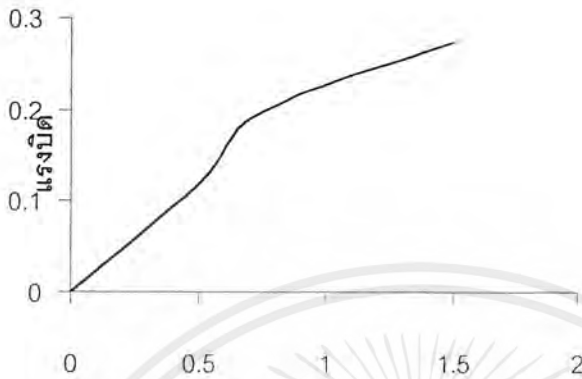


รูปที่ 6.1 แสดงกราฟผลการทดลอง T/θ มุมสเกล $1.8^\circ/\text{สเกล}$ รัศมีฟู่เลี้ยว = 0.045 เมตร

ตารางที่ 6.2 แสดงผลการทดลอง T/θ มุมสเกล $2^\circ/\text{สเกล}$ รัศมีฟู่เลี้ยว = 0.04 เมตร

มวล (กรัม)	มุม (องศา)	แรงบิด (นิวตัน-เมตร)
0	0	0
200	0.25	0.0784
300	0.5	0.1176
400	0.5	0.1568
500	0.75	0.196
600	1	0.2352
700	1.5	0.2744

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



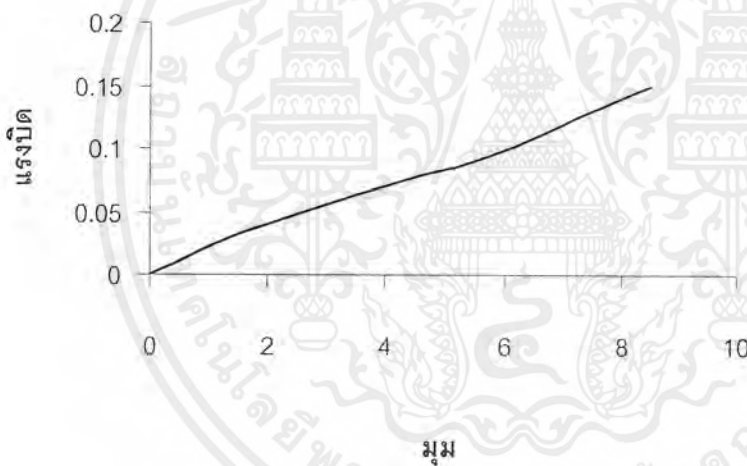
รูปที่ 6.2 แสดงกราฟผลการทดลอง T/θ มุมสเกล $2^{\circ}/\text{สเกล}$ รัศมีพู่แกว่ง = 0.04 เมตร

ตารางที่ 6.3 แสดงผลการทดลอง T/θ มุมสเกล $7.5^{\circ}/\text{สเกล}$ รัศมีพู่แกว่ง = 0.04 เมตร

มวล (กรัม)	มุม (องศา)	แรงบิด (นิวตัน-เมตร)
0	0	0
20	0.25	0.00784
40	0.75	0.0156
60	1.25	0.0235
80	1.5	0.0313
100	2	0.0392
120	2.5	0.047
140	3	0.0548
160	3.5	0.0627
180	4.25	0.07
200	4.75	0.078
220	5.25	0.0862

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

240	5.75	0.094
260	6	0.1
280	6.5	0.11
300	6.75	0.1176
320	7.25	0.1254
340	7.75	0.1332
360	8	0.1411
380	8.5	0.1489
400	9	0.1568



รูปที่ 6.3 แสดงกราฟผลการทดลอง T/θ มุมสเกล $7.5^{\circ}/\text{สเกล}$ รัศมีฟูลเลอร์ = 0.04 เมตร

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มลูกน้ำหนักขึ้นจะทำให้เกิดแรงบิดที่แกนเพลลาเพิ่มขึ้นและทำให้แกนเพลลาค่อยๆเคลื่อนที่ออกจากจุดสมดุลและจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าแรงบิดค่าหนึ่งจะไม่สามารถวัดตำแหน่งของแกนเพลลาที่เคลื่อนที่ออกจากจุดสมดุลได้เนื่องจากแรงบิดที่ตัวสเกลปิงมอเตอร์สร้างขึ้นมาไม่สามารถเอาชนะผลของแรงบิดจากมวลของลูกน้ำหนักได้ ซึ่งที่ค่าแรงบิดสุดท้ายที่สามารถวัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนเพลลาได้คือแรงบิดสถิตย์สูงสุด

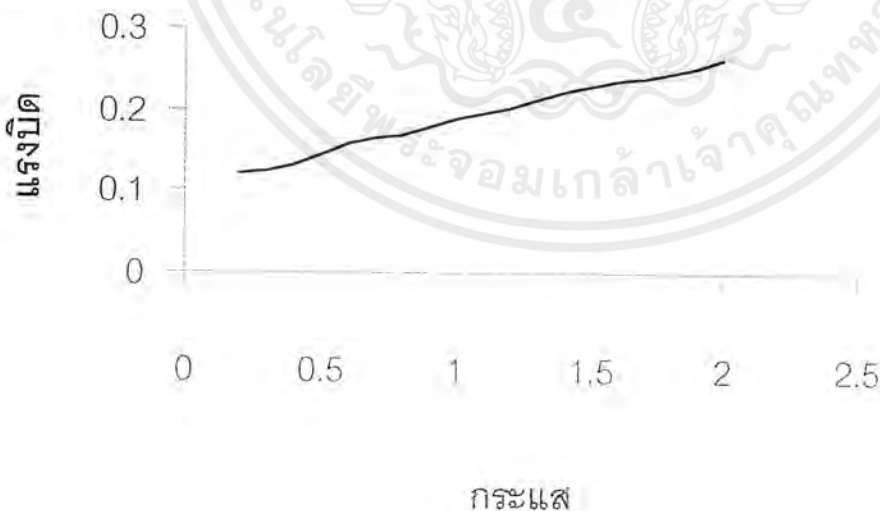
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 การทดสอบคุณลักษณะของแรงบิดกับกระแส

1. ทดลองต่อโหลดค่าน้อยๆค่าหนึ่งให้กับสเตปป์มอเตอร์โดยที่ขณะนี้ยังไม่จ่ายกระแสให้กับสเตปป์มอเตอร์
2. ค่อยๆเพิ่มมวลของลูกน้ำหนักไปเรื่อยๆจนกระทั่งถึงมวลค่าหนึ่งซึ่งไม่สามารถวัดตำแหน่งของเข็มชี้ได้
3. ทำการบันทึกผลค่าของมวลค่าสุดท้ายที่สามารถวัดตำแหน่งได้
4. จ่ายกระแสค่าน้อยๆค่าหนึ่งให้กับสเตปป์มอเตอร์เพียงหนึ่งเฟส
5. จากนั้นทำตามข้อ 2 และข้อ 3 ตามลำดับ แล้วค่อยๆเพิ่มกระแสให้กับสเตปป์มอเตอร์ ในการเพิ่มกระแสให้ทำการเพิ่มกระแสให้เกินพิคตกระแสของสเตปป์มอเตอร์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น
6. นำผลการทดลองที่ได้ไปวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแส

ตารางที่ 6.4 แสดงผลการทดลองแรงบิดและกระแส มุมสเตป $1.8^{\circ}/\text{สเตป}$ รัศมีพูเลย์ = 0.025 เมตร ที่มุม 0.5 องศา

กระแส (A)	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
แรงบิด (N-m)	0.122	0.132	0.159	0.17	0.188	0.203	0.223	0.235	0.247	0.262

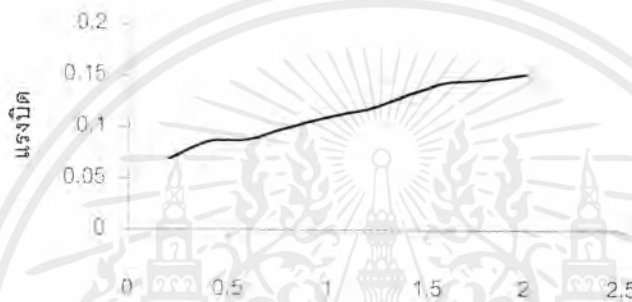


รูปที่ 6.4 แสดง กราฟผลการทดลองแรงบิดและกระแส มุมสเตป $1.8^{\circ}/\text{สเตป}$ รัศมีพูเลย์ = 0.025 เมตร ที่มุม 0.5 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.5 แสดงผลการทดลองแรงบิดและกระแส มุมสเตป $1.8^{\circ}/\text{สเตป}$ รัศมีพุ่งเลย์ = 0.025 เมตร ที่มุม 0.25 องศา

กระแส (A)	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
แรงบิด (N-m)	0.069	0.086	0.088	0.1	0.11	0.118	0.132	0.144	0.147	0.152

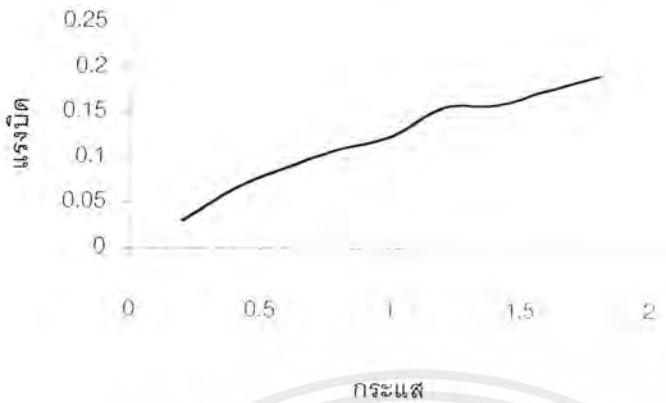


รูปที่ 6.5 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดและกระแส มุมสเตป $1.8^{\circ}/\text{สเตป}$ รัศมีพุ่งเลย์ = 0.025 เมตร ที่มุม 0.25 องศา

ตารางที่ 6.6 แสดงผลการทดลองแรงบิดและกระแส มุมสเตป $2^{\circ}/\text{สเตป}$ รัศมีพุ่งเลย์ = 0.04 เมตร ที่มุม 0.5 องศา

กระแส (A)	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8
แรงบิด (Nm-m)	0.031	0.066	0.09	0.11	0.125	0.157	0.16	0.176	0.192

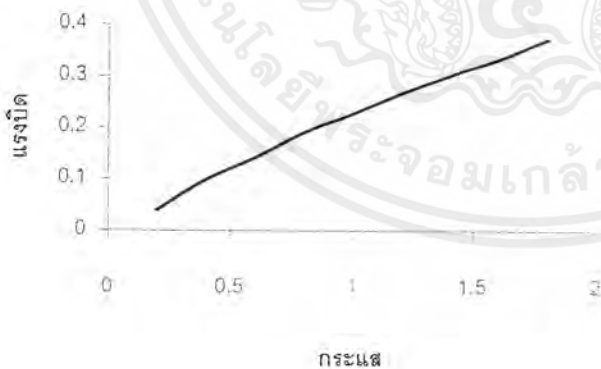
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 แสดงผลการทดลองแรงบิดและกระแส มุมสลับ $2^{\circ}/\text{สเดบ}$ รัศมีพู่ไต้ = 0.04 เมตร ที่มุม 0.5 องศา

ตารางที่ 6.7 แสดงผลการทดลองแรงบิดและกระแส มุมสลับ $2^{\circ}/\text{สเดบ}$ รัศมีพู่ไต้ = 0.04 เมตร ที่มุม 1.5 องศา

กระแส (A)	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8
แรงบิด (N-m)	0.039	0.098	0.141	0.19	0.227	0.266	0.301	0.333	0.372

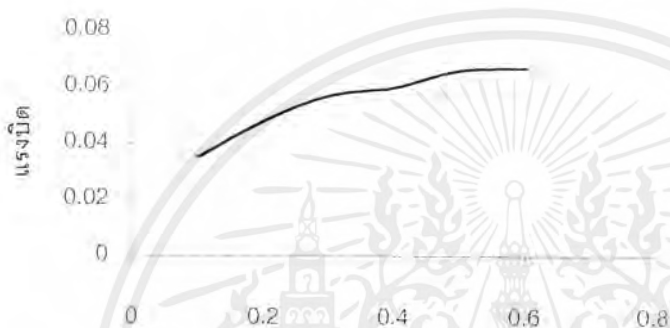


รูปที่ 6.7 แสดงผลการทดลองแรงบิดและกระแส มุมสลับ $2^{\circ}/\text{สเดบ}$ รัศมีพู่ไต้ = 0.04 เมตร ที่มุม 1.5 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.8 แสดงผลการทดลองแรงบิดและกระแสมุมสเกล $7.5^{\circ}/\text{สเกล}$ รัศมีพู่เล่ย์ = 0.045 เมตร
ทึ่มม 3 องศา

กระแส (A)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
แรงบิด (N-m)	0.035	0.048	0.057	0.06	0.066	0.067

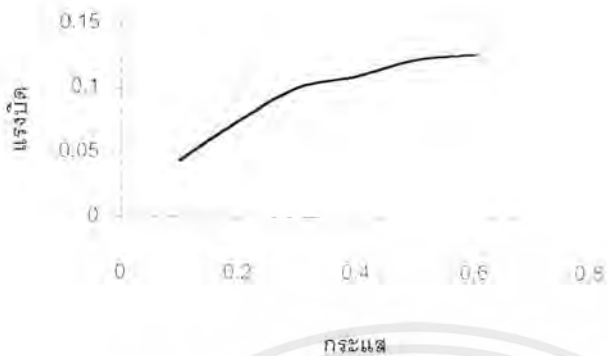


รูปที่ 6.8 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดและกระแสมุมสเกล $7.5^{\circ}/\text{สเกล}$ รัศมีพู่เล่ย์ = 0.045
เมตร ทึ่มม 3 องศา

ตารางที่ 6.9 แสดงผลการทดลองแรงบิดและกระแสมุมสเกล $7.5^{\circ}/\text{สเกล}$ รัศมีพู่เล่ย์ = 0.045 เมตร
ทึ่มม 6 องศา

กระแส (A)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
แรงบิด (N-m)	0.044	0.075	0.101	0.11	0.123	0.127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.9 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดและกระแส มุมสลิป $7.5^{\circ}/\text{สลิป}$ รัศมีฟลูเอย์ = 0.045 เมตร ที่มุม 6 องศา

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองจะพบว่าขณะที่ยังไม่ได้อาศัยกระแสให้กับสเตปิงมอเตอร์ ภายในตัวสเตปิงมอเตอร์จะมีแรงบิดค่าหนึ่งซึ่งเป็นผลมาจากแม่เหล็กถาวรภายในตัวสเตปิงมอเตอร์ และพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและกระแสในช่วงที่กระแสต่ำจะเป็นเชิงเส้น แต่ในช่วงที่กระแสสูงๆค่าแรงบิดจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเนื่องจากผลของค่าความอิ่มตัวในแกนเหล็ก

6.3 การทดสอบคุณลักษณะการสารถหรือคุณลักษณะของแรงบิดพูลอิน ที่สถานะไม่มีโหลด

1. ทดลองสารถด้วยความถี่ค่าหนึ่ง โดยเริ่มต้นจากความถี่ต่างๆก่อนสังเกตดูการหมุนของ สเตปปีงมอเตอร์ ถ้าสเตปปีงมอเตอร์หมุน โดยไม่สูญเสียสเตป ก็ให้ทำการเพิ่มความถี่ในการสารถ
2. ทดลองสารถใหม่อีกครั้ง โดยค่อยๆเพิ่มความถี่ที่ละน้อยสังเกตดูการหมุนของสเตปปีงมอเตอร์ว่าสเตปปีงมอเตอร์สูญเสียสเตปหรือไม่
3. ทำการทดลองโดยสารถใหม่อีกครั้ง โดยเพิ่มความถี่ไปเรื่อยๆจนกระทั่งถึงความถี่ค่าหนึ่งที่ทำให้สเตปปีงมอเตอร์สูญเสียสเตป บันทึกผล

ที่สถานะมีโหลด

1. ต่อ โหลดที่มีมวลค่าหนึ่งแล้วทำการสารถด้วยความถี่ค่าหนึ่งสังเกตดูการหมุนของ สเตปปีงมอเตอร์ถ้าสเตปปีงมอเตอร์หมุน โดยไม่สูญเสียสเตป ก็ให้ทำการเพิ่มความถี่ในการสารถ
2. ที่มีมวลค่าเดิมทดลองสารถใหม่อีกครั้ง โดยเพิ่มความถี่ที่ละน้อยสังเกตดูการหมุนของ สเตปปีงมอเตอร์ว่าสเตปปีงมอเตอร์สูญเสียสเตปหรือไม่
3. ทำการทดลองโดยสารถใหม่อีกครั้ง โดยเพิ่มความถี่ไปเรื่อยๆจนกระทั่งถึงความถี่ค่าหนึ่งที่ทำให้สเตปปีงมอเตอร์สูญเสียสเตป บันทึกผล
4. ทำการเพิ่มน้ำหนักให้กับโหลด แล้วทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 1 ถึงข้อ 3 ตามลำดับ
5. นำค่าที่บันทึกผลไปทำการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความถี่

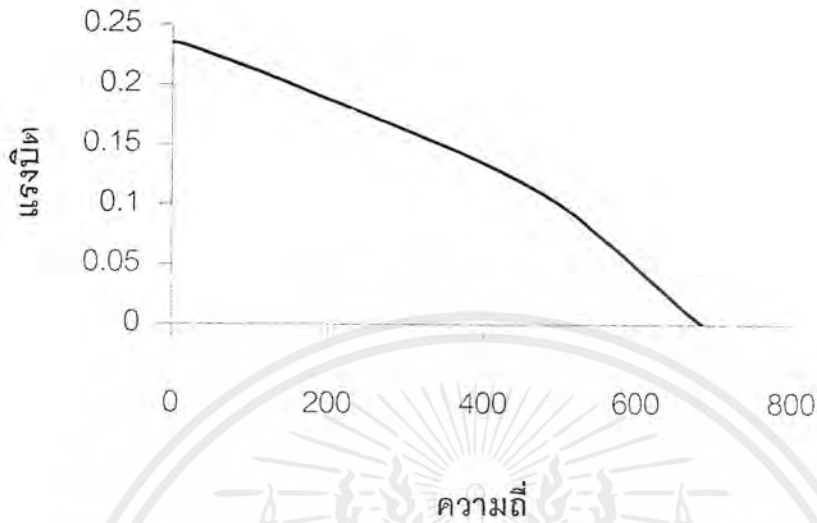
ทดสอบผลของโมเมนต์ความเฉื่อย

1. ทำการทดลองเหมือนกับการทดลองสถานะมีโหลด เพียงแต่เปลี่ยนขนาดของฟูลเลย์
2. นำค่าที่บันทึกผลไปทำการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความถี่

ตารางที่ 6.10 แสดงผลการทดลองแรงบิดพูลอิน มุมสลับ $1.8^{\circ}/\text{สลับ}$ รัศมีพู่เลี้ยว = 0.025 เมตร

ความถี่ (เฮิรตซ์)	แรงบิด (นิวตัน-เมตร)	มวลที่อ่านจากสเกล (กรัม)	มวลลูกน้ำหนัก (กรัม)
685	0	0	0
600	0.0441	20	200
525	0.06615	30	300
520	0.0882	40	400
475	0.11	50	500
425	0.1323	60	600
260	0.15435	70	700
225	0.174	90	800
180	0.1935	110	900
135	0.2131	130	1000
125	0.23275	150	1100
115	0.245	200	1200
20	0.2325	340	1300
10	0.2352	440	1400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

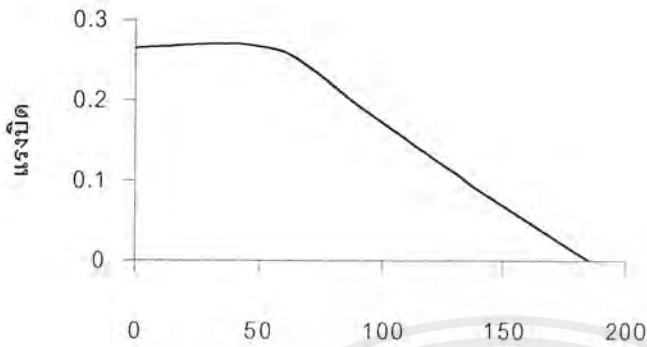


รูปที่ 6.10 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดพูลอิน มุมสเกล $1.8^{\circ}/\text{สเกล}$ รัศมีพู่เล่ย์ = 0.025 เมตร

ตารางที่ 6.11 แสดงผลการทดลองแรงบิดพูลอิน มุมสเกล $1.8^{\circ}/\text{สเกล}$ รัศมีพู่เล่ย์ = 0.045 เมตร

ความถี่ (เฮิรต์)	แรงบิด (นิวตัน-เมตร)	มวลที่อ่านจากสเกล (กรัม)	มวลลูกน้ำหนัก (กรัม)
185	0	0	0
145	0.07938	20	200
125	0.119	30	300
110	0.15876	40	400
90	0.19404	60	500
75	0.23	80	600
55	0.2646	100	700

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

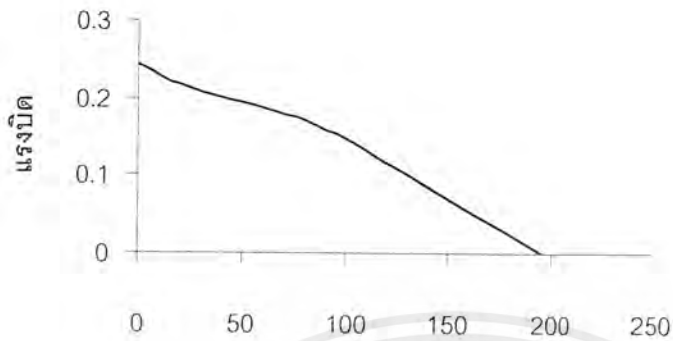


รูปที่ 6.11 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดพูลอิน มุมสเตป $1.8^{\circ}/\text{สเตป}$ รัศมีพู่เล่ย์ = 0.045 เมตร

ตารางที่ 6.12 แสดงผลการทดลองแรงบิดพูลอิน มุมสเตป $2^{\circ}/\text{สเตป}$ รัศมีพู่เล่ย์ = 0.04 เมตร

ความถี่ (เฮิรต์)	แรงบิด (นิวตัน-เมตร)	มวลที่อ่านจากสเกล (กรัม)	มวลลูกน้ำหนัก (กรัม)
195	0	0	0
157	0.07056	20	200
130	0.102	40	300
112	0.1333	60	400
85	0.1646	80	500
48	0.1881	120	600
25	0.211	160	700
20	0.243	180	800

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

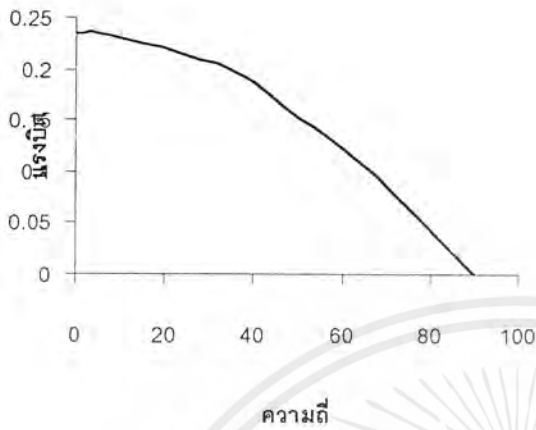


รูปที่ 6.12 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดพอลิอิน มุมสเกล $2^{\circ}/\text{สเกล}$ รัศมีพู่เลี้ยว = 0.04 เมตร

ตารางที่ 6.13 แสดงผลการทดลองแรงบิดพอลิอิน มุมสเกล $2^{\circ}/\text{สเกล}$ รัศมีพู่เลี้ยว = 0.06 เมตร

ความถี่ (เฮิร์ต)	แรงบิด (นิวตัน-เมตร)	มวลที่อ่านจากสเกล (กรัม)	มวลตุกน้ำหนัก (กรัม)
90	0	0	0
65	0.1058	20	200
50	0.1528	40	300
35	0.2	60	400
5	0.2352	100	500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

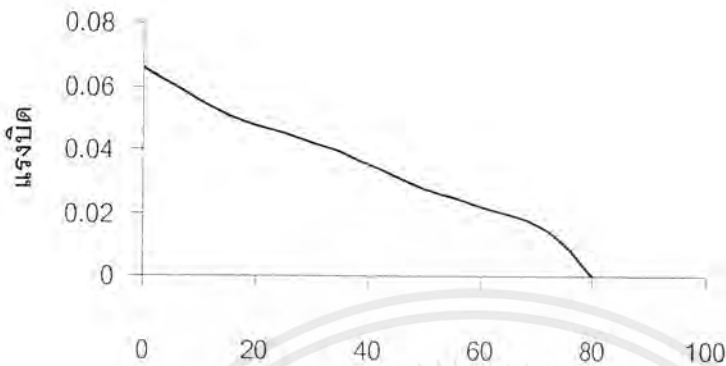


รูปที่ 6.13 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดพูลอิน มุมสลับ $2^{\circ}/\text{สลับ}$ รัศมีฟูลเลย์ = 0.06 เมตร

ตารางที่ 6.14 แสดงผลการทดลองแรงบิดพูลอิน มุมสลับ $7.5^{\circ}/\text{สลับ}$ รัศมีฟูลเลย์ = 0.04 เมตร

ความถี่ (เฮิรต์)	แรงบิด (นิวตัน-เมตร)	มวลที่อ่านจากสเกล (กรัม)	มวลลูกน้ำหนัก (กรัม)
80	0	0	0
75	0.0073	0	20
70	0.0156	0	40
65	0.02352	0	60
50	0.0274	10	80
45	0.0352	10	100
35	0.0392	20	120
30	0.047	20	140
15	0.051	30	160
5	0.0588	30	180
5	0.066	30	200

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.14 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดพูลอิน มุมสเตป $7.5^{\circ}/\text{สเตป}$ รัศมีพู่เลี้ยว = 0.04 เมตร

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่าค่าโมเมนต์ความเฉื่อยมีผลทำให้ความถี่ในการสแตร์ทสเตปปีงมอเตอร์มีค่าลดลง และจากกราฟแรงบิดพูลอินจะทำให้สามารถเลือกความถี่ในการสแตร์ทที่เหมาะสมสำหรับโหลดค่าใดๆ โดยที่ทำให้สเตปปีงมอเตอร์สามารถสแตร์ทได้โดยไม่สูญเสียสเตป และผลของกราฟแรงบิดพูลอินจะนำไปใช้คำนวณค่าความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบลูปเปิด

6.4 การทดลองคุณลักษณะของการหมุนหรือคุณลักษณะของแรงบิดพูลเอาท

ที่สภาวะไม่มีโหลด

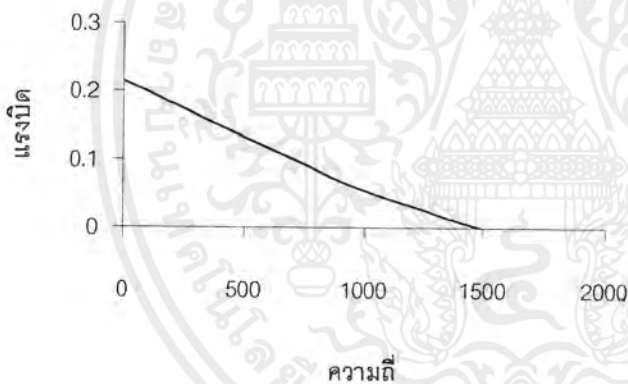
1. ทดลองสตาร์ทที่ย่านความถี่แรงบิดพูลอินแล้วค่อยๆเพิ่มความถี่ สังเกตดูการหมุนของ สเตปปีงมอเตอร์ ถ้าสเตปปีงมอเตอร์สามารถหมุนได้โดยไม่สูญเสียสเตปแล้วให้ทำตามข้อต่อมา
2. ให้ทำการสตาร์ทที่ย่านความถี่พูลอินใหม่อีกครั้ง โดยเพิ่มความถี่มากขึ้น แล้วสังเกตดูการหมุนของสเตปปีงมอเตอร์ว่าสเตปปีงมอเตอร์สูญเสียสเตปหรือไม่
3. ให้ทำการสตาร์ทที่ย่านความถี่พูลอินใหม่อีกครั้ง โดยเพิ่มความถี่มากขึ้นไปจนกระทั่งถึงความถี่ค่าหนึ่งที่ทำให้สเตปปีงมอเตอร์สูญเสียสเตป บันทึกผล

ที่สภาวะมีโหลด

1. ต่อ โหลดที่มีมวลค่าหนึ่งแล้วทำการสตาร์ทที่ย่านความถี่พูลอินแล้วค่อยๆเพิ่มความถี่จากนั้นสังเกตดูการหมุนของสเตปปีงมอเตอร์ว่าสเตปปีงมอเตอร์สูญเสียสเตปหรือไม่ถ้าสเตปปีงมอเตอร์หมุนโดยไม่สูญเสียสเตปแล้วเพิ่มความถี่ในการเร่งความเร็วขึ้น
2. ที่มวลค่าเดิมทดลองสตาร์ทใหม่อีกครั้ง โดยสตาร์ทที่ย่านความถี่พูลอินแล้วค่อยๆเพิ่มความถี่เพิ่มขึ้นไปสังเกตดูตำแหน่งการหมุนของสเตปปีงมอเตอร์ว่าสเตปปีงมอเตอร์สูญเสียสเตปหรือไม่
3. ทำการสตาร์ทที่ย่านความถี่พูลอินใหม่อีกครั้ง โดยค่อยๆเพิ่มความถี่เพิ่มขึ้นขณะเร่งความเร็วจนกระทั่งถึงความถี่ค่าหนึ่งที่ทำให้สเตปปีงมอเตอร์สูญเสียสเตป บันทึกผล (โดยบันทึกผลความถี่ในการเร่งสุดท้ายที่ทำให้สเตปปีงมอเตอร์สามารถหมุนได้โดยไม่สูญเสียสเตป)
4. ทำการเพิ่มมวลให้กับ โหลด แล้วทำการทดลองตั้งแต่ข้อ 1 ถึงข้อ 3 ใหม่อีกครั้งตามลำดับ
5. นำค่าที่ได้ไปบันทึกผลและวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความถี่

ตารางที่ 6.15 แสดงผลการทดลองแรงบิดพูลเออร์ มุมสลับ $1.8^{\circ}/\text{สลับ}$ รัศมีพุ่งเดี่ยว = 0.025 เมตร

ความถี่ (เฮิรตซ์)	แรงบิด (นิวตัน-เมตร)	มวลที่อ่านจากสเกล (กรัม)	มวลลูกน้ำหนัก (กรัม)
1480	0	0	0
1350	0.039	40	200
950	0.061	50	300
550	0.127	80	600
270	0.172	100	800
230	0.216	120	1000

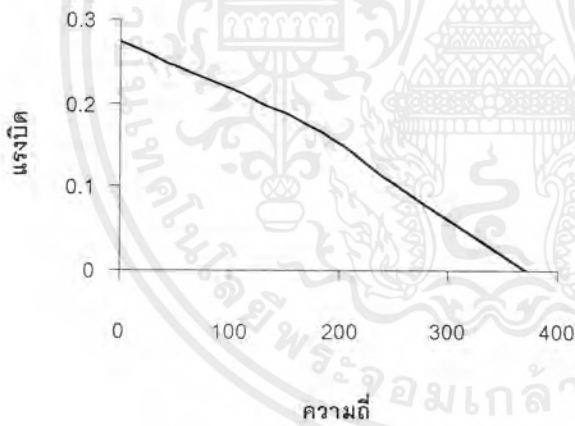


รูปที่ 6.15 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดพูลเออร์ มุมสลับ $1.8^{\circ}/\text{สลับ}$ รัศมีพุ่งเดี่ยว = 0.025 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.16 แสดงผลการทดลองแรงบิดพูลเอาท์ มุมสเตรป $2^{\circ}/\text{สเตรป}$ รัศมีพู่เล่ย์ = 0.04 เมตร

ความถี่ (เฮิรต์)	แรงบิด (นิวตัน-เมตร)	มวลที่อ่านจากสเกล (กรัม)	มวลลูกน้ำหนัก (กรัม)
370	0	0	0
280	0.071	20	200
250	0.104	35	300
180	0.141	40	400
170	0.176	50	500
22	0.274	100	800

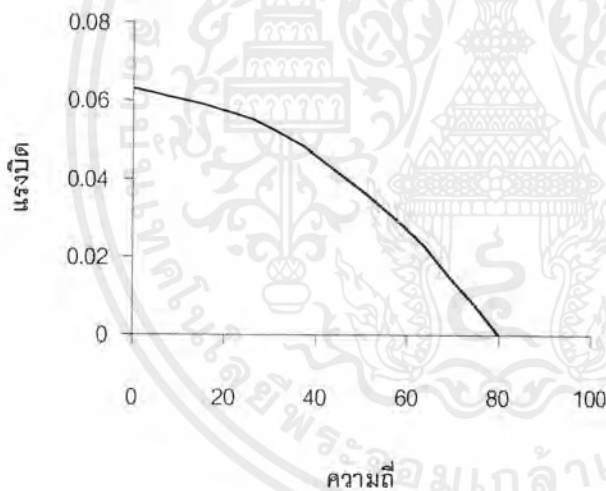


รูปที่ 6.16 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดพูลเอาท์ มุมสเตรป $2^{\circ}/\text{สเตรป}$ รัศมีพู่เล่ย์ = 0.04 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.17 แสดงผลการทดลองแรงบิดพูลเออร์ มุมสลับ $7.5^{\circ}/\text{สลับ}$ รัศมีพู่เล่ย์ = 0.04 เมตร

ความถี่ (เฮิรต์)	แรงบิด (นิวตัน-เมตร)	มวลที่อ่านจากสเกล (กรัม)	มวลลูกน้ำหนัก (กรัม)
80	0	0	0
75	0.022	4	60
58	0.029	7	80
45	0.043	10	120
30	0.053	25	160



รูปที่ 6.17 แสดงกราฟผลการทดลองแรงบิดพูลเออร์ มุมสลับ $7.5^{\circ}/\text{สลับ}$ รัศมีพู่เล่ย์ = 0.04 เมตร

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองแรงบิดพูลเออร์ที่ได้มาวาดกราฟแรงบิดพูลเออร์ จากกราฟทำให้เราสามารถทราบค่าความถี่ในการหมุนสูงสุดและทำให้สามารถเลือกค่าความถี่ที่เหมาะสมสำหรับหมุนสลับปีงมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่สเตปป์มอเตอร์สามารถหมุนได้โดยไม่สูญเสียสเตปป์เนื่องจากแรงบิดที่โหลดค่าใดๆทั้งยังใช้เป็นองค์ประกอบหนึ่งในการคำนวณค่าความถี่ที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบลูปเปิดและผลของโมเมนต์ความเฉื่อยก็ทำให้ความถี่พูลเอาท์ที่โหลดค่าเดียวกันลดลง

6.5 การทดลองการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบลูปเปิด

1. กำหนดระยะทางการเคลื่อนที่ให้กับสเตปป์มอเตอร์
2. นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการทดลองแรงบิดพูลอินและแรงบิดพูลเอาท์มาใช้กำหนดค่าความถี่ในการสตาร์ทและความถี่สูงสุดในการหมุนตามลำดับ
3. จากนั้นทำการคำนวณหาช่วงเวลาของการเร่งอัตราเร่ง อัตราการหมุนที่คงที่และช่วงลดความเร็วดังในหัวข้อ 6.4.2 แล้วนำมาเขียนเป็นตารางเวลาของพัลส์ที่จ่ายให้กับสเตปป์มอเตอร์
4. นำค่าที่ได้จากการคำนวณไปทดลองขับให้กับสเตปป์มอเตอร์แล้วสังเกตดูตำแหน่งการเคลื่อนที่ของสเตปป์มอเตอร์ว่าไปถึงยังตำแหน่งที่ต้องการหรือไม่

ตารางที่ 6.18 แสดงตารางเวลาและความถี่ที่ใช้ขับสเตปป์มอเตอร์ $1.8^{\circ}/\text{สเตปป์}$ รัศมีพูลเลย์ 0.025 เมตร มวลลูกน้ำหนัก = 200 กรัม ความถี่พูลอิน = 600 Hz ความถี่พูลเอาท์ = 1350 Hz

tm (ms)	delta tm (ms)	f (Hz)
0	1.6666	600
1.6666	1.5089	662.71
3.1756	1.3889	719.94
4.5646	1.2937	772.92
5.8583	1.2158	882.48
7.0742	1.1504	869.22
8.2246	1.0946	913.55
9.3192	1.0462	955.83
10.365	1.0036	996.32
11.369	0.9659	1035.2
12.335	0.9322	1072.7
13.267	0.9017	1108.9
14.169	0.8741	1143.9
15.043	0.8488	1178

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15.892	0.8256	1211
16.717	0.8043	1243.2
17.522	0.7845	1274.6
18.306	0.7661	1305.2
19.372	0.7489	1335.2
19.821	0.7407	1350

ตารางที่ 6.19 แสดงตารางเวลาและความถี่ที่ใช้ขับสเตปปีงมอเตอร์ $2^{\circ}/\text{สเตป}$ รัศมีพู่แกว่ง = 0.04 เมตร มวลลูกน้ำหนัก = 200 กรัม ความถี่พูลอิน = 157 Hz ความถี่พูลเอาท์ = 280 Hz

tm (ms)	delta tm (ms)	f (Hz)
0	6.3694	157
6.3694	6.0241	165.99
12.393	5.7295	174.53
18.123	5.4744	182.66
23.597	5.2505	190.45
28.848	5.0521	197.93
33.9	4.8746	205.14
38.774	4.7146	212.1
43.489	4.5694	218.84
48.059	4.4368	225.38
52.495	4.3151	231.74
56.811	4.203	237.92
61.014	4.0991	243.95
65.113	4.0026	249.83
69.115	3.9126	255.58
73.028	3.8284	261.2
76.856	3.7494	266.7
80.606	3.6751	272.09
84.281	3.6051	277.38
87.886	3.5714	280

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.20 แสดงตารางเวลาและความถี่ที่ใช้ขับสเตปปีงมอเตอร์ $7.5^{\circ}/\text{สเตป}$ รัศมีพูลีย์ = 0.04 เมตร มวลลูกน้ำหนัก = 60 กรัม ความถี่พูลิน = 65 Hz ความถี่พูลเอท = 75 Hz

tm (ms)	delta tm (ms)	f (Hz)
0	15.384	65
15.384	15.248	65.579
30.633	15.116	66.153
45.749	14.987	66.723
60.736	14.861	67.288
75.598	14.738	67.848
90.337	14.619	68.403
104.95	14.502	68.954
119.45	14.388	69.5
133.84	14.276	70.043
148.12	14.168	70.581
162.29	14.061	71.115
176.35	13.957	71.645
190.31	13.855	72.171
204.16	13.756	72.693
217.92	13.658	73.212
231.58	13.563	73.727
245.14	13.47	74.238
258.61	13.378	74.746
271.99	13.333	75

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าสเตปปีงมอเตอร์สามารถไปถึงตำแหน่งที่ต้องการได้โดยไม่สูญเสียสเตปและใช้เวลารวดเร็วและพบว่าคาบเวลาที่ใช้ในช่วงเร่งความเร็วนี้จะมีช่วงสั้นๆแต่จะมีบางช่วงที่อัตราเร่งมีสภาวะคงที่และเมื่อใกล้ถึงตำแหน่งที่ต้องการคาบเวลาที่ใช้ในการลดความเร็วจะมีคาบเวลายาวนานขึ้นเนื่องจากถ้าหากในช่วงเวลาที่ลดความเร็วนี้มีคาบเวลาสั้นๆเหมือนตอนที่เร่งความเร็วนี้ก็อาจจะทำให้สเตปปีงมอเตอร์หยุดเกินตำแหน่งที่ต้องการหรือมอเตอร์อาจจะเสียสเตปได้ซึ่งนี่ก็เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อจำกัดข้อหนึ่งของการควบคุมแบบลูปเปิดแต่ถ้าเป็นการควบคุมแบบลูปปิดจะแก้ปัญหการเสียดสเตรปได้ทำให้สเตรปิงมอเตอร์สามารถไปถึงตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

เนื่องจากปริญญาโทฉบับนี้ทำการศึกษาพารามิเตอร์และคุณลักษณะต่างๆของสเตปป์มอเตอร์ จึงมีข้อจำกัดทางด้านวงจรมอเตอร์อยู่บ้าง โดยปกติแล้วสเตปป์มอเตอร์จะหมุนเป็นสเตปป์ไม่ได้ หมุนฟรีเหมือนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทุกๆไปทำให้เมื่อทำการขับสเตปป์มอเตอร์จะมีการสั่นเกิดขึ้นที่เพลาโรเตอร์ ซึ่งถ้าสเตปป์มอเตอร์สั่นมากจะลดความสามารถของความเร็วในการสตาร์ทและความถี่ในการหมุน อันจะทำให้สเตปป์มอเตอร์สูญเสียสเตปป์ได้ง่ายขึ้น ดังนั้นถ้าต้องการให้เกิดการสั่นน้อยลงก็ต้องทำการปรับปรุงวงจรมอเตอร์และทำการขับแบบไมโครสเตป

ผลของการสั่นและข้อจำกัดของชุดเอนโคเดอร์ทำให้ไม่สามารถขับสเตปป์มอเตอร์ได้ด้วยความถี่สูงๆแต่สามารถขับได้ที่ความถี่ต่ำๆเนื่องจากมีความละเอียดต่ำ แต่ชุดเอนโคเดอร์ในปริญญาโทฉบับนี้แสดงให้เห็นถึงพื้นฐานของการป้อนกลับ หากต้องการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ให้ขับได้ที่ความถี่สูงๆและไม่สูญเสียสเตปป์ จะต้องทำการปรับปรุงชุดเอนโคเดอร์ให้มีความละเอียดที่สูงๆ



ภาคผนวก

โปรแกรมการทดลอง

ในการทดสอบจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ MCS51 ซึ่งจะใช้เป็นบอร์ดการทดลองที่ใช้
งานร่วมกับเครื่อง PC โดยติดต่อผ่านพอร์ตอนุกรม

เนื่องจากโปรแกรมที่ใช้นั้นเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการทดลองเพื่อให้ได้ความถี่ที่หลากหลายจึง
อาจจะไม่ใช่โปรแกรมที่สะดวกมากนักในการใช้งานจริงแต่ผู้ที่ศึกษาก็สามารถใช้เป็นแนวทางในการ
เขียนโปรแกรมเพื่อประยุกต์ใช้งานต่อไปได้

6.1 โปรแกรมทดสอบแรงบิดพูลอิน

```
-----;
;          DRIVE STEPPING MOTOR          ;
;          (PULL IN TEST)                ;
;-----;
CPU      "8051.TBL"
HOF      "INT8"
P1: EQU  90H          ;PORT 1
ORG      8100H
MOV      A,#11H
MOV      R4,#2          ;number of step
LOOP1:   MOV      R3,#10
LOOP:    MOV      P1,A
RR
MOV      R7,#100        ;delay 1/1mS
TIME:    LCALL   DELAY
DJNZ    R7, TIME
STEP:    DJNZ    R3,LOOP
DJNZ    R4,LOOP1
STOP:    LJMP   0033H
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DELAY:    MOV    R0,#28H           ; time delay 1mS
DI:       MOV    R1,#0AH
          DJNZ   R1,$
          DJNZ   R0,DI
          RET
          END

```

6.2 โปรแกรมการทดสอบแรงบิดพูลเอาท

```

;-----;
;      DRIVE STEPPING MOTOR      ;
;      (PULL OUT TEST)           ;
;-----;
CPU      "8051.TBL"
HOF      "INT8"
INCL     "INST.ASM"
P1:      EQU    90H               ;PORT 1
DPH:     EQU    83H               ;DATA POINTER HIGH
DPL:     EQU    82H               ;DATA POINTER LOW
N:       EQU    20                ;NUMBER OF (M)
T:       EQU    5                 ;CHANGE SPEED
ORG      8100H
MOV      A,#11H                   ;start pulse
MOV      P1,A
MOV      R5,A
MOV      DPTR,#Y
MOVX     A,@DPTR
MOV      R4,A
MOV      R7,#00

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ROTATE:   MOV  A,R4
          CJNE A,#00,LEFT      ;check direction
RIGHT:    MOV  A,R5           ;current of step
          RR   A
          SJMP STEP
LEFT:     MOV  A,R5
          RL   A

STEP:     MOV  PI,A
          MOV  R5,A
          INC  R7
DETERM:   MOV  DPTR,#X-1
          MOV  A,R7
          CLR  C
          SUBB A,#N           ;R7-N
          JNC  STOP          ;if R7>N goto STOP
          MOV  A,R7
          CLR  C
          SUBB A,#T
          JNC  TACC2

TACC1:    MOV  A,R7
          MOVC A,@A+DPTR
          MOV  R3,A
TA1:      LCALL DELAY1
          DJNZ R3,TA1
          LJMP ROTATE

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

TACC2:    MOV  A,R7
          MOVC A,@A+DPTR
          MOV  R3,A
TA2:      LCALL DELAY2
          DJNZ R3,TA2
          LJMP ROTATE

TACC3:    MOV  A,R7
          MOVC A,@A+DPTR
          MOV  R3,A
TA3:      LCALL DELAY3
          DJNZ R3,TA3
          LJMP ROTATE
STOP:     LJMP 0033H

DELAY1:   MOV  R0,#28H           ;time delay 1mS
DD1:      MOV  R1,#0AH
          DJNZ R1,$
          DJNZ R0,DD1
          RET

DELAY2:   MOV  R0,#01H           ;time delay 0.1mS
DD2:      MOV  R1,#2BH
          DJNZ R1,$
          DJNZ R0,DD2
          RET

DELAY3:   MOV  R0,#01H           ;time delay 0.01mS
DD3:      MOV  R1,#02H

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
DJNZ R1,$
DJNZ R0,DD3
RET
```

```
Y:   DFB   1           ;position
X:   DFB  200   ;=>1   ;accelerate time
     DFB  150   ;=>2
     DFB  100   ;=>3
     DFB   50   ;=>4
     DFB  250   ;=>5
     DFB  200   ;=>6
     DFB  180   ;=>7
     DFB  150   ;=>8
     DFB  120   ;=>9
     DFB  100   ;=>10
     DFB  100   ;=>11
     DFB  100   ;=>12
     DFB  100   ;=>13
     DFB   80   ;=>14
     DFB   80   ;=>15
     DFB   50   ;=>16
     DFB   50   ;=>17
     DFB   50   ;=>18
     DFB   50   ;=>19
     DFB   50   ;=>20
END
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.3 โปรแกรมการทดสอบการจับแบบมีอัตราเร่งและลด

```

;-----;
;   DRIVE STEPPING MOTOR   ;
;   LOOP CONTROL           ;
;-----;

```

```

CPU "8051.TBL"
HOF "INT8"
INCL "INST.ASM"
P1: EQU 90H ;PORT 1
DPH: EQU 83H ;DATA POINTER HIGH
DPL: EQU 82H ;DATA POINTER LOW
N: EQU 20 ;NUMBER OF (M)
T: EQU 7 ;CHANGE BASE TIME
ORG 8100H
MOV A,#11H ;start pulse
MOV P1,A
MOV R5,A
MOV DPTR,#Y
LOOP1: MOVX A,@DPTR
MOV R4,A
CLR C
SUBB A,#2
CJNE A,#00,GO
STOP: LJMP 0033H
GO: INC DPTR
MOVX A,@DPTR
MOV R6,A ;R6 is number of step

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV R7,#00
PUSH DPL
PUSH DPH

ROTATE: MOV A,R4
        CJNE A,#00,LEFT      ;checking direction
RIGHT:  MOV A,R5             ;current of step
        RR A
        SJMP STEP
LEFT:   MOV A,R5
        RL A
STEP:   MOV P1,A
        MOV R5,A
COUNT: INC R7
        DEC R6
        MOV A,R6
        CJNE A,#00,DETERM
PAUSE:  MOV R0,#00H          ;wiat
PAUSE1: MOV R1,#70H
PAUSE2: MOV R2,#10H
        DJNZ R2,$
        DJNZ R1,PAUSE2
        DJNZ R0,PAUSE1
        POP DPH
        POP DPL
        INC DPTR
        SJMP LOOP1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DETERM:  MOV  DPTR,#X-1
          MOV  A,R7
          CLR  C
          SUBB A,R6           ;R7-R6
          JC   ASUBN         ;if R7<R6 goto ASUBN
DSUBN:   MOV  A,R6
          CLR  C
          SUBB A,#N         ;R6-N
          JNC SLEW          ;if R6>N goto slew
DECEL:   MOV  A,R6
          CLR  C
          SUBB A,#T
          JNC TDEC2         ;if change base time go to TDEC2
TDEC1:   MOV  A,R6
          MOVC A,@A+DPTR
          MOV  R3,A
TD1:     LCALL DELAY1
          DJNZ R3,TD1
          LJMP ROTATE
TDEC2:   MOV  A,R6
          MOVC A,@A+DPTR
          MOV  R3,A
TD2:     LCALL DELAY2
          DJNZ R3,TD2
          LJMP ROTATE
TDEC3:   MOV  A,R6

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV C A,@A+DPTR
MOV R3,A
TD3:   LCALL DELAY3
       DJNZ R3,TD3
       LJMP ROTATE

ASUBN: MOV A,R7
       CLR C
       SUBB A,#N           ;R7-N
       JNC SLEW           ;if R7>N goto slew

ACCEL: MOV A,R7
       CLR C
       SUBB A,#T
       JNC TACC2

TACC1: MOV A,R7
       MOVC A,@A+DPTR
       MOV R3,A

TA1:   LCALL DELAY1
       DJNZ R3,TA1
       LJMP ROTATE

TACC2: MOV A,R7
       MOVC A,@A+DPTR
       MOV R3,A

TA2:   LCALL DELAY2
       DJNZ R3,TA2
       LJMP ROTATE

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

TACC3:  MOV  A,R7
        MOVC A,@A+DPTR
        MOV  R3,A

TA3:    LCALL DELAY3
        DJNZ R3,TA3
        LJMP ROTATE

SLEW:   MOV  A,#N
        MOVC A,@A+DPTR
        MOV  R3,A

TSL:    LCALL DELAY2
        DJNZ R3,TSL
        LJMP ROTATE

DELAY1:  MOVR0,#28H           ;time delay 1mS
DD1:    MOV  R1,#0AH
        DJNZ R1,$
        DJNZ R0,DD1
        RET

DELAY2:  MOV  R0,#01H           ;time delay 0.1mS
DD2:    MOV  R1,#2BH
        DJNZ R1,$
        DJNZ R0,DD2
        RET

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DELAY3:   MOV   R0,#01H           ;time delay 0.01mS
          DD3:   MOV   R1,#02H
          DJNZ  R1,$
          DJNZ  R0,DD3
          RET

```

```

Y:        DFB   1                 ;position
          DFB   200              ;number of step
          DFB   0                 ;next position
          DFB   100              ;number of step
          DFB   2                 ;stop

```

```

X:        DFB   200   ;=>1       ;accelerate time
          DFB   150   ;=>2
          DFB   100   ;=>3
          DFB   80    ;=>4
          DFB   60    ;=>5
          DFB   50    ;=>6
          DFB   180   ;=>7
          DFB   170   ;=>8
          DFB   160   ;=>9
          DFB   150   ;=>10
          DFB   140   ;=>11
          DFB   130   ;=>12
          DFB   120   ;=>13
          DFB   110   ;=>14
          DFB   100   ;=>15
          DFB   140   ;=>16
          DFB   130   ;=>17

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DFB 120 ;=>18
DFB 110 ;=>19
DFB 100 ;=>20
END

```

6.4 โปรแกรมการทดสอบแบบลูปปิด

```

;-----;
; Drive stepping Motor ;
; Close Loop control ;
;-----;

CPU "8051.TBL"
HOF "INT8"
P1: EQU 90H ;PORT 1
PORTA: EQU 800H
PORTB: EQU 801H
PORTC: EQU 802H
CONP: EQU 803H
ACC.7: EQU 0E7H

ORG 8100H
MOV R7,#11H ;start pulse
MOV R6,#48 ;number of step
MOV R5,#00
MOV R3,#00
NEW: MOV A,#88H ;set port
MOV DPTR,#CONP

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOVX @DPTR,A

CHECK:   MOV  DPTR,#PORTC      ;check feedback pulse
         MOVX A,@DPTR
         JNB  ACC.7,CHECK1
         SJMP CHECK

CHECK1:  INC   R3              ; two pulse per step
         MOV  R4,#28          ;delay time 1/1mS
         CJNE R3,#02,WAIT
         SJMP NEXT

WAIT:    LCALL DELAY
         DJNZ R4,WAIT
         LJMP CHECK

NEXT:    INC   R5
         MOV  A,R6
         CLR  C
         SUBB A,R5
         JNC  RIGHT

LEFT:    MOV  A,R7
         MOV  P1,A
         RL   A
         MOV  R7,A
         MOV  R4,#125
         LCALL TIME
         MOV  R3,#00

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV A,R6
CLR C
SUBB A,R5
JNZ CHECK
LJMP CHECK

```

```

RIGHT: MOV A,R7
MOV PI,A
RR A
MOV R7,A ;save current of step
MOV R4,#28 ;delay time 1/1mS
LCALL TIME
MOV R3,#00
MOV A,R6
CLR C
SUBB A,R5
JNZ CHECK
LJMP CHECK

TIME: LCALL DELAY
DJNZ R4,TIME
RET

```

```

DELAY: MOV R0,#28H ;delay 1mS
D1: MOV R1,#0AH
DJNZ R1,$
DJNZ R0,D1
RET
END

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง. ไอซีไทมเมอร์ 555

DESCRIPTION

The NE/SE 555 monolithic timing circuit is a highly stable controller capable of producing accurate time delays, or oscillation. Additional terminals are provided for triggering or resetting if desired. In the time delay mode of operation, the time is precisely controlled by one external resistor and capacitor. For a stable operation as an oscillator, the free running frequency and the duty cycle are both accurately controlled with two external resistors and one capacitor. The circuit may be triggered and reset on falling waveforms, and the output structure can source or sink up to 200mA or drive TTL circuits.

FEATURES

- TIMING FROM MICROSECONDS THROUGH HOURS
- OPERATES IN BOTH ASTABLE AND MONOSTABLE MODES

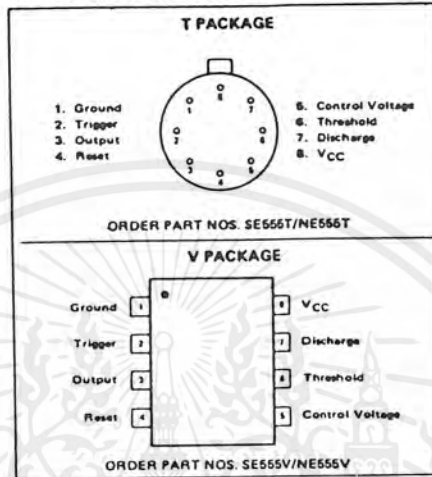
- ADJUSTABLE DUTY CYCLE
- HIGH CURRENT OUTPUT CAN SOURCE OR SINK 200mA
- OUTPUT CAN DRIVE TTL
- TEMPERATURE STABILITY OF 0.005% PER °C
- NORMALLY ON AND NORMALLY OFF OUTPUT

APPLICATIONS

PRECISION TIMING
PULSE GENERATION
SEQUENTIAL TIMING
TIME DELAY GENERATION
PULSE WIDTH MODULATION
PULSE POSITION MODULATION
MISSING PULSE DETECTOR

LINEAR INTEGRATED CIRCUITS

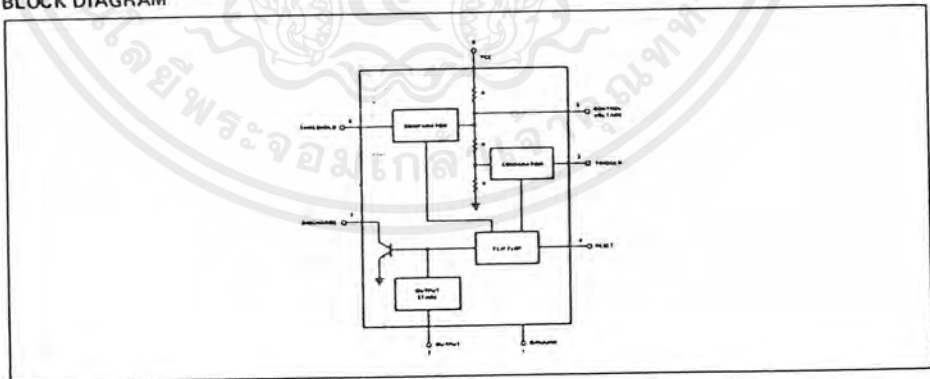
PIN CONFIGURATIONS (Top View)



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage	+18V
Power Dissipation	600 mW
Operating Temperature Range	
NE555	0°C to +70°C
SE555	-55°C to +125°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 60 seconds)	+300°C

BLOCK DIAGRAM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

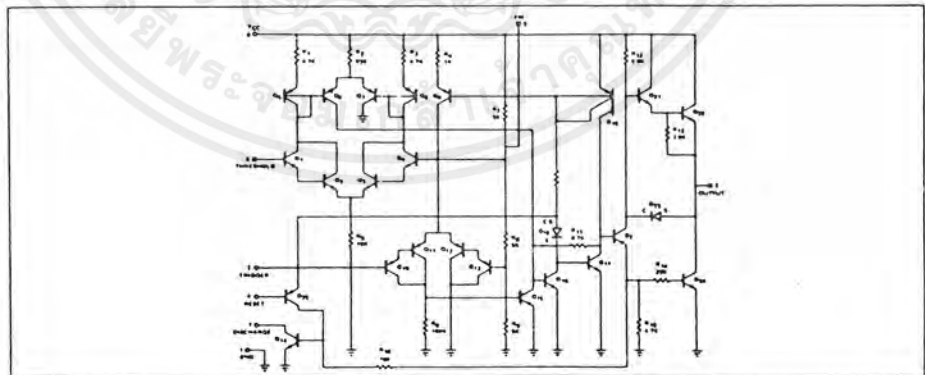
ELECTRICAL CHARACTERISTICS $T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_{CC} = +5\text{V}$ to $+15$ unless otherwise specified

PARAMETER	TEST CONDITIONS	SE 555			NE 555			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Supply Voltage		4.5		18	4.5		16	V
Supply Current	$V_{CC} = 5\text{V}$ $R_L = \infty$ $V_{CC} = 15\text{V}$ $R_L = \infty$ Low State, Note 1		3	5		3	6	mA
	$R_A, R_B = 1\text{K}\Omega$ to $100\text{K}\Omega$ $C = 0.1\ \mu\text{F}$ Note 2		10	12		10	15	mA
Timing Error(Monostable)								
Initial Accuracy			0.5	2		1		%
Drift with Temperature			30	100		50		ppm/ $^\circ\text{C}$
Drift with Supply Voltage			0.05	0.2		0.1		%/Volt
Threshold Voltage			2/3			2/3		$\times V_{CC}$
Trigger Voltage	$V_{CC} = 15\text{V}$	4.8	5	6.2		5		V
Fiming Error(Astable)	$V_{CC} = 5\text{V}$	1.45	1.67	1.9		1.67		V
Trigger Current			0.5			0.5		μA
Reset Voltage		0.4	0.7	1.0	0.4	0.7	1.0	V
Reset Current			0.1			0.1		mA
Threshold Current	Note 3		0.1	.25		0.1	.25	μA
Control Voltage Level	$V_{CC} = 15\text{V}$	9.6	10	10.4	9.0	10	11	V
	$V_{CC} = 5\text{V}$	2.9	3.33	3.8	2.6	3.33	4	V
Output Voltage (low)	$V_{CC} = 15\text{V}$							
	$I_{\text{SINK}} = 10\text{mA}$		0.1	0.15		0.1	.25	V
	$I_{\text{SINK}} = 50\text{mA}$		0.4	0.5		0.4	.75	V
	$I_{\text{SINK}} = 100\text{mA}$		2.0	2.2		2.0	2.5	V
	$I_{\text{SINK}} = 200\text{mA}$		2.5			2.5		V
	$V_{CC} = 5\text{V}$							
	$I_{\text{SINK}} = 8\text{mA}$		0.1	0.25				V
	$I_{\text{SINK}} = 5\text{mA}$.25	.35	V
Output Voltage Drop (low)								
	$I_{\text{SOURCE}} = 200\text{mA}$		12.5			12.5		V
	$V_{CC} = 15\text{V}$							
	$I_{\text{SOURCE}} = 100\text{mA}$							
	$V_{CC} = 15\text{V}$	13.0	13.3		12.75	13.3		V
	$V_{CC} = 5\text{V}$	3.0	3.3		2.75	3.3		V
Rise Time of Output			100			100		nsec
Fall Time of Output			100			100		nsec

NOTES

1. Supply Current when output high typically 1mA less.
2. Tested at $V_{CC} = 5\text{V}$ and $V_{CC} = 15\text{V}$.
3. This will determine the maximum value of $R_A + R_B$. For 15V operation, the max total R = 20 megohm.

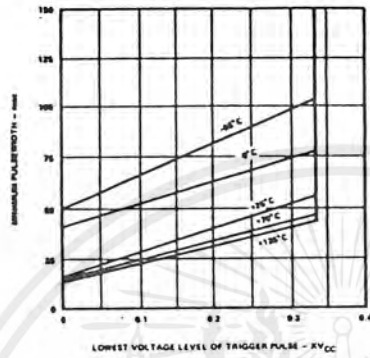
EQUIVALENT CIRCUIT (Shown for One Side Only)



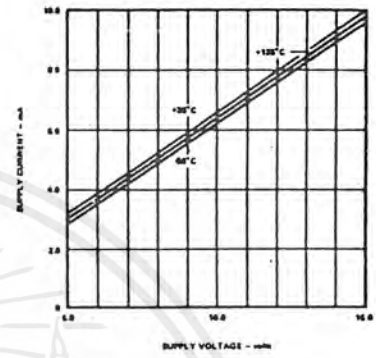
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL CHARACTERISTICS

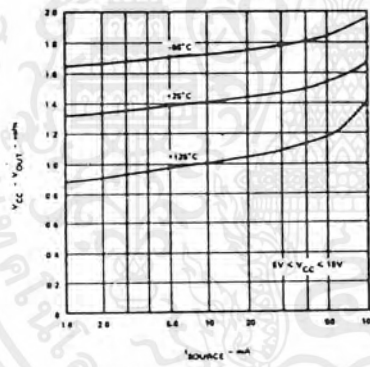
MINIMUM PULSE WIDTH
REQUIRED FOR TRIGGERING



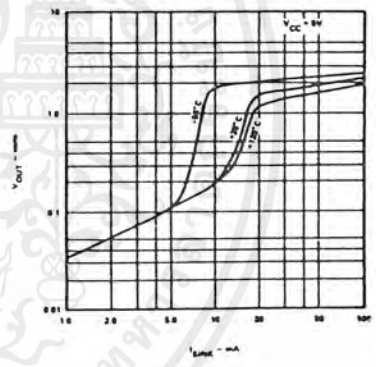
SUPPLY CURRENT
vs SUPPLY VOLTAGE



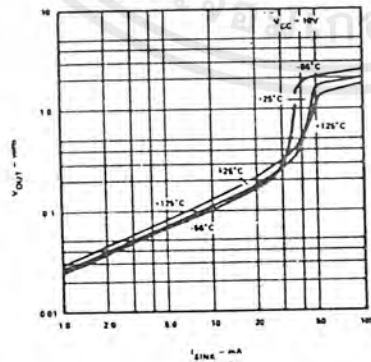
LOW OUTPUT VOLTAGE
vs OUTPUT SINK CURRENT



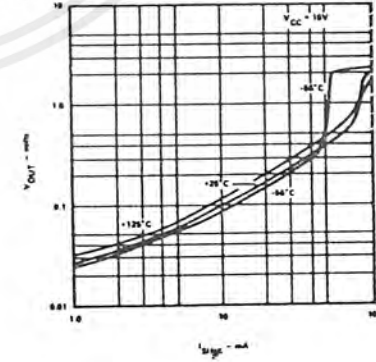
HIGH OUTPUT VOLTAGE
vs OUTPUT
SOURCE CURRENT



LOW OUTPUT VOLTAGE
vs OUTPUT SINK CURRENT

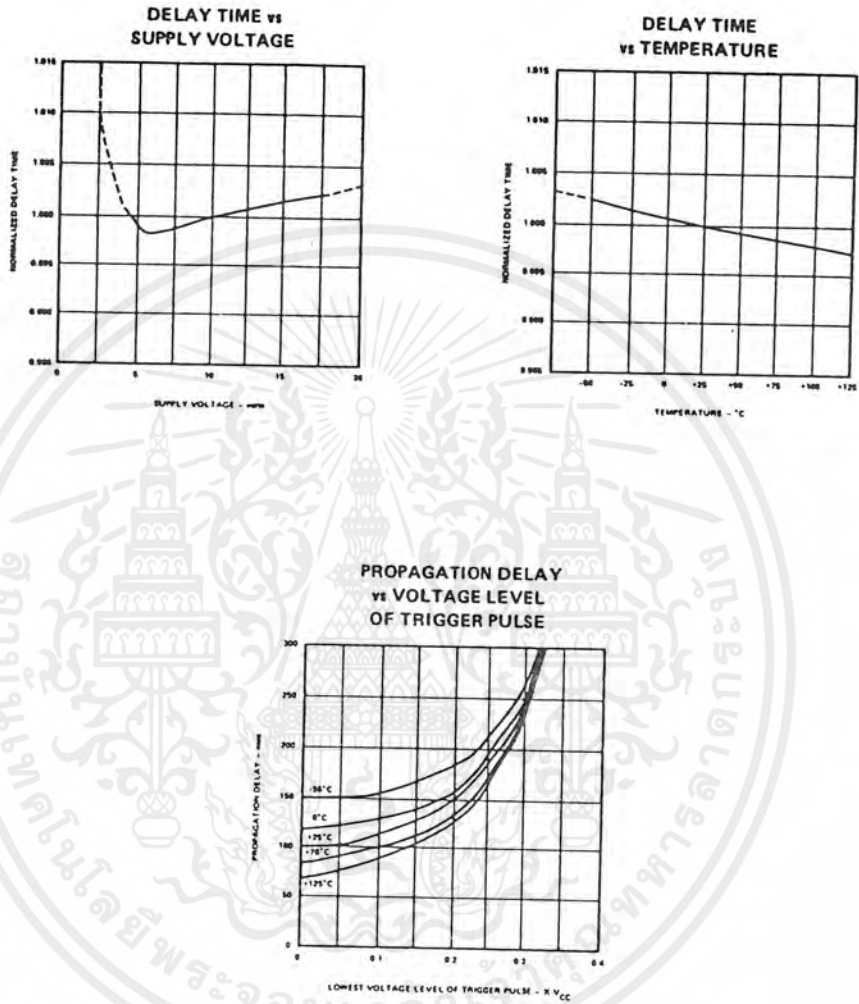


LOW OUTPUT VOLTAGE
vs OUTPUT SINK CURRENT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL CHARACTERISTICS (Cont'd)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ.

LM317 ไอซีเรกูเลเตอร์ชนิด 3 ขา

General Description

The LM117/LM217/LM317 are adjustable 3 terminal positive voltage regulators capable of supplying in excess of 1.5A over a 1.2V to 37V output range. They are exceptionally easy to use and require only two external resistors to set the output voltage. Further, both line and load regulation are better than standard fixed regulators. Also, the LM117 is packaged in standard transistor packages which are easily mounted and handled.

In addition to higher performance than fixed regulators, the LM117 series offers full overload protection available only in IC's. Included on the chip are current limit, thermal overload protection and safe area protection. All overload protection circuitry remains fully functional even if the adjustment terminal is disconnected.

Features

- Adjustable output down to 1.2V
- Guaranteed 1.5A output current
- Line regulation typically 0.01%/V
- Load regulation typically 0.1%
- Current limit constant with temperature
- 100% electrical burn-in
- Eliminates the need to stock many voltages
- Standard 3-lead transistor package
- 80 dB ripple rejection

Normally, no capacitors are needed unless the device is situated far from the input filter capacitors in which case an input bypass is needed. An optional output capacitor can be added to improve transient response. The adjustment terminal can be bypassed to achieve very high ripple rejections ratios which are difficult to achieve with standard 3-terminal regulators.

Besides replacing fixed regulators, the LM117 is useful in a wide variety of other applications. Since the regulator is "floating" and sees only the input-to-output differential voltage, supplies of several hundred volts can be regulated as long as the maximum input to output differential is not exceeded.

Also, it makes an especially simple adjustable switching regulator, a programmable output regulator, or by connecting a fixed resistor between the adjustment and output, the LM117 can be used as a precision current regulator. Supplies with electronic shutdown can be achieved by clamping the adjustment terminal to ground which programs the output to 1.2V where most loads draw little current.

The LM117K, LM217K and LM317K are packaged in standard TO-3 transistor packages while the LM117H, LM217H and LM317H are packaged in a solid Kovar base TO-39 transistor package. The LM117 is rated for operation from -55°C to $+150^{\circ}\text{C}$, the LM217 from -25°C to $+150^{\circ}\text{C}$ and the LM317 from 0°C to $+125^{\circ}\text{C}$. The LM317T and LM317MP, rated for operation over a 0°C to $+125^{\circ}\text{C}$ range, are available in a TO-220 plastic package and a TO-202 package, respectively.

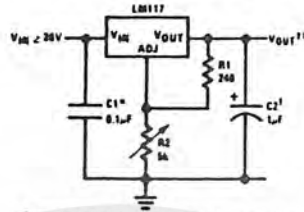
For applications requiring greater output current in excess of 3A and 5A, see LM150 series and LM138 series data sheets, respectively. For the negative complement, see LM137 series data sheet.

LM117 Series Packages and Power Capability

DEVICE	PACKAGE	RATED POWER DISSIPATION	DESIGN LOAD CURRENT
LM117	TO-3	20W	1.5A
LM217	TO-39	2W	0.5A
LM317T	TO-220	15W	1.5A
LM317M	TO-202	7.5W	0.5A
LM317LZ	TO-92	0.6W	0.1A

Typical Applications

1.2V–25V Adjustable Regulator

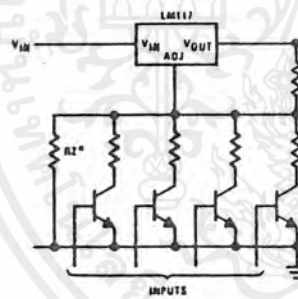


† Optional—improves transient response. Output capacitors in the range of 1 μF to 1000 μF of aluminum or tantalum electrolytic are commonly used to provide improved output impedance and rejection of transients.

* Needed if device is far from filter capacitors.

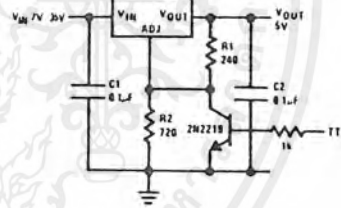
$$V_{OUT} = 1.25V \left(1 + \frac{R2}{R1} \right)$$

Digitally Selected Outputs



* Sets maximum V_{OUT}

5V Logic Regulator with Electronic Shutdown*



* Min output ≈ 1.2V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings

Power Dissipation	Internally limited
Input-Output Voltage Differential	40V
Operating Junction Temperature Range	
LM117	-55°C to +150°C
LM217	-25°C to +150°C
LM317	0°C to +125°C
Storage Temperature	-65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)	300°C

Preconditioning

Burn-In in Thermal Limit 100% All Devices

Electrical Characteristics (Note 1)

PARAMETER	CONDITIONS	LM117/217			LM317			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Line Regulation	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $3\text{V} \leq V_{IN} - V_{OUT} \leq 40\text{V}$ (Note 2)		0.01	0.02		0.01	0.04	%/V
Load Regulation	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $10\text{ mA} \leq I_{OUT} \leq I_{MAX}$ $V_{OUT} \leq 5\text{V}$, (Note 2) $V_{OUT} \geq 5\text{V}$, (Note 2)		5	15		5	25	mV
			0.1	0.3		0.1	0.5	%
Thermal Regulation	$T_A = 25^\circ\text{C}$, 20 ms Pulse		0.03	0.07		0.04	0.07	%/W
Adjustment Pin Current			50	100		50	100	μA
Adjustment Pin Current Change	$10\text{ mA} \leq I_L \leq I_{MAX}$ $3\text{V} \leq (V_{IN} - V_{OUT}) \leq 40\text{V}$		0.2	5		0.2	5	μA
Reference Voltage	$3\text{V} \leq (V_{IN} - V_{OUT}) \leq 40\text{V}$, (Note 3) $10\text{ mA} \leq I_{OUT} \leq I_{MAX}$, $P \leq P_{MAX}$	1.20	1.25	1.30	1.20	1.25	1.30	V
Line Regulation	$3\text{V} \leq V_{IN} - V_{OUT} \leq 40\text{V}$, (Note 2)		0.02	0.05		0.02	0.07	%/V
Load Regulation	$10\text{ mA} \leq I_{OUT} \leq I_{MAX}$, (Note 2) $V_{OUT} \leq 5\text{V}$ $V_{OUT} \geq 5\text{V}$		20	50		20	70	mV
			0.3	1		0.3	1.5	%
Temperature Stability	$T_{MIN} \leq T_J \leq T_{MAX}$		1			1		%
Minimum Load Current	$V_{IN} - V_{OUT} = 40\text{V}$		3.5	5		3.5	10	mA
Current Limit	$V_{IN} - V_{OUT} = 15\text{V}$ K and T Package H and P Package $V_{IN} - V_{OUT} = 40\text{V}$, $T_J = +25^\circ\text{C}$ K and T Package H and P Package		1.5	2.2		1.5	2.2	A
			0.5	0.8		0.5	0.8	A
			0.30	0.4		0.15	0.4	A
			0.15	0.07		0.075	0.07	A
RMS Output Noise, % of V_{OUT}	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $10\text{ Hz} \leq f \leq 10\text{ kHz}$		0.003			0.003		%
Ripple Rejection Ratio	$V_{OUT} = 10\text{V}$, $f = 120\text{ Hz}$ $C_{ADJ} = 10\mu\text{F}$		65			65		dB
			66	80		66	80	dB
Long Term Stability	$T_A = 125^\circ\text{C}$		0.3	1		0.3	1	%
Thermal Resistance, Junction to Case	H Package K Package T Package P Package		12	15		12	15	$^\circ\text{C/W}$
			2.3	3		2.3	3	$^\circ\text{C/W}$
						4		$^\circ\text{C/W}$
						12		$^\circ\text{C/W}$

Note 1: Unless otherwise specified, these specifications apply $-55^\circ\text{C} < T_J < +150^\circ\text{C}$ for the LM117, $-25^\circ\text{C} < T_J < +150^\circ\text{C}$ for the LM217, and $0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$ for the LM317; $V_{IN} - V_{OUT} = 5\text{V}$; and $I_{OUT} = 0.1\text{ A}$ for the TO-39 and TO-202 packages and $I_{OUT} = 0.5\text{ A}$ for the TO-3 and TO-220 packages. Although power dissipation is internally limited, these specifications are applicable for power dissipations of 2W for the TO-39 and TO-202, and 20W for the TO-3 and TO-220. I_{MAX} is 1.5A for the TO-3 and TO-220 packages and 0.5A for the TO-39 and TO-202 packages.

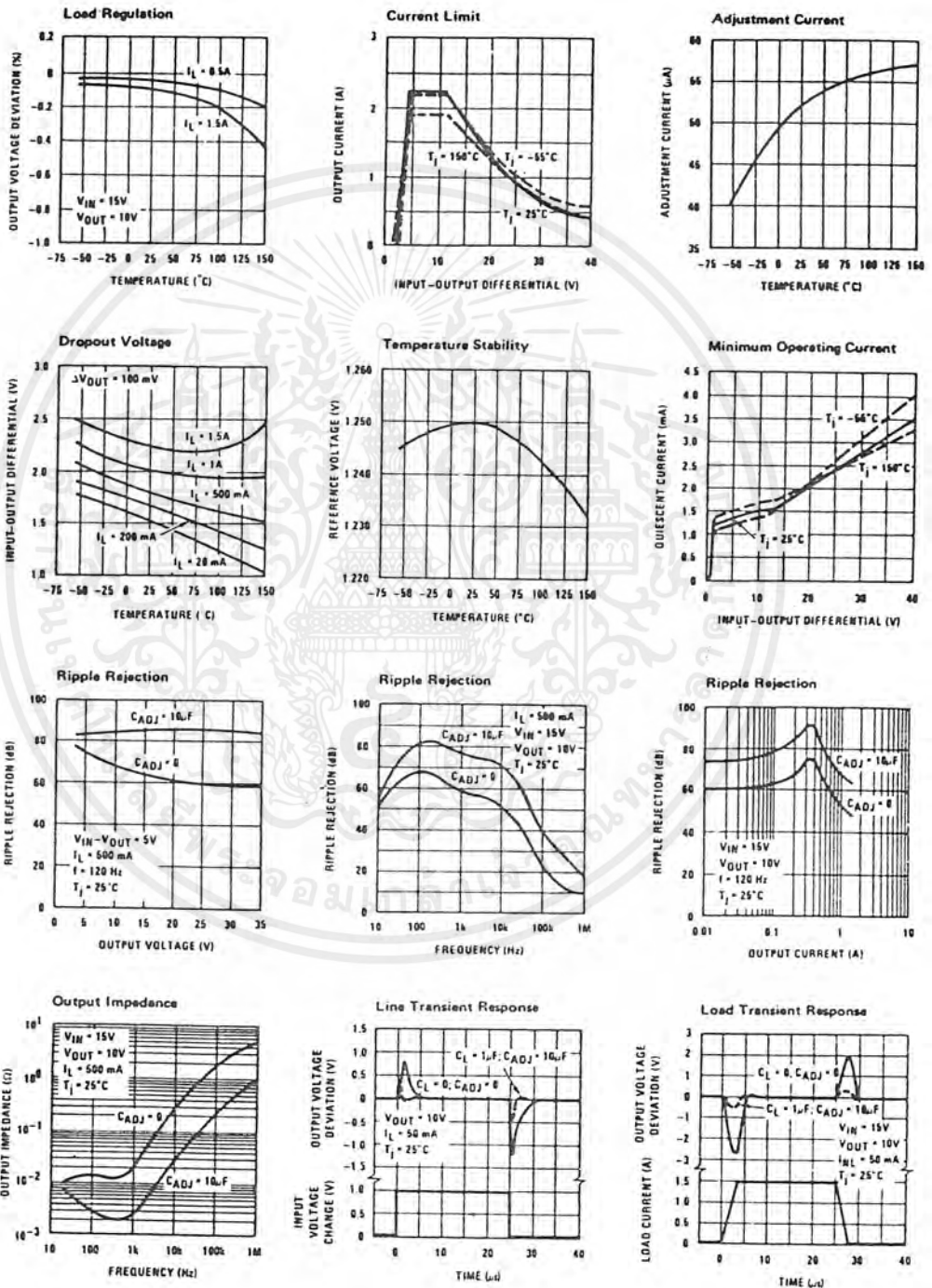
Note 2: Regulation is measured at constant junction temperature, using pulse testing with a low duty cycle. Changes in output voltage due to heating effects are covered under the specification for thermal regulation.

Note 3: Selected devices with tightened tolerance reference voltage available.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Performance Characteristics (K and T Packages)

Output Capacitor = 0 unless otherwise noted



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Application Hints

In operation, the LM117 develops a nominal 1.25V reference voltage V_{REF} between the output and adjustment terminal. The reference voltage is impressed across program resistor $R1$ and since the voltage is constant, a constant current I_1 then flows through the output set resistor $R2$ giving an output voltage of

$$V_{OUT} = V_{REF} \left(1 + \frac{R2}{R1} \right) + I_{ADJ}R2$$

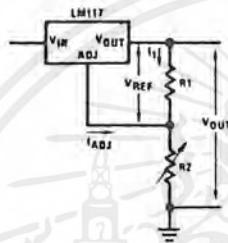


FIGURE 1.

Since the 100 μ A current from the adjustment terminal represents an error term, the LM117 was designed to minimize I_{ADJ} and make it very constant with line and load changes. To do this, all quiescent operating current is returned to the output establishing a minimum load current requirement. If there is insufficient load on the output, the output will rise.

External Capacitors

An input bypass capacitor is recommended. A 0.1 μ F disc or 1 μ F solid tantalum on the input is suitable input bypassing for almost all applications. The device is more sensitive to the absence of input bypassing when adjustment or output capacitors are used but the above values will eliminate the possibility of problems.

The adjustment terminal can be bypassed to ground on the LM117 to improve ripple rejection. This bypass capacitor prevents ripple from being amplified as the output voltage is increased. With a 10 μ F bypass capacitor 80 dB ripple rejection is obtainable at any output level. Increases over 10 μ F do not appreciably improve the ripple rejection at frequencies above 120 Hz. If the bypass capacitor is used, it is sometimes necessary to include protection diodes to prevent the capacitor from discharging through internal low current paths and damaging the device.

In general, the best type of capacitors to use are solid tantalum. Solid tantalum capacitors have low impedance even at high frequencies. Depending upon capacitor construction, it takes about 25 μ F in aluminum electrolytic to equal 1 μ F solid tantalum at high frequencies. Ceramic capacitors are also good at high frequencies; but some types have a large decrease in capacitance at frequencies around 0.5 MHz. For this reason, 0.01 μ F disc may seem to work better than a 0.1 μ F disc as a bypass.

Although the LM117 is stable with no output capacitors, like any feedback circuit, certain values of external capacitance can cause excessive ringing. This occurs with values between 500 pF and 5000 pF. A 1 μ F solid tantalum (or 25 μ F aluminum electrolytic) on the output swamps this effect and insures stability.

Load Regulation

The LM117 is capable of providing extremely good load regulation but a few precautions are needed to obtain maximum performance. The current set resistor connected between the adjustment terminal and the output terminal (usually 240 Ω) should be tied directly to the output of the regulator rather than near the load. This eliminates line drops from appearing effectively in series with the reference and degrading regulation. For example, a 15V regulator with 0.05 Ω resistance between the regulator and load will have a load regulation due to line resistance of 0.05 Ω \times I_L . If the set resistor is connected near the load the effective line resistance will be 0.05 Ω (1 + $R2/R1$) or in this case, 11.5 times worse.

Figure 2 shows the effect of resistance between the regulator and 240 Ω set resistor.

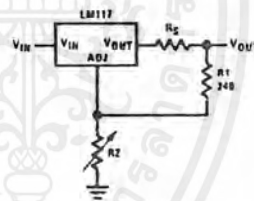


FIGURE 2. Regulator with Line Resistance in Output Lead

With the TO-3 package, it is easy to minimize the resistance from the case to the set resistor, by using two separate leads to the case. However, with the TO-5 package, care should be taken to minimize the wire length of the output lead. The ground of $R2$ can be returned near the ground of the load to provide remote ground sensing and improve load regulation.

Protection Diodes

When external capacitors are used with any IC regulator it is sometimes necessary to add protection diodes to prevent the capacitors from discharging through low current points into the regulator. Most 10 μ F capacitors have low enough internal series resistance to deliver 20A spikes when shorted. Although the surge is short, there is enough energy to damage parts of the IC.

When an output capacitor is connected to a regulator and the input is shorted, the output capacitor will discharge into the output of the regulator. The discharge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Application Hints (cont'd.)

current depends on the value of the capacitor, the output voltage of the regulator, and the rate of decrease of V_{IN} . In the LM117, this discharge path is through a large junction that is able to sustain 15A surge with no problem. This is not true of other types of positive regulators. For output capacitors of 25 μ F or less, there is no need to use diodes.

occurs when *either* the input or output is shorted. Internal to the LM117 is a 50 Ω resistor which limits the peak discharge current. No protection is needed for output voltages of 25V or less and 10 μ F capacitance. *Figure 3* shows an LM117 with protection diodes included for use with outputs greater than 25V and high values of output capacitance.

The bypass capacitor on the adjustment terminal can discharge through a low current junction. Discharge

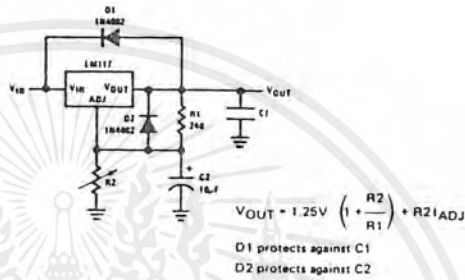
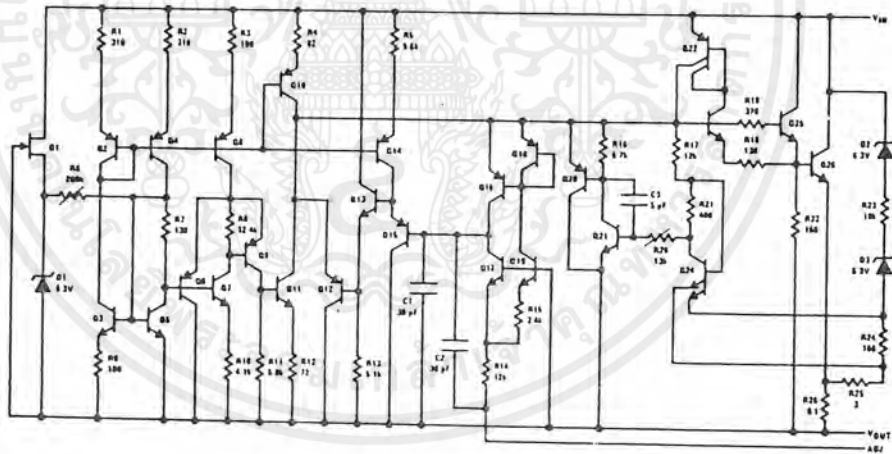


FIGURE 3. Regulator with Protection Diodes

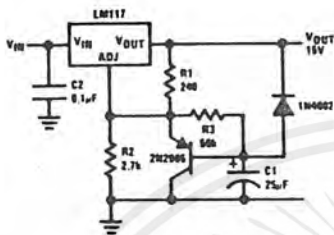
Schematic Diagram



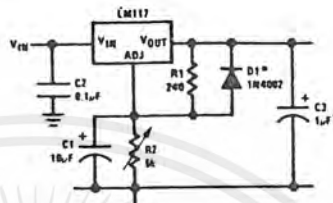
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications (cont'd.)

Slow Turn-On 15V Regulator

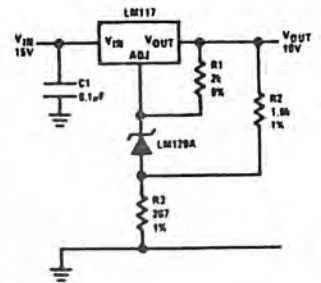


Adjustable Regulator with Improved Ripple Rejection

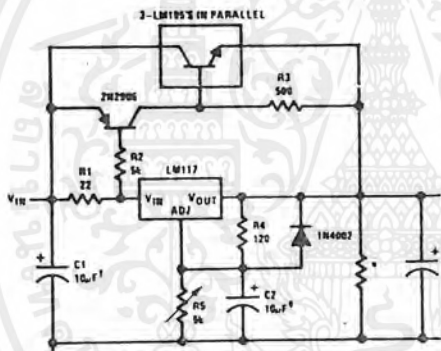


†Solid tantalum
*Discharges C1 if output is shorted to ground

High Stability 10V Regulator

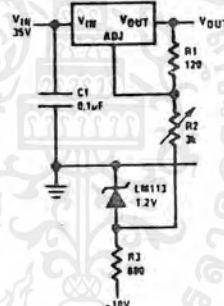


High Current Adjustable Regulator

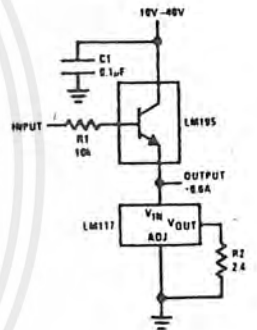


†Solid tantalum
*Minimum load current = 30 mA
‡Optional—improves ripple rejection

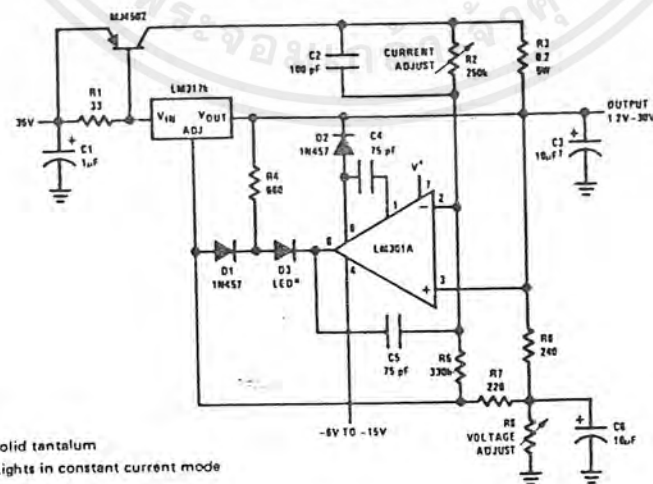
0 to 30V Regulator



Power Follower

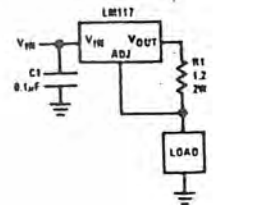


5A Constant Voltage/Constant Current Regulator

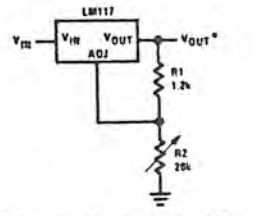


†Solid tantalum
*Lights in constant current mode

1A Current Regulator



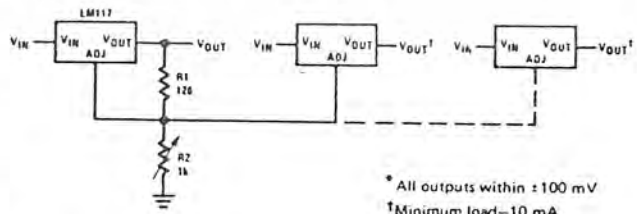
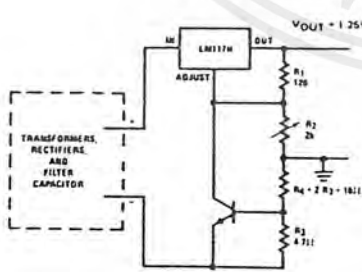
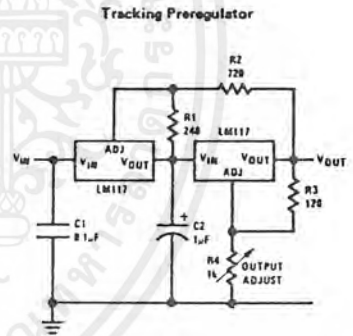
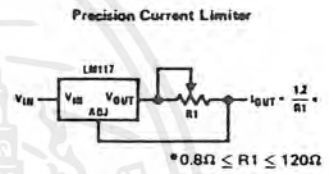
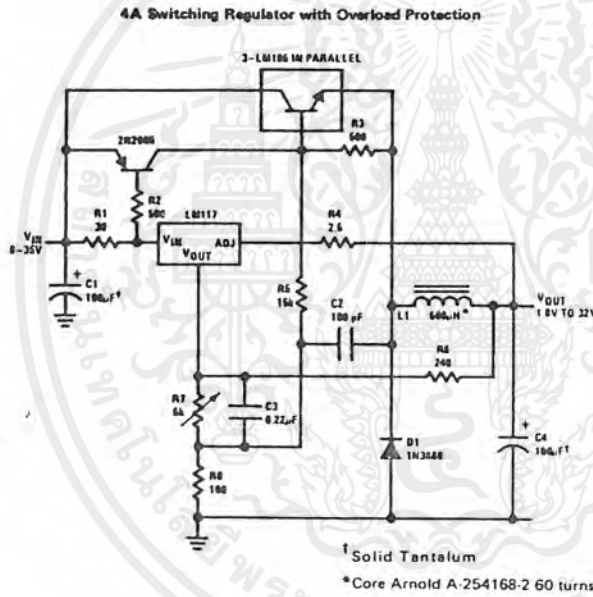
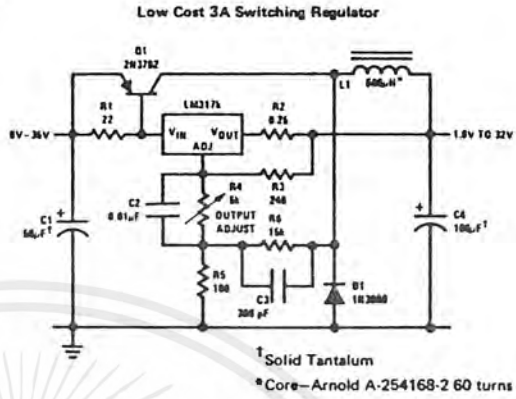
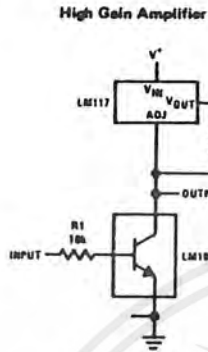
1.2V-20V Regulator with Minimum Program Current



*Minimum load current ~ 4 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications (cont'd.)



- Short circuit current is approximately $\frac{600\text{ mV}}{R3}$, or 120mA (compared to LM117H's 1 ampere current limit)
- (At 50mA output only ¼ volt of drop occurs in $R3$ and $R4$.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.พิชิต ถ้ายอง ที่ได้ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะต่างๆที่เป็นประโยชน์และ คุณพรชัยยศ ศรีปัญญาพงศ์ ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปการะการทดลองและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] TAKASHI KENJO , “Stepping motors and their microprocessor control”,Claren press,Oxford, 1986
- [2] ชาวดี พิชัยรัตน์. “การควบคุมสเตปมอเตอร์แบบวงจรถักโดยใช้หลักการของไมโครสเตป”
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2536



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้