

ศึกษาผลตอบสนองแต่ละสเตปของสเตปปีงมอเตอร์ที่มีการหน่วงกระแสในโหมด
การกระตุ้นแบบเฟสเดียว

STUDY EACH STEP RESPONSE OF STEPPING MOTOR WITH CURRENT
DAMPING IN SINGLE PHASE EXCITATION MODE



นายสราวุฒิ วณิชชานุกร

MR.SARAWUT WANITCHANUKORN



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

พ.ศ.2540

ISBN 974-622-052-7

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

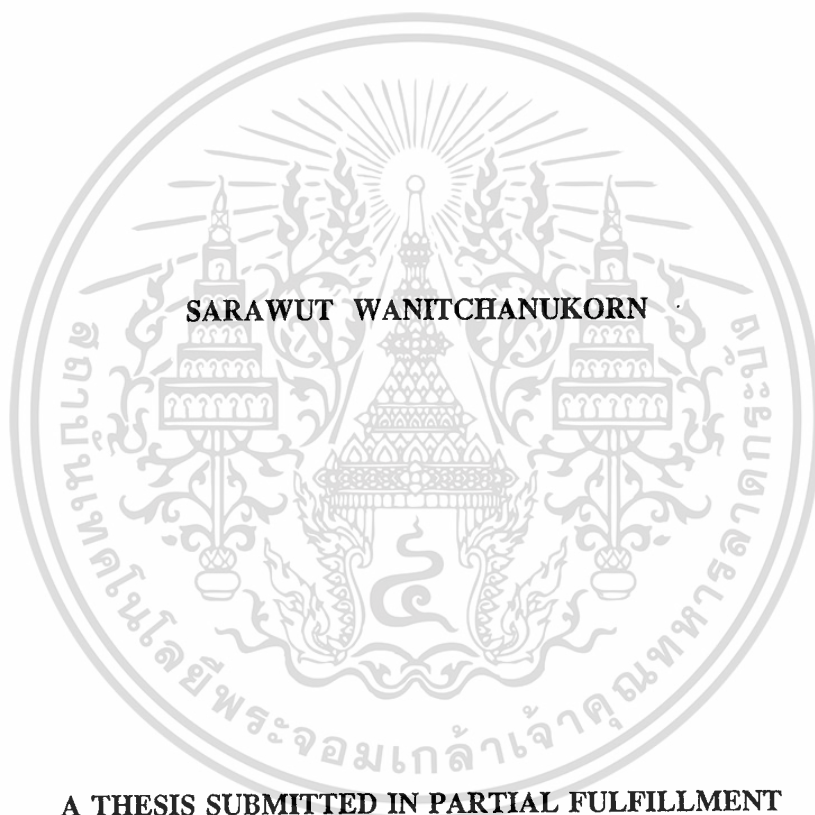
เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....29089

วัน, เดือน, ปี.....18 พ.ย. 2540

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของสถาบันฯ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
โดยไม่ขออนุญาตล่วงหน้า และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**STUDY EACH STEP RESPONSE OF STEPPING MOTOR WITH CURRENT
DAMPING IN SINGLE PHASE EXCITATION MODE**



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

1997

ISBN 974-622-052-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วยลดการสิ้นของตัวโรเตอร์ของสเตรปการเคลื่อนที่ และการเกิดโอเวอร์ชูทลงได้ ถึง 98 เปอร์เซ็นต์ โดยพบว่าผลตอบสนองที่ได้มีลักษณะราบเรียบมากขึ้น ทำให้ค่าของเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวมีค่าน้อยมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title Study Each Step Response of Stepping Motor with
Current Damping in Single Phase Excitation Mode

Student Mr.Sarawut Wanitchanukorn

Thesis Advisor Assoc.Prof.Dr.Yothin Prempraneerach

Level of Study Master of Engineering in Electrical Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Year 1997

ABSTRACT

Now , Stepping motors have been applied in peripheral computer widely such as printers , plotters , teletypes , play and recorded tapes etc. Stepping motors is controlled by sequence excitation digital pulse phases to stepping motor driver circuits easily so that it can make the stepping motors to move in step by step by sequence excited pulses . But happening of single step response from step motions of stepping motors under ordinary condition by excited digital pulses will be appeared overshoots and oscillations of rotor in step motions , settling times are also long . The most application of stepping motors to drive , have desired , step motions are accurate complete stopped at detent or desired position quickly and without overshoots and oscillations of rotor in step motions . The result in excitation digital pulses drive to stepping motor driver circuits previously can not eliminate this problem but also the response has appeared oscillations of rotor. For eliminate this problem to increase damp in this system. So this thesis is presented the new damping technique to drive stepping motors for eliminate overshoots and oscillations of single step response in step motions by current damping technique controlled in each phase excitation. By implement pulse as staircase controls current controlled driver circuits to generate staircase current pulses by microcontroller controlled so that these pulses to drive stepping motors in single phase excitation. The new technique has been found it can reduced

oscillations and the overshoots of rotor 98 % in step motions by more giving the smooth response and settling times have been saved in this system



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความเมตตาจากท่านรองศาสตราจารย์ ดร.โยธิน เปรมปราวณีรัชต์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำปรึกษาและแนะนำแก่ผู้วิจัยตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คุณ ศรีโสภา นิมวิจิตร ที่เอื้อเฟื้ออุปการะกล้องถ่ายรูป คุณ ธนิน ทัพกาญจนะ ที่ช่วยให้คำปรึกษาในเรื่องโปรแกรม และการถ่ายรูป คุณ พิศาล งามเมืองแมน ที่ให้คำปรึกษาในเรื่องโปรแกรม ตลอดจนทุกท่านที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ทนุอดหนุนการทำวิทยานิพนธ์ จากบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สรารุณี วณิชชานุกร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	V
สารบัญตาราง.....	X
สารบัญภาพ.....	XI
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 คำนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์และประโยชน์ ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	2
1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	3
2 สเตปป์มอเตอร์.....	4
2.1 หลักการทำงานของสเตปป์มอเตอร์.....	4
2.2 ประเภทของสเตปป์มอเตอร์.....	6
2.2.1 สเตปป์มอเตอร์ชนิดค่ารีลักแตนซ์แปรค่าได้.....	6
2.2.2 สเตปป์มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร.....	10
2.2.3 สเตปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์.....	12
2.2.4 ลักษณะการพันขดลวดในสเตปป์มอเตอร์.....	14
2.3 คุณลักษณะแรงบิดของสเตปป์มอเตอร์.....	16
2.3.1 คุณลักษณะแรงบิดทางสถิตของสเตปป์มอเตอร์.....	16
2.4 โหมดการขับสเตปป์มอเตอร์.....	17
2.4.1 การขับที่ละเฟส.....	17
2.4.2 การขับที่ละ 2 เฟส.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.4.3 การขับทีละครั้งสเตป.....	20
2.5 วงจรขับ.....	22
2.5.1 วงจรขับแบบยูนิโพลาร์.....	23
2.5.2 วงจรขับแบบไบโพลาร์.....	27
3 ผลตอบสนองสเตปปี้งมอเตอร์กับเทคนิควิธีการหน่วง.....	30
3.1 ผลตอบสนองของสเตปปี้งมอเตอร์.....	30
3.2 เทคนิควิธีการหน่วงของสเตปปี้งมอเตอร์.....	31
3.2.1 การหน่วงแบบกล.....	31
3.2.2 การหน่วงแบบอิเล็กทรอนิกส์.....	35
4 การลดโอเวอร์ชูทของสเตปปี้งมอเตอร์โดยใช้วิธีการหน่วงกระแส.....	43
4.1 บทนำ.....	43
4.2 หลักการของวิธีการหน่วงกระแสและการสร้างสัญญาณควบคุม.....	44
4.3 ส่วนประกอบของระบบควบคุมการหน่วงกระแส.....	48
4.3.1 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCS-51).....	49
4.3.2 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาลอก (DAC).....	50
4.3.3 วงจรควบคุมกระแสและขับกำลังสเตปปี้งมอเตอร์ (V TO I).....	51
4.3.4 ภาคของเอนโคดเดอร์, วงจรนับขึ้น-ลงแบบไบนารีและ วงจรถวายขับผลตอบสนองของสเตปปี้งมอเตอร์.....	52
5 ผลการเลียนแบบและการทดลองเมื่อควบคุมการหน่วงกระแส ให้กับสเตปปี้งมอเตอร์.....	55
5.1 สมการทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของสเตปปี้งมอเตอร์.....	55
5.2 ผลการเลียนแบบผลตอบสนองของสเตปปี้งมอเตอร์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB.....	57
5.2.1 ผลการเลียนแบบเมื่อป้อนพัลส์แบบดิจิตอลพัลส์.....	57
5.2.2 ผลการเลียนแบบเมื่อป้อนพัลส์กระแสเป็นขั้นบันได ด้วยอัตราส่วนตามสมการที่ 4.12 และ 4.13.....	58
5.2.3 ผลการเลียนแบบเมื่อค่า I_d ในช่วงที่คิเลียมี่ค่าเพิ่มขึ้น.....	59
5.2.4 ผลการเลียนแบบเมื่อค่า I_d ในช่วงที่คิเลียมี่ค่าลดลง.....	60
5.2.5 ผลการเลียนแบบเมื่อค่า t_d ในช่วงที่คิเลียมี่ค่ามากขึ้น.....	61
5.2.6 ผลการเลียนแบบเมื่อค่า t_d ในช่วงที่คิเลียมี่ค่าน้อยลง.....	62
5.3 ผลการทดลองผลตอบสนองของสเคปปีงมอเตอร์ โดยการป้อนพัลส์แบบดิจิตอลพัลส์.....	63
5.4 ผลการทดลองผลตอบสนองของสเคปปีงมอเตอร์ โดยใช้การหน่วงกระแสเป็นขั้นบันได.....	64
5.4.1 ผลการทดลองเมื่อป้อนพัลส์กระแสเป็นขั้นบันได ด้วยค่าอัตราส่วนตามสมการที่ 4.12 และ 4.13.....	64
5.4.2 ผลการทดลองเมื่อค่า I_d ในช่วงที่คิเลียมี่ค่าเพิ่มขึ้น.....	65
5.4.3 ผลการทดลองเมื่อค่า I_d ในช่วงที่คิเลียมี่ค่าลดลง.....	66
5.4.4 ผลการทดลองเมื่อค่า t_d ในช่วงที่คิเลียมี่ค่ามากขึ้น.....	67
5.4.5 ผลการทดลองเมื่อค่า t_d ในช่วงที่คิเลียมี่ค่าน้อยลง.....	68
5.5 สรุป.....	69
6 ข้อวิจารณ์ผลการทดลองและแนวทางข้อเสนอแนะ.....	75
6.1 ข้อวิจารณ์ผลการทดลอง.....	75
6.2 แนวทางข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนาต่อไปในอนาคต.....	75

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก ก ภาพถ่ายชิ้นงานส่วนต่างๆของระบบที่ใช้ในงานวิจัย.....	78
ภาคผนวก ข โปรแกรมควบคุมที่ใช้ในการทดลองงานวิจัย.....	84
ภาคผนวก ค บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร วิศวกรรมลาดกระบัง.....	115
ประวัติผู้เขียน.....	129



สารบัญภาพ

	หน้า
2.1 แสดงหลักการทำงานของสเตปป์มอเตอร์.....	5
2.2 แสดงระบบการควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์.....	5
2.3 แสดงโครงสร้างและการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ ชนิดคาร์ลัคแตนซ์แปรค่าได้.....	6
2.4 แสดงตำแหน่งสมดุลเมื่อเฟสที่ 1 เมื่อมอเตอร์ถูกกระตุ้นให้ทำงาน.....	7
2.5 แสดงลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่สร้างแรงบิดขึ้น.....	7
2.6 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เมื่อถูกกระตุ้น จากเฟส 1 ไปยังเฟส 2.....	8
2.7 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เมื่อได้รับการกระตุ้น.....	8
2.8 แสดงการเปรียบเทียบเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในสเตปป์มอเตอร์ แบบแอร์แก๊ปกว้างและแคบ.....	9
2.9 แสดงโครงสร้างของสเตปป์มอเตอร์ชนิดคาร์ลัคแตนซ์แปรค่าได้ ที่มีขนาดสเตป 15 องศา ต่อ สเตป.....	9
2.10 แสดงโครงสร้างของสเตปป์มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร.....	10
2.11 แสดงวงจรขับแบบพื้นฐานของสเตปป์มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร.....	11
2.12 แสดงสเตปป์การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ของสเตปป์มอเตอร์ ชนิดแม่เหล็กถาวร.....	11
2.13 แสดงโครงสร้างของสเตปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์.....	12
2.14 แสดงโครงสร้างแกนโรเตอร์ของสเตปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์.....	13
2.15 แสดงทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กในสเตปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์.....	13
2.16 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กในสเตปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์ ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของโรเตอร์.....	14
2.17 แสดงขดลวดที่พันแบบไปฟิลาาร์.....	15
2.18 แสดงวงจรขับแบบพื้นฐานของสเตปป์มอเตอร์ที่พันขดลวดแบบต่าง ๆ.....	15
2.19 แสดงคุณลักษณะแรงบิดสแตติคของสเตปป์มอเตอร์ขนาด 3 เฟส.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
2.20 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของ โรเตอร์เมื่อควบคุมแบบการขับที่ละเฟส.....	18
2.21 แสดงลักษณะของซีฟีนสเตเตอร์และโรเตอร์เมื่อขับแบบ 2เฟส.....	19
2.22 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของ โรเตอร์เมื่อควบคุมแบบ การขับแบบ 2 เฟส.....	20
2.23 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของตำแหน่งการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ เมื่อขับที่ละเฟสและขับที่ละ 2 เฟส.....	20
2.24 แสดงรูปแบบของการพันขดลวดแบบ ไบพอลาร์.....	21
2.25 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กในขดลวดที่พันแบบ ไบพอลาร์.....	22
2.26 แสดงวงจรขับสเตปป์มอเตอร์แบบยูนิโพลาร์.....	24
2.27 แสดงการปรับปรุงการเพิ่มในวงจรขับ โดยใช้ตัวความต้านทาน.....	25
2.28 แสดงหลักการของการปรับปรุงการเพิ่มกระแสใน วงจรขับแบบแหล่งจ่ายไฟคู่.....	25
2.29 แสดงลักษณะของสัญญาณ โวลเตจและกระแสใน วงจรขับแบบแหล่งจ่ายไฟคู่.....	26
2.30 แสดงวงจรขับชนิดแหล่งจ่ายไฟคู่แบบสำหรับ ขับสเตปป์มอเตอร์ 4 เฟสในแบบ 2เฟส.....	27
2.31 แสดงวงจรขับสเตปป์มอเตอร์แบบไบโพลาร์.....	27
2.32 แสดงวงจรขับแบบบริดจ์.....	29
3.1 แสดงผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์.....	31
3.2 แสดงบล็อก ไดอะแกรมของการต่อตัวหม่่วงแบบแรงหนืดเฉื่อย เข้ากับสเตปป์มอเตอร์.....	32
3.3 แสดงตัวหม่่วงแบบแรงหนืดเฉื่อย.....	32
3.4 แสดงผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์ที่ได้จากการ ใช้ตัวหม่่วงแบบแรงหนืดเฉื่อย.....	33
3.5 แสดงการต่อตัวหม่่วงแบบแรงเสียดทานเฉื่อยเข้ากับสเตปป์มอเตอร์.....	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
3.6 แสดงผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์ที่ได้จากการใช้ ตัวห้วงแบบแรงเสียดทานน้อย.....	34
3.7 แสดงแรงบิดสแตติคกับวิธีการห้วงแบบ แบน-แบน.....	35
3.8 แสดงลำดับสวิทซ์การทำงานของวิธีการห้วงแบบ แบน-แบน.....	36
3.9 แสดงผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์ที่ได้จากการใช้ วิธีการห้วงแบบ แบน-แบน.....	37
3.10 แสดงแรงบิดสแตติคกับวิธีการห้วงแบบคิเลียสเตปสุดท้าย.....	38
3.11 แสดงผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์ที่ใช้ วิธีการห้วงแบบคิเลียสเตปสุดท้าย.....	38
3.12 แสดงลำดับสวิทซ์การทำงานของวิธีการห้วงแบบคิเลียสเตปสุดท้าย.....	39
3.13 แสดงผลตอบสนองแบบสเตปเดียวกับผลตอบสนองแบบหลายสเตป ที่ได้จากการห้วงด้วยวิธีกำหนดช่วงห่างของพัลส์ให้มีค่าคงที่.....	40
3.14 แสดงกราฟของแรงบิดกับมุมการเคลื่อนที่และการประมาณ ค่าแบบเชิงเส้น.....	41
3.15 แสดงกราฟของแรงบิดกับมุมการเคลื่อนที่ ที่สัมพันธ์กับกระแส.....	42
4.1 แสดงผลตอบสนองโดยทั่วไปของสเตปป์มอเตอร์.....	44
4.2 แสดงกราฟคุณลักษณะของแรงบิด $T-\theta$ ที่ได้จากการป้อนกระแส แบบดิจิตอลพัลส์.....	44
4.3 แสดงสัญญาณควบคุมแบบโวลเตจและกระแสที่เป็นขั้นบันได.....	46
4.4 แสดงสัญญาณโวลเตจควบคุมแบบขั้นบันไดที่สร้างขึ้นใช้ในการทดลอง.....	49
4.5 แสดงบล็อก ไดอะแกรมของระบบการห้วงกระแสที่ออกแบบขึ้น.....	49
4.6 แสดงบล็อก ไดอะแกรมของวงจร ไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCS-51).....	49
4.7 แสดงบล็อก ไดอะแกรมของวงจร DAC เมื่อเชื่อมต่อกับวงจร V TO I.....	50
4.8 แสดงวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก.....	50
4.9 แสดงวงจรภาคควบคุมกระแสและขับกำลัง.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
4.10 แสดงบล็อกไดอะแกรมของภาคเอนโคเดอร์, วงจรนับขึ้น-ลง แบบไบนารี และวงจรตรวจจับผลตอบสนองของสเตปปีงมอเตอร์.....	53
4.11 แสดงวงจรมอเตอร์นับขึ้น-ลง แบบไบนารี ขนาด 16 บิต.....	54
4.12 แสดงวงจรภาคเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก แบบ R-2R LADDER.....	54
5.1 แสดงผลการเขียนแบบสัญญาณควบคุมแบบดิจิทัลพัลส์.....	57
5.2 แสดงผลการเขียนแบบผลตอบสนองของสเตปปีงมอเตอร์ที่ได้จากการป้อนพัลส์แบบดิจิทัลพัลส์.....	57
5.3 แสดงผลการเขียนแบบสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันไดที่ค่ากระแสและเวลาเป็นไปตามสมการที่ 4.13 และ 4.14.....	58
5.4 แสดงผลการเขียนแบบผลตอบสนองของสเตปปีงมอเตอร์ที่ได้จากการป้อนสัญญาณแบบขั้นบันไดของรูปที่ 5.3.....	58
5.5 แสดงผลการเขียนแบบสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันไดที่ค่า I_d ในช่วงคี่เลขมีค่าเพิ่มขึ้น.....	59
5.6 แสดงผลการเขียนแบบผลตอบสนองของสเตปปีงมอเตอร์ที่ค่า I_d ในช่วงเวลาที่คี่เลขมีค่าเพิ่มขึ้น.....	59
5.7 แสดงผลการเขียนแบบสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันไดที่ค่า I_d ในช่วงคี่เลขมีค่าลดลง.....	60
5.8 แสดงผลการเขียนแบบผลตอบสนองของสเตปปีงมอเตอร์ที่ค่า I_d ในช่วงเวลาที่คี่เลขมีค่าลดลง.....	60
5.9 แสดงผลการเขียนแบบสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันไดที่ค่า i_d ในช่วงคี่เลขมีค่ามากขึ้น.....	61
5.10 แสดงผลการเขียนแบบผลตอบสนองของสเตปปีงมอเตอร์ที่ค่า i_d ในช่วงเวลาที่คี่เลขมีค่ามากขึ้น.....	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
5.11 แสดงผลการเขียนแบบสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันไดที่ค่า t_d ในช่วงที่เสถียรมีค่าน้อยลง.....	62
5.12 แสดงผลการจำลองผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์ที่ค่า t_d ในช่วงเวลาเสถียรมีค่าน้อยลง.....	62
5.13 แสดงสัญญาณควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบคิจิตอลพัลส์.....	63
5.14 แสดงผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์ที่เกิดจากการป้อนสัญญาณแบบคิจิตอลพัลส์.....	63
5.15 แสดงสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันไดที่ให้ค่าสัดส่วนของกระแสและเวลาที่เสถียรตามสมการที่ 4.13 และ 4.14.....	64
5.16 แสดงผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์ที่เกิดจากการป้อนสัญญาณแบบขั้นบันไดของรูปที่ 5.15.....	64
5.17 แสดงสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันไดที่ค่า I_d ในช่วงที่เสถียรมีค่าเพิ่มขึ้น.....	65
5.18 แสดงผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์ที่ได้จากการป้อนสัญญาณแบบขั้นบันไดที่ค่า I_d มีค่าเพิ่มขึ้น.....	65
5.19 แสดงสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันไดที่ค่า I_d ในช่วงที่เสถียรมีค่าลดลง.....	66
5.20 แสดงผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์ที่ได้จากการป้อนสัญญาณแบบขั้นบันไดที่ค่า I_d มีค่าลดลง.....	66
5.21 แสดงสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันไดที่ค่า t_d ในช่วงที่เสถียรมีค่ามากขึ้น.....	67
5.22 แสดงผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์ที่ได้จากการป้อนสัญญาณแบบขั้นบันไดที่ค่า t_d มีค่ามากขึ้น.....	67

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

5.23 แสดงสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันไดที่ค่า t_d ในช่วงที่ติลล์มีค่าน้อยลง.....	68
5.24 แสดงผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์ที่ได้จากการป้อนสัญญาณแบบขั้นบันไดที่ค่า t_d มีค่าน้อยลง.....	68
5.25 แสดงกราฟค่าโอเวอร์ชูทของผลตอบสนองแต่ละแบบ.....	73
5.26 แสดงกราฟค่าเปอร์เซ็นต์โอเวอร์ชูทของผลตอบสนองแต่ละแบบ.....	73
5.27 แสดงกราฟค่าเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวของผลตอบสนองแต่ละแบบ.....	74
ก.1 แสดงชุดระบบทดลองโดยรวมที่ใช้ในงานวิจัย.....	79
ก.2 แสดงส่วนของวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCS-51).....	79
ก.3 แสดงส่วนของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก (DAC).....	80
ก.4 แสดงส่วนการเชื่อมต่อระหว่างวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCS-51) กับวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก (DAC).....	80
ก.5 แสดงส่วนของวงจรแปลงโวลเตจเป็นกระแส (V TO I) และภาคขับกำลังสเตปป์มอเตอร์.....	81
ก.6 แสดงส่วนการเชื่อมต่อระหว่างวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก (DAC) กับวงจรแปลงโวลเตจเป็นกระแส (V TO I) และภาคขับกำลังสเตปป์มอเตอร์.....	81
ก.7 แสดงส่วนของวงจรมอเตอร์ขึ้น-ลงแบบไบนารี.....	82
ก.8 แสดงส่วนของวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก แบบ R-2R LADDER	82
ก.9 แสดงส่วนของสเตปป์มอเตอร์และออปติคัลเอนโคเดอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	83
ข.1 แผนภูมิแสดงโฟลวชาร์ทของโปรแกรมควบคุมที่ใช้สำหรับการหน่วงกระแส.....	85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 คำนำ

สเตปป์มอเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับการกระตุ้นทางแม่เหล็กไฟฟ้าให้เกิดการเคลื่อนที่เป็นสเตป โดยจะทำการเปลี่ยนสัญญาณพัลส์อินพุตแบบดิจิทัลไปเป็นการเคลื่อนที่ของแกนโรเตอร์ สำหรับการเคลื่อนที่ของแกนโรเตอร์ของสเตปป์มอเตอร์นั้น จะเคลื่อนที่เป็นจำนวนสเตปที่เท่ากับจำนวนสัญญาณพัลส์อินพุตที่ป้อนให้ ดังนั้นจึงได้มีการนำสเตปป์มอเตอร์ไปประยุกต์ใช้งานกันอย่างมากมาย ในระบบการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ ปัจจุบันอุปกรณ์ส่วนประกอบที่เกี่ยวข้องกับคอมพิวเตอร์ได้มีการนำสเตปป์มอเตอร์เข้าไปประยุกต์ใช้งานมากมาย เช่น เครื่องพิมพ์ , เครื่องอ่านและบันทึกเทป , เครื่องพล็อตเตอร์ , เครื่องอ่านแผ่นดิสก์ , เครื่องอ่านกระดาษ , เครื่องเจาะแผ่นปริ้นท์ และ อื่นๆ [1],[2]

ปัจจุบันไมโครโปรเซสเซอร์ได้เข้ามามีบทบาทในอุปกรณ์และเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์แทบทุกชนิด แต่จากการที่สเตปป์มอเตอร์ถูกควบคุมการทำงานโดยใช้การกระตุ้นด้วยสัญญาณแบบดิจิทัลนั้น จึงทำให้มีการนำไมโครโปรเซสเซอร์เข้ามาควบคุมการทำงานร่วมกับวงจรจับเพื่อใช้ควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ [1] ข้อดีของสเตปป์มอเตอร์ก็คือ ตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาดจะไม่ถูกสะสม , ไม่จำเป็นต้องมีการป้อนกลับ สะดวกและง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน เพียงแค่ทำการต่อวงจรจับให้กับในแต่ละเฟสของสเตปป์มอเตอร์ แล้วทำการป้อนดิจิทัลพัลส์ เรียงตามเฟสจากไมโครโปรเซสเซอร์หรือวงจรถอดจิกซีควเอนเซอร์ ก็สามารถควบคุมการทำงานให้กับสเตปป์มอเตอร์สามารถเคลื่อนที่เป็นสเตปไปตามจังหวะของการป้อนสัญญาณพัลส์อินพุตนั้นได้ แต่ปัญหาที่พบจากการจับสเตปป์มอเตอร์ด้วยวงจรจับสเตปป์มอเตอร์ที่ถูกควบคุมการจ่ายกระแสด้วยจังหวะของสัญญาณดิจิทัลพัลส์ ก็คือ ผลตอบสนองที่เกิดจาก สเตปป์การเคลื่อนที่ในแต่ละสเตปที่ต่อเนื่องกันไปนั้น จะเกิดการสั่นหรือออสซิลเลทของตัวโรเตอร์ในสเตปป์การเคลื่อนที่ ซึ่งยังผลให้เกิดโอเวอร์ชูทของสเตปป์การเคลื่อนที่ขึ้น ดังนั้นในการแก้ปัญหาเรื่องการสั่นตัวของโรเตอร์ในสเตปป์การเคลื่อนที่ ดังกล่าวก็คือ การเพิ่มการหน่วง (damping method) เข้าไปในระบบหรือที่ตัวสเตปป์มอเตอร์ ที่นำไปใช้งาน [2],[3] ซึ่งการหน่วงก็มีด้วยกัน 2 แบบ คือ การหน่วงแบบกลและแบบอิเล็กทรอนิกส์ การหน่วงแบบกลก็มี

ด้วยกันหลายแบบ เช่น การหน่วงด้วยตัวหน่วงแบบแรงหนืด , การหน่วงด้วยตัวหน่วงแบบแรงเสียดทาน และอื่นๆ ส่วนแต่มีข้อจำกัดไม่สะดวกต่อในการนำไปใช้งานรวมถึงไม่สามารถลดการสั่นและโอเวอร์ชูทลงได้หมด ส่วนการหน่วงแบบอิเล็กทรอนิกส์ก็มีด้วยกันหลายแบบ เช่น การหน่วงแบบแวง-แวง แต่วิธีการหน่วงนี้ก็มีข้อจำกัดของการนำไปใช้งาน คือ ต้องย้อนกลับไปกระตุ้นเฟสก่อนหน้าในที่เพิ่งจะหยุดการทำงาน แล้วต้องกลับมากระตุ้นเฟสปัจจุบันอีกครั้ง ซึ่งไม่สะดวกในการควบคุม, การหน่วงแบบดีเลย์สเตปสุดท้าย ก็มีข้อจำกัดเช่นกัน ไม่สามารถให้ผลตอบสนองแบบสเตปเดียวเพราะว่าต้องกระตุ้นเฟสของสเตปปีงมอเตอร์แบบต่อเนื่องติดกันสามสเตปจึงจะได้ผลตอบสนองแบบสามสเตปที่สามารถลดโอเวอร์ชูทลงได้ ซึ่งหลักการทำงานของวิธีดังกล่าวข้างต้นจะกล่าวอยู่ในบทที่ 3 , [3]

จากปัญหาการขับสเตปปีงมอเตอร์ด้วยวงจรขับสเตปปีงมอเตอร์แบบที่ถูกควบคุมการจ่ายกระแสด้วยจังหวะของสัญญาณดิจิทัล ทำให้เกิดการสั่นและโอเวอร์ชูทของตัวโรเตอร์ในสเตปการเคลื่อนที่ ซึ่งผลตอบสนองที่ได้จากการขับแบบนี้จะมีค่าเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ยาวมาก เป็นผลทำให้สเตปปีงมอเตอร์ทำงานได้ช้าลง ด้วยความเร็วที่ต่ำ [4] ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอวิธีการหน่วงแบบใหม่ เพื่อนำไปใช้ขับสเตปปีงมอเตอร์เพื่อลดการสั่นของสเตปการเคลื่อนที่เมื่อโหลดมีค่าคงที่ โดยใช้หลักการของการหน่วงกระแสที่ป้อนให้กับสเตปปีงมอเตอร์ในแต่ละเฟส โดยทำการสร้างสัญญาณพัลส์เป็นขั้นบันไดไปควบคุมวงจรขับแบบควบคุมกระแสเพื่อให้ได้พัลส์กระแสเป็นขั้นบันได โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมการทำงาน แล้วจึงนำไปใช้ในการขับสเตปปีงมอเตอร์ในโหมดการกระตุ้นแบบเฟสเดียว ซึ่งพบว่า การหน่วงด้วยวิธีการดังกล่าวนี้สามารถช่วยลดการสั่นของตัวโรเตอร์ของสเตปการเคลื่อนที่ และการเกิดโอเวอร์ชูทลงได้ ถึง 98 เปอร์เซ็นต์ โดยพบว่าผลตอบสนองที่ได้มีลักษณะราบเรียบมากขึ้น ทำให้ค่าของเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวมีค่าน้อยมาก

1.2 วัตถุประสงค์และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

จากการที่สเตปปีงมอเตอร์ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น เครื่องพิมพ์ , เครื่องพล็อตเตอร์ , เครื่องเทเลไทป์ ถ้าหากมีการนำสเตปปีงมอเตอร์ไปประยุกต์ใช้ในการขับเคลื่อนของเครื่องพิมพ์ หรือ พล็อตเตอร์ ความเร็วของเครื่องในการพิมพ์ตัวอักษร แต่ละตัว จะถูกจำกัดด้วยปัญหาการเกิดการสั่นและโอเวอร์ชูทของตัวโรเตอร์ในสเตปการเคลื่อนที่ [4] ดังนั้น การที่จะเพิ่มความเร็วของเครื่องในการพิมพ์ตัวอักษร เหล่านี้ก็คือ การลดการสั่นและโอเวอร์ชูท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของตัวแกนโรเตอร์ลงให้หมด ถ้ามีการนำการขับเคลื่อนปั๊มมอเตอร์แบบควบคุมการหมุนกระแส
นี้มาประยุกต์ใช้งาน ซึ่งจะสามารถช่วยเพิ่มความเร็วของเครื่องในการพิมพ์ตัวอักษรตัวอักษรได้
ให้ค่าเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวมีค่าน้อยลง

1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของปัญหาที่เกิดจากการขับเคลื่อนปั๊มมอเตอร์แบบทั่วไปรวม
ถึงวัตถุประสงค์และประโยชน์ที่จะได้รับการวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงพื้นฐานหลักการทำงาน, โครงสร้างและวงจรขับเคลื่อนปั๊มมอเตอร์ รวมถึง
ประเภทของสเตรปปั๊มมอเตอร์ชนิดต่างๆ

บทที่ 3 กล่าวถึงเทคนิคการออกแบบกลและแบบอิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆที่นำมาใช้
กับสเตรปปั๊มมอเตอร์และข้อจำกัดของการนำไปใช้งาน

บทที่ 4 กล่าวถึงหลักการและการสร้างสัญญาณควบคุมของวิธีการขับเคลื่อนแบบหมุนกระแส
รวมถึงส่วนประกอบของวงจรระบบการหมุนกระแสที่ได้รับการออกแบบขึ้นและใช้ในการ
ทดลอง

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการเขียนแบบการทำงานโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB
และผลการทดลองที่ได้จากการขับเคลื่อนปั๊มมอเตอร์โดยใช้วิธีการขับเคลื่อนแบบหมุนกระแส รวมถึง
บทสรุปของผลการเขียนแบบและผลการทดลอง

บทที่ 6 กล่าวถึงข้อเสนอแนะและแนวทางวิธีการพัฒนาต่อไปในอนาคต

ภาคผนวก ประกอบไปด้วย ภาพถ่ายแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและโปรแกรมที่
ใช้ในการทดลอง

บทที่ 2

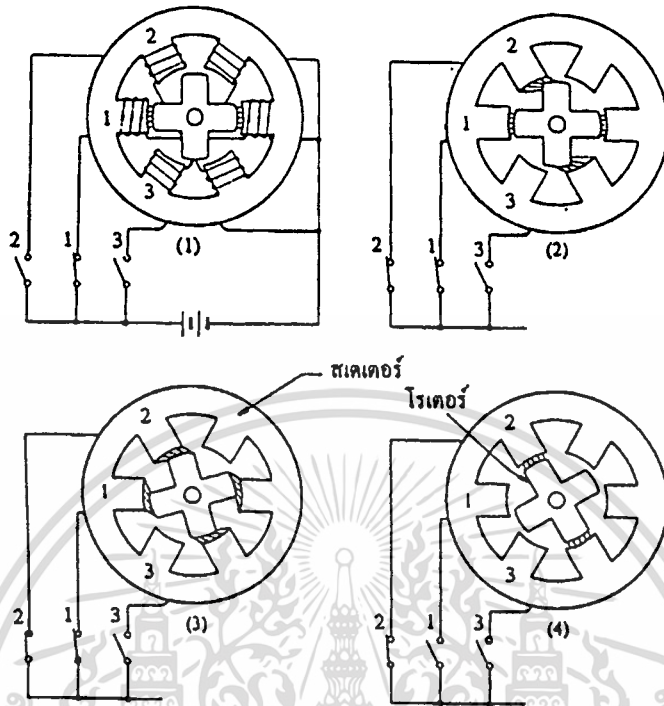
สเตปป์มอเตอร์

สเตปป์มอเตอร์เปรียบเสมือนทรานสดิวเซอร์ (transducer) ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานเชิงกล ซึ่งมีอินพุทเป็นกลุ่มของแรงดันไบนารี และเอาต์พุทเป็นลักษณะของการเคลื่อนที่เชิงมุมเป็นสเตปป์ที่สามารถกำหนดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของการหมุนได้อย่างเที่ยงตรงแน่นอนง่ายต่อการควบคุมการทำงาน หรือประยุกต์ จากลักษณะดังกล่าวสเตปป์มอเตอร์จึงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานต่างๆ เช่น ในระบบการป้องกันกระดาศ และกำหนดช่วงห่างของบรรทัดในระบบเครื่องพิมพ์ใช้ในระบบของเครื่อง x-y ของพล็อตเตอร์ ชุดขับเคลื่อนจักรกลที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ หุ่นยนต์ ฯลฯ [1]

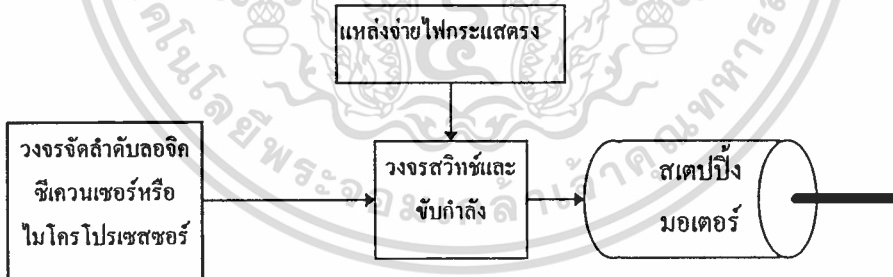
2.1 หลักการทำงานของสเตปป์มอเตอร์

ในรูปที่ 2.1 แสดงหลักการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ ซึ่งมีสเตเตอร์ที่มีซี่ฟันจำนวน 6 ซี่ฟันและมีโรเตอร์ที่มีจำนวนซี่ฟันเท่ากับ 4 ซึ่งทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์ทำจากเหล็กอ่อน (soft steel) มีชุดของขดลวดซึ่งมีลักษณะดังในรูป แต่ละชุดประกอบไปด้วยขดลวด 2 ชุด ที่ต่ออนุกรมกัน แต่ละชุดของขดลวดเรียกว่า “เฟส” (phase) ในรูปนี้เป็นสเตปป์มอเตอร์ชนิด 3 เฟส กระแสถูกจ่ายให้กับขดลวดทั้งสามเฟสด้วยสวิทช์ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ในสภาวะแรกจ่ายกระแสผ่านสวิทช์ที่ 1 ไปยังขดลวดเฟสที่ 1 หรือเป็นการกระตุ้นเฟสที่ 1 จะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กในแอร์แก๊ป (air-gap) ดังแสดงตามทิศทางของลูกศรในรูปในสภาวะ (1) ซี่ฟัน 2 ซี่ฟันของตัวสเตเตอร์ของเฟสที่ 1 ตรงกับซี่ฟันของโรเตอร์ 2 ซี่ฟัน ณ ตำแหน่งเรียกว่า “สภาวะสมดุล” (equilibrium state) เมื่อสวิทช์ที่ 2 ปิด เพื่อกระตุ้นเฟสที่ 2 เพิ่มเข้าไป เส้นแรงแม่เหล็กจะเกิดที่ซี่ฟันของสเตเตอร์ของเฟสที่ 2 ในลักษณะดังแสดงในสภาวะ(2) และโรเตอร์จะเคลื่อนที่ด้วยแรงบิดที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กจากการกระตุ้นเฟสที่ 2 ซึ่งได้แสดงได้ดังสภาวะ (3)

ดังนั้นการเคลื่อนที่ของโรเตอร์จะมีลักษณะเป็นสเตปป์ด้วยมุมที่แน่นอน ในกรณีนี้จะเป็น 15 องศาต่อสเตปป์ เมื่อเอาสวิทช์ที่ 1 ออก หรือเป็นการหยุดกระตุ้นเฟสที่ 1 โรเตอร์จะเคลื่อนที่ไปอีก 15 องศาดังสภาวะที่ (4)



รูปที่ 2.1 แสดงหลักการทำงานของสเต็ปป์มอเตอร์



รูปที่ 2.2 แสดงระบบการควบคุมการขับเคลื่อนสเต็ปป์มอเตอร์

ทุกวันนี้อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ถูกจ่ายกระแสให้แก่สเต็ปป์มอเตอร์และสัญญาณที่ใช้ควบคุมการสวิตช์ก็ได้จากอุปกรณ์ดิจิทัลไอซี หรือไมโครโปรเซสเซอร์ ซึ่งสะดวกต่อการควบคุมสเต็ปป์มอเตอร์ ดังแสดงหลักการควบคุมสเต็ปป์มอเตอร์ในรูปที่ 2.2 จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าสเต็ปป์มอเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าทางดิจิทัลเป็นการเคลื่อนที่ทางเชิงกล ซึ่งสาเหตุที่ทำให้สเต็ปป์มอเตอร์มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากข้อดีดังต่อไปนี้ [1],[4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

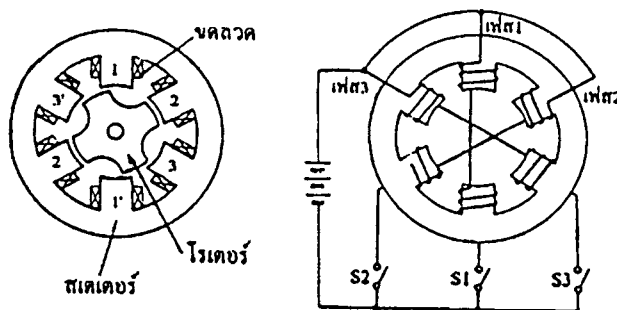
1. โดยปกติจะไม่ต้องการส่วนป้อนกลับของสัญญาณเพื่อควบคุมตำแหน่งหรือความเร็ว ทำให้วงจรที่ใช้ควบคุมต้นทุนต่ำ .
2. ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเคลื่อนที่ จะไม่สะสมหรือเพิ่มขึ้น
3. สเตปป์มอเตอร์สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์ดิจิทัลและคอมพิวเตอร์ได้อย่างสมบูรณ์

2.2 ประเภทของสเตปป์มอเตอร์

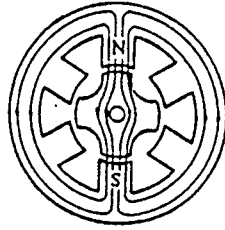
สเตปป์มอเตอร์สามารถแบ่งออกได้หลายประเภทตามลักษณะของ โครงสร้างและการทำงานได้ดังนี้

2.2.1 สเตปป์มอเตอร์ชนิดคาร์รีล็คแดนซ์แปรค่าได้ (variable reluctance stepping motor)

สเตปป์มอเตอร์ชนิดคาร์รีล็คแดนซ์แปรค่าได้ เป็นสเตปป์มอเตอร์ที่มีลักษณะการทำงานที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจมากที่สุด หลักการทำงานในรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นตัวอย่างของสเตปป์มอเตอร์ แบบ 3 เฟสซึ่งมีจำนวนซี่ฟันสเตเตอร์เท่ากับ 6 ซี่ฟัน แต่ละคู่ของซี่ฟันที่อยู่ตรงกันข้ามจะเป็นเฟสเดียวกันเนื่องจากมีขดลวดขดเดียวกันพันอยู่ในลักษณะต่ออนุกรม ส่วนโรเตอร์จะมีจำนวนฟันเท่ากับ 4 แกนของโรเตอร์และสเตเตอร์ ปกติแล้วจะทำจากแผ่นเหล็กบางๆที่มีส่วนผสมของซิลิคอน(laminate silicon steel) แต่โรเตอร์ที่ทำจากแท่งซิลิคอนจะเป็นที่นิยมใช้กันมากกว่าวัสดุที่ใช้ทำโรเตอร์และสเตเตอร์จะต้องมีค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (permeability) และเส้นแรงแม่เหล็ก(magnitic flux)สามารถผ่านได้ง่าย เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก (magnetomotive force) สูงสุด

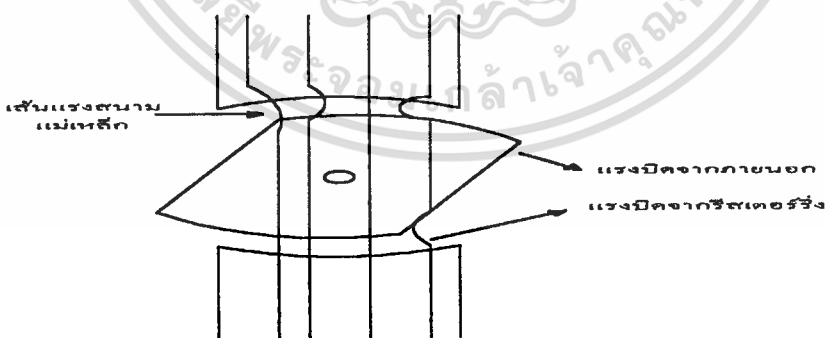


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะที่องค์กรศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจากรั้วองค์กรไปเผยแพร่ในที่สาธารณะ การค้าไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงตำแหน่งสมดุลของเฟสที่ 1 เมื่อมอเตอร์ถูกกระตุ้นให้ทำงาน

ในรูปที่ 2.3 สมมติให้ซี่ฟันแต่ละคู่ของสเตเตอร์มีขั้วที่ตรงกันข้ามคือ ซี่ฟัน 1,2 และ 3 เป็นขั้วเหนือ และซี่ฟัน 1' 2' และ 3' เป็นขั้วใต้ เมื่อแต่ละเฟสถูกกระตุ้นให้ทำงานกระแสในแต่ละเฟสจะถูกควบคุมด้วยลำดับของการปิดหรือเปิดสวิตช์ ถ้ากระแสถูกจ่ายให้กับขดลวดเฟสที่ 1 เส้นแรงแม่เหล็กจะเกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยซี่ฟันโรเตอร์คู่หนึ่งจะมีตำแหน่งตรงกับซี่ฟัน 1 และ 1' ของสเตเตอร์ ณ ตำแหน่งนี้ค่าความต้านทานแม่เหล็ก (magnetic reluctance) จะมีค่าต่ำสุดเรียกว่า “ตำแหน่งสมดุล” และจะเกิดแรงบิดขึ้นต้านทานแรงจากภายนอกเรียกว่า “แรงบิดรีสตอริง” (restoring torque) ดังมีลักษณะในรูปที่ 2.5 ในรูปนี้แรงจากภายนอกมีทิศทางตามเข็มนาฬิกาทำให้โรเตอร์เคลื่อนที่ไปในทิศทางดังกล่าว และแรงบิดรีสตอริงจะมีทิศทางเข็มนาฬิกา



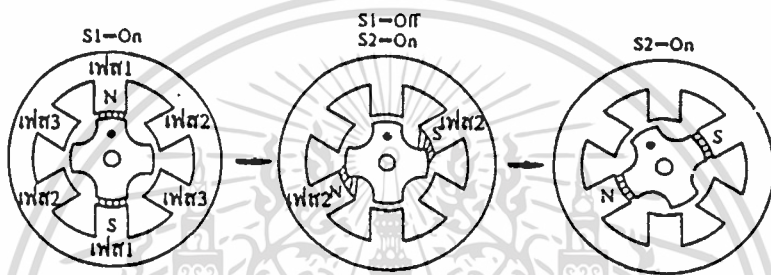
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่สร้างแรงบิด

ตรงกันข้ามกับแรงจากภายนอกเพื่อให้ตำแหน่งของโรเตอร์ตรงกับตำแหน่งของซี่ฟันของสเตเตอร์มากที่สุดขณะที่ตำแหน่งของซี่ฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์เบี่ยงเบนไปจากตำแหน่งสมดุลของเฟสที่กำลังถูกกระตุ้นค่าความต้านทานของแม่เหล็กจะมีค่าสูง ในรูปที่ 2.6 แสดงลักษณะการ

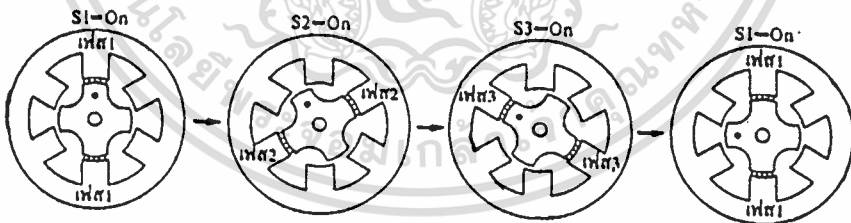
เอกสารนี้เป็นเอกสารหนึ่งวันเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่ของโรเตอร์ขณะที่เฟสที่ 1 ถูกเปิดออก และเฟสที่ 2 ถูกจ่ายกระแสเข้ามา ค่าความต้านทานแม่เหล็กของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นทันทีทำให้โรเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกาด้วยมุม 30 องศา และที่ตำแหน่งนี้ค่าความต้านทานแม่เหล็กก็จะมีค่าที่ต่ำสุด การเคลื่อนที่ในลักษณะดังกล่าวนี้ ในแต่ละครั้งของการกระตุ้นแต่ละเฟสเรียกว่า “สเตป” ดังนั้นถ้าเราจัดลำดับการจ่ายกระแสให้แต่ละเฟสของมอเตอร์ดังนี้ 1,2,3 และ 1 แล้ว ลักษณะการเคลื่อนที่ของโรเตอร์จะเคลื่อนกลับมายังตำแหน่งเริ่มต้นดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 แสดงการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เมื่อถูกกระตุ้นจากเฟส 1 ไปสู่เฟส 2

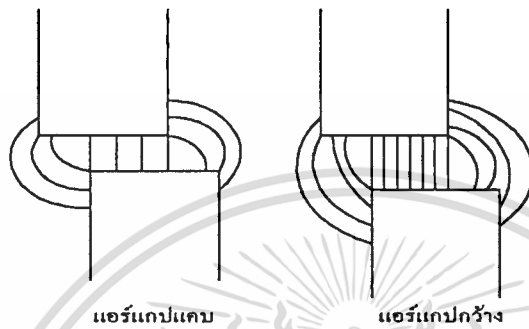


รูปที่ 2.7 แสดงการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เมื่อได้รับการกระตุ้น

ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของสเตปปิ้งมอเตอร์ชนิดคาร์ลิกแดนซ์แปรค่าได้ช่องว่างหรือ แอร์แก๊ป ควรแคบที่สุด ช่องว่างระหว่างซี่ฟันของสเตเตอร์และโรเตอร์ในสเตปปิ้งมอเตอร์จะต้องแคบที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้เกิดแรงบิดที่มีค่าสูงและตำแหน่งของโรเตอร์มีความเที่ยงตรงสูง ในรูปที่ 2.8 เปรียบเทียบเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างสเตปปิ้งมอเตอร์ที่มีแอร์

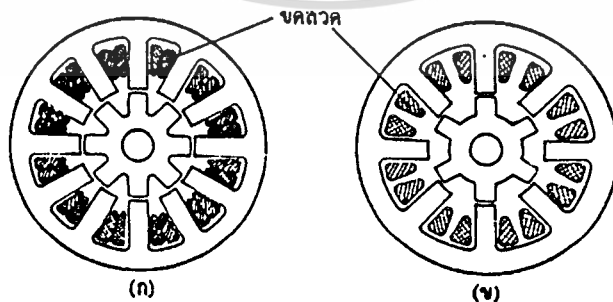
เอกสารถ่ายเป็นเอกสารนี้ขึ้นอยู่ภายใต้การควบคุมและดูแลของสำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ ณ นครเชียงใหม่ การคัดลอกหรือการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับความยินยอมจากสำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ ณ นครเชียงใหม่ จะถือว่าผิดกฎหมาย

สูงกว่าแอร์เก็บที่กว้าง นั้นหมายความว่า แรงบิดที่ได้จะสูงกว่าด้วย และผลที่ตามมาก็คือ ความเที่ยงตรงของโรเตอร์ก็จะสูงตามขึ้นไปด้วยโดยทั่วไปขนาดของแอร์เก็บจะมีค่าประมาณ 30 ถึง 100 ไมโครเมตรในสเตปป์ึงมอเตอร์ประเภทขนาดสเตปป์เล็ก [1]



รูปที่ 2.8 แสดงการเปรียบเทียบเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในสเตปป์ึงมอเตอร์แบบแอร์เก็บแคบและกว้าง

ในรูปที่ 2.9 (ก) แสดงโครงสร้างของสเตปป์ึงมอเตอร์ชนิดคาร์ลัคแตนซ์แปรค่าได้ ที่มีขนาดสเตปป์เล็กลงอีก คือเท่ากับ 15 องศาต่อสเตปป์ชนิด 3 เฟส มีซี่ฟันของสเตเตอร์จำนวน 12 ซี่ฟัน และโรเตอร์จำนวน 8 ซี่ฟันและรูปที่ 2.9 (ข) ชนิด 4 เฟส ซึ่งมีซี่ฟันของสเตเตอร์จำนวน 8 ซี่ฟัน และโรเตอร์ 6 ซี่ฟัน และมีขนาดสเตปป์เท่ากับ 15 องศาต่อสเตปป์เช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของสเตปป์ึงมอเตอร์ชนิดคาร์ลัคแตนซ์แปรค่าได้ที่มี

ขนาดสเตปป์ 15 องศาต่อสเตปป์ (ก) ชนิด 3 เฟส (ข) ชนิด 4 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

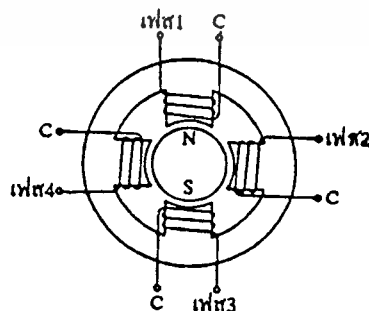
ความสัมพันธ์ของขนาดมุมสเตป (θ_s) , จำนวนเฟส (m) , จำนวนซี่ฟันของโรเตอร์ (N_r) และจำนวนสเตป (S) กำหนดได้จากสมการต่อไปนี้

$$S = 360/\theta_s = mN_r \quad 2.1$$

จากสมการข้างบนจะเห็นว่า เพื่อที่จะลดขนาดของสเตป θ_s จะต้องเพิ่มจำนวนซี่ฟันของโรเตอร์ให้สูงขึ้น แต่ถ้าต้องเพิ่มจำนวนซี่ฟันของโรเตอร์ให้สูงขึ้นจำนวนซี่ฟันของสเตเตอร์ก็จะต้องเพิ่มตามขึ้นด้วย ดังหลักการที่อธิบายผ่านมา [1]

2.2.2 สเตปปีงมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร (permanent magnet stepping motor หรือ PM stepping motor)

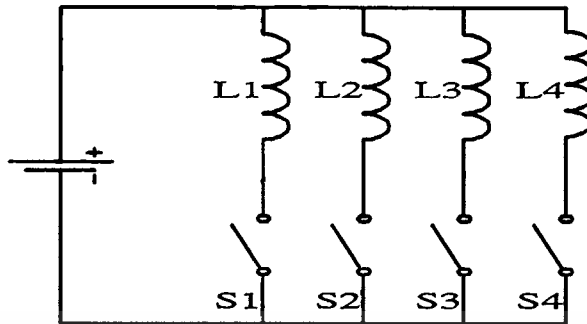
สเตปปีงมอเตอร์บางประเภทโรเตอร์จะทำด้วยแม่เหล็กถาวร จึงเรียกสเตปปีงมอเตอร์ประเภทนี้ว่า “สเตปปีงมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร” ซึ่งตัวอย่างประเภท 4 เฟส ของมอเตอร์ชนิดนี้แสดงในรูปที่ 2.10 โดยโรเตอร์รูปทรงกระบอกทำจากแม่เหล็กถาวรและสเตเตอร์มีจำนวน 4 ซี่ฟันแต่ละซี่ฟันจะมีขดลวดพันล้อมรอบอยู่ โดยมีรูปที่ 2.11 แสดงหลักการควบคุมการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ประเภทนี้ ในรูปนี้ที่จุด ค. ของทุกเฟสจะต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟ ถ้าแต่ละเฟสถูกกระตุ้นให้ทำงานด้วยลำดับเฟส 1 เฟส 2 และเฟส 3 แล้ว โรเตอร์จะเคลื่อนที่ตามเข็มนาฬิกา ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ขนาดสเตปที่ได้จะมีขนาด 90 องศา สำหรับในตัวอย่างนี้ ถ้าต้องการลดขนาดของสเตปลงจะต้องทำการเพิ่มจำนวนซี่ฟันของตัวสเตเตอร์และจำนวนขั้วแม่เหล็กบนโรเตอร์ขึ้นอีก [1]



รูปที่ 2.10 แสดงโครงสร้างของสเตปปีงมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการแข่งขันพ็อกเก็ตบอลเท่านั้น เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขและข้อกำหนดด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงวงจรขับแบบพื้นฐานของสเตปป์มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร



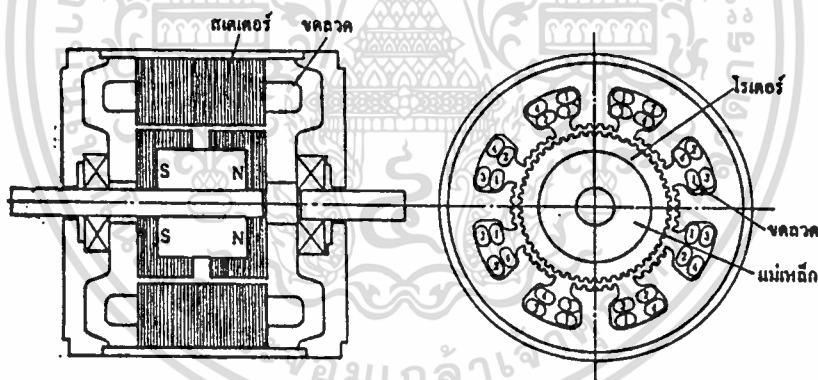
รูปที่ 2.12 แสดงสเตปการเคลื่อนที่ของสเตปป์มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร

โรเตอร์ของสเตปป์มอเตอร์ประเภทนี้สามารถเคลื่อนที่มาหยุด ณ ตำแหน่งที่แน่นอนได้ แม้ว่าจะหยุดกระตุ้นให้ทำงานก็ตาม ตำแหน่งดังกล่าวเรียกว่า “ตำแหน่งดีเทนท” (detent position) ซึ่งปกติแล้ว ตำแหน่งดีเทนทจะตรงกับตำแหน่งสมดุล (equilibrium) เมื่อเฟสหนึ่งเฟสใดถูกกระตุ้นให้ทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

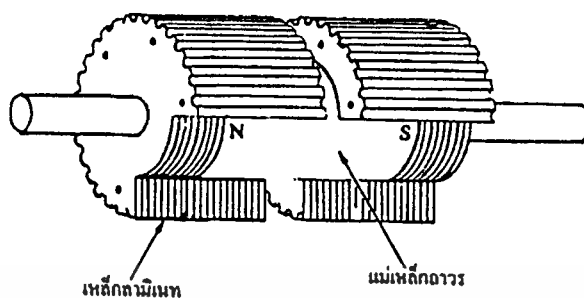
2.23 สเตปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริด(Hybrid stepping motor)

สเตปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริดเป็นสเตปป์มอเตอร์แบบที่มีหลักการทำงานผสมผสานกันระหว่างสเตปป์มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรกับชนิดค้ำรีลักเตนซ์แปรค่าได้ จึงได้ชื่อว่า “สเตปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริด” โดยรูปที่ 2.13 เป็นรูปแสดงโครงสร้างของสเตปป์มอเตอร์ชนิดนี้ ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ลักษณะโครงสร้างแกนสเตเตอร์ของสเตปป์มอเตอร์ชนิดนี้จะมีลักษณะที่คล้ายกับสเตปป์มอเตอร์แบบค้ำรีลักเตนซ์แปรค่าได้ แต่จะแตกต่างกันตรงที่การพันขดลวด กล่าวคือ ชนิดค้ำรีลักเตนซ์แปรค่าได้ขดลวด 1 ขดจากทั้งหมด 2 ขดใน 1 เฟส จะพันบนโพลของสเตเตอร์เพียงขดเดียว ในขณะที่สเตปป์มอเตอร์แบบไฮบริคชนิด 4 เฟส โพลของสเตเตอร์จะมีขดลวด 2 ขด ที่ต่างเฟสกันพันอยู่ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งขดลวดทั้งสองบนโพลของสเตเตอร์นี้จะพันในลักษณะ ไบฟีลาร์ (bifilar) ซึ่งจะให้ลักษณะชั่วสนามแม่เหล็กที่ต่างกันเมื่อถูกกระตุ้นให้ทำงาน [1]

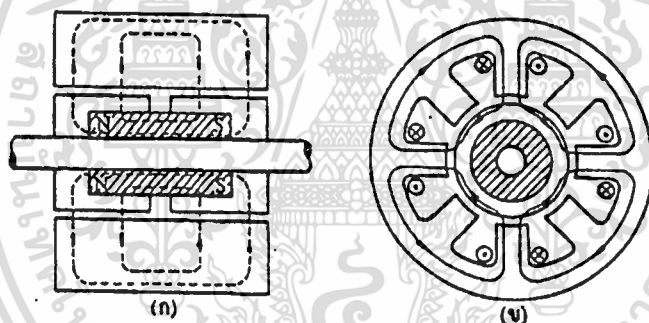


รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างของสเตปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริด

ส่วนโรเตอร์ของสเตปป์มอเตอร์แบบไฮบริด มีลักษณะดังรูปที่ 2.14 กล่าวคือ จะมีแม่เหล็กรูปทรงกระบอกที่วางตัวตามแกนโรเตอร์ ซึ่งมีทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ก) โดยแต่ละโพลของแม่เหล็กจะถูกล้อมรอบด้วยซี่เหล็กอ่อนซึ่งโดยทั่วไปจะทำได้ด้วยเหล็กซินเทอริด (sintered steel) หรือแท่งเหล็กซิลิคอน (solid silicon steel) ซี่ฟันของเหล็กอ่อนทั้งสองด้าน(เหนือและใต้)จะมีตำแหน่งเยื้องกันเท่ากับครึ่งหนึ่งของซี่ฟัน และสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดสเตเตอร์มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.15 (ข) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างแกน โรเตอร์ของสเตปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์



รูปที่ 2.15 แสดงทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กในสเตปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์

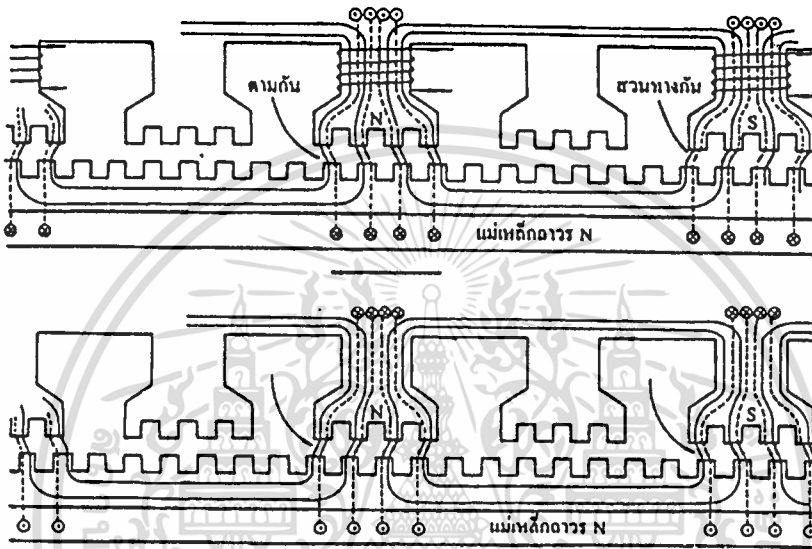
(ก) เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กบนแกนโรเตอร์

(ข) เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านขดลวด

ในสเตปป์มอเตอร์ประเภทนี้แรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กดังกล่าว จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.16 โดยด้านบนของรูปนี้แสดงด้านที่ขั้วแม่เหล็กเป็นขั้วได้และรูปร่างเป็นขั้วเหนือ โพลแรกถูกกระตุ้นให้ทำงานเป็นขั้วเหนือ ส่วนโพลที่ 3 เป็นขั้วได้ มีทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดแสดงด้วยเส้นทึบ ส่วนเส้นประเป็นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวร จะเห็นว่ารูปทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กทั้งสองที่เกิดขึ้นที่โพลแรกจะมีทิศทางเดียวกัน ส่วนในโพลที่สามจะมีทิศทางตรงกันข้าม เป็นผลทำให้โรเตอร์เคลื่อนที่ไปทางซ้ายตามทิศทางของลูกศรในรูป ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำนองเดียวกับรูปต่าง ในโพลแรกทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นตรงกันข้ามในขณะที่โพลที่ 3 มีทิศทางเดียวกันเป็นผลทำให้โรเตอร์เคลื่อนที่ไปทางซ้ายดังทิศทางของลูกศรในรูป



รูปที่ 2.16 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กในสเตปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์ ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของโรเตอร์

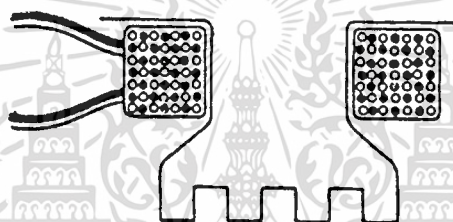
2.24 ลักษณะการพันขดลวดในสเตปป์มอเตอร์

ลักษณะการพันขดลวดในสเตปป์มอเตอร์จะมี 2 ลักษณะคือ การพันแบบโมโนฟิลาร์ และไบฟิลาร์ [1] ซึ่งในสเตปป์มอเตอร์แบบคาร์รีล็คแดนซ์แปรค่าได้ชนิดมีหลายสเตค และสเตปป์มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร ประเภทมีคลาวโพล (claw pole) ขดลวดที่ใช้จะมีลักษณะเป็นขดลวดโซลินอยด์ ส่วนในสเตปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์แบบคาร์รีล็คแดนซ์แปรค่าได้ชนิดสเตคเดียวจะมีลักษณะการพันขดลวดแบบโมโนฟิลาร์และไบฟิลาร์ ซึ่งลักษณะการพันขดลวดแบบไบฟิลาร์

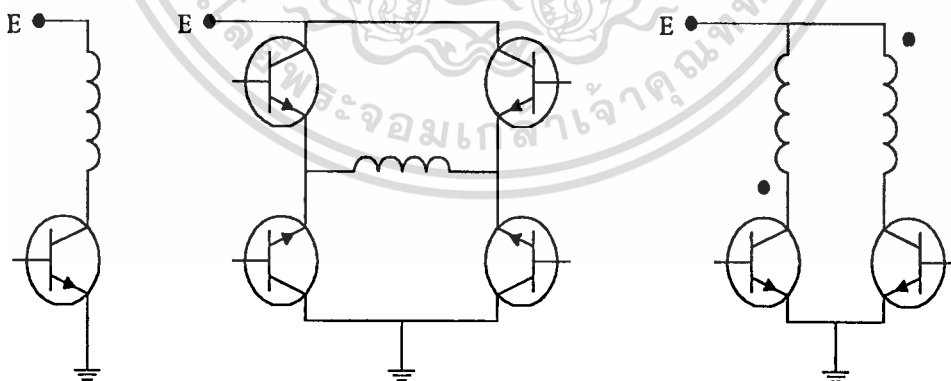
แสดงดังรูปที่ 2.17 คือจะใช้เส้นลวด 2 เส้นพันคู่กันไป ถ้าเส้นหนึ่งเป็นของเฟสที่ 1 แล้ว อีกเส้นที่เหลือจะเป็นเฟสที่ 3 ในทำนองเดียวกันถ้าเส้นแรกเป็นเฟสที่ 2 อีกเส้นหนึ่งจะเป็นเฟสที่ 4 ซึ่งวัตถุประสงค์ในการพันขดลวดแบบไบฟิลาร์ คือ ต้องการให้โพลของสเตเตอร์สามารถมีขั้วแม่เหล็กกลับไปได้ทั้งสองขั้ว โดยลัดคู่ปรอทที่ใช้ในวงจรควบคุมการจ่ายกระแสแสดงในรูปที่ 2.18

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงหลักการของวงจรควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ที่มีการพันขดลวดแบบต่างๆ โดยในรูป 2.18(ก) เป็นวงจรควบคุมการทำงานพื้นฐานของสเตปป์มอเตอร์ที่มีการพันแบบโมโนฟิลาร์ ขั้วสนามแม่เหล็กที่ได้จะมีทิศทางเดียวถ้าต้องการให้สามารถสลับขั้วของสนามแม่เหล็กไปมาในขดลวดแบบโมโนฟิลาร์จะต้องจัดวงจรเป็นลักษณะวงจรบริดจ์ดังรูป 2.18(ข) แต่จะเห็นว่าจะต้องใช้อุปกรณ์ในการสวิตช์กระแสเพิ่มคือ ทหรานซิสเตอร์ถึง 4 ตัว ต่อ 1 เฟส แต่ถ้าขดลวดที่ใช้ในสเตปป์มอเตอร์มีการพันแบบไบฟิลาร์แล้ว อุปกรณ์ในการสวิตช์กระแสจะใช้เพียง 2 ตัวใน 1 เฟส ดังแสดงในรูป 2.18 (ค) [4]



รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะของขดลวดที่พันแบบไบฟิลาร์



รูปที่ 2.18 แสดงวงจรขับแบบพื้นฐานของสเตปป์มอเตอร์ที่พันแบบ

- (ก) โมโนฟิลาร์ วงจรควบคุมแบบโมโนโพลาร์
- (ข) โมโนฟิลาร์ วงจรควบคุมแบบไบโพลาร์
- (ค) ไบฟิลาร์ วงจรควบคุมแบบไบโพลาร์

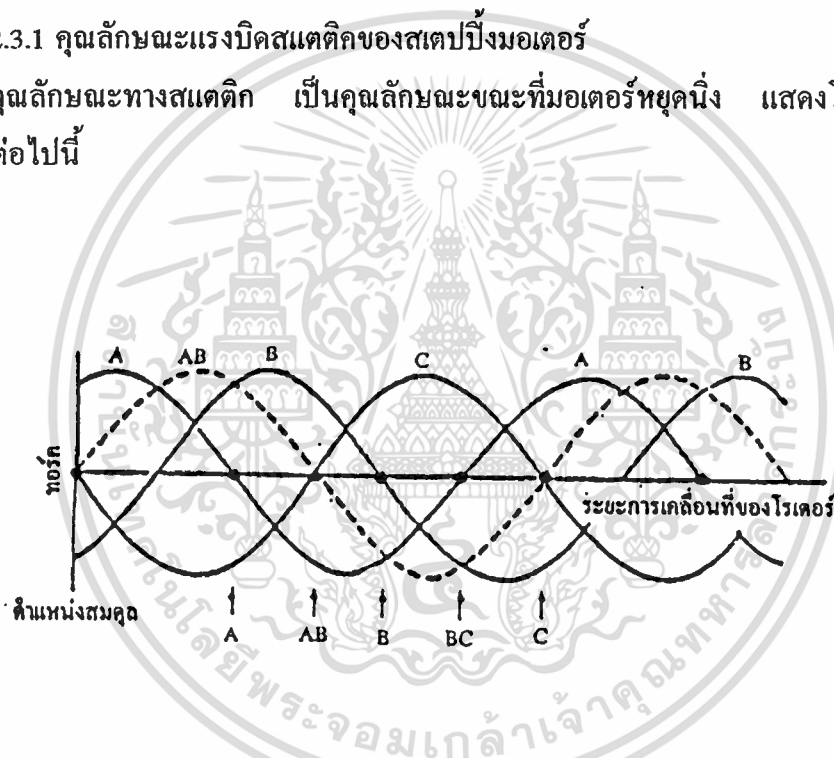
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 คุณลักษณะแรงบิดของสเตปป์มอเตอร์

การศึกษาคุณสมบัติของสเตปป์มอเตอร์ เพื่อให้สามารถควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพ ต้องศึกษาถึงคุณลักษณะต่างๆ เช่น คุณลักษณะเกี่ยวกับแรงบิดหรือทอร์กค่าของค่าความถี่สูงสุดที่มอเตอร์สามารถตอบสนองได้ คุณลักษณะเกี่ยวกับกระแสซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงค่าทอร์ก ซึ่งคุณลักษณะเหล่านี้ศึกษาได้จากกราฟแสดงคุณลักษณะของสเตปป์มอเตอร์ ซึ่งมีรายละเอียดที่ศึกษาได้ดังต่อไปนี้

2.3.1 คุณลักษณะแรงบิดสแตติกของสเตปป์มอเตอร์

คุณลักษณะทางสแตติก เป็นคุณลักษณะขณะที่มอเตอร์หยุดนิ่ง แสดงโดยกราฟของทอร์กดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.19 แสดงคุณลักษณะแรงบิดสแตติกของสเตปป์มอเตอร์ขนาดสามเฟส

จุดสมดุลของการหมุนคือจุดซึ่งซี่ฟันของ โรเตอร์และซี่ฟันของสเตเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กันอยู่ในแนวเดียวกัน มันคงอยู่ในตำแหน่งนี้โดยไม่มีการกำหนดจนกว่าจะได้รับสัญญาณกระตุ้นครั้งต่อไปที่ตำแหน่งสมดุลของโรเตอร์จะมีค่าทอร์กเป็นศูนย์ ถ้ามอเตอร์เคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเนื่องจากโหลด มอเตอร์จะสร้างทอร์กขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามเพื่อสมดุลกับโหลดแรงที่เกิดขึ้นนี้เป็นพลังงานที่สะสมอยู่เมื่อมอเตอร์อยู่ในสถานะหยุดนิ่ง ซึ่งจะมีทิศทางตรงข้ามกับจุดสมดุลเริ่มต้น ผลของทอร์กกับการเคลื่อนที่ของโรเตอร์จะมีลักษณะคล้ายรูปคลื่นไซน์(รูปร่างจริงจะขึ้นอยู่กับการโครงสร้างของโรเตอร์และสเตเตอร์ ซึ่งจะเป็นคาบกับซี่ฟันของโรเตอร์) [1],[4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าทอร์กสูงสุดจะขึ้นอยู่กับกระแสที่จ่ายให้เฟสนั้นๆ ทอร์กจะถูกเรียกว่าไฮลด์ทอร์ก หรือสแตติกทอร์ก ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของทอร์กและกระแสก่อนข้างจะมีลักษณะเป็นเชิงเส้น แต่จะมีขีดจำกัดที่คุณสมบัติการเกิดการอ้อมตัวของโรเตอร์และสเตเตอร์ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแม่เหล็กที่จุดอ้อมตัวนี้จะไม่มีการเพิ่มขึ้นของทอร์กเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของกระแสเฟส [1]

ทอร์กของมอเตอร์จะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อมอเตอร์เคลื่อนที่ไปครึ่งหนึ่งของระยะห่างซี่ฟันของโรเตอร์ ถ้าการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ข้ามจุดสมมูลไป หรือไปที่ตำแหน่งอื่นซึ่งเป็นจำนวนเท่าของซี่ฟันของโรเตอร์ จะทำให้เกิดการสูญเสียของพัลส์อินพุท ทำให้ไม่เกิดการชิงโครไนส์ระหว่างคำสั่งพัลส์อินพุทกับการตอบสนองของสเต็ปการเคลื่อนที่ เพื่อไม่ให้เกิดเหตุการณ์นั้น มอเตอร์จะมีไฮลด์ทอร์กสูงกว่าโหลดทอร์ก [1]

2.4 โหมดการขับเคลื่อนมอเตอร์

โหมดการขับหรือการจัดลำดับการขับเคลื่อนมอเตอร์ เป็นการจัดลำดับการจ่ายพลังงานให้แก่ขดลวดสเต็ปมอเตอร์เพื่อควบคุมทิศทางหมุน และ ปรับปรุงประสิทธิภาพของแรงบิด ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายโหมดดังนี้

2.4.1 การขับทีละเฟส

ตารางที่ 2.1 แสดงลำดับของการขับขดลวดแต่ละเฟสของสเต็ปมอเตอร์ชนิด 3 และ 4 เฟสในโหมดของการขับทีละเฟส โดยในส่วนของพื้นที่ที่แสดงนั้นจะเป็นสถานะของการจ่ายพลังงานให้แก่มอเตอร์ เมื่อต้องการให้สเต็ปมอเตอร์หมุนจะทำการจ่ายพลังงานให้แก่แต่ละเฟสของมอเตอร์เรียงลำดับกันไปเช่นในสเต็ปมอเตอร์ 3 เฟสดังนี้ เฟส 1,เฟส2,เฟส3,... และเมื่อต้องการให้มอเตอร์หมุนในทิศทางตรงกันข้ามก็จะจ่ายพลังงานให้แก่แต่ละเฟสกลับทิศทางดังนี้ เฟส 3,เฟส2,เฟส1,...ลักษณะการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เมื่อควบคุมด้วยการขับทีละเฟสแสดงได้ดังรูปนี้

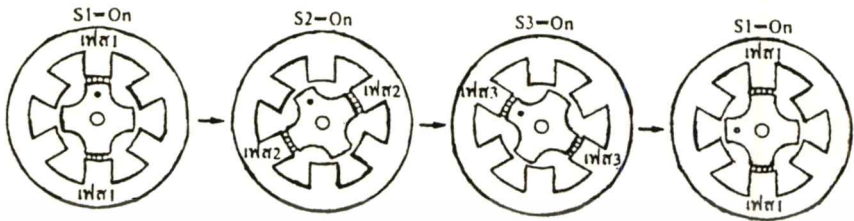
2.20

2.4.2 การขับทีละ 2 เฟส

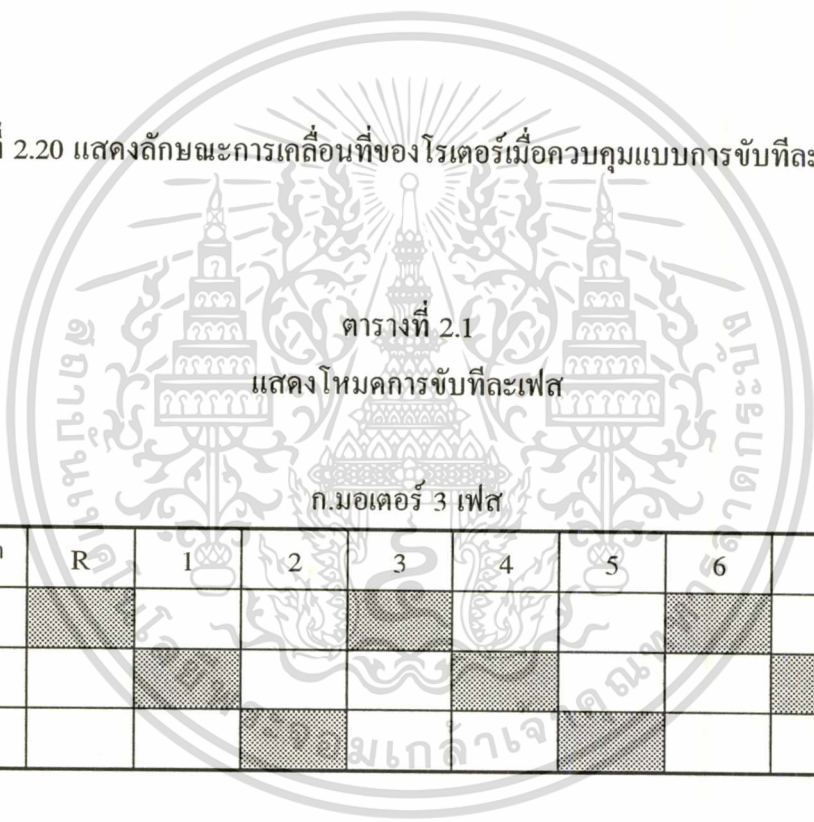
ลำดับของการขับเคลื่อนมอเตอร์ แบบทีละเฟสดังแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งเป็นมอเตอร์ชนิด 3 และ 4 เฟสตามลำดับ จะเห็นว่า การขับแบบนี้ขณะที่กระแสที่ขับเฟสหนึ่งสวิตซ์ไปสู่อีกเฟสหนึ่งนั้น ในเฟสที่ 3 ยังคงอยู่ในสถานะของการขับ ตัวอย่างเช่น จากลูกศรในตาราง เฟส 2 จะหยุดจ่ายพลังงาน และเฟส 1 จะได้รับพลังงานในขณะที่เฟส 3 ยังคงได้รับพลังงานอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เมื่อควบคุมแบบการขับที่ละเฟส



ตารางที่ 2.1

แสดงโหมดการขับที่ละเฟส

ก.มอเตอร์ 3 เฟส

สัญญาณนาฬิกา	R	1	2	3	4	5	6	7	8
เฟส1	■			■			■		
เฟส2		■			■			■	
เฟส3			■			■			■

ข.มอเตอร์ 4 เฟส

สัญญาณนาฬิกา	R	1	2	3	4	5	6	7	8
เฟส1	■				■				■
เฟส2		■				■			
เฟส3			■				■		
เฟส4				■				■	

พัลส์
R = รีเซท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2
แสดงโหมคการขับทีละ 2 เฟส

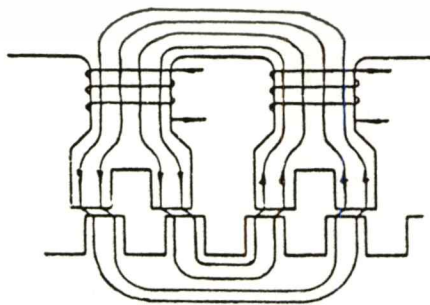
ก.มอเตอร์ 3 เฟส

สัญญาณนาฬิกา	R	1	2	3	4	5	6	7	8
เฟส1	■	■	□	■	■	□	■	■	□
เฟส2	□	■	■	□	■	■	□	■	■
เฟส3	■	□	■	■	□	■	■	□	■

ข.มอเตอร์ 4 เฟส

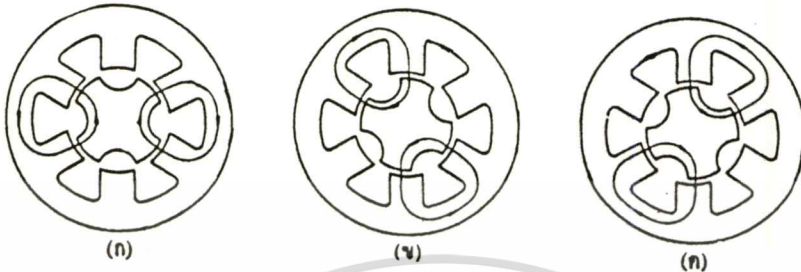
สัญญาณนาฬิกา	R	1	2	3	4	5	6	7	8
เฟส1	■	■	□	■	■	■	□	■	■
เฟส2	□	■	■	□	■	■	■	□	■
เฟส3	■	□	■	■	□	■	■	■	□
เฟส4	■	■	□	■	■	■	□	■	■

การขับแบบนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งซีฟันของโรเตอร์และมอเตอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 2.21 จะเห็นว่า ตำแหน่งของซีฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์จะไปวางอยู่ในแนวเดียวกันเหมือนดังการขับทีละเฟส ลักษณะของการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ที่เกิดขึ้นในแต่ละสเตปป์ึงมอเตอร์ชนิด 3 เฟส เมื่อขับด้วยการขับทีละ 2 เฟส แสดงได้ดังรูปที่ 2.22

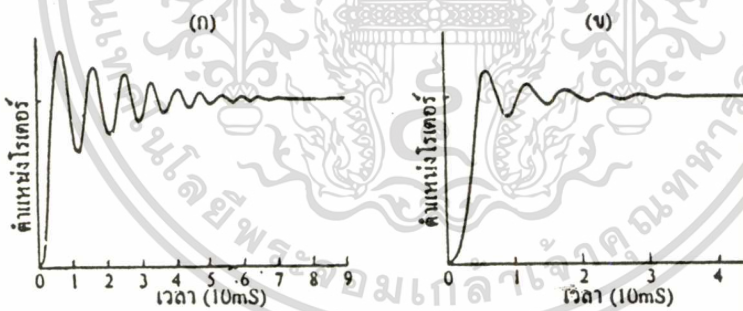


รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะของซีฟันสเตเตอร์และโรเตอร์เมื่อขับแบบทีละ 2 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 แสดงการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เมื่อควบคุมแบบการขับ 2 เฟส การขับทีละ 2 เฟส มีข้อดีว่าการขับทีละเฟสตรงที่ว่า จะให้ผลตอบสนองดีกว่าแบบ หนึ่งสเตปได้ดีกว่าการแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของโรเตอร์เมื่อขับทีละเฟส และ ขับทีละ 2 เฟส

2.4.3 การขับทีละครั้งสเตป

เป็นการขับสเตปปิ้งมอเตอร์แบบที่รวมกันระหว่างการขับทีละเฟสและการขับทีละสองเฟสในตารางที่ 2.3 เป็นลักษณะของการขับสเตปปิ้งมอเตอร์ชนิด 3 เฟส จะเห็นว่าสัญญาณนาฬิกาที่ใช้อยู่ 2 ลักษณะ คือ สัญญาณนาฬิกา (ก) เมื่อขับในลักษณะของการขับทีละเฟส และ สัญญาณนาฬิกา (ข) ขณะที่โรเตอร์เคลื่อนตัวจากตำแหน่งสมดุลอันหนึ่งไปอยู่ในตำแหน่งอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

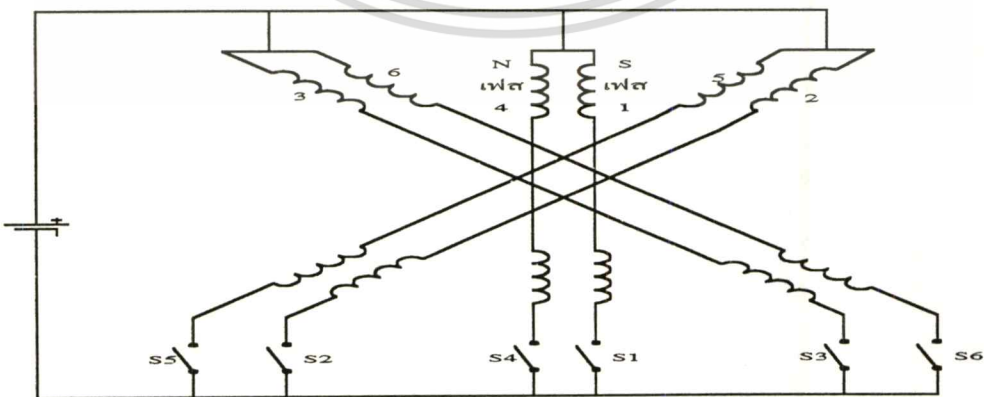
เพื่อลดการสั่นของตำแหน่งโรเตอร์ (suppress oscillation) จากลักษณะของการจับแบบนี้จะทำให้ขนาดของสเตปที่ได้เป็นครึ่งหนึ่งของสเตปปกติ

ตารางที่ 2.3
แสดงโหมดการจับที่ละครึ่งสเตป

สัญญาณนาฬิกา(A)	R	1	2	3	4	5
สัญญาณนาฬิกา(B)	R	1	2	3	4	5
เฟส 1	■				■	
เฟส 2		■			■	
เฟส 3			■		■	

2.4.4 การจับที่ละ 2 เฟส ของสเตปปิ้งมอเตอร์ที่พันแบบไบไฟลาร์

ลักษณะการต่อของขดลวดในมอเตอร์ประเภทที่พันแบบไบไฟลาร์ จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.24 จะสังเกตว่าขดลวดที่มีขั้วตรงกันเข้าจะถูกต่อเข้าด้วยกัน ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นก็จะทั้ง 2 ทิศทาง คือ ทิศทางเข้าและออกในเวลาเดียวกัน โดยในรูปที่ 2.25 แสดงทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการจับแบบที่ละ 2 เฟสของสเตปปิ้งมอเตอร์ชนิดคำร์ลิตต์เด่นค์แปรค่าได้



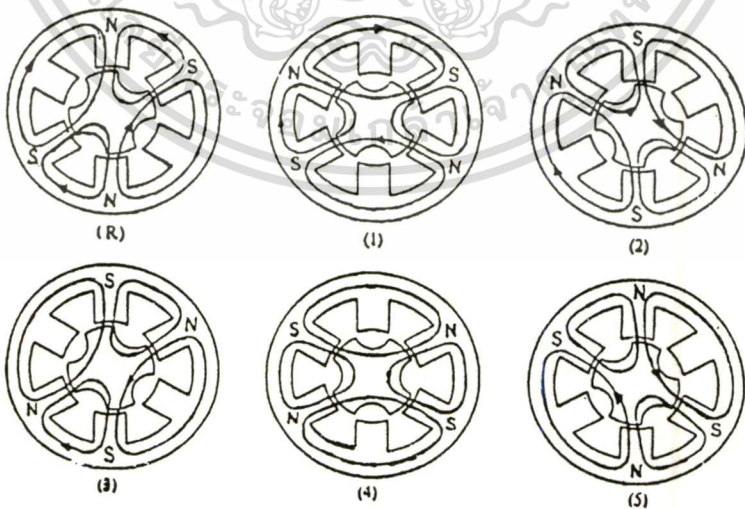
รูปที่ 2.24 แสดงรูปแบบของการพันขดลวดแบบไบไฟลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิด 3 เฟส แบบไบโพลาร์ตามตารางที่ 2.4 จะเห็นว่าในกรณีนี้จะมีเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นถึง 4 ลูปด้วยกัน ซึ่งจะต่างกับสเตปป์ิงมอเตอร์ประเภทที่พันแบบโมนอฟิลาร์ โดยทั่วไปแล้วสเตปป์ิงมอเตอร์ที่พันแบบไบโพลาร์จะให้ประสิทธิภาพเกี่ยวกับแรงบิดที่ดีกว่าแบบโมนอฟิลาร์

ตารางที่ 2.4
แสดงโหมคการขั้วที่ละ 2 เฟสของสเตปป์ิงมอเตอร์ที่พันแบบไบโพลาร์

สัญญาณนาฬิกา	R	1	2	3	4	5	6	7	8
เฟส1 (S1)	■					■	■		
เฟส2 (S2)	■	■				■		■	
เฟส3 (S3)		■	■					■	■
เฟส4 (S4)			■	■					■
เฟส5 (S5)				■	■				
เฟส6 (S6)					■	■			



รูปที่ 2.25 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กในขดลวดที่พันแบบไบโพลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 วงจรขับ (drive circuit)

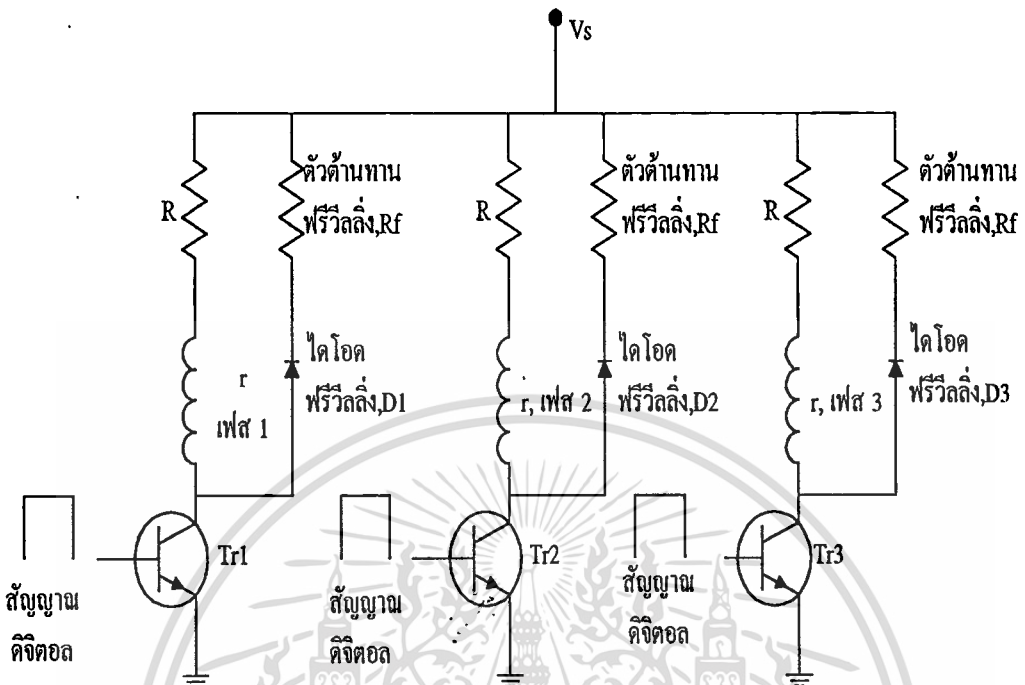
สเตปป์มอเตอร์ชนิดคาร์ลิตแตนซ์แปรค่าได้ โดยทั่วไปมีเฟสอย่างน้อย 3 เฟส ซึ่งแต่ละเฟสต้องการเพียงแค่ควบคุมการปิด , เปิด สวิตซ์ให้กระแสไหลผ่านขดลวดเท่านั้น ขั้วหรือทิศทาง การไหลของกระแสไม่มีผลต่อสเตปป์การเคลื่อนที่ของสเตปป์มอเตอร์ ดังนั้นวงจรขับของ สเตปป์มอเตอร์ชนิดคาร์ลิตแตนซ์แปรค่าได้ จึงเป็นวงจรขับอย่างง่ายที่เรียกว่า วงจรขับแบบยูนิโพลาร์ (unipolar) เนื่องจากให้กระแสไหลในทิศทางเดียว [4] ส่วนสเตปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์หรือชนิดแม่เหล็กถาวร ส่วนใหญ่ มักจะมี 2 เฟส ขั้วหรือทิศทาง การไหลของกระแสเป็นสิ่งที่ มีผลต่อสเตปป์การเคลื่อนที่ของสเตปป์มอเตอร์ ดังนั้นจึงต้องใช้วงจรขับที่เรียกว่า วงจรขับแบบไบโพลาร์ (bipolar) ที่สามารถให้กระแสไหลได้ใน 2 ทิศทาง [4]

2.5.1 วงจรขับแบบยูนิโพลาร์ (unipolar)

วงจรขับแบบยูนิโพลาร์นี้ เป็นวงจรขับอย่างง่ายที่นิยมใช้ขับสเตปป์มอเตอร์ชนิดคาร์ลิตแตนซ์แปรค่าได้ วงจรขับของสเตปป์มอเตอร์ในแต่ละเฟสจะถูกแยกออกจากกันเพื่อใช้กระตุ้นขดลวดในแต่ละเฟส วงจรขับนี้จะได้รับการควบคุมด้วยสัญญาณควบคุมที่มีค่ากำลังงานต่ำ เช่น สัญญาณจาก ไอซีทีทีแอล ดังในรูปที่ 2.26 ขดลวดแต่ละเฟสจะได้รับการกระตุ้นจากการสวิตซ์ของทรานซิสเตอร์จนกระแสที่ไหลผ่านขดลวดถึงจุดอิมพัลส์ของทรานซิสเตอร์ภายใต้สภาวะการณีนี้นี้ แหล่งจ่ายไฟดีซี จะตรกร่อมขนานไปกับ ตัวต้านทานบังคับ (R_f , force resistance) ที่ต่ออนุกรมกับขดลวดอยู่ ดังนั้นแหล่งจ่ายไฟดีซี จะถูกเลือกให้ผลิตกระแสจนมีค่าถึงพิกัดที่ขดลวดของมอเตอร์ตามต้องการ โดยที่ผลรวมโวลเตจตกคร่อมขดลวดกับตัวต้านทานต้องมีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานในขดลวด (r) กับตัวต้านทาน (R_f) [4]

$$V_s = I (R + r) \quad 2.3$$

โดยทั่วไปแล้วขดลวดจะมีค่าคงที่ของเวลา (time constant = L/R) ที่มีค่ายาวนาน ซึ่งเป็นตัวทำให้กระแสไหลเพิ่มขึ้นได้ช้า ดังนั้นการทำให้กระแสไหลเพิ่มขึ้นได้เร็วคือการทำให้ ค่าคงที่ของเวลามีค่าน้อยลง โดยการเพิ่มค่าตัวต้านทาน (R_f) ให้มีค่ามากขึ้นตามสัดส่วนกับแหล่งจ่ายไฟ ส่วนตัวต้านทานและไดโอดฟรีวิลลิ่ง (free wheeling diode) จะทำหน้าที่ช่วยระบายกระแสให้ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงทรานซิสเตอร์หยุดทำงาน



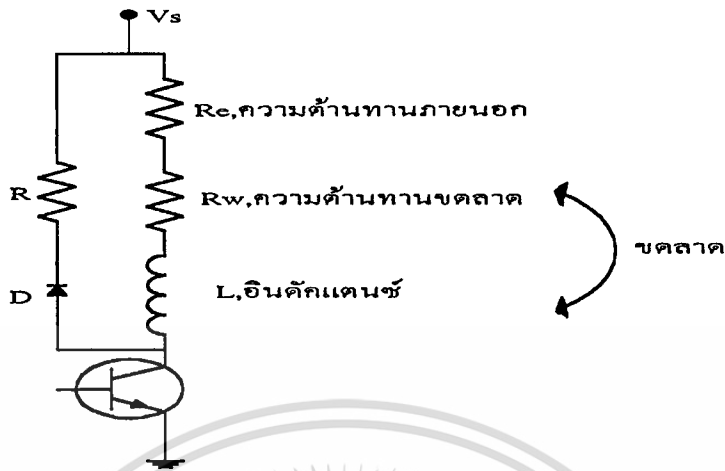
รูปที่ 2.26 แสดงวงจรขับสเตปป์มอเตอร์แบบยูนิโพลาร์

1. การปรับปรุงการเพิ่มกระแส (improvement of build-up current)

เมื่อทรานซิสเตอร์ถูกกระตุ้นให้ทำงาน ผลของความเหนี่ยวนำ (inductance) จะหน่วงกระแสจากภาคจ่ายไฟไปยังทรานซิสเตอร์ เป็นผลให้การตอบสนองการทำงานของวงจรขับช้าลง จึงมีวิธีการต่าง ๆ เพื่อที่จะเพิ่มการตอบสนองของวงจรให้สูงขึ้นดังนี้

การใช้ค่าความต้านทานเพิ่มเข้าไปยังวงจรทางขา C ของทรานซิสเตอร์ดังรูปที่ 2.27 ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด ในกรณีนี้ค่าคงที่ของเวลา (time constant) ของวงจรภายในสภาวะคงตัว (steady-state) จะลดลงจาก L/R_w เป็น $L/(R_c + R_w)$ ในวงจรลักษณะนี้จะมีข้อเสียคือ กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นที่ความต้านทานที่ต่อเพิ่มเข้าไปจะมีค่าสูง ตัวอย่างเช่น เมื่อวงจรนั้นทำงานในลักษณะการขับที่ละเฟสความต้านทานของขดลวดแต่ละเฟสเท่ากับ 1.5 กระแสพิคเท่ากับ 4A และใช้แหล่งจ่ายไฟ 24V. ดังนั้นจะต้องใช้ความต้านทาน R_c เพิ่มเข้าไป 4.5 ในแต่ละเฟส ดังนั้นกำลังงานสูญเสียที่ R_c จะมีประมาณ $4.5 \times 4^2 = 72W$ และจะมีค่าเป็นสองเท่าเมื่อขับแบบที่ละสองเฟส [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

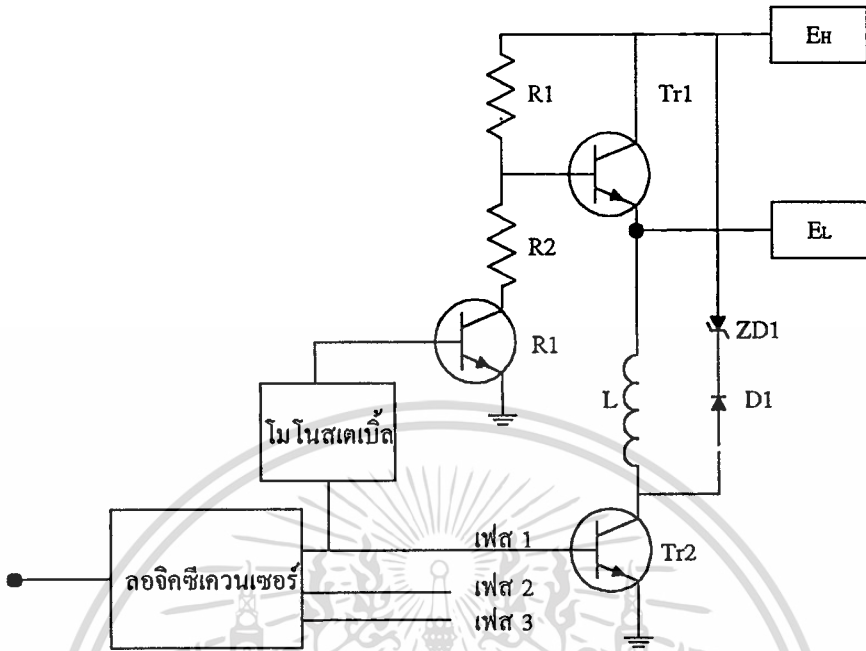


รูปที่ 2.27 แสดงการปรับปรุงการเพิ่มกระแสในวงจรขับโดยใช้ตัวความต้านทาน

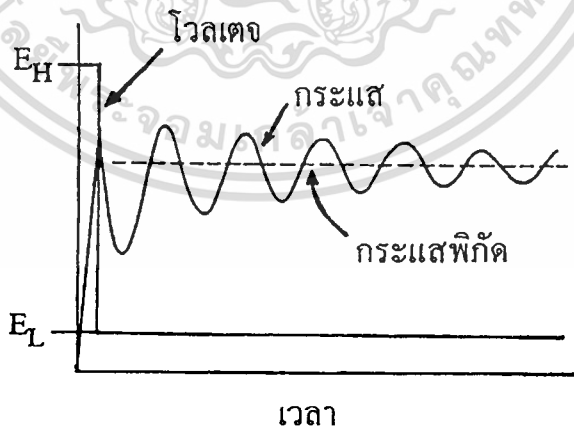
2. การใช้วงจรแหล่งจ่ายไฟแบบคู่ (Dual Voltage)

เพื่อที่จะลดปัญหาการเกิดกำลังงานสูญเสียของวงจรภาคขับกำลัง และเพิ่มประสิทธิภาพของสเตรปิ้งมอเตอร์ จึงมีการนำวงจรขับสเตรปิ้งมอเตอร์ที่มีแหล่งจ่ายไฟแบบคู่มาใช้งาน ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.28 เมื่อมีสัญญาณพัลส์ควบคุม ป้อนให้กับวงจรลอจิกซีเคเวนเซอร์ เอาท์พุทของซีเคเวนเซอร์จะกระตุ้นให้เฟสใดเฟสหนึ่งทำงาน เช่น เฟส 1 ทรานซิสเตอร์ T_{H1} และ T_{r2} จะทำงานแหล่งจ่ายไฟ E_H ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง จะทำการจ่ายกระแสไปยังขดลวดของสเตรปิ้งมอเตอร์ ในขณะที่ไดโอด D_1 จะมีการไบอัสกลับเพื่อแยกแหล่งจ่ายไฟโวลเตจสูง E_H และโวลเตจต่ำ E_L ออกจากกัน เนื่องจากการใช้แหล่งจ่ายไฟโวลเตจสูงจะทำให้กระแสเกิดการตอบสนองเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (build-up current) จากนั้นวงจรโมนอสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์จะเป็นตัวกำหนดค่าคงที่ของเวลา (time constant) เพื่อหยุดการทำงานของ T_{r1} เมื่อกระแสในขดลวดของมอเตอร์เริ่มเพิ่มขึ้นเกินพิกัดของมอเตอร์แหล่งจ่ายไฟโวลเตจสูงจะหยุดจ่ายกระแสให้แก่ขดลวด ในช่วงเวลานี้ไดโอดจะมีไบอัสตรงแหล่งจ่ายไฟโวลเตจต่ำ E_L จะจ่ายกระแสให้แก่ขดลวดของสเตรปิ้งมอเตอร์แทน ซึ่งมีลักษณะสัญญาณกระแสแสดงดังรูปที่ 2.29 ส่วนในรูปที่ 2.30 แสดงลักษณะของวงจรขับที่ใช้แหล่งจ่ายไฟแบบคู่ สำหรับมอเตอร์ 4 เฟส [1],[4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

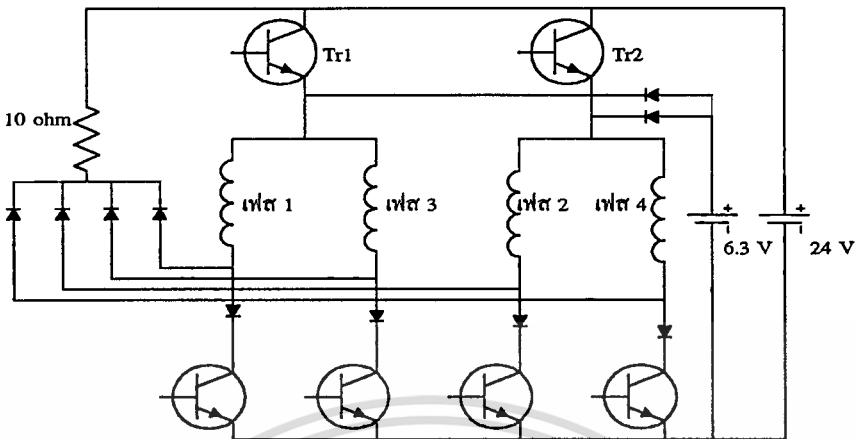


รูปที่ 2.28 แสดงหลักการของการปรับปรุงการเพิ่มกระแสโดย
ใช้วงจรขับสเตรปิ้งมอเตอร์ชนิดแหล่งจ่ายไฟ แบบคู่



รูปที่ 2.29 แสดงลักษณะของสัญญาณ โวลเตจและกระแสในวงจรขับ แบบแหล่งจ่ายไฟคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

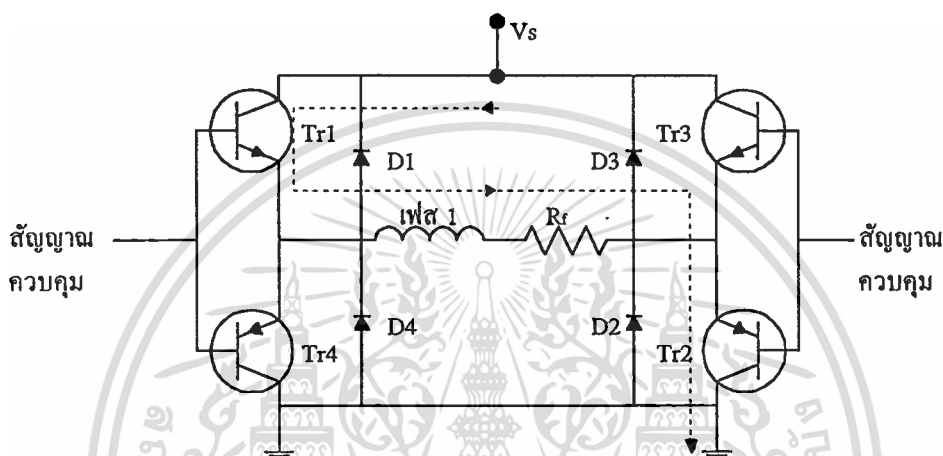


รูปที่ 2.30 แสดงวงจรขับชนิดแหล่งจ่ายไฟแบบคู่สำหรับขับ
สเต็ปปีงมอเตอร์ 4 เฟสในแบบ 2 เฟส

2.5.2 วงจรขับแบบไบโพลาร์

วงจรขับแบบไบโพลาร์นี้จะนิยมใช้กับสเต็ปปีงมอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์หรือชนิดแม่เหล็กถาวร [4] เนื่องจากวงจรมอเตอร์นี้สามารถให้กระแสไหลได้ 2 ทิศทาง ในขดลวดของมอเตอร์เพียงหนึ่งเฟส โดยทรานซิสเตอร์จะทำงานเป็นคู่ เพื่อให้กระแสไหลผ่านขดลวดในทิศทางที่ต้องการดังในรูปที่ 2.31 เมื่อกระตุ้นขดลวดด้วยสัญญาณบวก จะทำให้ Tr1 กับ Tr2 ทำงานอยู่ในสถานะปิดวงจร กระแสจะไหลออกจากแหล่งจ่ายไฟผ่าน Tr1 ไปสู่ขดลวดผ่านตัวต้านทาน R_f ไหลลงสู่ Tr2 แล้วลงสู่กราวด์ ในทางตรงกันข้าม เมื่อกระตุ้นด้วยสัญญาณลบจะทำให้ Tr3 กับ Tr4 ทำงานคืออยู่ในสถานะปิดวงจร โดยกระแสจะไหลกลับทิศทาง ทรานซิสเตอร์ทั้ง 4 ตัวนี้ในวงจรแบบบริดจ์นี้ จะทำหน้าที่แยกขาเบสของวงจรขับออกจากกัน ในวงจรแบบบริดจ์นี้จะมีไดโอด 4 ตัวต่อในทิศทางแบบย้อนกลับขนานไปกับทรานซิสเตอร์ทั้ง 4 ตัว โดยทำหน้าที่เป็นฟรีวิลลิงไดโอด (free wheeling) เมื่อสถานะที่ Tr1 กับ Tr2 หยุดจ่ายกระแส กระแสที่ไหลผ่านขดลวดจะเริ่มลดลง โดยกระแสนี้จะไหลผ่านไดโอด D3 กับ D4 กลับสู่แหล่งจ่ายไฟ วงจรขับแบบนี้จะช่วยให้พลังงานที่สะสมอยู่ในขดลวดหลังจากที่ทรานซิสเตอร์หยุดทำงานกระจายกลับสู่แหล่งจ่ายไฟ นอกจากนี้วงจรขับแบบบริดจ์เป็นวงจรขับที่มีประสิทธิภาพสูง เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรขับแบบยูนิโพลาร์ที่ผ่านมา เนื่องจากมีลักษณะการขับแบบไบโพลาร์ที่ทุกเฟสของมอเตอร์กระแสจะสามารถไหลได้ทั้ง 2 ทิศทาง [1] วงจรขับไบโพลาร์แบบบริดจ์นี้สามารถนำไปใช้ขับสเต็ปปีงมอเตอร์ชนิดคาร์ลัคแดนซ์แปรค่าได้ด้วย ค่ากระแสที่ไหลในฟรีวิลลิงไดโอดในวงจรขับแบบไบโพลาร์นี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลาร์นี้จะลดลงอย่างรวดเร็วกว่าวงจรขับแบบยูนิโพลาร์ เนื่องจากทิศทางกระแสที่ไหลจะอยู่ในลักษณะตรงกันข้ามกับแหล่งจ่ายไฟ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องเพิ่มค่าตัวต้านทานฟรียูลิ่งลงในวงจรขับแบบไบโพลาร์นี้ [4] วงจรขับแบบบริดจ์มีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะ ลักษณะแรกดังแสดงในรูปที่ 2.31 ซึ่งสามารถสรุปลักษณะการทำงานและหน้าที่ของวงจรได้ดังนี้ [1]



รูปที่ 2.31 แสดงวงจรขับสเต็ปปีงมอเตอร์แบบไบโพลาร์

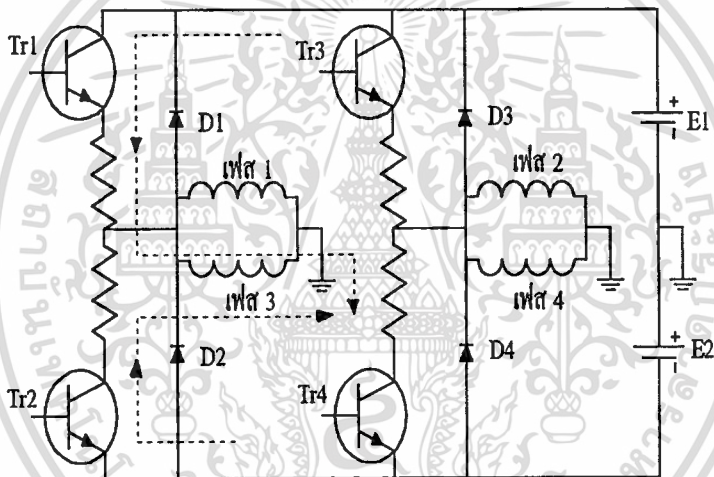
1. ถ้าสเต็ปปีงมอเตอร์มี 8 ขั้ว ที่มีลักษณะการต่อแยกอิสระออกจากกัน ถูกต่อให้มีลักษณะดังในรูปที่ 2.31 แล้ว ขั้วของขดลวดเฟส 1 และเฟส 3 จะมีลักษณะเหมือนกันตลอดเมื่อมีกระแสไหลผ่านไม่ว่าทิศทางใด ดังนั้นในกรณีนี้สเต็ปปีงมอเตอร์จะทำงานในลักษณะของมอเตอร์ 2 เฟส

2. เพื่อป้องกันความเสียหายอันเนื่องมาจากการทำงานที่พร้อมกันในเวลาเดียวกันของทรานซิสเตอร์ 2 ตัว เช่น TR1 และ TR2 หรือ TR3 และ TR4 จำเป็นจะต้องมีวงจรหน่วงเวลาซึ่งในตัวอย่างใช้อุปกรณ์ความต้านทานต่อเพิ่มเข้าไปดังแสดงในรูป [1]

3. ไดโอดชัพเพรสเซอร์ ไดโอดที่ต่อขนานกับทรานซิสเตอร์จะทำหน้าที่ลดแรงดันกระชาก(spike voltage) อันเนื่องมาจากทรานซิสเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งเปิดวงจร และยังคงมีหน้าที่ต่างไปจากในวงจรขับแบบยูนิโพลาร์อีก กล่าวคือ ถ้า TR1 กำลังนำกระแสทิศทางของกระแสจะมีทิศทางดังลูกศรเส้นประในรูป 2.32 ทันทีที่ TR1 หยุดทำงาน และ TR2 ทำงานต่อ กระแสในขดลวดจะไม่ไหลกลับแต่ยังจะไหลวนผ่าน D2 ไปยังแหล่งจ่ายไฟ E(2) ซึ่งแสดงทิศทางของลูกศรเส้นประในรูป ซึ่งอาจกล่าวได้ว่ากระแสจากขั้วลบของ E(2) ถูกจ่ายออกมาหรืออีกนัยหนึ่งเป็น

การเก็บประจุ (charge) ให้กับแบตเตอรี่หรือพลังงานจากสนามแม่เหล็กย้ายกลับคืนไปยังแหล่งจ่ายไฟ ต่างกับการขับแบบขุณีโพลาร์ที่พลังงานนี้จะสูญเสียไปกับอุปกรณ์ภายในวงจรเช่น ขดลวด, ไดโอด และอุปกรณ์ค่าความต้านทาน ซึ่งเป็นข้อดีของวงจรขับแบบบริดจ์นี้ [1]

4. การเปลี่ยนทิศทางของกระแสในขดลวดของมอเตอร์ ในการขับแบบขุณีโพลาร์ หลังจากที่เราานซิสเตอร์หยุดทำงาน จะใช้อุปกรณ์ซัพเพรสเซอร์ลดกระแสไหลวนที่เกิดขึ้น ส่วนในกรณีของการขับแบบไบโพลาร์นี้ จะจ่ายแรงดันอันหนึ่งเพื่อให้กระแสไหลกลับทาง กล่าวคือหลังจากที่กระแสแสดงด้วยเส้นประในรูปกลายเป็นศูนย์ กระแสอีกอันหนึ่งจะเกิดขึ้นผ่าน TR2 ในทิศทางตรงกันข้าม [1]



รูปที่ 2.32 แสดงวงจรขับแบบบริดจ์

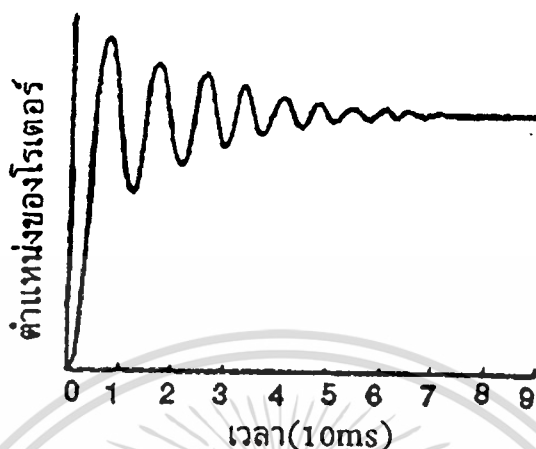
บทที่ 3

ผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์กับเทคนิควิธีการหน่วง

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า โดยทั่วไปผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์จะเกิดโอเวอร์ชุตและการสั่นของตัวแกนโรเตอร์ที่อุดมสมบูรณ์ ซึ่งสิ่งเหล่านี้ทำให้ผลตอบสนองที่ได้มีค่าเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่มีค่ายาวนาน แต่ในการนำสเตปป์มอเตอร์ไปประยุกต์ใช้งาน สิ่งที่ต้องการคือ สเตปป์การเคลื่อนที่ที่ถูกต้อง และถึงจุดสมดุลได้อย่างรวดเร็ว โดยปราศจากการเกิดโอเวอร์ชุตและการสั่น ดังนั้น แนวทางการควบคุมไม่ให้เกิดโอเวอร์ชุต และการสั่นของตัวแกนโรเตอร์ คือ การเพิ่มการหน่วง (damping) เข้าไประบบ ซึ่งกรรมวิธีการหน่วงก็เป็นส่วนหนึ่งที่อยู่ในหลักการของระบบควบคุม (control system) แต่สำหรับวิธีการหน่วงที่ใช้ในสเตปป์มอเตอร์มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี [3]

3.1 ผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์

โดยทั่วไปแล้ว ในการควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ จะทำการป้อนพัลส์โวลเตจ หรือกระแสที่เป็นแบบดิจิทัลพัลส์ผ่านวงจรขับแบบควบคุมการจ่ายกระแสด้วยจังก์ทของสัญญาณดิจิทัลพัลส์ เพื่อไปกระตุ้นขดลวดแต่ละเฟสให้เกิดการเคลื่อนที่ของ ตัวแกนโรเตอร์ ผลตอบสนองที่ได้ในแต่ละสเตปป์ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ จะเกิดโอเวอร์ชุต และการสั่นที่หาค่าเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ยาวนาน ซึ่งสิ่งนี้ถือเป็นข้อเสีย ถ้าหากมีการนำสเตปป์มอเตอร์ไปประยุกต์ใช้งาน ในการขับเคลื่อนของเครื่องพิมพ์ (printer) , พล็อตเตอร์ (plotter) ตลอดจนเครื่องเทเลไทป์ (teletype) ความเร็วของเครื่องในการพิมพ์ตัวอักษร จะถูกจำกัดด้วยปัญหาการเกิดโอเวอร์ชุต และการสั่นของตัวแกนโรเตอร์ [4] ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์

3.2 เทคนิควิธีการหน่วงของสเตปป์มอเตอร์

ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์นั้น จะเกิดโอเวอร์ชูทและการสั่นตัวของตัวแกนโรเตอร์ จึงได้มีวิธีการแก้ปัญหาเหล่านี้ โดยการลดหรือทำให้ไม่เกิดสิ่งเหล่านี้ขึ้น โดยเป็นการปรับปรุงผลตอบสนองให้ดีขึ้น ซึ่งวิธีดังกล่าวเรียกว่า วิธีการหน่วง (damping) เป็นการเพิ่มแรงหน่วงเข้าไปในระบบการเคลื่อนที่ของตัวแกนโรเตอร์ วิธีการหน่วงนี้มีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ [3],[1]

3.2.1 การหน่วงแบบกล (mechanical damping)

3.2.2 การหน่วงแบบอิเล็กทรอนิกส์ (electronics damping)

3.2.1 การหน่วงแบบกล (mechanical damping)

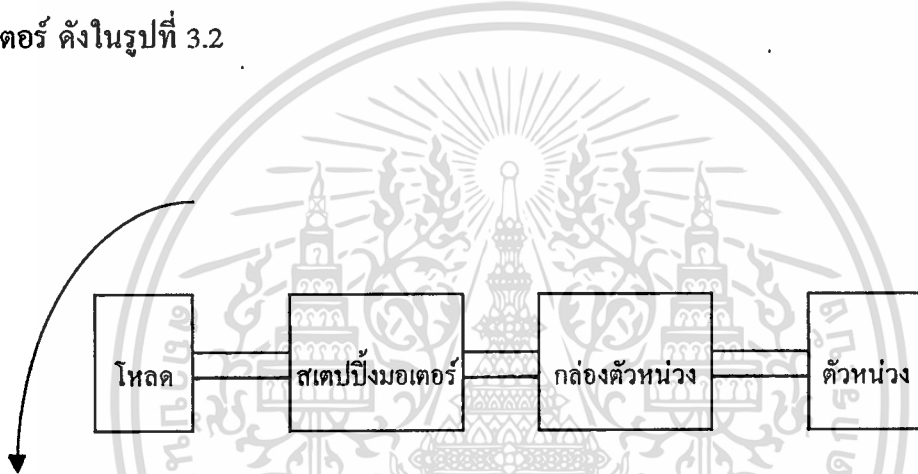
เป็นรูปแบบหนึ่งของการปรับปรุงการหน่วงให้กับสเตปป์มอเตอร์ โดยต่ออุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นการเพิ่มความหนืด ต่อเข้ากับแกนโรเตอร์ของสเตปป์มอเตอร์ อุปกรณ์เหล่านี้จะมีลักษณะเป็นตัวหน่วง หรือตัวต้าน (brakes) ที่มีราคาไม่สูงมากนัก มีด้วยกันหลายขนาด วิธีการนี้เป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยในการปรับปรุงผลตอบสนองของแต่ละสเตปป์ให้ดีขึ้น แต่ก็พบว่ามิชอบจำกัดในการนำไปใช้งาน คือจะเป็นการเพิ่มโหลดให้กับสเตปป์มอเตอร์ ทำให้สเตปป์ที่ได้ไม่ถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

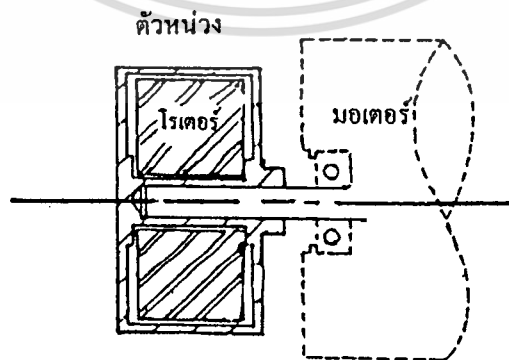
ต้อง ค่าแรงเฉื่อยของระบบมีค่ามากขึ้นและยังสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อน สเตปป์มอเตอร์ทำงานมากขึ้นกว่าเดิม [3]

1. ตัวหน่วงแบบแรงหนืดเฉื่อย (viscous inertia damper)

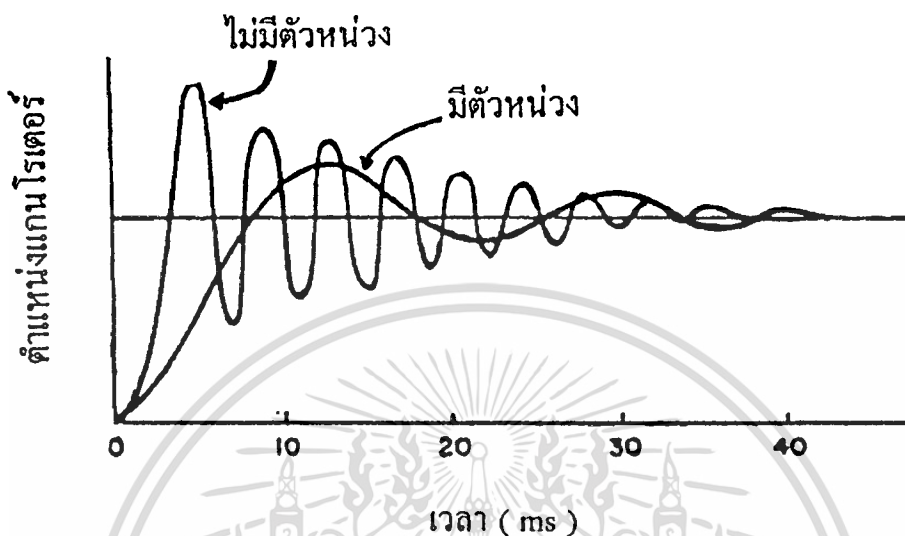
ตัวหน่วงแบบนี้จะมีโครงสร้างประกอบไปด้วย แท่งโลหะเฉื่อย (inertia) อยู่ในกล่องที่เป็นวัสดุแบบแข็งเกร็ง (rigidly) แล้วถูกต่อเข้ากับแกนโรเตอร์ของสเตปป์มอเตอร์ ภายในกล่องนี้จะมีซิลิโคนเหลวอยู่ภายใน ที่มีสมบัติความหนืดสูง แท่งโลหะนี้จะมีอิสระในการหมุนได้อยู่ภายในกล่อง จะเห็นว่าการหน่วงแบบนี้คือการเพิ่มแรงเฉื่อยเข้าไปในระบบของสเตปป์มอเตอร์ ดังในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการต่อตัวหน่วงแบบแรงหนืดเฉื่อยเข้ากับสเตปป์มอเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะภายในเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงผลตอบสนองของสเทปปีงมอเตอร์ ที่ได้จากการใช้ตัวหน่วง แบบแรงหนืดเฉื่อย

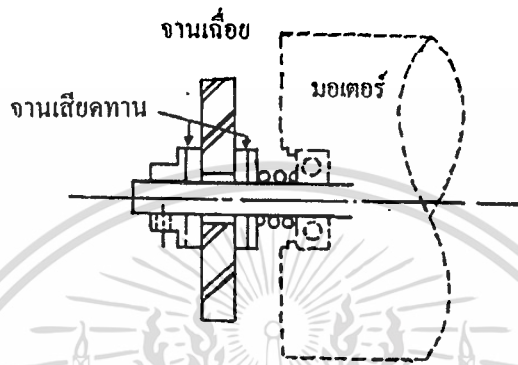
จะเห็นว่าการหน่วงด้วยวิธีนี้นั้นสามารถลดการเกิดโอเวอร์ชูตการสั่งตั้งของแกนโรเตอร์ลงได้ในระดับหนึ่งแต่เวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวยังมีค่ามาก ข้อสังเกตการหน่วงด้วยวิธีนี้เป็นการเพิ่มแรงเฉื่อยให้กับระบบอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นจะเห็นว่าการหน่วงด้วยวิธีนี้มีข้อเสียหลายประการ เช่น เพิ่มแรงเฉื่อยให้กับระบบ ลดความเร็วของระบบ เกิดการรั่วไหลของของเหลวในกล่องได้ ไม่สามารถลดการเกิดโอเวอร์ชูตและการสั่งลงได้หมด [3]

2. ตัวหน่วงแบบแรงเสียดทานเฉื่อย (friction inertia damping)

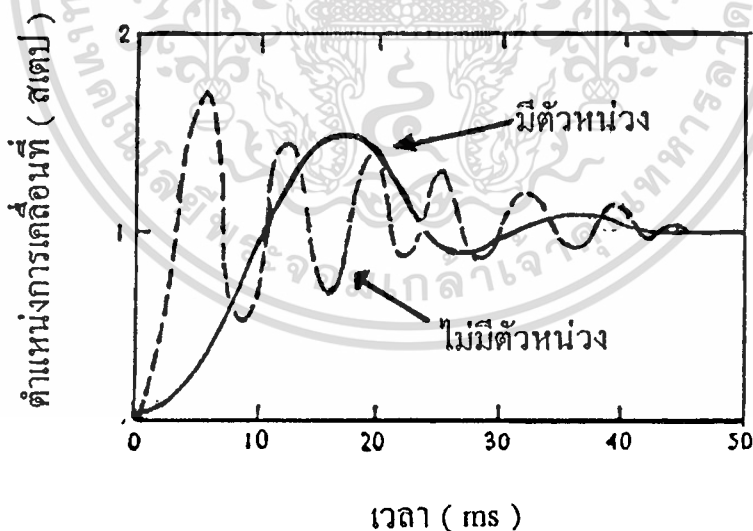
ตัวหน่วงชนิดนี้ประกอบไปด้วยวงล้อแรงเฉื่อย ที่อยู่ตรงกลางแผ่นจานแรงเสียดทานแบบสปริงโหลด (spring loaded friction disk) ทั้งสอง สามารถเลื่อนไถลไปมาระหว่างแผ่นจานทั้งสองได้ เมื่อนำไปต่อเข้ากับแกนโรเตอร์ของมอเตอร์ดังในรูปที่ 3.5 ผลของแรงเฉื่อยจากตัวหน่วงจะไปต้านความเร็วในการหมุนของตัวโรเตอร์ ช่วยให้การสั่งตัวของแกนโรเตอร์ที่เคลื่อนที่อยู่น้อยลง การหน่วงนี้เป็นการทำให้พลังงานจลน์ ที่ได้จากการหมุนของโรเตอร์ จะถูกเปลี่ยนไปในรูปของความร้อน และกระจายออกไปอยู่ในบริเวณของวงล้อกับแผ่นจานแรงเสียดทาน ค่าแรงหน่วงสามารถปรับได้จากความดันสปริง วิธีดังกล่าวนี้ยังมีการข้อจำกัดในการนำไปใช้งานคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่สามารถลดการเกิดโอเวอร์ชูทการสั่นตัวของแกนโรเตอร์ลงได้หมด ค่าการหน่วงมีค่าไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของระบบ เป็นเพิ่มโหลดและแรงเฉื่อยให้กับระบบ [3]



รูปที่ 3.5 แสดงการต่อตัวหน่วงแบบแรงเสียดทานเฉื่อยเข้ากับสเตปป์มอเตอร์



รูปที่ 3.6 แสดงผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์ ที่ได้จากการใช้ตัวหน่วงแบบแรงเสียดทานเฉื่อย

นอกจากนี้ยังมีตัวหน่วงแบบกลอีกหลายชนิด เช่น ตัวหน่วงแบบแรงหนืด (viscous damper) ตัวหน่วงแบบแรงเฉื่อยกระแสแอดคทีฟ ตัวหน่วงแบบนิวเมติก ก็มีข้อเสียเหมือนกับ

ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวหน่วงดั่งที่กล่าวมาข้างต้น ตัวหน่วงเหล่านี้ไม่สามารถลดการเกิด โอเวอร์ชูทและการสั่นลงได้หมด เป็นการเพิ่มโหลดและแรงเฉื่อยให้กับระบบ [3]

3.2.2 การหน่วงแบบอิเล็กทรอนิกส์

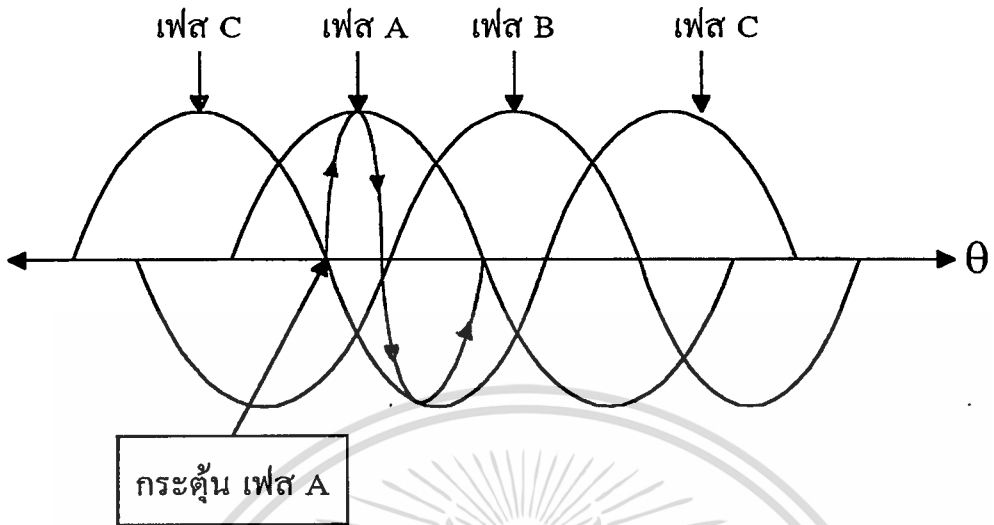
การหน่วงแบบอิเล็กทรอนิกส์ (electronics damping) ค่อนข้างจะเป็นที่นิยมใช้ในการปรับปรุงผลตอบสนองของสเตปปีงมอเตอร์มากกว่าการหน่วงแบบกล อันเนื่องมาจากความสะดวกในการจัดสร้างฮาร์ดแวร์ ควบคุมการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ได้ ซึ่งสามารถจัดลำดับการสวิตช์ กระแสให้กับขดลวดของมอเตอร์ได้ตามต้องการกับเวลาที่เหมาะสม ไม่เป็นการเพิ่มโหลดและแรงเฉื่อยให้กับตัวมอเตอร์ ค่าการหน่วงที่ได้มีค่าคงที่กว่าการหน่วงแบบกล วิธีการนี้เป็นรูปแบบหนึ่งของการสร้างแรงหน่วงให้กับสเตปปีงมอเตอร์เพื่อช่วยปรับปรุงผลตอบสนอง แต่ก็มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งานจริง เช่น การหน่วงแบบเบง-เบง ต้องกระตุ้นเฟสย้อนกลับไปเฟสที่แล้วที่เพิ่งหยุดการทำงานลงไป แล้วจึงกลับมากระตุ้นเฟสปัจจุบันอีกครั้ง จึงจะได้ผลตอบสนองที่ลดโอเวอร์ชูทลงได้ ส่วนในกรณีของการหน่วงแบบดีเลย์สเตปสุดท้ายไม่สามารถให้ผลตอบสนองแบบสเตปเดียวได้แต่จะให้ผลตอบสนองแบบสามสเตป จะเห็นว่าไม่สะดวกต่อการควบคุม[3],[1]

1. การหน่วงแบบเบง-เบง (Bang-Bang damping)

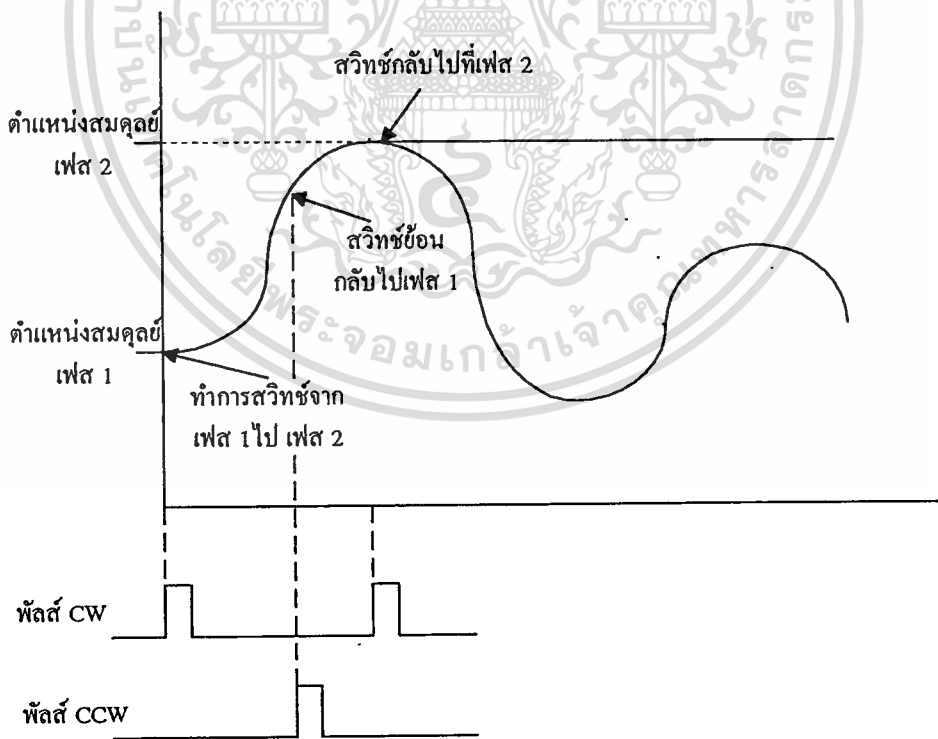
วิธีการหน่วงแบบอิเล็กทรอนิกส์วิธีนี้เป็นที่รู้จักกันดีในชื่อของการป้อนพัลส์ย้อนกลับเฟส (back phasing) ใช้วิธีการสร้างแรงบิด (torque) ที่มีค่าเป็นลบ จากเฟสที่แล้วที่เพิ่งจะหยุดจ่ายกระแสให้ โดยอธิบายการทำงานได้ดังนี้ พิจารณารูป 3.7 และ 3.8 ประกอบ เริ่มต้น สมมติว่าเฟส C ของมอเตอร์อยู่ในสถานะสมดุล เราต้องการกระตุ้นสเตปปีงมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ไป 1 สเตป โดยไม่มีการสั่น จะเห็นว่าที่เวลา $t=0$ เฟส C อยู่ในสถานะสมดุล ขณะเดียวกันเฟส A ก็ได้รับการกระตุ้น ทำให้ค่าของแรงบิดที่ได้จากการกระตุ้นเฟส A จะมีค่าที่สูงมาก เป็นผลให้โรเตอร์เมื่อเคลื่อนที่ไปถึงจุดสมดุลใหม่ เกิดโอเวอร์ชูทและการสั่นขึ้น ดังนั้น ในการปรับปรุงผลตอบสนองไม่ให้เกิดการสั่นขึ้น คือ ต้องสร้างแรงต้าน (braking torque) ต่อแรงบิดจากการกระตุ้นเฟส A ซึ่งแรงต้านนี้ก็คือ การกระตุ้นย้อนกลับเฟส ในที่นี้ก็คือ การกระตุ้นเฟส C ใหม่ (จากเฟส A ไปสู่เฟส C) ด้วยจังหวะของเวลาที่เหมาะสม ซึ่งแรงต้านนี้จะช่วยไปหักล้างแรงบิดที่เกิดจากเฟส A ให้มีค่าพอดีที่จะช่วยให้โรเตอร์เคลื่อนที่ไปถึงจุดสมดุลใหม่ได้พอดี โดยไม่มีการเกิดโอเวอร์ชูทและการสั่น ลำดับการกระตุ้นเฟสของการหน่วงแบบ [2],[3] ในกรณีของรูปที่

เอกสาร 3.7 และ 3.8 คือ C-A-C-A สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

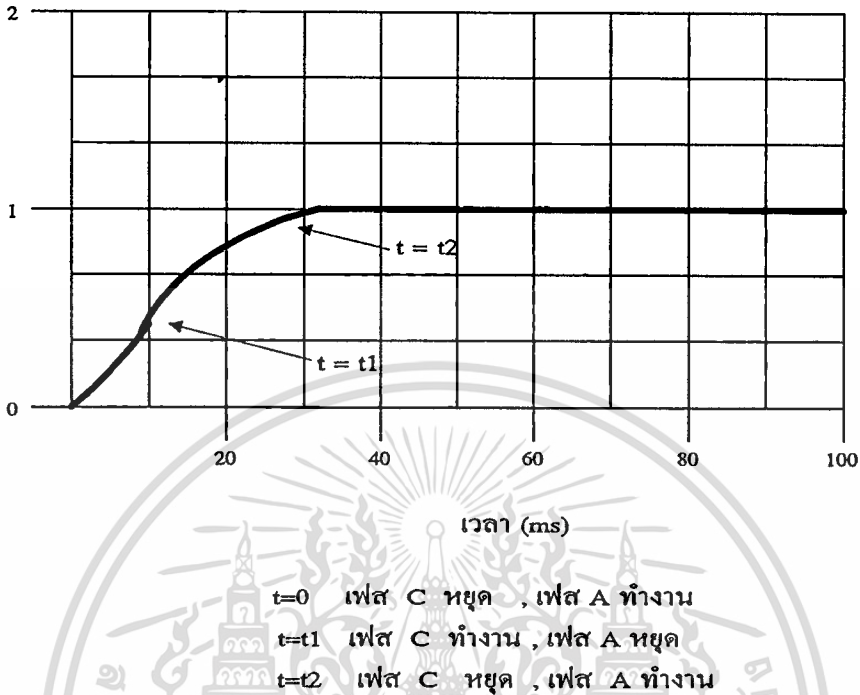


รูปที่ 3.7 แสดงแรงบิดสแตติกกับวิธีการหน่วงแบบ แบน-แบน



รูปที่ 3.8 แสดงลำดับสวิตช์การทำงานของวิธีการหน่วงแบบ แบน-แบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

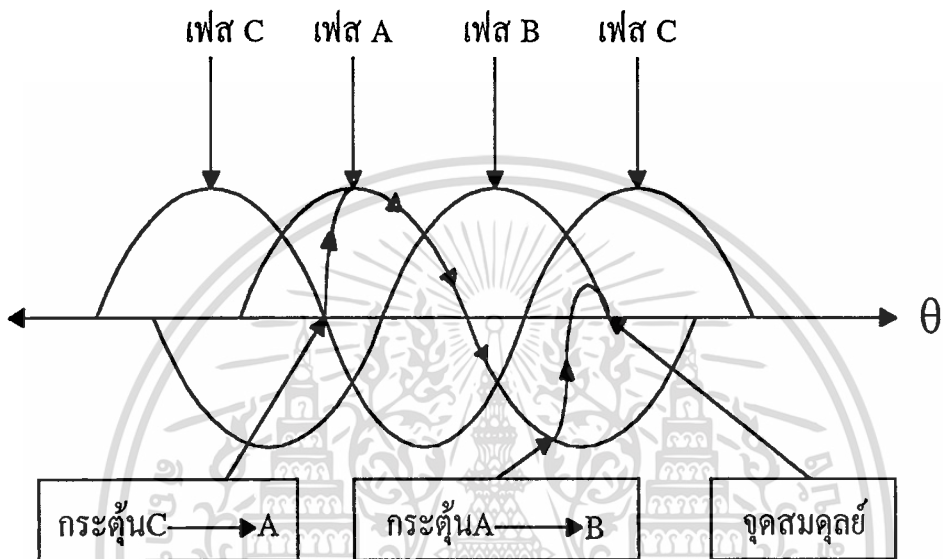


รูปที่ 3.9 แสดงผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์ที่ได้จากการใช้วิธีการหน่วงแบบ แบน-แบน

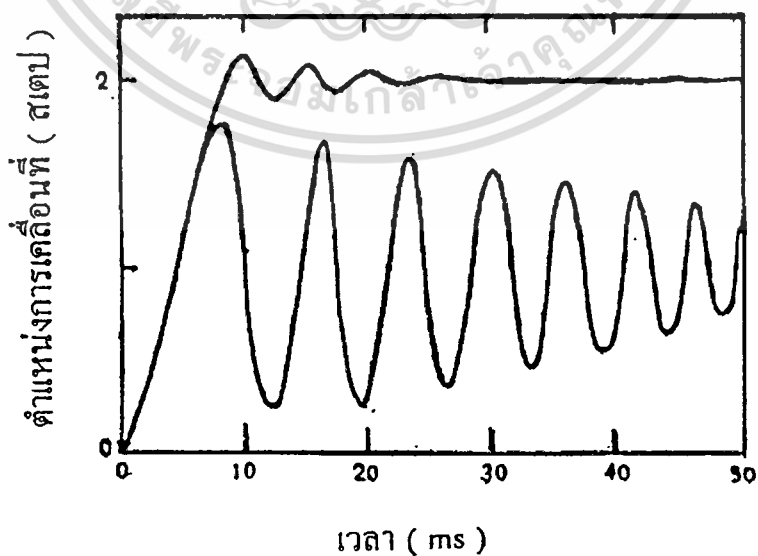
2. การหน่วงด้วยวิธีการดีเลย์สเตปสุดท้าย (delayed last step damping)

วิธีการนี้จะเกี่ยวข้องกับเวลาที่ดีเลย์ การกระตุ้นพัลส์สุดท้ายให้กับสเตปป์มอเตอร์ ซึ่งนำไปประยุกต์ใช้งานได้ แต่ต้องกระตุ้นสเตปป์มอเตอร์ให้ทำงาน ครั้งละมากกว่า 2 เฟส วิธีการนี้อาศัยประโยชน์จากการที่ผลตอบสนองแต่ละสเตปของสเตปป์มอเตอร์ จะเกิดการสั่นและโอเวอร์ชูทที่สูงมาก ดังนั้น จึงเป็นไปได้ที่จะกระตุ้นสเตปป์มอเตอร์ครั้งละหลายเฟสต่อเนื่อง เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ต่อเนื่องแบบทวีค่า [1],[3] โดยปราศจากแรงสั่นและโอเวอร์ชูท เมื่อกระตุ้นสเตปป์มอเตอร์ให้เคลื่อนที่ไป 1 สเตป จะพบว่าเมื่อแกนโรเตอร์เคลื่อนที่ไปถึงตำแหน่งที่จุดสมดุล จะเกิดการสั่นและโอเวอร์ชูทขึ้น ณ ที่จุดสมดุลนั้น แต่การเกิดโอเวอร์ชูทนั้น ทำให้แกนโรเตอร์เคลื่อนที่ไปเกือบถึงจุดสมดุลของสเตปถัดไป ดังนั้น ถ้าเราป้อนพัลส์สุดท้ายด้วยการดีเลย์ ด้วยช่วงเวลาที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ราบเรียบแบบต่อเนื่อง โดยมีการสั่นเล็กน้อย การทำงานด้วยวิธีดังกล่าว อธิบายด้วยแรงบิดสแตติก ดังในรูป 3.10 เมื่อเราเคลื่อนที่ไป 2 สเตป เริ่มจากกระตุ้นเฟส C แล้วไปกระตุ้นเฟส A ในแบบต่อเนื่องติดกัน โดยมีลำดับการกระตุ้นดังนี้ C-A-B เนื่องจากเฟส C มีผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์มีค่าโอเวอร์ชูทที่สูง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาก ดังนั้น ถ้ากระตุ้นเฟส B ต่อ ตำแหน่งแกนโรเตอร์จะมีค่าแรงบิดที่น้อย ซึ่งจะทำให้แกนโรเตอร์ถึงจุดสมดุลได้ โดยอาศัยแรงส่งจากโอเวอร์ชูทของสเตปก่อนหน้านี้ โดยที่การเคลื่อนที่ของสเตปใหม่นี้ จะมีโอเวอร์ชูทเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย [3] ดังในรูปที่ 3.11

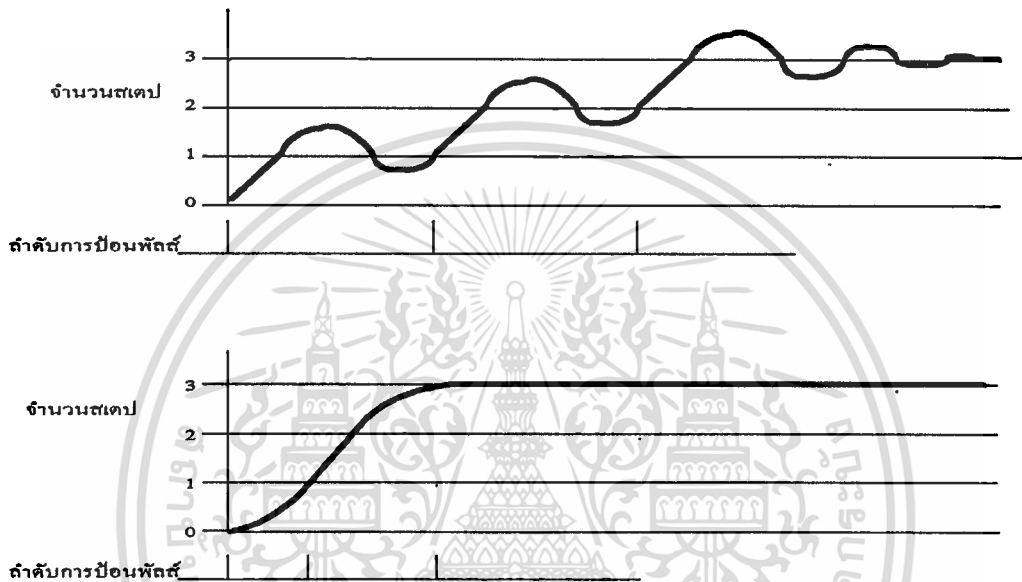


รูปที่ 3.10 แสดงแรงบิดสแตตคกับวิธีการหน่วงแบบดีเลย์สเตปสุดท้าย



เอกสารนี้รูปที่ 3.11 แสดงผลตอบสนองของสเตปปีงมอเตอร์ที่ใช้วิธีการหน่วงแบบดีเลย์สเตปสุดท้าย ในการคำนวณการคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

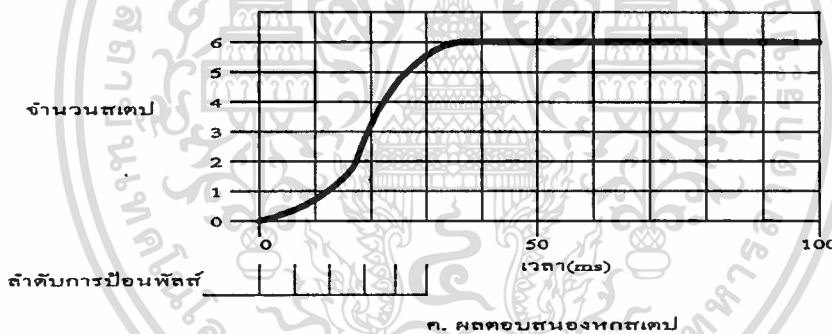
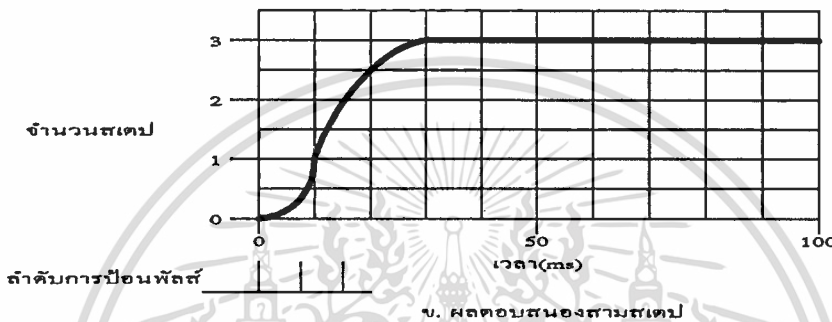
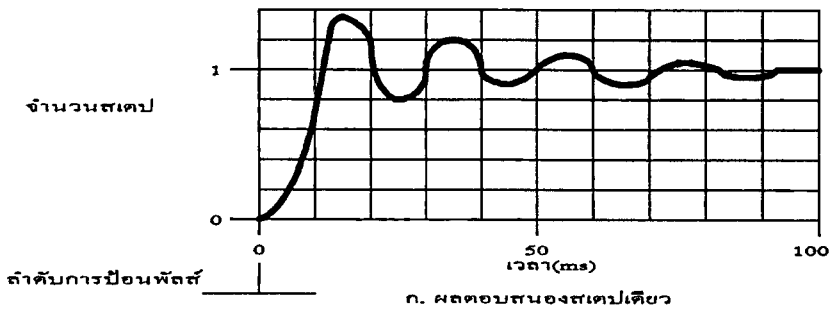
เทคนิควิธีนี้มีข้อเสียคือ ต้องกระตุ้นสเตปป์ิงมอเตอร์แบบต่อเนื่องครั้งละมากกว่า 2-3 สเตป เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ราบเรียบ ดังนั้น ถ้าสเตปป์ิงมอเตอร์มีจำนวน 4 เฟส ก็ต้องกระตุ้นครั้งละ 4 สเตป แบบต่อเนื่องจึงจะได้ผลตอบสนองที่ราบเรียบ [1]



รูปที่ 3.12 แสดงลำดับวิธีการป้อนพัลส์ของวิธีการหน่วงแบบคิเลี่ยสเตปป์สุดท้าย

3. การหน่วงแบบกำหนดช่วงห่างของพัลส์ให้มีค่าคงที่ (constant pulse rate damping)

วิธีดังกล่าวนี้ มีหลักการคล้าย ๆ กับวิธีการหน่วงคิเลี่ยแบบสุดท้าย เพียงแต่วิธีนี้ใช้วิธีการกำหนดระยะเวลาความห่างของการป้อนพัลส์ให้มีค่าเท่ากัน โดยทำการป้อนพัลส์เรียงติดกันต่อเนื่อง ซึ่งต้องป้อนพัลส์ครั้งละ 3 สเตปป์ติดกัน ให้ช่วงห่างของเวลาการป้อนพัลส์มีค่าคงที่ ก็จะสามารถได้ผลตอบสนองที่ค่อนข้างราบเรียบ หรือมีโอเวอร์ชูทเพียงเล็กน้อย แต่จะได้ผลตอบสนองแบบหลายสเตปป์แบบต่อเนื่อง นอกจากนี้ถ้าป้อนพัลส์เพิ่มขึ้นครั้งละหลาย ๆ สเตปป์แบบต่อเนื่อง ที่มากขึ้นก็จะช่วยลดโอเวอร์ชูทและการสั่นลงได้ ซึ่งวิธีดังกล่าวก็ยังจำเป็น ต้องกระตุ้นสเตปป์ิงมอเตอร์ครั้งละหลายสเตปป์ จึงจะช่วยลดการเกิดการสั่น และโอเวอร์ชูทลงได้ [1]



รูปที่ 3.13 แสดงผลตอบสนองแบบสเตปเดียว กับผลตอบสนองแบบหลายสเตป
ที่ได้จากการห้วงด้วยวิธีกำหนดช่วงห่างของพัลส์ ให้มีค่าคงที่

ดังนั้น จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ถึงวิธีการห้วงแบบต่าง ๆ จะเห็นว่า การห้วงแบบกลนั้นก็มีข้อเสียหลายประการ เช่น เป็นการเพิ่มโหลดให้กับสเตปปิ้งมอเตอร์ หรือการปรับแต่งค่าแรงห้วง ส่วนการห้วงแบบอิเล็กทรอนิกส์ดังที่กล่าวมาก็พบว่ามีข้อเสียเช่นเดียวกับการห้วงแบบกล จะต้องการตั้งสเตปปิ้งมอเตอร์ ครั้งละหลายสเตป จึงจะสามารถลดการเกิดโอเวอร์ชูท และการสั่นลงได้ ไม่สามารถให้สเตปการเคลื่อนที่แบบสเตปเดียวได้ [1],[3]

การเคลื่อนที่ของโรเตอร์จะมีค่าความสัมพันธ์กับแรงบิดในแต่ละเฟสโดยเป็นฟังก์ชันของไซน์นูซอยดอล (sinusoidal) กราฟแสดงคุณลักษณะของกระแสกับแรงบิด เป็นไปดังในรูปที่ 3.14 และ 3.15 ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้ คือ

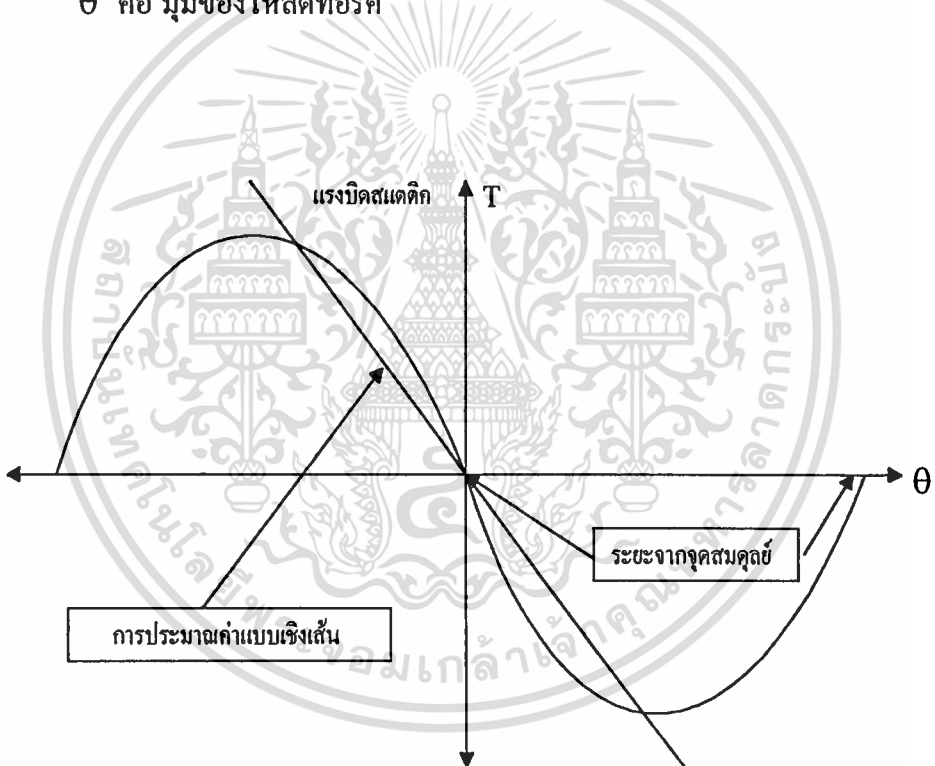
$$T = CN_r I_m \sin \theta \quad 3.4$$

C คือ ค่าคงที่ของแรงบิด

N_r คือ จำนวนซี่ฟันของโรเตอร์

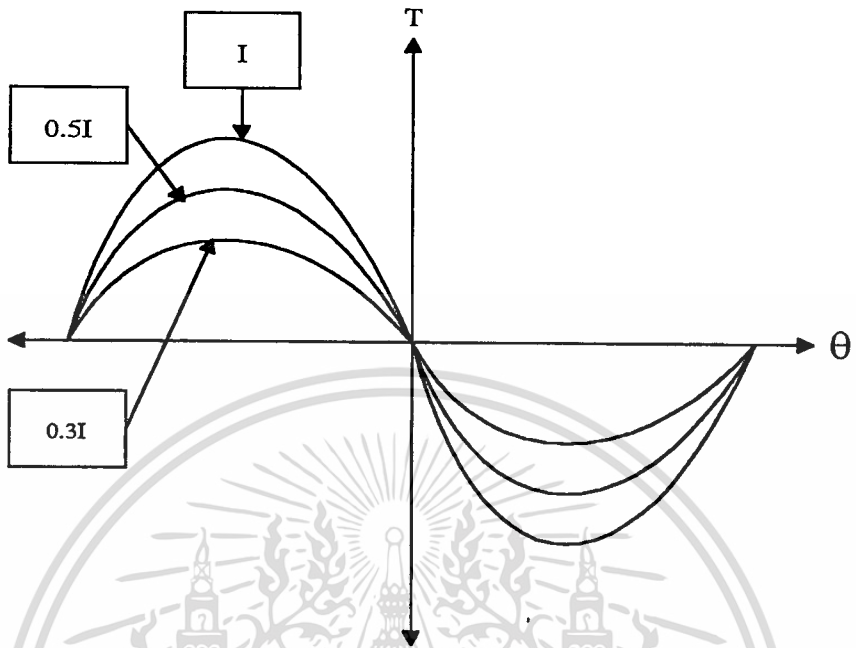
I_m คือ กระแสที่ไหลในขดลวด

θ คือ มุมของโพลทอร์ค



รูปที่ 3.14 แสดงกราฟของแรงบิดกับมุมการเคลื่อนที่และการประมาณค่าแบบเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 แสดงกราฟของแรงบิดกับมุมการเคลื่อนที่ ที่สัมพันธ์กับกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

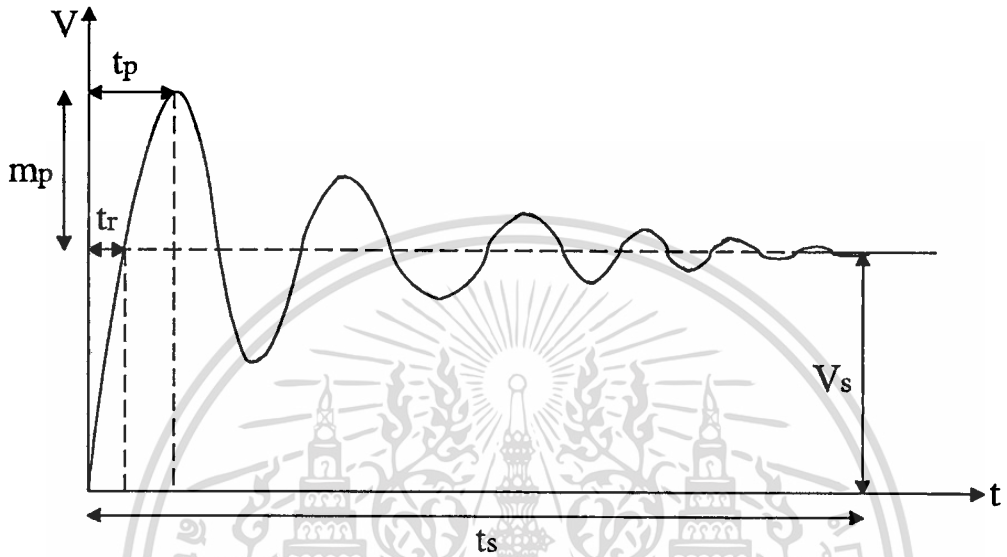
การลดโอเวอร์ชูทของสเตปปีงมอเตอร์ โดยการใช้วิธีการหน่วงกระแส

4.1 บทนำ

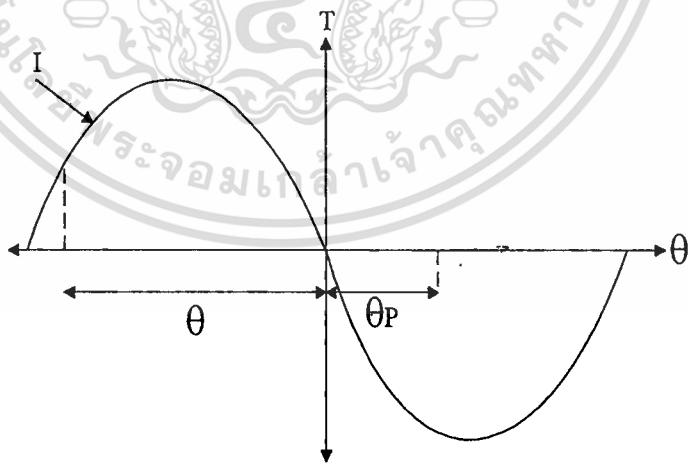
โดยทั่วไปการควบคุมการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์โดยป้อนพัลส์กระแสแบบดิจิทัลพัลส์ เข้าไปที่วงจรถับนั้น จะมีผลทำให้ผลตอบสนองที่ได้ในแต่ละสเตป เกิดการสั่นและโอเวอร์ชูทขึ้น โดยมีค่าเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวที่มีค่ามาก แต่สำหรับการนำสเตปปีงมอเตอร์สิ่งที่ต้องการคือ ตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่ถูกต้องและรวดเร็วปราศจากการสั่น แต่โดยทั่วไปผลตอบสนองที่ได้จะมีความรวดเร็วในการถึงตำแหน่งสมดุลย์แต่จะเกิดการเคลื่อนที่ ที่เลยไปจากสมดุลย์ ซึ่งบางที อาจสูงถึง 80 เปอร์เซ็นต์และเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวอาจมากถึงเป็นร้อยมิลลิวินาที จะเห็นว่าปัญหาที่เกิดจากการสั่นและโอเวอร์ชูทนี้เป็นสิ่งที่ทำให้สเตปปีงมอเตอร์มีความเร็วในการทำงานได้ช้าลงและเกิดสเตรปการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาดได้ ดังนั้น ถ้ามีการนำสเตปปีงมอเตอร์ไปประยุกต์ใช้งาน เช่น ในระบบเครื่องพิมพ์ (printer) , เครื่องพล็อตเตอร์ (plotter) หรือเครื่องโทรเลข (teletype) ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะต้องทำงานในการพิมพ์ตัวอักษรแต่ละตัว ซึ่งความเร็วของการพิมพ์ตัวอักษรเหล่านี้จะถูกจำกัดด้วยปัญหาของการสั่นและโอเวอร์ชูท ดังนั้นแนวทางในการเพิ่มความเร็วของการพิมพ์ตัวอักษร ก็คือการกำจัดหรือทำให้แต่ละสเตปของการเคลื่อนที่ไม่ให้เกิดการสั่นและโอเวอร์ชูท ก็จะช่วยให้สเตปปีงมอเตอร์ทำงานได้รวดเร็วขึ้น [4] ซึ่งวิธีแก้ปัญหาดังกล่าวมีหลายแบบตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ซึ่งแต่ละแบบล้วนมีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอแนวทางใหม่ในการควบคุมการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ไม่ให้เกิดการสั่นและโอเวอร์ชูท โดยใช้หลักการการหน่วงกระแส โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุม ซึ่งสามารถควบคุมกระแสที่นำไปใช้ขับสเตปปีงมอเตอร์ในแต่ละเฟส ไม่ให้เกิดการสั่นและโอเวอร์ชูทได้อย่างเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งสามารถควบคุมการขับเพียงครั้งละหนึ่งเฟส โดยทำการสร้างสัญญาณกระแสที่ใช้ขับสเตปปีงมอเตอร์ ให้มีลักษณะเป็นขั้นบันไดไปควบคุมการขับสเตปปีงมอเตอร์ ในแต่ละเฟสเพื่อให้ได้ผลตอบสนองของแต่ละสเตปที่มีลักษณะราบเรียบ ปราศจากการเกิดการสั่นและโอเวอร์ชูท การขับด้วยสัญญาณกระแสแบบขั้นบันไดนี้สามารถให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าการขับแบบสัญญาณดิจิทัลพัลส์ทั่วไปที่นิยมใช้กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 หลักการวิธีการหน่วงกระแส และการสร้างสัญญาณการควบคุม



รูปที่ 4.1 ผลตอบสนองโดยทั่วไปของสเตปป์ิงมอเตอร์



รูปที่ 4.2 แสดงกราฟคุณลักษณะของแรงบิด T- θ ที่ได้จากการป้อนกระแสแบบดิจิตอลพัลส์

m_p คือ ค่าการเกิดโอเวอร์ชูท

V_s คือ ค่าโวลเตจที่ถึงสภาวะคงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรรเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V_d คือ ค่าโวลเตจที่คิเล็บบนขั้วบันได

I_d คือ ค่ากระแสที่คิเล็บบนขั้วบันได

V คือ ค่าโวลเตจมากที่สุดที่ใช้สร้างสัญญาณควบคุม

I คือ ค่ากระแสที่ใช้ขับสเตปป์มอเตอร์

t_r คือ เวลาที่ถึงสภาวะคงตัว

t_p คือ เวลาที่ถึงการเกิดโอเวอร์ชูท

t_d คือ เวลาที่ใช้คิเล็บบนขั้วบันไดเพื่อสร้างสัญญาณแบบขั้วบันได

θ คือ มุมที่โรเตอร์เคลื่อนที่ไป

K_A คือ ค่าคงที่ของวงจรแปลงโวลเตจเป็นกระแส

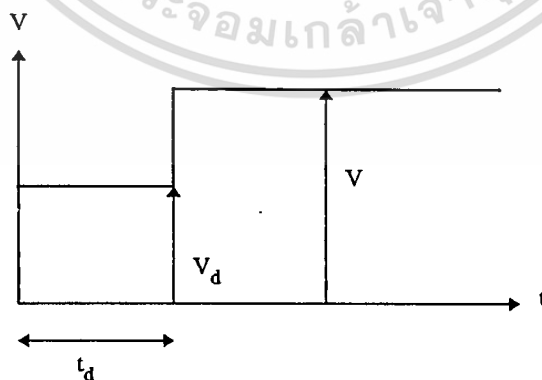
ω คือ ความถี่เชิงมุม

เมื่อสเตปป์มอเตอร์เคลื่อนที่ไปหนึ่งสเตป ด้วยกระแส I จะได้มุมสเตปพร้อมเกิดการสั่นและโอเวอร์ชูท ซึ่งมุมการเคลื่อนที่คือ

$$\theta_P = \omega t_P \quad 4.1$$

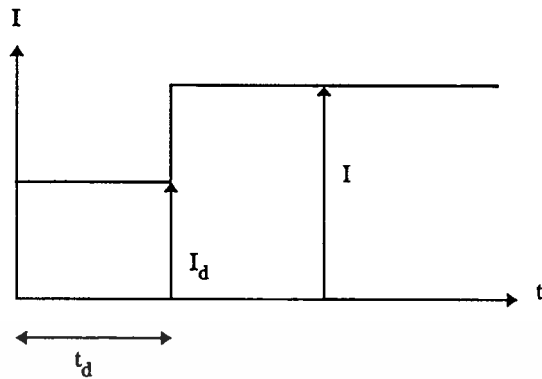
ดังนั้น มุมการเกิดโอเวอร์ชูท คือ

$$\theta_{mp} = \omega (t_P - t_r) \quad 4.2$$



ก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข.

รูปที่ 4.3 แสดงสัญญาณควบคุมแบบโวลเตจและกระแสที่เป็นขั้นบันได

ก. สัญญาณ โวลเตจแบบขั้นบันไดที่ดีที่สุด

ข. สัญญาณกระแสแบบขั้นบันไดที่ดีที่สุด

ณ จุดสมดุลที่ไม่เกิดโอเวอร์ชูท คือ $\theta_p - \theta_{mp} = \omega t_p - \omega (t_p - t_r)$ 4.3

ถ้าเราควบคุมด้วยกระแสแบบขั้นบันไดให้หยุดพอดี ณ จุดสมดุล จะได้ว่า

$$\theta = \omega_d t_d \tag{4.4}$$

ดังนั้น จะได้ว่า การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ที่หยุด ณ จุดสมดุลพอดี คือ สมการ 4.3 เท่ากับ 4.4

$$\theta_p - \theta_{mp} = \theta \tag{4.5}$$

$$\omega t_p - \omega (t_p - t_r) = \omega_d t_d \tag{4.6}$$

$$\omega t_r = \omega_d t_d \tag{4.7}$$

จากสมการ 4.40 [1] จะได้ว่า $\omega = K_t I$ 4.8

ดังนั้น $\omega_d = K_t I_d$ 4.9

แทนค่า 4.8 , 4.9 ลงใน 4.7 จะได้

$$K_t I t_r = K_t I_d t_d \tag{4.10}$$

$$(t_r / t_d) = (I_d / I) \tag{4.11}$$

แต่จากความสัมพันธ์ระหว่างโวลเตจและกระแสของวงจรแปลงโวลเตจเป็นกระแสซึ่งมีความ

เอกลักษณ์กันดังนี้คือ เอกสารนี้จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = K_A I \quad 4.12$$

ดังนั้นจะได้ว่า $t_r / t_d = I_d / I = (V_d / V) \quad 4.13$

โดยที่ค่า $I_d = I - I_p \quad 4.14$

โดยที่ค่า I_p คือค่ากระแสที่ได้จากค่าโวลเตจ ของการเกิด โอเวอร์ชูท

$$I_p = (m_p / K_A) \quad 4.15$$

$$I = (V / K_A) \quad 4.16$$

$$I_d = (V_d / K_A) \quad 4.17$$

แทนค่า 4.15 ถึง 4.17 ลงใน 4.14 จะได้ว่า $V_d = V - V_p \quad 4.18$

นำความสัมพันธ์จากสมการ 4.13 ทำการสร้างสัญญาณการควบคุมดังในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.4 แสดงสัญญาณโวลเตจและกระแสควบคุมแบบขั้นบันไดที่สร้างขึ้นใช้ในการทดลอง

สัญญาณบน : โวลเตจ (0.2 V/ DIV)

สัญญาณล่าง : กระแส (10 mV/ 0.2 A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 ส่วนประกอบของระบบการหน่วงกระแสที่ได้รับการออกแบบ

ส่วนประกอบของระบบการควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบหน่วงกระแส ที่ได้ออกแบบขึ้นและนำไปใช้ทำการทดลองประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

4.3.1 วงจรระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCS-51)

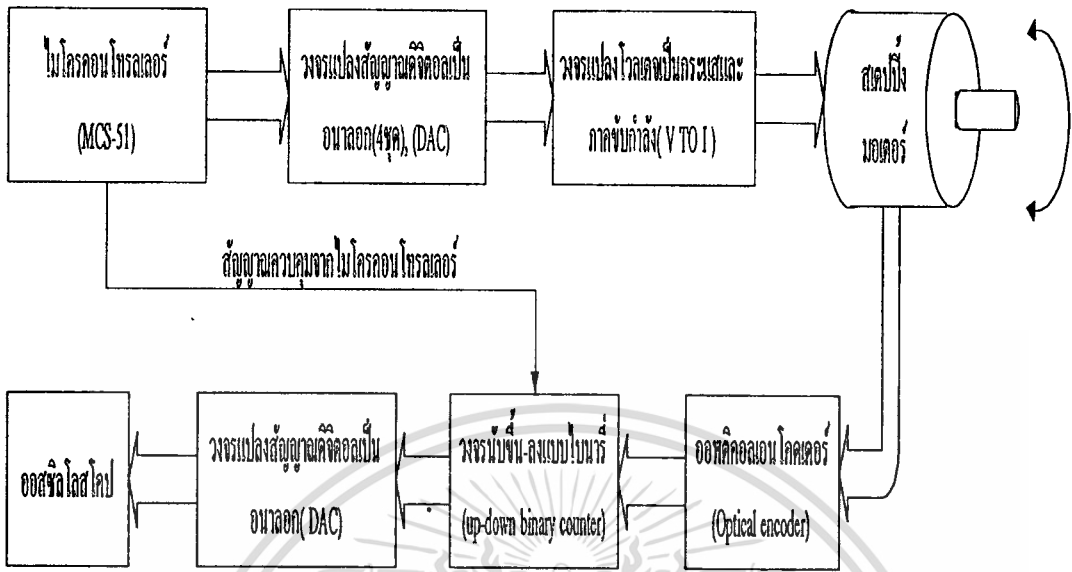
4.3.2 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก (Digital to Analog converter : DAC)

4.3.3 วงจรควบคุมแปลงโวลเตจเป็นกระแส และภาคขับกำลังสเตปป์มอเตอร์ (Voltage to Current converter and Driver Control : V TO I)

4.3.4 วงจรเอนโคดเดอร์ , วงจรนับขึ้น-ลงแบบไบนารี (Encoder and Up-Down Binary Counter) และ วงจรตรวจจับสเตปป์การเคลื่อนที่ ผลตอบสนอง (Step response detector)

ระบบที่ออกแบบขึ้นใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCS-51) ของอินเทลเบอร์ 8032 เป็นตัวควบคุมการทำงานหรือหน่วยประมวลผลกลางของระบบ ทำการสร้างสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันไดแบบดิจิตอลผ่านทางไอซีแบบพอร์ท เบอร์ 8255 แล้วส่งผ่านวงจร DAC ทำการแปลงเป็นสัญญาณอนาลอก วงจร DAC หรือ วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็น อนาลอก จำนวน 4 ชุด แต่ละชุดมีความละเอียด 8 บิต ซึ่งเป็นส่วนทำหน้าที่รับสัญญาณควบคุมจาก ไมโครคอนโทรลเลอร์ สัญญาณอนาลอกที่ได้จากเข้าที่พอร์ทนี้ ของวงจร DAC นี้ จะถูกส่งต่อไปให้กับวงจรควบคุมกระแส (V TO I) และภาคขับกำลังเพื่อควบคุมปริมาณกระแส ให้เป็นไปตามสัดส่วนกับสัญญาณควบคุมจากวงจร DAC วงจรควบคุมแปลงโวลเตจเป็นกระแส และภาคขับกำลัง เป็นวงจรที่ใช้อุปกรณ์เพาเวอร์ ออฟแอมป์ ทำงานร่วมกับเพาเวอร์ ทรานซิสเตอร์ จำนวน 4 ชุด เพื่อใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ จำนวน 4 เฟส ซึ่งวงจร V TO I ใช้ควบคุมปริมาณกระแสให้เป็นสัดส่วนและเชิงเส้นต่อสัญญาณอินพุท วงจรภาคเอนโคดเดอร์ และวงจรมับขึ้น-ลง แบบไบนารี ภาคเอนโคดเดอร์เป็นส่วนที่ใช้ติดตามการเคลื่อนที่ของตัวโรเตอร์ ส่วนวงจรมับขึ้น-ลงแบบไบนารี นั้น เป็นส่วนที่ใช้นับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของตัวแกนโรเตอร์ โดยสัญญาณที่ได้จากการนับจะอยู่ในรูปของสัญญาณดิจิตอลแบบไบนารี จากนั้นก็จะต้องถูกส่งต่อไปที่ภาคตรวจจับผลตอบสนองของสเตปป์ของการเคลื่อนที่ของสเตปป์มอเตอร์ (DAC) เพื่อใช้สังเกตผลตอบสนองที่ได้ผ่านทางออสซิลโลสโคปต่อไป

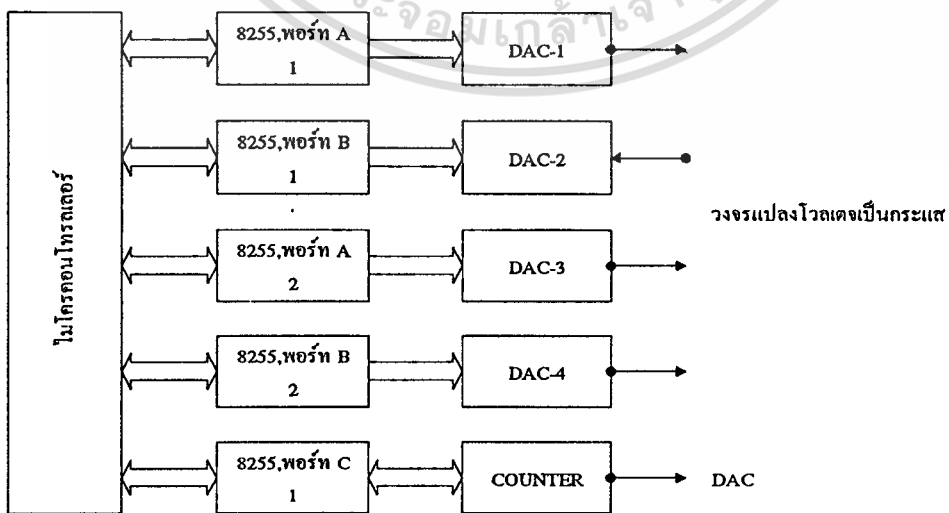
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบการหน่วงกระแสที่ออกแบบขึ้น

4.3.1 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCS 51)

เป็นส่วนที่ใช้สร้างสัญญาณควบคุม โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ของอินเทลเบอร์ 8032 เป็นหน่วยประมวลผลสัญญาณผ่านพอร์ต โดยใช้ไอซีของอินเทลเบอร์ 8255 จำนวน 2 ตัว ซึ่งใช้พอร์ต A และพอร์ต B ของทั้ง 2 ตัว รวมกันเป็น 4 พอร์ต ซึ่งพอร์ตทั้ง 4 นี้ ถูกเชื่อมต่อเข้ากับวงจร DAC โดยที่แต่ละพอร์ตมีความละเอียด 8 บิต สามารถสร้างสัญญาณได้ 256 ระดับ (0-255)



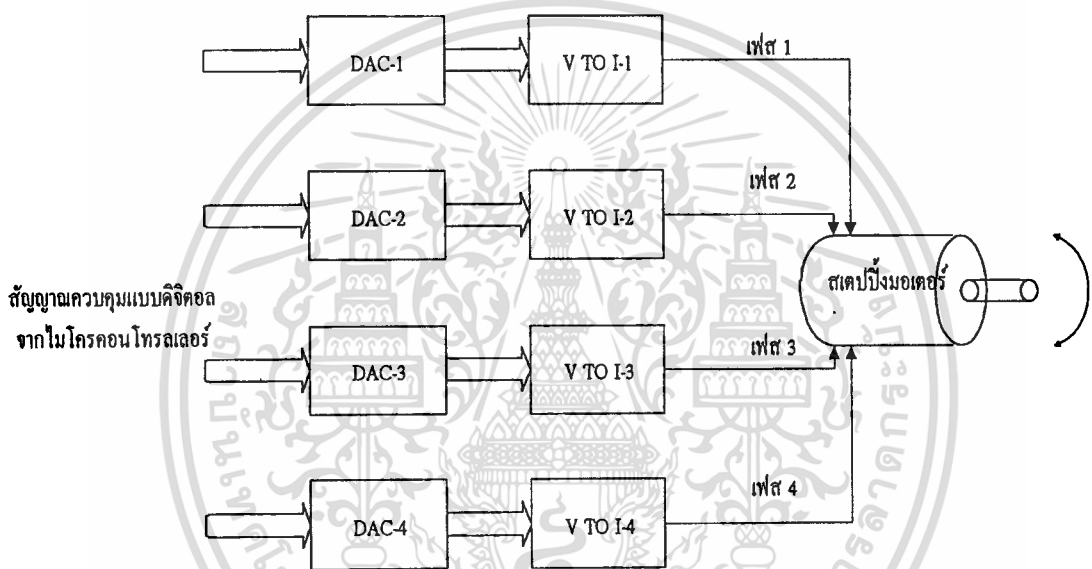
รูปที่ 4.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจร ไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCS-51)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ ห้ามทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีอากาศยาน

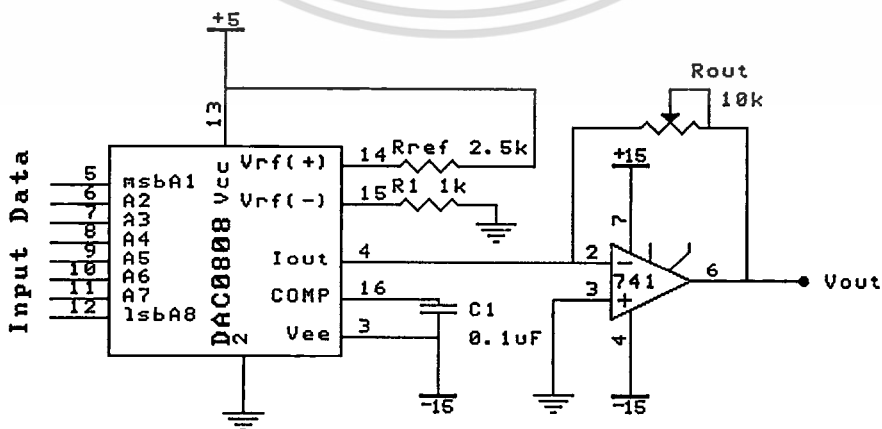
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาลอก (DAC)

วงจรนี้มีหน้าที่หลัก คือ แปลงสัญญาณดิจิทัลจากพอร์ตของวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อเปลี่ยนเป็นสัญญาณอนาลอก แล้วจ่ายให้กับวงจรแปลงโวลตจเป็นกระแส (V TO I) วงจรส่วนนี้มีด้วยกัน 4 ชุด เท่ากับจำนวนเฟสของสเตปป์ิงมอเตอร์ โดยใช้ไอซีที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอกเบอร์ DAC 0808 ซึ่งมีความละเอียด 8 บิต สามารถแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอกได้ 256 ระดับ (0-255)



รูปที่ 4.7 แสดงบล็อกโคะแกรมของวงจร DAC เมื่อเชื่อมต่อกับวงจร V TO I



รูปที่ 4.8 แสดงวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก (แสดงเพียง 1 เฟส)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{โดยที่ } I_{\text{out}} = \left(\frac{V_{\text{ref}}}{R_{\text{ref}}} \right) \times \left(\frac{D_7}{2} + \frac{D_6}{4} + \frac{D_5}{8} + \frac{D_4}{16} + \frac{D_3}{32} + \frac{D_2}{64} + \frac{D_1}{128} + \frac{D_0}{256} \right) \quad 4.19$$

I_{out} คือ กระแสเข้าที่พุทของ DAC (mA)

R_{ref} คือ ค่าความต้านทานที่กำหนดค่า I_{ref} ของไอซี DAC 0808

V_{ref} , I_{ref} คือ โวลตจและกระแสอ้างอิงตามลำดับ

D_0 - D_7 คือ ค่าสัญญาณไบนารีอินพุทที่มีค่า 1 หรือ 0

$$\text{โดยที่ } V_{\text{out}} = I_o R_{\text{out}} \quad 4.20$$

V_{out} คือ แรงดันทางด้านเข้าที่พุทของออปแอมป์

I_o คือ ค่ากระแสเข้าที่พุทของ DAC

R_{out} คือ ค่าความต้านทานด้านเข้าที่พุท

4.3.3 วงจรภาคควบคุมกระแสและขับกำลังสเตปป์มอเตอร์

วงจรมีเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดสำหรับการควบคุมการหน่วงกระแสให้กับสเตปป์มอเตอร์ กล่าวคือ การจ่ายกระแสที่ป้อนให้กับขดลวด สเตปป์มอเตอร์นั้นจะต้องมีความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้น กับสัญญาณโวลตจควบคุมอย่างเที่ยงตรง จึงจะสามารถควบคุมกระแสที่จ่ายให้แก่สเตปป์มอเตอร์ ได้อย่างเที่ยงตรงด้วย ภาคควบคุมกระแสนี้จะมีอยู่ด้วยกัน 4 ชุด แยกอิสระออกจากกันเท่ากับจำนวนเฟส ของสเตปป์มอเตอร์ ทำการรับสัญญาณอนาล็อก จากวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก เพื่อควบคุมให้ได้ปริมาณกระแสในแต่ละเฟสของสเตปป์มอเตอร์ตามต้องการ แต่ละชุดจะมีอุปกรณ์หลักคือ ไอซีเพาเวอร์ ออปแอมป์ L165 ซึ่งทำงานร่วมกับเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ให้กระแสได้มากกว่า 3 แอมป์ ซึ่งวงจรมีความสามารถจ่ายกระแสเข้าที่พุทได้มากกว่า 3.5 แอมป์ รับสัญญาณอินพุทได้ในช่วง 0 ถึง 8 โวลต์ สมการทรานเฟอร์ฟังก์ชันของวงจรมีดังนี้คือ

$$\frac{I_m}{V_i} = \frac{R_4}{R_x R_3} \quad 4.21$$

$$I_m = \frac{V_i R_4}{R_x R_3} \quad 4.22$$

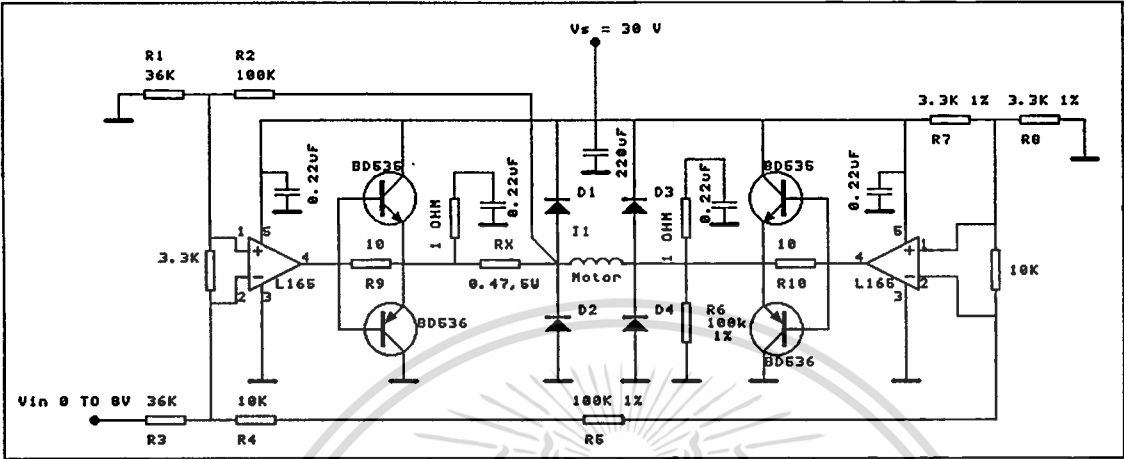
โดยที่ I_m คือ กระแสในขดลวดของสเตปป์มอเตอร์

V_i คือ อินพุทโวลตจ ที่ได้จากภาคเข้าที่พุทของ DAC

R_x , R_3 , R_4 คือ ค่าความต้านทานในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงวงจรภาคควบคุมกระแสและขับกำลัง (เพียง 1 ชุด)

จากค่าวงจรที่ใช้งาน $R_4 = 10 \text{ K}\Omega$, $R_3 = 36 \text{ K}\Omega$, $R_x = 0.47 \Omega$ ดังนั้น จากสมการที่ 4.34 จะได้ว่า

$$I_m = 0.591 \text{ V}_i \tag{4.23}$$

$$V_i = 1.692 I_m \tag{4.24}$$

$$\text{หรือ } V_i = K_A I_m \tag{4.25}$$

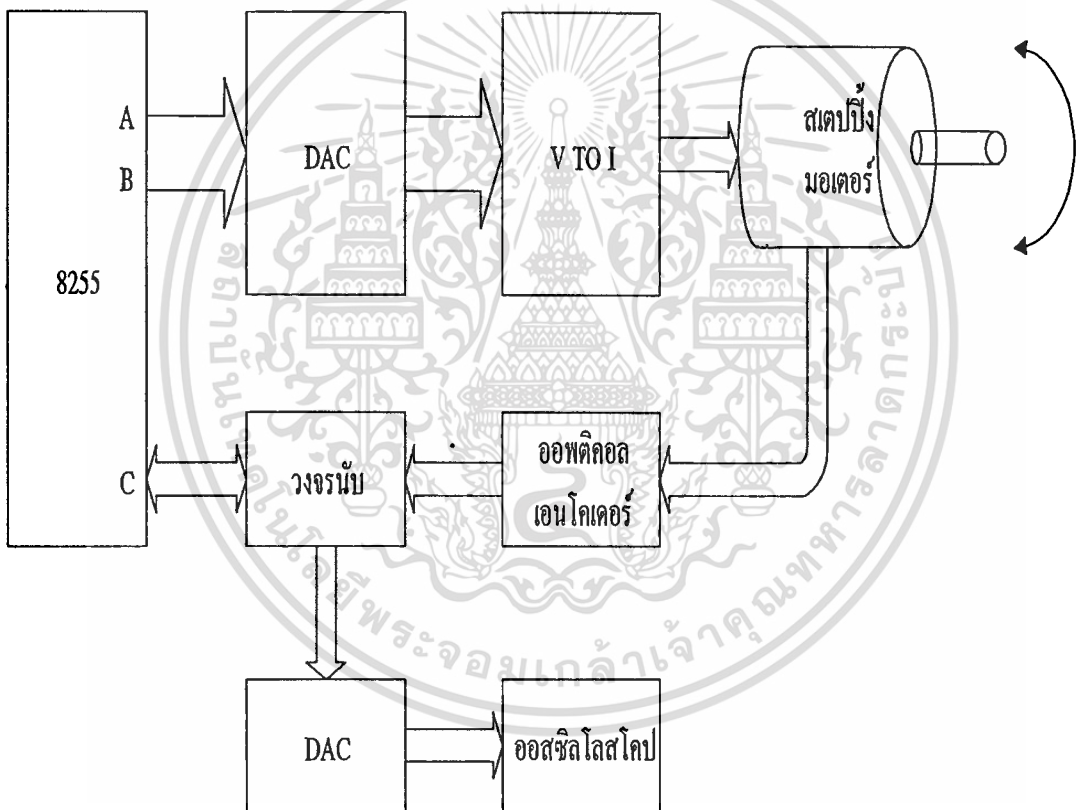
โดยที่ K_A คือ 1.692

4.3.4 ภาคของเอนโคดเดอร์ , วงจรนับขึ้น-ลงแบบไบนารี และวงจรตรวจจับผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์

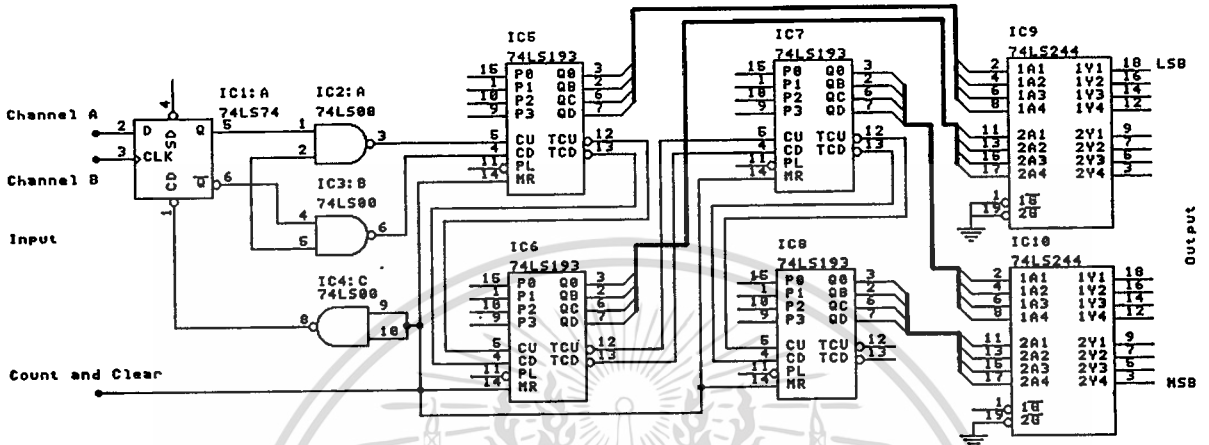
ภาคนี้เป็นส่วนที่ตรวจจับผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์ในแต่ละสเตปป์ซึ่งก็คือการเคลื่อนที่ของแกนโรเตอร์นั่นเอง โดยนำสัญญาณที่ได้จากออปติคอลเอนโคดเดอร์ที่เคลื่อนที่ไปตามการหมุนของแกนโรเตอร์ ส่งเข้าสู่่วงจรนับขึ้น-ลงแบบไบนารี เพื่อนับตามการหมุนของแกนโรเตอร์ สัญญาณที่ได้จากออปติคอลเอนโคดเดอร์ จะมี 2 ลักษณะ คือ ถ้าหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (CW) จะมีค่าสัญญาณ A นำสัญญาณ B ด้วยมุมเฟส 90 องศา และในทางตรงกันข้าม ถ้าหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (CCW) ค่าสัญญาณ A จะตามสัญญาณ B ด้วยมุมเฟส 90

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของงานวิจัยของหน่วยงานนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

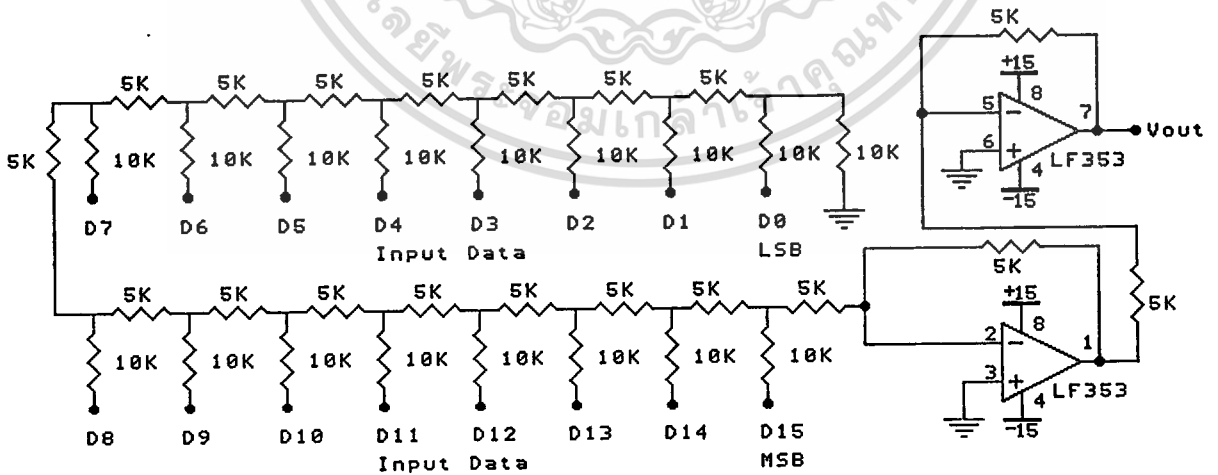
องศาเช่นกัน เรานำสัญญาณที่ได้นี้ส่งผ่านไปให้วงจรนับขึ้น-ลง แบบไบนารี ทำการนับตามการหมุนของแกนโรเตอร์ของสเตปปีงมอเตอร์ ก็จะสามารถทราบการเคลื่อนที่ ที่เป็นสเตปของแกนโรเตอร์ของสเตปปีงมอเตอร์ได้ แต่เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากวงจรขึ้น-ลงนี้ เป็นสัญญาณ ดิจิตอล ดังนั้น จึงต้องทำการแปลงเป็นสัญญาณอนาลอก จึงจะสามารถสังเกตผลตอบสนองของสเตปปีงมอเตอร์ผ่านทางออสซิลโลสโคปได้ ในรูปที่ 4.12 แสดงวงจรภาคเปลี่ยนสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอกแบบ R-2R LADDER ชนิด 16 บิต



รูปที่ 4.10 แสดงบล็อกไดอะแกรมของภาคเอนโคเดอร์ , วงจรนับขึ้น-ลงแบบไบนารี และวงจรตรวจจับผลตอบสนองของสเตปปีงมอเตอร์



รูปที่ 4.11 แสดงวงจรนับขึ้น-ลง แบบไบนารี ขนาด 16 บิต



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 4.12 แสดงวงจรภาคเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกแบบ R-2R LADDER ในการคำนวณค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ผลการเลียนแบบและการทดลอง

เมื่อควบคุมการหน่วงกระแสให้กับสเตปป์มอเตอร์

5.1 สมการทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของสเตปป์มอเตอร์

ทฤษฎีการคำนวณแบบพื้นฐานสเตปป์มอเตอร์ ก็มีลักษณะเหมือนอุปกรณ์แปลงพลังงานทางไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล เมื่อเกิดการเคลื่อนที่ของตัวโรเตอร์ไปสู่ตำแหน่งใหม่ การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดการสั่นตัวของโรเตอร์อยู่ก่อนที่ตำแหน่งสมดุลย์ใหม่นั้นและจะค่อยๆ ลดการสั่นลงจนหยุดพอดี ซึ่งผลตอบสนองที่ได้จัดอยู่ในระบบอันดับสอง (second order system) [1]ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{C(S)}{R(S)} = T(S) = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2} \quad 5.1$$

$C(S)$ คือ ค่าเข้าพุท , $R(S)$ คือ ค่าอินพุท

ส่วนการขับสเตปป์มอเตอร์ด้วยสัญญาณพัลส์แบบขั้นบันไดสามารถเขียนทรานสเฟอร์ฟังก์ชันในรูปของสมการลาปลาซทรานส์ฟอร์มได้ดังนี้

$$R(S) = \frac{A}{S} + \frac{B}{S} e^{-ST} \quad 5.2$$

$$C(S) = T(S) \times R(S) = \left(\frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2} \right) \times \left(\frac{A}{S} + \frac{B}{S} e^{-ST} \right) \quad 5.3$$

$$\text{โดยที่ } A = I_d \quad 5.4$$

$$B = (I - I_d) \quad 5.5$$

$$T = t_d \quad 5.6$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยได้ทำการเลียนแบบผลตอบสนองของสเตปป์ิ่งมอเตอร์ โดยการใส่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB ส่วนในการทดลองได้ใช้สเตปป์ิ่งมอเตอร์แบบ คาร์ริกแดนซ์แปรค่าได้ (VR-Stepping Motor) ชนิด 4 เฟส ขนาดสเตปป์ 7.5 องศาต่อสเตปป์ ในการทดสอบ โดยการทำการทดลองควบคุมการหมุนวงกระแสที่ป้อนให้ในแต่ละเฟสในสเตปป์ิ่งมอเตอร์ พิจารณาความสามารถในการลดการสั่น , การเกิดโอเวอร์ชูทและเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัว เมื่อเทียบกับการป้อนพัลส์แบบดิจิทัลพัลส์ ที่ไม่มีการหมุนวงกระแส เปรียบเทียบลักษณะผลตอบสนองที่ได้ กับแบบที่มีการหมุนวงกระแสถึงข้อแตกต่างของผลตอบสนองแต่ละแบบที่ได้

รายละเอียดข้อมูลของสเตปป์ิ่งมอเตอร์ที่ใช้ในการวิจัย

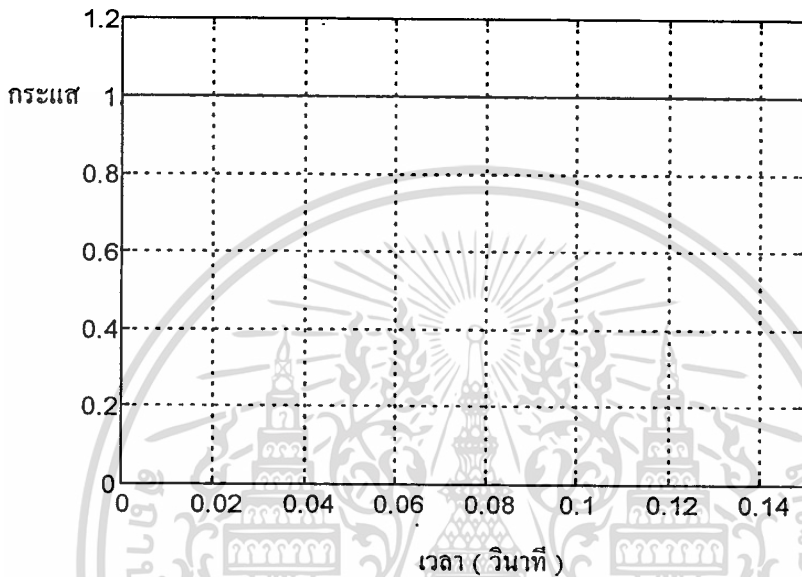
1. ชนิดคาร์ริกแดนซ์แปรค่าได้ (VR)
2. ขนาด 7.5 องศาต่อสเตปป์ , จำนวน 48 สเตปป์ต่อรอบ
3. จำนวนเฟสเท่ากับ 4 เฟส
4. ค่าโวลต์ต่อเฟสเท่ากับ 2.5 โวลต์ต่อเฟส
5. ค่ากระแสต่อเฟสเท่ากับ 0.5 แอมป์ต่อเฟส
6. ผลิตโดยบริษัท ฟิลิปส์

รายละเอียดข้อมูลของออปติคอลลินครีเมนต์เอนโคเดอ์ที่ใช้ในการวิจัย

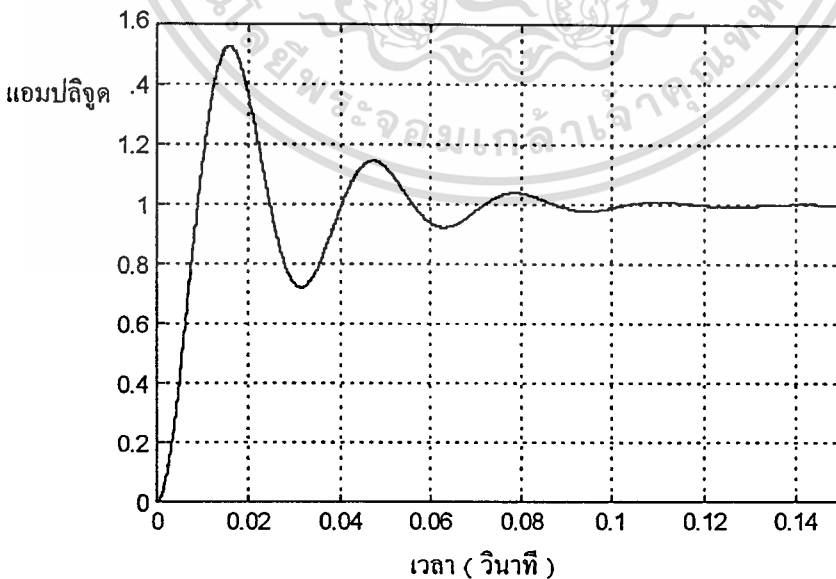
1. ชนิดแบบออปติคอลลินครีเมนต์เอนโคเดอ์ (OPTICAL INCREMENT ENCODER)
2. ความละเอียดของพัลส์ต่อรอบ เท่ากับ 10,000 พัลส์ ต่อรอบ
3. ผลิตโดยบริษัท ไฮเดนไฮน (HEIDENHAIN)

5.2 ผลการเลียนแบบผลตอบสนองโดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB

5.2.1 เมื่อทำการเลียนแบบการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ แบบที่มีการป้อนพัลส์กระแส เป็นแบบดิจิตอลพัลส์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB



รูปที่ 5.1 แสดงผลการเลียนแบบสัญญาณควบคุมแบบดิจิตอลพัลส์



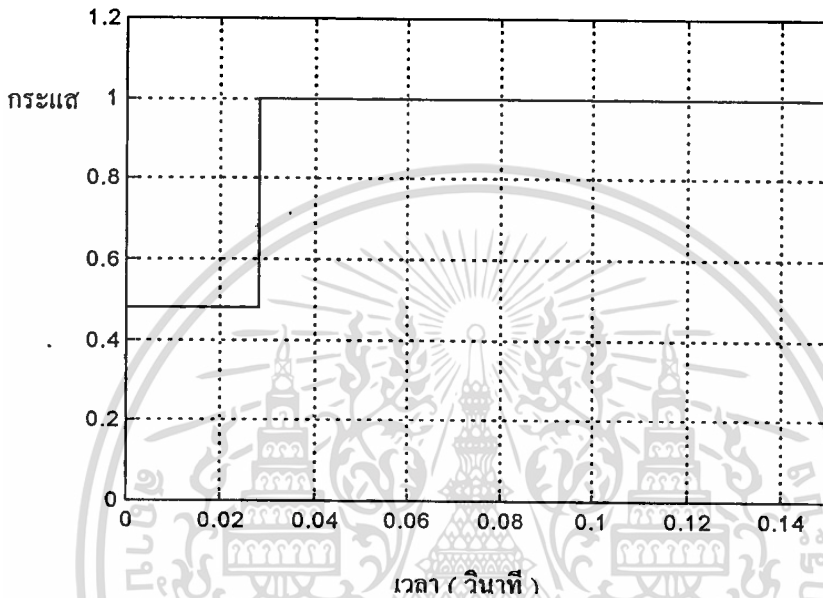
รูปที่ 5.2 แสดงผลการเลียนแบบผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์ที่ได้

จากการป้อนพัลส์แบบดิจิตอลพัลส์

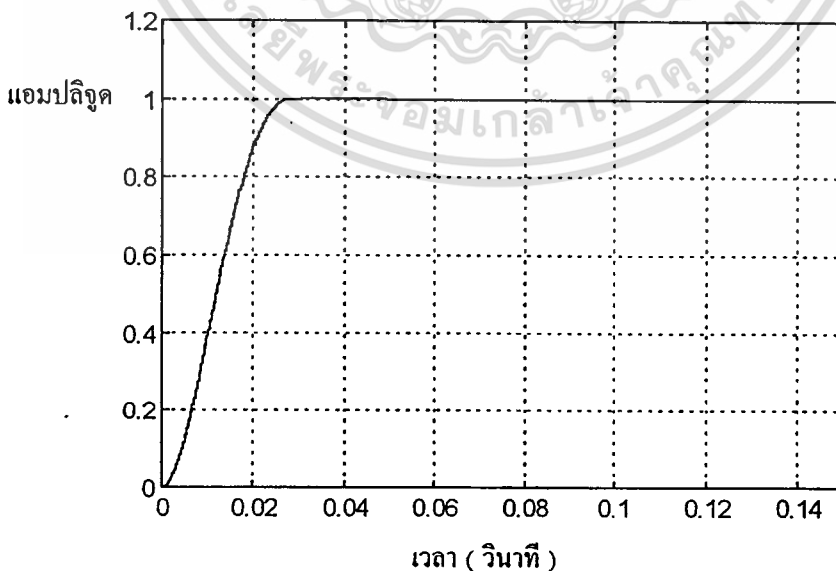
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 เมื่อทำการเขียนแบบการทำงานของสเตปป์ิ่งมอเตอร์ แบบที่มีการหน่วงกระแส โดยการป้อนพัลส์เป็นขั้นบันได โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB โดยให้ค่าสัดส่วนของ

$$I_d/I = V_d/V = t_r/t_d$$



รูปที่ 5.3 แสดงผลการเขียนแบบสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันไดที่ค่า $I_d/I = V_d/V = t_r/t_d$

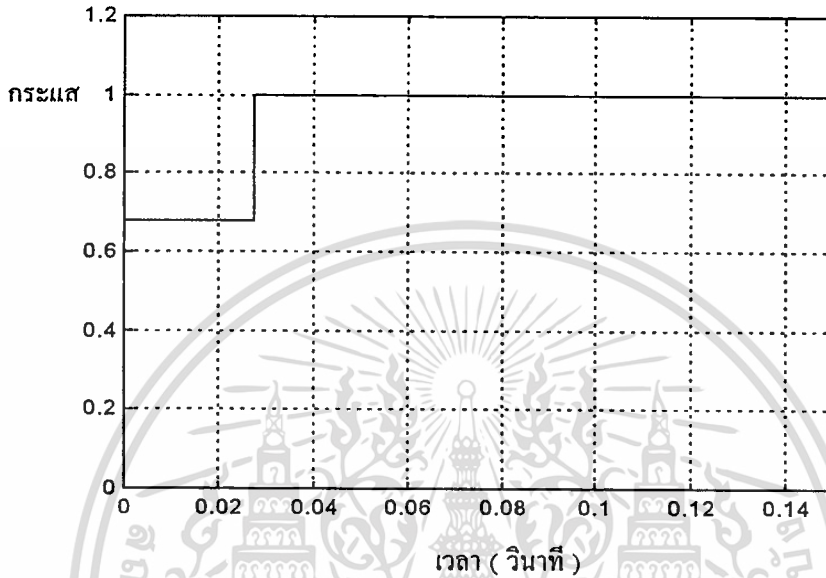


รูปที่ 5.4 แสดงผลการเขียนแบบ ผลการตอบสนองของสเตปป์ิ่งมอเตอร์ที่ได้จาก

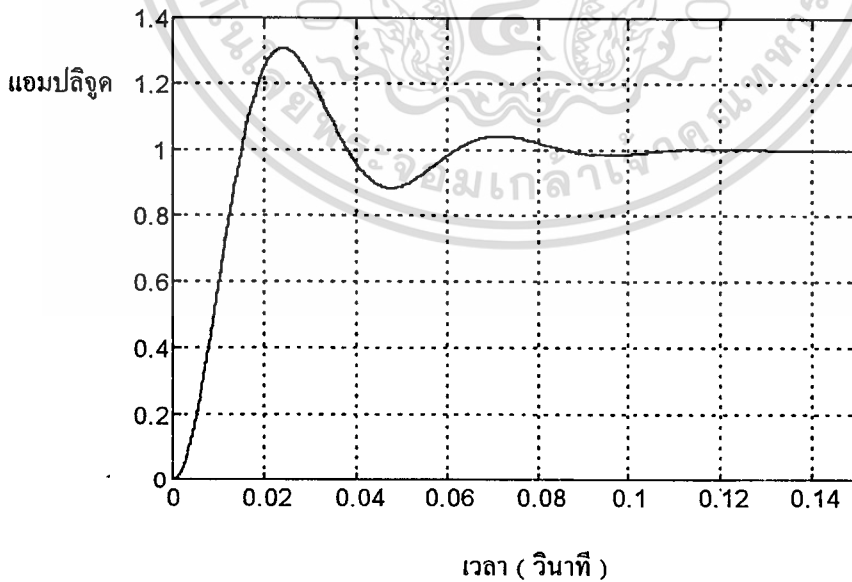
การป้อนพัลส์แบบขั้นบันได ที่ให้ค่าสัดส่วนของ $I_d/I = V_d/V = t_r/t_d$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่นเป็นการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3.3 เมื่อทำการเลียนแบบการทำงานของสเตรปิ้งมอเตอร์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB โดยให้ค่าของ I_d , V_d ในช่วงที่คีย์มีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.5 แสดงผลการเลียนแบบสัญญาณควบคุมเมื่อค่า I_d ในช่วงคีย์มีค่าเพิ่มขึ้น



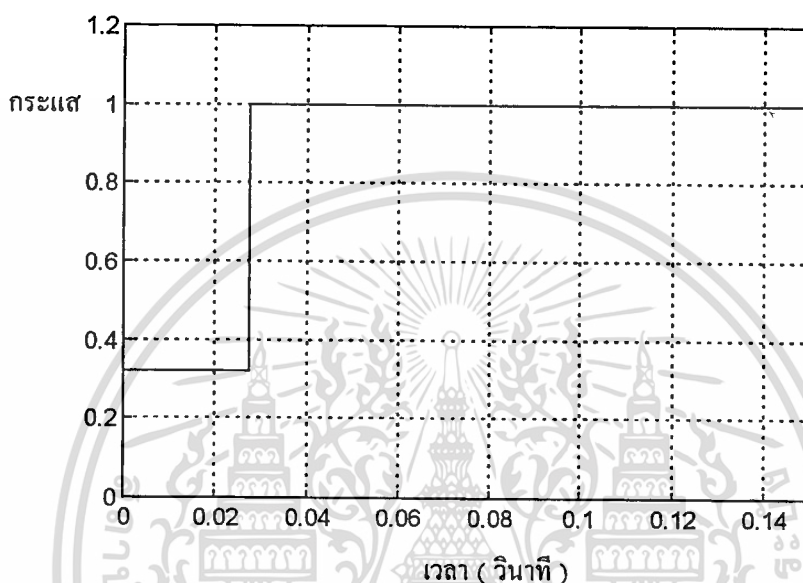
รูปที่ 5.6 แสดงผลการเลียนแบบ ผลตอบสนองของสเตรปิ้งมอเตอร์

โดยให้ค่าของ I_d ในช่วงคีย์มีค่าเพิ่มขึ้น

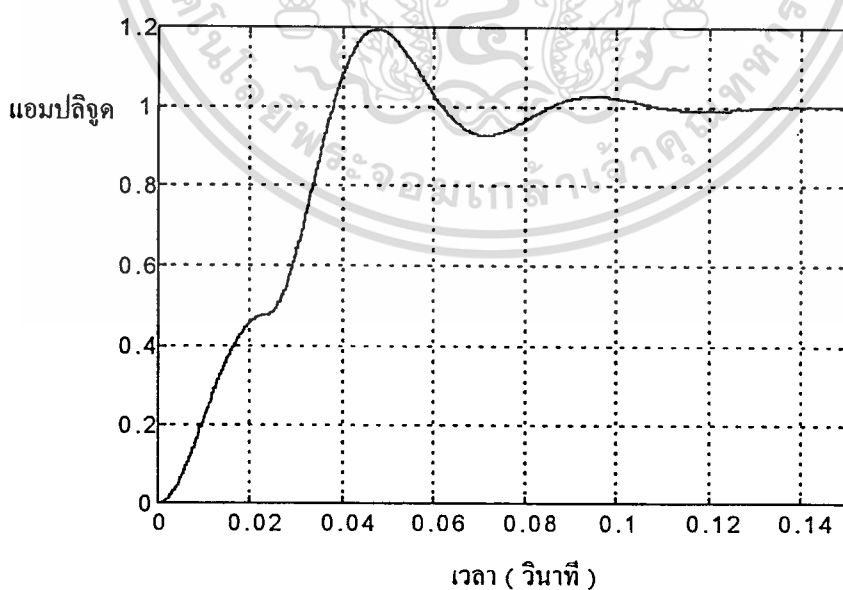
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.4 เมื่อทำการเลียนแบบการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ แบบที่มีการป้อนพัลส์แบบ
ขั้นบันได โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB โดยให้ค่าของ I_d , V_d ในช่วงดีเลย์มีค่าลด
ลง



รูปที่ 5.7 แสดงผลการเลียนแบบสัญญาณควบคุมเมื่อค่า I_d ในช่วงดีเลย์ มีค่าลดลง



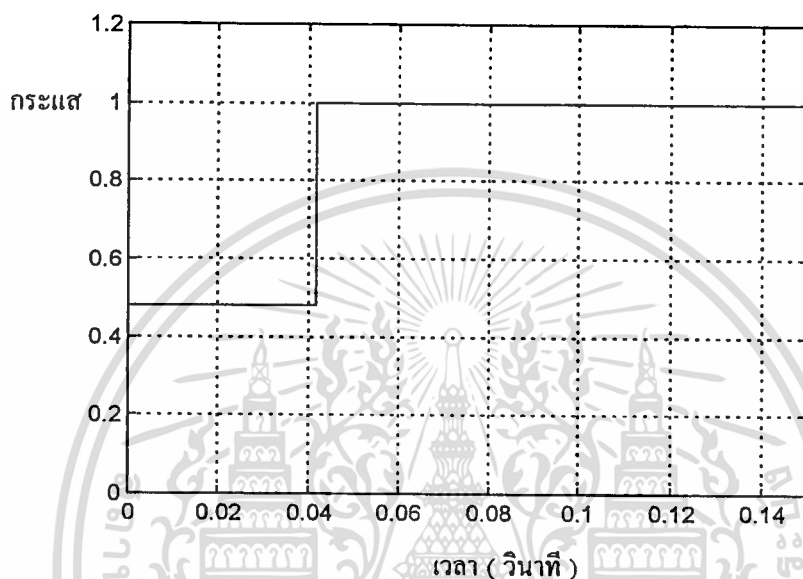
รูปที่ 5.8 แสดงผลการเลียนแบบ ผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์

โดยให้ค่าของ I_d , V_d ในช่วงดีเลย์มีค่าลดลง

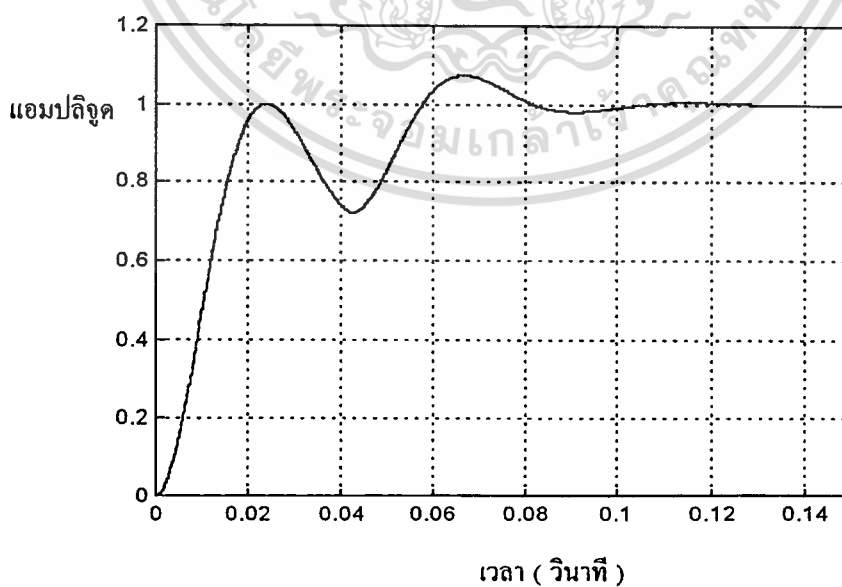
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.25 เมื่อทำการเลียนแบบการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ แบบที่มีการป้อนพัลส์เป็นขั้น
บันได โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB โดยให้ค่าเวลา t_d มีค่ามากขึ้น



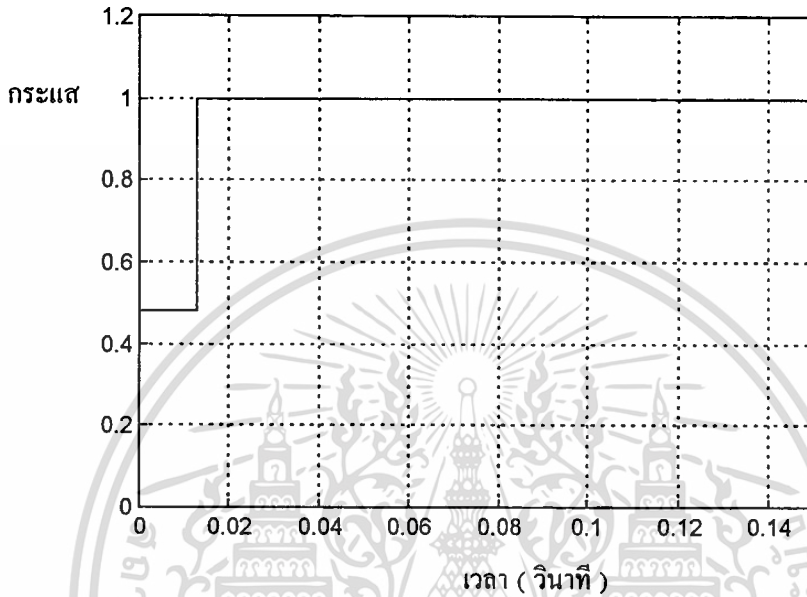
รูปที่ 5.9 แสดงผลการเลียนแบบสัญญาณควบคุมเมื่อค่า t_d ในช่วงคี่เลขมีค่ามากขึ้น



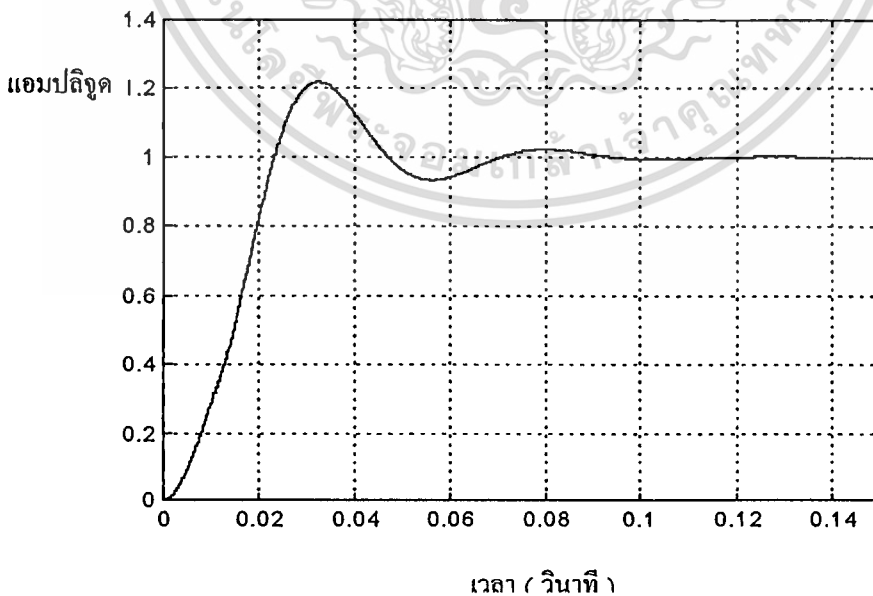
รูปที่ 5.10 ผลการเลียนแบบ ผลตอบสนองสเตปปีงมอเตอร์โดยให้ค่าเวลา t_d มีค่ามากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.6 เมื่อทำการเลียนแบบการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ แบบที่มีการป้อนพัลส์แบบ
ขั้นบันได โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB โดยให้ค่าเวลา t_d มีค่าน้อยลง



รูปที่ 5.11 แสดงผลการเลียนแบบสัญญาณควบคุมเมื่อค่า t_d ในช่วงที่เล็หมีค่าน้อยลง



รูปที่ 5.12 ผลการเลียนแบบ ผลตอบสนองของสเตปปีงมอเตอร์ โดยให้ค่า t_d มีค่าน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลการทดลองผลตอบสนอง โดยการป้อนพัลส์แบบดิจิตอลพัลส์

5.3.1 เมื่อทำการทดลองโดยป้อนสัญญาณพัลส์กระแสแบบดิจิตอลพัลส์ ที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปดังในรูปที่ 5.13 จะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.13 แสดงสัญญาณควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบดิจิตอลพัลส์

สัญญาณบน : สัญญาณ โวลเตจ (0.2 V/DIV)

สัญญาณล่าง : สัญญาณกระแส (10 mV/0.2 A)



รูปที่ 5.14 แสดงผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์ที่เกิดจากการป้อนสัญญาณแบบดิจิตอลพัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ผลการทดลองแบบที่มีการหน่วงกระแสโดยการป้อนพัลส์เป็นขั้นบันได

5.4.1 เมื่อทำการทดลองโดยการป้อนพัลส์กระแสเป็นขั้นบันได ที่มีค่าสัดส่วนของ $I_d/I =$

$V_d/V = t_r/t_d$ ดังในรูปที่ 5.15 จะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.16



รูปที่ 5.15 แสดงสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันไดที่มีค่าสัดส่วนของ $I_d/I = V_d/V = t_r/t_d$

สัญญาณบน : สัญญาณโวลเตจ (0.2 V/DIV)

สัญญาณล่าง : สัญญาณกระแส (10 mV/0.2 A)



รูปที่ 5.16 แสดงผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์ที่เกิดจากสัญญาณควบคุมของรูปที่ 5.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

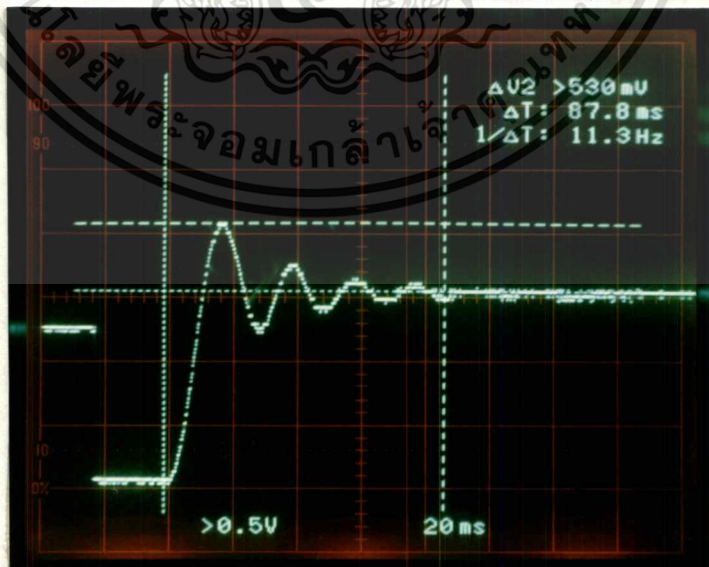
5.4.2 เมื่อทำการทดลองการป้อนพัลส์กระแสแบบขั้นบันได โดยให้ค่า I_d , V_d ในช่วงที่คี่เลขเป็นขั้นบันได มีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.17 แสดงสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันไดที่ค่า I_d , V_d ในช่วงที่คี่เลข มีค่าเพิ่มขึ้น

สัญญาณบน : สัญญาณโวลเตจ (0.2 V/DIV)

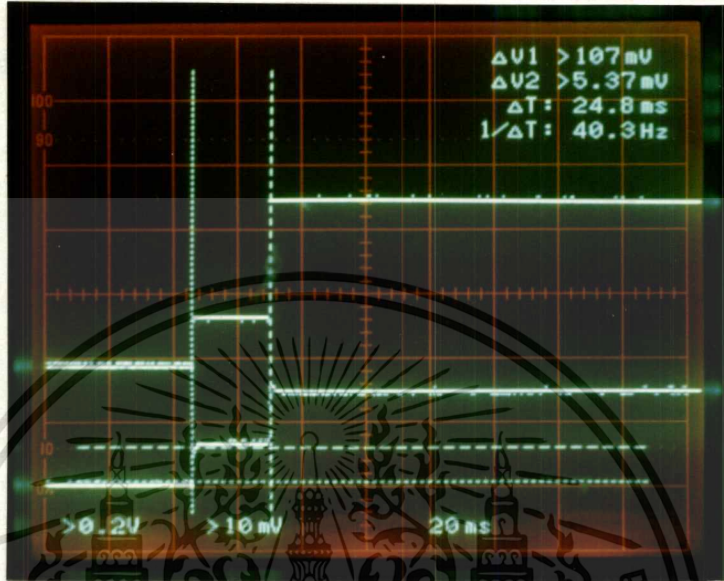
สัญญาณล่าง : สัญญาณกระแส (10 mV/0.2 A)



รูปที่ 5.18 แสดงผลตอบสนองของสเตปปีงมอเตอร์ที่เกิดจากสัญญาณควบคุมของรูปที่ 5.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

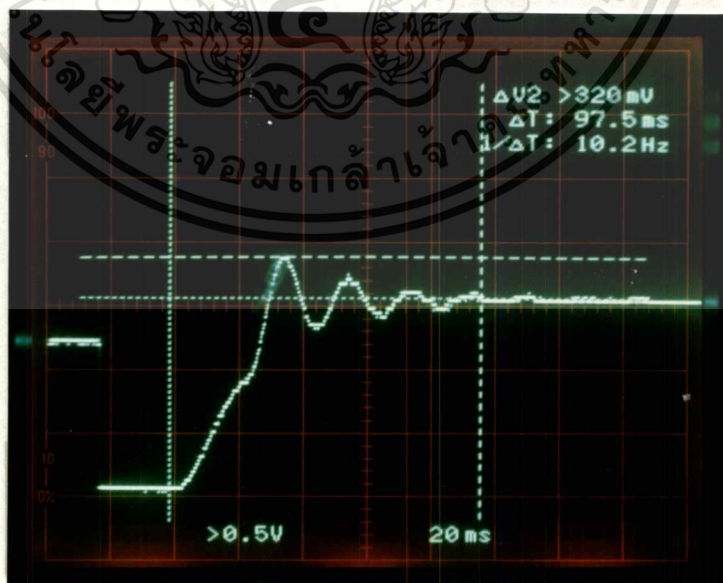
5.4.3 เมื่อทำการทดลองป้อนพัลส์กระแสเป็นขั้นบันได โดยให้ค่าของ I_d , V_d ในช่วงที่ ดีเลย์เป็นขั้นบันได มีค่าลดลง ดังในรูปที่ 5.19 จะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.19 แสดงสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันได ที่ค่า I_d , V_d ในช่วงดีเลย์ มีค่าลดลง

สัญญาณบน : สัญญาณ โวลเตจ (0.2 V/DIV)

สัญญาณล่าง : สัญญาณกระแส (10 mV/0.2 A)



รูปที่ 5.20 แสดงผลตอบสนองของสเตรปปีงมอเตอร์ที่เกิดจากสัญญาณควบคุมของรูปที่ 5.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

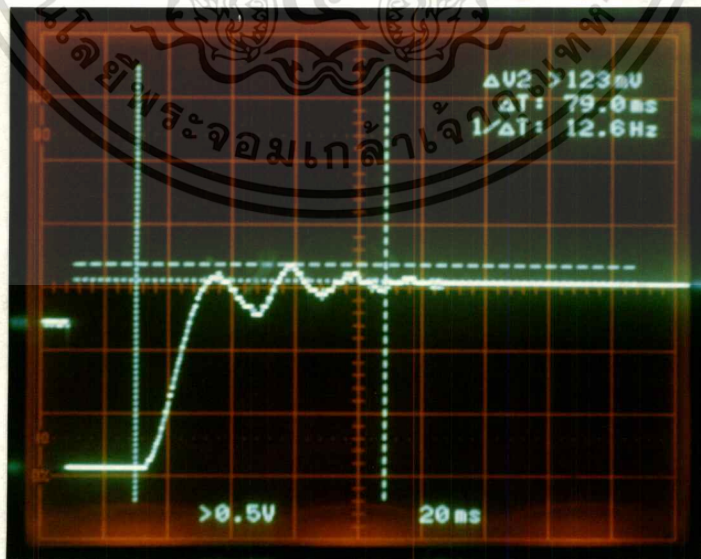
5.4.4 เมื่อทำการทดลองป้อนพัลส์กระแสเป็นขั้นกระแส โดยที่ให้ค่าของ t_d ในช่วงเวลาที่ ดีเลย์ เป็นขั้นบันได มีค่ามากขึ้น ดังในรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 แสดงสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันได ที่ค่าของเวลาดีเลย์ t_d มีค่ามากขึ้น

สัญญาณบน : สัญญาณโวลเตจ (0.2 V/DIV)

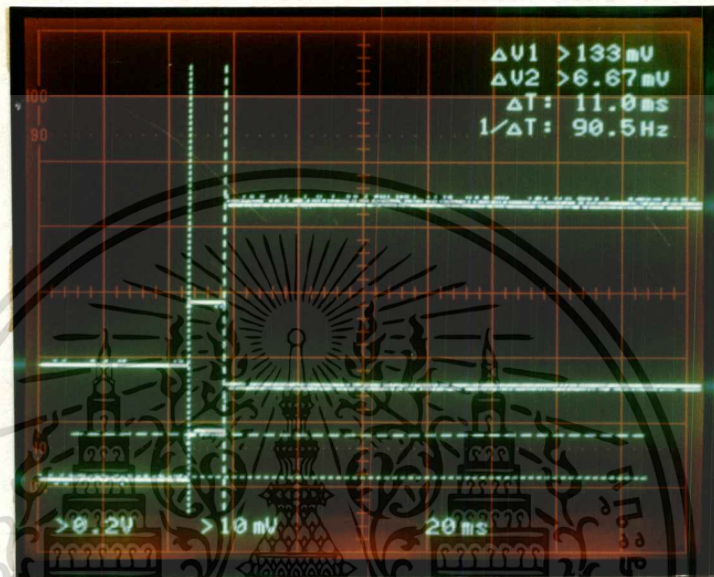
สัญญาณล่าง : สัญญาณกระแส (10 mV/ 0.2 A)



รูปที่ 5.22 แสดงผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์ ที่เกิดจากสัญญาณควบคุมของรูปที่ 5.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

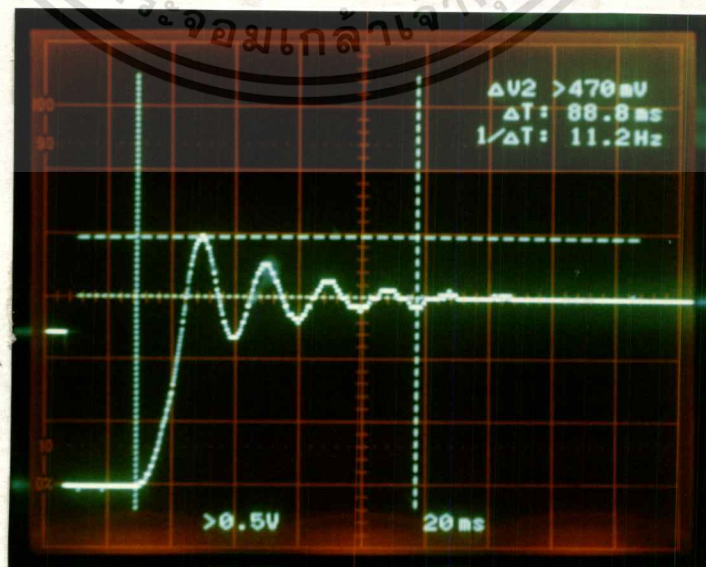
5.3.5 เมื่อทำการทดลองป้อนพัลส์กระแสเป็นขั้นบันได โดยให้ค่าของเวลา t_d ในช่วงเวลาที่ติลต์เป็นขั้นบันได มีค่าน้อยลง ดังในรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.23 แสดงสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันไดที่ค่าเวลาติลต์ t_d มีค่าน้อยลง

สัญญาณบน : สัญญาณโวลเตจ (0.2 V/DIV)

สัญญาณล่าง : สัญญาณกระแส (10 mV/0.2 A)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของห้องปฏิบัติการเครื่องวัดไฟฟ้าของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การคัดลอกหรือการนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการคัดลอกหรือการนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการคัดลอกหรือการนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

5.5 สรุป

เมื่อทำการทดสอบการเลียนแบบผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์โดยใช้โปรแกรม MATLAB พบว่าผลตอบสนองที่ได้ในแต่ละแบบการเลียนแบบมีลักษณะใกล้เคียงและสอดคล้องกับผลการทดลอง

เมื่อทดสอบการเลียนแบบด้วยสัญญาณแบบดิจิตอลพัลส์พบว่าผลการเลียนแบบที่ได้มีลักษณะเกิดการสั่น , เกิดโอเวอร์ชูท โดยมีค่าเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ยาวนาน

เมื่อทำการทดสอบการเลียนแบบด้วยสัญญาณพัลส์แบบขั้นบันไดพบว่าผลการเลียนแบบที่ได้ก็มีลักษณะราบเรียบ , ไม่เกิดการสั่น ให้ค่าเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่มีค่าน้อยมาก เช่นเดียวกันกับผลการทดลอง

เมื่อให้ค่าของ I_d มีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยมีค่าเพิ่มขึ้น หรือลดลงตามลำดับ พบว่าผลการเลียนแบบที่ได้ก็มีลักษณะที่เกิดการสั่นและโอเวอร์ชูท ที่ให้ค่าเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่น้อยกว่าแบบสเตปป์กติ ที่เกิดจากการป้อนแบบดิจิตอลพัลส์

เมื่อให้ค่าของ t_d มีค่าที่เปลี่ยนแปลงไป โดยมีค่ามากขึ้นหรือน้อยลงตามลำดับ พบว่าผลการเลียนแบบที่ได้มีลักษณะเกิดการสั่นและโอเวอร์ชูทเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบค่าเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าสเตปป์กติที่ได้จากการป้อนแบบดิจิตอลพัลส์

ในการทดลองควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์โดยใช้การป้อนแบบดิจิตอลพัลส์ให้กับวงจรขับแบบควบคุมกระแส ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสเตปป์การเคลื่อนที่ของโรเตอร์จะได้ผลตอบสนองที่เกิดการสั่นของโรเตอร์ ที่มีค่าการเกิดโอเวอร์ชูทสูงถึง 56 เปอร์เซ็นต์ และให้ค่าระยะเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ค่ายาวนานถึง 99 มิลลิวินาที ดังนั้นจะเห็นว่ากรป้อนแบบดิจิตอลพัลส์ ให้กับวงจรขับสเตปป์มอเตอร์เพื่อนำไปใช้ขับสเตปป์มอเตอร์นั้น ไม่สามารถทำให้สเตปป์การเคลื่อนที่มีลักษณะที่ราบเรียบได้ แต่จะเกิดการสั่นแทน

เมื่อทำการทดลองโดยการสร้างสัญญาณพัลส์ให้เป็นขั้นบันไดไปควบคุมวงจรขับแบบควบคุมกระแสชนิดแปลงโวลเตจเป็นกระแส ซึ่งให้สัญญาณพัลส์ของกระแสมีลักษณะเช่นเดียวกันกับสัญญาณควบคุม โดยมีอัตราส่วนของ

$$(V_d/V) = (I_d/I) = (t_r/t_d)$$

นำสัญญาณพัลส์ของกระแสที่ได้ไปขับสเตปป์มอเตอร์ จากผลการทดลองพบว่าผลตอบสนองที่ได้จากสเตปป์การเคลื่อนที่จะมีลักษณะที่ราบเรียบไม่เกิดการสั่นตัวของโรเตอร์ โดยสามารถค่าการเกิดโอเวอร์ชูทลงได้เกือบหมด คือลดลงถึง 98 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับขนาดสเตปป์การเคลื่อนที่ ที่เกิดจากการป้อนแบบดิจิตอลพัลส์ นอกจากนี้ค่าเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวก็มีค่าลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อยลง โดยเหลือเพียง 24.8 มิลลิวินาที ซึ่งลดลงถึง 74.94 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าการควบคุมการขับเคลื่อนของมอเตอร์ โดยวิธีการหน่วงแบบการขับเคลื่อนด้วยพัลส์กระแสเป็นขั้นบันได สามารถทำให้สเตรปการเคลื่อนที่ปราศจากการสั่นลงได้ ให้สเตรปการเคลื่อนที่ ที่มีลักษณะราบเรียบ

เมื่อให้ค่าอัตราส่วนของกระแส (I_d / I) ค่าเปลี่ยนไป โดยให้ค่าของ I_d ในช่วงที่ดีเลยมีค่าเพิ่มมากขึ้นนำไปขับเคลื่อนมอเตอร์ พบว่าผลตอบสนองที่ได้จากสเตรปการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ จะเกิดการสั่น ที่มีลักษณะเดียวกันกับขนาดสเตรปปกติที่เกิดจากการขับเคลื่อนด้วยพัลส์ แต่เมื่อเปรียบเทียบกัน พบว่าค่าการเกิดโอเวอร์ชูทยังมีค่าต่ำกว่า โดยมีค่าเพียง 530 มิลลิโวลต์ ลดลงจากเดิม 36.9 เปอร์เซ็นต์ เวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวก็มีค่าน้อยลงเช่นเดียวกันแต่ลดลงเพียงแค่ 11.3 เปอร์เซ็นต์

เมื่อทดลองให้ค่าของกระแส I_d ในช่วงที่ดีเลยมีค่าต่ำลง แล้วนำสัญญาณที่ได้ไปขับเคลื่อนมอเตอร์ พบว่าผลตอบสนองที่ได้ก็ยังคงมีลักษณะเช่นเดียวกันกับผลตอบสนองแบบสเตรปปกติที่เกิดจากการขับเคลื่อนด้วยพัลส์ โดยสเตรปการเคลื่อนที่ที่เกิดการสั่นของโรเตอร์เช่นเดียวกัน ซึ่งมีค่าโอเวอร์ชูท 320 มิลลิโวลต์ ลดลงจากของเดิมถึง 61.9 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับขนาดสเตรปปกติ ส่วนเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวก็มีค่าน้อยลงเพียงแค่ 1.52 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน้อยมาก

เมื่อทำการทดลองโดยให้ค่าอัตราส่วนของ (t_r / t_d) มีค่าเปลี่ยนแปลงไป โดยให้ค่าของเวลาที่ดีเลย t_d มีค่านานมากขึ้นกว่า 24.8 มิลลิวินาที นำสัญญาณพัลส์ที่ได้ไปใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ พบว่าผลตอบสนองที่ได้ก็ยังคงมีลักษณะเช่นเดียวกันกับผลตอบสนองที่เกิดจากการขับเคลื่อนด้วยพัลส์ คือยังเกิดการสั่นของตัวโรเตอร์ ที่มีค่าโอเวอร์ชูทประมาณ 123 มิลลิโวลต์ แต่ก็ลดต่ำลงเมื่อเทียบกับขนาดสเตรปปกติถึง 85.36 เปอร์เซ็นต์และค่าเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวมีค่าน้อยลง 20.2 เปอร์เซ็นต์เช่นกัน

เมื่อให้ค่าเวลาที่ใช้ดีเลย t_d มีค่าสั้นลงจากเดิม 24.8 มิลลิวินาที นำสัญญาณพัลส์ที่ได้ไปใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ พบว่าผลตอบสนองที่ได้ก็ยังคงมีลักษณะเช่นเดียวกันกับผลตอบสนองดังที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ มีการสั่นของตัวโรเตอร์ โดยมีค่าโอเวอร์ชูทประมาณ 470 มิลลิโวลต์ ลดลงจากของเดิม 44.04 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่เวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวก็ลดน้อยลงจากเดิมเพียง 10.3 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทดลองเราจะพบว่าถ้าค่าของ I_d มีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปโดยมีค่าที่เพิ่มขึ้นหรือ

ลดลง ก็ยังคงทำให้ผลตอบสนองที่ได้เกิดการสั่น เช่นเดียวกันกับ ที่ค่าของ t_d มีค่าเปลี่ยนแปลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปลงไปโดยมีค่านานขึ้นหรือลดน้อยลง ก็ยังคงทำให้ผลตอบสนองที่ได้เกิดการสั้นเช่นเดียวกัน แต่ทั้งสี่กรณีที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ก็ให้ผลตอบสนองในทางที่ดีขึ้นกว่าแบบที่ได้จากการจับด้วยแบบดิจิตอลพัลส์

ผลการเลียนแบบที่ได้จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงและสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ในแต่ละแบบ จะแตกต่างกันบ้างก็ในเรื่องของ เปอร์เซ็นต์ของการเกิดโอเวอร์ชูท , เวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ผลการเลียนแบบจะให้ค่าที่มากกว่า

การควบคุมการทำงานของสเตรปปีงมอเตอร์ด้วยวิธีการห้วงกระแสแบบการจับด้วยพัลส์กระแสเป็นขั้นบันไดนั้น สามารถช่วยปรับปรุงผลตอบสนองให้ดีขึ้นกว่าการจับด้วยดิจิตอลพัลส์แบบเดิมได้ โดยการควบคุมนั้น สามารถทำได้ง่ายโดยการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมการทำงาน ด้วยการกระตุ้นพัลส์ที่ใช้จับเพียงแค่ครั้งละเฟส ถ้าเปรียบเทียบกับวิธีการห้วงด้วยวิธีอื่นเช่น การห้วงแบบ แบน-แบน , การห้วงแบบคิเล็คเตปสุดท้าย ที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 3 นั้น ก็ให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าและยังสะดวกต่อการควบคุมการจับและการนำไปประยุกต์ใช้งานอีกด้วย นอกจากนี้ถ้านำไปเปรียบเทียบกับการห้วงเชิงกล ที่กล่าวถึงในบทที่ 3 เช่นกัน จะพบว่า จะให้ผลตอบสนองที่ดีกว่า และไม่เป็นการเพิ่มโหลดให้กับสเตรปปีงมอเตอร์อีกด้วย ส่วนรายละเอียดของค่าโอเวอร์ชูทและเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวแสดงไว้ในตารางที่ 5.1

จากตารางที่ 5.1 เราได้ทำการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การเกิดโอเวอร์ชูทและค่าเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ลดลง ของกรณีแบบที่มีการห้วงกระแส คือ ป้อนสัญญาณพัลส์กระแสเป็นแบบขั้นบันได (แบบที่ 2 ถึง 6) โดยนำไปเปรียบเทียบกับ กรณีที่ไม่มีห้วงกระแส คือ ป้อนสัญญาณพัลส์เป็นแบบดิจิตอลพัลส์ (แบบที่ 1) ซึ่งได้ค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ที่ลดลง ดังแสดงในตารางที่ 5.1 เช่น

ค่าโอเวอร์ชูทแบบ ดิจิตอลพัลส์ = 840mV , ค่าเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว 99 ms

ค่าโอเวอร์ชูทแบบห้วงกระแส (แบบที่ 2) = 18.7 mV ,

ค่าเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวแบบห้วงกระแส (แบบที่ 2) = 24.8 ms

ค่าเปอร์เซ็นต์โอเวอร์ชูทที่ลดลง = $[(840 - 18.7) / 840] \times 100 = 98 \%$

ค่าเปอร์เซ็นต์เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ลดลง = $[(99 - 24.8) / 99] \times 100 = 74.94 \%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

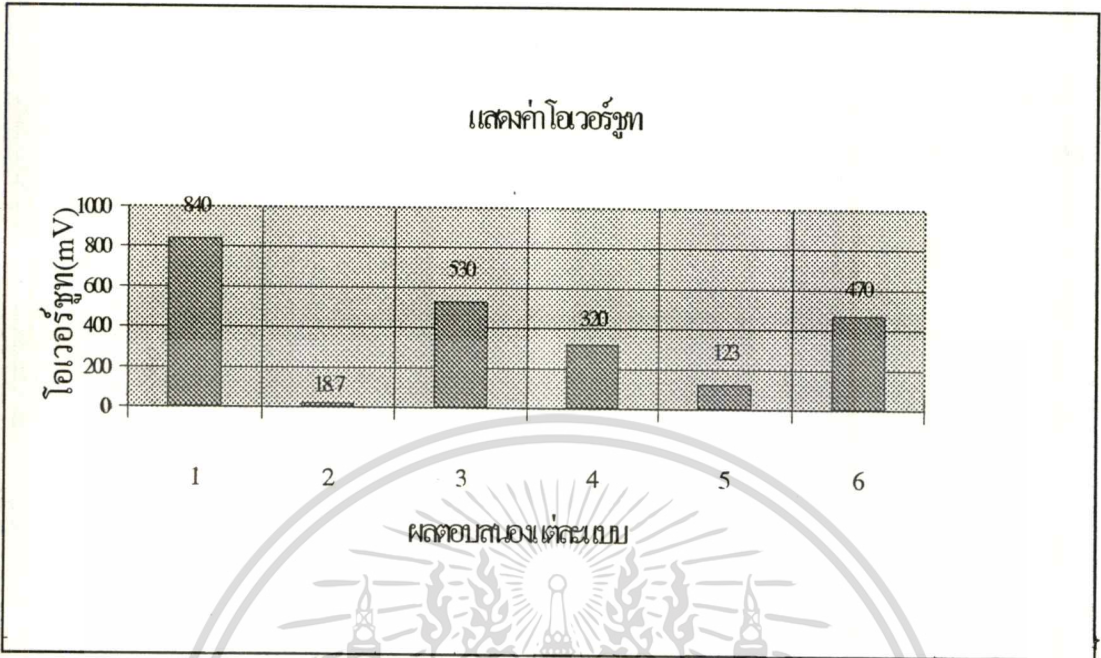
ตารางที่ 5.1

แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองสเตปป์มอเตอร์ ในแต่ละแบบวิธีการขับ

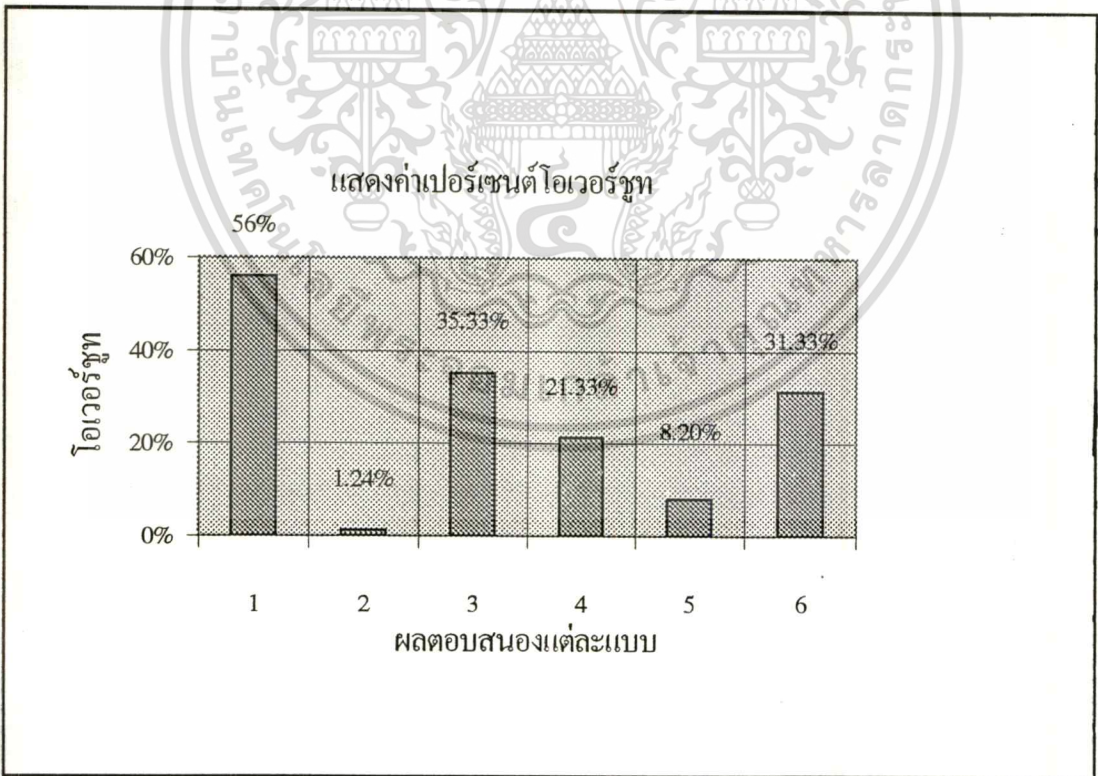
ผลตอบสนอง สเตปป์มอเตอร์ ในแต่ละแบบ	โอเวอร์ชูท (Overshoot)		ค่าโอเวอร์ชูทที่ลดลง (%)	ค่าเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัว (Settling time)	
1. ขนาดสเตปป์ปกติที่ได้จากการป้อนพัลส์แบบคิวิตอลพัลส์ (ไม่หน่วงกระแส)	840 mV	56 %	-	99 ms	-
2. ขนาดสเตปป์ที่ได้จากการป้อนพัลส์แบบขั้นบันได โดยให้ $I_d/I = V_d/V = t_r/t_d$ (หน่วงกระแส)	18.7 mV	1.24 %	ลดลง 98 %	24.8 ms	ลดลง 74.94 %
3. เมื่อให้ค่า I_d, V_d ในช่วงดีเลย์มีค่าเพิ่มขึ้น (หน่วงกระแส)	530 mV	35.33 %	ลดลง 36.9 %	87.8 ms	ลดลง 11.3 %
4. เมื่อให้ค่า I_d, V_d ในช่วงดีเลย์มีค่าลดลง (หน่วงกระแส)	320 mV	21.33 %	ลดลง 61.9 %	97.5 ms	ลดลง 1.52 %
5. เมื่อให้ค่า t_d ในช่วงดีเลย์มีค่ามากขึ้น (หน่วงกระแส)	123 mV	8.2 %	ลดลง 85.36 %	79 ms	ลดลง 20.2 %
6. เมื่อให้ค่า t_d ในช่วงดีเลย์มีค่าน้อยลง (หน่วงกระแส)	470 mV	31.33 %	ลดลง 44.04 %	88.8 ms	ลดลง 10.3 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

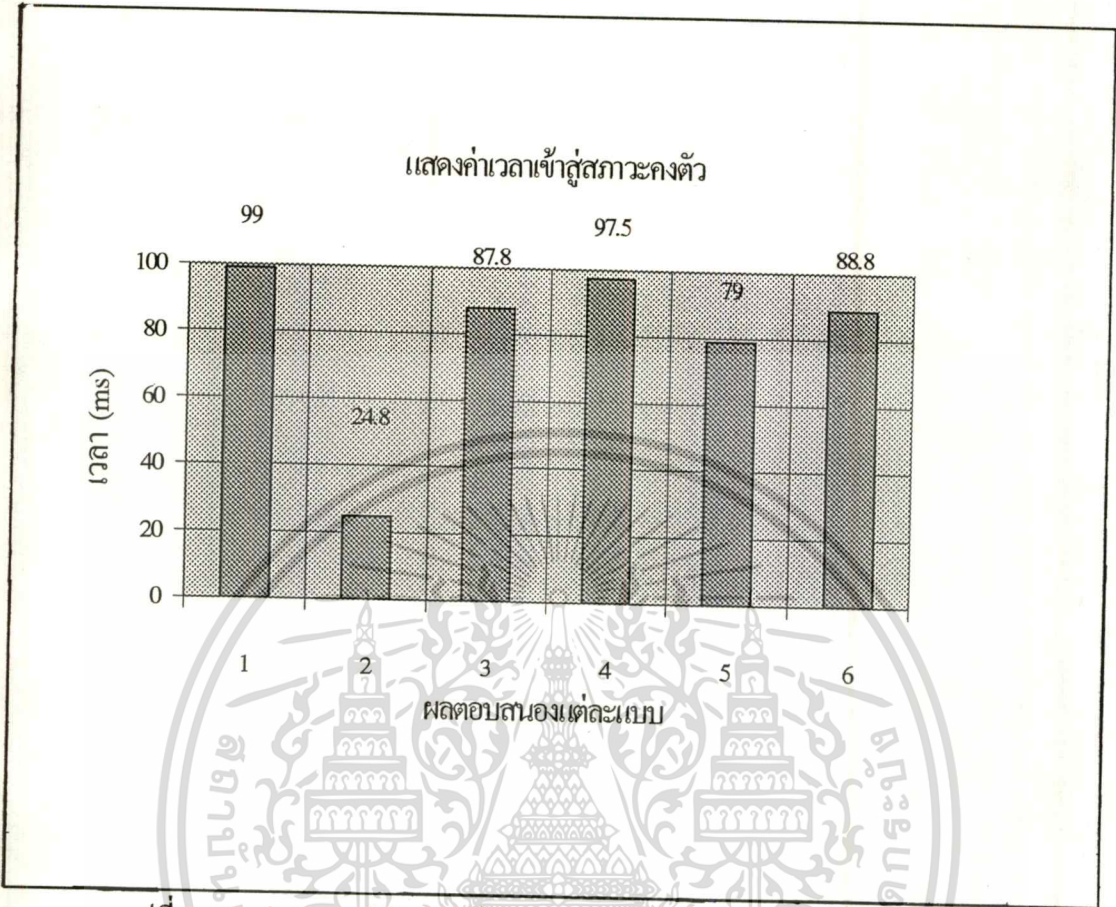


รูปที่ 5.25 แสดงกราฟค่าโอเวอร์ชูทของผลตอบสนองแต่ละแบบ



รูปที่ 5.26 แสดงกราฟค่าเปอร์เซ็นต์โอเวอร์ชูทของผลตอบสนองแต่ละแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.27 แสดงกราฟค่าเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัวของผลตอบสนองแต่ละแบบ

แบบที่ 1 คือ ผลตอบสนองแบบไม่หน่วงกระแสที่ได้จากการป้อนสัญญาณดิจิทัลพัลส์
 แบบที่ 2 ถึง 6 คือ ผลตอบสนองแบบหน่วงกระแสที่ได้จากการป้อนสัญญาณพัลส์
 กระแสเป็นขั้นบันได ดังนี้

แบบที่ 2 คือ ป้อนด้วยอัตราส่วนของ $(I_d / I) = (t_r / t_d)$

แบบที่ 3 คือ ป้อนด้วยค่า I_d ที่คี่เลยมีค่าเพิ่มขึ้น ประมาณ 50% ของ I_d ในแบบที่ 2

แบบที่ 4 คือ ป้อนด้วยค่า I_d ที่คี่เลยมีค่าลดลง ประมาณ 50% ของ I_d ในแบบที่ 2

แบบที่ 5 คือ ป้อนด้วยค่า t_d ที่คี่เลยมีค่ามากขึ้น ประมาณ 50% ของ t_d ในแบบที่ 2

แบบที่ 6 คือ ป้อนด้วยค่า t_d ที่คี่เลยมีค่าน้อยลง ประมาณ 50% ของ t_d ในแบบที่ 2

บทที่ 6

ข้อวิจารณ์ผลการทดลองและแนวทางข้อเสนอแนะ

6.1 วิจารณ์ผลการทดลอง

การปรับปรุงผลตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์ให้มีค่าเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เร็วขึ้นปราศจากการสั่นของตัวแกนโรเตอร์ เป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับการนำสเตปป์มอเตอร์ไปประยุกต์ใช้งาน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาไม่ให้เกิดการสั่น และโอเวอร์ชูทของผลตอบสนองสเตปป์มอเตอร์ เพื่อให้ได้ระยะเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เร็วขึ้น โดยใช้วิธีการห้วงแบบการห้วงกระแส โดยการป้อนพัลส์กระแสเป็นขั้นบันได แทนการควบคุมการทำงานแบบเดิม ที่ป้อนพัลส์กระแสหรือโวลเตจเป็นแบบดิจิตอลพัลส์ ซึ่งไม่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้นได้ หลักการใหม่ที่น่าเสนอ คือการป้อนพัลส์กระแสเป็นขั้นบันได จากผลการทดลองจะเห็นว่าการทำงานห้วงกระแสด้วยวิธีนี้ ทำให้ได้ผลตอบสนองที่ราบเรียบ สามารถลดโอเวอร์ชูทลงได้ 98 เปอร์เซ็นต์ และได้ระยะเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่รวดเร็วกว่าถึง 74.94 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับแบบเดิมที่มีการป้อนพัลส์กระแสเป็นแบบดิจิตอลพัลส์ ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ง่าย โดยการควบคุมและสร้างสัญญาณแบบขั้นบันไดโดยใช้ซอฟต์แวร์เป็นตัวควบคุม ผ่านวงจรทางด้านฮาร์ดแวร์ ซึ่งอุปกรณ์ทั้งซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์สามารถหาได้ง่าย และมีราคาต่ำ อีกทั้งยังสะดวกต่อการควบคุมการขับเคลื่อนสเตปป์มอเตอร์ให้ทำงานในแต่ละเฟส โดยเพียงแค่กระตุ้นสเตปป์มอเตอร์ครั้งละเฟสก็สามารถลดการสั่นและโอเวอร์ชูทลงได้ เหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานในกรณีที่มีโหลดคงที่ เช่น เครื่องพรีนเตอร์ , เครื่องพล็อตเตอร์ , เครื่องเทเลไทป์

6.2 แนวทางข้อเสนอแนะ เพื่อการพัฒนาต่อไปในอนาคต

ลักษณะการควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ของงานวิจัยนี้ จะอยู่ในลักษณะของการควบคุมแบบรูปเปิด ดังนั้น ถ้าหากมีการพัฒนาต่อไปในอนาคต โดยสามารถควบคุมให้อยู่ในลักษณะที่สามารถจะเรียนรู้ การปรับค่าสัญญาณควบคุมนี้ด้วยตัวเองให้เป็นแบบที่เรียนรู้ได้ด้วยตนเองอย่างอัตโนมัติ ตามสถานะการณ์ของผลตอบสนองที่เกิดขึ้น หรือเปลี่ยนแปลงไป จะเอื้อ

ประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานได้ อย่างกว้างขวางขึ้นกว่านี้ นอกจากนี้ ถ้าหากสามารถ ออกแบบวงจรควบคุม ให้มีประสิทธิภาพที่สูงและใช้ต้นทุนที่ต่ำแล้ว จะเป็นประโยชน์อย่างมาก ต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน ทั้งในเชิงอุตสาหกรรม และพาณิชย์ต่อไปในอนาคตได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

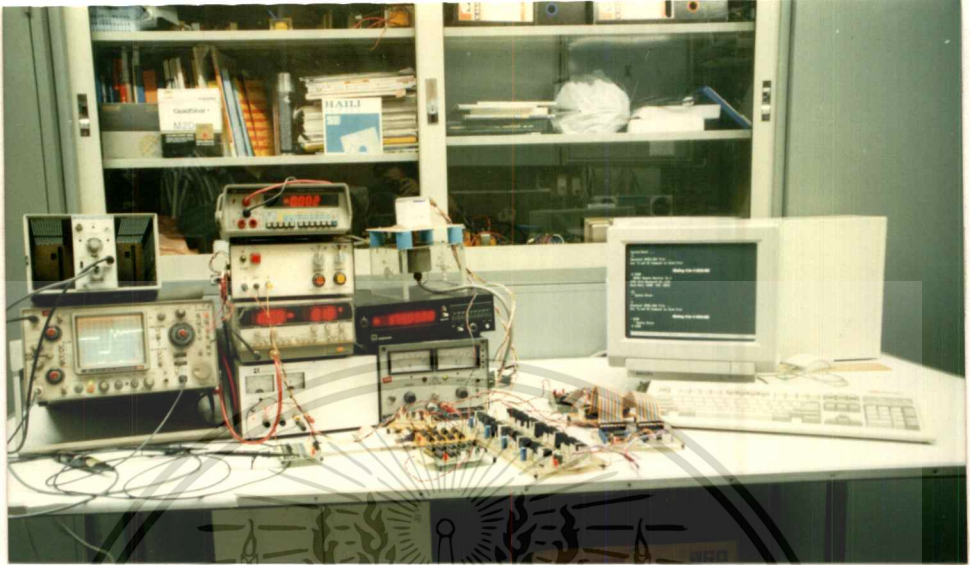
เอกสารอ้างอิง

- [1] Takashi Kenjo , “Stepping motor and their microprocessor controls”, Claren Press , Oxford , 1986
- [2] Benjamin C.Kuo , “Theory and application of Step mortors” , West Publishing Co., 1974
- [3] Benjamin C.Kuo , “Damping method of step mortors”, Department of Electrical Engineering , University of Illinois at Urbana-Champaign Urbana , Illinois , 1974
- [4] P.P.Acamley , “Stepping motors : a guide to modern theory and practice” , IEE Control Engineering Series 19 , Peter Peregrius Ltd. , 1984
- [5] โยธิน เปรมปราณีรัชต์ , “ระบบเซอร์โวและอิเล็กทรอนิกส์คอนโทรลมอเตอร์” , ตำราชุดวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง , พ.ศ. 2533
- [6] สรวุฒิ วณิชชานุกร , โยธิน เปรมปราณีรัชต์ , “การลดโอเวอร์ชูทและออสซิลเลชันในแต่ละสเตปของผลตอบสนองสเตปปีงมอเตอร์โดยวิธีการหน่วงกระแส” , วารสารวิศวกรรมลาดกระบัง , เดือนตุลาคม 2540 ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
- [7] วุฒิชัย สังขกุล , “การขับสเตปปีงมอเตอร์ในโหมดไมโครสเตปด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง” , วิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง พ.ศ. 2539

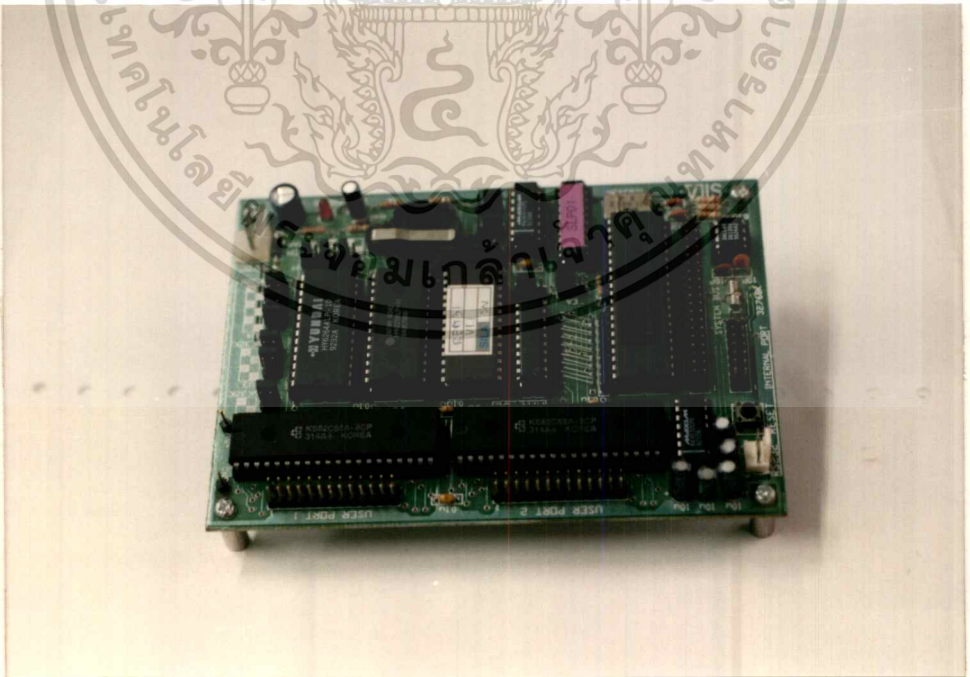
The logo of Rajabhat Buriram University is a circular emblem. It features a central sun with rays, flanked by two traditional Thai stupas. Below the sun is a central figure, possibly a deity or a symbol of knowledge, surrounded by ornate floral and geometric patterns. The entire emblem is enclosed in a circular border with Thai text.

ภาคผนวก ก

แสดงภาพถ่ายส่วนต่างๆของระบบที่ใช้ในงานวิจัย เรื่องศึกษาผลตอบสนองแต่ละสเตป
ของสเตปปีงมอเตอร์ที่มีการหน่วงกระแสในโหมดในการกระตุ้นแบบเฟสเดียว

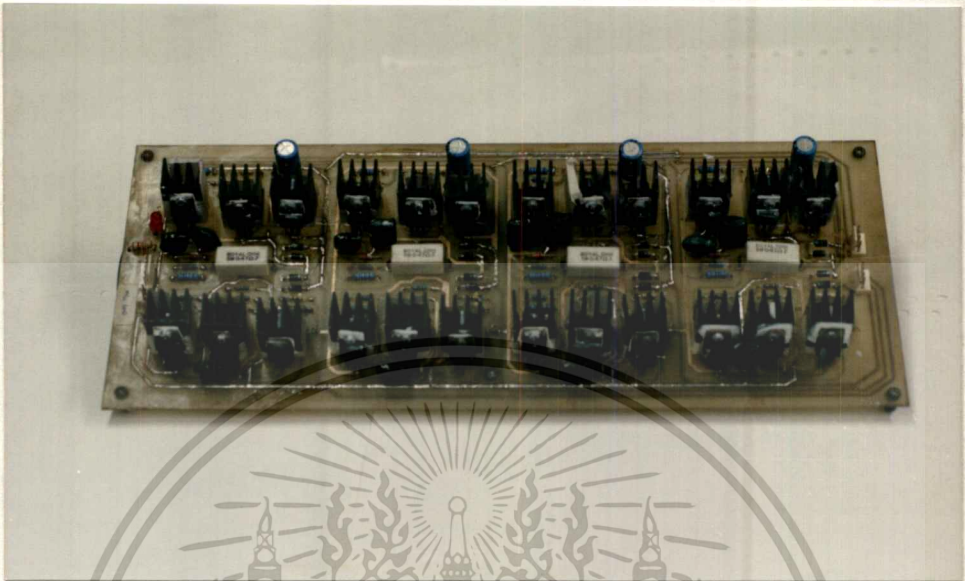


รูป ก.1 แสดงชุดระบบทดลองโดยรวมที่ใช้ในงานวิจัย

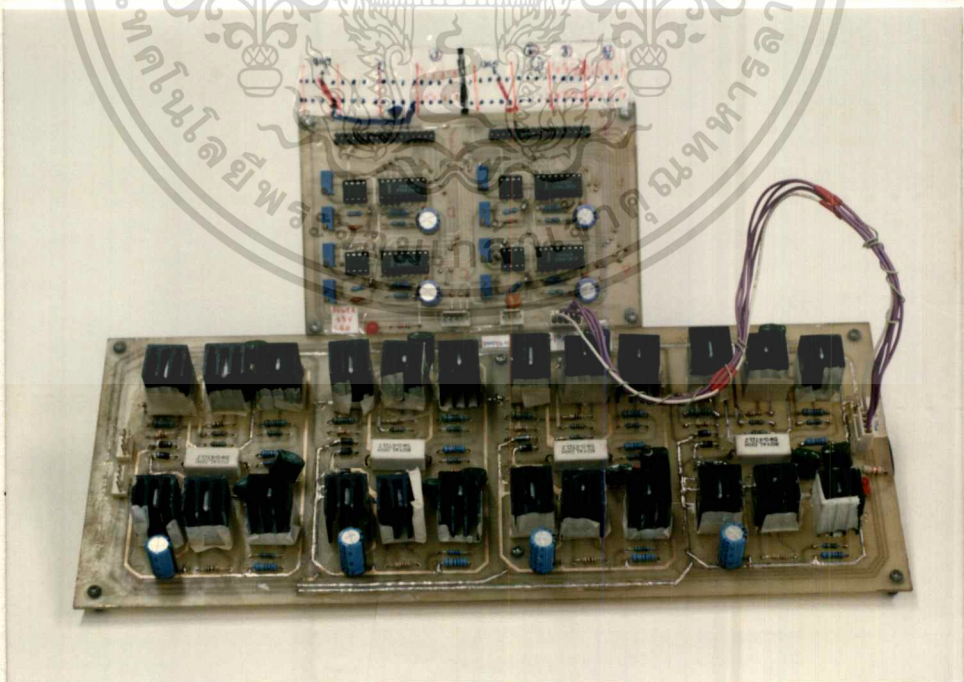


รูป ก.2 แสดงส่วนของวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCS-51)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



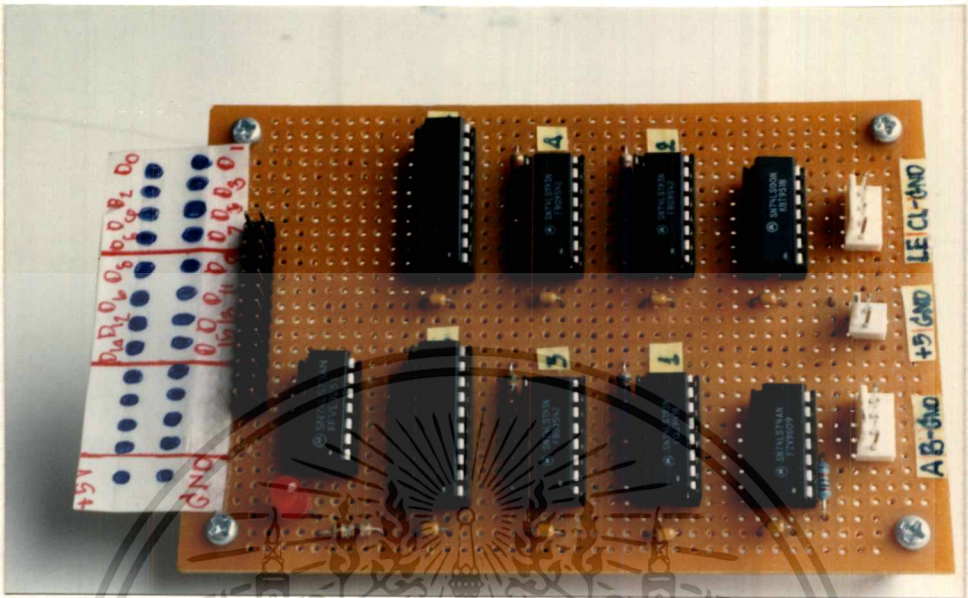
รูป ก.5 แสดงส่วนของวงจรแปลงโวลเตจเป็นกระแส (V TO I)
และภาคขั้วกำลังสเตปป์มอเตอร์



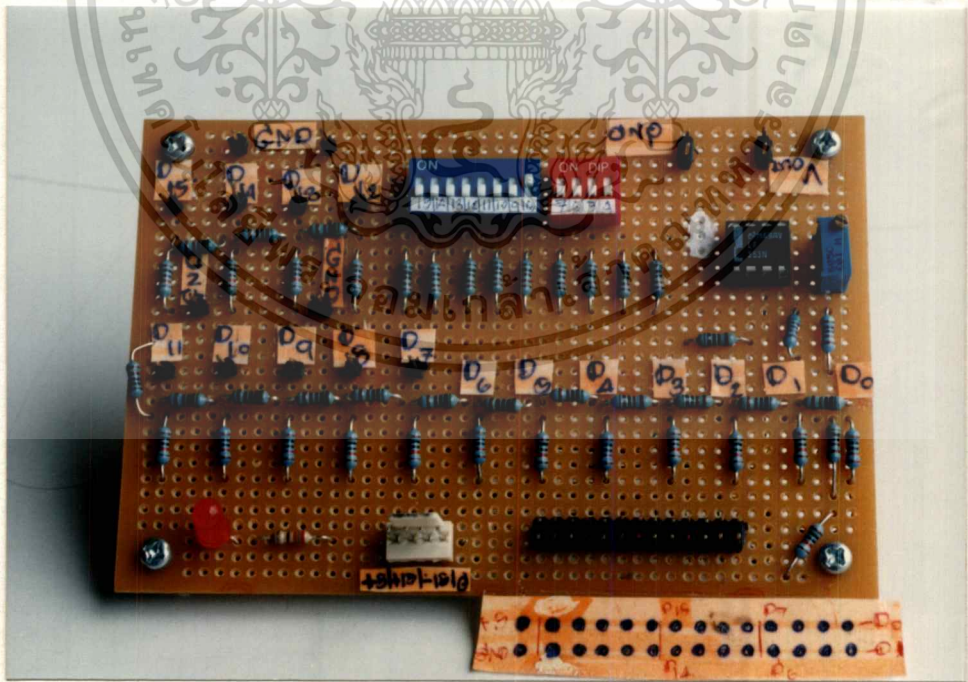
รูป ก.6 แสดงส่วนการเชื่อมต่อระหว่าง วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัล

เป็นอนาลอก (DAC) กับ วงจรแปลงโวลเตจเป็นกระแส (V TO I)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
และภาคขั้วกำลังสเตปป์มอเตอร์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

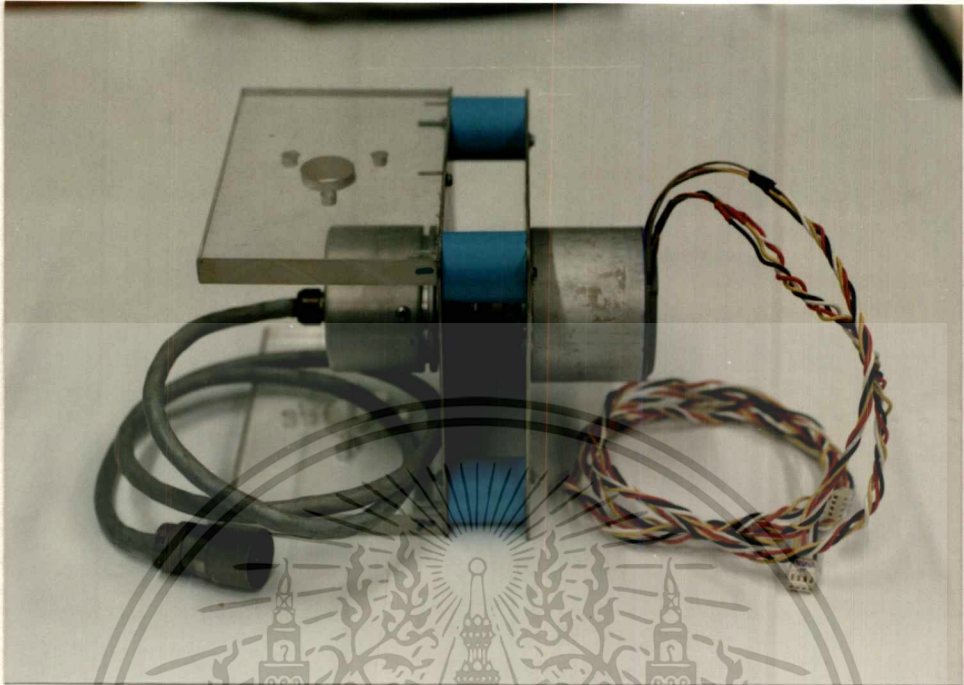


รูป ก.7 แสดงส่วนของวงจรนับขึ้น-ลง แบบไบনারี



รูป ก.8 แสดงส่วนของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก
แบบ R-2R LADDER ที่ใช้สังเกตผลตอบสนอง

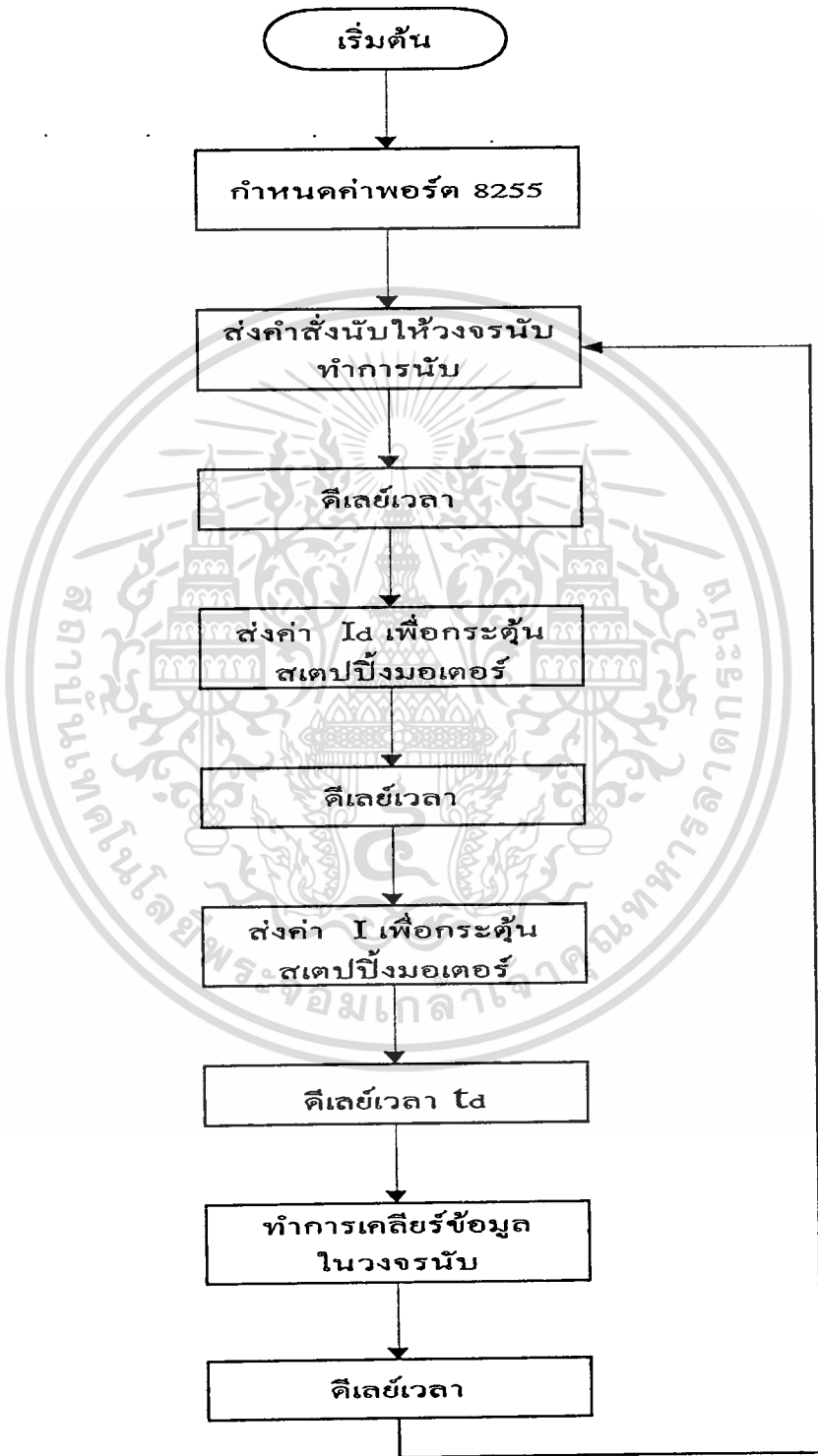
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ก.9 แสดงส่วนของสเตปป์มอเตอร์และออปติคอลลอน โคคเคอร์ที่ใช้ในการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แผนภูมิที่ ข.1 แสดงโฟลว์ชาร์ทของโปรแกรมควบคุมที่ใช้สำหรับการห้วงกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

;*****
; Program control stepping motor in single step mode *
; by one phase exciting on current control mode from *
; D to A , out data from both 8255 port a,b = 0FFH *
; THIS PROGRAM IS 1PHASE.ASM ,OBSERVE STEP RESPONSE *
;*****

```

```

UP1A EQU 0F800H
UP1B EQU 0F801H
UP1C EQU 0F802H
UP1P EQU 0F803H
UP2A EQU 0FC00H
UP2B EQU 0FC01H
UP2C EQU 0FC02H
UP2P EQU 0FC03H

ORG 8100H
MOV A,#80H ; SET DATA CONTROL 8255
MOV DPTR,#UP1P
MOVX @DPTR,A ; OUT DATA CONTROL 8255 NO.1
MOV DPTR,#UP2P
MOVX @DPTR,A ; OUT DATA CONTROL 8255 NO.2

```

```

LOOP: MOV A,#0FFH
MOV DPTR,#UP1A
MOVX @DPTR,A ; OUT PHASE 1
LCALL DELAY
LCALL LATCH ;LATCH FOR COUNT OVERSHOOT

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

LCALL LATCH          ;LATCH FOR COUNT STEADY STATE
MOV  A,#00H
MOV  DPTR,#UP1A
MOVX @DPTR,A        ; CLEAR DATA PORT 1A

MOV  A,#0FFH
MOV  DPTR,#UP1B
MOVX @DPTR,A        ; OUT PHASE 2
LCALL DELAY
LCALL LATCH          ;LATCH FOR COUNT OVERSHOOT
LCALL CLEAR          ;CLEAR COUNTER
LCALL LATCH          ;LATCH FOR COUNT STEADY STATE
MOV  A,#00H
MOV  DPTR,#UP1B
MOVX @DPTR,A        ; CLEAR DATA PORT 1B

MOV  A,#0FFH
MOV  DPTR,#UP2A
MOVX @DPTR,A        ; OUT PHASE 3
LCALL DELAY
LCALL LATCH          ;LATCH FOR COUNT OVERSHOOT
LCALL CLEAR          ;CLEAR COUNTER
LCALL LATCH          ;LATCH FOR COUNT STEADY STATE
MOV  A,#00H
MOV  DPTR,#UP2A
MOVX @DPTR,A        ;CLEAR DATA PORT 2A

MOV  A,#0FFH
MOV  DPTR,#UP2B

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานโดยไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

LCALL DELAY
LCALL LATCH ;LATCH FOR COUNT OVERSHOOT
LCALL CLEAR ;CLEAR COUNTER
LCALL LATCH ;LATCH FOR COUNT STEADY STATE
MOV A,#00H
MOV DPTR,#UP2B
MOVX @DPTR,A ;CLEAR DATA PORT 2B
LJMP LOOP

```

```

DELAY: MOV R2,#20
DELAY1: MOV R1,#10
DELAY2: MOV R0,#10
        DJNZ R0,$
        DJNZ R1,DELAY2
        DJNZ R2,DELAY1 ;SET DELAY TIME CONTROL DATA
RET

```

```

LATCH: MOV A,#00H ;SET 74193 COUNT OVERSHOOT
        MOV DPTR,#UP1C
        MOVX @DPTR,A
        LCALL LDELAY
        MOV A,#02H ;LATCH OVERSHOOT,74193 COUNT
        MOV DPTR,#UP1C
        MOVX @DPTR,A
        RET

```

```

CLEAR: MOV A,#03H ;LATCH CLEAR COUNTER,74193 CLEAR
        MOV DPTR,#UP1C
        MOVX @DPTR,A

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV A,#02H ;LATCH CLEAR COUNTER,74193 COUNT
MOV DPTR,#UP1C
MOVX @DPTR,A
LCALL CDELAY
LDELAY: MOV R4,#10
LDELAY1: MOV R3,#100
        DJNZ R3,$
        DJNZ R4,LDELAY1
        RET
CDELAY: MOV R6,#10
CDELAY1: MOV R5,#10
        DJNZ R5,$
        DJNZ R6,CDELAY1
        RET
END

```

```

;*****
; Program control stepping motor in single step mode      *
; by one phase exciting on current control mode from      *
; D to A , out data from both 8255 port a,b = 0FFH      *
; THIS PROGRAM IS IMPROVED RESPONSE                       *
; OBSERVE STEP RESPONSE                                  *
;*****

```

```

PHASE1 EQU 0F800H
PHASE2 EQU 0F801H
UP1C EQU 0F802H
UP1P EQU 0F803H
PHASE3 EQU 0FC00H
PHASE4 EQU 0FC01H
UP2C EQU 0FC02H
UP2P EQU 0FC03H
GOOD EQU 80H
RUN EQU 0FFH

```

```

ORG 9100H
MOV A,#80H ; SET DATA CONTROL 8255
MOV DPTR,#UP1P
MOVX @DPTR,A ; OUT DATA CONTROL 8255 NO.1
MOV DPTR,#UP2P
MOVX @DPTR,A ; OUT DATA CONTROL 8255 NO.2
LCALL CLEAR

```

```

LOOP: MOV A,#GOOD-11H
MOV DPTR,#PHASE1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

LCALL SHOOTP1
MOV A,#RUN
MOVX @DPTR,A ; OUT PHASE 1
LCALL DELAY
LCALL CLEAR ;CLEAR COUNTER
MOV A,#00H
MOV DPTR,#PHASE1
MOVX @DPTR,A ; CLEAR DATA PORT 1A

MOV A,#GOOD-13H
MOV DPTR,#PHASE2
MOVX @DPTR,A
LCALL SHOOTP2
MOV A,#RUN
MOVX @DPTR,A ; OUT PHASE 2
LCALL DELAY
LCALL CLEAR ;CLEAR COUNTER
MOV A,#00H
MOV DPTR,#PHASE2
MOVX @DPTR,A ; CLEAR DATA PORT 1B

MOV A,#GOOD-18H
MOV DPTR,#PHASE3
MOVX @DPTR,A
LCALL SHOOTP3
MOV A,#RUN
MOVX @DPTR,A ; OUT PHASE 3
LCALL DELAY
LCALL CLEAR ;CLEAR COUNTER
MOV A,#00H

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV DPTR,#PHASE3
MOVX @DPTR,A ; CLEAR DATA PORT 2A

MOV A,#GOOD-5H
MOV DPTR,#PHASE4
MOVX @DPTR,A
LCALL SHOOTP4
MOV A,#RUN
MOVX @DPTR,A ; OUT PHASE 4
LCALL DELAY
LCALL CLEAR ;CLEAR COUNTER
MOV A,#00H
MOV DPTR,#PHASE4
MOVX @DPTR,A ; CLEAR DATA PORT 2B

LJMP LOOP

DELAY: MOV R2,#200
DELAY1: MOV R1,#200
DELAY2: MOV R0,#2
DJNZ R0,$
DJNZ R1,DELAY2
DJNZ R2,DELAY1 ; SET DELAY TIME CONTROL DATA
RET

CLEAR: MOV A,#03H ;SET COUNTER,74193 CLEAR
MOV DPTR,#UP1C
MOVX @DPTR,A
LCALL CDELAY
MOV A,#02H ;SET COUNTER,74193 COUNT
MOV DPTR,#UP1C

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOVX @DPTR,A
LCALL CDELAY
RET

```

```

SHOOTP1: MOV R1,#118
SHOOTP11: MOV R0,#106
          DJNZ R0,$
          DJNZ R1,SHOOTP11
          RET

```

```

SHOOTP2: MOV R1,#120
SHOOTP21: MOV R0,#102
          DJNZ R0,$
          DJNZ R1,SHOOTP21
          RET

```

```

SHOOTP3: MOV R1,#120
SHOOTP31: MOV R0,#110
          DJNZ R0,$
          DJNZ R1,SHOOTP31
          RET

```

```

SHOOTP4: MOV R1,#124
SHOOTP41: MOV R0,#95
          DJNZ R0,$
          DJNZ R1,SHOOTP41
          RET

```

```

CDELAY: MOV R6,#100

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DJNZ R5,\$
DJNZ R6,CDELAY1
RET

END



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

;*****
; Program control stepping motor in single step mode      *
; by one phase exciting on current control mode from      *
; D to A , out data from both 8255 port a,b = 0FFH        *
; THIS PROGRAM IS IMPROVED RESPONSE ( add current ) *
; OBSERVE STEP RESPONSE                                  *
;*****

```

```

PHASE1 EQU 0F800H
PHASE2 EQU 0F801H
UP1C EQU 0F802H
UP1P EQU 0F803H
PHASE3 EQU 0FC00H
PHASE4 EQU 0FC01H
UP2C EQU 0FC02H
UP2P EQU 0FC03H
GOOD EQU 80H
RUN EQU 0FFH

```

```

ORG 9100H
MOV A,#80H ; SET DATA CONTROL 8255
MOV DPTR,#UP1P
MOVX @DPTR,A ; OUT DATA CONTROL 8255 NO.1
MOV DPTR,#UP2P
MOVX @DPTR,A ; OUT DATA CONTROL 8255 NO.2
LCALL CLEAR

```

```

LOOP: MOV A,#GOOD+28H
MOV DPTR,#PHASE1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

LCALL SHOOTP1
MOV A,#RUN
MOVX @DPTR,A ; OUT PHASE 1
LCALL DELAY
LCALL CLEAR ;CLEAR COUNTER
MOV A,#00H
MOV DPTR,#PHASE1
MOVX @DPTR,A ; CLEAR DATA PORT 1A

MOV A,#GOOD+28H
MOV DPTR,#PHASE2
MOVX @DPTR,A
LCALL SHOOTP2
MOV A,#RUN
MOVX @DPTR,A ; OUT PHASE 2
LCALL DELAY
LCALL CLEAR ;CLEAR COUNTER
MOV A,#00H
MOV DPTR,#PHASE2
MOVX @DPTR,A ; CLEAR DATA PORT 1B

MOV A,#GOOD+28H
MOV DPTR,#PHASE3
MOVX @DPTR,A
LCALL SHOOTP3
MOV A,#RUN
MOVX @DPTR,A ; OUT PHASE 3
LCALL DELAY
LCALL CLEAR ;CLEAR COUNTER

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV DPTR,#PHASE3
MOVX @DPTR,A ; CLEAR DATA PORT 2A

MOV A,#GOOD+28H
MOV DPTR,#PHASE4
MOVX @DPTR,A
LCALL SHOOTP4
MOV A,#RUN
MOVX @DPTR,A ; OUT PHASE 4
LCALL DELAY
LCALL CLEAR ;CLEAR COUNTER
MOV A,#00H
MOV DPTR,#PHASE4
MOVX @DPTR,A ; CLEAR DATA PORT 2B

LJMP LOOP

DELAY: MOV R2,#200
DELAY1: MOV R1,#200
DELAY2: MOV R0,#2
DJNZ R0,$
DJNZ R1,DELAY2
DJNZ R2,DELAY1 ; SET DELAY TIME CONTROL DATA
RET

CLEAR: MOV A,#03H ;SET COUNTER,74193 CLEAR
MOV DPTR,#UP1C
MOVX @DPTR,A
LCALL CDELAY
MOV A,#02H ;SET COUNTER,74193 COUNT

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
MOVX @DPTR,A
```

```
LCALL CDELAY
```

```
RET
```

```
SHOOTP1: MOV R1,#118
```

```
SHOOTP11: MOV R0,#106
```

```
DJNZ R0,$
```

```
DJNZ R1,SHOOTP11
```

```
RET
```

```
SHOOTP2: MOV R1,#120
```

```
SHOOTP21: MOV R0,#102
```

```
DJNZ R0,$
```

```
DJNZ R1,SHOOTP21
```

```
RET
```

```
SHOOTP3: MOV R1,#120
```

```
SHOOTP31: MOV R0,#110
```

```
DJNZ R0,$
```

```
DJNZ R1,SHOOTP31
```

```
RET
```

```
SHOOTP4: MOV R1,#124
```

```
SHOOTP41: MOV R0,#95
```

```
DJNZ R0,$
```

```
DJNZ R1,SHOOTP41
```

```
RET
```

```
CDELAY: MOV R6,#100
```

```
CDELAY1: MOV R5,#50
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DJNZ R5,\$
DJNZ R6,CDELAY1
RET

END



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

;*****
; Program control stepping motor in single step mode *
; by one phase exciting on current control mode from *
; D to A , out data from both 8255 port a,b = 0FFH *
; THIS PROGRAM IS IMPROVED RESPONSE ( decrease current ) *
; OBSERVE STEP RESPONSE *
;*****

```

```

PHASE1 EQU 0F800H
PHASE2 EQU 0F801H
UP1C EQU 0F802H
UP1P EQU 0F803H
PHASE3 EQU 0FC00H
PHASE4 EQU 0FC01H
UP2C EQU 0FC02H
UP2P EQU 0FC03H
GOOD EQU 80H
RUN EQU 0FFH

ORG 9100H
MOV A,#80H ; SET DATA CONTROL 8255
MOV DPTR,#UP1P
MOVX @DPTR,A ; OUT DATA CONTROL 8255 NO.1
MOV DPTR,#UP2P
MOVX @DPTR,A ; OUT DATA CONTROL 8255 NO.2
LCALL CLEAR

LOOP: MOV A,#GOOD-2AH
MOV DPTR,#PHASE1
MOVX @DPTR,A

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

LCALL SHOOTP1
MOV A,#RUN
MOVX @DPTR,A ; OUT PHASE 1
LCALL DELAY
LCALL CLEAR ;CLEAR COUNTER
MOV A,#00H
MOV DPTR,#PHASE1
MOVX @DPTR,A ; CLEAR DATA PORT 1A

MOV A,#GOOD-2AH
MOV DPTR,#PHASE2
MOVX @DPTR,A
LCALL SHOOTP2
MOV A,#RUN
MOVX @DPTR,A ; OUT PHASE 2
LCALL DELAY
LCALL CLEAR ;CLEAR COUNTER
MOV A,#00H
MOV DPTR,#PHASE2
MOVX @DPTR,A ; CLEAR DATA PORT 1B

MOV A,#GOOD-2AH
MOV DPTR,#PHASE3
MOVX @DPTR,A
LCALL SHOOTP3
MOV A,#RUN
MOVX @DPTR,A ; OUT PHASE 3
LCALL DELAY
LCALL CLEAR ;CLEAR COUNTER

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV DPTR,#PHASE3
MOVX @DPTR,A ; CLEAR DATA PORT 2A

MOV A,#GOOD-2AH
MOV DPTR,#PHASE4
MOVX @DPTR,A
LCALL SHOOTP4
MOV A,#RUN
MOVX @DPTR,A ; OUT PHASE 4
LCALL DELAY
LCALL CLEAR ;CLEAR COUNTER
MOV A,#00H
MOV DPTR,#PHASE4
MOVX @DPTR,A ; CLEAR DATA PORT 2B

LJMP LOOP

DELAY: MOV R2,#200
DELAY1: MOV R1,#200
DELAY2: MOV R0,#2
DJNZ R0,$
DJNZ R1,DELAY2
DJNZ R2,DELAY1 ; SET DELAY TIME CONTROL DATA
RET

CLEAR: MOV A,#03H ;SET COUNTER,74193 CLEAR
MOV DPTR,#UP1C
MOVX @DPTR,A
LCALL CDELAY
MOV A,#02H ;SET COUNTER,74193 COUNT

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการศึกษาด้านนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOVX @DPTR,A
LCALL CDELAY
RET

```

```

SHOOTP1: MOV R1,#118
SHOOTP11: MOV R0,#106
          DJNZ R0,$
          DJNZ R1,SHOOTP11
          RET

```

```

SHOOTP2: MOV R1,#120
SHOOTP21: MOV R0,#102
          DJNZ R0,$
          DJNZ R1,SHOOTP21
          RET

```

```

SHOOTP3: MOV R1,#120
SHOOTP31: MOV R0,#110
          DJNZ R0,$
          DJNZ R1,SHOOTP31
          RET

```

```

SHOOTP4: MOV R1,#124
SHOOTP41: MOV R0,#95
          DJNZ R0,$
          DJNZ R1,SHOOTP41
          RET

```

```

CDELAY: MOV R6,#100

```

```

CDELAY1: MOV R5,#50

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
DJNZ R5,$  
DJNZ R6,CDELAY1  
RET  
  
END
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

;*****
; Program control stepping motor in single step mode          *
; by one phase exciting on current control mode from          *
; D to A , out data from both 8255 port a,b = 0FFH           *
; THIS PROGRAM IS IMPROVED RESPONSE ( add time )              *
; OBSERVE STEP RESPONSE                                       *
;*****

```

```

PHASE1 EQU 0F800H
PHASE2 EQU 0F801H
UP1C EQU 0F802H
UP1P EQU 0F803H
PHASE3 EQU 0FC00H
PHASE4 EQU 0FC01H
UP2C EQU 0FC02H
UP2P EQU 0FC03H
GOOD EQU 80H
RUN EQU 0FFH

ORG 9100H
MOV A,#80H ; SET DATA CONTROL 8255
MOV DPTR,#UP1P
MOVX @DPTR,A ; OUT DATA CONTROL 8255 NO.1
MOV DPTR,#UP2P
MOVX @DPTR,A ; OUT DATA CONTROL 8255 NO.2
LCALL CLEAR

LOOP: MOV A,#GOOD-11H
MOV DPTR,#PHASE1
MOVX @DPTR,A

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

LCALL SHOOTP1
MOV A,#RUN
MOVX @DPTR,A ; OUT PHASE 1
LCALL DELAY
LCALL CLEAR ;CLEAR COUNTER
MOV A,#00H
MOV DPTR,#PHASE1
MOVX @DPTR,A ; CLEAR DATA PORT 1A

MOV A,#GOOD-13H
MOV DPTR,#PHASE2
MOVX @DPTR,A
LCALL SHOOTP2
MOV A,#RUN
MOVX @DPTR,A ; OUT PHASE 2
LCALL DELAY
LCALL CLEAR ;CLEAR COUNTER
MOV A,#00H
MOV DPTR,#PHASE2
MOVX @DPTR,A ; CLEAR DATA PORT 1B

MOV A,#GOOD-18H
MOV DPTR,#PHASE3
MOVX @DPTR,A
LCALL SHOOTP3
MOV A,#RUN
MOVX @DPTR,A ; OUT PHASE 3
LCALL DELAY
LCALL CLEAR ;CLEAR COUNTER
MOV A,#00H

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV DPTR,#PHASE3
MOVX @DPTR,A ; CLEAR DATA PORT 2A

MOV A,#GOOD-5H
MOV DPTR,#PHASE4
MOVX @DPTR,A
LCALL SHOOTP4
MOV A,#RUN
MOVX @DPTR,A ; OUT PHASE 4
LCALL DELAY
LCALL CLEAR ;CLEAR COUNTER
MOV A,#00H
MOV DPTR,#PHASE4
MOVX @DPTR,A ; CLEAR DATA PORT 2B

LJMP LOOP

DELAY: MOV R2,#200
DELAY1: MOV R1,#200
DELAY2: MOV R0,#2
DJNZ R0,$
DJNZ R1,DELAY2
DJNZ R2,DELAY1 ; SET DELAY TIME CONTROL DATA
RET

CLEAR: MOV A,#03H ;SET COUNTER,74193 CLEAR
MOV DPTR,#UP1C
MOVX @DPTR,A
LCALL CDELAY
MOV A,#02H ;SET COUNTER,74193 COUNT
MOV DPTR,#UP1C

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOVX @DPTR,A
LCALL CDELAY
RET

```

```
SHOOTP1: MOV R1,#120
```

```
SHOOTP11: MOV R0,#165
```

```
DJNZ R0,$
```

```
DJNZ R1,SHOOTP11
```

```
RET
```

```
SHOOTP2: MOV R1,#120
```

```
SHOOTP21: MOV R0,#165
```

```
DJNZ R0,$
```

```
DJNZ R1,SHOOTP21
```

```
RET
```

```
SHOOTP3: MOV R1,#120
```

```
SHOOTP31: MOV R0,#165
```

```
DJNZ R0,$
```

```
DJNZ R1,SHOOTP31
```

```
RET
```

```
SHOOTP4: MOV R1,#12
```

```
SHOOTP41: MOV R0,#165
```

```
DJNZ R0,$
```

```
DJNZ R1,SHOOTP41
```

```
RET
```

```
CDELAY: MOV R6,#100
```

```
CDELAY1: MOV R5,#50
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DJNZ R5,\$

DJNZ R6,CDELAY1

RET

END



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

;*****
; Program control stepping motor in single step mode *
; by one phase exciting on current control mode from *
; D to A , out data from both 8255 port a,b = 0FFH *
; THIS PROGRAM IS IMPROVED RESPONSE ( decrease time ) *
; OBSERVE STEP RESPONSE *
;*****

```

```

PHASE1 EQU 0F800H
PHASE2 EQU 0F801H
UP1C EQU 0F802H
UP1P EQU 0F803H
PHASE3 EQU 0FC00H
PHASE4 EQU 0FC01H
UP2C EQU 0FC02H
UP2P EQU 0FC03H
GOOD EQU 80H
RUN EQU 0FFH

ORG 9100H
MOV A,#80H ; SET DATA CONTROL 8255
MOV DPTR,#UP1P
MOVX @DPTR,A ; OUT DATA CONTROL 8255 NO.1
MOV DPTR,#UP2P
MOVX @DPTR,A ; OUT DATA CONTROL 8255 NO.2
LCALL CLEAR

LOOP: MOV A,#GOOD-11H
MOV DPTR,#PHASE1
MOVX @DPTR,A

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือสงวนชื่อเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

LCALL SHOOTP1
MOV A,#RUN
MOVX @DPTR,A ; OUT PHASE 1
LCALL DELAY
LCALL CLEAR ;CLEAR COUNTER
MOV A,#00H
MOV DPTR,#PHASE1
MOVX @DPTR,A ; CLEAR DATA PORT 1A

MOV A,#GOOD-13H
MOV DPTR,#PHASE2
MOVX @DPTR,A
LCALL SHOOTP2
MOV A,#RUN
MOVX @DPTR,A ; OUT PHASE 2
LCALL DELAY
LCALL CLEAR ;CLEAR COUNTER
MOV A,#00H
MOV DPTR,#PHASE2
MOVX @DPTR,A ; CLEAR DATA PORT 1B

MOV A,#GOOD-18H
MOV DPTR,#PHASE3
MOVX @DPTR,A
LCALL SHOOTP3
MOV A,#RUN
MOVX @DPTR,A ; OUT PHASE 3
LCALL DELAY
LCALL CLEAR ;CLEAR COUNTER
MOV A,#00H

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับสำนักงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV DPTR,#PHASE3
MOVX @DPTR,A ; CLEAR DATA PORT 2A

MOV A,#GOOD-5H
MOV DPTR,#PHASE4
MOVX @DPTR,A
LCALL SHOOTP4
MOV A,#RUN
MOVX @DPTR,A ; OUT PHASE 4
LCALL DELAY
LCALL CLEAR ;CLEAR COUNTER
MOV A,#00H
MOV DPTR,#PHASE4
MOVX @DPTR,A ; CLEAR DATA PORT 2B

LJMP LOOP

DELAY: MOV R2,#200
DELAY1: MOV R1,#200
DELAY2: MOV R0,#2
DJNZ R0,$
DJNZ R1,DELAY2
DJNZ R2,DELAY1 ; SET DELAY TIME CONTROL DATA
RET

CLEAR: MOV A,#03H ;SET COUNTER,74193 CLEAR
MOV DPTR,#UP1C
MOVX @DPTR,A
LCALL CDELAY
MOV A,#02H ;SET COUNTER,74193 COUNT
MOV DPTR,#UP1C

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOVX @DPTR,A
LCALL CDELAY
RET

```

```
SHOOTP1: MOV R1,#120
```

```
SHOOTP11: MOV R0,#50
```

```
DJNZ R0,$
```

```
DJNZ R1,SHOOTP11
```

```
RET
```

```
SHOOTP2: MOV R1,#120
```

```
SHOOTP21: MOV R0,#50
```

```
DJNZ R0,$
```

```
DJNZ R1,SHOOTP21
```

```
RET
```

```
SHOOTP3: MOV R1,#120
```

```
SHOOTP31: MOV R0,#50
```

```
DJNZ R0,$
```

```
DJNZ R1,SHOOTP31
```

```
RET
```

```
SHOOTP4: MOV R1,#120
```

```
SHOOTP41: MOV R0,#50
```

```
DJNZ R0,$
```

```
DJNZ R1,SHOOTP41
```

```
RET
```

```
CDELAY: MOV R6,#100
```

```
CDELAY1: MOV R5,#50
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DJNZ R5,\$

DJNZ R6,CDELAY1

RET

END



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสาร วิศวกรรมลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลดโอเวอร์ชูทและออสซิลเลทในแต่ละสเตปของ ผลตอบสนองสเตปปีงมอเตอร์โดยวิธีการหน่วงกระแส (Current damping for single step response of stepping motor)

*สรารวุฒิ วณิชชานุกร

**ดร.โยธิน เปรมปราณีรัชต์

**Mr. Sarawut Wanitchanukorn

**Dr.Yothin Prempraneerach

*นักศึกษาปริญญาโท

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

**รองศาสตราจารย์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการลดการเกิด โอเวอร์ชูทและออสซิลเลท(overshoot and oscillate)ในแต่ละสเตปของผลตอบสนองสเตปปีงมอเตอร์ที่ได้จากการกระตุ้นสเตปปีงมอเตอร์ โดยอาศัยเทคนิควิธีการหน่วงเชิงอิเล็กทรอนิกส์(electronics damping)แบบควบคุมการหน่วงกระแส(current damping)ที่ป้อนในแต่ละเฟส โดยสร้างสัญญาณพัลส์กระแสมีลักษณะเป็นขั้นบันได ไปควบคุมการขับสเตปปีงมอเตอร์ในแต่ละเฟส ซึ่งพบว่าการกระตุ้นสเตปปีงมอเตอร์ด้วยวิธีนี้สามารถลดการเกิด โอเวอร์ชูทและออสซิลเลทลงได้เกือบหมด โดยผลตอบสนองที่ได้มีลักษณะราบเรียบมากขึ้นและทำให้ค่าเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัว(settling time)มีค่าลดลง

Abstract

This paper presents the method to decrease overshoots and oscillation in single step response of stepping motor by electronic damping control technique which is current damping control as staircase in each phase of stepping motor ,the results shows that the overshoots and oscillation in single step response will be decrease ,give a smooth response and settling time also can be reduced

1.บทนำ

ในการขับสเตปปีงมอเตอร์โดยทั่วไปนิยมการขับแบบป้อนพัลส์ให้กับสเตปปีงมอเตอร์

ด้วยวงจรขับที่มีค่าโวลต์เดจและกระแสที่คงที่ [1,4] เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่มุ่งลดต้นทุนค่าใช้จ่ายประโยชน์ด้านการค้า

ผลตอบสนองที่ได้ต้องมีเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัว
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นผลตอบสนองที่ได้จากการขับแบบนี้จึงเกิดโอเวอร์ชูทและออสซิลเลทขึ้น ซึ่งสิ่งนี้เป็นปัญหาที่เกิดขึ้นกับการขับสเตปปีงมอเตอร์แบบทั่วไป แต่การนำสเตปปีงมอเตอร์ไปใช้งาน สิ่งที่ต้องการคือ

ที่มีค่าน้อย (settling time, t_s) รวมถึงตำแหน่งสเตปที่ถูกต้อง โดยปราศจาก ค่าการเกิดโอเวอร์ชูท (V_p) และออสซิลเลท แต่ข้อเสียที่เกิดขึ้นจากการขับแบบป้อนพัลส์ทั่วไป ก็คือ จะเกิดการออสซิลเลทและโอเวอร์ชูทขึ้น ทำให้เวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวมีค่านาน ดังในรูปที่ 1 ซึ่งสิ่งนี้เป็นข้อเสียอย่างมากถ้ามีการนำไปใช้งานการขับเคลื่อน (carriage) ของเครื่องพิมพ์ (printer) , เครื่องพลอตเตอร์ (plotter) , เครื่องเทเลไทป์ (teletype) ความเร็วที่ใช้ในการพิมพ์อักษรแต่ละตัวจึงถูกจำกัดด้วยปัญหาการเกิดโอเวอร์ชูทและออสซิลเลท ซึ่งสิ่งนี้เป็นผลที่เกิดจากการขับสเตปปีงมอเตอร์แบบป้อนพัลส์ทั่วไป [3]

ดังนั้นวิธีการที่ใช้ควบคุมการขับเคลื่อนสเตปปีงมอเตอร์เพื่อไม่ให้เกิดโอเวอร์ชูทและออสซิลเลทในแต่ละสเตปที่ถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไป จึงมีอยู่หลายวิธี ดังนี้ [1,2]

1.วิธีการหน่วงเชิงกล (external mechanic damper) เป็นการต่ออุปกรณ์การหน่วงเชิงกลเข้าทางแกนหมุนของสเตปปีงมอเตอร์

2.วิธีปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างของตัวสเตปปีงมอเตอร์ (modification of motor parameter) เป็นการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ทางโครงสร้างของตัวสเตปปีงมอเตอร์

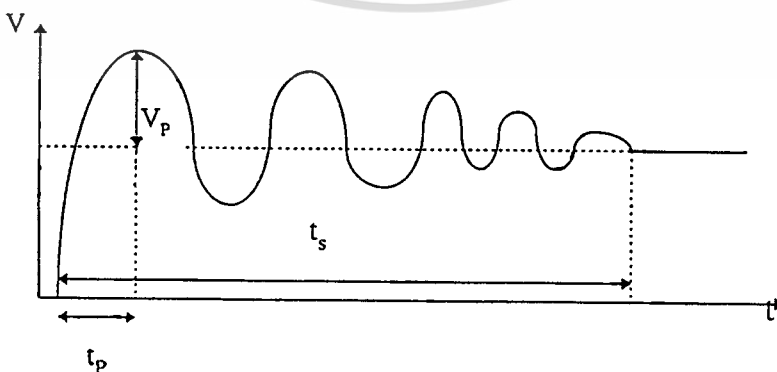
3.วิธีการหน่วงเชิงอิเล็กทรอนิกส์ (electronics damping) เป็นวิธีการหน่วงด้วยการควบคุมการป้อนพัลส์ที่ใช้ขับเคลื่อนสเตปปีงมอเตอร์ ซึ่งมีอยู่หลายวิธี

3.1 วิธีป้อนพัลส์ย้อนกลับเฟส (back phasing or Bang-Bang control)

3.2 วิธีดีเลย์สเตปสุดท้าย (delay - last step)

3.3.วิธีกำหนดช่วงห่างของพัลส์แบบคงที่ (constant- pulse rate)

ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้ ต้องกระตุ้นพัลส์ให้กับสเตปปีงมอเตอร์ครั้งละ 3 เฟสและต้องจัดเวลาการป้อนพัลส์ในแต่ละลูกให้เหมาะสมด้วยจึงจะสามารถลดการเกิดโอเวอร์ชูทและออสซิลเลทลงได้ ซึ่งวิธีดังกล่าวข้างต้น เป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน [2]



รูปที่ 1 แสดงผลตอบสนองของสเตปปีงมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการขับเคลื่อนมอเตอร์ เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ปราศจากการเกิดโอเวอร์ชูทและออสซิลเลชันในแคสเคด โดยใช้วิธีการหน่วงเชิงอิเล็กทรอนิกส์ (electronic damping) เช่นกัน แต่เป็นชนิดการหน่วงกระแสที่ป้อนในแต่ละเฟส โดยใช้วิธีการป้อนพัลส์กระแสเป็นแบบขั้นบันได ให้กับแคสเคดมอเตอร์ ซึ่งพัลส์ดังกล่าวมีรูปร่างลักษณะเป็นขั้นบันได ที่มีค่าต่ำกับค่าสูงเรียงติดกัน โดยการสร้างสัญญาณโวลเตจควบคุมแบบขั้นบันได ไปควบคุมวงจรควบคุมกระแสแบบแปลงค่าโวลเตจเป็นกระแส (voltage to current control) ซึ่งให้สัญญาณกระแสที่เป็นเชิงเส้นกับสัญญาณโวลเตจควบคุม แล้วจึงนำสัญญาณกระแสแบบขั้นบันไดที่ได้นี้ ไปควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์

2. แนวความคิดและหลักการ

เนื่องจาก ค่าของทอร์ค เป็นฟังก์ชัน ของ θ และ I ดังนั้น $f(\theta, I) = T$ ถ้าเราประมาณ ค่าของทอร์ค ให้เป็น ฟังก์ชันของ θ จะได้ว่า $f(\theta) * I = T$ โดยประมาณค่าความสัมพันธ์ ให้เป็นแบบเชิงเส้น โดยที่

$$T = -kI \sin \theta \approx -kI \theta \tag{1}$$

k คือค่าคงที่ ของทอร์ค

θ คือ มุมการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เมื่อถึงจุดสมดุลพอดี

θ_p คือ มุมการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ที่เลยออกจากจุดสมดุลในช่วงที่เกิดโอเวอร์ชูท

θ_d คือ มุมการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ที่ถูกควบคุมด้วยกระแส I_d

θ_s คือ มุมการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ที่ต่อจาก θ_d จนหยุดที่จุดสมดุลพอดี

I_d คือ ค่าของกระแสที่ใช้ คิลย์

I คือ ค่ากระแสสูงสุดที่ใช้ขับเคลื่อน ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\theta = \theta_d + \theta_s \tag{2}$$

สมการ ทอร์ค ของการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ ที่เลยจากจุดสมดุล มีความสัมพันธ์ดังสมการ (3)

$$T = -kI\theta + kI\theta_p \tag{3}$$

สมการ ทอร์ค ของการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ ที่หยุดที่จุดสมดุลพอดี มีความสัมพันธ์ดังสมการ (4)

$$T_E = -kI_d\theta_d - kI\theta_s \tag{4}$$

ณ จุดสมดุลที่ไม่เกิดโอเวอร์ชูท จะได้ว่า

$$T = T_E \text{ ดังนั้น } (3) = (4)$$

$$-kI\theta + kI\theta_p = -kI_d\theta_d - kI\theta_s \tag{5}$$

$$I\theta - I\theta_p = I_d\theta_d + I\theta_s \tag{6}$$

จาก สมการ (2) จะได้ว่า

$$\theta_s = \theta - \theta_d \tag{7}$$

แทนค่า (7) ลงใน (6) จะได้ว่า

$$I\theta - I\theta_p = I_d\theta_d + I(\theta - \theta_d) \tag{8}$$

$$I\theta - I\theta_p = I_d\theta_d + I\theta - I\theta_d \tag{9}$$

$$I\theta_d - I\theta_p = I_d\theta_d \tag{10}$$

$$I(\theta_d - \theta_p) = I_d\theta_d \tag{11}$$

$$I_d/I = (\theta_d - \theta_p)/\theta_d \tag{12}$$

$$I_d/I = 1 - (\theta_p/\theta_d) \tag{13}$$

$$\text{แต่ } \theta_d = \omega t_d \tag{14}$$

$$\theta_p = \omega t_p \tag{15}$$

แทนค่า (14), (15) ลงใน (13) จะได้ว่า

$$(I_d/I) = 1 - (\omega t_p / \omega t_d) \tag{16}$$

$$(I_d/I) = 1 - (t_p / t_d) \tag{17}$$

โดยที่ t_p คือ ช่วงเวลาที่ เกิดโอเวอร์ชูท

t_d คือ ช่วงเวลาที่คิลย์ turn on ด้วย

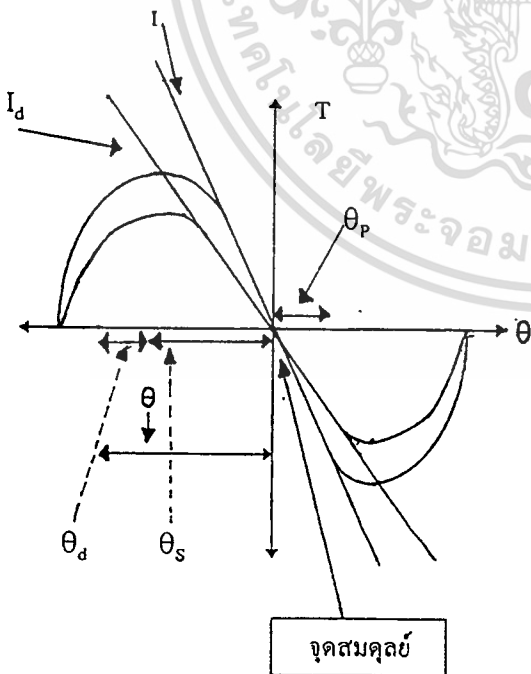
กระแส I_d

จากสมการ (17) เรานำค่าของพิคโวลเตจช่วงที่เกิดโอเวอร์ชูท (V_p) ไปสร้างเป็นสัญญาณควบคุม (V_d) แล้วแปลงเป็นสัญญาณกระแสแบบขั้นบันไดในช่วง delay turn on (I_d) โดยผ่านวงจร

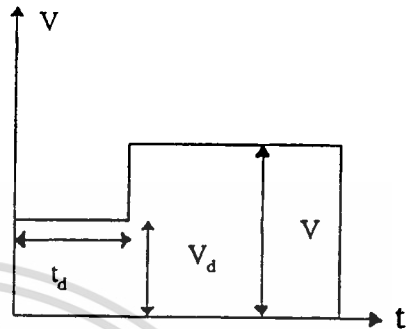
ควบคุมกระแสแบบแปลงค่าโวลเตจเป็นกระแส (voltage to current control) ซึ่งให้สัญญาณกระแสที่เป็นเชิงเส้นกับสัญญาณโวลเตจควบคุม และจากสมการ (17) จะได้ช่วงเวลา delay turn on (t_d) มีค่าประมาณ สองเท่าของเวลาที่เกิดฟิสิกโอเวอร์ชูต (t_p) ในแต่ละสลับ โดยนำค่าที่เฉลี่ยเหล่านี้ไปสร้างเป็นสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันไดที่ delay turn on ด้วยค่าดังกล่าว เพื่อเปลี่ยนเป็นสัญญาณกระแสแบบขั้นบันไดที่มีการ delay turn on เดียวกันกับสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันได นำไปควบคุมการขับสลับปึงมอเตอร์ในแต่ละเฟส ดังในรูปที่ 2.2 สำหรับวงจรควบคุมกระแสแบบแปลงค่าโวลเตจเป็นกระแส (voltage to current control) ดังในรูปที่ 2.3 นั้นมีค่าความสัมพันธ์ดังนี้

$$V = KI \tag{18}$$

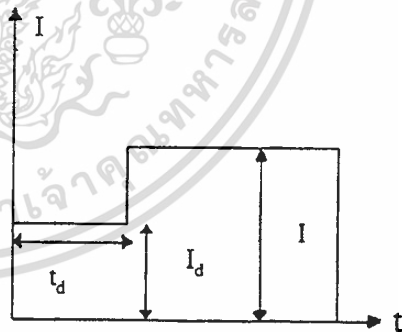
โดยที่ K คือ ค่าคงที่



รูปที่ 2.1 การประมาณค่าเคิร์ฟ T- θ ด้วยสมการเชิงเส้น



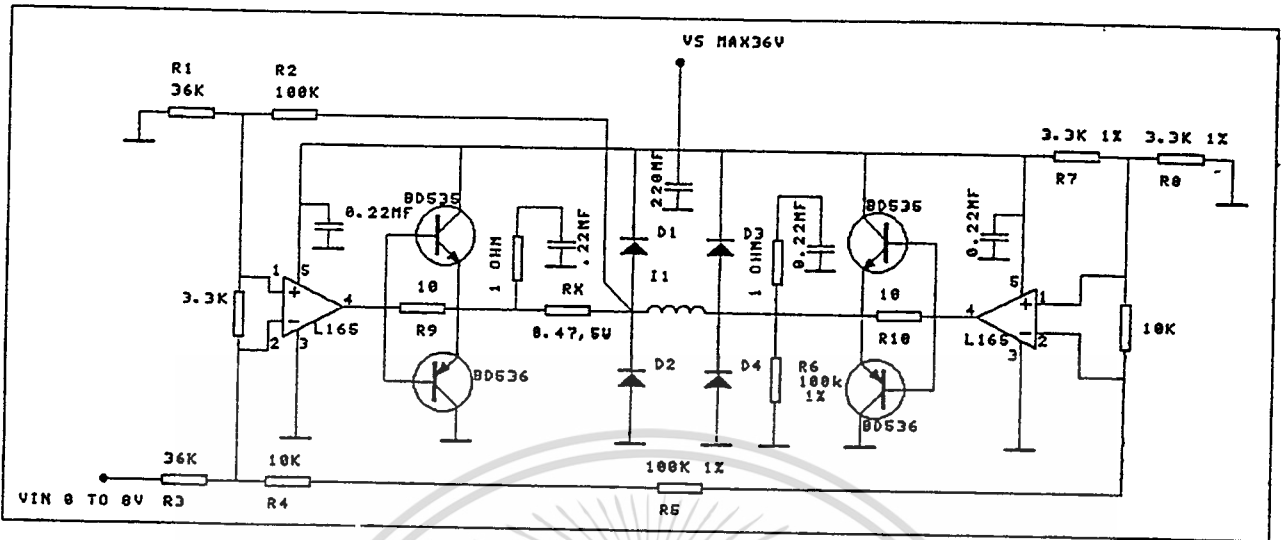
ก.สัญญาณควบคุมแบบขั้นบันไดที่ delay turn on (t_d)



ข.สัญญาณกระแสแบบขั้นบันไดที่ delay turn on (t_d)

รูปที่ 2.2 แสดงรูปสัญญาณแบบขั้นบันไดที่ delay turn on (t_d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

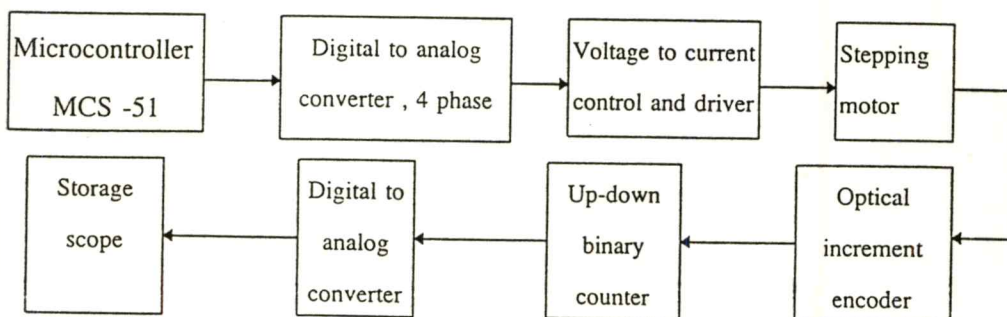


รูปที่ 2.3 แสดงวงจรควบคุมกระแสแบบแปลงค่าโวลตเป็นกระแส (voltage to current control)

3. การออกแบบระบบควบคุมการหน่วงกระแส

ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอ หลักการของการหน่วงกระแสแบบกำหนดช่วงเวลา delay turn on ด้วยสัญญาณกระแสให้มีลักษณะเป็นขั้นบันได ซึ่งการสร้างพัลส์ดังกล่าวนี้ใช้วิธีการสร้างจากซอฟต์แวร์ (software) ไปควบคุมผ่านวงจรแปลงสัญญาณ ดิจิตอลเป็น

อนาล็อก เพื่อกำหนดเป็นสัญญาณควบคุม ไปควบคุมวงจรการขับสเตปปีงมอเตอร์แบบควบคุมกระแสเพื่อให้ได้สัญญาณกระแสที่มีรูปร่างเป็นขั้นบันไดแบบเดียวกันกับสัญญาณควบคุม นำไปขับสเตปปีงมอเตอร์ ดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านขดลวดของสเตปปีงมอเตอร์จึงเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันได ดังแสดงในบล็อกไดอะแกรมของระบบที่ใช้ควบคุมดังในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมสเต็ปมิ่งมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

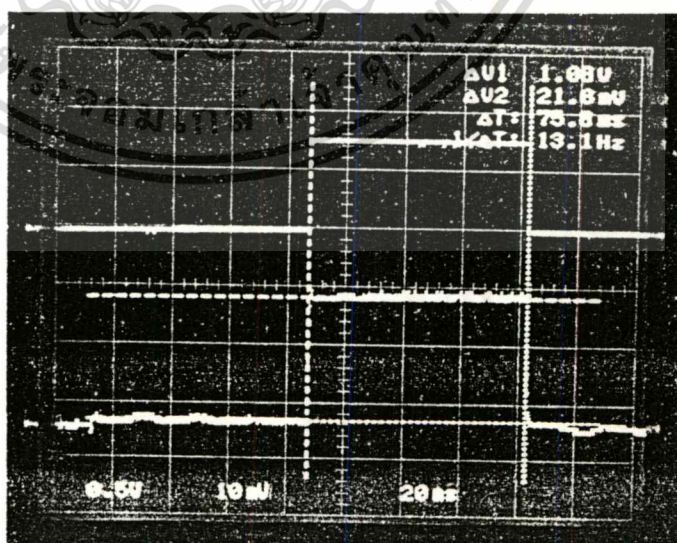
4.ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สเต็ปมิ่งมอเตอร์ของบริษัท ฟิลิปป์ ซึ่งเป็นชนิด VR โดยมีรายละเอียดดังนี้ คือ 4 เฟส , 1 แอมป์ ต่อเฟส , ขนาดสเต็ป 7.5 องศาต่อสเต็ป จำนวน 48 สเต็ป ต่อรอบ ให้โวลตของสเต็ปมิ่งมอเตอร์มีค่าคงที่ ซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

4.1 ในการจับสเต็ปมิ่งแบบปกติคือการป้อนพัลส์ไปกระตุ้นแต่ละเฟสของตัวมอเตอร์นั้น ผลตอบสนองที่ได้ในแต่ละสเต็ปจากการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เพื่อเข้าหาตำแหน่งสมดุลใหม่นั้น จะเกิดการออสซิลเลทและโอเวอร์ชูทที่มีค่าสูง ก่อนที่ตำแหน่งโรเตอร์จะเข้าสู่ภาวะสมดุล จะได้ผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5

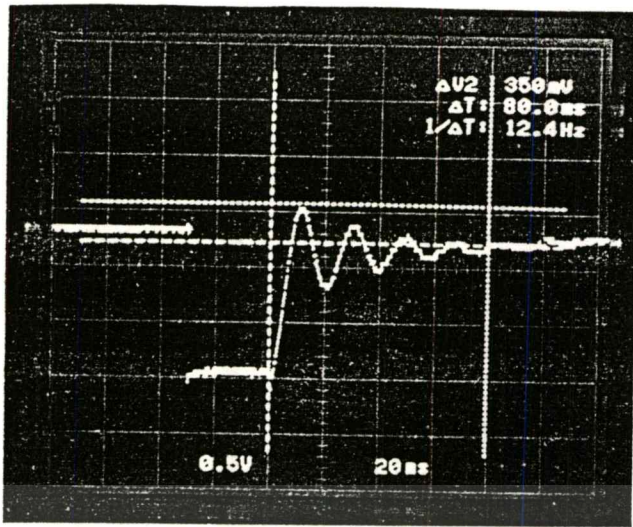
ก. โวลเตจที่ควบคุม

ข. กระแสที่จับสเต็ปมิ่งมอเตอร์



รูปที่ 4 แสดงสัญญาณพัลส์ทั่วไปที่ใช้จับสเต็ปมิ่งมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 แสดงผลตอบสนองของสเตปป์เตอร์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยพัลส์ดังรูปที่ 4

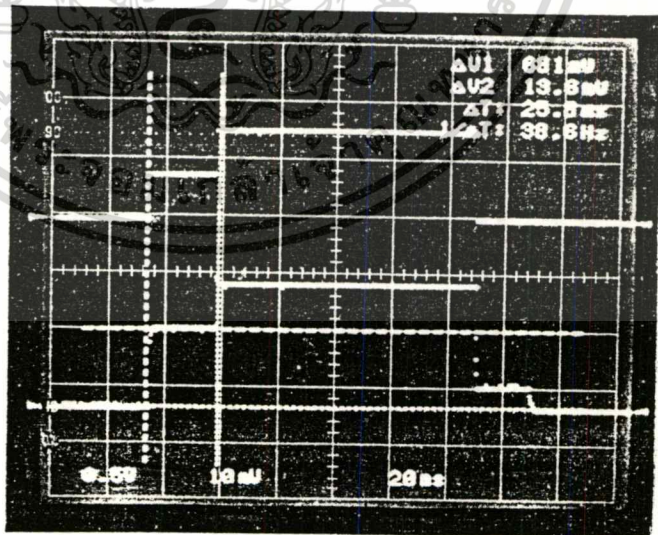
จากรูปที่ 5 จะเห็นว่าเมื่อกระตุ้นสเตปป์มอเตอร์ด้วยพัลส์ดังในรูปที่ 4 จะได้ผลตอบสนองที่เกิดค่าโอเวอร์ชูทและออสซิลเลทที่มีค่าเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวที่มีค่ามาก

ให้ค่าพัลส์ช่วง delay turn on (V_d) มีค่าประมาณค่าของพีคที่เกิดโอเวอร์ชูท (V_p) และ ค่าของเวลาที่ delay turn on (t_d) มีค่าประมาณ สองเท่าของค่าเวลาที่เกิดพีคโอเวอร์ชูท (t_p) จะได้ผลการทดลองดังในรูปที่ 6 และ 7

4.2 เมื่อทดลองปรับค่าสัญญาณควบคุมเป็นแบบขั้นบันไดที่มีช่วงเวลา delay turn on โดย

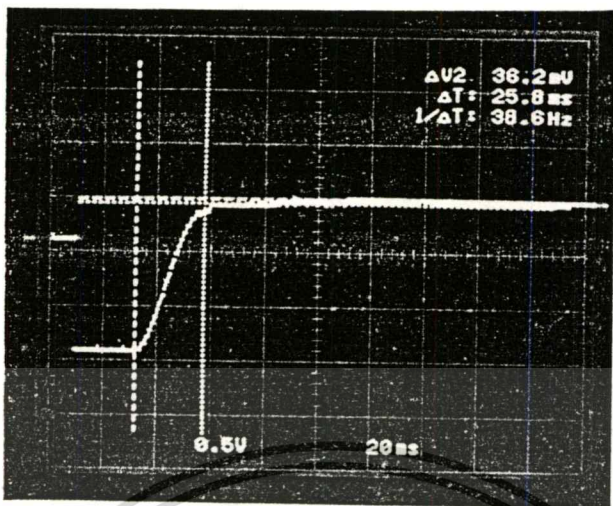
ก. โวลเตจที่ควบคุม

ข. กระแสที่ขับสเตปป์มอเตอร์



รูปที่ 6 แสดงสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันไดที่มีการ delay turn on ด้วยขนาดของพัลส์ (V_d) มีค่าประมาณค่าของพีคที่เกิดโอเวอร์ชูท (V_p) และ ค่าของเวลาที่ delay turn on (t_d) ค่าประมาณ สองเท่าของค่าเวลาที่เกิดพีคโอเวอร์ชูท (t_p)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

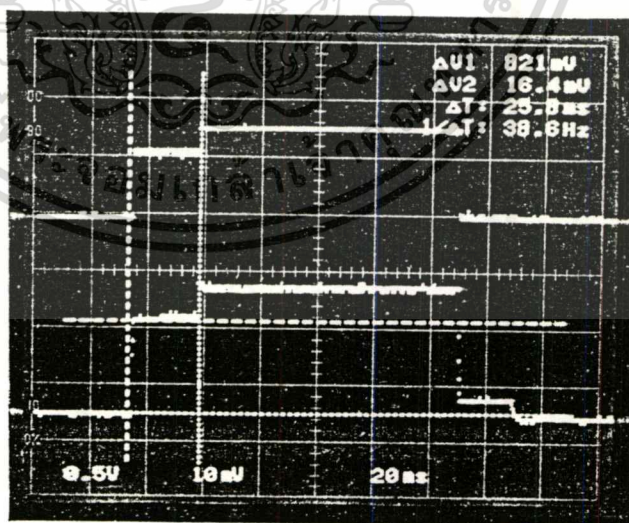


รูปที่ 7 แสดงผลตอบสนองของแต่ละสเตปที่ได้จากการกระตุ้นด้วยสัญญาณควบคุมดังในรูปที่ 6

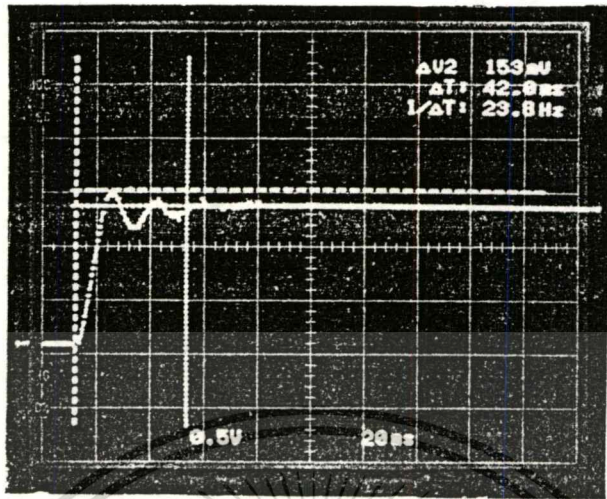
4.3 เมื่อปรับค่าโวลเตจและกระแสของไปกระตุ้นสเตปปีงมอเตอร์จะพบว่าผลตอบสนองที่สัญญาณควบคุมแบบขั้นบันไดในช่วงเวลา delay ได้จะเกิดโอเวอร์ชูทและออสซิลเลท โดยที่เวลาการ turn on (t_d) ให้มีค่าเพิ่มขึ้น ดังในรูปที่ 8 เมื่อนำเข้าสู่สภาวะคงตัวมีค่ามากขึ้น ดังในรูปที่ 9

ก. โวลเตจที่ควบคุม

ข. กระแสที่ขับสเตปปีงมอเตอร์



รูปที่ 8 แสดงสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันไดที่โวลเตจ (V_d) และกระแส (I_d) ในช่วงเวลา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า delay turn on (t_d) มีค่าเพิ่มขึ้น ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



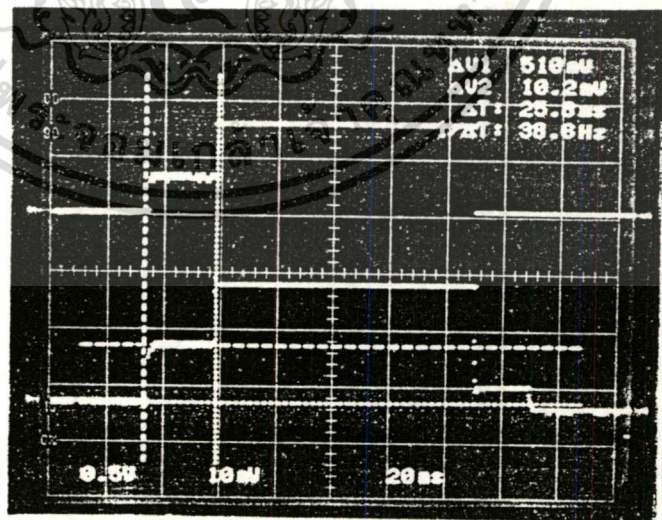
รูปที่ 9 แสดงผลตอบสนองแต่ละสเตปที่ได้จากการกระตุ้นด้วยสัญญาณควบคุมคิงในรูปที่ 8

4.4 เมื่อทดลองลดค่าโวลเตจและกระแสของสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันไดในช่วงเวลา delay turn on (t_d) ให้มีค่าต่ำลง ดังในรูปที่ 10 เมื่อนำไปกระตุ้นสเตปปีงมอเตอร์จะพบว่าผลตอบ

สนองแต่ละสเตปที่ได้จะเกิดโอเวอร์ชูทและออสซิลเลทโดยที่เวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวมีค่ามากขึ้น ดังในรูปที่ 11

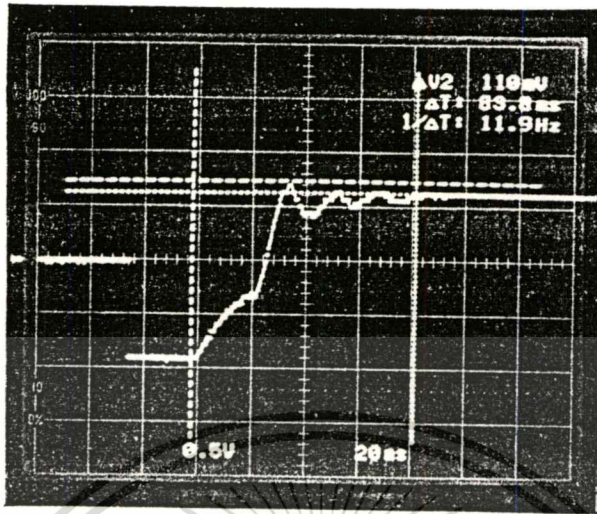
ก. โวลเตจที่ควบคุม

ข. กระแสที่ขับสเตปปีงมอเตอร์



รูปที่ 10 แสดงสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันไดที่โวลเตจ (V_d) และกระแส (I_d) ในช่วงเวลา delay turn on (t_d) มีค่าลดลง

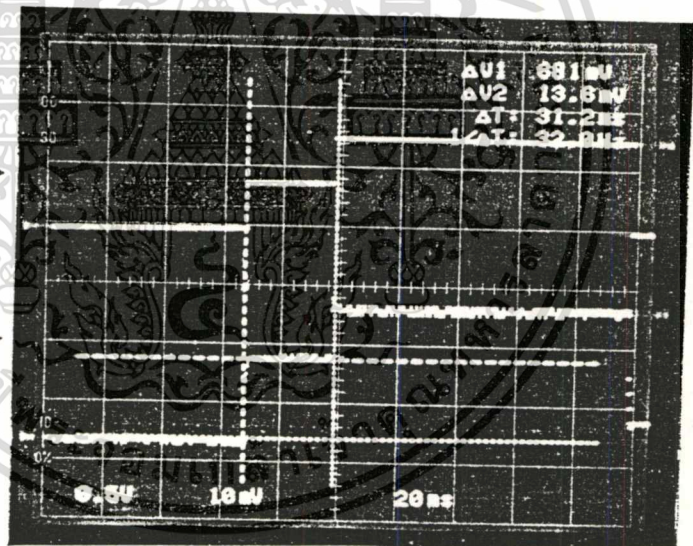
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11 แสดงผลตอบสนองต่อสเตปที่ได้จากการกระตุ้นด้วยสัญญาณควบคุมดังในรูปที่ 10

ก. โวลเตจที่ควบคุม

ข. กระแสที่ขั้วสเตปปีงมอเตอร์

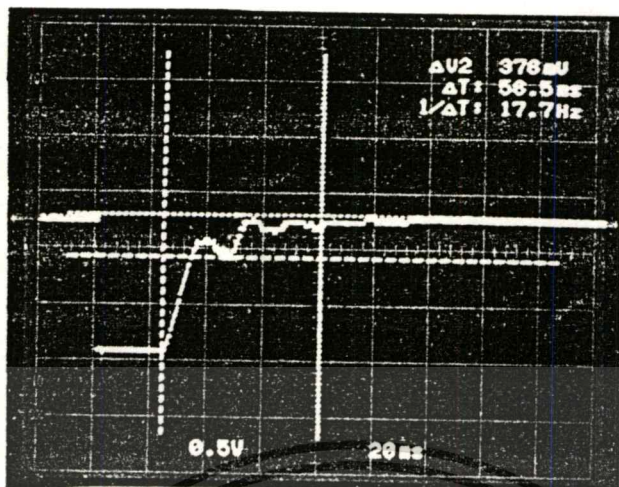


รูปที่ 12 แสดงสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันไดที่เวลา delay turn on (t_d) มีค่าเพิ่มขึ้น

4.5 เมื่อทดลองเพิ่มค่าเวลาของสัญญาณควบคุมในช่วงเวลา delay turn on (t_d) ให้มีค่าเพิ่มขึ้นดังในรูปที่ 12 เมื่อนำไปกระตุ้นสเตปปีง

มอเตอร์จะพบว่าผลตอบสนองที่ได้จะเกิดโอเวอร์ชุตและออสซิลเลทโดยที่เวลาการเข้าสู่ภาวะคงตัวมีค่ามากขึ้น ดังในรูปที่ 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

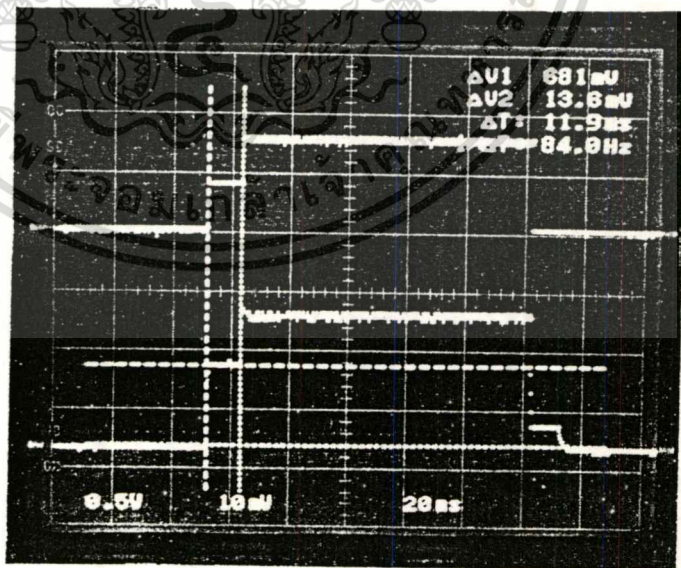


รูปที่ 13 แสดงผลตอบสนองแต่ละสเตปที่ได้จากการกระตุ้น ด้วยสัญญาณควบคุมดังในรูปที่ 12

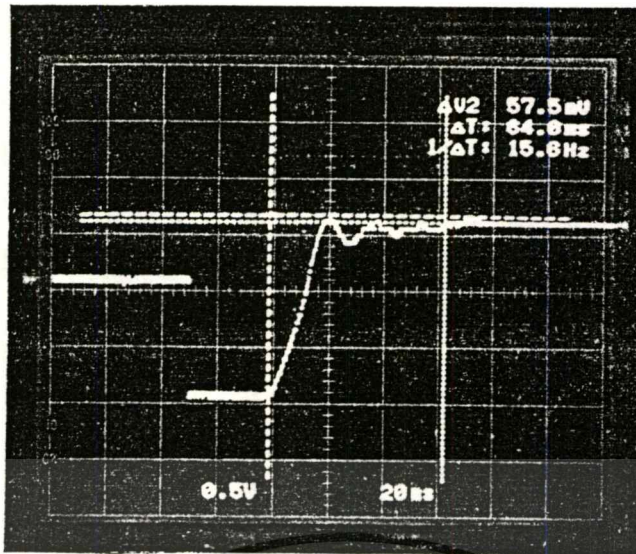
4.6 เมื่อทดลองลดค่าเวลาของสัญญาณควบคุมในช่วงเวลา delay turn on (t_d) ให้มีค่าลดลง ดังในรูปที่ 14 เมื่อนำไปกระตุ้นสเตปป์มอเตอร์ จะพบว่าผลตอบสนองที่ได้จะเกิดโอเวอร์ชูทและออสซิลเลท โดยที่เวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวมีค่ามากขึ้น ดังในรูปที่ 15

ก. โวลเตจที่ควบคุม

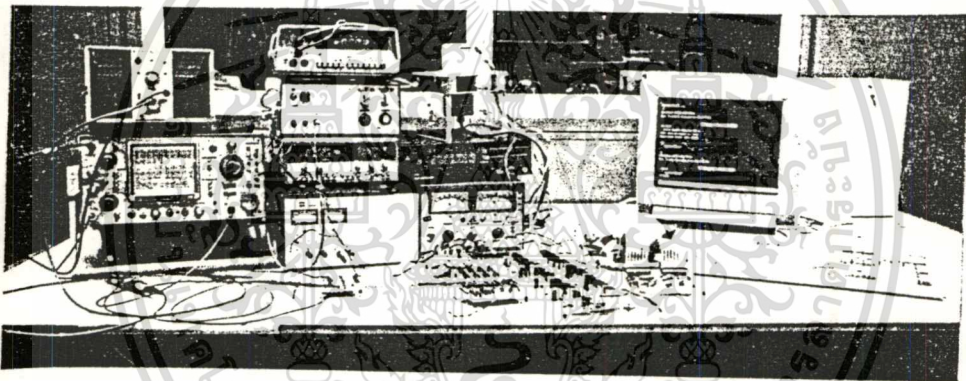
ข. กระแสที่ขับเคลื่อนสเตปป์มอเตอร์



รูปที่ 14 แสดงสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันไดที่เวลา delay turn on (t_d) มีค่าลดลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 15 แสดงผลตอบสนองแต่ละสเตปที่ได้จากการกระตุ้น ด้วยสัญญาณควบคุมดังในรูปที่ 14



รูปที่ 16 แสดงชุดระบบทดลองที่ใช้การหน่วงกระแสเพื่อควบคุมสเตปปีงมอเตอร์

5.สรุป

1. จากผลการทดลองเราพบว่า สามารถลดการเกิดโอเวอร์ชูทและออสซิลเลชันได้เกือบหมด โดยที่เวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัว ในผลตอบสนองของแต่ละสเตปมีค่าลดลง โดยใช้วิธีการหน่วงกระแส (current damping) ด้วยพัลส์ที่มีรูปแบบเป็นขั้นบันได โดยให้ค่าพัลส์ช่วง delay turn on (V_d) มีค่าประมาณค่าของพีคที่เกิดโอเวอร์ชูท (V_p) และค่าของเวลาที่ delay turn on (t_d) มีค่าประมาณ สองเท่าของค่าเวลาที่เกิดค่าพีคโอเวอร์

2. จากการทดลอง เราพบว่า ค่าโวลต์แดง (V_d) และเวลา (t_d) ในช่วง ที่ delay turn on ของสัญญาณควบคุม ที่เหมาะสมคือ มีค่า ประมาณ 350.0 mV และ 25.8 mS ตามลำดับ

3. ตารางแสดงเปรียบเทียบผลการทดลองของค่าโอเวอร์ชูทและเวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัวในแต่ละแบบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลตอบสนองของแต่ละสเตป	โอเวอร์ชูท (overshoot) mV		เวลาการเข้าสู่สภาวะคงตัว (settling time) ms	
ขนาดสเตปปกติ	350.0 mV	-	80.0 ms	-
ขนาดสเตปที่มีการ delay turn on ด้วย $(V_d) \approx V_p, t_d \approx 2t_p$	36.2mV	ลดลง 89.7 %	25.8 ms	ลดลง 67.75 %
ขนาดสเตปที่มีการ delay turn on ด้วย โวลเตจและกระแสที่มีค่าเพิ่มขึ้น	153.0 mV	ลดลง 56.3 %	42.0 ms	ลดลง 47.5%
ขนาดสเตปที่มีการ delay turn on ด้วย โวลเตจและกระแสที่มีค่าลดลง	110.0mV	ลดลง 68.6 %	83.8 ms	เพิ่มขึ้น 3.8%
ขนาดสเตปที่เวลา delay turn on มีค่าเพิ่มขึ้น	376 mV	เพิ่มขึ้น 0.3 %	56.5 mS	ลดลง 29.38%
ขนาดสเตปที่เวลา delay turn on มีค่าลดลง	57.5 mV	ลดลง 83.57 %	64.0 mS	ลดลง 20 %

เอกสารอ้างอิง

[1.] Takashi Kenjo , Stepping motor and their microprocessors controls , Oxford Science Publication , 1990

[2.] Benjamin C. Kuo ,Theory and application of step motors , West Publishing co. , 1974

[3.] P.P. Acarnley ,Stepping motors :a guide to modern theory and practice , IEE control engineering serires 19 , 1984

[4.] โยชิน เปรมปราณีรัชต์ . ระบบ

เซอร์โวและอิเล็กทรอนิกส์คอนโทรลมอเตอร์.

ตำราชุดวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ,
ลาดกระบัง , 2533

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายสรารุฒิ วณิชชานุกร เกิดวันที่ 30 เมษายน 2513 ที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา สำเร็จการศึกษา ระดับมัธยมต้นและปลาย จากโรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) ปีการศึกษา 2531 ปีการศึกษา 2532 เข้าศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษา ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ (โซลิตสเททอีเลคทรอนิกส์) สำเร็จการศึกษา ปีการศึกษา 2535 และปีการศึกษา 2537 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

1.ระบบสแกนพื้นผิววัตถุด้วยเลเซอร์ วารสารการประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16 ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ปี 2536

2.การลดโอเวอร์ชูทและออสซิลเลชันในแต่ละสเตปของผลตอบสนองสเตปปีงมอเตอร์ โดยวิธีการหน่วงกระแส วารสารวิศวกรรมลาดกระบัง เดือนตุลาคม 2540 ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง