

การขับสแต็ปมอเตอร์ในโหมดไมโครสเต็ปด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

THE APPROACH TO DRIVE STEPPING MOTOR IN

MICROSTEP EXCITATION MODE WITH ^{with}

DIRECT TESTED SIGNAL



นายวุฒิชัย สังขกุล

MR. WUTTHICHAI SANGKHAKUL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษิตตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2539

ISBN 974-621-705-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่.....

เลขทะเบียน..... 27256

วัน, เดือน, ปี 8 ส.ค. 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ..... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้าม..... ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THE APPROACH TO DRIVE STEPPING MOTOR IN
MICROSTEP EXCITATION MODE WITH
DIRECT TESTED SIGNAL**



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

1996

ISBN 974-621-705-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การจับสแต๊ปปีงมอเตอร์ในโหมคไมโครสแต๊ปด้วยสัญญาณ
ที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

นักศึกษา

นายวุฒิชัย สังขกุล

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

รศ. ดร. โยธิน เปรมปราณีรัชต์

ระดับการศึกษา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชา

วิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.

2539

บทคัดย่อ

ขนาดสแต๊ปของสแต๊ปปีงมอเตอร์โดยทั่วๆ ไปจะมีขนาดเล็กลงประมาณ 0.5 องศาต่อสแต๊ป ซึ่งบางครั้งอาจใหญ่เกินไปที่จะนำไปใช้ในบางประเภทเช่นในระบบของเครื่องพิมพ์เครื่องพล็อตเตอร์หรือระบบแขนกล เป็นต้น อีกทั้งการใช้งานสแต๊ปปีงมอเตอร์ด้วยขนาดสแต๊ปปกติยังเกิดปัญหาการสั่นหรือการเกิดโอเวอร์ชูทของสแต๊ปการเคลื่อนที่ของตัวโรเตอร์ของสแต๊ปปีงมอเตอร์อีกด้วย ดังนั้นเพื่อที่จะเพิ่มความละเอียดให้แก่ขนาดสแต๊ปและลดปัญหาการเกิดโอเวอร์ชูทของตำแหน่งการเคลื่อนที่แกนหมุนสแต๊ปปีงมอเตอร์ จึงมีการจับหรือควบคุมให้สแต๊ปปีงมอเตอร์ทำงานในโหมคไมโครสแต๊ป ซึ่งทำได้โดยการจับสแต๊ปปีงมอเตอร์ทีละสองเฟสหรือมากกว่า ด้วยสัญญาณที่ทำให้กระแสในแต่ละเฟสของสแต๊ปปีงมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนกัน หรือมีอัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงของกระแสในลักษณะของคลื่นรูปซายน์ ซึ่งได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะทอร์คของสแต๊ปปีงมอเตอร์ด้วยสมการลิเนียร์และซายน์ตามลำดับ แทนการจับด้วยสัญญาณที่มีลักษณะแรงดันคงที่ในโหมคการทำงานปกติของสแต๊ปปีงมอเตอร์แต่เนื่องจากกราฟคุณลักษณะทอร์คของสแต๊ปปีงมอเตอร์ ในแต่ละเฟสจะมีลักษณะที่ไม่เหมือนกันหรือมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้ขนาดไมโครสแต๊ปที่ได้เมื่อจับสแต๊ปปีงมอเตอร์ในโหมคไมโครสแต๊ปด้วยสัญญาณดังกล่าวทั้งสองมีขนาดไม่เที่ยงตรงเท่าที่ควร ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงแนะนำวิธีการจับสแต๊ปปีงมอเตอร์ในโหมคไมโครสแต๊ปแบบใหม่ด้วยสัญญาณอ้างอิงหรือสัญญาณควบคุมที่ได้จากการทดสอบโดยตรง ซึ่งได้จากการนำไมโครโปรเซสเซอร์มาช่วยในการควบคุมและหาปริมาณการจ่ายกระแสในแต่ละเฟสของสแต๊ปปีงมอเตอร์ เพื่อให้ได้ค่ากระแสอ้างอิงที่เหมาะสมในแต่ละเฟสที่ทุกๆ ตำแหน่งไมโครสแต๊ปย่อยๆ ที่ต้องการ การจับสแต๊ปปีงมอเตอร์ให้ทำงานในโหมคไมโครสแต๊ปด้วยสัญญาณอ้างอิงที่ได้จากการทดสอบโดยตรงนี้จะให้ความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสแต๊ปสูงกว่าการจับสแต๊ปปีงมอเตอร์แบบเดิม

Thesis Title	The Approach to Drive Stepping Motor in Microstep Excitation Mode with Direct Tested Signal
Student	Mr. Wutthichai Sangkhakul
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Dr. Yothin Prempraneerach
Level of Study	Master of Engineering in Electrical Engineering
Department	Control Engineering King Mongkut' s Institute of Technology Ladkrabang
Year	1996

ABSTRACT

Normally, the step size of the conventional stepping motor is not less than 0.5 degrees per step. It is too large for certain applications such as printers, plotters, robot arms and etc. Furthermore the operation of stepping motor in the full step size also causes overshoot problem of the rotor position. To eliminate or decrease the problem microstepping is required. The formal methods to drive stepping motor in microstep excitation mode are driven the stepping motor with the proportional or sinusoidal reference signal. These reference signals are obtained by calculating of linear and sine approximations to stepping motor static torque displacement ($T-\theta$) characteristic curve, respectively. However, the stepping motor static torque-displacement characteristic curves are not identical for each phases at each displacement angles. For this reason, the microstep sizes are not quite accurate. The thesis presents a new technique to drive stepping motor in microstep excitation mode called "the approach to drive stepping motor in microstep excitation mode with direct tested signal". This technique takes into account of stepping motor nonlinearities as above mentioned. To find the direct tested signal, the technique based on microprocessor control to quantify the proper current in all windings of stepping motor at every microstep angles and the accuracy of microstep size is observed by using an optical encoder circuit with interfaced to the microprocessor. The technique gives better accuracy of microstep size when compared to the formal methods obtained from simple linear and sine approximations to torque-displacement characteristic curve.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความเมตตาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.โยธิน เปรมปราณีรัชต์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้ความกรุณาแนะนำแก่ผู้วิจัยตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ พ.ต.ท.สมเกียรติ ไกรทิพย์ ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณถ่ายภาพ คุณวรดา อภิรัตน์ ที่ช่วยในการจัดพิมพ์เอกสาร และทุกท่านที่ให้ความร่วมมือ ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา

วุฒิชัย สังขกุล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญภาพ	X
บทที่	
1 บทนำ.....	1
คำนำ.....	1
วัตถุประสงค์และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	1
แนวความคิดของวิทยานิพนธ์.....	2
หลักการใหม่ที่นำเสนอ.....	2
เปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม.....	2
2 ทฤษฎีพื้นฐานของสเต็ปปีงมอเตอร์.....	3
หลักการทำงานของสเต็ปปีงมอเตอร์.....	4
ประเภทของสเต็ปปีงมอเตอร์.....	5
สเต็ปปีงมอเตอร์ชนิดคาร์ลัคแตนซ์แปรค่าได้.....	6
สเต็ปปีงมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร.....	12
สเต็ปปีงมอเตอร์ชนิดไฮบริด.....	14
ลักษณะการพันขดลวดในสเต็ปปีงมอเตอร์.....	17
คุณลักษณะแรงบิดของสเต็ปปีงมอเตอร์.....	19
คุณลักษณะทางสแตติกของสเต็ปปีงมอเตอร์.....	19
คุณลักษณะทางไดนามิกของสเต็ปปีงมอเตอร์.....	21
พารามิเตอร์ต่างๆ ของสเต็ปปีงมอเตอร์.....	22
โหมคการขับสเต็ปปีงมอเตอร์.....	24
การขับที่ละเฟส.....	24
การขับที่ละ 2 เฟส.....	24
การขับที่ละครึ่งสเต็ป.....	26

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
การขั้บทีละ 2 เฟสของสตั้ปปี้งมอเตอ์ที่พันแบบไปฟิลา์.....	27
การขั้บด้วยวงจรวรบริดจ์.....	29
3 การควบคุมการทำงานของสตั้ปปี้งมอเตอ์.....	32
ระบบการขั้บสตั้ปปี้งมอเตอ์.....	32
วงจรวรลจคชี่คววนเซอร์.....	32
ลจคชี่คววนเซอร์ชนิดขั้บทีละ 2 เฟสสำหรับสตั้ปปี้งมอเตอ์ชนิด 4 เฟส.....	32
ลจคชี่คววนเซอร์สำหรับการขั้บทีละเฟสของมอเตอ์ 4 เฟส.....	33
วงจรวรลจคชี่คววนเซอร์สำหรับการขั้บทีละเฟสของมอเตอ์ 3 เฟส.....	36
วงจรวรลจคชี่คววนเซอร์สำหรับการขั้บทีละสองเฟสของมอเตอ์ 3 เฟส.....	36
วงจรวรลจคชี่คววนเซอร์สำหรับการขั้บแบบคั้งสตั้ปของมอเตอ์ 3 เฟส	36
วงจรวรลจคชี่คววนเซอร์สำหรับการขั้บทีละสองเฟสของมอเตอ์ชนิด VR ที่มีลักษณะการพันแบบไปฟิลา์ของมอเตอ์ 3 เฟส	39
วงจรวรภาคขั้บคั้ง.....	39
ซัพเพรสเซอร์.....	40
การปรับปรุ้งกระแสบัลด์อ์.....	44
วงจรวรขั้บแบบบริดจ์.....	47
วงจรวรขั้บสำหรับมอเตอ์ 3 เฟสชนิด VR ที่มีลักษณะการพันแบบไปฟิลา์.....	49
วงจรวรขั้บแบบพัลลซ์วิดท์มอคูเลเตอ์.....	50
4 การควบคุมการทำงานสตั้ปปี้งมอเตอ์ในโหมคไมโครสตั้ป.....	52
หลักการของไมโครสตั้ปคอนโทรลเลอร์.....	52
การคั้งวณหาคะแสอ้างอิงในโหมคไมโครสตั้ปจากกราฟคุณลักษณะ T- θ ของมอเตอ์.....	54
การคั้งวณหาคะแสอ้างอิงโดยการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ใน ลักษณะเชิงเส้น	55
การคั้งวณหาคะแสอ้างอิงโดยการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของ มอเตอ์ด้วยค่าชาน์	56
วิธีการหาคะแสอ้างอิงด้วยวิธีทดสอบโดยตรงโดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์	58

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ส่วนประกอบของระบบไมโครสแต็ปที่ออกแบบขึ้น	62
วงจรรภาคอินเทอร์เฟส	63
วงจรรภาคแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (DAC).....	64
วงจรรภาคควบคุมกระแสและขับเคลื่อนมอเตอร์	67
วงจรรภาคตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนหมุนสแต็ปมอเตอร์.....	69
วงจรรภาคสังเกตลักษณะการเคลื่อนที่ของแกนหมุนสแต็ปมอเตอร์.....	70
5 ผลการทดลอง เมื่อควบคุมให้สแต็ปมอเตอร์ทำงานในโหมดไมโครสแต็ป.....	72
ลักษณะของสัญญาณควบคุม	72
ลักษณะของสัญญาณที่ใช้ควบคุมสแต็ปมอเตอร์ให้ทำงานที่ขนาด สแต็ปปกติ	73
ลักษณะของสัญญาณที่ใช้ควบคุมสแต็ปมอเตอร์ให้ทำงานในโหมด ไมโครสแต็ปที่ขนาดสแต็ปเท่ากับ 1/4 เท่าของขนาดสแต็ปปกติ	74
ลักษณะของสัญญาณที่ใช้ควบคุมสแต็ปมอเตอร์ให้ทำงานในโหมด ไมโครสแต็ปที่ขนาดสแต็ปเท่ากับ 1/8 เท่าของขนาดสแต็ปปกติ	76
ลักษณะของสัญญาณที่ใช้ควบคุมสแต็ปมอเตอร์ให้ทำงานในโหมด ไมโครสแต็ปที่ขนาดสแต็ปเท่ากับ 1/16 เท่าของขนาดสแต็ปปกติ	78
ลักษณะของสัญญาณที่ใช้ควบคุมสแต็ปมอเตอร์ให้ทำงานในโหมด ไมโครสแต็ปที่ขนาดสแต็ปเท่ากับ 1/32 เท่าของขนาดสแต็ปปกติ	80
ผลการเปรียบเทียบเชิงตรงของขนาดไมโครสแต็ปที่ได้	82
เปรียบเทียบความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสแต็ปที่ได้เมื่อขนาดสแต็ป เป็น 1/4 เท่าของขนาดสแต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการ ประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ด้วยสมการเชิงเส้นหรือสัญญาณแบบที่ เป็นสัดส่วนกัน สมการชายน์และสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง	82
เปรียบเทียบความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสแต็ปที่ได้เมื่อขนาดสแต็ป เป็น 1/8 เท่าของขนาดสแต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการ ประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ด้วยสมการเชิงเส้นหรือสัญญาณแบบที่ เป็นสัดส่วนกัน สมการชายน์และสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง	91

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	เปรียบเทียบความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสเต็มที่ได้เมื่อขนาดสเต็มเป็น 1/16 เท่าของขนาดสเต็มปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ด้วยสมการเชิงเส้นหรือสัญญาณแบบที่เป็นสัดส่วนกัน สมการชายนและสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง.....	106
	เปรียบเทียบความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสเต็มที่ได้เมื่อขนาดสเต็มเป็น 1/32 เท่าของขนาดสเต็มปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ด้วยสมการเชิงเส้นหรือสัญญาณแบบที่เป็นสัดส่วนกัน สมการชายนและสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง.....	121
	ทดสอบความสามารถในการลดปัญหาการเกิดโอเวอร์ชูท.....	124
	สรุปผลการทดลอง.....	126
6	วิจารณ์ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	138
	วิจารณ์ผลของงานวิจัย.....	138
	ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต.....	139
	บรรณานุกรม.....	140
	ภาคผนวก ก ส่วนต่างๆ ของระบบที่ใช้ในการวิจัย.....	141
	ภาคผนวก ข โปรแกรมที่ใช้ในการทดลองของการวิจัย.....	150
	ภาคผนวก ค บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมสารวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.....	175
	ประวัติผู้เขียน.....	183

สารบัญญัตินาง

ตารางที่	หน้าที
1 แสดงโหมดการขับทีละเฟส	25
2 แสดงโหมดการขับทีละ 2 เฟส	25
3 แสดงโหมดการขับทีละครั้งสเติป	27
4 แสดงโหมดการขับทีละ 2 เฟสของสเติปปิ้งมอเตอร์ทีพันแบบไบฟีลา.....	28
5 แสดงการขับในลักษณะวงจรบริดจ์	30
6 แสดงขนาดสเติปทีวัดได้เมื่อขนาดสเติปเป็น 1/4 เท่าของขนาดสเติปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณทีได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ของ สเติปปิ้งมอเตอร์ ด้วยสมการชาชน์.....	82
7 แสดงขนาดสเติปทีวัดได้เมื่อขนาดสเติปเป็น 1/4 เท่าของขนาดสเติปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณทีได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ของ สเติปปิ้งมอเตอร์ ด้วยสมการเชิงเส้น	85
8 แสดงขนาดสเติปทีวัดได้เมื่อขนาดสเติปเป็น 1/4 เท่าของขนาดสเติปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณทีได้จากการทดสอบ โดยตรง.....	88
9 แสดงขนาดสเติปทีวัดได้เมื่อขนาดสเติปเป็น 1/8 เท่าของขนาดสเติปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณทีได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ของ สเติปปิ้งมอเตอร์ ด้วยสมการชาชน์.....	91
10 แสดงขนาดสเติปทีวัดได้เมื่อขนาดสเติปเป็น 1/8 เท่าของขนาดสเติปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณทีได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ของ สเติปปิ้งมอเตอร์ ด้วยสมการเชิงเส้น	96
11 แสดงขนาดสเติปทีวัดได้เมื่อขนาดสเติปเป็น 1/8 เท่าของขนาดสเติปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณทีได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ของ สเติปปิ้งมอเตอร์ ด้วยสัญญาณทีได้จากการทดสอบ โดยตรง	101
12 แสดงขนาดสเติปทีวัดได้เมื่อขนาดสเติปเป็น 1/16 เท่าของขนาดสเติปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณทีได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ของ สเติปปิ้งมอเตอร์ ด้วยสมการชาชน์.....	106
13 แสดงขนาดสเติปทีวัดได้เมื่อขนาดสเติปเป็น 1/16 เท่าของขนาดสเติปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณทีได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ของ สเติปปิ้งมอเตอร์ ด้วยสมการเชิงเส้น	111

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้าที่
14 แสดงขนาดสตีปที่วัดได้เมื่อขนาดสตีปเป็น 1/16 เท่าของขนาดสตีปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง.....	116
15 แสดงขนาดของโอเวอร์ชูทของตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนหมุนสตีปปี้งมอเตอร์ เมื่อทำงานด้วยขนาดสตีปปกติ เปรียบเทียบกับเมื่อทำงานในโหมดไมโครสตีป 1/4 และ 1/8 เท่า ตามลำดับ.....	124
16 แสดงการเปรียบเทียบขนาดไมโครสตีปที่ได้และค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อสตีปปี้งมอเตอร์ ทำงานที่ขนาดสตีปเป็น 1/8 เท่า ของขนาดสตีปปกติ.....	127
17 แสดงการเปรียบเทียบขนาดไมโครสตีปที่ได้และค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อสตีปปี้งมอเตอร์ทำงานที่ขนาดสตีปเป็น 1/16 เท่า ของขนาดสตีปปกติ	132
18 แสดงค่าแรงดันพีคของโอเวอร์ชูทที่เกิดขึ้น เมื่อสตีปปี้งมอเตอร์ทำงานด้วยขนาดสตีปปกติ เปรียบเทียบกับเมื่อควบคุมให้ทำงานในโหมดไมโครสตีปที่ขนาดสตีปเป็น 1/4 และ 1/8 เท่า.....	136

สารบัญภาพ

	หน้า
1 แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานสตีปิ้งมอเตอร์.....	3
2 แสดงหลักการทำงานของสตีปิ้งมอเตอร์	4
3 แสดงหลักการควบคุมการทำงานของสตีปิ้งมอเตอร์.....	5
4 แสดงโครงสร้างของสตีปิ้งมอเตอร์ชนิดคาร์ลัคแดนซ์แปรค่าได้	6
5 แสดงหลักการทำงานของสตีปิ้งมอเตอร์ชนิดคาร์ลัคแดนซ์แปรค่าได้	7
6 แสดงตำแหน่งสมมูลเมื่อเฟสที่ 1 ของมอเตอร์ถูกกระตุ้นให้ทำงาน	7
7 แสดงลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงขึ้น	8
8 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ขณะเปลี่ยนการจ่ายกระแสจากเฟส 1 มายังเฟส 2	8
9 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของโรเตอร์	9
10 แสดงการเปรียบเทียบเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในสตีปิ้งมอเตอร์ที่มีแอร์แกป กว้างและแคบ	9
11 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของสตีปิ้งมอเตอร์ชนิดคาร์ลัคแดนซ์แปรค่าได้ที่มี ขนาดสตีป 15 องศาต่อสตีป	10
12 แสดงโครงสร้างของสตีปิ้งมอเตอร์ชนิดคาร์ลัคแดนซ์แปรค่าได้ที่มี 2 ซี่ฟัน บนแต่ละโพล จำนวนซี่ฟันของโรเตอร์เท่ากับ 14 และขนาดสตีปเป็น 8.75 องศา ต่อสตีป	10
13 แสดงโครงสร้างของสตีปิ้งมอเตอร์ชนิดคาร์ลัคแดนซ์แปรค่าได้ที่โรเตอร์มี 44 ซี่ฟันจำนวนสตีปเป็น 132 สตีปต่อรอบ	11
14 แสดงโครงสร้างของสตีปิ้งมอเตอร์ชนิดคาร์ลัคแดนซ์แปรค่าได้ที่มีขนาดสตีป 1.8 องศาต่อสตีป	11
15 แสดงโครงสร้างของสตีปิ้งมอเตอร์ชนิดคาร์ลัคแดนซ์แปรค่าได้ประเภท มีหลายสแตค	12
16 แสดงโครงสร้างของสตีปิ้งมอเตอร์ชนิดคาร์ลัคแดนซ์แปรค่าได้ประเภท มี 5 สแตค.....	13
17 แสดงโครงสร้างของสตีปิ้งมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร	13
18 แสดงหลักการควบคุมการทำงานของสตีปิ้งมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร	14
19 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ของสตีปิ้งมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร	14
20 แสดงโครงสร้างของสตีปิ้งมอเตอร์ชนิดไฮบริด	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
21 แสดงโครงสร้างแกนโรเตอร์ ของสตีปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริด	15
22 แสดงเส้นแรงแม่เหล็ก ในสตีปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริด	16
23 แสดงลักษณะการเอียงกันของซี่ฟันของสเตเตอร์	16
24 แสดงลักษณะเส้นแรงแม่เหล็ก ในสตีปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริดที่ทำให้เกิด การเคลื่อนที่ของโรเตอร์.....	17
25 แสดงลักษณะของขดลวดที่พันแบบไบฟีลาร์	18
26 แสดงหลักการควบคุมการทำงานของสตีปป์มอเตอร์ที่พันแบบต่างๆ	18
27 แสดงคุณลักษณะทางสแตติกของสตีปป์มอเตอร์ขนาดสามเฟส	19
28 แสดงกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสตีปป์มอเตอร์	20
29 แสดงกราฟคุณลักษณะ T-I ของสตีปป์มอเตอร์โดยเส้นกราฟ	21
30 แสดงกราฟคุณลักษณะทางไดนามิกของสตีปป์มอเตอร์	22
31 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เมื่อควบคุมแบบการขับที่ละเฟส	24
32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างซี่ฟันของสเตเตอร์และโรเตอร์เมื่อควบคุมแบบ การขับที่ละ 2 เฟส	26
33 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เมื่อควบคุมแบบการขับที่ละ 2 เฟส ของมอเตอร์ 3 เฟส	26
34 แสดงการเปรียบเทียบการตอบสนองแบบซิงเกิลสตีปป์ของตำแหน่งการเคลื่อนที่ ของโรเตอร์ เมื่อขับที่ละเฟสและขับที่ละ 2 เฟส	27
35 แสดงลักษณะของขดลวดที่พันแบบไบฟีลาร์	28
36 แสดงลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดที่พันแบบไบฟีลาร์	29
37 แสดงลักษณะของสตีปป์มอเตอร์ที่พันแบบโมโนฟีลาร์ชนิด 2 เฟส	29
38 แสดงลักษณะของวงจรบริดจ์ที่ใช้ขับสตีปป์มอเตอร์	30
39 แสดงการใช้แหล่งจ่ายไฟที่มีเซ็นเตอร์แทปของการขับแบบที่ละ 2 เฟสในมอเตอร์ ที่พันแบบไบฟีลาร์	31
40 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบการขับสตีปป์มอเตอร์	32
41 แสดงลอจิกซีควเอนเซอร์ แบบทิศทางเดียว สำหรับการขับที่ละ 2 เฟสของ สตีปป์มอเตอร์ที่มี 4 เฟส	33
42 แสดงตัวอย่างวงจรถูกกำหนดทิศทางหมุนของสตีปป์มอเตอร์	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
43 แสดงลอจิกซีแควนเซอร์แบบไบโคเร็กซ์ันแนล สำหรับการขับทีละ 2 เฟส ของมอเตอร์แบบ 4 เฟส	34
44 แสดงอีกตัวอย่างหนึ่งของลอจิกซีแควนเซอร์แบบไบโคเร็กซ์ันแนล สำหรับ การขับทีละ 2 เฟสของมอเตอร์ 4 เฟส	35
45 แสดงลอจิกซีแควนเซอร์แบบไบโคเร็กซ์ันแนลสำหรับการขับทีละเฟสของ มอเตอร์ 4 เฟส	35
46 แสดงวงจรซีแควนเซอร์แบบไบโคเร็กซ์ันแนลสำหรับการขับทีละเฟสของ มอเตอร์ 4 เฟส	36
47 แสดงวงจรซีแควนเซอร์ยูนิโคเร็กซ์ันสำหรับการขับทีละเฟสของมอเตอร์ 3 เฟส	37
48 แสดงลอจิกซีแควนเซอร์แบบไบโคเร็กซ์ันแนลของมอเตอร์ 3 เฟส	38
49 แสดงวงจรลอจิกซีแควนเซอร์สำหรับการขับแบบครั้งสเต็ปของมอเตอร์ 3 เฟส	38
50 แสดงอุปกรณ์เกทที่เพิ่มเข้ากับเอาต์พุทของวงจรในรูปที่ 3.10 เพื่อให้ทำงานเป็น วงจรลอจิกซีแควนเซอร์แบบการขับทีละ 2 เฟสของ VR สเต็ปมิ่งมอเตอร์ที่พัน แบบไบพิลาร์ของมอเตอร์ 3 เฟส	39
51 แสดงตัวอย่างการต่อระหว่างซีแควนเซอร์และวงจรภาคขับเคลื่อนกำลัง	40
52 วงจรสมมูลของขดลวดสเต็ปมิ่งมอเตอร์	41
53 แสดงวงจรไดโอดซัพเพรสเซอร์	42
54 แสดงวงจรไดโอดรีซิสเตอร์ซัพเพรสเซอร์	42
55 แสดงวงจรซีเนอร์ไดโอดซัพเพรสเซอร์	43
56 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของซัพเพรสเซอร์ประเภทต่างๆ	43
57 แสดงตัวอย่างของวงจรขับเคลื่อนกำลังสเต็ปมิ่งมอเตอร์ที่ใช้ซีเนอร์ไดโอดซัพเพรสเซอร์ ของมอเตอร์ 4 เฟส	44
58 แสดงตัวอย่างวงจรขับเคลื่อนที่ใช้ซัพเพรสเซอร์ชนิดตัวเก็บประจุ	44
59 แสดงการปรับปรุงกระแสบัลด์อ์พของวงจรขับเคลื่อนโดยใช้ความต้านทาน	45
60 แสดงหลักการของวงจรขับเคลื่อนสเต็ปมิ่งมอเตอร์ที่ใช้แหล่งจ่ายไฟ 2 ชุด	46
61 แสดงลักษณะของสัญญาณแรงดันและกระแสของวงจรขับเคลื่อน 2 ระดับแรงดัน	46
62 แสดงลักษณะของวงจรขับเคลื่อนที่ใช้แหล่งจ่ายไฟ 2 ชุด สำหรับมอเตอร์ 4 เฟส	46
63 แสดงวงจรขับเคลื่อนแบบบริดจ์	47
64 แสดงลักษณะแรงดันและกระแสของวงจรขับเคลื่อนไบโพลาร์	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการค้าภายใต้เงื่อนไข เมื่อคุณดูให้แน่ใจว่าได้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
65 แสดงอีกลักษณะหนึ่งของวงจรขับแบบบริดจ์	48
66 แสดงวงจรขับสำหรับ VR ของสเต็ปป์มอเตอร์ 3 เฟส ที่มีลักษณะการพันแบบ ไบฟีลาร์	49
67 แสดงหลักการของวงจรแบบ PWM	50
68 แสดงลักษณะการเกิดโอเวอร์ชูทของตำแหน่งโรเตอร์ของสเต็ปป์มอเตอร์เมื่อทำงานในขนาดสเต็ปปกติ	52
69 แสดงหลักการของไมโครสเต็ป สเต็ปป์มอเตอร์คอนโทรลเลอร์ของสเต็ปป์มอเตอร์ชนิด 3 เฟส	53
70 แสดงกราฟคุณลักษณะแรงบิด T- θ ของสเต็ปป์มอเตอร์	54
71 แสดงการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเต็ปป์มอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้น	55
72 แสดงลักษณะกระแสอ้างอิงที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเต็ปป์มอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้น	56
73 แสดงลักษณะสัญญาณที่ได้จากการคำนวณโดยการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ แบบต่างๆ	57
74 แสดงตัวอย่างลักษณะของกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเต็ปป์มอเตอร์ที่เกิดขึ้นจริงในแต่ละเฟส	59
75 บล็อกไดอะแกรมแสดงหลักการของวิธีทดสอบโดยตรง	59
76 แสดงโพลวาร์ทของโปรแกรมที่ใช้ในการหากระแสอ้างอิงด้วยวิธีการทดสอบโดยตรง เมื่อต้องการจำนวนไมโครสเต็ป 32 สเต็ป	60
77 แสดงโปรไฟล์ของสัญญาณควบคุมการขับสเต็ปป์มอเตอร์ในแต่ละเฟส เพื่อหากระแสอ้างอิง	61
78 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบไมโครสเต็ปที่ออกแบบขึ้น	63
79 แสดงบล็อกไดอะแกรมการเชื่อมต่อระหว่างภาคอินเทอร์เฟสกับวงจรภาคอื่นๆ	64
80 แสดงวงจรที่สมบูรณ์ของภาคอินเทอร์เฟส	65
81 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรภาค DAC เมื่อต่อกับวงจรภาคอื่นๆ	66
82 แสดงวงจรภาคแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก	66
83 แสดงวงจรควบคุมกระแสและขับกำลัง	68
84 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรภาคตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนหมุนสเต็ปป์มอเตอร์	69

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
85 แสดงใบโคเร็กซ์แนลคาน์เตอร์ที่นำมาประยุกต์ใช้งาน	70
86 บล็อกไดอะแกรมแสดงภาคสังเกตลักษณะของไมโครสเต็ป	70
87 แสดงวงจรนับ 16 บิต แบบใบโคเร็กซ์แนลของภาคสังเกตการตอบสนอง ของไมโครสเต็ป	71
88 แสดงวงจรเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอกแบบ 16 บิต R-2R ของภาค สังเกตลักษณะของไมโครสเต็ป	71
89 แสดงลักษณะของสัญญาณควบคุมสเต็ปปิ้งมอเตอร์เมื่อทำงานด้วยขนาด สเต็ปปกติ	73
90 แสดงลักษณะของสัญญาณที่ใช้ควบคุมให้สเต็ปปิ้งมอเตอร์ทำงานใน โหมดไมโครสเต็ป ที่ขนาดไมโครสเต็ปเท่ากับ 1/4 เท่าของขนาดสเต็ปปกติ	74
91 แสดงลักษณะของสัญญาณที่ใช้ควบคุมให้สเต็ปปิ้งมอเตอร์ทำงานในโหมด ไมโครสเต็ป ที่ขนาดไมโครสเต็ปเท่ากับ 1/8 เท่าของขนาดสเต็ปปกติ	76
92 แสดงลักษณะของสัญญาณที่ใช้ควบคุมให้สเต็ปปิ้งมอเตอร์ทำงานในโหมด ไมโครสเต็ป ที่ขนาดไมโครสเต็ปเท่ากับ 1/16 เท่าของขนาดสเต็ปปกติ	78
93 แสดงลักษณะของสัญญาณที่ใช้ควบคุมให้สเต็ปปิ้งมอเตอร์ทำงานในโหมด ไมโครสเต็ป ที่ขนาดไมโครสเต็ปเท่ากับ 1/32 เท่าของขนาดสเต็ปปกติ	80
94 แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/4 เท่าของขนาด สเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสมการชานน์	83
95 แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/4 เท่าของขนาดสเต็ป ปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้น	86
96 แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/4 เท่าของขนาด สเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง	89
97 แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/8 เท่าของขนาด สเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสมการชานน์	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
98 แสดงขนาดไมโครสแต็ปแต่ละสแต็ปที่ขนาดสแต็ปเป็น 1/8 เท่า ของขนาดสแต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสแต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้น	97
99 แสดงขนาดไมโครสแต็ปแต่ละสแต็ปที่ขนาดสแต็ปเป็น 1/8 เท่าของขนาดสแต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสแต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง	102
100 แสดงขนาดไมโครสแต็ปแต่ละสแต็ปที่ขนาดสแต็ปเป็น 1/16 เท่าของขนาดสแต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสแต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสมการชายัน	107
101 แสดงขนาดไมโครสแต็ปแต่ละสแต็ปที่ขนาดสแต็ปเป็น 1/16 เท่าของขนาดสแต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสแต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้น	112
102 แสดงขนาดไมโครสแต็ปแต่ละสแต็ปที่ขนาดสแต็ปเป็น 1/16 เท่าของขนาดสแต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง	117
103 แสดงความเป็นเชิงเส้นของขนาดสแต็ปที่ได้เมื่อขนาดสแต็ปเป็น 1/32 เท่าของขนาดสแต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสแต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสมการชายัน	121
104 แสดงความเป็นเชิงเส้นของขนาดสแต็ปที่ได้เมื่อขนาดสแต็ปเป็น 1/32 เท่าของขนาดสแต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสแต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้น	122
105 แสดงความเป็นเชิงเส้นของขนาดสแต็ปที่ได้เมื่อขนาดสแต็ปเป็น 1/32 เท่าของขนาดสแต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง.....	123
106 แสดงลักษณะการเกิดโอเวอร์ชูทของตำแหน่งการเคลื่อนที่ของสแต็ปปิ้งมอเตอร์เมื่อทำงานด้วยขนาดสแต็ปปกติ.....	124
107 แสดงลักษณะการเกิดโอเวอร์ชูทของตำแหน่งการเคลื่อนที่ของสแต็ปปิ้งมอเตอร์เมื่อทำงานในโหมดไมโครสแต็ปที่ขนาดสแต็ปเท่ากับ 1/4 เท่าของขนาดสแต็ปปกติ.....	125

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
108 แสดงลักษณะการเกิดโอเวอร์ชูทของตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ สเต็ปปิ้งมอเตอร์เมื่อทำงานในโหมดไมโครสเต็ปที่ขนาดสเต็ป เท่ากับ 1/8 เท่าของขนาดสเต็ปปกติ	125
109 กราฟแสดงความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสเต็ปที่ได้ เมื่อควบคุมให้ มอเตอร์ทำงานที่ขนาดสเต็ปเท่ากับ 1/8 เท่าของขนาดสเต็ปปกติ.....	129
110 กราฟแสดงความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสเต็ปที่ได้ เมื่อควบคุมให้ สเต็ปปิ้งมอเตอร์ทำงานที่ขนาดสเต็ปเท่ากับ 1/16 เท่าของขนาดสเต็ปปกติ	133
111 กราฟแสดงความสามารถในการลดโอเวอร์ชูทของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ เมื่อทำงานในโหมดไมโครสเต็ป	137



บทที่ 1

บทนำ

คำนำ

สเต็มปี้งมอเตอร์โดยทั่วไปจะมีขนาดสเต็มปี้งเล็กสุดน้อยกว่า 0.5 องศาต่อสเต็มปี้ง ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างของตัวสเต็มปี้งมอเตอร์นั้นๆซึ่งบางครั้งอาจใหญ่เกินไปที่จะนำไปใช้งานบางประเภทเช่นในระบบของเครื่องพรีนเตอร์ พล็อตเตอร์ หรือระบบแขนกล เป็นต้น อีกทั้งการใช้งานสเต็มปี้งมอเตอร์ด้วยขนาดสเต็มปี้งปกติยังเกิดปัญหาการสั่น หรือเกิดโอเวอร์ชูทของตัวโรเตอร์^[3]ของสเต็มปี้งมอเตอร์อีกด้วย ดังนั้นเพื่อที่จะเพิ่มความละเอียดของขนาดสเต็มปี้งปกติของสเต็มปี้งมอเตอร์ให้สูงขึ้น และลดปัญหาการเกิดโอเวอร์ชูทของตัวโรเตอร์ของสเต็มปี้งมอเตอร์ในเวลาเดียวกัน จึงมีการควบคุมหรือขับให้สเต็มปี้งมอเตอร์ทำงานในโหมดไมโครสเต็มปี้ง หรือมินิสเต็มปี้ง^[3] แทนการขับสเต็มปี้งมอเตอร์ด้วยสัญญาณที่มีระดับแรงดันคงที่

วัตถุประสงค์และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

โดยทั่วไปเมื่อต้องการเพิ่มความละเอียดของขนาดสเต็มปี้งของสเต็มปี้งมอเตอร์ให้สูงขึ้นมักจะใช้ระบบเฟืองทดเข้าช่วย แต่การใช้ระบบเฟืองทดเป็นการเพิ่มโหลดให้กับสเต็มปี้งมอเตอร์และยังไม่สะดวกต่อการนำไปออกแบบใช้งาน ซึ่งถ้าสามารถควบคุมหรือขับสเต็มปี้งมอเตอร์ให้ทำงานในโหมดไมโครสเต็มปี้งและได้ขนาดไมโครสเต็มปี้งย่อยๆ ที่เที่ยงตรงแล้ว จะมีประโยชน์ต่อการนำไปใช้งานในระบบที่ต้องการความละเอียดสูงได้เป็นอย่างดี ลดความต้องการการใช้ระบบเฟืองทด และลดปัญหาการเกิดโอเวอร์ชูทได้อีกด้วย

แนวความคิดของวิทยานิพนธ์

หลักการใหม่ที่นำเสนอ

หลักการใหม่ที่นำเสนอในการขับสตีปิ้งมอเตอร์ให้ทำงานในโหมดไมโครสตีปิ้งนั้น จะเน้นที่ความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสตีปิ้งที่ได้ ซึ่งจะต้องมีความเที่ยงตรงสูงเมื่อเทียบกับการขับสตีปิ้งมอเตอร์ในโหมดไมโครสตีปิ้งแบบเดิม ซึ่งใช้สัญญาณในการควบคุมที่ทำให้กระแสในแต่ละเฟสของสตีปิ้งมอเตอร์เป็นสัดส่วนกัน หรือแบบลิเนียร์^[7] หรือควบคุมด้วยสัญญาณรูปซายน์^[7] ซึ่งได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะทอร์ค T- θ ของสตีปิ้งมอเตอร์^[1] ด้วยสมการลิเนียร์และซายน์ตามลำดับ โดยหลักการใหม่จะควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรงซึ่งสัญญาณควบคุมหรือสัญญาณกระแสอ้างอิงจากการทดสอบโดยตรงนี้จะต้องทำการหามาก่อนโดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์มาช่วยในการควบคุม เพื่อหาปริมาณการจ่ายกระแสให้แก่สตีปิ้งมอเตอร์แต่ละเฟสว่า ที่ทุกๆ ตำแหน่งไมโครสตีปิ้งย่อยๆ ที่ต้องการนั้น กระแสในแต่ละเฟสควรมีค่าเท่าใด โดยจะทำงานร่วมกับวงจรรอเฟดคอลลเอ็นโอดีเคอร์ที่อินเทอร์เฟซเข้ากับไมโครโปรเซสเซอร์เพื่อตรวจสอบความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสตีปิ้งที่ได้ หลังจากได้ค่ากระแสอ้างอิงหรือสัญญาณควบคุมที่ทุกๆ ตำแหน่งไมโครสตีปิ้งแล้ว จึงนำค่ากระแสอ้างอิงนี้มาใช้ควบคุมสตีปิ้งมอเตอร์ให้ทำงานในโหมดไมโครสตีปิ้งอีกทีหนึ่ง

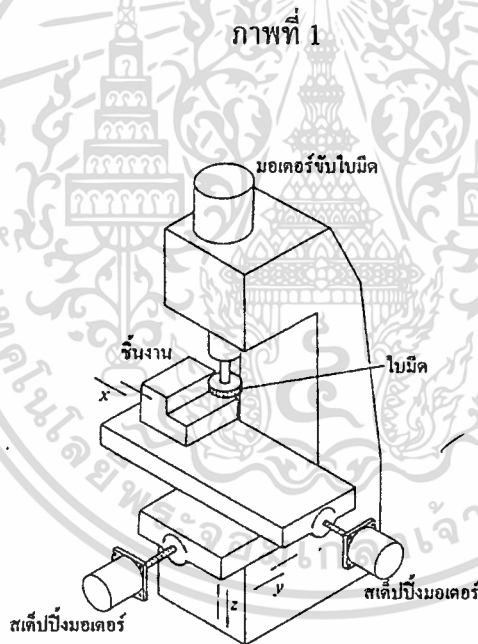
เปรียบเทียบกับหลักการที่มีอยู่เดิม

การควบคุมสตีปิ้งมอเตอร์ให้ทำงานในโหมดไมโครสตีปิ้งแบบเดิมนั้นได้แก่ การควบคุมด้วยสัญญาณที่ทำให้กระแสในแต่ละเฟสของสตีปิ้งมอเตอร์เป็นสัดส่วนต่อกัน^[7] หรือควบคุมด้วยสัญญาณซายน์^[7] ซึ่งได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะทอร์ค T- θ ของสตีปิ้งมอเตอร์^[1] ดังกล่าวนั้น จะให้ขนาดไมโครสตีปิ้งไม่เที่ยงตรงเท่าที่ควร เนื่องจากลักษณะของกราฟคุณลักษณะทอร์ค T- θ ในแต่ละเฟสของสตีปิ้งมอเตอร์จะมีลักษณะไม่เหมือนกันเลขที่เดียว หรือมีลักษณะไม่เชิงเส้น ส่วนหลักการใหม่ที่นำเสนอนี้จะมีการหากระแสอ้างอิงหรือสัญญาณควบคุมที่ใช้ควบคุมที่ทำให้ทุกๆ ตำแหน่งไมโครสตีปิ้งถูกต้องเที่ยงตรงก่อนการนำมาขับสตีปิ้งมอเตอร์ให้ทำงานในโหมดไมโครสตีปิ้ง ทำให้ความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสตีปิ้งที่มีความเที่ยงตรงสูงกว่าวิธีควบคุมสตีปิ้งมอเตอร์ในโหมดไมโครสตีปิ้งแบบเดิม

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานของสเต็ปปีงมอเตอร์

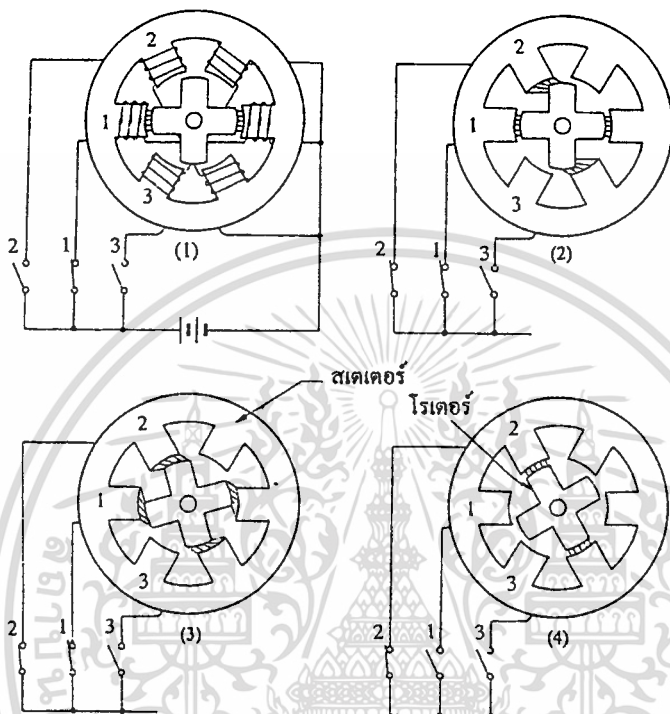
สเต็ปปีงมอเตอร์เปรียบเสมือนทรานสดิวเซอร์ (transducer) ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานเชิงกล ซึ่งมีอินพุตเป็นกลุ่มของแรงดันไบนารีและเอาต์พุตเป็นลักษณะของการเคลื่อนที่เชิงมุมเป็นสเต็ปที่สามารถกำหนดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนหมุนได้อย่างเที่ยงตรงแน่นอน ง่ายต่อการควบคุมการทำงาน หรือประยุกต์ใช้งาน จากลักษณะดังกล่าวสเต็ปปีงมอเตอร์จึงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานต่างๆ เช่น ในระบบการป้องกันกระดาศ และกำหนดช่วงห่างของบรรทัดในระบบเครื่องพิมพ์ ใช้ในระบบของเครื่อง x-y พล็อตเตอร์ ชุดขับเครื่องจักรกลที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ หุ่นยนต์ ฯลฯ ดังแสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานของสเต็ปปีงมอเตอร์ในภาพที่ 1



แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานสเต็ปปีงมอเตอร์ในเครื่องกลึง

หลักการทํางานของสเต็ปปีงมอเตอร์

ภาพที่ 2



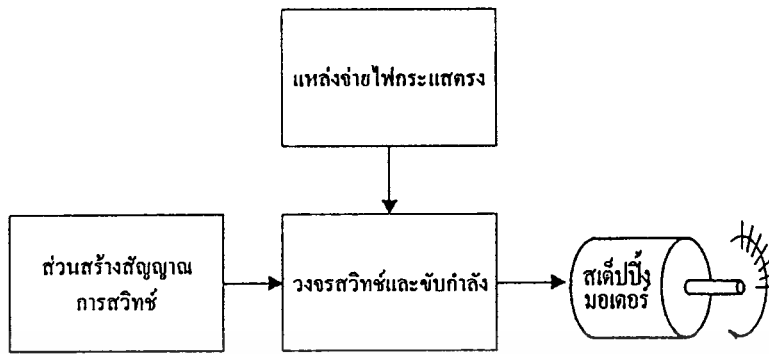
แสดงหลักการทํางานของสเต็ปปีงมอเตอร์

ในภาพที่ 2 แสดงหลักการทํางานของสเต็ปปีงมอเตอร์ ซึ่งมีสเตเตอร์ที่มีซี่ฟันจำนวน 6 ซี่ฟัน และมีโรเตอร์ที่มีจำนวนซี่ฟันเท่ากับ 4 ซึ่งทั้งสเตเตอร์และโรเตอร์ทำจากเหล็กอ่อน (soft steel) มีชุดของขดลวดซึ่งมีลักษณะดังในภาพ แต่ละชุดประกอบไปด้วยขดลวด 2 ชุด ที่อ่อนนุกรรมกัน แต่ละชุดของขดลวดเรียกว่า “เฟส” (phase) ในภาพนี้เป็นสเต็ปปีงมอเตอร์ชนิด 3 เฟส กระแสถูกจ่ายให้กับขดลวดทั้งสามเฟสด้วยสวิตช์ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ในสภาวะแรกจ่ายกระแสผ่านสวิตช์ที่ 1 ไปยังขดลวดเฟสที่ 1 หรือเป็นการกระตุ้นเฟสที่ 1 จะเกิดเส้นแรงแม่เหล็กในแอร์แก๊ป (air-gap) ดังแสดงตามทิศทางของลูกศรในภาพในสภาวะ (1) ซี่ฟัน 2 ซี่ฟันของตัวสเตเตอร์ของเฟสที่ 1 ตรงกับซี่ฟันของโรเตอร์ 2 ซี่ฟัน ณ ตำแหน่งนี้เรียกว่า “สภาวะสมดุล” (equilibrium state) เมื่อสวิตช์ที่ 2 ปิด เพื่อกระตุ้นเฟสที่ 2 เพิ่มเข้าไป เส้นแรงแม่เหล็กจะเกิดขึ้นที่ซี่ฟันของสเตเตอร์ของเฟสที่ 2 ในลักษณะดังแสดงในสภาวะ(2) และโรเตอร์จะเคลื่อนที่ด้วยแรงบิดที่เกิดจากเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากการกระตุ้นเฟสที่ 2 ซึ่งได้แสดงได้ดังสภาวะ (3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 3



แสดงหลักการควบคุมการทำงานของสเต็ปป์มอเตอร์

ดังนั้นการเคลื่อนที่ของโรเตอร์จะมีลักษณะเป็นสเต็ปด้วยมุมที่แน่นอน ในกรณีนี้จะเป็น 15 องศาต่อสเต็ป เมื่อเอาสวิตช์ที่ 1 ออก หรือเป็นการหยุดกระตุ้นเฟสที่ 1 โรเตอร์จะเคลื่อนที่ไปอีก 15 องศา ดังสภาวะที่(4)

ทุกวันนี้อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ถูกนำมาใช้เป็นอิเล็กทรอนิกส์สวิตช์ สำหรับควบคุมการจ่ายกระแสให้แก่สเต็ปป์มอเตอร์และสัญญาณที่ใช้ควบคุมการสวิตช์ก็ได้จากอุปกรณ์ดิจิทัลไอซี หรือ ไมโครโปรเซสเซอร์ ซึ่งสะดวกต่อการควบคุมสเต็ปป์มอเตอร์ ดังแสดงหลักการควบคุมสเต็ปป์มอเตอร์ในภาพที่ 3 จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าสเต็ปป์มอเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าทางดิจิทัลเป็นการเคลื่อนที่เชิงกล ซึ่งสาเหตุที่ทำให้สเต็ปป์มอเตอร์มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากข้อดีดังต่อไปนี้

1. โดยปกติจะไม่ต้องการส่วนป้อนกลับของสัญญาณเพื่อควบคุมตำแหน่งหรือความเร็ว ทำให้วงจรที่ใช้ควบคุมต้นทุนต่ำ
2. ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเคลื่อนที่ จะไม่สะสมหรือเพิ่มขึ้น
3. สเต็ปป์มอเตอร์สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์ดิจิทัลและคอมพิวเตอร์ได้อย่างสมบูรณ์

ประเภทของสเต็ปป์มอเตอร์

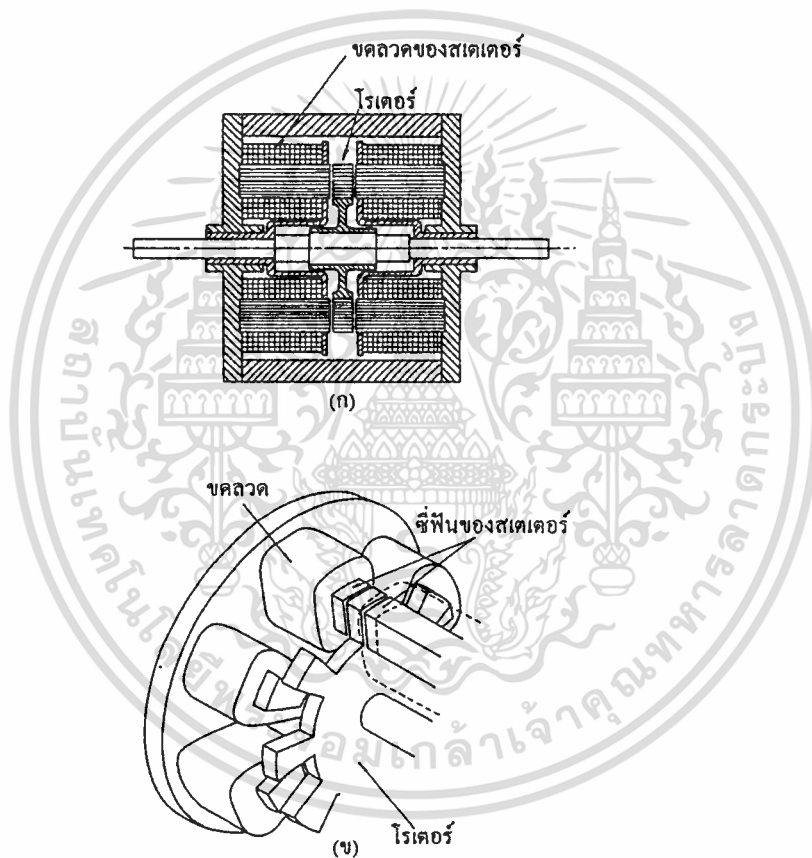
สเต็ปป์มอเตอร์สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายประเภทตามลักษณะของโครงสร้างและการทำงานได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเต็ปป์มอเตอร์ชนิดคาร์ลิกแดนซ์แปรค่าได้ (variable reluctance stepping motor)

สเต็ปป์มอเตอร์ชนิดคาร์ลิกแดนซ์แปรค่าได้ เป็นสเต็ปป์มอเตอร์ที่มีลักษณะการทำงานที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจมากที่สุด ดังแสดงโครงสร้างของสเต็ปป์มอเตอร์ประเภทนี้ในภาพที่ 4 และหลักการทำงานในภาพที่ 5 ซึ่งเป็นตัวอย่างของสเต็ปป์มอเตอร์ 3 เฟส ซึ่งมีจำนวนซี่ฟันสเตเตอร์เท่ากับ 6 ซี่ฟัน แต่ละคู่ของซี่ฟันที่อยู่ตรงกันข้ามจะเป็นเฟสเดียวกันเนื่องจากมีขดลวดขดเดียวกันพันอยู่

ภาพที่ 4



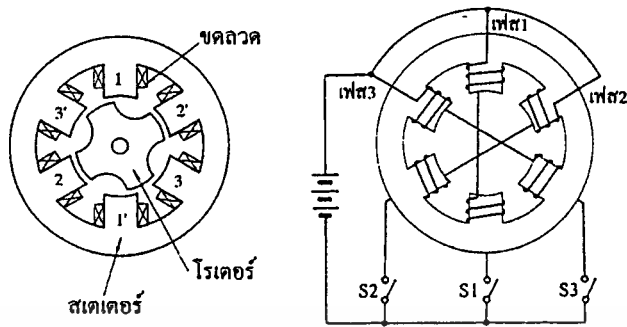
แสดงโครงสร้างของสเต็ปป์มอเตอร์ชนิดคาร์ลิกแดนซ์แปรค่าได้

ในลักษณะต่ออนุกรม ส่วนโรเตอร์จะมีจำนวนซี่ฟันเท่ากับ 4 แกนของโรเตอร์และสเตเตอร์ ปกติแล้วจะทำจากแผ่นเหล็กบางๆ ที่มีส่วนผสมของซิลิคอน (laminated silicon steel) แต่โรเตอร์ที่ทำจากแท่งซิลิคอนจะเป็นที่นิยมใช้กันมากกว่า วัสดุที่ใช้ทำโรเตอร์และสเตเตอร์จะต้องมีค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (permeability) และเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic flux) สามารถผ่านได้ง่าย เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก (magnetomotive force) สูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

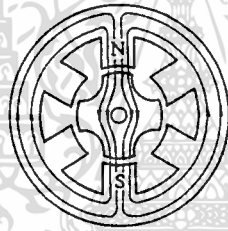
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 5



แสดงหลักการทำงานของสเต็ปิ่งมอเตอร์ชนิดคาร์ลิกคแคนซ์แปรค่าได้

ภาพที่ 6



แสดงตำแหน่งสมดุลเมื่อเฟสที่ 1 ของมอเตอร์ถูกกระตุ้นให้ทำงาน

ในภาพที่ 5 สมมติให้ซี่ฟันแต่ละคู่ของสเตเตอร์มีขั้วที่ตรงกันข้ามคือ ซี่ฟัน 1, 2 และ 3 เป็นขั้วเหนือ และซี่ฟัน 1', 2' และ 3' เป็นขั้วใต้ เมื่อแต่ละเฟสถูกกระตุ้นให้ทำงานกระแสในแต่ละเฟสจะถูกควบคุมด้วยลำดับของการปิดหรือเปิดสวิตช์ ถ้ากระแสถูกจ่ายให้กับขดลวดเฟสที่ 1 เส้นแรงแม่เหล็กจะเกิดขึ้นดังแสดงในภาพที่ 6 โดยซี่ฟันโรเตอร์คู่หนึ่งจะมีตำแหน่งตรงกับซี่ฟัน 1 และ 1' ของสเตเตอร์ ณ ตำแหน่งนี้ค่าความต้านทานแม่เหล็ก (magnetic reluctance) จะมีค่าต่ำสุดเรียกว่า “ตำแหน่งสมดุล” และจะเกิดแรงบิดขึ้นต้านแรงจากภายนอกเรียกว่า “แรงบิดรีสตอริง” (restoring torque) ดังมีลักษณะในภาพที่ 7 ในภาพนี้แรงจากภายนอกมีทิศทางตามเข็มนาฬิกาทำให้ โรเตอร์เคลื่อนที่ไปในทิศทางดังกล่าว และแรงบิดรีสตอริงจะมีทิศทางทวนเข็มนาฬิกาตรงกันข้ามกับแรงจากภายนอกเพื่อให้ตำแหน่งของโรเตอร์ตรงกับตำแหน่งของซี่ฟันของสเตเตอร์มากที่สุด ขณะที่ตำแหน่งซี่ฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์เบี่ยงเบนไปจากตำแหน่งสมดุลของเฟสที่กำลังถูกกระตุ้น ค่าความต้านทานแม่เหล็กจะมีค่าสูง ในภาพที่ 8 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ขณะที่เฟสที่ 1 ถูกเปิดออก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเฟสที่ 2 ถูกจ่ายกระแสเข้ามา ค่าความต้านทานแม่เหล็กของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นทันที ทำให้โรเตอร์ หมุนทวนเข็มนาฬิกาด้วยมุม 30 องศา และที่ตำแหน่งนี้ค่าความต้านทานแม่เหล็กก็จะมีค่าต่ำสุด

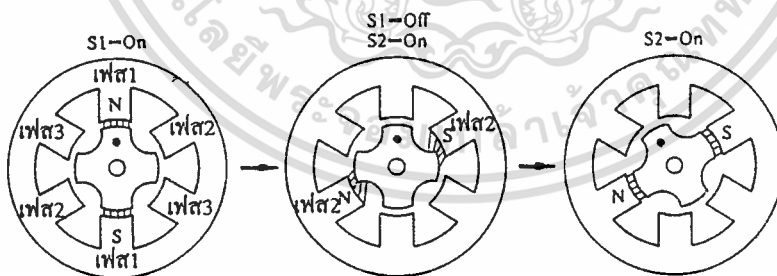
ภาพที่ 7



แสดงลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่ทำให้เกิดแรงบิดขึ้น

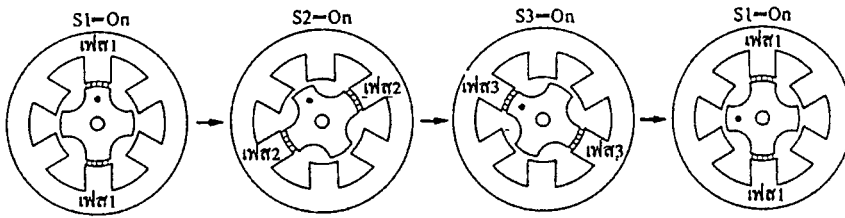
การเคลื่อนที่ในลักษณะดังกล่าวนี้ในแต่ละครั้งของการกระตุ้นแต่ละเฟสเรียกว่า “สเต็ป” ดังนั้นถ้าเรา จัดลำดับการจ่ายกระแสให้แต่ละเฟสของมอเตอร์ดังนี้ 1, 2, 3 และ 1 แล้ว ลักษณะการเคลื่อนที่ของ โรเตอร์จะเคลื่อนกลับมายังตำแหน่งเริ่มต้นดังแสดงในภาพที่ 9

ภาพที่ 8



แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ขณะเปลี่ยนการจ่ายกระแสจากเฟส 1 มายังเฟส2

ภาพที่ 9

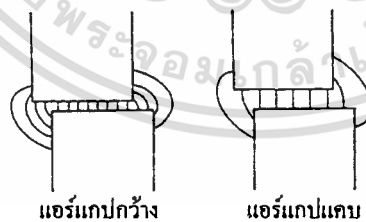


แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของ โรเตอร์

ลักษณะ โครงสร้างพื้นฐานของสเต็ปป์มอเตอร์ชนิดคาร์ลิตแดนซ์แปรค่าได้

ช่องว่าง หรือ แอร์แก๊ป ควรแคบที่สุด ช่องว่างระหว่างซี่ฟันของสเตเตอร์และโรเตอร์ในสเต็ปป์มอเตอร์จะต้องแคบที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อให้เกิดแรงบิดที่มีค่าสูงและตำแหน่งของโรเตอร์มีความเที่ยงตรงสูง ในภาพที่ 10 เปรียบเทียบเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างสเต็ปป์มอเตอร์ที่มีแอร์แก๊ปกว้างและแคบ จะเห็นว่า แรงเคลื่อนแม่เหล็กที่แอร์แก๊ปแคบจะให้จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่สูงกว่าแอร์แก๊ปที่กว้าง นั่นหมายความว่า แรงบิดที่ได้ก็จะสูงกว่าด้วย และผลที่ตามมาก็คือ ความเที่ยงตรงของโรเตอร์ก็จะสูงตามขึ้นไปด้วยโดยทั่วไปขนาดของแอร์แก๊ปจะมีค่าประมาณ 30 ถึง 100 ไมโครเมตร

ภาพที่ 10



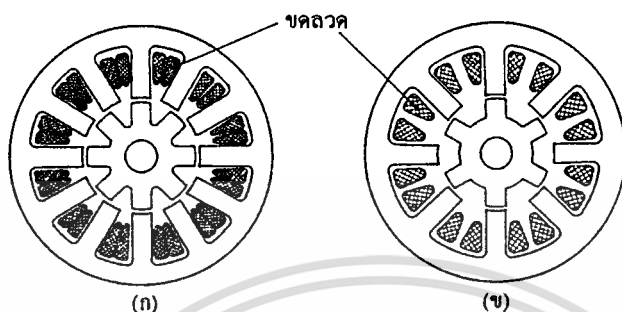
แสดงการเปรียบเทียบเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในสเต็ปป์มอเตอร์ที่มีแอร์แก๊ปกว้าง และแคบ

ในสเต็ปป์มอเตอร์ประเภทขนาดสเต็ปเล็ก

ในภาพที่ 11 (ก) แสดงโครงสร้างของสเต็ปป์มอเตอร์ชนิดคาร์ลิตแดนซ์แปรค่าได้ ที่มีขนาดสเต็ปเล็กลงอีก คือเท่ากับ 15 องศาต่อสเต็ปชนิด 3 เฟส มีซี่ฟันของสเตเตอร์จำนวน 12 ซี่ฟัน และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โรเตอร์จำนวน 8 ซี่ฟัน และในภาพที่ 11(ข) ชนิด 4 เฟส ซึ่งมีซี่ฟันของสเตเตอร์จำนวน 8 ซี่ฟัน และโรเตอร์ 6 ซี่ฟัน และมีขนาดสเต็ปเท่ากับ 15 องศาต่อสเต็ปเช่นเดียวกัน

ภาพที่ 11



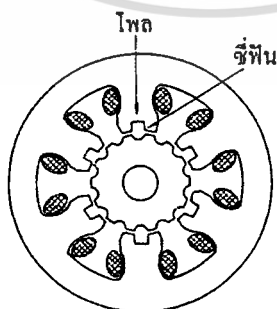
แสดงตัวอย่างโครงสร้างของสเต็ปโป่งมอเตอร์ชนิดคาร์ลัคแดนซ์แปรค่าได้ที่มีขนาดสเต็ป 15 องศาต่อสเต็ป (ก) ชนิด 3 เฟส (ข) ชนิด 4 เฟส

ความสัมพันธ์ของขนาดมุมสเต็ป (θ_s), จำนวนเฟส (m), จำนวนซี่ฟันของโรเตอร์ (N_r) และจำนวนสเต็ป (S) กำหนดได้จากสมการต่อไปนี้

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

จากสมการข้างบนจะเห็นว่า เพื่อที่จะลดขนาดของสเต็ป θ_s จะต้องเพิ่มจำนวนซี่ฟันของโรเตอร์ให้สูงขึ้น แต่ถ้าต้องเพิ่มจำนวนซี่ฟันของโรเตอร์ให้สูงขึ้นจำนวนซี่ฟันของสเตเตอร์ก็ต้องเพิ่มตามด้วยดังหลักการที่อธิบายผ่านมา แต่จะเห็นว่า จำนวนซี่ฟันไม่ปรากฏในสมการข้างบน ซึ่งที่จริงแล้วสเต็ปโป่งมอเตอร์ชนิดนี้ที่มีขนาดสเต็ปเล็กจะมีลักษณะโครงสร้างดังภาพที่ 12 โดยสเตเตอร์

ภาพที่ 12

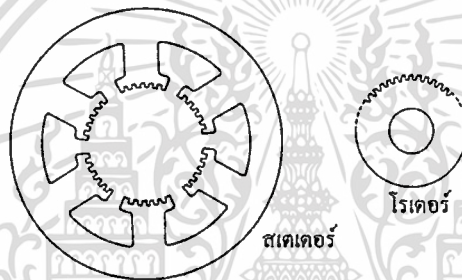


แสดงโครงสร้างของสเต็ปโป่งมอเตอร์ชนิดคาร์ลัคแดนซ์แปรค่าได้ที่มี 2 ซี่ฟันบนแต่ละโพล จำนวนซี่ฟันของโรเตอร์เท่ากับ 14 และขนาดสเต็ปเป็น 8.75 องศาต่อสเต็ป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

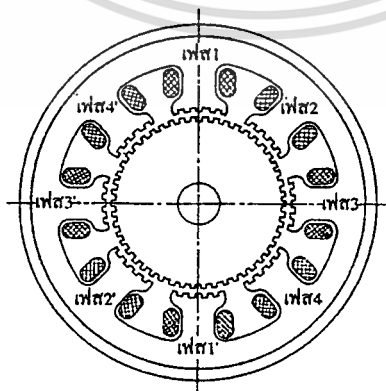
จะมีลักษณะยื่นออกมาเรียกว่า “โพล” (pole) โดยที่ปลายของแต่ละโพลจะมีซี่ฟันจำนวนหนึ่งอยู่ ซึ่งแต่ละซี่ฟันที่อยู่ที่ปลายของโพลนี้จะมีขั้วแม่เหล็กเดียวกันทั้งโพล จากภาพที่ 12 นี้ จำนวนซี่ฟันของโรเตอร์เท่ากับ 14 และจำนวนเฟสเท่ากับ 3 ดังนั้นจึงมีจำนวนสเต็ปเท่ากับ 3×14 เท่ากับ 42 สเต็ป และขนาดมุมของสเต็ปเท่ากับ $360/42$ เท่ากับ 8.57 องศา โดยในภาพที่ 13 และ 14 แสดงอีกลักษณะหนึ่งของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ชนิดที่มีความละเอียดของขนาดสเต็ปสูง คือในภาพที่ 13 เป็นชนิด 3 เฟส ที่มีจำนวนซี่ฟันของโรเตอร์เท่ากับ 44 หรือจำนวนสเต็ปต่อรอบเท่ากับ 132 ส่วนภาพที่ 14 เป็นมอเตอร์ชนิด 4 เฟส จำนวนซี่ฟันของโรเตอร์เท่ากับ 50 จำนวนสเต็ปต่อรอบเท่ากับ 200 และขนาดสเต็ปเท่ากับ 1.8 องศา ตามลำดับ

ภาพที่ 13



แสดงโครงสร้างของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ชนิดคาร์ลิกคแตนซ์แปรค่าได้ที่โรเตอร์มี 44 ซี่ฟันจำนวนสเต็ปเป็น 132 สเต็ปต่อรอบ

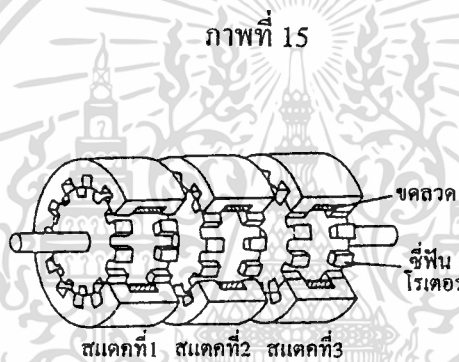
ภาพที่ 14



แสดงโครงสร้างของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ชนิดคาร์ลิกคแตนซ์แปรค่าได้ที่มีความละเอียดของขนาดสเต็ป 1.8 องศา ต่อสเต็ปนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเต็ปป์มอเตอร์ชนิดคาร์ลิตแคตแดนซ์แปรค่าได้ชนิดหลายสเตค

ที่ผ่านมาเป็นสเต็ปป์มอเตอร์ชนิดคาร์ลิตแคตแดนซ์แปรค่าได้ชนิดสเตคเดียว คือ จำนวนเฟสทั้งหมดจะอยู่ที่สเตคเดียวกัน ส่วนชนิดหลายสเตคนั้นมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 15 ซึ่งในภาพนี้เป็นประเภท 3 สเตค ถ้ากระตุ้นให้เฟส(สเตค)ที่ 3 ทำงาน ซึ่งฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์ของเฟสนี้ก็มีตำแหน่งตรงกัน ส่วนเฟสอื่นๆ ตำแหน่งซึ่งฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์จะไม่ตรงกัน ซึ่งในภาพนี้จะห่างจากตำแหน่งสมมูลเมื่อเฟสที่ 3 ถูกกระตุ้นเท่ากับ $1/3$ เท่าของซึ่งฟัน จากนั้นเปลี่ยนการกระตุ้นจากเฟสที่ 3 ไปเฟสที่ 1 โรเตอร์จะเคลื่อนที่ตามเข็มนาฬิกาเป็นจำนวน 1 สเต็ป แต่ถ้ากระตุ้นจากเฟสที่ 3 ไปเฟสที่ 2 โรเตอร์จะเคลื่อนที่ทวนเข็มนาฬิกาเป็นจำนวน 1 สเต็ป



แสดงโครงสร้างของสเต็ปป์มอเตอร์ชนิดคาร์ลิตแคตแดนซ์แปรค่าได้ประเภทมีหลายสเตค

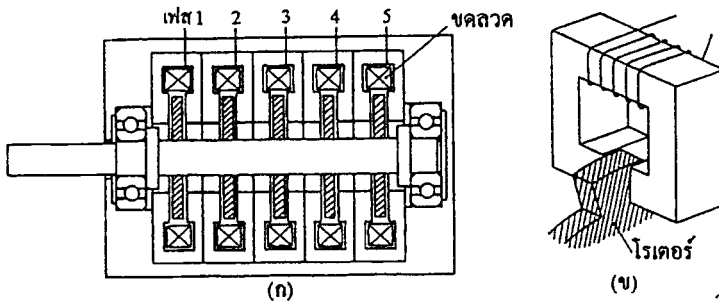
ในภาพที่ 16 แสดงสเต็ปป์มอเตอร์แบบหลายสเตคอีกประเภทหนึ่ง ซึ่งมีจำนวนเฟสเท่ากับ 5 เฟส ออกแบบมาเพื่อใช้งานประเภทนิวเมอริคอล คอนโทรล (numerical control) ซึ่งในภาพที่ 16(ข) แสดงหลักการของสเต็ปป์มอเตอร์ชนิดนี้ จะเห็นว่า ซึ่งฟันของโรเตอร์จะถูกขนาบด้วยซึ่งฟันของสเตเตอร์ จุดประสงค์ก็เพื่อให้ได้ค่าแรงบิดที่สูงขึ้นนั่นเอง

สเต็ปป์มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร (permanent magnet stepping motor หรือ PM stepping motor)

สเต็ปป์มอเตอร์บางประเภทโรเตอร์จะทำด้วยแม่เหล็กถาวร จึงเรียกสเต็ปป์มอเตอร์ประเภทนี้ว่า “สเต็ปป์มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร” ซึ่งตัวอย่างประเภท 4 เฟส ของมอเตอร์ชนิดนี้แสดงในภาพที่ 17 โดยโรเตอร์ภาพทรงกระบอกทำจากแม่เหล็กถาวรและสเตเตอร์มีจำนวน 4 ซึ่งฟัน แต่ละซึ่งฟัน

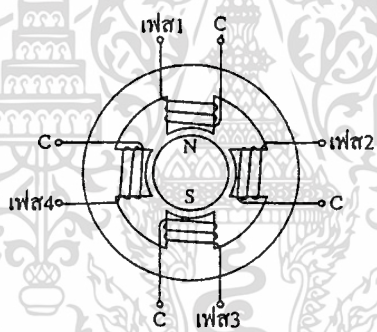
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 16



แสดง โครงสร้างของสเต็ปป์มอเตอร์ชนิดคาร์ลัคแดนซ์แปรค่าได้ประเภทมี 5 สเตค

ภาพที่ 17



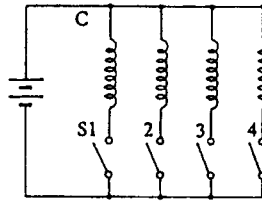
แสดง โครงสร้างของสเต็ปป์มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร

จะมีขดลวดพันล้อมรอบอยู่ โดยมีภาพที่ 18 แสดงหลักการควบคุมการทำงานของสเต็ปป์มอเตอร์ในภาพนี้ที่จุด ค. ของทุกเฟสจะต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟ ถ้าแต่ละเฟสถูกระตุ้นให้ทำงานด้วยลำดับเฟส 1 เฟส 2 และเฟส 3 แล้ว โรเตอร์จะเคลื่อนที่ตามเข็มนาฬิกา ดังแสดงในภาพที่ 19 ขนาดสเต็ปป์ที่ได้จะมีขนาด 90 องศา สำหรับในตัวอย่างนี้ ถ้าต้องการลดขนาดของสเต็ปป์ลงจะต้องทำการเพิ่มจำนวนซี่ฟันของตัวสเตเตอร์และจำนวนขั้วแม่เหล็กบนโรเตอร์ขึ้นอีก

โรเตอร์ของสเต็ปป์มอเตอร์ประเภทนี้สามารถเคลื่อนที่มาหยุด ณ ตำแหน่งที่แน่นอนได้แม้ว่าจะหยุดกระตุ้นให้ทำงานก็ตาม ตำแหน่งดังกล่าวเรียกว่า “ตำแหน่งดีเทนท์” (detent position) ซึ่งปกติแล้ว ตำแหน่งดีเทนท์จะตรงกับตำแหน่งสมดุล (equilibrium) เมื่อเฟสใดเฟสหนึ่งถูกกระตุ้นให้ทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 18

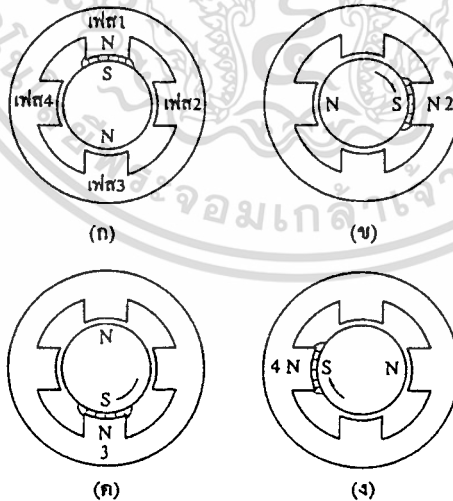


แสดงหลักการควบคุมการทำงานของสเต็ปป์มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร

สเต็ปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริด (Hybrid stepping motor)

สเต็ปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริดเป็นสเต็ปป์มอเตอร์ที่มีหลักการทำงานผสมผสานกัน ระหว่าง สเต็ปป์มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรกับชนิดคาร์ลัคแดนซ์แปรค่าได้ จึงได้ชื่อว่า “สเต็ปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริด” โดยภาพที่ 20 เป็นภาพแสดงโครงสร้างของสเต็ปป์มอเตอร์ชนิดนี้ ที่มีการใช้งานอย่าง

ภาพที่ 19

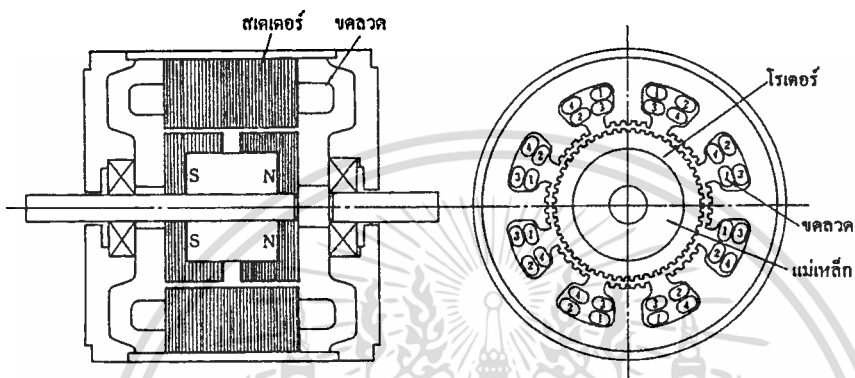


แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ของสเต็ปป์มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร

แพร่หลายในปัจจุบัน ลักษณะโครงสร้างแกนสเตเตอร์ของสเต็ปป์มอเตอร์ชนิดนี้จะมีลักษณะที่คล้ายกับสเต็ปป์มอเตอร์แบบคาร์ลัคแดนซ์แปรค่าได้ แต่จะต่างกันตรงที่ลักษณะการพันขดลวด กล่าวคือ เอกสารนี้เป็นเอกสารหลวงวิไลรักษ์การเขียนเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการคัดค้านไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดคาร์ลัคแทนซ์แปรค่าได้ขดลวด 1 ขด จากทั้งหมด 2 ขดใน 1 เฟส จะพันบนโพลของสเตเตอร์เพียงขดเดียว ในขณะที่สเต็ปป์มอเตอร์แบบไฮบริดชนิด 4 เฟส โพลของสเตเตอร์จะมีขดลวด 2 ขด ที่ต่างเฟสกันพันอยู่ดังแสดงในภาพที่ 20 ซึ่งขดลวดทั้งสองบนโพลของสเตเตอร์นี้จะพันในลักษณะไบฟีลาร์ (bifilar) ซึ่งจะให้ลักษณะขั้วสนามแม่เหล็กที่ต่างกันเมื่อถูกกระตุ้นให้ทำงาน

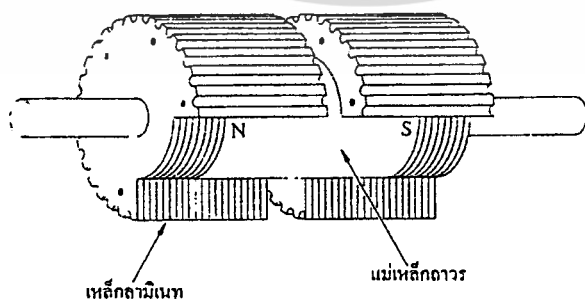
ภาพที่ 20



แสดงโครงสร้างของสเต็ปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริด

ส่วนโรเตอร์ของสเต็ปป์มอเตอร์แบบไฮบริด มีลักษณะดังภาพที่ 21 กล่าวคือ จะมีแม่เหล็กรูปทรงกระบอกที่วางตัวตามแกนโรเตอร์ ซึ่งมีทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นดังแสดงในภาพที่ 22(ก) โดยแต่ละโพลของแม่เหล็กจะถูกล้อมรอบด้วยซี่เหล็กอ่อนซึ่งโดยทั่วไปจะทำด้วยเหล็กซินเทอริค

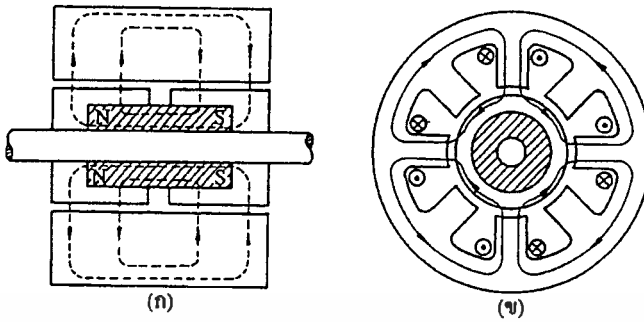
ภาพที่ 21



แสดงโครงสร้างแกนโรเตอร์ของสเต็ปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

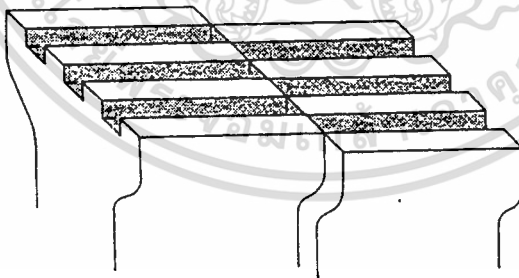
ภาพที่ 22



แสดงเส้นแรงแม่เหล็กในสตีปิ้งมอเตอร์ชนิดไฮบริด โดย (ก) เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กบนแกนโรเตอร์ และ (ข) เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านขดลวด

(sintered steel) หรือแท่งเหล็กซิลิคอน (solid silicon steel) ซึ่งพื้นของเหล็กอ่อนทั้งสองด้าน (เหนืและใต้) จะมีตำแหน่งเยื้องกันเท่ากับครึ่งหนึ่งของซี่ฟัน ในบางมอเตอร์ตำแหน่งของซี่ฟันของโรเตอร์จะตรงกันและตำแหน่งซี่ฟันของสเตเตอร์จะเยื้องกันแทนดังแสดงในภาพที่ 23 และสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดสเตเตอร์มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 22 (ข)

ภาพที่ 23

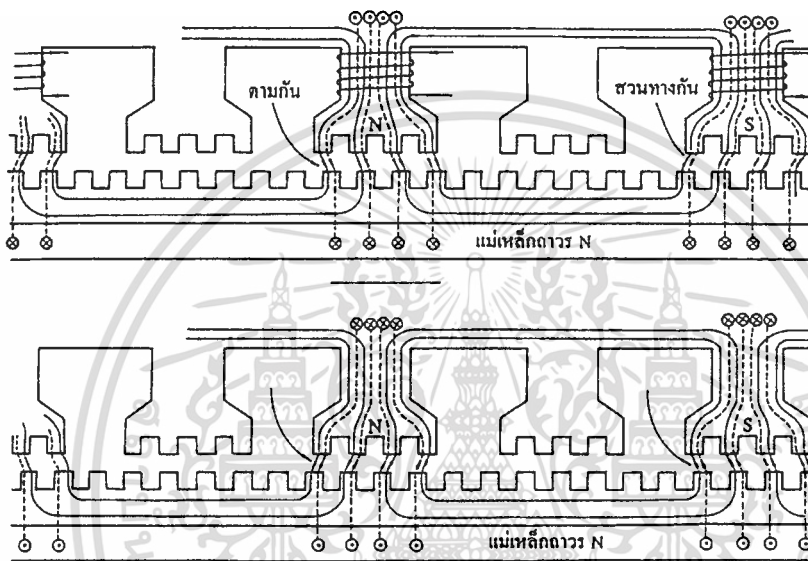


แสดงลักษณะการเยื้องกันของซี่ฟันของสเตเตอร์

ในสตีปิ้งมอเตอร์ประเภทนี้แรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กจะมีลักษณะดังภาพที่ 24 โดยด้านบนของภาพนี้แสดงด้านที่มีขั้วแม่เหล็กเป็นขั้วใต้และภาพล่างเป็นขั้วเหนือ โพลแรกถูกกระตุ้นให้ทำงานเป็นขั้วเหนือ ส่วนโพลที่ 3 เป็นขั้วใต้ มีทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดแสดงด้วยเส้นทึบ ส่วนเส้นประเป็นทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวร จะเห็นว่าภาพทิศทางเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเส้นแรงแม่เหล็กทั้งสองที่เกิดขึ้นที่โพลแรกจะมีทิศทางเดียวกัน ส่วนในโพลที่ 3 จะมีทิศทางตรงกันข้าม เป็นผลทำให้โรเตอร์เคลื่อนที่ไปทางซ้ายตามทิศทางของลูกศรในภาพ ทำนองเดียวกับภาพล่างในโพลแรกทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นตรงกันข้าม ในขณะที่โพลที่ 3 มีทิศทางเดียวกันเป็นผลให้โรเตอร์เคลื่อนที่ไปทางซ้ายดังทิศทางของลูกศรในภาพ

ภาพที่ 24



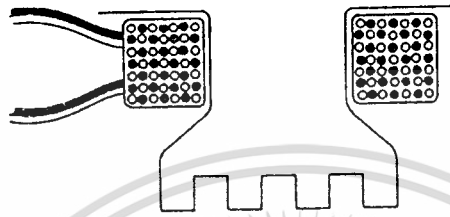
แสดงลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กในสเต็ปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริดที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของโรเตอร์

ลักษณะการพันขดลวดในสเต็ปป์มอเตอร์

ลักษณะการพันขดลวดในสเต็ปป์มอเตอร์จะมี 2 ลักษณะคือ การพันแบบโมนอฟิลาร์ และไบฟิลาร์ ซึ่งในสเต็ปป์แบบคาร์ริคแคนซ์แปรค่าได้ชนิดมีหลายสเตค และสเต็ปป์มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรประเภทมีคลาวโพล (claw pole) ขดลวดที่ใช้จะมีลักษณะเป็นขดลวดโซลินอยด์ ส่วนในสเต็ปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริดและแบบคาร์ริคแคนซ์แปรค่าได้ชนิดสเตคเดียวจะมีลักษณะการพันขดลวดแบบโมนอฟิลาร์และไบฟิลาร์ ซึ่งลักษณะการพันขดลวดแบบไบฟิลาร์แสดงดังภาพที่ 25 คือจะใช้เส้นลวด 2 เส้น พันคู่กันไป ถ้าเส้นหนึ่งเป็นของเฟสที่ 1 แล้ว อีกเส้นที่เหลือจะเป็นเฟสที่ 3 ในทำนองเดียวกันถ้าเส้นแรกเป็นเฟสที่ 2 อีกเส้นหนึ่งจะเป็นเฟสที่ 4 ซึ่งวัตถุประสงค์ในการพันขดลวดแบบไบฟิลาร์ คือ ต้องการให้โพลของสเตเตอร์สามารถมีขั้วแม่เหล็กสลับไปมาได้ทั้งสองขั้ว โดยลดอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรควบคุมการจ่ายกระแสดังในภาพที่ 26 แสดงหลักการของวงจรควบคุมการทำงานของสเต็ปป์ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ที่มีการพันขดลวดแบบต่างๆ โดยในภาพ 26(ก) เป็นวงจรควบคุมการทำงานของสแต็ปปีงมอเตอร์ที่มีการพันแบบโมโนฟิลาร์ ขั้วของสนามแม่เหล็กที่ได้จะมีเพียงทิศทางเดียว ถ้าต้องการให้สามารถสลับขั้วของสนามแม่เหล็กไปมาในขดลวดแบบโมโนฟิลาร์แล้ว จะต้องจัดวงจร

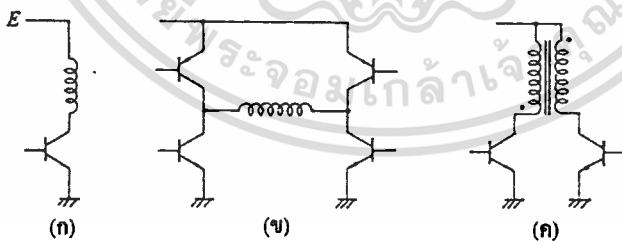
ภาพที่ 25



แสดงลักษณะของขดลวดที่พันแบบไบฟิลาร์

เป็นลักษณะวงจรบริดจ์ดังภาพ 26(ข) แต่จะเห็นว่าจะต้องใช้อุปกรณ์ในการสวิตช์กระแสเพิ่มคือทรานซิสเตอร์ถึง 4 ตัว ต่อ 1 เฟส แต่ถ้าขดลวดที่ใช้ในสแต็ปปีงมอเตอร์มีการพันแบบไบฟิลาร์แล้ว อุปกรณ์ในการสวิตช์กระแสจะใช้เพียง 2 ตัว ใน 1 เฟส ดังแสดงในภาพ 26(ค)

ภาพที่ 26



แสดงหลักการควบคุมการทำงานของสแต็ปปีงมอเตอร์ที่พันแบบ

(ก) โมโนฟิลาร์ วงจรควบคุมแบบโมโนโพลาร์

(ข) โมโนฟิลาร์ วงจรควบคุมแบบไบโพลาร์

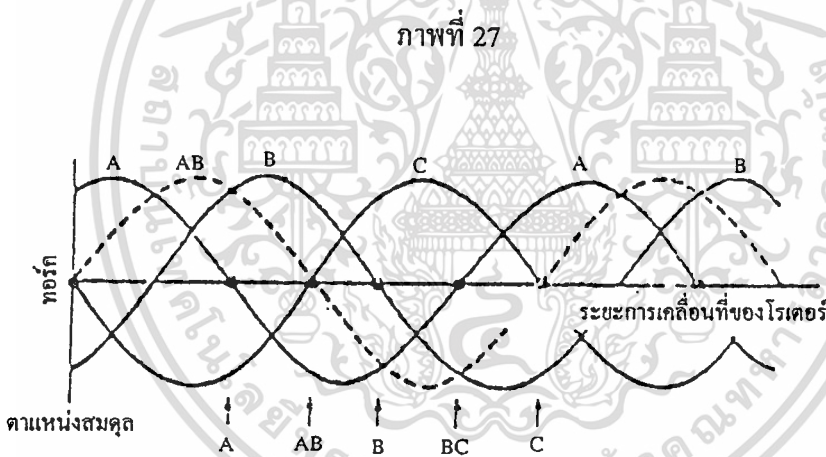
(ค) ไบฟิลาร์ วงจรควบคุมแบบไบโพลาร์

คุณลักษณะแรงบิดของสเต็ปปีงมอเตอร์

การศึกษาคุณสมบัติของสเต็ปปีงมอเตอร์ เพื่อให้สามารถควบคุมการทำงานของสเต็ปปีงมอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพต้องศึกษาถึงคุณลักษณะต่างๆ เช่น คุณลักษณะเกี่ยวกับแรงบิดหรือทอร์ก ค่าของความเร็วสูงสุดที่มอเตอร์สามารถตอบสนองได้ คุณลักษณะเกี่ยวกับกระแสซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงค่าทอร์ก ซึ่งคุณลักษณะเหล่านี้ศึกษาได้จากกราฟแสดงคุณลักษณะของสเต็ปปีงมอเตอร์ ซึ่งมีรายละเอียดที่ศึกษาได้ดังต่อไปนี้

คุณลักษณะทางสแตติกของสเต็ปปีงมอเตอร์

คุณลักษณะทางสแตติก เป็นคุณลักษณะขณะที่มอเตอร์หยุดนิ่ง แสดงโดยกราฟของทอร์กดังต่อไปนี้



แสดงคุณลักษณะทางสแตติกของสเต็ปปีงมอเตอร์ขนาดสามเฟส

จุดสมดุลของการหมุน คือ จุดซึ่งชี้ฟันของโรเตอร์และชี้ฟันของสเตเตอร์ที่มีความสัมพันธ์กัน อยู่ในแนวเดียวกัน และคงอยู่ในตำแหน่งนี้โดยไม่มีการกำหนดจนกว่าจะได้รับสัญญาณกระตุ้นครั้งต่อไป ที่ตำแหน่งสมดุลของโรเตอร์จะมีค่าทอร์กเป็นศูนย์ ถ้ามอเตอร์เคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง เนื่องจากโหลด T_L มอเตอร์จะสร้างทอร์กขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามเพื่อให้สมดุลกับโหลด แรงที่เกิดขึ้นนี้เป็นพลังงานที่สะสมอยู่เมื่อมอเตอร์อยู่ในสถานะหยุดนิ่ง ซึ่งจะมีทิศทางตรงข้ามกับจุดสมดุลเริ่มต้น ผลของทอร์กกับการเคลื่อนที่ของโรเตอร์จะมีลักษณะคล้ายคลื่นไซน์ (รูปร่างจริงจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโรเตอร์และสเตเตอร์ ซึ่งจะเป็นคาบกับชี้ฟันของโรเตอร์)

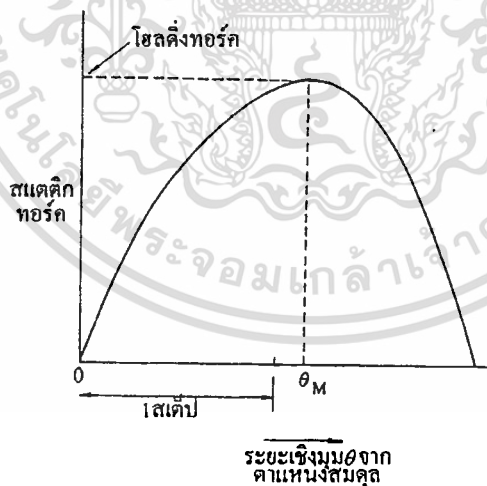
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าทอร์กสูงสุดจะขึ้นอยู่กับกระแสที่จ่ายให้เฟสนั้นๆ ทอร์กนี้จะถูกเรียกว่าโฮลดิ้งทอร์กหรือ สเตตติกทอร์ก ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของทอร์กและกระแสค่อนข้างจะมีลักษณะเป็นเชิงเส้น แต่จะมีขีดจำกัดที่คุณสมบัติการเกิดการอ้อมตัวของโรเตอร์และสเตเตอร์ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแม่เหล็ก ที่จุดอ้อมตัวนี้จะไม่มีการเพิ่มขึ้นของทอร์กเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของกระแสเฟส

ทอร์กของมอเตอร์จะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อมอเตอร์เคลื่อนที่ไปครึ่งหนึ่งของระยะห่างซี่ฟัน โรเตอร์ ถ้าการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ข้ามจุดสมดุลไปหรือไปที่ตำแหน่งอื่น ซึ่งเป็นจำนวนเท่าของซี่ฟันของ โรเตอร์ จะทำให้เกิดการสูญเสียของพัลส์อินพุท ทำให้เกิดการไม่เชิงโครในสัระหว่างคำสั่งพัลส์อิน พุทกับการตอบสนองของสเต็ปการเคลื่อนที่ เพื่อไม่ให้เกิดเหตุการณ์นั้น มอเตอร์ต้องมีโฮลดิ้งทอร์ก สูงกว่าโฮลคทอร์ก

ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของโรเตอร์ผ่านจุดสมดุลเริ่มต้น ถ้าแรงเสียดทานมีค่ามากกว่า ทอร์ก โรเตอร์จะหยุดก่อนถึงตำแหน่งสมดุล ความไม่แน่นอนของตำแหน่งจากจุดสมดุลคือความคลาด เคลื่อนทางตำแหน่ง ค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งนี้จะไม่มีการสะสม การลดค่าความคลาดเคลื่อน ทางตำแหน่งต้องลดโฮลคทอร์กหรือเพิ่มโฮลดิ้งทอร์ก กราฟแสดงคุณลักษณะทางสเตตติกจะแสดงถึงความ สัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 28

ภาพที่ 28

แสดงกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเต็ปมิ่งมอเตอร์

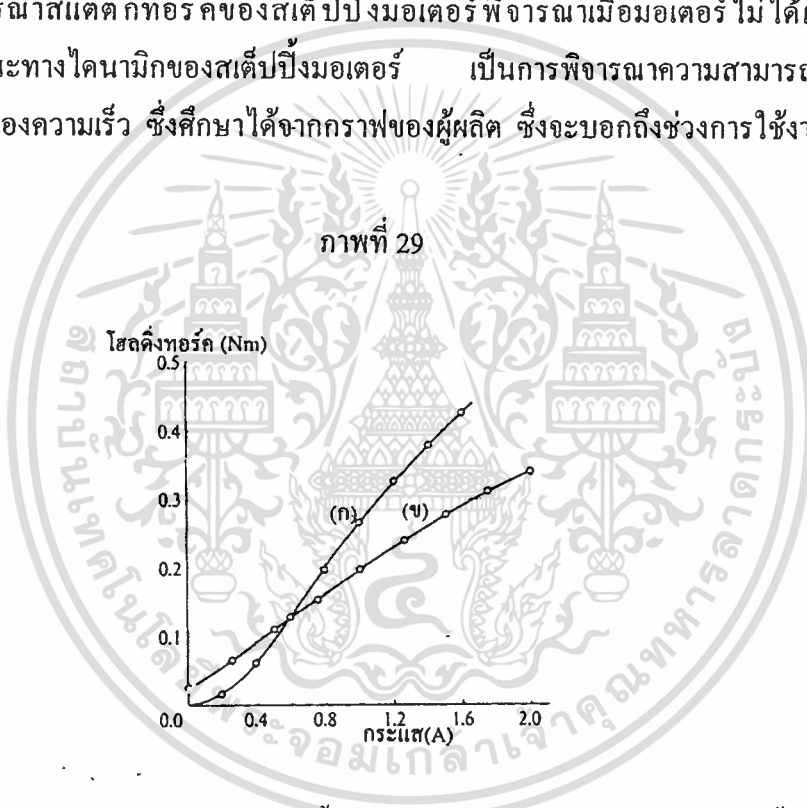
คุณลักษณะของทอร์กกับมุมสเต็ป (T- θ characteristics) เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ทอร์กและตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ สเตตติกทอร์กที่สูงสุดเรียกว่า “โฮลดิ้งทอร์ก” (holding torque) ซึ่งเกิดขึ้นที่ $\theta = \theta_0$ ตำแหน่งที่เกิดโฮลดิ้งทอร์ก จะมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งสมดุลของโรเตอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โสตติงทอร์กคือ ลักษณะทอร์กมูลฐานทั้งหมดของมอเตอร์ซึ่งเป็นทอร์กที่สะสมอยู่ที่ตัวมอเตอร์ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของโรเตอร์ สมมติทอร์ก และไดนามิกทอร์ก จะมีจุดเริ่มต้นที่โสตติงทอร์ก

คุณลักษณะของทอร์กกับกระแส (T/I characteristics) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโสตติงทอร์กกับกระแสที่จ่ายให้เฟสต่างๆ ของสเต็ปป์มอเตอร์ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 29

คุณลักษณะทางไดนามิกของสเต็ปป์มอเตอร์

การพิจารณาสมมติ ทอร์กของสเต็ปป์มอเตอร์ พิจารณาเมื่อมอเตอร์ไม่ได้เคลื่อนที่ การพิจารณาคุณลักษณะทางไดนามิกของสเต็ปป์มอเตอร์ เป็นการพิจารณาความสามารถในการสร้างทอร์กกับฟังก์ชันของความเร็ว ซึ่งศึกษาได้จากกราฟของผู้ผลิต ซึ่งจะบอกถึงช่วงการใช้งานดังต่อไปนี้

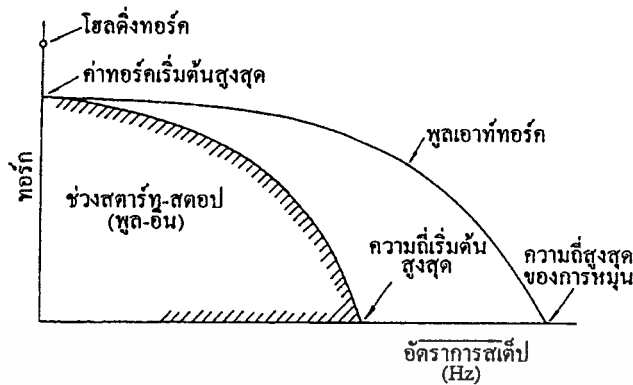


แสดงกราฟคุณลักษณะ T-I ของสเต็ปป์มอเตอร์โดยเส้นกราฟ โดย (ก) สเต็ปป์มอเตอร์ 1.8 องศาต่อสเต็ปป์ชนิดคาร์รีล็คแดนซ์แปรค่าได้ และ (ข) สเต็ปป์มอเตอร์ 1.8 องศาต่อสเต็ปป์ชนิดไฮบริค

ช่วง start-stop การทำงานของมอเตอร์ในช่วงนี้ มอเตอร์จะหยุดหรือสตาร์ทใหม่ หรือเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามโดยปราศจากการสูญเสียสเต็ป ช่วงสตาร์ท-สตอป บางครั้งเรียกว่าช่วงพูลอิน ค่าทอร์กในการทำงานช่วงนี้เรียกว่า “พูลอินทอร์ก”(pull-in torque) ค่าพูล-อินทอร์กของสเต็ปป์มอเตอร์คือ ฟริกชันโหลดทอร์ก (friction load torque) ซึ่งมอเตอร์สามารถหมุนหรือหยุดได้โดยปราศจากการขาดหายไปของสเต็ป ค่าพูล-อินทอร์กขึ้นอยู่กับค่าโหลดทอร์ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 30



แสดงกราฟคุณลักษณะทางไดนามิกของสตีปปี้งมอเตอร์

ช่วงมอเตอร์หมุน (slew-range) จากกราฟจะเป็นช่วงที่แรงงัดมอเตอร์ทำงานในช่วงนี้จะไม่สามารถหยุดหรือสตาร์ทหรือเปลี่ยนทิศทางได้ ช่วงการทำงานนี้อยู่ระหว่างช่วงกราฟของพูลอินทอร์กกับพูลเอาต์ทอร์ก เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์การตอบสนองของมอเตอร์ที่ช่วงความถี่ต่างๆ จนถึงความถี่สูงสุด โดยการทำงานยังคงซิงโครไนซ์กับวงจรถับ พูลเอาต์ทอร์กของสตีปปี้งมอเตอร์ไม่ได้ ถูกจำกัดไว้ที่จุดทำงานใดจุดทำงานหนึ่งหรือมีทรานเซอร์ฟังก์ชันมาเกี่ยวข้องเหมือนในกรณีซีดีมอเตอร์ การกำหนดกราฟนี้กำหนดให้มอเตอร์ทำงานเฉพาะภายในเส้นกราฟ และไม่ทำงานภายนอกเส้นกราฟ กราฟของพูลเอ้าท์นี้สามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงการขับเคลื่อนพูลเอ้าท์ทอร์กจะลดลงเมื่อความถี่สูงขึ้น

การดิปปลิ่งให้เกิดแรงเฉื่อย (inertia) หรือการใช้ระบบการควบคุมแบบวงจรถับ (closed-loop control) จะช่วยให้คุณสมบัติของทอร์กและการตอบสนองต่อความถี่ดีขึ้น ในระบบเปิด (open loop) มอเตอร์จะสามารถทำงานที่ค่าทอร์กต่ำกว่าค่าที่สามารถเป็นไปได้ แต่สำหรับการควบคุมแบบวงจรถับ จะสามารถทำงานได้ที่ใกล้เคียง กราฟของไดนามิกทอร์ก ความถี่สูงสุดนี้บางครั้งถูกเรียกว่าค่าความถี่สูงสุดของการหมุน (maximum slewing frequency) ค่าทอร์กสูงสุดของการเริ่มต้นการทำงานของมอเตอร์ (maximum starting torque) มีความสัมพันธ์กับค่าพูลเอาต์ทอร์กสูงสุดซึ่งเป็นทอร์กของแรงเสียดทานของโหลดมอเตอร์ยังสามารถเริ่มต้นการทำงานได้โดยยังคงซิงโครไนซ์กับขบวนการกำลังพัลส์

พารามิเตอร์ต่างๆ ของสตีปปี้งมอเตอร์

สัญลักษณ์ต่างๆ ของสตีปปี้งมอเตอร์

N_r = จำนวนขั้วของโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N_s	=	จำนวนซี่ฟันของสเตเตอร์
N_p	=	จำนวนเฟส
P_r	=	ความห่างระหว่างปลายซี่ฟันของโรเตอร์ (องศา)
P_s	=	ความห่างระหว่างปลายซี่ฟันของสเตเตอร์ (องศา)
θ_s	=	มุมสเต็ป (องศา)
R_s	=	อัตราการสเต็ปหรือความเร็วในการสเต็ป (สเต็ป/รอบ)
X	=	N_s/N_p = จำนวนซี่ฟันของสเตเตอร์ต่อเฟส

1. ความห่างระหว่างปลายซี่ฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์

$$P_r = 360/N_r \text{ และ } P_s = 360/N_s$$

2. มุมสเต็ป (step angle)

เมื่อโรเตอร์เคลื่อนที่ในขนาดมุม P_r ได้เท่ากับ N_p สเต็ป ดังนั้นเราจะหามุมสเต็ปได้เป็น

$$\theta_s = P_r/N_p = 360/N_r N_p \text{ องศา/สเต็ป}$$

มุมสเต็ปจะเท่ากับความแตกต่างระหว่าง P_r และ P_s

3. อัตราการสเต็ป (stepping rate)

ความเร็วในการสเต็ปต่อรอบ (360 องศา) หาได้เป็น

$$R_s = 360/\theta_s = N_r N_p \text{ สเต็ป/รอบ}$$

4. ความเร็วของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ (speed of stepping motor)

เมื่อเราป้อนอินพุตพัลส์ที่มีความถี่ (f) สเต็ปต่อพัลส์ให้กับสเต็ปปิ้งมอเตอร์จะสเต็ปไปด้วยความเร็ว (สเต็ป/พัลส์) $\times f$ (พัลส์/วินาที)

$$1/R_s \text{ (รอบ/สเต็ป)} \times f \text{ (พัลส์/วินาที)} \text{ (สเต็ป/พัลส์)} \times 60 \text{ (วินาที/นาที)}$$

$$\text{ความเร็วของมอเตอร์ (w)} = 60 f/R_s = 60 f/N_r N_p$$

$$\text{หรือ } X = R_s/N_p (N_p + 1) = N_r/(N_p + 1)$$

จำนวนโพลของสเตเตอร์ต่อเฟส (x) จะสัมพันธ์กับอัตราการสเต็ปหรือจำนวนซี่ฟันของ

โรเตอร์

จากค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ทำให้รู้ความสามารถในการทำงานของสเต็ปปิ้งมอเตอร์และนอกจากนั้นยังมีพารามิเตอร์อื่นที่สำคัญที่ต้องรู้ในการศึกษาควบคุมการทำงานของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ คือ จำนวนสเต็ปต่อรอบ (resolution) ที่มอเตอร์สามารถทำงานได้ความถูกต้องแม่นยำ (accuracy) ซึ่งแสดงในลักษณะของความผิดพลาดเชิงมุมของตำแหน่งของการตอบสนองแบบสเต็ปเดียว (single step) เป็นต้น

โหมดการขับเคลื่อนสี่ล้อ

โหมดการขับเคลื่อนสี่ล้อหรือการจัดลำดับการขับเคลื่อนสี่ล้อเป็นการจัดลำดับการจ่ายพลังงานให้แก่ชุดขับเคลื่อนสี่ล้อเพื่อควบคุมทิศทางการหมุน และ ปรับปรุงประสิทธิภาพของแรงบิด ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายโหมดดังนี้

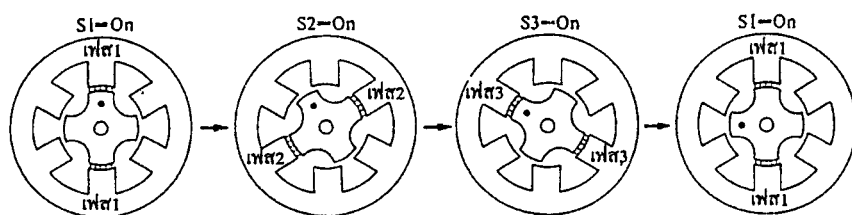
การขับเคลื่อนเฟส

ตารางที่ 1 แสดงลำดับของการขับเคลื่อนแต่ละเฟสของสเตรปขับเคลื่อนสี่ล้อชนิด 3 และ 4 เฟส ในโหมดการขับเคลื่อนเฟส โดยในส่วนของพื้นที่ที่แสงเงานั้นจะเป็นสภาวะของการจ่ายพลังงานให้แก่มอเตอร์ เมื่อต้องการให้สเตรปขับเคลื่อนสี่ล้อหมุนจะทำการจ่ายพลังงานให้แก่เฟสของมอเตอร์เรียงลำดับกันไปเช่นในสเตรปขับเคลื่อนสี่ล้อ 3 เฟส ดังนี้ เฟส 1, เฟส 2, เฟส 3,... และเมื่อต้องการให้มอเตอร์หมุนในทิศทางตรงกันข้ามก็จะจ่ายพลังงานให้แก่เฟสกลับทิศทางดังนี้ เฟส 3, เฟส 2, เฟส 1,... ลักษณะการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เมื่อควบคุมด้วยการขับเคลื่อนเฟส แสดงได้ดังภาพที่ 31

การขับเคลื่อน 2 เฟส

ลำดับของการขับเคลื่อนสี่ล้อแบบขับเคลื่อนเฟส ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งเป็นของมอเตอร์ชนิด 3 และ 4 เฟส ตามลำดับ จะเห็นว่า การขับเคลื่อนแบบนี้ขณะที่กระแสที่ขับเคลื่อนหนึ่งสวิตช์ไปสู่อีกเฟสหนึ่งนั้น ในเฟสที่ 3 ยังคงอยู่ในสภาวะของการขับเคลื่อน ตัวอย่างเช่น จากลูกศรในตาราง เฟส 2 จะหยุดจ่ายพลังงาน และเฟส 1 จะได้รับพลังงาน ในขณะที่เฟส 3 ยังคงได้รับพลังงานอยู่

ภาพที่ 31



แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เมื่อควบคุมแบบการขับเคลื่อนเฟส

ตารางที่ 1
แสดงโหมดการขับทีละเฟส

(ก) มอเตอร์ 3 เฟส

	R	1	2	3	4	5	6	7	8
เฟส 1	■			■			■		
เฟส 2		■			■			■	
เฟส 3			■			■			■

(ข) มอเตอร์ 4 เฟส

	R	1	2	3	4	5	6	7	8
เฟส 1	■				■				■
เฟส 2		■				■			
เฟส 3			■				■		
เฟส 4				■				■	

พัลส์

R = รีเซท

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

ตารางที่ 2

แสดงโหมดการขับทีละ 2 เฟส

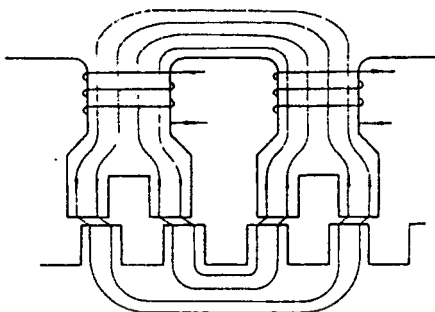
(ก) มอเตอร์ 3 เฟส

สัญญาณนาฬิกา	R	1	2	3	4	5	6	7	8
เฟส 1	■	■		→	■		■	■	
เฟส 2		■	■	→	■	■		■	■
เฟส 3	■		■	■		■	■		■

(ข) มอเตอร์ 4 เฟส

สัญญาณนาฬิกา	R	1	2	3	4	5	6	7	8
เฟส 1	■	■			■	■			■
เฟส 2		■	■			■	■		
เฟส 3			■	■			■	■	
เฟส 4	■			■	■			■	■

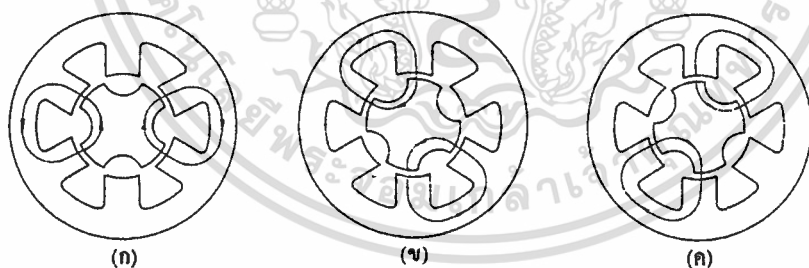
ภาพที่ 32



แสดงความสัมพันธ์ระหว่างซี่ฟันของสเตเตอร์และโรเตอร์เมื่อควบคุมแบบการขับทีละ 2 เฟส

การขับแบบนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งซี่ฟันของโรเตอร์และมอเตอร์แสดงได้ดังภาพที่ 32 จะเห็นว่า ตำแหน่งของซี่ฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์จะไปวางอยู่ในแนวเดียวกันเหมือนดังการขับทีละเฟส ลักษณะของการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ที่เกิดขึ้นในแต่ละสเต็ปจึงมอเตอร์ชนิด 3 เฟส เมื่อขับด้วยการขับทีละ 2 เฟส แสดงได้ดังภาพที่ 33

ภาพที่ 33



แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของโรเตอร์เมื่อควบคุมแบบการขับทีละ 2 เฟสของมอเตอร์ 3 เฟส

การขับทีละ 2 เฟส มีข้อดีกว่าการขับทีละเฟสตรงที่ว่า จะให้การตอบสนองต่อแบบซิงเกิลสเต็ปได้ดีกว่าดังแสดงในภาพที่ 34

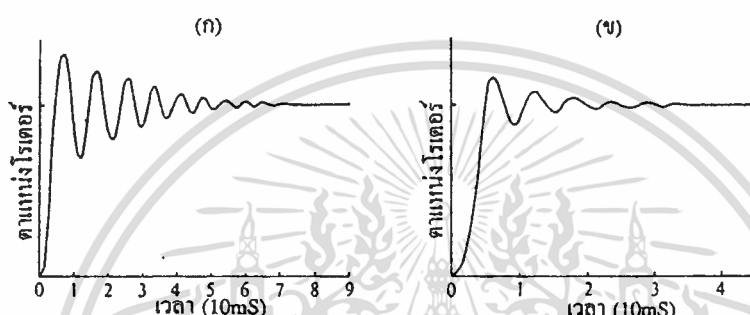
การขับทีละครึ่งสเต็ป

เป็นการขับสเต็ปปึงมอเตอร์แบบที่รวมกันระหว่างการขับทีละเฟสและการขับทีละสองเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตารางที่ 3 เป็นลักษณะของการจับสตีปิ้งมอเตอร์ชนิด 3 เฟส เมื่อจับด้วยการจับที่ละเฟส จะเห็นว่า สัญญาณนาฬิกาที่ใช้อยู่มี 2 ลักษณะคือ สัญญาณนาฬิกา (ก) เมื่อจับในลักษณะของการจับที่ละเฟส และ สัญญาณนาฬิกา (ข) เป็นการจับที่ละ 2 เฟส ขณะที่โรเตอร์เคลื่อนตัวจากตำแหน่งสมมูลอันหนึ่งไปอยู่ตำแหน่งอื่น เพื่อลดการสั่นของตำแหน่งของโรเตอร์ (suppress oscillation) จากลักษณะของการจับแบบนี้จะทำให้ขนาดของสตีปิ้งที่ได้เป็นครึ่งหนึ่งของสตีปิ้งปกติ

ภาพที่ 34



แสดงการเปรียบเทียบการตอบสนองแบบซิงเกิลสตีปิ้งของตำแหน่งการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ เมื่อจับที่ละเฟส และ จับที่ละ 2 เฟส

ตารางที่ 3

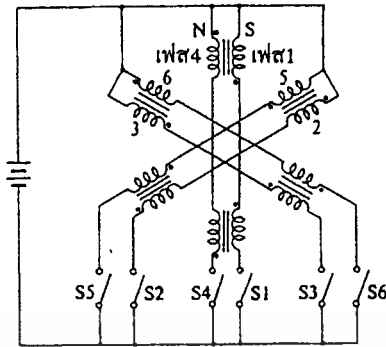
แสดงโหมดการจับที่ละครั้งสตีปิ้ง

สัญญาณนาฬิกา (A)	R	1	2	3	4	5				
สัญญาณนาฬิกา (B)	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9
เฟส1										
เฟส2										
เฟส3										

การจับที่ละ 2 เฟสของสตีปิ้งมอเตอร์ที่พันแบบ ไบฟีลาร์

ลักษณะการต่อของขดลวดในมอเตอร์ประเภทที่พันแบบ ไบฟีลาร์ จะมีลักษณะดังภาพที่ 35 จะสังเกตว่าขดลวดที่มีขั้วตรงกันเข้าจะถูกต่อเข้าด้วยกัน ดังนั้นเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นก็จะมีทั้ง 2 ทิศ
 เอ็กสตรีนเป็นเอ็กสตรีนที่ส่งแรงไว้สำหรับใช้แรง ในเพื่อการยกเข้าเห็น เมื่อผู้ดูได้เห็นใบใช้ประโยชน์ในการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 35



แสดงลักษณะของขดลวดที่พันแบบ ไบฟิลาาร์

ทาง คือ ทิศทางเข้าและออกในเวลาเดียวกัน โดยในภาพที่ 36 แสดงทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการจับแบบที่ละ 2 เฟสของสเต็ปป์มอเตอร์ชนิดคาร์ลัคเด็นท์แปลค่าได้ชนิด 3 เฟส แบบไบโพลาร์ตามตารางที่ 4 จะเห็นว่าในกรณีนี้จะมีเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นถึง 4 คู่ด้วยกัน ซึ่งจะต่างกับสเต็ปป์มอเตอร์ประเภทที่พันแบบโมโนฟิลาาร์ โดยทั่วไปแล้วสเต็ปป์มอเตอร์ที่พันแบบไบฟิลาาร์ จะให้ประสิทธิภาพเกี่ยวกับแรงบิดที่ดีกว่าแบบโมโนฟิลาาร์

ตารางที่ 4

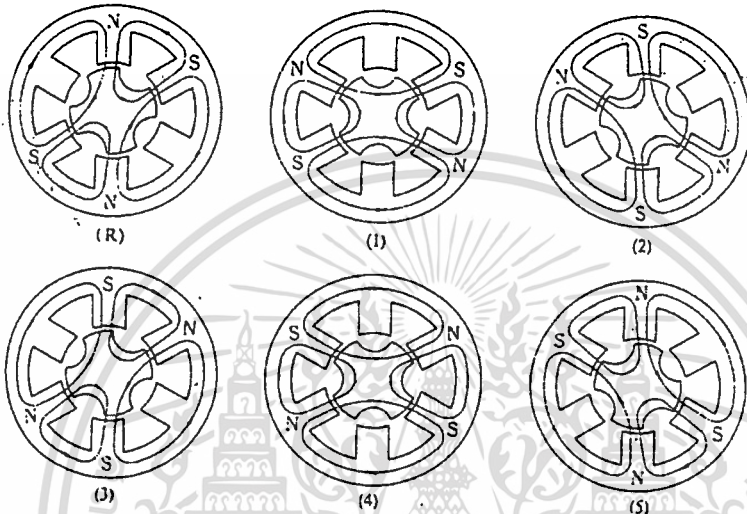
แสดงโหมดการจับที่ละ 2 เฟสของสเต็ปป์มอเตอร์ที่พันแบบ ไบฟิลาาร์

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

การขับเคลื่อนวงจรรบริคค์

ลักษณะการขับเคลื่อนขั้วนิโพลาร์ของสเต็ปปีงมอเตอร์แบบไฮบริดที่พันแบบไบโพล่านั้น ขดลวดของมอเตอร์ที่พันแบบไบโพลาร์นั้นขดลวดของมอเตอร์จะไม่ทำงานเต็มที่ เช่น อาจเพียง 50 เปอร์เซ็นต์

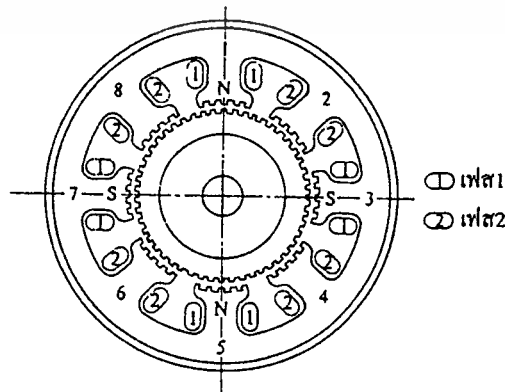
ภาพที่ 36



แสดงลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดที่พันแบบไบโพลาร์

ของขดลวดเท่านั้นที่ใช้นำกระแสเมื่อทำงานในลักษณะการขับที่ละ 2 เฟส ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงให้มีการทำงานในลักษณะขับเคลื่อนไบโพลาร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์

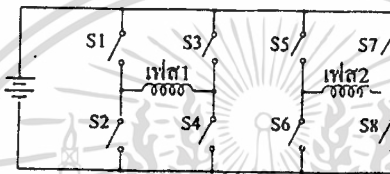
ภาพที่ 37



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในวงเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 แสดงลักษณะของสเต็ปปีงมอเตอร์ที่พันแบบไบโพลาร์ชนิด 2 เฟส
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮบริดสแต็ปมอเตอร์ ขดลวดพันแบบโมนโพลาร์ชนิด 2 เฟสดังภาพนี้ 37 มีโพล 1, 3, 5 และ 7 เป็นของเฟส A และโพล 2, 4, 6 และ 8 เป็นของเฟส B สำหรับเฟส A โพล 1 และ 5 ให้ขั้วแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือ และโพล 3 และ 7 เป็นขั้วใต้ และทำนองเดียวกันกับเฟส B ลักษณะของวงจรบริดจ์ที่จะใช้ขับสแต็ปมอเตอร์ชนิดนี้แสดงได้ดังภาพ 38 และลำดับของการขับแต่ละเฟสแสดงดังตารางที่ 5 จากตารางนี้จะเห็นว่า แต่ละขดลวดจะทำงานตลอดเวลาโดยให้ขั้วของแม่เหล็กสลับกัน

ภาพที่ 38



แสดงลักษณะของวงจรบริดจ์ที่ใช้ขับสแต็ปมอเตอร์

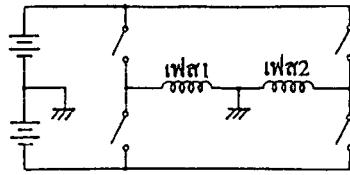
ตลอดเวลา จากลักษณะเช่นนี้จะทำให้ประสิทธิภาพในเรื่องแรงบิดเพิ่มขึ้น 25 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ แต่การขับแบบไบโพลาร์จะต้องการอุปกรณ์ที่ใช้สวิทช์มากเป็น 2 เท่าของการขับแบบโมนโพลาร์ แต่ถ้าชุดจ่ายไฟมีจุดเซ็นเตอร์แทปแล้วก็สามารถลดอุปกรณ์ในการสวิทช์ลงได้ดังภาพ 39

ตารางที่ 5

แสดงการขับในลักษณะวงจรบริดจ์

สัญญาณนาฬิกา	R	1	2	3	4	5	6	7	8
S1	■	■			■	■			■
S2			■	■			■	■	
S3			■	■			■	■	
S4	■	■			■	■			
S5		■	■			■	■		
S6	■			■	■			■	■
S7	■			■	■			■	■
S8		■	■			■	■		

ภาพที่ 39



แสดงการใช้แหล่งจ่ายไฟที่มีเซ็นเซอร์แบบของการขับทีละ 2 เฟสในมอเตอร์ที่พันแบบไปฟิ-
ลาร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

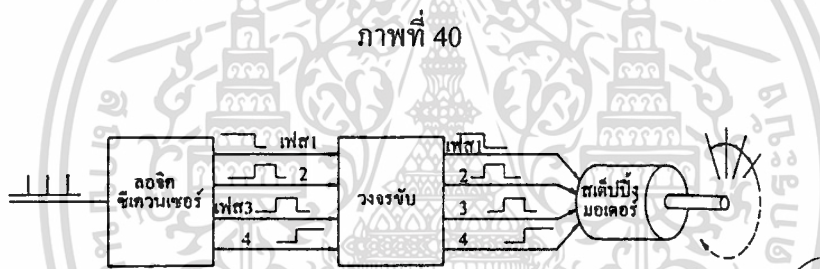
บทที่ 3

การควบคุมการทำงานของสเต็ปปีงมอเตอร์

สิ่งสำคัญที่สุดของการประยุกต์ใช้งานสเต็ปปีงมอเตอร์ก็คือ ระบบการขับสเต็ปปีงมอเตอร์ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ แบบลูปเปิด (open loop) และแบบลูปปิด (close loop) ในส่วนของบทนี้จะกล่าวถึงระบบการขับแบบลูปเปิดดังนี้

ระบบการขับ (drive system)

ระบบการขับสเต็ปปีงมอเตอร์สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 40 ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนวงจรถอดจิกซีแควนเซอร์ (logic sequencer) และวงจรถับ (driver)



แสดงบล็อกโคแอมแกรมของระบบการขับสเต็ปปีงมอเตอร์

วงจรถอดจิกซีแควนเซอร์

ลอจิกซีแควนเซอร์ เป็นวงจรถอดจิกซึ่งทำหน้าที่จัดลำดับการกระตุ้นให้แต่ละเฟสของสเต็ปปีงมอเตอร์ทำงาน ลอจิกซีแควนเซอร์โดยทั่วไปจะประกอบด้วยชิพที่รีจิสเตอร์และลอจิกเกต ในส่วนนี้จะกล่าวถึงวงจรถอดจิกซีแควนเซอร์ชนิดต่างๆ ดังนี้

ลอจิกซีแควนเซอร์ชนิดขับทีละ 2 เฟส สำหรับสเต็ปปีงมอเตอร์ชนิด 4 เฟส

ในภาพที่ 41 เป็นวงจรถลอจิกซีควเอนเซอร์แบบง่าย ๆ ที่ประกอบด้วย JK ฟลิปฟลอปจำนวน 2 ตัว ซึ่งในตัวอย่างนี้เป็นซีควเอนเซอร์ชนิดทิศทางเดียว มีตารางการทำงานอยู่ในรูปเดียวกัน โดยวงจรในภาพที่ 42 จะเป็นวงจรสำหรับกำหนดทิศทางการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์ ดังนั้นเมื่อต้องการให้วงจรซีควเอนเซอร์ในภาพที่ 41 สามารถควบคุมการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์ได้ทั้งสองทิศทาง จึงสามารถรวมวงจรในภาพที่ 41 และ 42 เข้าด้วยกันให้มีลักษณะของวงจรดังในภาพที่ 43 ซึ่งเราเรียกววงจรประเภทนี้ว่า ประเภทไบโคเร็กซ์ันแนล และในภาพที่ 44 เป็นอีกตัวอย่างหนึ่งของซีควเอนเซอร์ประเภทไบโคเร็กซ์ันแนลชนิดขับทีละ 2 เฟสของสเต็ปปีงมอเตอร์ที่มี 4 เฟส

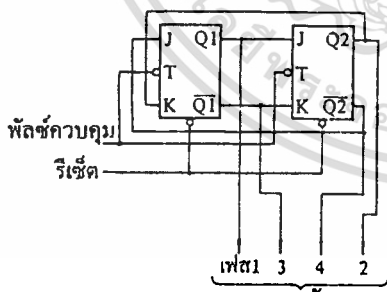
ลจกซีควเอนเซอร์สำหรับการขับทีละเฟสของมอเตอร์ 4 เฟส

วงจรซีควเอนเซอร์สำหรับการขับทีละเฟสนี้ วงจรจะเพิ่มอุปกรณ์ AND เกท จำนวน 4 ตัว เข้ากับเอาต์พุทของวงจรซีควเอนเซอร์สำหรับการขับทีละเฟสในภาพที่ 43 หรือ 44 ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 45 และ 46 ตามลำดับ

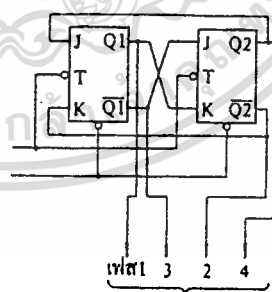
ภาพที่ 41

	R	1	2	3	4	5	6	...
เฟส1, Q1	0	1	1	0	0	1	1	...
เฟส2, Q2	0	0	1	1	0	0	1	...
เฟส3, Q1	1	0	0	1	1	0	0	...
เฟส4, Q2	1	1	0	0	1	1	0	...

	R	1	2	3	4	5	6	...
เฟส1, Q1	0	0	1	1	0	0	1	...
เฟส2, Q2	0	1	1	0	0	1	1	...
เฟส3, Q1	1	1	0	0	1	1	0	...
เฟส4, Q2	1	0	0	1	1	0	0	...



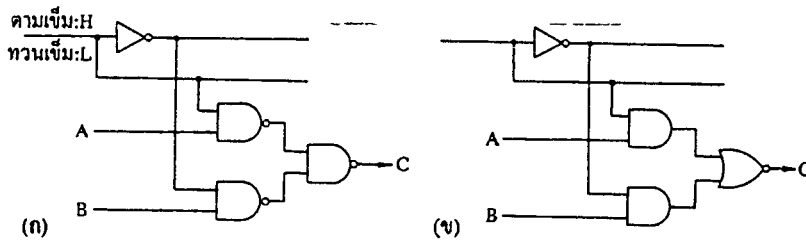
(ก) ตามเข็มนาฬิกา



(ข) ทวนเข็มนาฬิกา

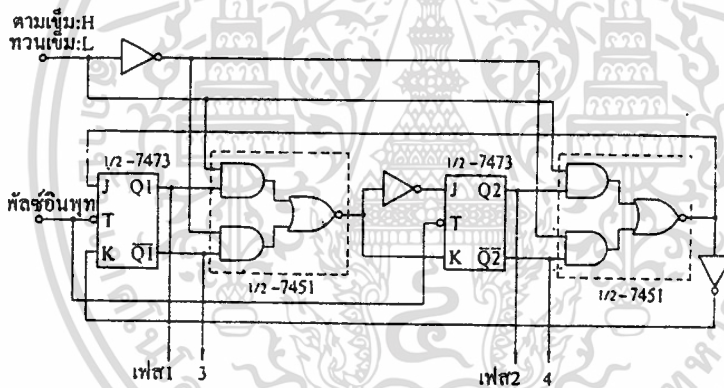
แสดงลจกซีควเอนเซอร์แบบทิศทางเดียว สำหรับการขับทีละ 2 เฟสของสเต็ปปีงมอเตอร์ที่มี 4 เฟส

ภาพที่ 42



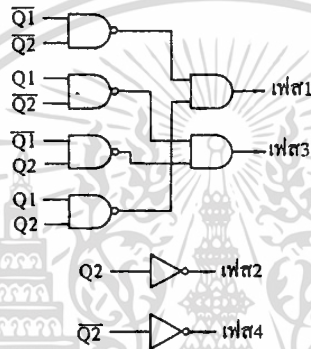
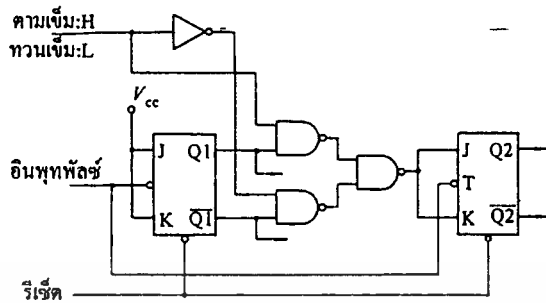
แสดงตัวอย่างวงจรกำหนดทิศทางการหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์

ภาพที่ 43



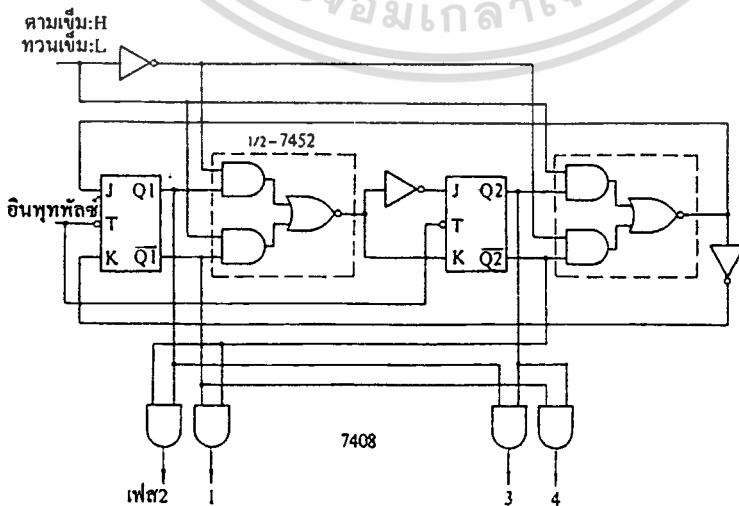
แสดงลอจิกซีควเอนเซอร์แบบไบไดเร็คชันแนล สำหรับการขับทีละ 2 เฟสของมอเตอร์ 4 เฟส

ภาพที่ 44



แสดงอีกตัวอย่างหนึ่งของลอจิกซีควেনเซอร์แบบไบไดเรกชันแนล สำหรับการขับทีละ 2 เฟสของมอเตอร์ 4 เฟส

ภาพที่ 45

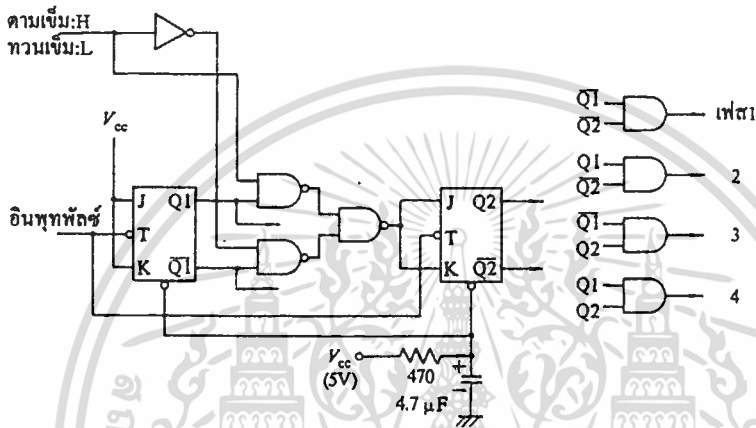


แสดงลอจิกซีควเอนเซอร์แบบไบไดเรกชันแนลสำหรับการขับทีละ 2 เฟสของมอเตอร์ 4 เฟส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 46

		ตามเข็มนาฬิกา						
	R	1	2	3	4	5	6	...
Q_1	0	1	0	1	0	1	0	...
\bar{Q}_1	1	0	1	0	1	0	1	...
Q_2	0	0	1	1	0	0	1	...
\bar{Q}_2	1	1	0	0	1	1	0	...
เฟส 1	Q_1, \bar{Q}_2	1	0	0	0	1	0	...
เฟส 2	Q_1, \bar{Q}_2	0	1	0	0	0	1	...
เฟส 3	Q_1, \bar{Q}_2	0	0	1	0	0	0	...
เฟส 4	Q_1, \bar{Q}_2	0	0	0	1	0	0	...

		ทวนเข็มนาฬิกา						
	R	1	2	3	4	5	6	...
Q_1	0	1	0	1	0	1	0	...
\bar{Q}_1	1	0	1	0	1	0	1	...
Q_2	0	1	1	0	0	1	1	...
\bar{Q}_2	1	0	0	1	1	0	0	...
เฟส 1	Q_1, \bar{Q}_2	1	0	0	0	1	0	...
เฟส 2	Q_1, \bar{Q}_2	0	0	0	1	0	0	...
เฟส 3	Q_1, \bar{Q}_2	0	0	1	0	0	0	...
เฟส 4	Q_1, \bar{Q}_2	0	1	0	0	0	1	...



แสดงวงจรซีควเอนเซอร์แบบ ไบ ไดเรกชัน แนนลสำหรับการขับที่ละเฟสของมอเตอร์ 4 เฟส

วงจรลอจิกซีควเอนเซอร์สำหรับการขับที่ละเฟสของมอเตอร์ 3 เฟส

ลอจิกซีควเอนเซอร์แบบทิศทางเดียวหรือ ยูนิไดเรกชัน สำหรับการขับที่ละเฟสของมอเตอร์ 3 เฟส จะประกอบอุปกรณ์ซีฟที่รีจิสเตอร์ และ AND เกท ตัวแสดงวงจรและตารางการทำงานในภาพที่ 47 และในขณะเดียวกันในวงจรภาพที่ 48 แสดงซีควเอนเซอร์แบบสองทิศทางสำหรับการขับที่ละเฟส

วงจรลอจิกซีควเอนเซอร์สำหรับการขับที่ละสองเฟสของมอเตอร์ 3 เฟส

ในวงจรลอจิกชนิดนี้แสดงดังในภาพที่ 48 จะเห็นว่าวงจรจะเหมือนกับซีควเอนเซอร์สำหรับการขับที่ละเฟสต่างกันเพียงเปลี่ยนจากอุปกรณ์ AND เกท เป็น NAND เกท ซึ่งสังเกตได้จากวงจรในภาพที่ 48

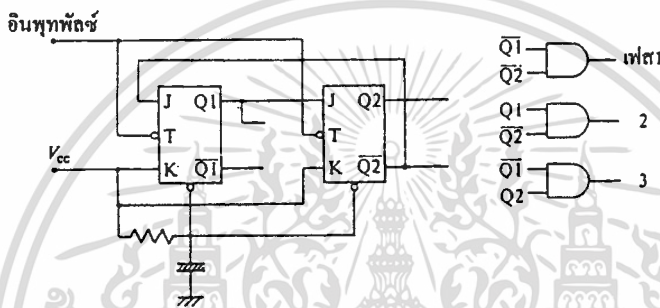
วงจรลอจิกซีควเอนเซอร์สำหรับการขับแบบครึ่งสเต็ปของมอเตอร์ 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

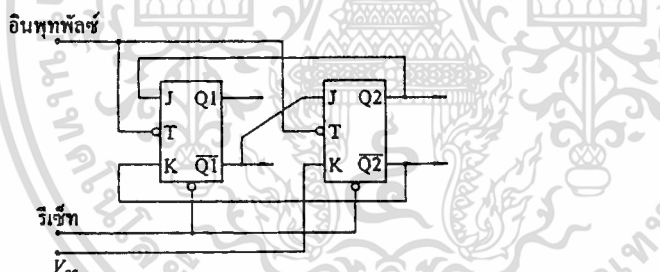
ตัวอย่างของวงจรลอจิกซีควนเซอร์ชนิดนี้แสดงดังภาพที่ 49

ภาพที่ 47

หมุนตามเข็มนาฬิกา		หมุนทวนเข็มนาฬิกา					
	R	1	2	3	4	5	...
Q_1	0	1	0	0	1	0	...
\bar{Q}_1	1	0	1	1	0	1	...
Q_2	0	0	1	0	0	1	...
\bar{Q}_2	1	1	0	1	1	0	...
เฟส1	$\bar{Q}_1 \cdot \bar{Q}_2$	1	0	0	1	0	...
เฟส2	$Q_1 \cdot \bar{Q}_2$	0	1	0	0	1	...
เฟส3	$\bar{Q}_1 \cdot Q_2$	0	0	1	0	0	...



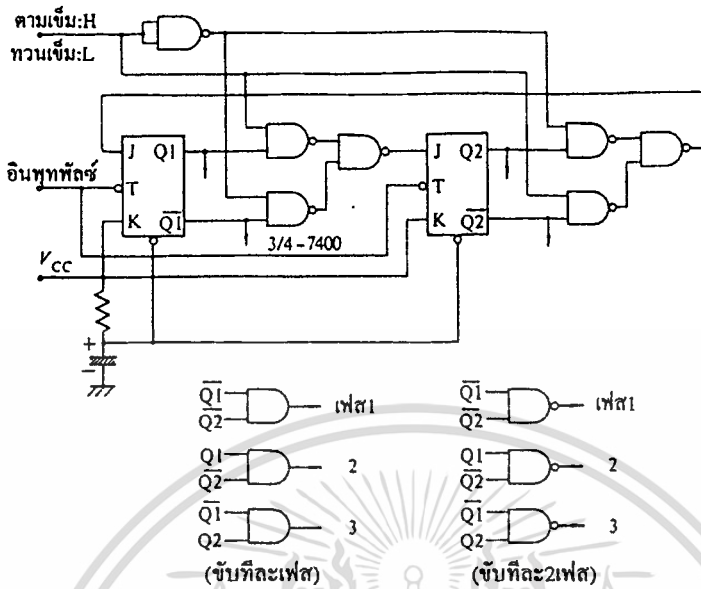
(ก) หมุนตามเข็มนาฬิกา



(ข) หมุนทวนเข็มนาฬิกา

แสดงวงจรซีควนเซอร์ยูนิโคเร็กซ์ัน สำหรับการขับที่ละเฟสของมอเตอร์ 3 เฟส

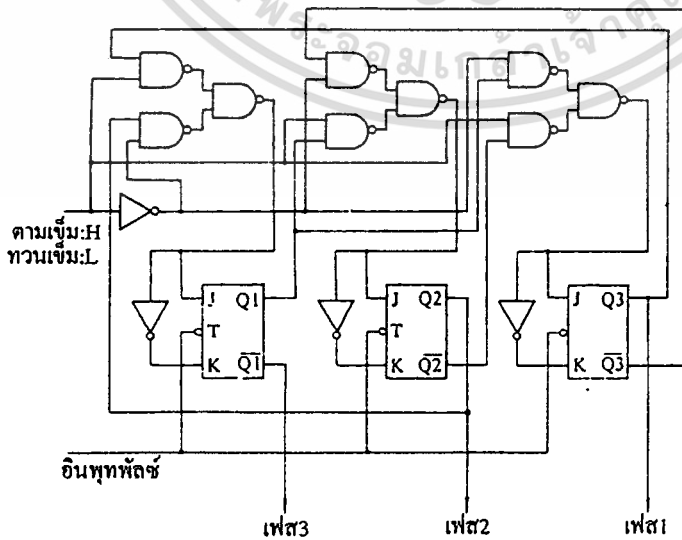
ภาพที่ 48



แสดงลอจิกซีควেনเซอร์แบบ ไบโคเดอริคชั่นเนกของมอเตอร์ 3 เฟส

ภาพที่ 49

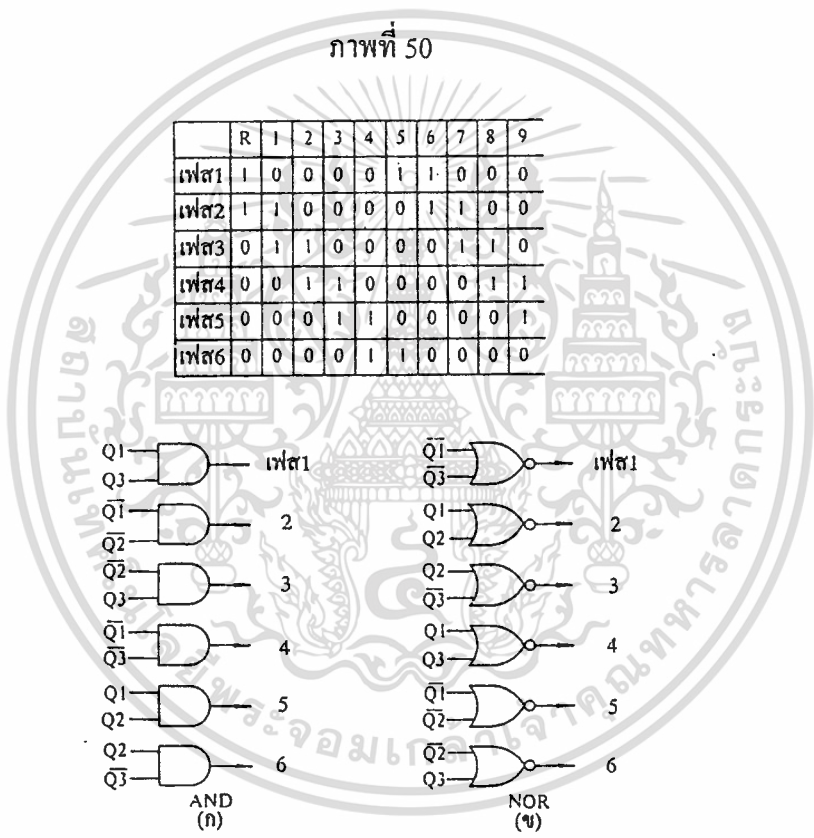
		ตามเข็มนาฬิกา							ทวนเข็มนาฬิกา									
	R	1	2	3	4	5	6	7		R	1	2	3	4	5	6	7	
เฟส1	Q1	1	1	0	0	0	1	1	1	เฟส1	Q1	1	1	0	0	0	1	1
เฟส2	Q2	0	0	0	1	1	1	0	0	เฟส2	Q2	0	1	1	1	0	0	0
เฟส3	Q3	0	1	1	1	0	0	0	1	เฟส3	Q3	0	0	0	1	1	1	0



เอกสารนี้เป็น แสดงวงจรลอจิกซีควเอนเซอร์สำหรับการขับแบบครึ่งสเต็ปของมอเตอร์ 3 เฟส ะโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรถอดจิกซีควนเซอร์สำหรับการขับที่ละสองเฟสของมอเตอร์ชนิด VR ที่มีลักษณะการพันแบบ ไบฟีลาร์ของมอเตอร์ 3 เฟส

วงจรถอดจิกซีควนเซอร์แบบนี้สามารถประยุกต์วงจรถอดจิกซีควนเซอร์แบบการขับที่ละครั้งสลับไปในภาพที่ 49 โดยการเพิ่มอุปกรณ์เกทดังแสดงในภาพที่ 50 เข้าไปยังส่วนเอาต์พุตของวงจรในภาพที่ 49 จะได้วงจรถอดจิกซีควนเซอร์สำหรับ VR มอเตอร์ที่มีการพันแบบไบฟีลาร์โดยจะมีลักษณะของตารางการทำงานในภาพที่ 50



แสดงอุปกรณ์เกทที่เพิ่มเข้ากับเอาต์พุตของวงจรในภาพที่ 49 เพื่อให้ทำงานเป็นวงจรถอดจิกซีควนเซอร์แบบการขับที่ละ 2 เฟสของ VR สลับปี้งมอเตอร์ที่พันแบบไบฟีลาร์ของมอเตอร์ 3 เฟส

วงจรภาคขับกำลัง

สัญญาณเอาต์พุตจากวงจรถอดจิกซีควนเซอร์จะถูกส่งต่อไปยังภาคกำลังของสลับปี้งมอเตอร์ดังลักษณะการต่อในภาพที่ 51(ก) และ(ข) แต่เนื่องจากกระแสจากภาคถอดจิกซีควนเซอร์ไม่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

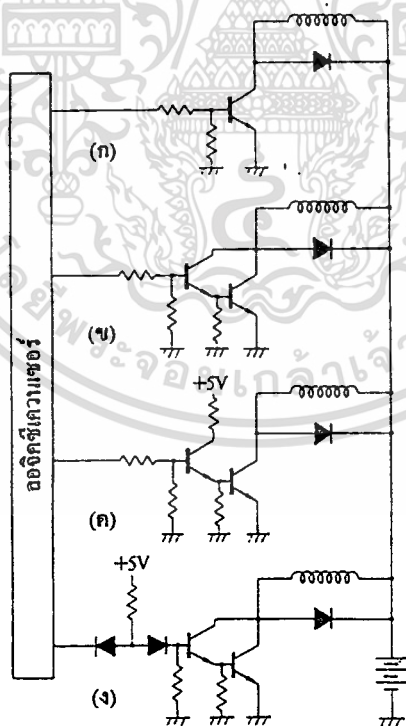
เพียงพอสำหรับขับทรานซิสเตอร์ในภาคขับกำลัง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีภาคขยายกระแสก่อน ดังแสดงในภาพที่ 51(ค) และ (ง)

ขดลวดของสเต็ปมอเตอร์จะมีวงจรสมมูลดังภาพที่ 52 คือ จะประกอบไปด้วยความเหนี่ยวนำ(L) และความต้านทาน(R) ซึ่งต่ออนุกรมกันอยู่ อีกทั้งยังมีแหล่งจ่ายแรงดันที่เกิดจากกระแสไหลย้อนกลับที่เกิดขึ้นในขดลวด สิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาถึงเมื่อออกแบบวงจรภาคขับกำลัง

ซัพเพรสเซอร์ (suppressor)

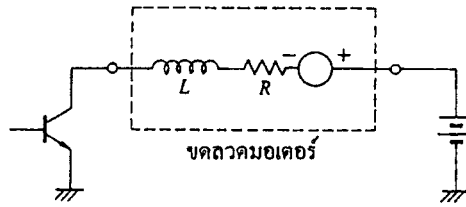
เมื่อทรานซิสเตอร์ในวงจรภาพที่ 52 เปิดวงจรแรงดันที่เกิดขึ้นเนื่องจาก $L(di/dt)$ อาจจะทำให้ความเสียหายให้แก่ทรานซิสเตอร์ได้ วิธีการต่อไปนี้เป็นวิธีลดแรงดันดังกล่าว และป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นแก่ทรานซิสเตอร์ภาคขับกำลัง

ภาพที่ 51



แสดงตัวอย่างการต่อระหว่างซีควีนเซอร์และวงจรภาคขับกำลัง

ภาพที่ 52



วงจรสมมูลของขดลวดสเต็ปปีงมอเตอร์

ไดโอดชัฟเฟรสเซอร์

ถ้าใช้ไดโอดต่อขนานกับขดลวดของสเต็ปปีงมอเตอร์ดังแสดงในภาพที่ 53 เมื่อทรานซิสเตอร์ของวงจรภาคขับกำลังเปิดวงจร กระแสที่เกิดขึ้นจะไหลวนดิ่งลักษณะในวงจรรูป 53 โดยจะค่อยๆ ลดลง เป็นการป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสในลักษณะทันทีทันใดที่ขา “E” ของทรานซิสเตอร์ แต่ในวงจรลักษณะนี้ กระแสที่ไหลวนค้างอยู่อาจเป็นสาเหตุให้เกิดเบรคกิ้งทอร์ค (braking torque)

ไดโอด-รีซิสเตอร์ ชัฟเฟรสเซอร์

ถ้าต่ออุปกรณ์ความต้านทานเพิ่มเข้าไปดังในภาพที่ 54 จะสามารถลดเวลาของกระแสที่ไหลวนให้เร็วขึ้นได้ ซึ่งแรงดัน V_{CE} เมื่อเปิดวงจรคือ

$$V_{CE} = E + IR_S + V_{DF}$$

เมื่อ

$$E = \text{ชัฟฟลายโวลเตจ}$$

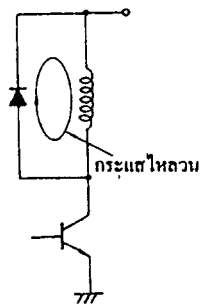
$$I = \text{กระแสเมื่อเปิดวงจรทันที}$$

$$R_S = \text{ค่าความต้านทานชัฟเฟรสเซอร์}$$

$$V_{DF} = \text{ค่าแรงดันตกคร่อมไดโอดเมื่อไบอัสตรง}$$

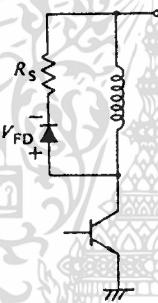
ที่ค่าความต้านทาน R_S สูง จะให้เวลาการลดลงของกระแสไหลวนรวดเร็วหลังจากวงจรเปิด แต่จะทำให้แรงดันที่ขา C ของทรานซิสเตอร์สูงตามขึ้นด้วย นั่นหมายความว่าค่าพิกัดแรงดันของทรานซิสเตอร์จะต้องสูงตามด้วย

ภาพที่ 53



แสดงวงจรไดโอดซัพเพรสเซอร์

ภาพที่ 54



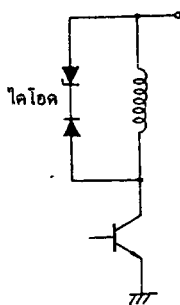
แสดงวงจรไดโอดรีซิสเตอร์ซัพเพรสเซอร์

ซีเนอร์ไดโอดซัพเพรสเซอร์

จากข้อเสียของซัพเพรสเซอร์ทั้งสองวงจรที่กล่าวมาแล้ว สามารถปรับปรุงโดยใช้ซีเนอร์ไดโอดได้ดังภาพที่ 55 วงจรซีเนอร์ไดโอดซัพเพรสเซอร์นี้ กระแสไหลวนจะลดลงอย่างรวดเร็วและแรงดันรวมที่ขา "C" ของทรานซิสเตอร์จะเท่ากับแรงดันของแหล่งจ่ายไฟรวมกับแรงดันของซีเนอร์ไดโอด ไม่ขึ้นอยู่กับกระแสดังเช่นในกรณีของไดโอด-รีซิสเตอร์ซัพเพรสเซอร์ ทำให้ไม่มีปัญหาเรื่องแรงดันพิกัดของทรานซิสเตอร์ ในภาพที่ 56 เปรียบเทียบผลของกระแสไหลวนที่ลดลงเมื่อใช้ซัพเพรสเซอร์แบบต่างๆ และในภาพที่ 57 แสดงวงจรขับสเต็ปปีงมอเตอร์ 4 เฟสที่ใช้ซีเนอร์ไดโอดซัพเพรสเซอร์

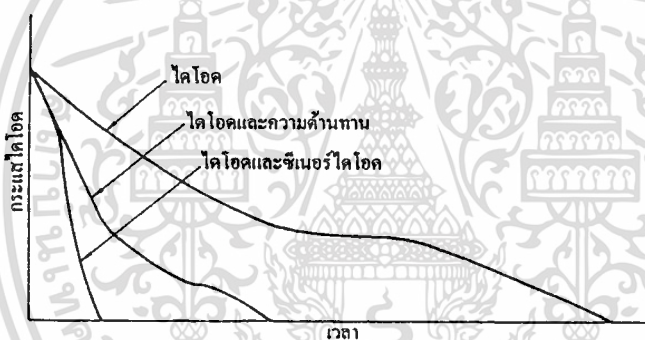
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 55



แสดงวงจรซีเนอร์ไครโอดซัพเพรสเซอร์

ภาพที่ 56



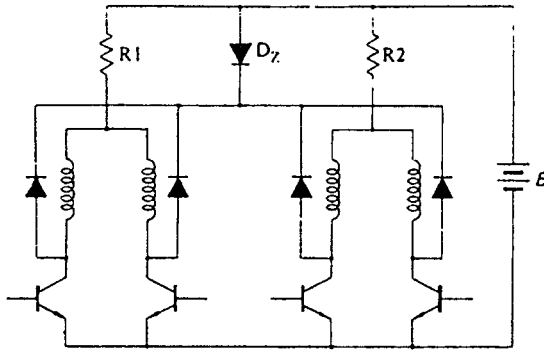
แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของซัพเพรสเซอร์ประเภทต่างๆ

ซัพเพรสเซอร์ชนิดตัวเก็บประจุ

ซัพเพรสเซอร์ลักษณะนี้มักจะใช้กับมอเตอร์ที่พันแบบไบฟีลาร์ ซึ่งมีลักษณะดังในภาพที่ 58 ซึ่งเป็นวงจรขั้วของมอเตอร์ชนิด 4 เฟส โดยจะใช้ตัวเก็บประจุต่อคร่อมระหว่างเฟส 1 กับเฟส 3 และเฟส 2 กับเฟส 4 ตัวเก็บประจุนี้จะทำหน้าที่เก็บประจุของกระแสที่ไหลวน เมื่อเฟสที่ "1" ทำงาน ในขณะที่เฟสอื่นเปิดวงจร จากนั้นเฟสที่ 1 เปิดวงจร ทิศทางของกระแสไหลวนจะมีลักษณะดังเส้นประในภาพที่ 58 กระแสนี้จะประจุเข้ากับตัวเก็บประจุเป็นการป้องกันความเสียหายของทรานซิสเตอร์เนื่องจากกระแสดังกล่าว อีกทั้งกระแสที่ประจุอยู่ในตัวเก็บประจุดังกล่าวยังช่วยทำให้เฟสที่ 3 ทำงานทำงานเร็วขึ้นเมื่อถูกกระตุ้นให้ทำงานในครั้งต่อไป เนื่องจากเฟส 1 และเฟส 3 พันอยู่ในลักษณะของไบฟีลาร์มีตัวเก็บประจุต่อถึงกันนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

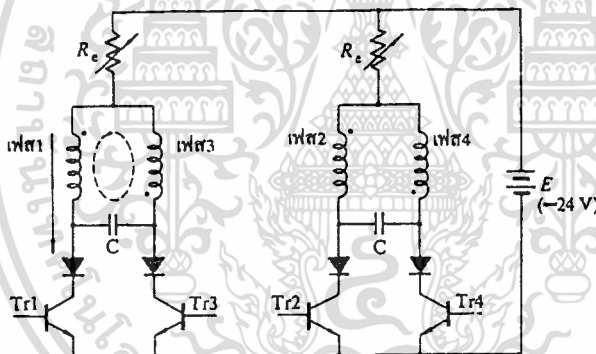
ภาพที่ 57



แสดงตัวอย่างของวงจรขับกำลังสแต็ปปีงมอเตอร์ที่ใช้ซีเนอริโค โอดซ์เพรสเซอร์ของมอเตอร์

4 เฟส

ภาพที่ 58



แสดงตัวอย่างวงจรขับที่ใช้ซีเพรสเซอร์ชนิดตัวเก็บประจุ

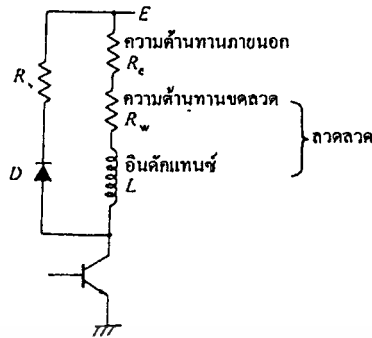
การปรับปรุงกระแสบิลด์อัป (improvement of build-up current)

เมื่อทรานซิสเตอร์ถูกกระตุ้นให้ทำงาน ผลของความเหนี่ยวนำ (inductance) จะหน่วงกระแสจากภาคจ่ายไฟไปยังทรานซิสเตอร์ เป็นผลให้การตอบสนองการทำงานของวงจรช้าลง จึงมีวิธีการต่างๆ เพื่อที่จะเพิ่มการตอบสนองของวงจรให้สูงขึ้นดังนี้

การใช้ค่าความต้านทานเพิ่มเข้าไปยังวงจรทางขา C ของทรานซิสเตอร์ดังภาพที่ 59 ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด ในกรณีนี้ค่าไทม์คอนสแตนต์ (time constant) ของวงจรถูกปรับในสภาวะปกติ (steady-state) จะลดลงจาก L/R_w เป็น $L/(R_c + R_w)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 59



แสดงการปรับปรุงกระแสบิลด์อัพของวงจรขับโดยใช้ความต้านทาน

ในวงจรลักษณะนี้จะมีข้อเสียคือ กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นที่ความต้านทานที่ต่อเพิ่มเข้าไปจะมีค่าสูง ตัวอย่างเช่น ความต้านทานของขดลวดแต่ละเฟสเท่ากับ 1.5Ω กระแสพิกัดเท่ากับ $4A$ และใช้แหล่งจ่ายไฟ $24V$. ดังนั้นจะต้องใช้ความต้านทาน R_c เพิ่มเข้าไป 4.5Ω ในแต่ละเฟส ดังนั้นกำลังงานสูญเสียที่ R_c จะมีประมาณ $4.5 \times 4^2 = 72W$ เมื่อวงจรนั้นทำงานในลักษณะการขับที่ละเฟสและเป็นสองเท่าเมื่อขับแบบที่ละสองเฟส

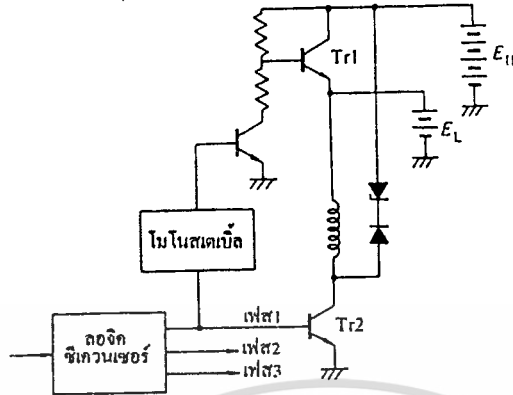
การใช้วงจรแหล่งจ่ายไฟ 2 ชุด (Dual Voltage)

เพื่อที่จะลดปัญหาการเกิดกำลังงานสูญเสียของวงจรภาคขับกำลัง และเพิ่มประสิทธิภาพของสแต็ปปีงมอเตอร์ จึงมีการนำวงจรขับสแต็ปปีงมอเตอร์ที่มีแหล่งจ่ายไฟจำนวน 2 ชุดมาใช้งาน ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 60 เมื่อมีสัญญาณพัลส์ควบคุมจ่ายให้กับวงจรลอจิกซีเควนเซอร์ เอาท์พุทของซีเควนเซอร์จะกระตุ้นให้เฟสใดเฟสหนึ่งทำงาน เช่น เฟส 1 ทรานซิสเตอร์ $Tr1$ และ $Tr2$ จะทำงาน แหล่งจ่ายไฟ E_H ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงจะจ่ายกระแสไปยังขดลวดของสแต็ปปีงมอเตอร์ ในขณะที่ไดโอด DI จะมีไบอัสกลับเพื่อแยกแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง E_H และแรงดันต่ำ E_L ออกจากกัน เนื่องจากใช้แหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงจึงทำให้กระแสบิลด์อัพ (build-up current) ตอบสนองเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์จะเป็นตัวกำหนดค่าไทม์คอนสแตนท์ (time constant) เพื่อหยุดการทำงานของ $Tr1$ เมื่อกระแสในขดลวดของมอเตอร์เริ่มเพิ่มขึ้นเกินพิกัดของมอเตอร์แหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงจะหยุดจ่ายกระแสให้แก่ขดลวด ในช่วงเวลานี้ไดโอดจะมีไบอัสตรง แหล่งจ่ายไฟแรงดันต่ำ E_L จะจ่ายกระแสให้แก่ขดลวดของสแต็ปปีงมอเตอร์แทน ซึ่งลักษณะสัญญาณกระแสจะแสดงดังภาพที่ 61 ส่วนในภาพที่ 62 แสดงลักษณะของวงจรขับที่ใช้แหล่งจ่ายไฟ 2 ชุดสำหรับมอเตอร์ 4 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

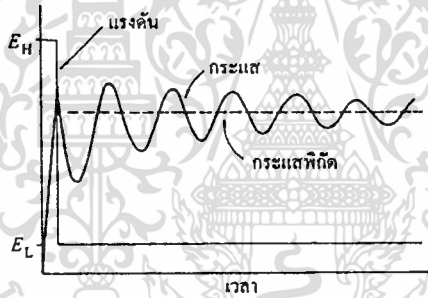
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 60



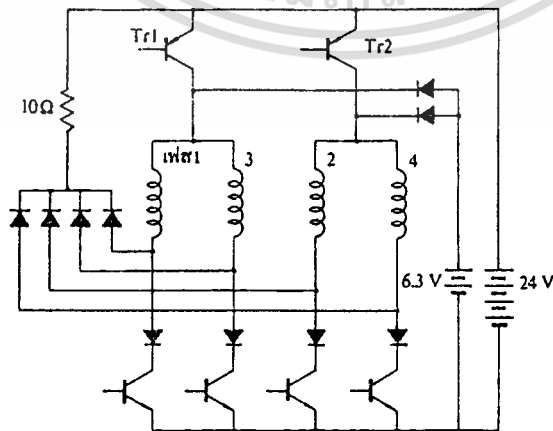
แสดงหลักการของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ใช้แหล่งจ่ายไฟ 2 ชุด

ภาพที่ 61



แสดงลักษณะของสัญญาณแรงดันและกระแสของวงจรขับเคลื่อน 2 ระดับแรงดัน

ภาพที่ 62



แสดงลักษณะของวงจรขับเคลื่อนที่ใช้แหล่งจ่ายไฟ 2 ชุด สำหรับมอเตอร์ 4 เฟส

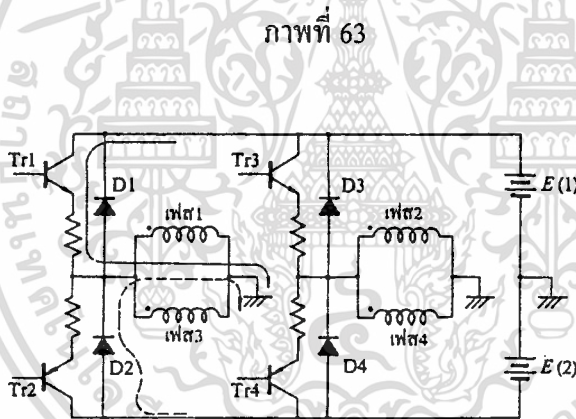
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรขับแบบบริดจ์

วงจรขับแบบบริดจ์เป็นวงจรที่มีประสิทธิภาพสูง เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรขับแบบยูนิโพลาร์ที่ผ่านมา เนื่องจากมีลักษณะการขับแบบไบโพลาร์ที่ทุกเฟสของมอเตอร์กระแสจะสามารถไหลได้ทั้ง 2 ทิศทาง วงจรขับแบบบริดจ์มีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะ ลักษณะแรกดังแสดงในภาพที่ 63 ซึ่งสามารถสรุปลักษณะการทำงานและหน้าที่ของวงจรได้ดังนี้

1. ถ้าสแต็ปป์มอเตอร์มี 8 ขั้ว ที่มีลักษณะแยกอิสระออกจากกัน ถูกต่อให้มีลักษณะดังในภาพที่ 63 แล้ว ขั้วของขดลวดเฟส 1 และ เฟส 3 จะมีลักษณะเหมือนกันตลอดเมื่อมีกระแสไหลผ่านไม่ว่าทิศทางใด ดังนั้นในกรณีนี้สแต็ปป์มอเตอร์จะทำงานในลักษณะของมอเตอร์ 2 เฟส

2. เพื่อป้องกันความเสียหายอันเนื่องมาจากการทำงานในเวลาเดียวกันของทรานซิสเตอร์ 2 ตัว เช่น TR1 และ TR2 หรือ TR3 และ TR4 จำเป็นจะต้องมีวงจรหน่วงเวลา ซึ่งในตัวอย่างใช้อุปกรณ์ความต้านทานต่อเพิ่มเข้าไปดังแสดงในรูป



แสดงวงจรขับแบบบริดจ์

3. ไดโอดชัฟเฟรสเซอร์ ไดโอดที่ต่อขนานกับทรานซิสเตอร์จะทำหน้าที่ลดแรงดันสไปค์ (spike voltage) อันเนื่องมาจากทรานซิสเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งเปิดวงจร และยังคงมีหน้าที่ต่างไปจากในวงจรขับแบบยูนิโพลาร์อีก กล่าวคือ ถ้า TR1 กำลังนำกระแสทิศทางของกระแสจะมีทิศทางดังถูกสรเส้นที่บในรูป 63 ทันทีที่ TR1 หยุดทำงาน และ TR2 ทำงาน กระแสในขดลวดไม่ไหลกลับแต่ยังจะไหลวนผ่าน D2 ไปยังแหล่งจ่ายไฟ E(2) ซึ่งแสดงทิศทางของถูกสรเส้นประในรูป ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า กระแสจากขั้วลบของ E(2) ถูกจ่ายออกมาหรืออีกนัยหนึ่งเป็นการเก็บประจุ (charge) ให้กับแบตเตอรี่หรือพลังงานจากสนามแม่เหล็กจ่ายกลับคืนไปยังแหล่งจ่ายไฟ ต่างกับการพันแบบยูนิโพลาร์ที่พลังงาน

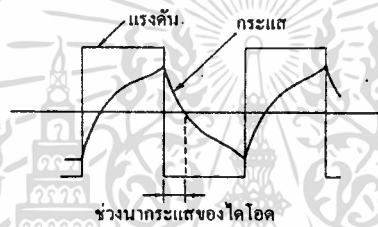
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นี้จะสูญเสียไปกับอุปกรณ์ภายในวงจรเช่น ขดลวด, ไดโอด และอุปกรณ์ค่าความต้านทาน ซึ่งเป็นข้อดีของวงจรขับแบบบริดจ์นี้

4. การเปลี่ยนทิศทางของกระแสในขดลวดของมอเตอร์

ในการขับแบบยูนิโพลาร์ หลังจากที่ทำทรานซิสเตอร์หยุดทำงาน จะใช้อุปกรณ์ซัพเพรสเซอร์ลดกระแสไหลวนที่เกิดขึ้น ส่วนในกรณีของการขับแบบไบโพลาร์นี้ จะจ่ายแรงดันอันหนึ่งเพื่อให้กระแสไหลกลับทาง กล่าวคือ หลังจากทีกระแสดังแสดงด้วยเส้นประในรูปกลายเป็นศูนย์ กระแสอีกอันหนึ่งจะเกิดขึ้นผ่าน TR2 ในทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันตกคร่อมที่ขดลวดแสดงดังในภาพที่ 64

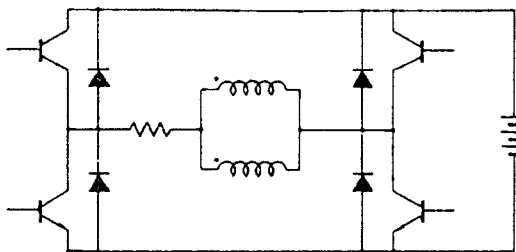
ภาพที่ 64



แสดงลักษณะแรงดันและกระแสของวงจรขับแบบไบโพลาร์

วงจรขับแบบบริดจ์ในอีกลักษณะหนึ่งแสดงดังภาพที่ 65 ซึ่งในลักษณะนี้จะใช้แหล่งจ่ายไฟ 1 ชุด แต่จะต้องใช้อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ถึง 4 ตัวในแต่ละเฟส ตัวความต้านทานที่ต่อกับขดลวดเพื่อลดเวลาของกระแสบิลด์อัฟในวงจรนี้คงต้องการอุปกรณ์หรือตัวความต้านทาน เพื่อป้องกันการทำงานในเวลาเดียวกันของทรานซิสเตอร์

ภาพที่ 65



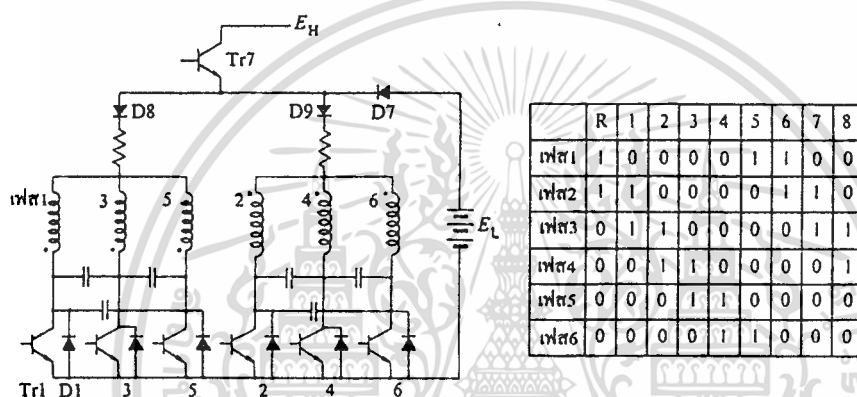
แสดงอีกลักษณะหนึ่งของวงจรขับแบบบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรขับสำหรับมอเตอร์ 3 เฟสชนิด VR ที่มีลักษณะการพันแบบ ไบฟีลาร์

ลักษณะของวงจรขับสำหรับ VR สเต็ปป์มอเตอร์ 3 เฟส ที่มีลักษณะการพันแบบ ไบฟีลาร์ แสดงดังในภาพที่ 66 ดังมีลักษณะการทำงานดังต่อไปนี้

ภาพที่ 66



แสดงวงจรขับสำหรับ VR สเต็ปป์มอเตอร์ 3 เฟส ที่มีลักษณะการพันแบบ ไบฟีลาร์

1. ในสภาวะเริ่มต้น (R) ดังตารางในภาพที่ 66 ขดลวดเฟสที่ 1 และ 2 กำลังทำงาน จากนั้นในสภาวะต่อไปเมื่อมีสัญญาณพัลส์ควบคุมเข้ามาเฟส 1 จะหยุดทำงานและเฟส 3 จะทำงานแทน ในขณะที่เฟส 2 ยังคงทำงานอยู่ในช่วงเวลาของการเปลี่ยนสภาวะ (Transition period) พลังงานแม่เหล็กจากเฟส 1 จะถูกปล่อยออกมา แต่เนื่องจากเฟส 1 และเฟส 4 พันอยู่ในลักษณะไบฟีลาร์ ดังนั้นกระแสจึงไหลขึ้นไปผ่านขดลวดของเฟสที่ 4 และไดโอด D4 โดยกระแสนี้จะไหลวนผ่านไปยัง TR2 และขดลวดเฟส 2

2. ตัวเก็บประจุที่ต่อระหว่างเฟสของมอเตอร์ เพื่อเป็นทางผ่านของกระแสรานเชียนท์ (transient current) เช่น หลังจาก TR1 หยุดทำงานและ TR3 เริ่มทำงาน กระแสรานเชียนท์จะไหลผ่านจากเฟส 1 ไปยังเฟส 3

3. ไดโอด D_8 และ D_9 ทำหน้าที่แยกชุดของขดลวดทั้ง 2 ออกจากกัน เพื่อให้ผลของมีวชวลคัพปลิง (mutual coupling) เท่านั้นที่มีผลต่อขดลวดทั้งสองชุด

4. ไดโอด D_7 ทำหน้าที่แยกแหล่งจ่ายไฟแรงดันต่ำ E_L และแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูง E_H ออกจากกันเมื่อ TR7 นำกระแสไหลสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟไปยังโหลด ในขณะที่สภาวะ off กระแสไหลวนจะมีลักษณะดังในภาพที่ 67 เนื่องจากลักษณะของแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์มีลักษณะดังในภาพที่ 67 (ก) ดังนั้นจึงเรียกวงจรประเภทนี้ว่า วงจรแบบช้อปเปอร์ (chopper) เมื่อกระแสไหลลดลงต่ำกว่าค่ากระแสที่ต้องการเพียงเล็กน้อยช่วงสภาวะ on ของทรานซิสเตอร์ TR2 จะมากกว่าสภาวะ off เพื่อเพิ่มกระแสให้กับโหลดเพียงพอ ในทางกลับกันหากกระแสไหลสูงกว่าค่าที่ต้องการ ช่วงสภาวะ off จะนานกว่าช่วงสภาวะ on เพื่อลดปริมาณกระแสของโหลดให้ต่ำลง

ค่าเฉลี่ยของแรงดันที่จ่ายให้แก่วงจรขับหรือ E_L กำหนดจากสมการดังต่อไปนี้

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

ข้อดีของวงจรขับแบบ PWM หรือช้อปเปอร์ คือใช้แหล่งจ่ายไฟเพียงชุดเดียวกำลังงานสูญเสีย น้อยและสามารถปรับแรงดันที่จ่ายให้กับโหลดได้อย่างอัตโนมัติ เพื่อให้ได้กระแส ณ ค่าพิกัดที่ ต้องการ



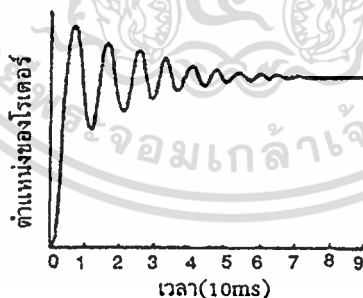
บทที่ 4

การควบคุมการทำงานของสเต็ปปีงมอเตอร์ในโหมดไมโครสเต็ป

หลักการของไมโครสเต็ปคอนโทรลเลอร์

ขนาดสเต็ปของสเต็ปปีงมอเตอร์โดยทั่วไปจะมีขนาดเล็กสุดไม่เกิน 0.5 องศาต่อสเต็ป ซึ่งบางครั้งใหญ่เกินที่จะนำไปใช้งาน เช่น ในระบบเครื่องพิมพ์ (printer), เครื่องพล็อตเตอร์ (plotter), แขนกล (robot arm) เป็นต้น ในระบบเหล่านี้เมื่อต้องการความละเอียดของขนาดสเต็ปมากขึ้นก็มักจะใช้ระบบเฟืองทด (Gearing) เข้าช่วย ยิ่งไปกว่านั้นการใช้งานสเต็ปปีงมอเตอร์ด้วยขนาดสเต็ปปกติยังเกิดปัญหาโอเวอร์ชูท (Overshoot) ของตำแหน่งการเคลื่อนที่ของตัวโรเตอร์ของมอเตอร์อีกด้วย ในภาพที่ 68 แสดงลักษณะการเกิดโอเวอร์ชูทของตำแหน่งการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ของสเต็ปปีงมอเตอร์เมื่อใช้งานด้วยขนาดสเต็ปปกติ การทำไมโครสเต็ป (Microstep) หรือมินิสเต็ป (Ministep) เป็นการเพิ่มความละเอียดของขนาดสเต็ปปกติของสเต็ปปีงมอเตอร์ให้สูงขึ้นเพื่อนำไปใช้งานในระบบที่ต้องการความละเอียดของขนาดสเต็ปสูง ลดปัญหาที่เกิดจากการใช้ระบบเฟืองทด เช่น ภาระของสเต็ปปีงมอเตอร์ (Load) ที่เพิ่มขึ้น

ภาพที่ 68

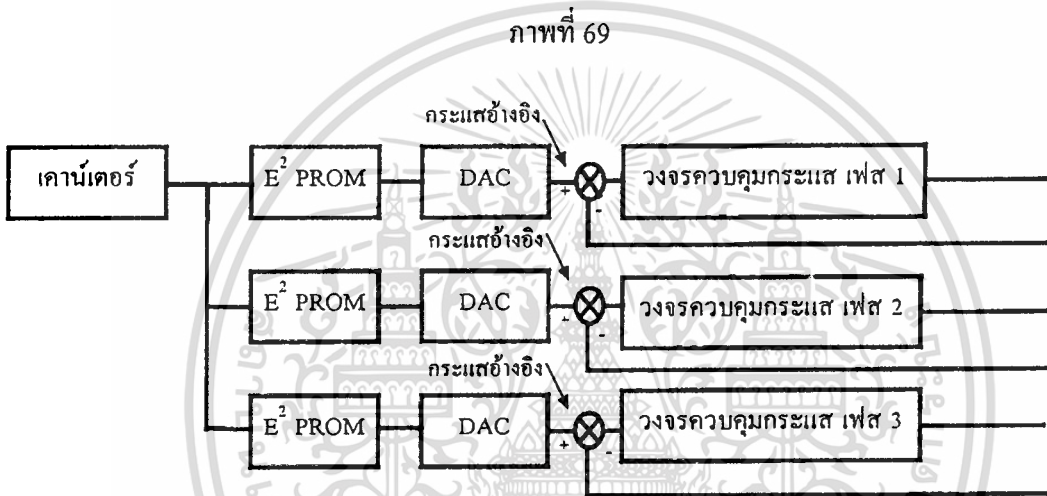


แสดงลักษณะการเกิดโอเวอร์ชูทของตำแหน่งโรเตอร์ของสเต็ปปีงมอเตอร์ เมื่อทำงาน ในขนาดสเต็ปปกติ

การใช้งานสเต็ปปีงมอเตอร์ด้วยขนาดสเต็ปปกติ ทำได้โดยการจัดลำดับการจ่ายกระแสให้แก่ขดลวดของมอเตอร์จำนวนหนึ่ง ซึ่งปกติจะเป็น 1 หรือ 2 ขด จากนั้นโรเตอร์จะหาจุดหรือเส้นทางที่มีค่าความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance path) ต่ำสุด เรียกว่าตำแหน่งดีเทนท์ (Detent position) ดังแสดงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในภาพที่ 69 ปริมาณของกระแสที่จ่ายให้แก่แต่ละเฟสนั้นโดยมากมักมีค่าคงที่ที่ค่าพิกัด (rated value) ของมอเตอร์นั้นๆ และขนาดของสเต็ปจะถูกกำหนดโดยลักษณะโครงสร้างของมอเตอร์นั้นๆ เพื่อที่จะทำไมโครสเต็ปจะต้องทำการควบคุมการจ่ายปริมาณกระแสให้แก่ขดลวดของมอเตอร์ 2 เฟสหรือมากกว่าในเวลาเดียวกันด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดตำแหน่งดีเทนท์ที่ใหม่ย่อยๆ ขึ้นอีกในระหว่างตำแหน่งดีเทนท์ปกติ ดังนั้นส่วนสำคัญของระบบไมโครสเต็ปคือ ส่วนควบคุมการจ่ายกระแส (Current controller) ของขดลวดแต่ละเฟสของสเต็ปมอเตอร์ ในภาพที่ 69 แสดงหลักการของไมโครสเต็ปของสเต็ปมอเตอร์ชนิด 3 เฟส ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนสร้างกระแสอ้างอิง (I_{ref}) และส่วนขับและควบคุมกระแสของสเต็ปมอเตอร์

ภาพที่ 69



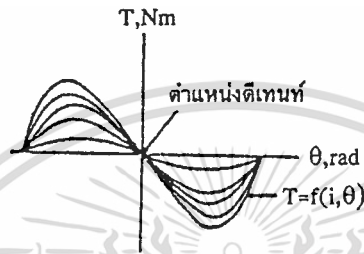
แสดงหลักการของไมโครสเต็ปสเต็ปมอเตอร์คอนโทรลเลอร์ของสเต็ปมอเตอร์ ชนิด 3 เฟส

จากรูปจะเห็นกระแสอ้างอิง (I_{ref}) ที่ต้องจ่ายให้แก่แต่ละเฟสของมอเตอร์ที่จะต้องหามาก่อนว่าค่าที่เหมาะสมที่จะให้ได้ขนาดไมโครสเต็ปตามต้องการนั้นมีค่าเป็นเท่าใด จากนั้นบันทึกลงหน่วยความจำ (E^2 PROM) และใช้วงจรนับชี้ตำแหน่ง (Address) ของหน่วยความจำนี้อ่านค่าข้อมูลของกระแสอ้างอิงในแต่ละเฟสออกมาแปลงเป็นสัญญาณควบคุมกระแสในแต่ละเฟสของมอเตอร์อีกทีหนึ่ง ซึ่งวิธีการหากระแสอ้างอิงดังกล่าวนี้มีอยู่ด้วยกันหลายวิธีดังต่อไปนี้

การคำนวณหากระแสอ้างอิงในโหมดไมโครสเต็ปจากกราฟคุณลักษณะ T- θ ของมอเตอร์

ลักษณะของแรงบิด (Torque, T) ของสเต็ปปีงมอเตอร์รอบตำแหน่งดีเทนท์ จะมีความสัมพันธ์กับกระแส (i) และตำแหน่งเชิงมุม (θ) ดังแสดงในภาพที่ 70 ดังนี้

ภาพที่ 70



แสดงกราฟคุณลักษณะแรงบิด T- θ ของสเต็ปปีงมอเตอร์

$$T = f(i, \theta) \quad (4.1)$$

ถ้าจัดสมการของแรงบิด T ให้อยู่ในรูปของตัวแปรเพียงหนึ่งตัวจะได้

$$T = f_i(i), \text{ เมื่อให้ } \theta \text{ คงที่} \quad (4.2)$$

และ

$$T = f_\theta(\theta), \text{ เมื่อให้ } i \text{ คงที่} \quad (4.3)$$

ถ้าตำแหน่งดีเทนท์ที่ต้องการอยู่ที่มุม $n(\theta_s/m)$ โดยที่ m คือจำนวนที่จะแบ่งขนาดสเต็ปปกติ θ_s เป็นสเต็ปย่อยๆ และ n คือจำนวนจริง 1,2,3... กระแสอ้างอิง (i_x) สำหรับแต่ละ n จะคำนวณได้จากสมการที่ (4.2) และ (4.3) โดยแรงบิดที่จุดดีเทนท์ที่ต้องการมีค่าเท่ากับศูนย์โดยที่ K คือจำนวนเฟสของมอเตอร์ภายใต้เงื่อนไขต่อไปนี้

1) คุณสมบัติของแรงบิดที่เกิดขึ้นของมอเตอร์ที่ใช้ อันเนื่องมาจากผลรวมของกระแสในแต่ละเฟสเมื่อทำงานในโหมดไมโครสเต็ปจะมีค่าคงเดิม เมื่อเทียบกับสเต็ปปีงมอเตอร์ที่ทำงานในโหมดปกติ

2) ผลรวมของกำลังสูญเสียของมอเตอร์ จะต้องไม่เกินค่าพิคคของมอเตอร์

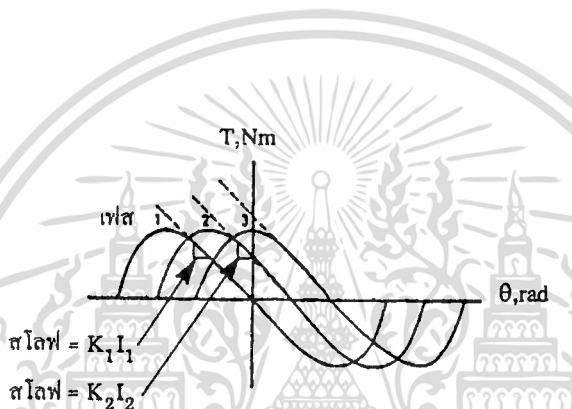
3) ขนาดของไมโครสเต็ปทุกสเต็ปจะต้องมีขนาดเท่ากัน

ในเงื่อนไขที่ 3 มีลักษณะเชิงเส้นทุกๆ ตำแหน่งของโรเตอร์ และเงื่อนไขที่ 2 สามารถแทนได้ด้วยสมการในรูปของสมการเชิงเส้น(Linear) และสมการซายน์(Sinusoids) แล้วสามารถที่จะหากระแสอ้างอิงได้ดังวิธีต่อไปนี้

การคำนวณหากระแสอ้างอิง โดยการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ในลักษณะเชิงเส้น

ในการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ด้วยสมการเส้นแสดงดังภาพที่ 71 สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

ภาพที่ 71



แสดงการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเต็ปป์มอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้น

$$T = K_1 I_1 \theta \quad (4.4)$$

$$T = K_2 I_2 \theta + K_0 I_2 \quad (4.5)$$

โดยที่ I_1 และ I_2 คือ กระแสของขดลวดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ส่วนค่า K_1 คือ ค่าแรงบิดคงที่ของเฟสที่ 1 และ K_0, K_2 คือค่าแรงบิดคงที่ของเฟสที่ 2 ที่ตำแหน่งไมโครสเต็ป θ ที่ต้องการ T_1 และ T_2 จะต้องให้ผลรวมของแรงบิดเท่ากับศูนย์นั้น คือ

$$T_1 + T_2 = 0 \quad (4.6)$$

รวมสมการ (4.4), (4.5) และ (4.6) เข้าด้วยกันจะได้

$$\theta = \frac{K_0 I_2}{K_1 I_1 + K_2 I_2} \quad (4.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าประมาณให้กราฟคุณลักษณะของแต่ละเฟสมีค่าเท่ากัน แล้ว $K_1=K_2$ และค่าความชันของเคิร์ฟ T- θ ของมอเตอร์ที่ตำแหน่งใหม่จะต้องเท่ากับเคิร์ฟ T- θ เดิม นั่นคือ

$$\frac{d(T_1+T_2)}{d\theta} = -K_1 = -K_2 = -K \quad (4.8)$$

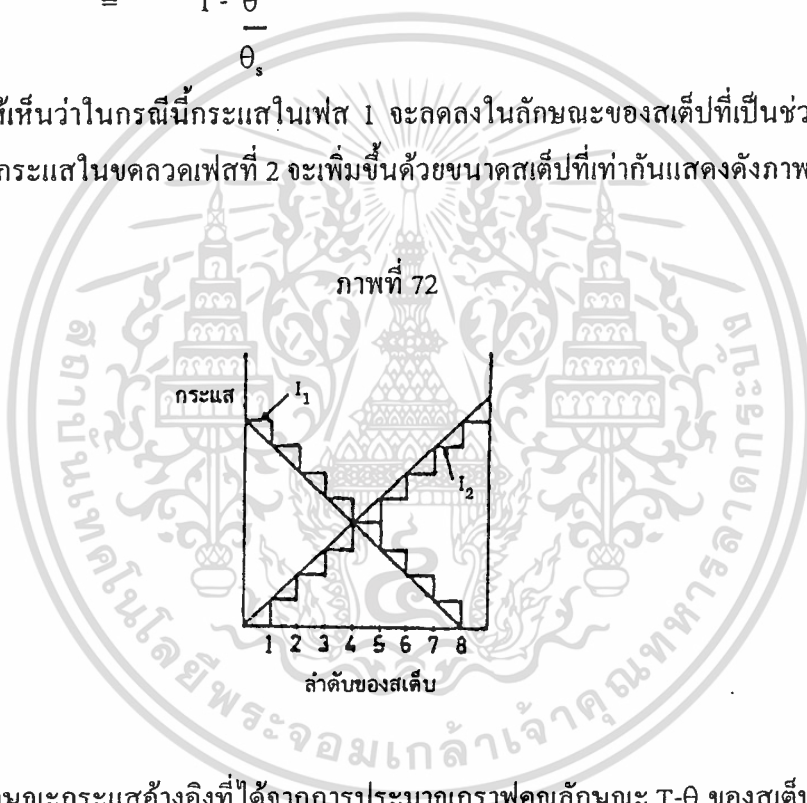
ดังนั้นสมการที่ 4.8 จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อ

$$I_1+I_2 = 1 \quad (4.9)$$

$$\text{ดังนั้นจะได้ } \theta = \frac{K_0 I_2}{K} \quad (4.10)$$

$$\text{และจะได้ } I_1 = 1 - \frac{\theta}{\theta_s} \quad (4.11)$$

แสดงให้เห็นว่าในกรณีนี้กระแสในเฟส 1 จะลดลงในลักษณะของสเต็ปที่เป็นช่วงๆ (Discrete Step) ในขณะที่กระแสในขดลวดเฟสที่ 2 จะเพิ่มขึ้นด้วยขนาดสเต็ปที่เท่ากันแสดงดังภาพที่ 72



แสดงลักษณะกระแสอ้างอิงที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเต็ปึงมอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้น

การคำนวณหากระแสอ้างอิงโดยการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของมอเตอร์ด้วยค่าชานัน์

จากภาพที่ 71 สามารถที่จะประมาณเคิร์ฟ T- θ ได้ด้วยค่าชานัน์ดังนี้

$$T_1 = -T_0 I_1 \sin \theta \quad (4.12)$$

$$T_2 = T_0 I_2 \sin (\theta + \theta_s) \quad (4.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ $T_1 + T_2 = 0$ ที่จุดไมโครสแต็ปดีเทนท์ จะได้

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\tan \theta}{\tan \theta \cos \theta_s + \sin \theta_s} \quad (4.14)$$

เพื่อที่จะคงคุณลักษณะของเคิร์ฟ T- θ เมื่อทำงานในโหมดไมโครสแต็ป จึงกำหนดให้แรงบิดที่ตำแหน่งใดๆ ของไมโครสแต็ปจากหลายๆ จุดมีค่าเท่ากับ T_1 หรือ T_2 ดังนั้นจะได้

$$T_0 T_2 \sin(\theta' + \theta_s) - T_0 I_0 \sin \theta' = T_0 \sin \frac{\theta_s}{m} \quad (4.15)$$

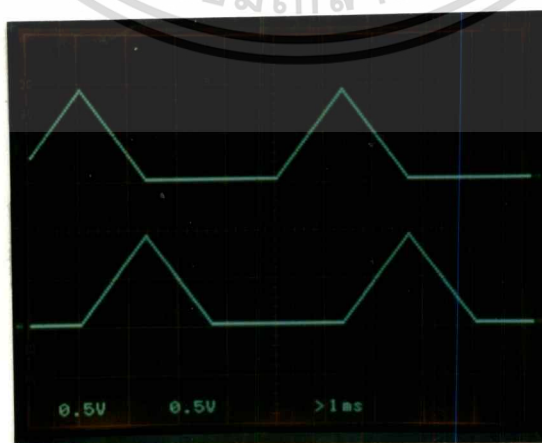
$$\text{โดยที่ } \theta' = \frac{\theta - \theta_s}{m} \text{ และ } m = 1, 2, 3, \dots$$

เมื่อรวมสมการที่ (4.14) และ (4.15) เข้าด้วยกันจะได้

$$I_1 = \frac{\sin(\theta_s/m)}{\frac{\tan \theta}{\tan \theta \cos \theta_s + \sin \theta_s} \sin(\theta' + \theta_s) - \sin \theta'} \quad (4.16)$$

จากสมการที่ (4.14) และ (4.16) สามารถที่จะหา I_1 และ I_2 ทุกๆ ตำแหน่งดีเทนท์ที่ต้องการได้ เมื่อได้ค่ากระแสอ้างอิงที่คำนวณได้เหล่านี้แล้ว จากนั้นจะถูกแปลงเป็นค่าทางเชิงเลข (digital) และเก็บไว้ใน E²PROM ดังในรูป 70 ต่อไป ในภาพที่ 73 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะสัญญาณอ้างอิงที่ได้จากการประมาณค่ากราฟคุณลักษณะ T- θ ของสแต็ปปีงมอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้นและสมการชายน

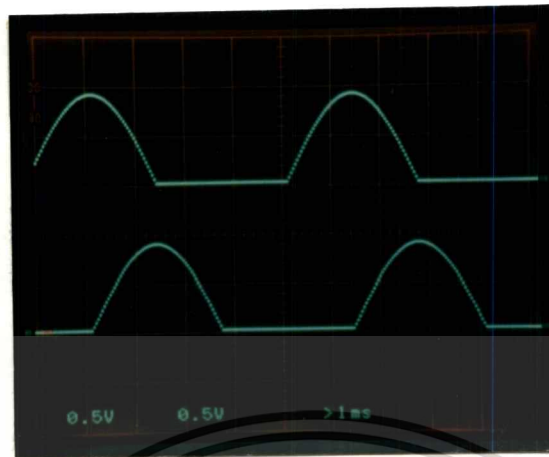
ภาพที่ 73



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 73(ต่อ)



(ข)

แสดงลักษณะสัญญาณที่ได้จากการคำนวณโดยการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ โดย (ก) สัญญาณกระแสอ้างอิงแบบลิเนียร์ และ (ข) สัญญาณกระแสอ้างอิงแบบรูปคลื่นชานซ์

วิธีการหากระแสอ้างอิงด้วยวิธีทดสอบโดยตรงโดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์

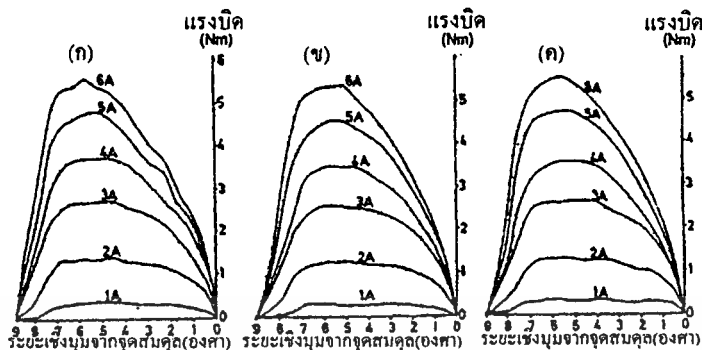
การคำนวณทั้ง 2 แบบที่ผ่านมานั้นคือ การประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ด้วยสมการเชิงเส้น และสมการชานซ์เพื่อใช้หาค่ากระแสอ้างอิงในแต่ละเฟสก่อนข้างหายากเกินไป อันเนื่องมาจากสาเหตุดังต่อไปนี้

1. เป็นการประมาณ โดยการสมมติให้วงจรแม่เหล็กอยู่ในลักษณะเชิงเส้น
2. กราฟคุณลักษณะ T- θ ของแต่ละเฟสสมมติให้มีลักษณะเหมือนกัน
3. เป็นการประมาณเคิร์ฟ T- θ โดยการประมาณเดียวกันตลอดทั้งเคิร์ฟ

ในภาพที่ 74 (ก) - (ค) แสดงตัวอย่างลักษณะของกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเต็ปป์มอเตอร์ที่เกิดขึ้นจริงในแต่ละเฟส จะเห็นว่า ไม่เหมาะที่จะประมาณด้วยสมการธรรมดาๆ เนื่องจากมีลักษณะไม่เชิงเส้น และไม่เหมือนกันในแต่ละเฟส ดังนั้นเมื่อใช้การประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ด้วยวิธีที่กล่าวมา จึงให้ขนาดไมโครสเต็ปที่ได้ไม่เที่ยงตรงเท่าที่ควร เพื่อจะขจัดปัญหาในลักษณะไม่เชิงเส้นนี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์และไมโครโปรเซสเซอร์เข้ามาช่วยโดยใช้วิธีทดสอบโดยตรง เพื่อช่วยในการหากระแสอ้างอิงในดังแสดงหลักการในภาพที่ 75

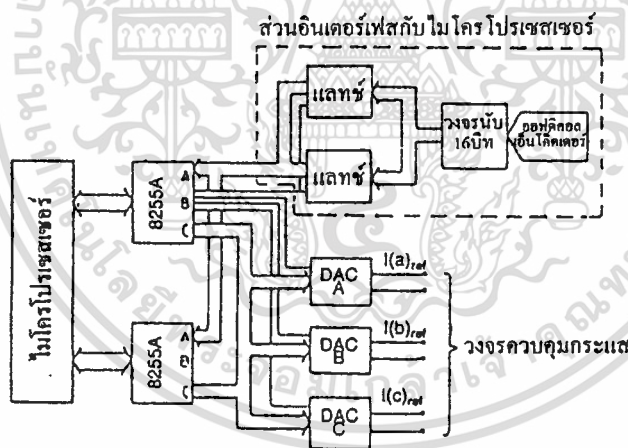
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 74



แสดงตัวอย่างลักษณะของกราฟคุณลักษณะ T-θ ของสเต็ปปีงมอเตอร์ที่เกิดขึ้นจริงในแต่ละเฟส (ก) เฟสที่ 1 (ข) เฟสที่ 2 และ (ค) เฟสที่ 3

ภาพที่ 75

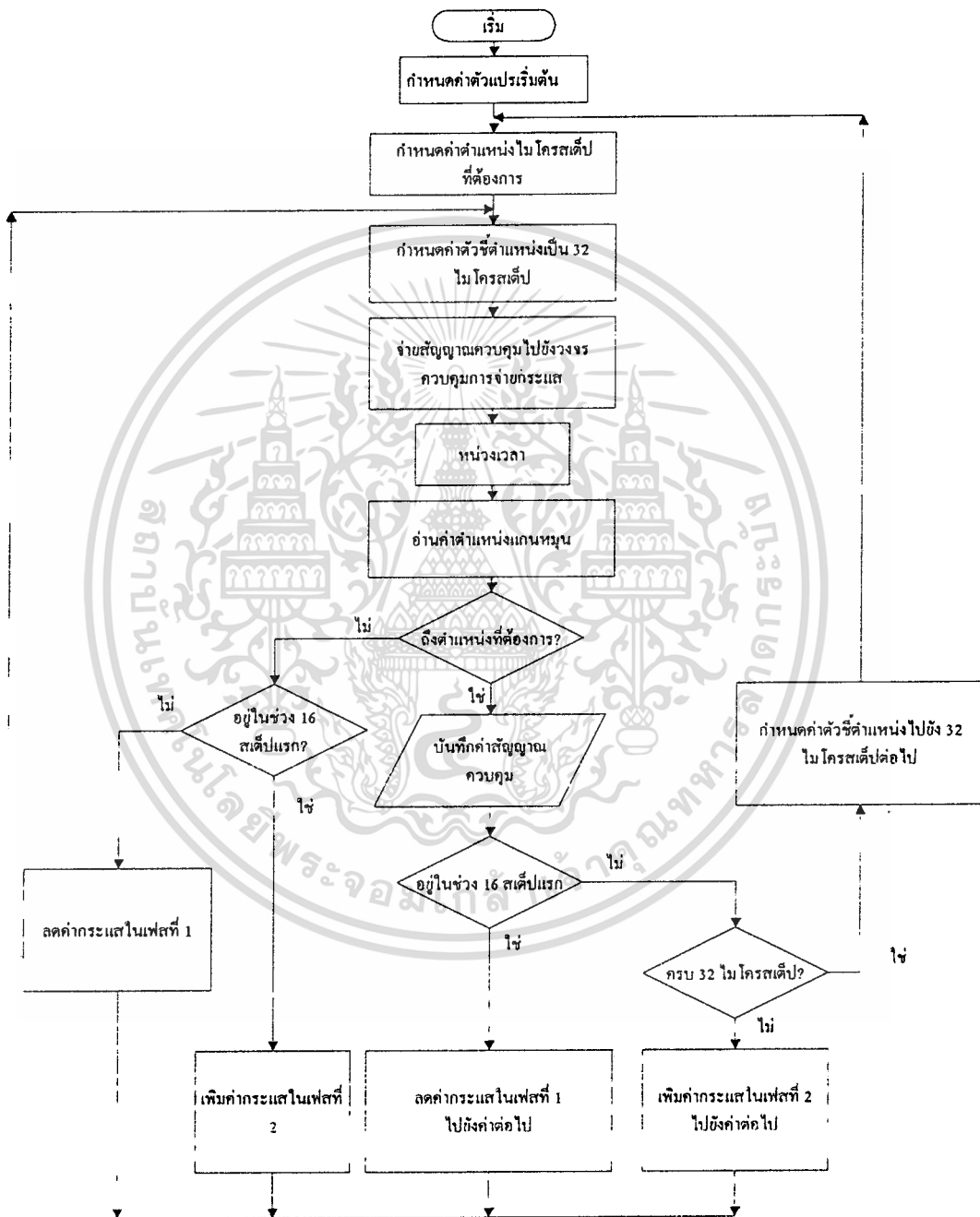


บล็อกไดอะแกรมแสดงหลักการของวิธีทดสอบโดยตรง

ในส่วนของวงจรในภาพที่ 75 นี้ จะถูกใส่เข้าไปในส่วนของหน่วยความจำ E²PROM และส่วนวงจรนับในวงจรภาพที่ 74 ไมโครโปรเซสเซอร์จะเป็นตัวจ่ายกระแสอ้างอิงไปยังวงจรแปลงสัญญาณทางดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก (DAC) และ โดยการให้การป้อนกลับจากออฟดีคอดเอ็นโค้ดเดอร์มายังไมโครโปรเซสเซอร์ เพื่อตรวจสอบตำแหน่งของโรเตอร์โดยใช้โปรแกรมที่มีหลักการดังแสดงในโพลวาร์ทภาพที่ 76 โดยโปรแกรมที่ใช้ทดสอบหากระแสหรือแรงดันอ้างอิงนี้จะอาศัยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรไฟล์ของสัญญาณในการขับสตีปปี้งมอเตอร์ดังในภาพที่ 77 ซึ่งมีรายละเอียดของวิธีทดสอบโดยตรงดังต่อไปนี้

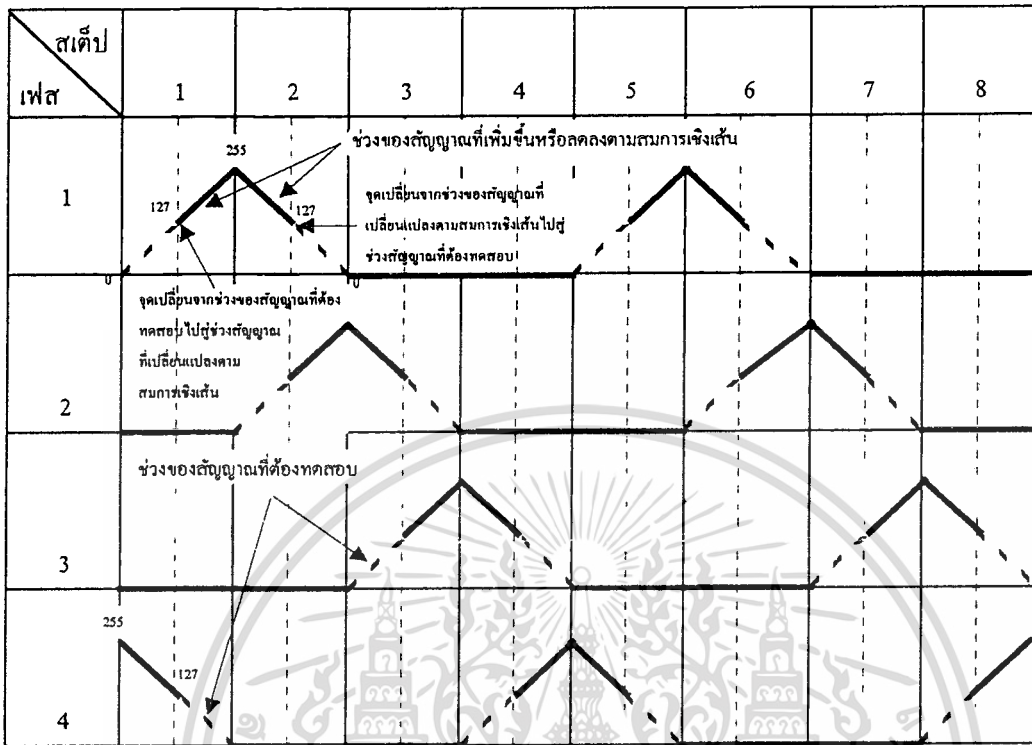
ภาพที่ 76



แสดงโฟลวชาร์ทของโปรแกรมที่ใช้ในการหากระแสอ้างอิงด้วยวิธีทดสอบโดยตรง เมื่อต้องการจำนวนไมโครสตีป 32 สตีป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 77



แสดงโปรไฟล์ของสัญญาณควบคุมการขับในแต่ละเฟส เพื่อหากระแสอ้างอิง โดย
 ——— แทนช่วงกระแสที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามสมการเชิงเส้น
 แทนช่วงกระแสอ้างอิงที่ต้องการทดสอบ
 0 - 255 แทนระดับของสัญญาณดิจิทัลที่ควบคุมกระแสในแต่ละเฟส

การหาสัญญาณอ้างอิงเพื่อใช้ขับสเต็ปปิ้งมอเตอร์ให้ทำงานในโหมดไมโครสเต็ปโดยวิธีทดสอบโดยตรงนั้น จะเริ่มด้วยการกำหนดจำนวนไมโครสเต็ปที่ต้องการ ดังเช่นในโพลวซาร์ทภาพที่ 76 กำหนดจำนวนไมโครสเต็ปเท่ากับ 32 จากนั้นกำหนดชุดของเฟสที่ต้องการทดสอบหาค่าสัญญาณอ้างอิง เช่น ในสเต็ปปิ้งมอเตอร์ชนิด 4 เฟส ชุดของเฟสที่ต้องการทดสอบคือเฟส 1-2-2-3-3-4 และ 4-1 ตามลำดับ เพื่อความสะดวกต่อการทดสอบแล้วจะแบ่งจำนวนไมโครสเต็ปทั้งหมดที่ต้องการเป็น 2 ส่วนคือ 16 สเต็ปแรกและ 16 สเต็ปหลัง โดยใน 16 สเต็ปแรกนั้นจะเลือกค่ากระแสในขดลวดเฟสแรกเท่ากับค่าพีคคของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ (ระดับสัญญาณทางดิจิทัลเท่ากับ 255) จากนั้นค่อยๆ เพิ่มค่ากระแสหรือลดค่ากระแสในขดลวดเฟสที่ 2 (เปลี่ยนแปลงสเต็ปละ 1) จนกระทั่งโรเตอร์เคลื่อนมายังตำแหน่งไมโครสเต็ปแรกที่ต้องการ จากนั้นบันทึกค่ากระแสในขดลวดเฟสแรกและเฟสที่สองลงในหน่วยความจำ ในไมโครสเต็ปที่สองค่าของกระแสในเฟสแรกจะลดลงด้วยค่าคงที่แน่นอนซึ่งจะไปตามสมการเชิงเส้น เช่น ในตัวอย่างนี้เมื่อต้องจำนวนไมโครสเต็ปเท่ากับ 32 สเต็ปการลดลงที่เป็นไปเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามสมการเชิงเส้นจะเท่ากับ $256/32 = 8$ ดังนั้นไมโครสเต็ปที่สองนี้ระดับสัญญาณควบคุมกระแสของเฟสแรกจะลดลงเป็น $255-8 = 247$ จากนั้นจะทำงานเช่นเดียวกับในไมโครสเต็ปแรกคือ ค่อยๆ เพิ่มหรือลดค่ากระแสในเฟสที่สองจนแกนหมุนเคลื่อนที่มายังตำแหน่งไมโครสเต็ปที่สองที่ต้องการ ทำการบันทึค่ากระแสของทั้งสองเฟสที่ได้ ทำเช่นนี้จนครบครั้งแรกของจำนวนไมโครสเต็ปทั้งหมดที่ต้องการ โดยลักษณะของกระแสในเฟสแรกนั้นจะลดลงด้วยค่าคงที่ที่แน่นอนตามสมการเชิงเส้น และกระแสในเฟสที่สองจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงด้วยสเต็ปที่ละเอียดกว่าในเฟสแรก ดังจะสังเกตลักษณะของสัญญาณทั้งสองได้ในโปรไฟล์ในภาพที่ 77 โดยเส้นที่บิรูปจะแทนด้วยสัญญาณกระแสในเฟสแรก ในช่วงที่ลดลงด้วยสมการเชิงเส้น ส่วนเส้นประแทนกระแสในเฟสที่สองที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงด้วยสเต็ปที่ละเอียดกว่า หรือเป็นกระแสที่ได้จากการทดสอบนั่นเอง ทำเช่นนี้จนครบครั้งแรกของจำนวนไมโครสเต็ปทั้งหมดที่ต้องการ

ส่วนในครึ่งหลังของจำนวนไมโครสเต็ปที่ต้องการทั้งหมด จะทำในลักษณะตรงกันข้ามกับครั้งแรกของจำนวนไมโครสเต็ปทั้งหมด กล่าวคือ จะควบคุมให้กระแสในเฟสที่สองเพิ่มขึ้นด้วยค่าที่แน่นอนตามสมการเชิงเส้น(เพิ่มขึ้นจาก 0 สเต็ปละ 8 สำหรับตัวอย่างนี้) และเฟสแรกจะค่อยๆ ลดลงด้วยค่าที่ละเอียดกว่า(สเต็ปละ 1) เมื่อครบจำนวนไมโครสเต็ปที่ต้องการแล้วจึงเลื่อนไปทำยังชุดของเฟสอื่น 2-3, 3-4 และ 4-1 ค่อยๆ เมื่อได้ค่าสัญญาณกระแสอ้างอิงครบทุกตำแหน่งไมโครสเต็ปของทุกชุดของขดลวดแล้วจึงนำไปจับสเต็ปปีงมอเตอร์เพื่อทดสอบหาความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสเต็ปที่ได้ ดังจะกล่าวถึงต่อไป

ส่วนประกอบของระบบไมโครสเต็ปที่ออกแบบขึ้น

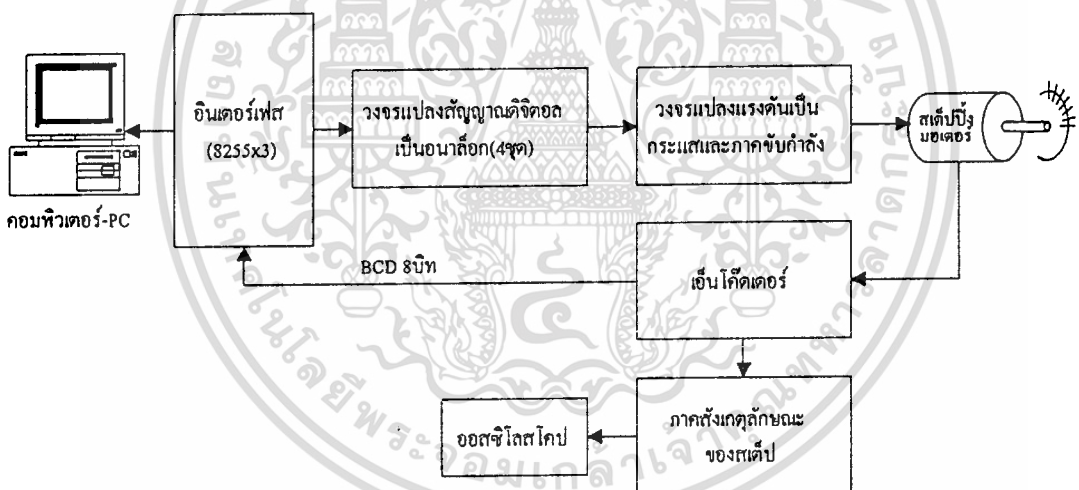
ส่วนประกอบของระบบไมโครสเต็ปที่ออกแบบขึ้น ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ส่วนไมโครคอมพิวเตอร์ (พีซี) และส่วนวงจรอินเตอร์เฟส
2. วงจรส่วนแปลงสัญญาณทางดิจิทัล เป็นอนาล็อก (DAC)
3. วงจรควบคุมการแปลงแรงดันเป็นกระแส (V TO I) และวงจรภาคขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์
4. วงจรเอ็นโค้ดเดอร์
5. วงจรสังเกตสเต็ปการเคลื่อนที่ของแกนหมุนสเต็ปปีงมอเตอร์ (Step Observer)

ระบบที่ออกแบบขึ้น ใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ในการควบคุมโปรแกรมการทำงานของระบบผ่านทางวงจรอินเตอร์เฟส มีวงจร DAC หรือวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกจำนวน 4 ชุด แต่ละชุดมีความละเอียด 8 บิต เป็นส่วนที่ทำหน้าที่รับสัญญาณควบคุมจากไมโครโปรเซสเซอร์ สัญญาณอนาล็อกทางเข้าที่พืที่ได้ของวงจรมีส่วนนี้ ส่งให้กับวงจรควบคุมกระแส (V TO I) และภาคขับเคลื่อนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังของสเต็ปป์มอเตอร์ เพื่อควบคุมปริมาณกระแสในแต่ละเฟสของสเต็ปป์มอเตอร์ให้ได้ตามต้องการ วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส และภาคขับสเต็ปป์มอเตอร์เป็นวงจรที่ใช้อุปกรณ์เพาเวอร์ ออปแอมป์ ทำงานร่วมกับเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์จำนวน 4 ชุด เพื่อใช้ขับสเต็ปป์มอเตอร์ชนิด 4 เฟส เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมปริมาณกระแสในแต่ละเฟสของสเต็ปป์มอเตอร์ที่ให้ ความละเอียดและความเป็นเชิงเส้นของกระแสทางเอาต์พุตต่อแรงดันทางอินพุตสูง ทำให้สามารถควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของสเต็ปป์มอเตอร์ได้อย่างที่ตรง วงจรภาคเอ็นโค้ดเดอร์เป็นส่วนที่ใช้วัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนหมุนของมอเตอร์ สัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ส่วนนี้อยู่ในรูปของสัญญาณ BCD จำนวน 8 ชุด ชุดละ 4 บิต สัญญาณ BCD นี้ จะส่งต่อไปยังไมโครโปรเซสเซอร์เพื่อประเมินผลและส่วนหนึ่งจะส่งให้กับ วงจรภาคสังเกตสเต็ปการเคลื่อนที่ของสเต็ป (DAC) เพื่อใช้สังเกตลักษณะไมโครสเต็ปที่ได้ ซึ่งได้แก่ ความเที่ยงตรงของขนาดสเต็ป ลักษณะความเป็นเชิงเส้นหรือสังเกตการเกิดโอเวอร์ชูทเหล่านี้ทางออกซี โลกโคปต่อไป

ภาพที่ 78



แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบไมโครสเต็ปที่ออกแบบขึ้น

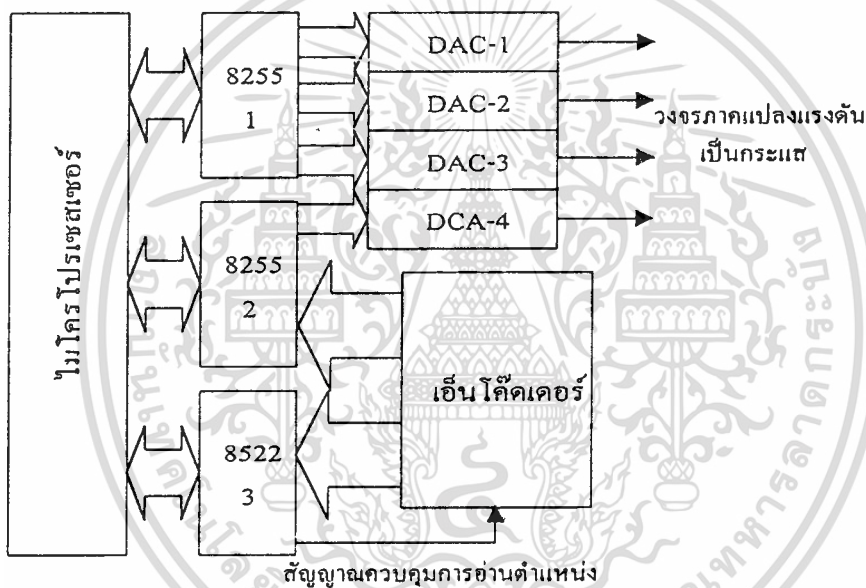
วงจรภาคอินเตอร์เฟส

เนื่องจากการควบคุมการทำงานของสเต็ปป์มอเตอร์ให้ทำงานในโหมดไมโครสเต็ปนั้น ปริมาณกระแสในแต่ละเฟสของสเต็ปป์มอเตอร์จะต้องสามารถเปลี่ยนแปลงไปหลายๆ ระดับ คือจะต้องใช้วงจรภาคแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อกถึง 4 ภาค เท่ากับจำนวนเฟสของสเต็ปป์มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกทั้งค่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์ที่ได้จากภาคเอ็นโค้ดเดอร์นั้นจะมีความละเอียดสูง นั่นคือ จะต้องใช้จำนวนพอร์ตสำหรับติดต่อกับคอมพิวเตอร์จำนวนมาก ดังจะสังเกตได้จากบล็อกไดอะแกรมในภาพที่ 80 ดังนั้นวงจรภาคอินเตอร์เฟสจะต้องมีจำนวนมากพอสำหรับใช้งานดังกล่าว ซึ่งระบบที่ใช้ในการทดลองนี้ ชุดอินเตอร์เฟสจะใช้อุปกรณ์หลักคือ ไอซี 8255 จำนวน 3 ตัว ในแต่ละตัวของไอซีนี้จะมีจำนวนพอร์ต 3 พอร์ต แต่ละพอร์ตมีขนาด 8 บิต ซึ่งสามารถแสดงระดับของสัญญาณได้ 256 ระดับ (0-255) ในหนึ่งเฟส เพียงพอต่อการใช้งานของระบบนี้ ในภาพที่ 80 แสดงวงจรภาคที่สมบูรณ์ของวงจรอินเตอร์เฟส

ภาพที่ 79



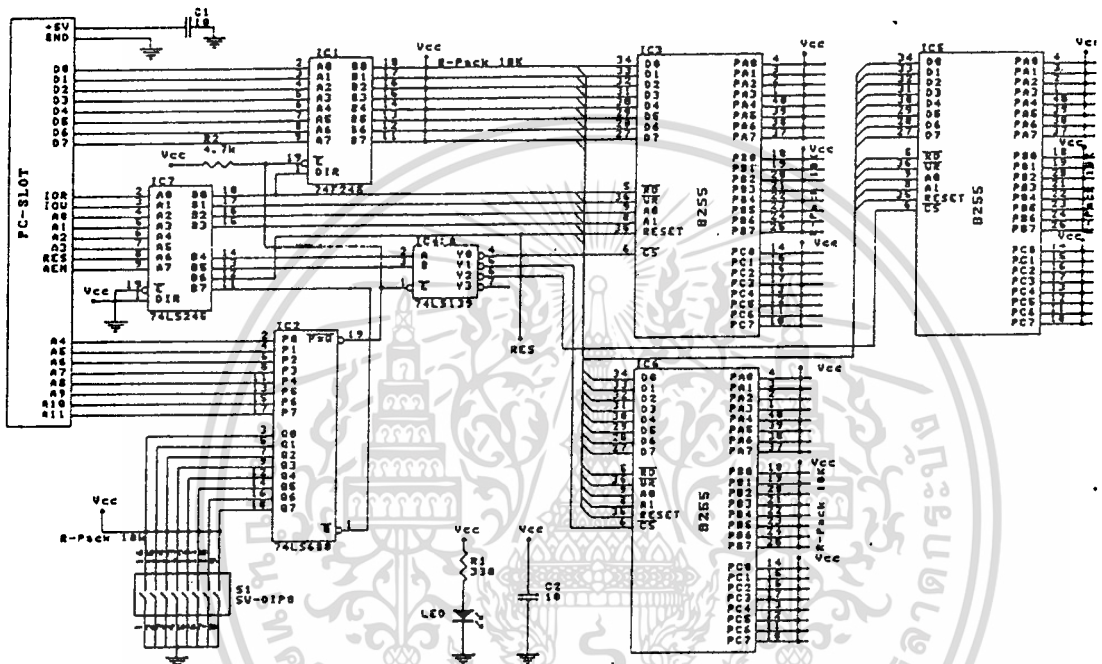
แสดงบล็อกไดอะแกรมการเชื่อมต่อระหว่างภาคอินเตอร์เฟสกับวงจรภาคอื่นๆ

วงจรภาคแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก (DAC)

วงจรส่วนนี้มีหน้าที่หลักคือแปลงสัญญาณดิจิทัลจากพอร์ตทางด้านวงจรอินเตอร์เฟส เปลี่ยนให้เป็นสัญญาณอนาล็อก เพื่อช่วยให้กับวงจรภาคเปลี่ยนสัญญาณควบคุมทางแรงดันให้เป็นสัญญาณควบคุมทางกระแส (V TO I) วงจรส่วนนี้มีด้วยกัน 4 ชุด เท่ากับจำนวนเฟสของสเต็ปปีงมอเตอร์ที่ใช้ ในแต่ละชุดจะใช้อุปกรณ์หลักคือ ไอซีที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก คือ ไอซี MC1408 เป็นไอซีที่มีความละเอียดอินพุต 8 บิต หรือสามารถแปลงสัญญาณทางดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกได้ 256 ระดับสัญญาณ (0-255 ระดับสัญญาณ) ซึ่งเพียงพอต่อการใช้ควบคุมปริมาณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

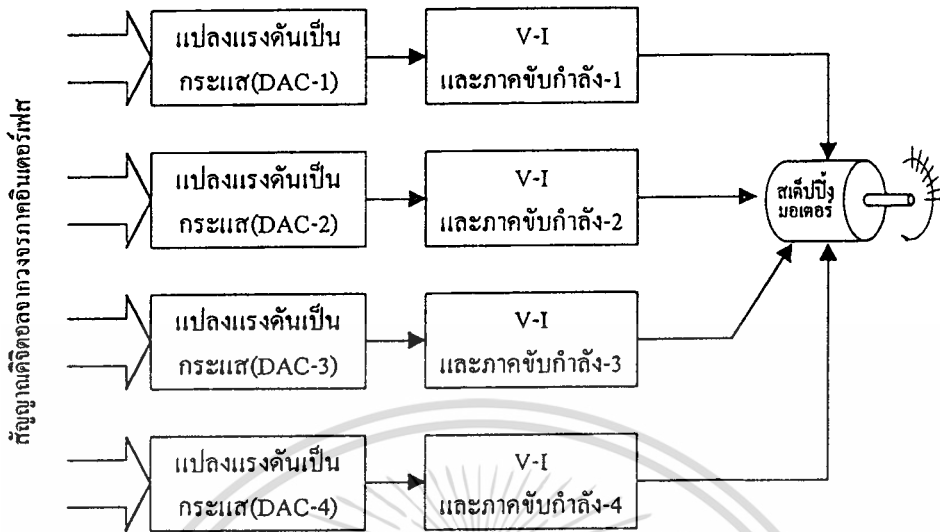
กระแสนี้แต่ละเฟสของสเต็ปมอเตอร์ อีกทั้งยังมีความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณเอาต์พุตต่อสัญญาณอินพุตสูงอีกด้วย ในภาพที่ 81 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรภาค DAC เมื่อเชื่อมต่อกับวงจรภาคอื่นๆ และในภาพที่ 82 แสดงวงจรที่สมบูรณ์ของวงจรภาค DAC (จำนวน 1 ชุด)

ภาพที่ 80



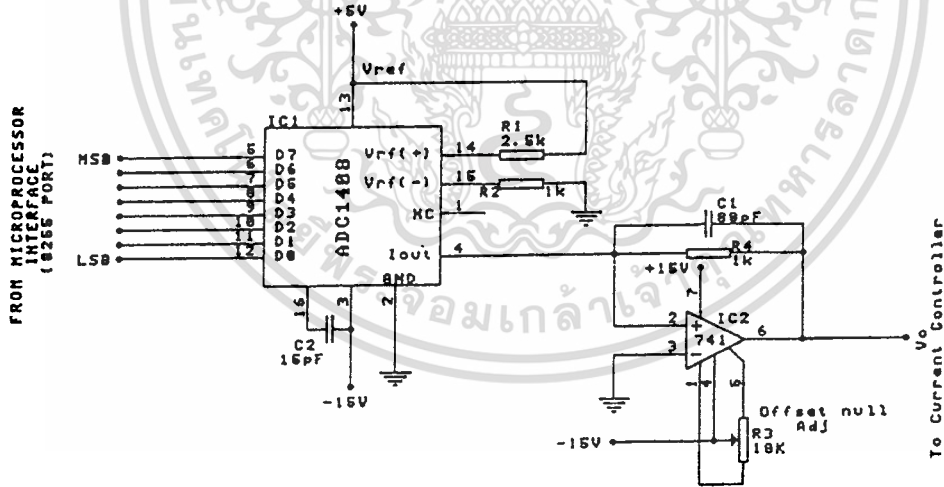
แสดงวงจรที่สมบูรณ์ของภาคอินเตอร์เฟส

ภาพที่ 81



แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรมicro DAC เมื่อเชื่อมต่อกับวงจรมอเตอร์อื่นๆ

ภาพที่ 82



แสดงวงจรมicroแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก(แสดงเพียง 1 เฟส)

จากภาพที่ 82 กระแส I_0 คือ กระแสเอาต์พุตที่ได้จาก MC1408 กระแส I_0 นี้จะขึ้นอยู่กับสภาวะ "0" หรือ "1" ของสัญญาณไบนารีทางอินพุตดังสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_0 = \frac{V_{ref}}{R_1} \left(\frac{D_7}{2} + \frac{D_6}{4} + \frac{D_5}{8} + \frac{D_4}{16} + \frac{D_3}{32} + \frac{D_2}{64} + \frac{D_1}{128} + \frac{D_0}{256} \right) \quad (4.17)$$

เมื่อ	I_0	=	กระแสเอาต์พุตของ DAC (mA)
	R_1	=	ค่าความต้านทานที่ต่อทางขา 14 ของไอซี MC1408 (k Ω)
	V_{ref}	=	ค่าแรงดันอ้างอิง (โวลต์)
	D_0 - D_7	=	สัญญาณไบนารีทางอินพุต

จากสมการดังกล่าวจะเห็นว่า กระแส I_0 จะเป็นศูนย์เมื่อสัญญาณไบนารีทางอินพุต (D_0 - D_7) มีค่าเท่ากับ “0” และในทางตรงกันข้ามกระแส I_0 นี้ จะมีค่าสูงสุดเมื่อทุกบิตทางอินพุตเป็น “1” หรือกล่าวได้ว่า กระแส I_0 นี้ ฟังก์ชันของสภาวะของสัญญาณไบนารีทางอินพุต และสามารถเปลี่ยนค่า I_0 นี้ เป็นค่าแรงดันเอาต์พุต (V_0) ได้โดยการเลือกใช้ค่า R_f ที่เหมาะสมได้ ดังนั้นวงจรนี้จะให้สัญญาณแรงดันเอาต์พุต V_0 ตามสมการ

$$V_0 = I_0 R_f \quad (4.18)$$

ตัวอย่างเมื่อใช้ $V_{ref} = 2$ โวลต์, $R_1 = 1$ k Ω และ $R_f = 2.7$ k. เราจะใช้ช่วงแรงดันเอาต์พุต 0 ถึง 5.38 โวลต์ คือ เมื่อทุกๆ บิตของไบนารีอินพุตเป็น “0” (D_0 - $D_7 = 0$) จะได้ $I_0 = 0$ หรือ $V_0 = 0$ โวลต์ และเมื่อ D_0 - D_7 ทุกบิตมีค่าเป็น “1” แล้ว

$$I_0 = \frac{2}{1K2} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{16} + \frac{1}{32} + \frac{1}{64} + \frac{1}{128} + \frac{1}{256} \right)$$

ดังนั้นจะได้ค่าเอาต์พุตโวลต์สูงสุด

$$\begin{aligned} V_0 &= I_0 R_f \\ &= (1.992 \text{ mA}) (2.7 \text{ K}\Omega) \\ &= 5.38 \text{ V} \end{aligned}$$

ดังนั้นช่วงของเอาต์พุตของวงจรจะเท่ากับ 0 ถึง 5.38 โวลต์

วงจรภาคควบคุมกระแสและขับกำลังสเต็ปปีงมอเตอร์

วงจรภาคควบคุมกระแสและขับกำลังของสเต็ปปีงมอเตอร์นี้เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดสำหรับการควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์ให้ทำงานในโหมดไมโครสเต็ป กล่าวคือ การทำงานในโหมดไมโครสเต็ปนั้น กระแสในขดลวดแต่ละเฟสของสเต็ปปีงมอเตอร์จะต้องสามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างเที่ยงตรง และมีความละเอียดและมีลักษณะเป็นเชิงเส้นที่สูง จึงจะสามารถควบคุมตำแหน่งไมโครสเต็ปได้อย่างเที่ยงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรง ภาคควบคุมกระแสจะมีอยู่ด้วยกัน 4 ชุด แยกอิสระออกจากกันเท่ากับจำนวนเฟสของสเต็ปปีงมอเตอร์ รับผิดชอบอนาล็อกจากวงจรภาคแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก เพื่อควบคุมให้ได้ปริมาณกระแสในแต่ละเฟสของสเต็ปปีงมอเตอร์ตามต้องการ แต่ละชุดจะมีอุปกรณ์หลักคือ ไอซีเพาเวอร์ออฟแอม L165 ซึ่งสามารถให้กระแสเอาท์พุทสูงถึง 3 แอมป์ และเมื่อทำงานร่วมกับอุปกรณ์เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์แล้ว สามารถนำไปใช้งานที่ต้องการกระแสสูงมากกว่า 3 แอมป์ได้ ในภาพที่ 83 วงจรควบคุมกระแสและขับเคลื่อนกำลังของสเต็ปปีงมอเตอร์

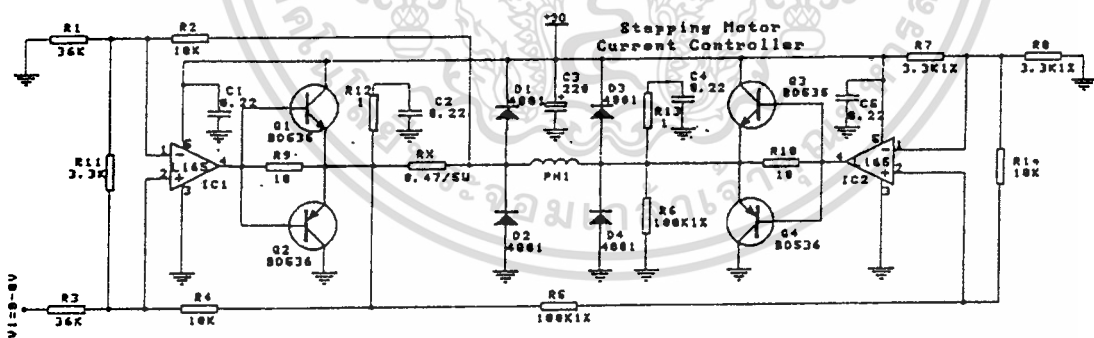
วงจรชุดนี้สามารถจ่ายกระแสเอาท์พุทได้สูงมากกว่า 3.5 แอมป์ และสัญญาณอินพุทสามารถรับได้ในช่วง 0 ถึง +8 โวลต์ สมการทรานเฟอร์ฟังก์ชันของวงจรดังนี้คือ

$$\frac{I_m}{V_i} = \frac{R_4}{R_x R_3} \quad (4.19)$$

หรือ
$$I_m = \frac{R_4}{R_x R_3} V_i \quad (4.20)$$

เมื่อ I_m = กระแสในขดลวดของสเต็ปปีงมอเตอร์
 V_i = อินพุทโวลเตจที่ได้จากภาค DAC
 R_x, R_3, R_4 = ค่าความต้านทานของอุปกรณ์ในวงจร

ภาพที่ 83



แสดงวงจรภาคควบคุมกระแสและขับเคลื่อนกำลัง (แสดงเพียง 1 ชุด)

จากวงจรที่ใช้งาน ค่า $R_4 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 36 \text{ k}\Omega$ และ $R_x = 0.47 \text{ k}\Omega$ ดังนั้นตามสมการทรานสเฟอร์ฟังก์ชันที่ 4.20 จะได้ ดังนั้นทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของวงจรชุดนี้คือ

$$I_m = (0.591) V_i \quad (4.21)$$

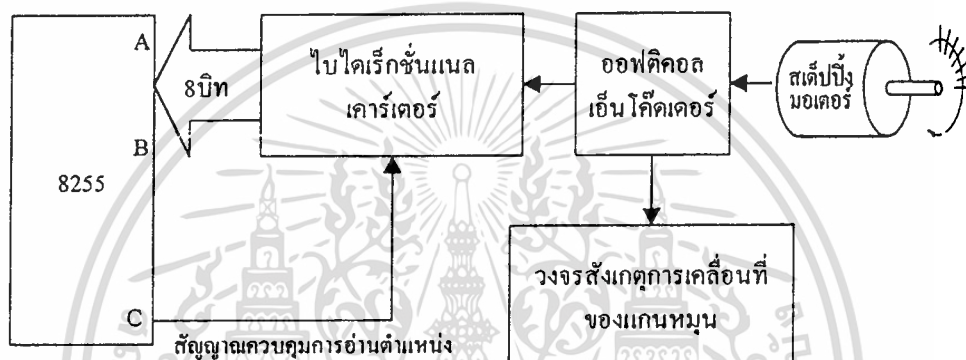
หรือ
$$V_i = (1.692) I_m \quad (4.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์

ส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งของการควบคุมการทำงานของสเต็ปปีงมอเตอร์ในโหมดไมโครสเต็ปก็คือ ส่วนของภาคตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนหมุนหรือขนาดของไมโครสเต็ป

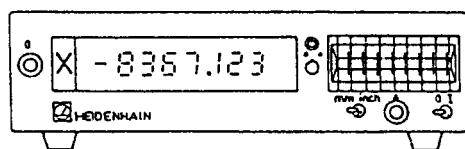
ภาพที่ 84



แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรภาคตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนหมุนสเต็ปปีงมอเตอร์

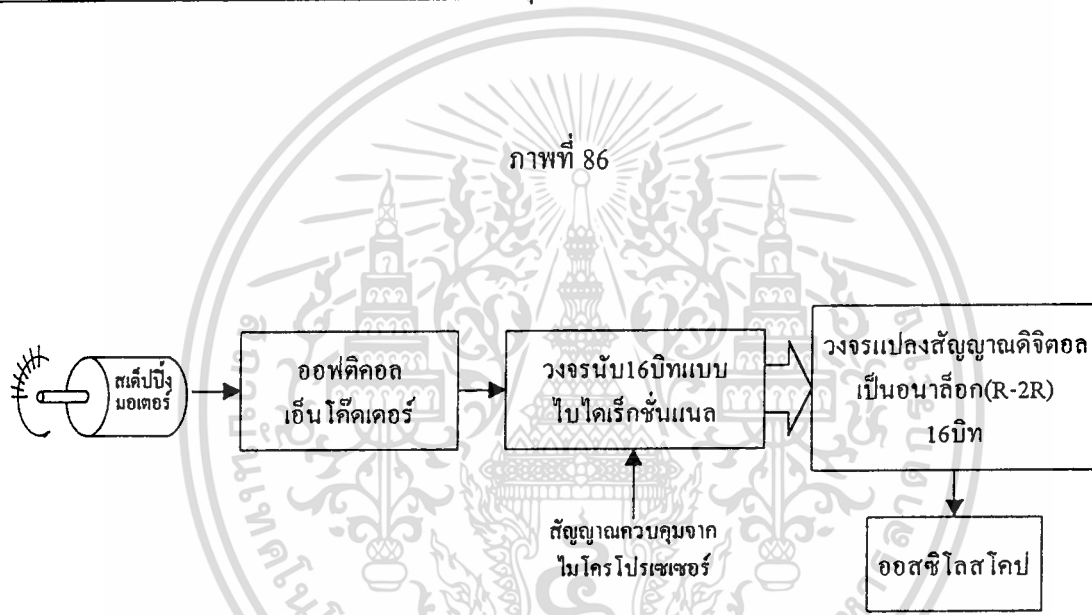
ที่ได้ ภาพที่ 84 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรในภาคนี้ ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ ออฟติคัลเอ็นโค้ดเดอร์ ซึ่งส่วนนี้จะยึดติดกับแกนของสเต็ปปีงมอเตอร์และส่วนวงจรรีเลย์แบบไปไดเร็กชันแนล ซึ่งทั้ง 2 ส่วนนี้จะป้อนข้อมูลเข้าสู่อุปกรณ์ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้เลย โดยค่าตำแหน่งของแกนหมุนที่อ่านได้จะมีความละเอียดถึง $0.1 \mu\text{m}$ ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปควบคุมใช้งาน ซึ่งนอกจากค่าตำแหน่งดังกล่าวจะสามารถสังเกตได้จากหน้าปัดของเครื่องชุดนี้แล้ว ยังสามารถอินเตอร์เฟสเข้ากับชุดของไมโครโปรเซสเซอร์ได้อีกด้วย ทำให้ง่ายต่อการนำไปใช้งาน อีกทั้งยังมีความเที่ยงตรงสูงอีกด้วย ในภาพที่ 85 แสดงไปไดเร็กชันแนลเคอร์เคเตอร์ที่นำมาประยุกต์ใช้งาน

ภาพที่ 85



แสดงไบโคเร็กซ์ันแนลเคาน์เตอร์ที่นำมาประยุกต์ใช้งาน

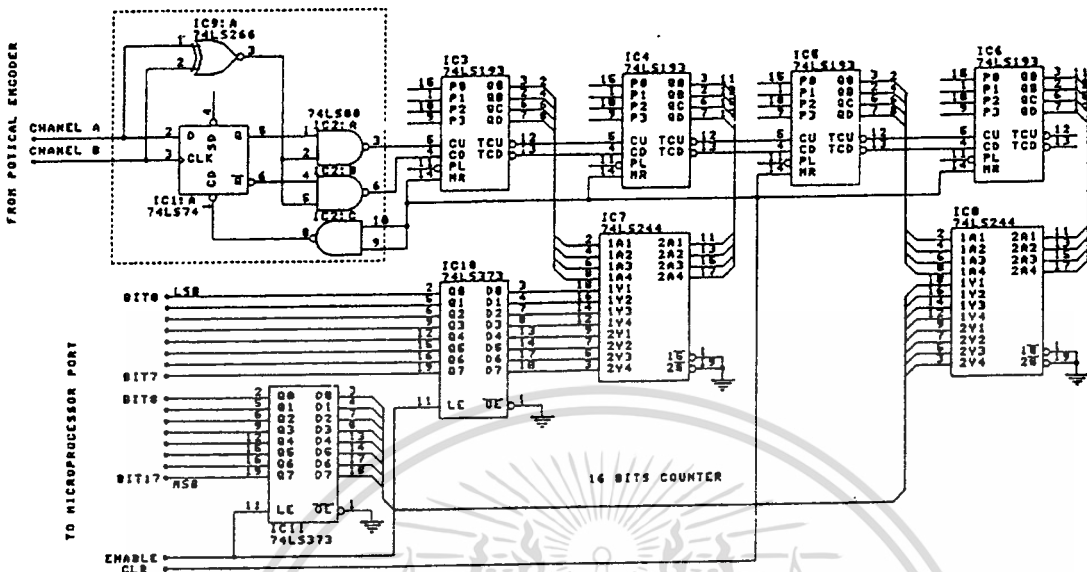
วงจรภาคสังเกตลักษณะการเคลื่อนที่ของแกนหมุนสแต็ปปีงมอเตอร์



บล็อกไดอะแกรมแสดงภาคสังเกตลักษณะของไมโครสแต็ป

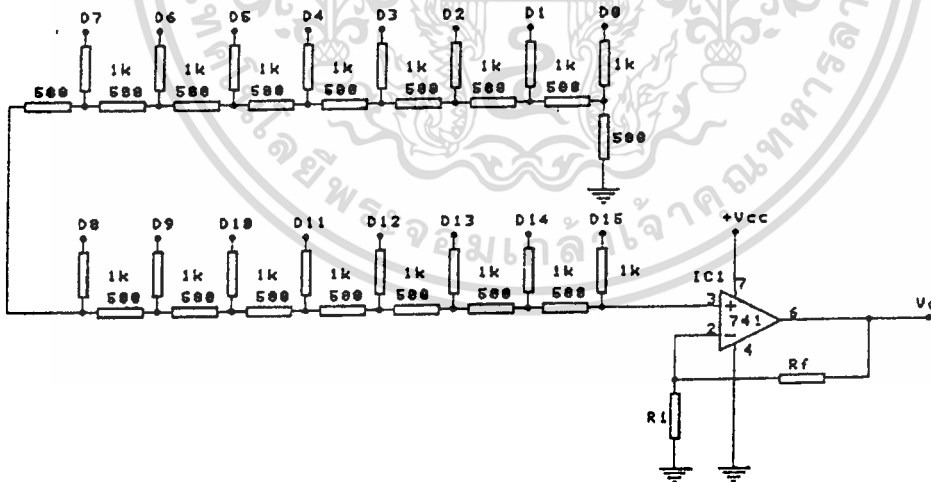
วงจรมัลติเพล็กซ์นำสัญญาณส่วนหนึ่งจากออฟติคอลลีเนียร์โค๊ดเดออร์ จากภาคตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนหมุนสแต็ปปีงมอเตอร์ เข้าสู่วงจรมัลติเพล็กซ์ 16 บิต แบบไบโคเร็กซ์ันแนล สัญญาณที่ได้จากภาคนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณอนาล็อกด้วยวงจรมัลติเพล็กซ์สัญญาณดิจิทัลแบบ 16 บิต R-2R เพื่อสังเกตการตอบสนองของไมโครสแต็ปและลักษณะของโอเวอร์ชูตที่ได้ทางออสซิลอสโคป ในภาพที่ 87 แสดงวงจรมัลติเพล็กซ์ 16 บิต แบบไบโคเร็กซ์ันแนล และในภาพที่ 88 แสดงวงจรมัลติเพล็กซ์สัญญาณทางดิจิทัลเป็นอนาล็อกแบบ 16 บิต R-2R (ladder) ตามลำดับ

ภาพที่ 87



แสดงวงจรนับ 16 บิต แบบไบโตรีคัซันแนลของภาคสังเกตรตอบสนองของไมโครสแต็ป

ภาพที่ 88



แสดงวงจรเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก แบบ 16 บิต R-2R ของภาคสังเกตลักษณะของไมโครสแต็ป

บทที่ 5

ผลการทดลองเมื่อควบคุมให้สเต็ปปีงมอเตอร์ทำงานในโหมดไมโครสเต็ป

ในการทดลองควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์ให้ทำงานในโหมดไมโครสเต็ปนี้ ใช้สเต็ปปีงมอเตอร์ชนิดคาร์ริกคัทแอนด์แปรค้ำได้ (VR-stepping motor) ชนิด 4 เฟส ขนาดสเต็ป 7.5 องศาต่อสเต็ปในการทดสอบ โดยจะทำการเปรียบเทียบลักษณะของสัญญาณควบคุมที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ด้วยสมการเชิงเส้นหรือแบบพหุพหุชันแนล, สมการชายน์ และหลักการใหม่ที่น่าเสนอคือสัญญาณควบคุมที่ได้จากการทดสอบโดยตรง จากนั้นทำการทดสอบเปรียบเทียบความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสเต็ปที่ได้ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณดังกล่าวเหล่านั้น โดยจะทำการทดลองด้วยขนาดไมโครสเต็ป 1/4, 1/8, 1/16 และ 1/32 เท่าของขนาดสเต็ปปกติตามลำดับ และส่วนสุดท้ายของการทดลองได้ทำการทดสอบความสามารถในการลดปัญหาการเกิดโอเวอร์ชูทของตำแหน่งการเคลื่อนที่แกนหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์เมื่อทำงานในโหมดไมโครสเต็ป เมื่อใช้สัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรงควบคุมเปรียบเทียบกับเมื่อขับสเต็ปปีงมอเตอร์ด้วยขนาดสเต็ปปกติ

ลักษณะของสัญญาณควบคุม

เปรียบเทียบลักษณะของสัญญาณอ้างอิงที่ใช้ควบคุมให้สเต็ปปีงมอเตอร์ทำงานในโหมดไมโครสเต็ปแบบเดิมคือ สัญญาณอ้างอิงที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเต็ปปีงมอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้นและสมการชายน์ และหลักการใหม่ที่น่าเสนอคือ สัญญาณอ้างอิงที่ได้จากการทดสอบโดยตรง โดยสัญญาณที่ได้นี้วัดจากเอาต์พุทของวงจรภาคแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก หรือ อินพุทของภาคควบคุมกระแสและขับกำลังของสเต็ปปีงมอเตอร์

ลักษณะของสัญญาณที่ใช้ควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์เมื่อทำงานที่ขนาดสเต็ปปกติ

ภาพที่ 89

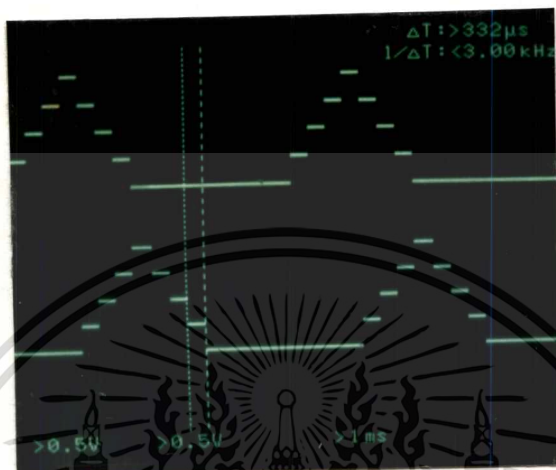


แสดงลักษณะของสัญญาณควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์ 2 เฟสแรก เมื่อทำงานด้วยขนาดสเต็ป

ปกติ

ลักษณะของสัญญาณควบคุมที่ใช้ควบคุมสเต็ปมอเตอร์ให้ทำงานให้โหมดไมโครสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเท่ากับ 1/4 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ

ภาพที่ 90



(ก)



(ข)

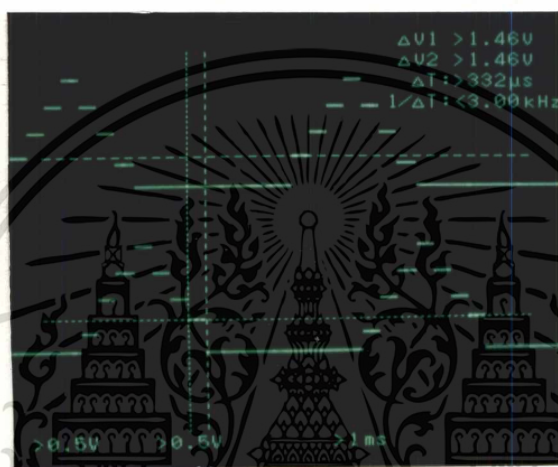
สเต็ป ที่แสดงลักษณะของสัญญาณ 2 เฟสแรก ที่ใช้ควบคุมให้สเต็ปปิ้งมอเตอร์ทำงานในโหมดไมโครขนาดไมโครสเต็ปเท่ากับ 1/4 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ โดย

(ก) สัญญาณควบคุมที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ด้วยสมการเชิงเส้น

(ข) สัญญาณควบคุมที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ด้วยสมการซาซัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 90(ต่อ)



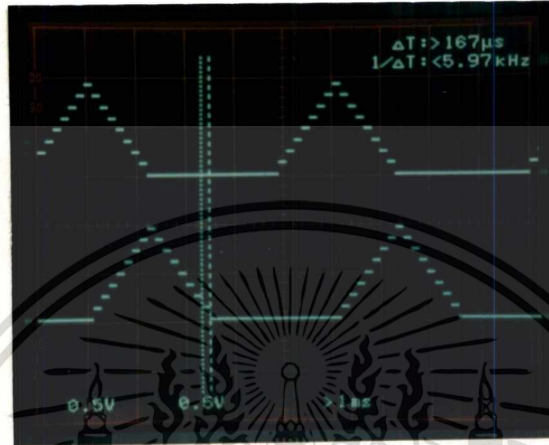
(ค)

สตีป ที่แสดงลักษณะของสัญญาณ 2 เฟสแรก ที่ใช้ควบคุมให้สตีปปีงมอเตอร์ทำงานในโหมด ไมโครขนาดไมโครสตีปเท่ากับ 1/4 เท่า ของขนาดสตีปปกติ โดย

(ค) สัญญาณควบคุมที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

ลักษณะของสัญญาณที่ใช้ควบคุมสตีปีงมอเตอร์ให้ทำงานในโหมดไมโครสตีปีที่ขนาดสตีปีเท่ากับ 1/8 เท่า ของขนาดสตีปีปกติ

ภาพที่ 91



(ก)



(ข)

แสดงลักษณะของสัญญาณ 2 เฟสแรก ที่ใช้ควบคุมให้สตีปีงมอเตอร์ทำงานในโหมดไมโครสตีปี ที่ขนาดไมโครสตีปีเท่ากับ 1/8 เท่า ของขนาดสตีปีปกติ โดย

(ก) สัญญาณควบคุมที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ด้วยสมการเชิงเส้น

(ข) สัญญาณควบคุมที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ด้วยสมการซาซัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 91(ต่อ)

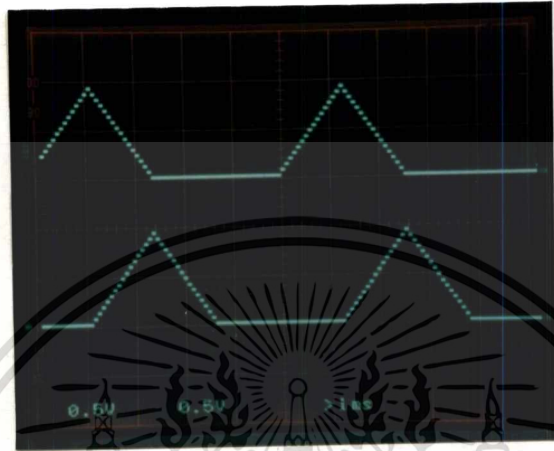


(ค)

แสดงลักษณะของสัญญาณ 2 เฟสแรก ที่ใช้ควบคุมให้สแต็ปปิ้งมอเตอร์ทำงานในโหมด ไมโครสแต็ป ที่ขนาดไมโครสแต็ปเท่ากับ 1/8 เท่าของขนาดสแต็ปปกติ โดย
(ค) สัญญาณควบคุมที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

ลักษณะของสัญญาณที่ใช้ควบคุมสแต็ปปีงมอเตอร์ให้ทำงานในโหมดไมโครสแต็ปที่ขนาดสแต็ปเท่ากับ 1/16 เท่า ของขนาดสแต็ปปกติ

ภาพที่ 92



(ก)



(ข)

แสดงลักษณะของสัญญาณ 2 เฟสแรก ที่ใช้ควบคุมให้สแต็ปปีงมอเตอร์ทำงานในโหมดไมโครสแต็ป ขนาดไมโครสแต็ปเท่ากับ 1/16 เท่า ของขนาดสแต็ปปกติ โดย

(ก) สัญญาณควบคุมที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ด้วยสมการเชิงเส้น

(ข) สัญญาณควบคุมที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ด้วยสมการชายน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 92(ต่อ)



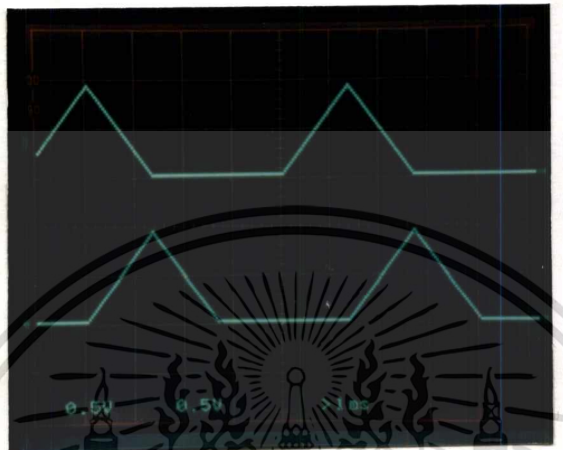
(ค)

แสดงลักษณะของสัญญาณ 2 เฟสแรก ที่ใช้ควบคุมให้สแต็ปปิ้งมอเตอร์ทำงานในโหมด ไมโครสเต็ป ขนาดไมโครสเต็ปเท่ากับ 1/16 เท่าของขนาดสเต็ปปกติ โดย

(ค) สัญญาณควบคุมที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

ลักษณะของสัญญาณที่ใช้ควบคุมสแต็ปปีงมอเตอร์ให้ทำงานในโหมดไมโครสแต็ปที่ขนาดสแต็ปเท่ากับ 1/32 เท่า ของขนาดสแต็ปปกติ

ภาพที่ 93



(ก)



(ข)

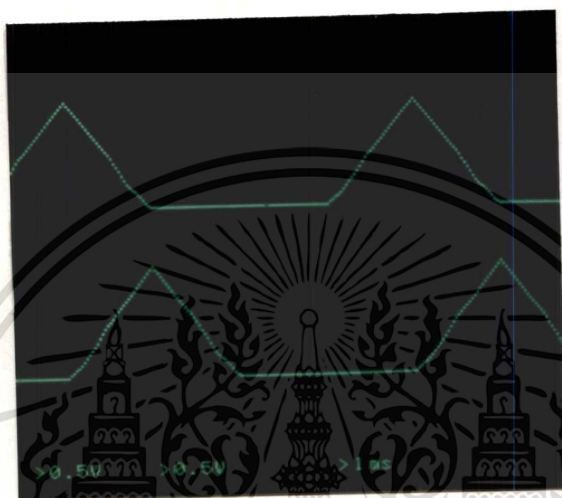
แสดงลักษณะของสัญญาณ 2 เฟสแรก ที่ใช้ควบคุมให้สแต็ปปีงมอเตอร์ทำงานในโหมดไมโครสแต็ป ที่ขนาดไมโครสแต็ปเท่ากับ 1/32 เท่า ของขนาดสแต็ปปกติ โดย

(ก) สัญญาณควบคุมที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ด้วยสมการเชิงเส้น

(ข) สัญญาณควบคุมที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ด้วยสมการชายนัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 93(ต่อ)



(ค)

แสดงลักษณะของสัญญาณ 2 เฟสแรก ที่ใช้ควบคุมให้สเต็ปมอเตอร์ทำงานในโหมด ไมโครสเต็ป ที่ขนาดไมโครสเต็ปเท่ากับ 1/32 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ โดย
(ค) สัญญาณควบคุมที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

ผลการเปรียบเทียบความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสเต็ปที่ได้

ผลการทดสอบเปรียบเทียบความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสเต็ปที่ได้ เมื่อใช้สัญญาณที่ได้จากหลักการเดิมควบคุมคือ สัญญาณที่ใช้ควบคุมที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้น หรือ พรอพโพร์ชันแนลและสมการชายน์ เปรียบเทียบกับหลักการใหม่ที่นำเสนอ คือ สัญญาณที่ใช้ควบคุมที่ได้จากการทดสอบโดยตรงโดยสัญญาณที่ได้นี้วัดจากเอาต์พุทของภาคสังเกตการตอบสนองของไมโครสเต็ป

เปรียบเทียบความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสเต็ปที่ได้ เมื่อขนาดสเต็ปเป็น 1/4 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ด้วยสมการเชิงเส้นหรือสัญญาณแบบที่เป็นสัดส่วนกัน สมการชายน์และสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

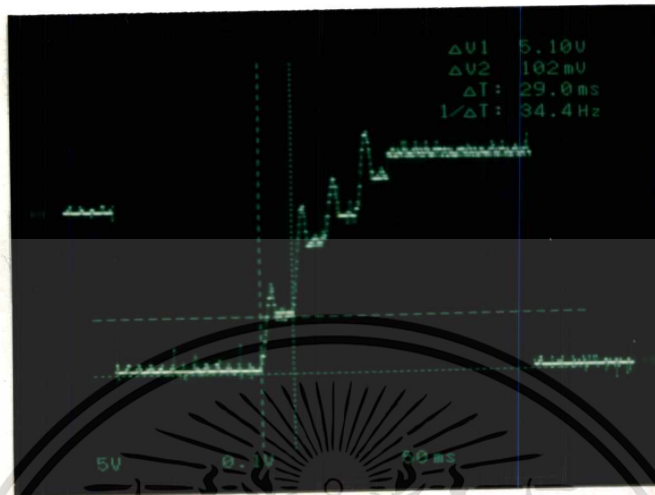
ผลการทดลองด้วยสัญญาณชายน์

ตารางที่ 6

แสดงขนาดสเต็ปที่วัดได้เมื่อขนาดสเต็ปเป็น 1/4 เท่าของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสมการชายน์

ผลการควบคุมด้วยสัญญาณชายน์ ที่ขนาดสเต็ปเท่ากับ 1/4 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อขนาดสเต็ปที่ต้องการเท่ากับ 96 mV.				
สเต็ปที่	1	2	3	4
ขนาดสเต็ปที่วัดได้ (mV)	102	118	50	108

ภาพที่ 94



(ก) สเต็ปที่ 1

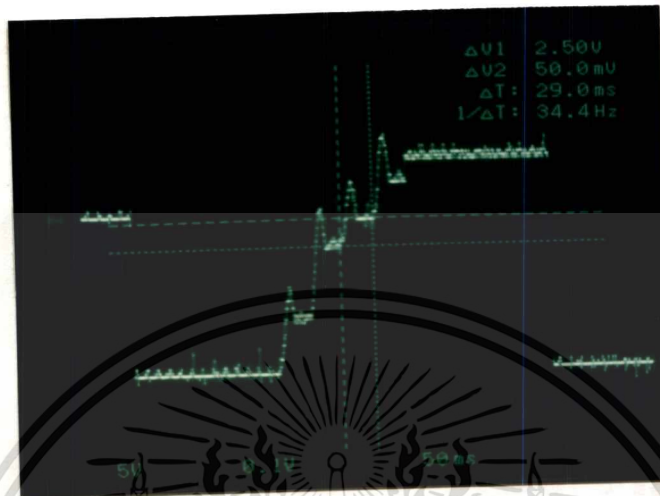


(ข) สเต็ปที่ 2

แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/4 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเต็ปมอเตอร์ด้วยสมการชาชน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 94(ต่อ)



(ค) สเต็ปที่ 3



(ง) สเต็ปที่ 4

แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/4 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ของสเต็ปปีงมอเตอร์ด้วยสมการชายน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองด้วยสัญญาณเชิงเส้น

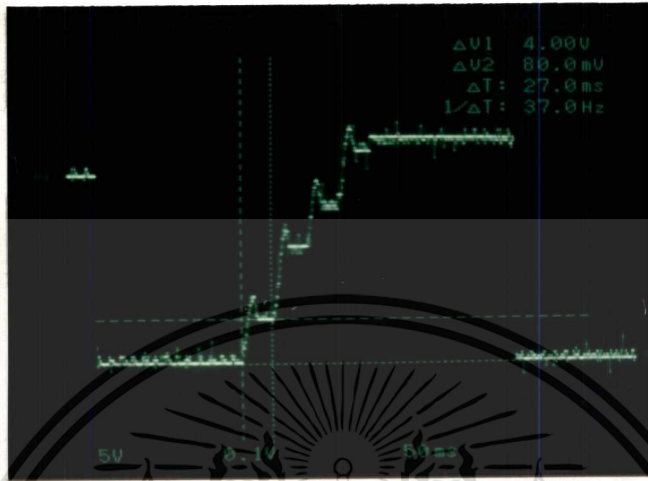
ตารางที่ 7

แสดงขนาดสเต็ปที่วัดได้เมื่อขนาดสเต็ปเป็น $1/4$ เท่าของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุม
ด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ
ของสเต็ปป้อนมอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้น

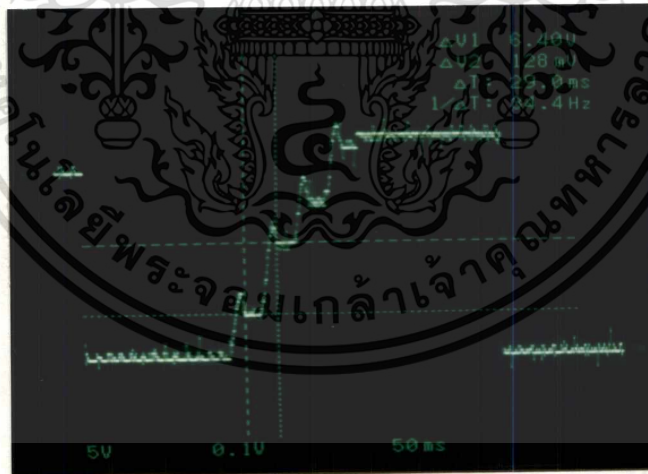
ผลการควบคุมด้วยสัญญาณเชิงเส้น ที่ขนาดสเต็ปเท่ากับ $1/4$ เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อขนาดสเต็ปที่ต้องการเท่ากับ 96 mV.				
สเต็ปที่	1	2	3	4
ขนาดสเต็ปที่วัดได้ (mV)	80	128	76	116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 95



(ก) สติปที่ 1

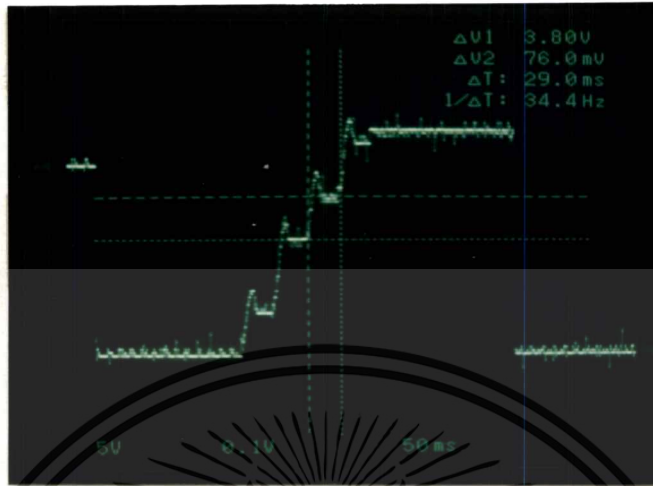


(ข) สติปที่ 2

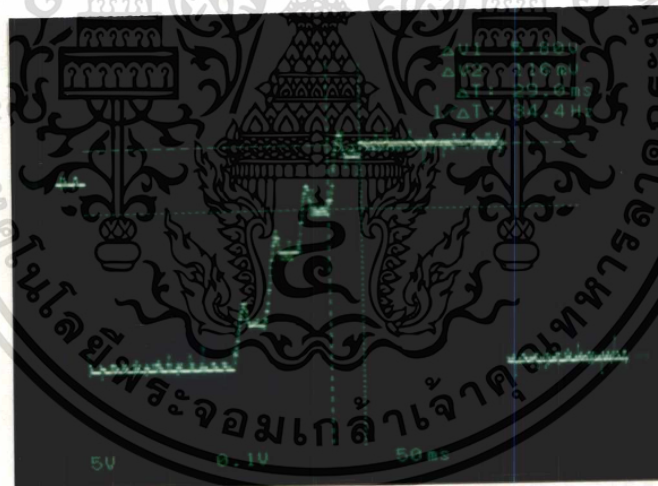
แสดงขนาดไมโครสติปแต่ละสติปที่ขนาดสติปเป็น 1/4 เท่า ของขนาดสติปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสติปึงมอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 95(ต่อ)



(ค) สเต็ปที่ 3



(ง) สเต็ปที่ 4

แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/4 เท่าของขนาด สเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

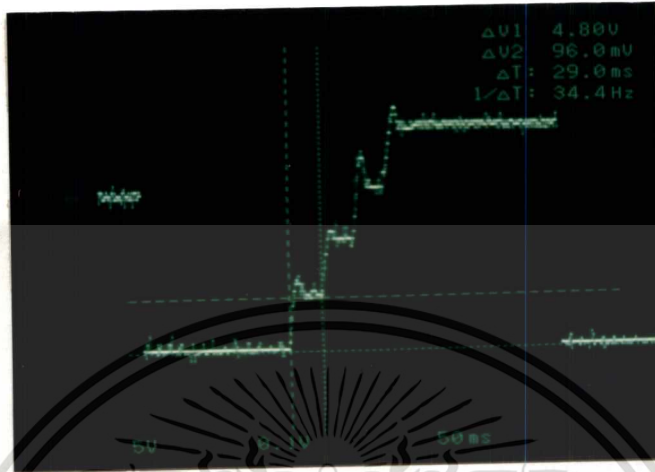
ผลการทดลองด้วยสัญญาณควบคุมที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

ตารางที่ 8

แสดงขนาดสเต็ปที่วัดได้เมื่อนาตสเต็ปเป็น 1/4 เท่าของขนาดสเต็ปปกติ
เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

ผลการควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบ โดยตรงที่ขนาดสเต็ปเท่ากับ 1/4 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อนาตสเต็ปที่ต้องการเท่ากับ 96 mV.				
สเต็ปที่	1	2	3	4
ขนาดสเต็ปที่วัดได้(mV)	96	96	96	96

ภาพที่ 96



(ก) สเต็ปที่ 1

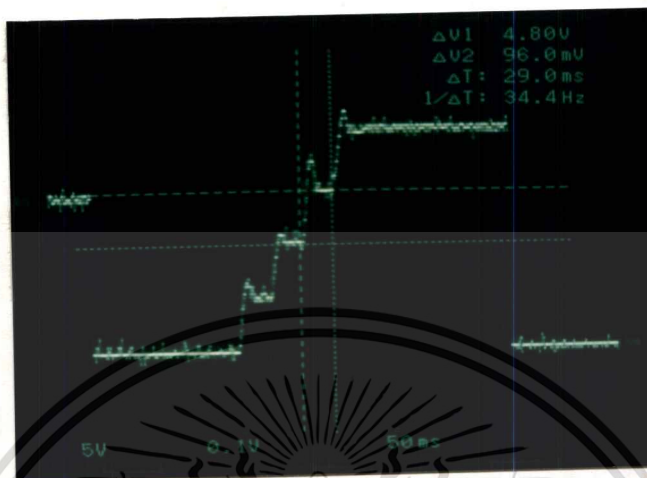


(ข) สเต็ปที่ 2

แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/4 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 96(ต่อ)



(ค) สแต็ปที่ 3



(ง) สแต็ปที่ 4

แสดงขนาดไมโครสแต็ปแต่ละสแต็ปที่ขนาดสแต็ปเป็น 1/4 เท่า ของขนาดสแต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสแต็ปที่วัดได้ เมื่อขนาดสแต็ปเท่ากับ 1/8 เท่า ของขนาดสแต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ด้วยสมการเชิงเส้นหรือสัญญาณแบบที่เป็นสัดส่วนกัน สมการชายน์และสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

ผลการทดลองควบคุมด้วยสัญญาณชายน์

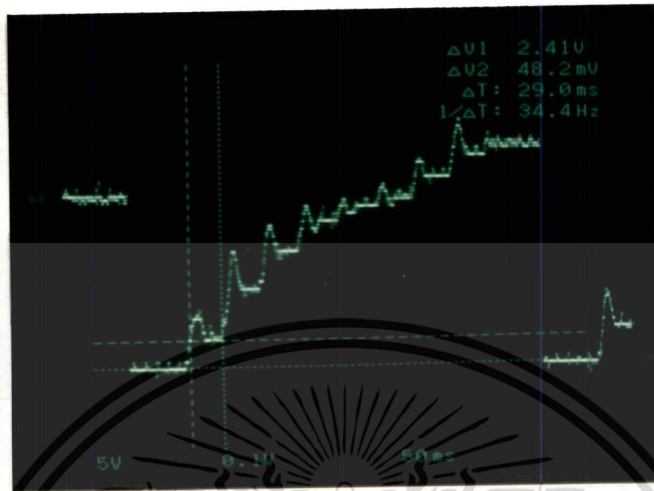
ตารางที่ 9

แสดงขนาดสแต็ปที่วัดได้เมื่อขนาดสแต็ปเป็น 1/8 เท่าของขนาดสแต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสแต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสมการชายน์

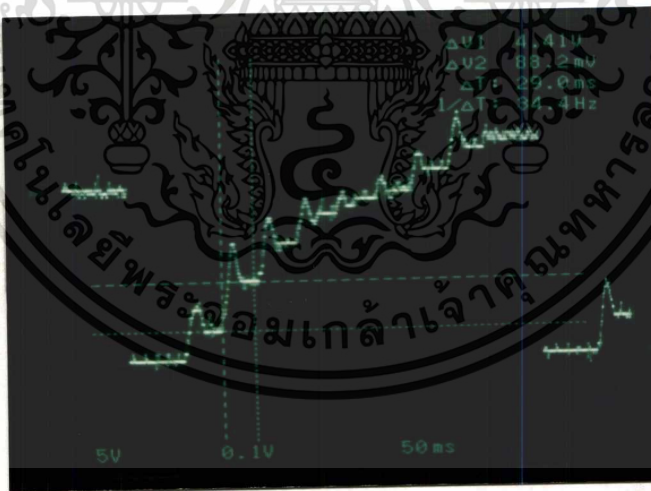
ผลการควบคุมด้วยสัญญาณชายน์ ที่ขนาดสแต็ปเท่ากับ 1/8 เท่า ของขนาดสแต็ปปกติ เมื่อขนาดสแต็ปที่ต้องการเท่ากับ 48 mV:								
สแต็ปที่	1	2	3	4	5	6	7	8
ขนาดสแต็ปที่วัดได้(mV)	48.2	88.2	66.2	46.2	22.2	16.2	34.2	44.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 97



(ก) สเต็ปที่ 1

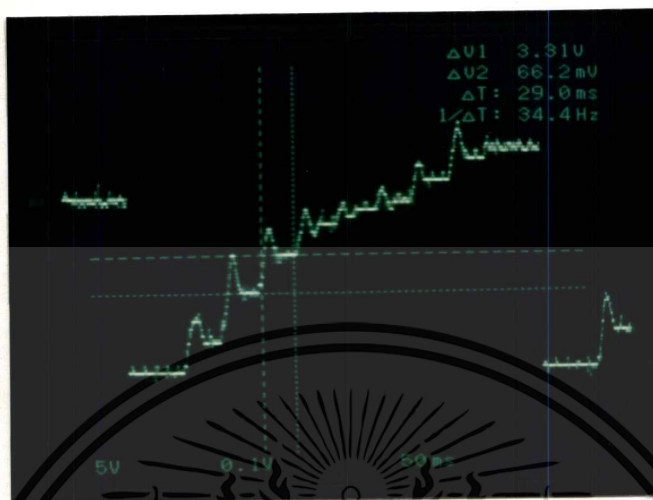


(ข) สเต็ปที่ 2

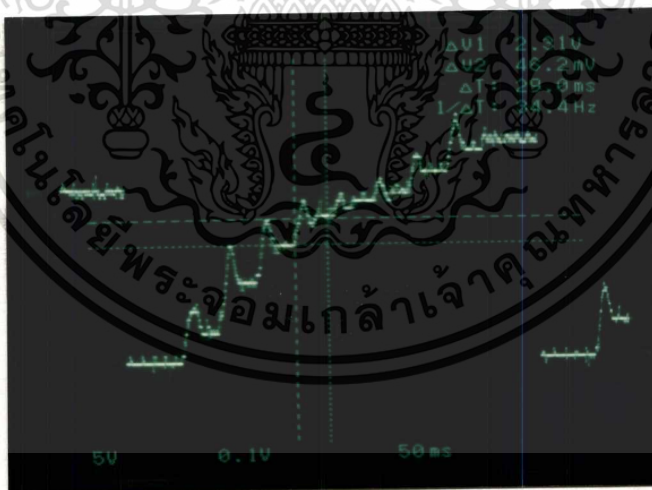
แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น $1/8$ เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสมการชายน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 97(ต่อ)



(ค) สเติร์ปที่ 3

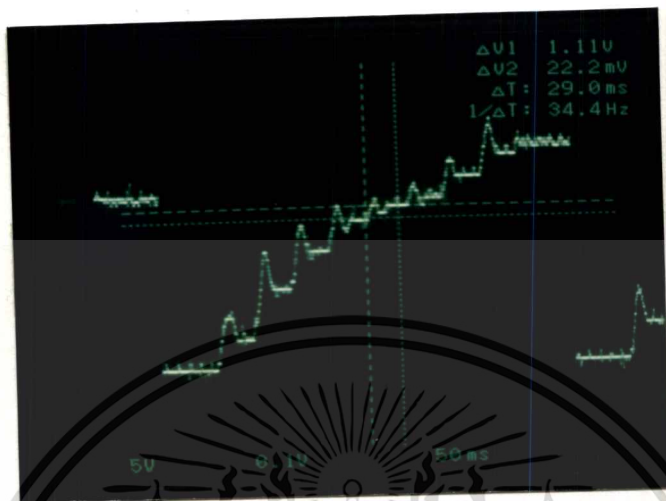


(ง) สเติร์ปที่ 4

แสดงขนาดไมโครสเติร์ปแต่ละสเติร์ปที่ขนาดสเติร์ปเป็น 1/8 เท่า ของขนาดสเติร์ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเติร์ปปั๊มมอเตอร์ด้วยสมการชายนี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 97(ต่อ)



(จ) สเต็ปที่ 5

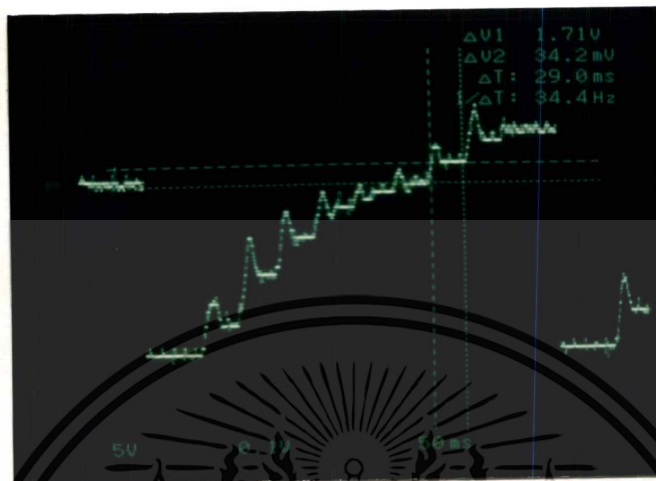


(ฉ) สเต็ปที่ 6

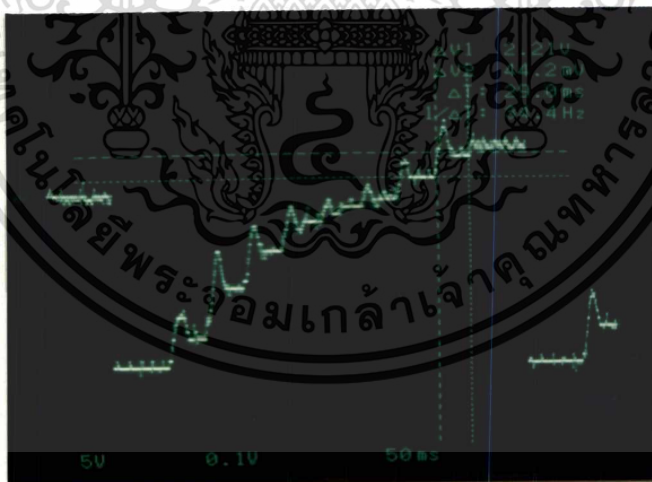
แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/8 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสมการชายนัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 97(ต่อ)



(ข) สเต็ปที่ 7



(ข) สเต็ปที่ 8

แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/8 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสมการชานน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองควบคุมด้วยสัญญาณเชิงเส้น

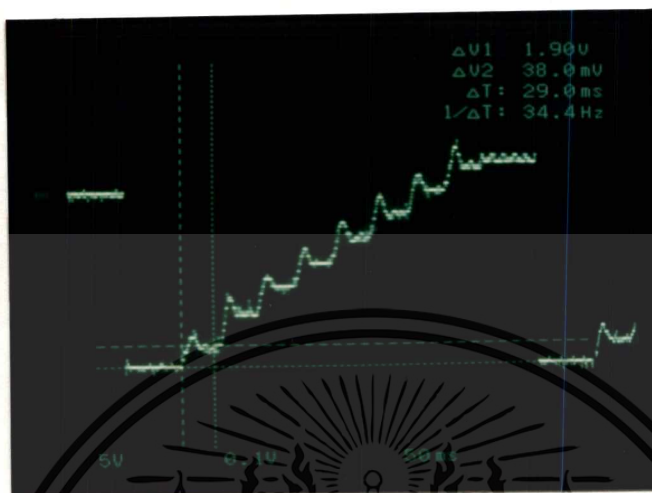
ตารางที่ 10

แสดงขนาดสเต็ปที่วัดได้เมื่อขนาดสเต็ปเป็น $1/8$ เท่าของขนาดสเต็ปปกติ
เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ
ของสเต็ปป้อนมอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้น

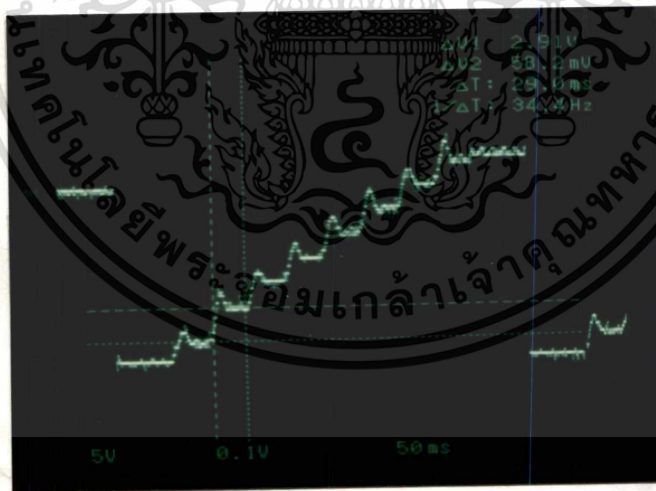
ผลการควบคุมด้วยสัญญาณเชิงเส้นที่ขนาดสเต็ปเท่ากับ $1/8$ เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อขนาดสเต็ปที่ต้องการเท่ากับ 48 mV.								
สเต็ปที่	1	2	3	4	5	6	7	8
ขนาดสเต็ปที่วัดได้(mV)	38	58.2	52.2	40.2	36.2	50.2	42.2	54.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 98



(ก) สเต็ปที่ 1

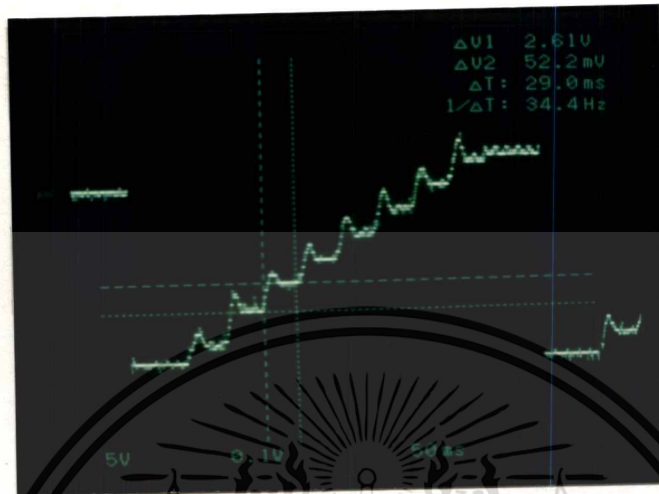


(ข) สเต็ปที่ 2

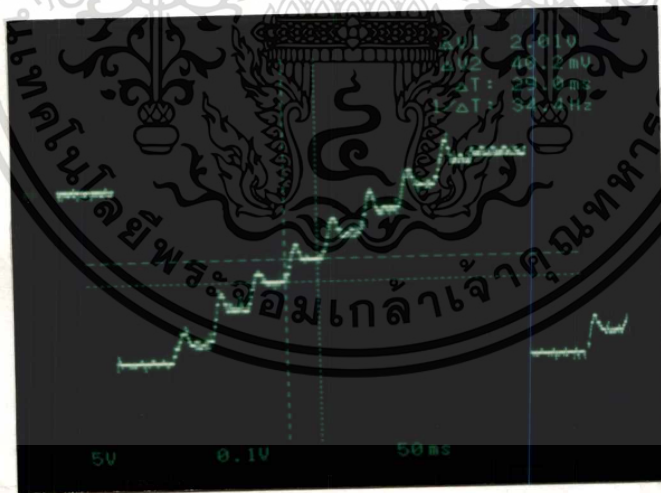
แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/8 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 98(ต่อ)



(ค) สตีปที่ 3

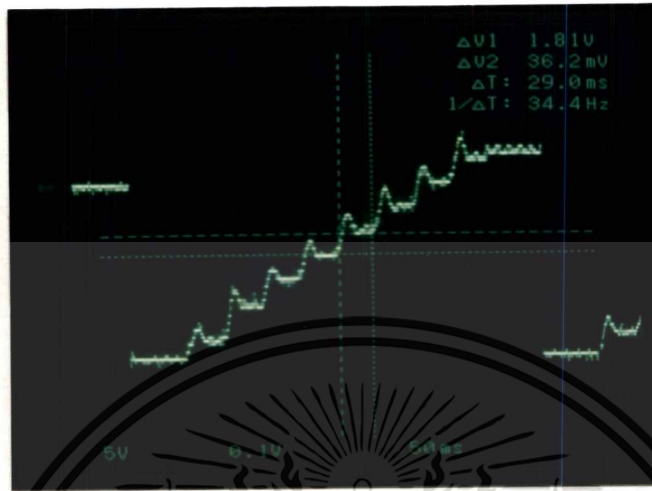


(ง) สตีปที่ 4

แสดงขนาดไมโครสตีปแต่ละสตีปที่ขนาดสตีปเป็น 1/8 เท่า ของขนาดสตีปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสตีปปีงมอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 98(ต่อ)



(จ) สเต็ปที่ 5

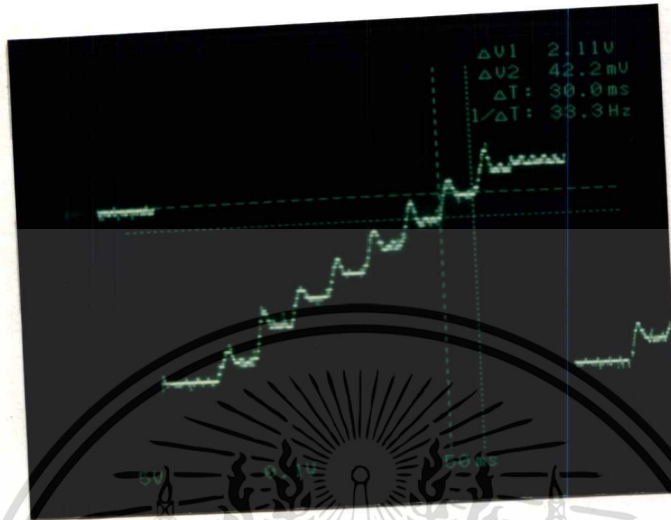


(ฉ) สเต็ปที่ 6

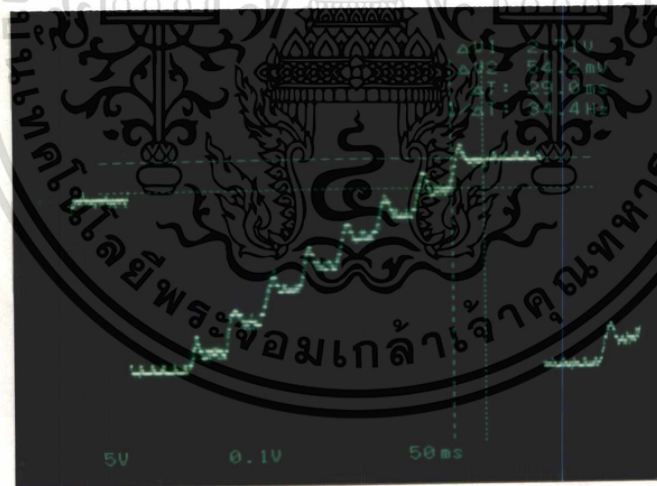
แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/8 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเต็ปปีงมอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 98(ต่อ)



(ข) สเต็ปที่ 7



(ข) สเต็ปที่ 8

แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/8 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเต็ปปีงมอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

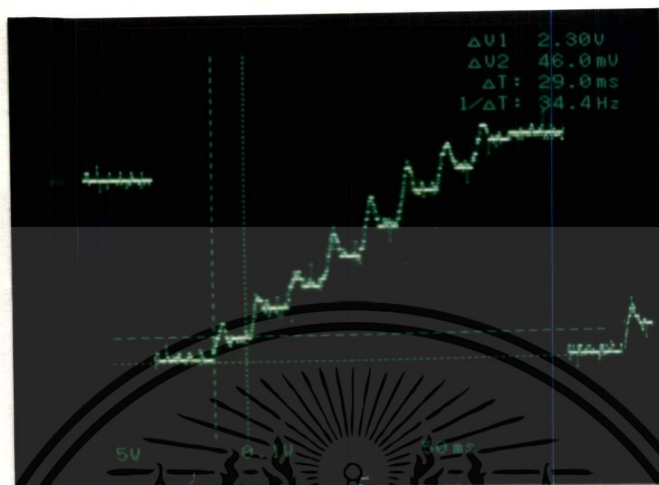
ผลการทดลองด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

ตารางที่ 11

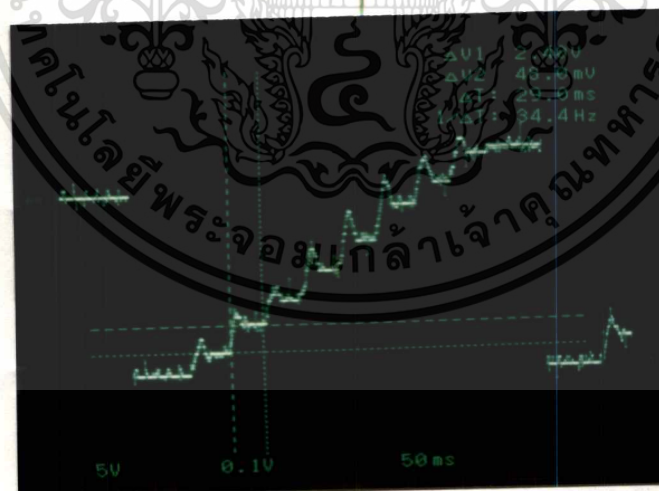
แสดงขนาดสเต็ปที่วัดได้เมื่อขนาดสเต็ปเป็น $1/8$ เท่าของขนาดสเต็ปปกติ
เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

ผลการควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง ที่ขนาดสเต็ปเท่ากับ $1/8$ เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อขนาดสเต็ปที่ต้องการเท่ากับ 48 mV.								
สเต็ปที่	1	2	3	4	5	6	7	8
ขนาดสเต็ปที่วัดได้ (mV)	46	48	46	48	48	54.5	47	48

ภาพที่ 99



(ก) สเต็ปที่ 1

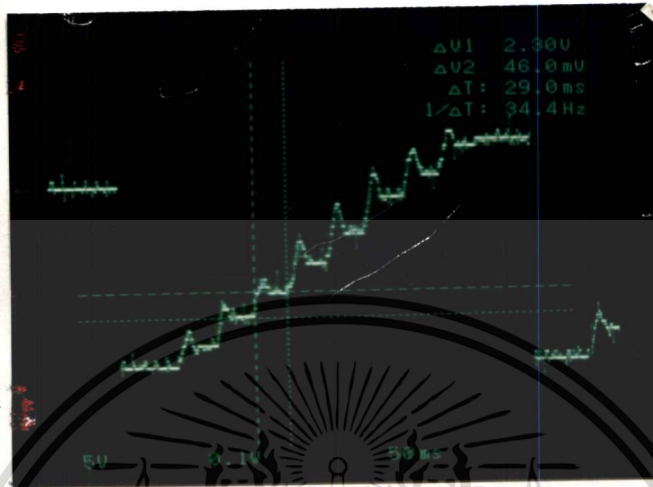


(ข) สเต็ปที่ 2

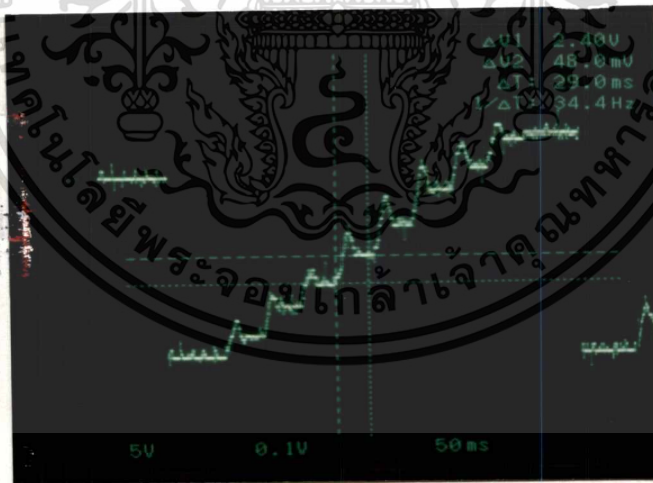
แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/8 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 99(ต่อ)



(ค) สเต็ปที่ 3

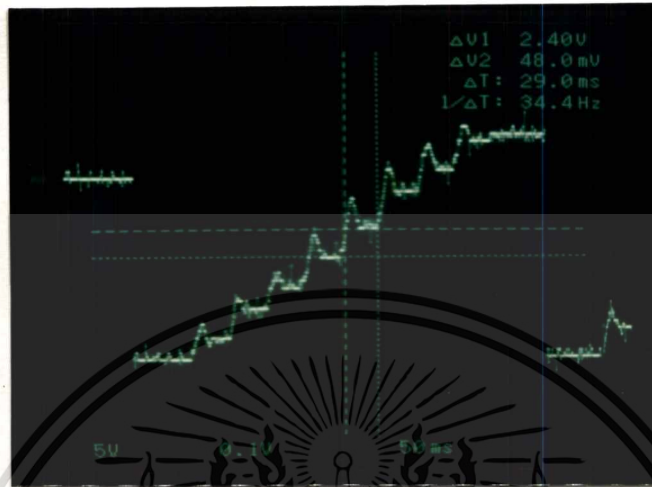


(ง) สเต็ปที่ 4

แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/8 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 99(ต่อ)



(จ) สเต็ปที่ 5

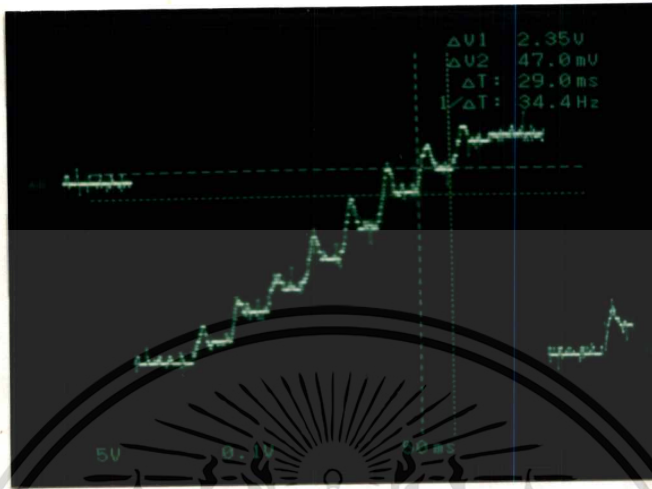


(ข) สเต็ปที่ 6

แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/8 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 99(ต่อ)



(ข) สเต็ปที่ 7



(ค) สเต็ปที่ 8

แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/8 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสเต็ปที่ได้ เมื่อขนาดสเต็ปเท่ากับ 1/16 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ด้วยสมการเชิงเส้นหรือสัญญาณแบบที่เป็นสัดส่วนกัน สมการชาชน์และสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

ผลการทดลองควบคุมด้วยสัญญาณชาชน์

ตารางที่ 12

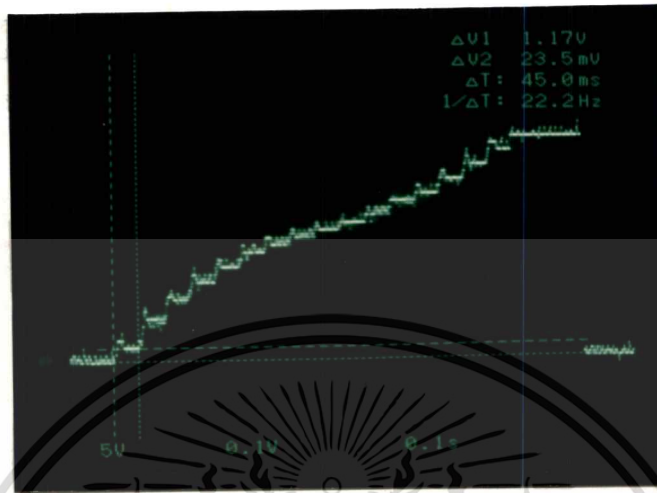
แสดงขนาดสเต็ปที่วัดได้เมื่อขนาดสเต็ปเป็น 1/16 เท่าของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะขนาดสเต็ปที่ต้องการ T-θ ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสมการชาชน์

ผลการควบคุมด้วยสัญญาณชาชน์ ที่ขนาดสเต็ปเท่ากับ 1/16 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ
เมื่อขนาดสเต็ปที่ต้องการเท่ากับ 24 mV.

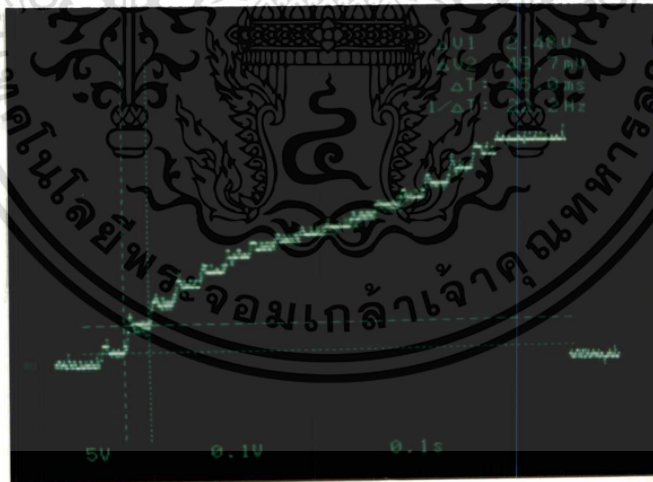
สเต็ปที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ขนาดสเต็ปที่วัดได้ (mV)	23.5	49.7	33.7	32.5	26.2	27.2	14.2	15.5	13.5	12.5	22.0	15.0	23.2	25.0	25.2	25.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 100



(ก) สเต็ปที่ 1

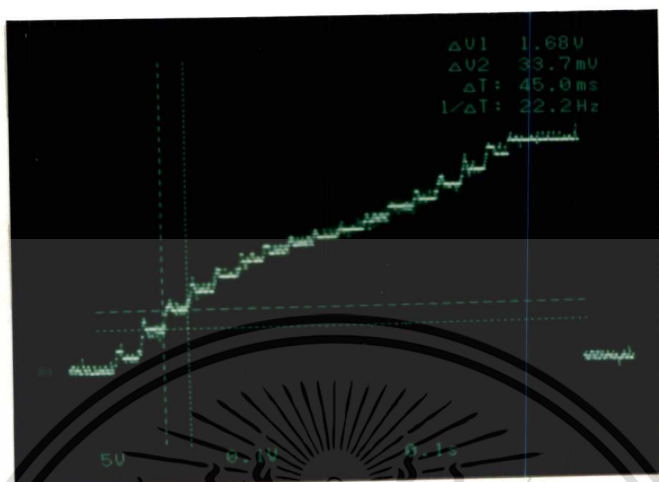


(ข) สเต็ปที่ 2

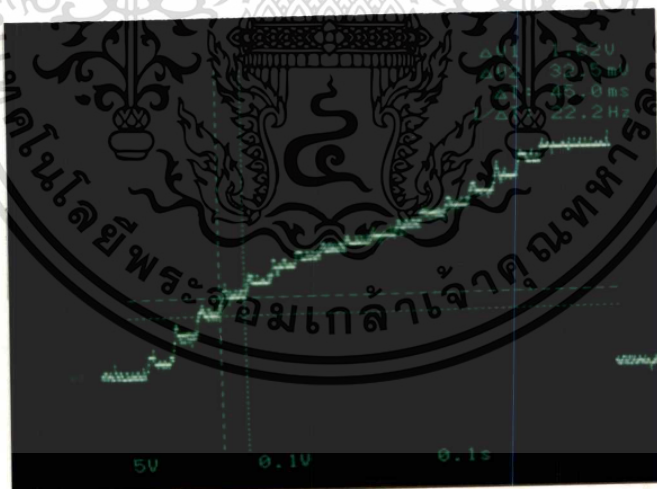
แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/16 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ของสเต็ปปีงมอเตอร์ด้วยสมการชาxon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 100(ต่อ)



(ค) สติปที่ 3

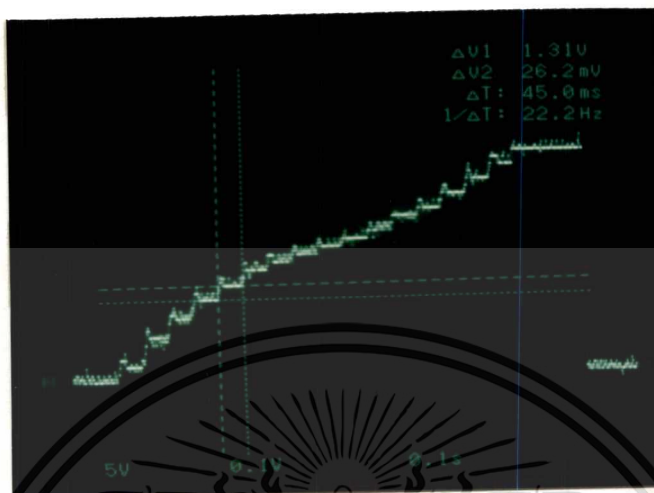


(ง) สติปที่ 4

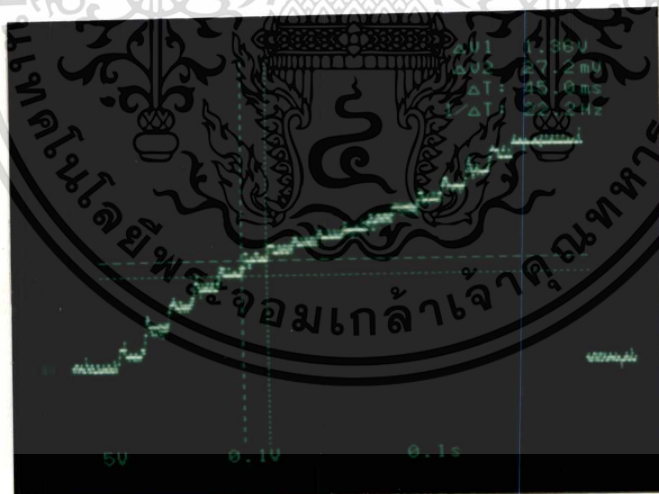
แสดงขนาดไมโครสติปแต่ละสติปที่ขนาดสติปเป็น 1/16 เท่า ของขนาดสติปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ของสติปปีงมอเตอร์ด้วยสมการชายน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 100(ต่อ)



(จ) สเต็ปที่ 5

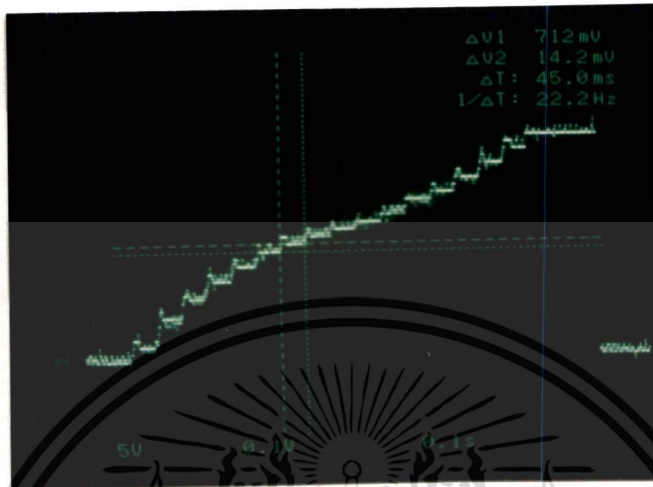


(ฉ) สเต็ปที่ 6

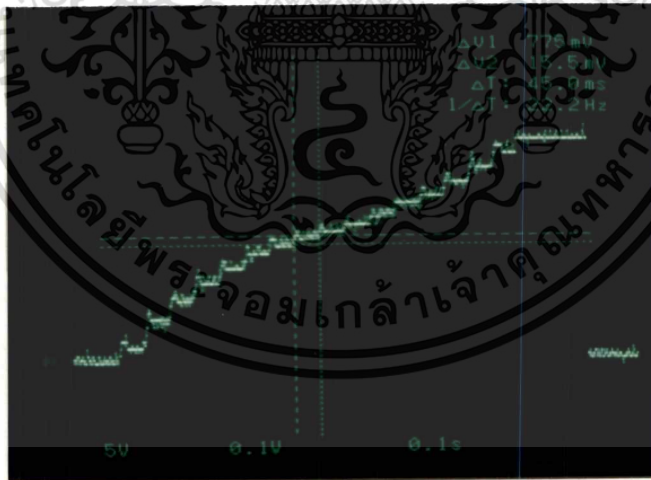
แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/16 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสมการชายน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 100(ต่อ)



(ข) สแต็ปที่ 7



(ข) สแต็ปที่ 8

แสดงขนาดไมโครสแต็ปแต่ละสแต็ปที่ขนาดสแต็ปเป็น 1/16 เท่า ของขนาดสแต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ของสแต็ปปีงมอเตอร์ด้วยสมการชานี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองควบคุมด้วยสัญญาณเชิงเส้น

ตารางที่ 13

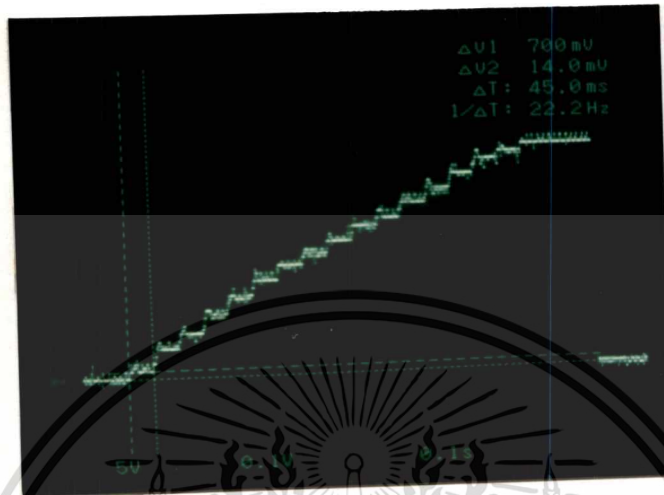
แสดงขนาดสเต็ปที่วัดได้เมื่อขนาดสเต็ปเป็น 1/16 เท่าของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุม
ด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ
ของสเต็ปป้อนมอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้น

ผลการควบคุมด้วยสัญญาณเชิงเส้นที่ขนาดสเต็ปเท่ากับ 1/16 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ
เมื่อขนาดสเต็ปที่ต้องการเท่ากับ 24 mV.

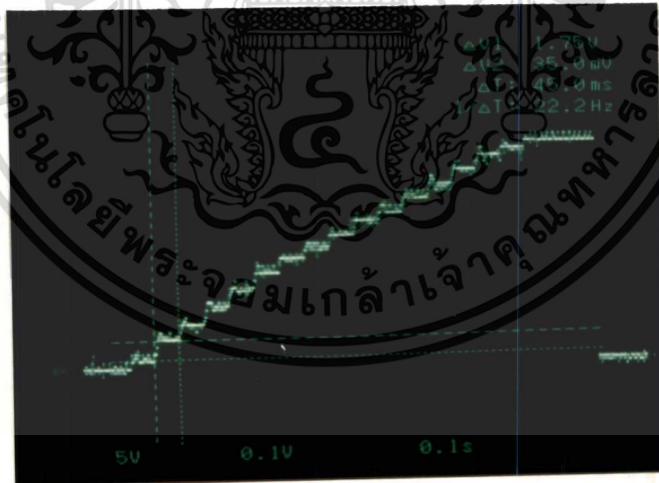
สเต็ปที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ขนาดสเต็ปที่วัดได้(mV)	14.0	35.0	25.7	33.5	29.7	27.5	23.7	25.5	16.0	24.0	11.7	23.0	29.5	25.5	25.5	15.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 101



(ก) สเต็ปที่ 1

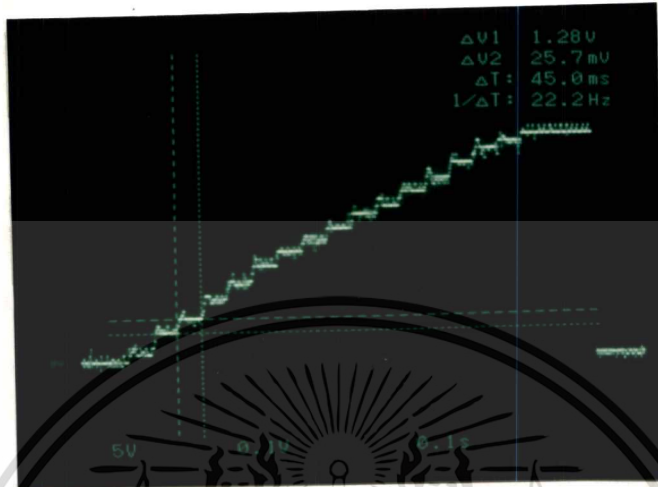


(ข) สเต็ปที่ 2

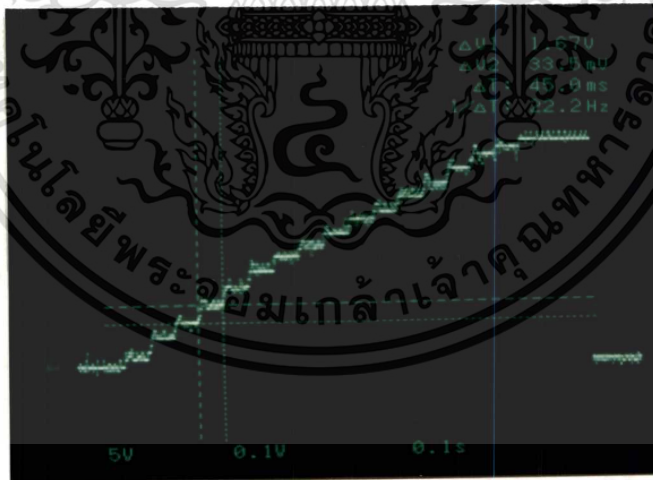
แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/16 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 101(ต่อ)



(ค) สแต็ปที่ 3

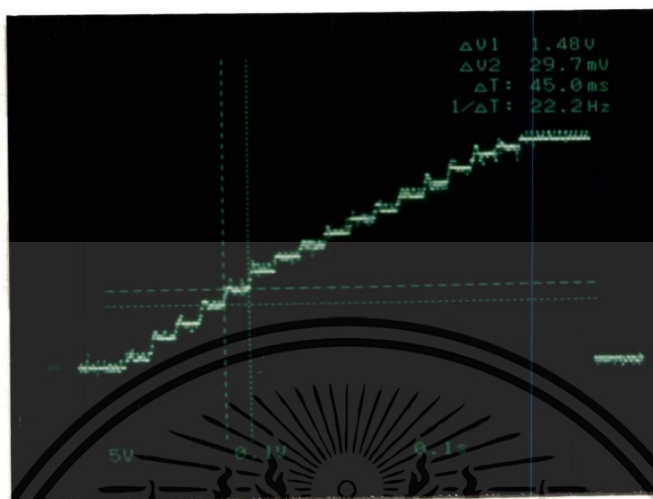


(ง) สแต็ปที่ 4

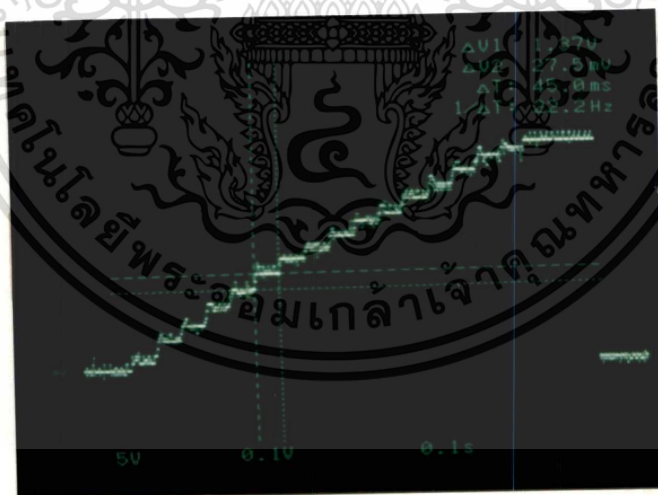
แสดงขนาดไมโครสแต็ปแต่ละสแต็ปที่ขนาดสแต็ปเป็น 1/16 เท่า ของขนาดสแต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ของสแต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 101(ต่อ)



(จ) สเต็ปที่ 5

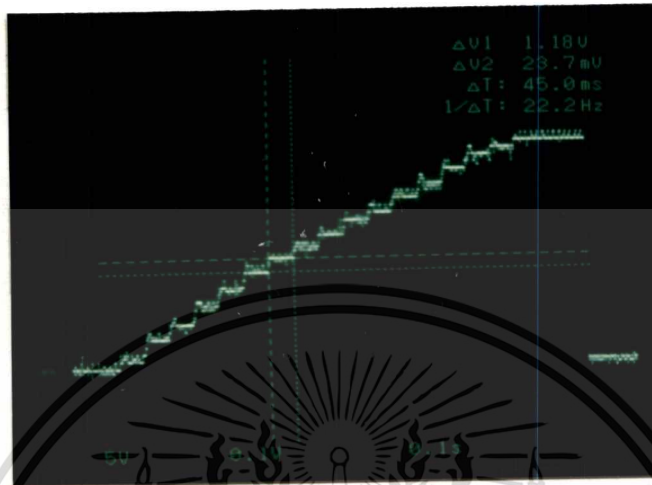


(ฉ) สเต็ปที่ 6

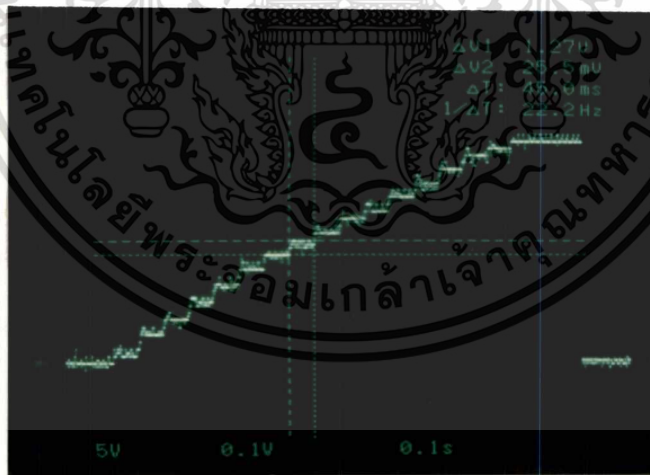
แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/16 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 101(ต่อ)



(ข) สเต็ปที่ 7



(ง) สเต็ปที่ 8

แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/16 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

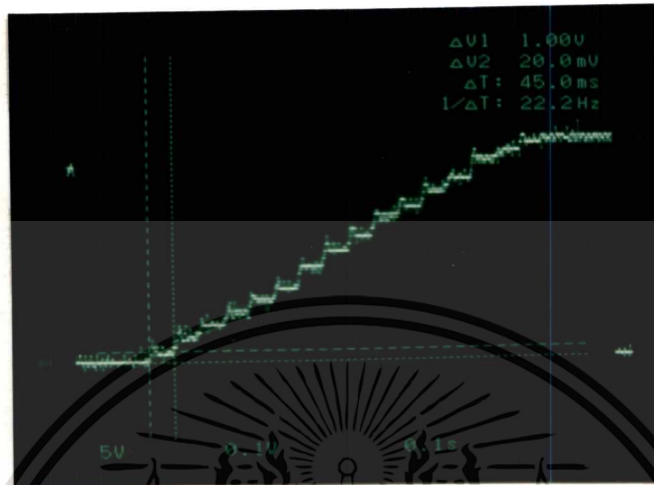
ตารางที่ 14

แสดงขนาดสเต็ปที่วัดได้เมื่อขนาดสเต็ปเป็น 1/16 เท่าของขนาดสเต็ปปกติ
เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

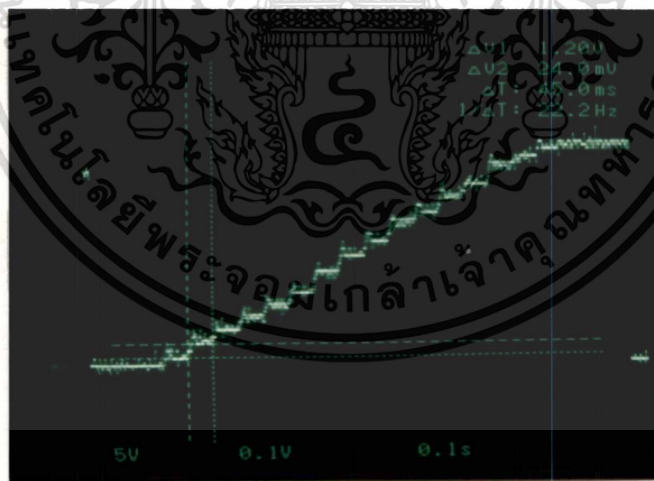
ผลการควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง ที่ขนาดสเต็ปเท่ากับ 1/16 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อขนาดสเต็ปที่ต้องการเท่ากับ 24 mV																
สเต็ปที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ขนาดสเต็ปที่วัดได้(mV)	20.0	24.0	24.0	24.0	24.0	23.0	30.0	24.0	24.0	28.0	25.0	24.0	24.0	27.0	23.0	24.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 102



(ก) สแต็ปที่ 1

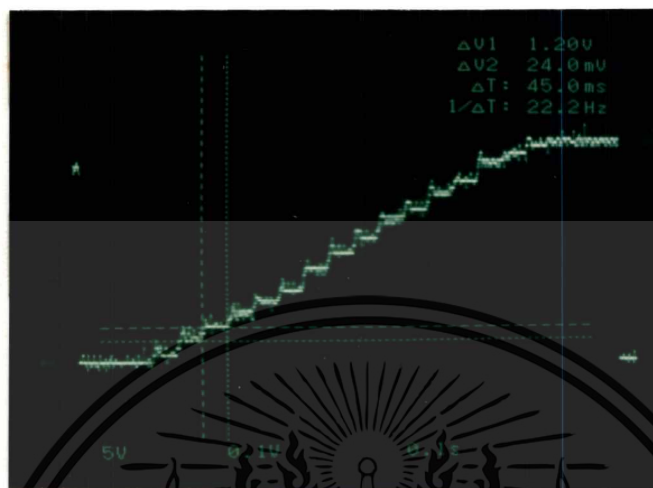


(ข) สแต็ปที่ 2

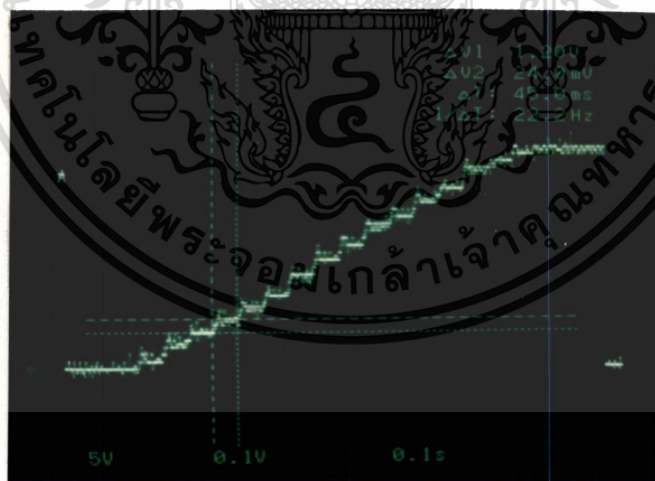
แสดงขนาดไมโครสแต็ปแต่ละสแต็ปที่ขนาดสแต็ปเป็น 1/16 เท่า ของขนาดสแต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 102(ต่อ)



(ค) สเต็ปที่ 3

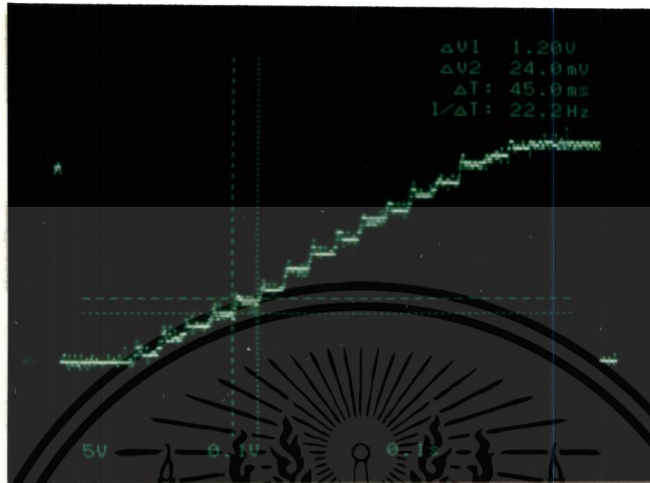


(ง) สเต็ปที่ 4

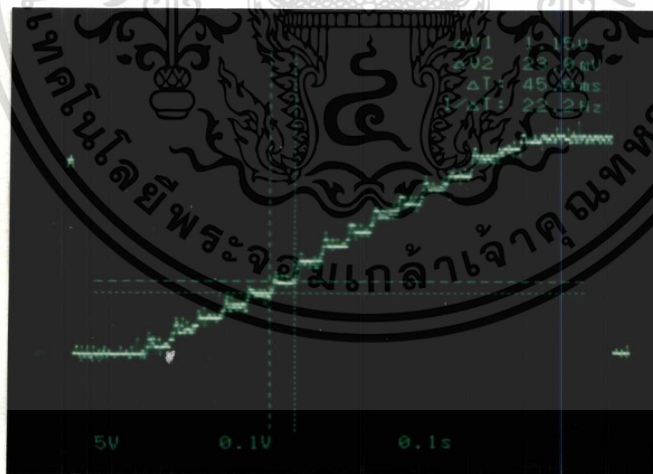
แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/16 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 102(ต่อ)



(จ) สเต็ปที่ 5

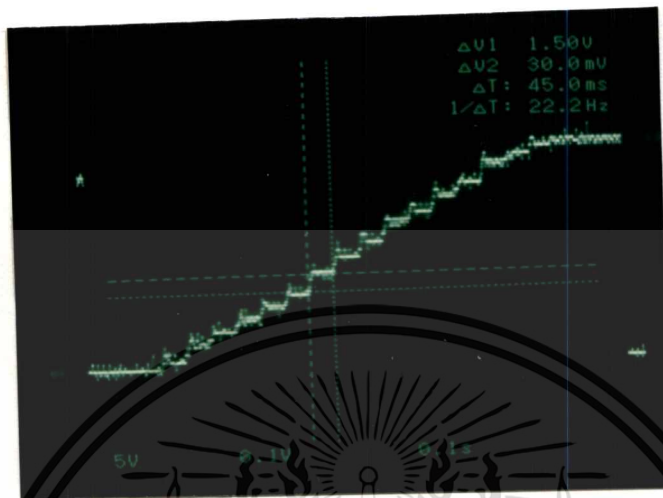


(ข) สเต็ปที่ 6

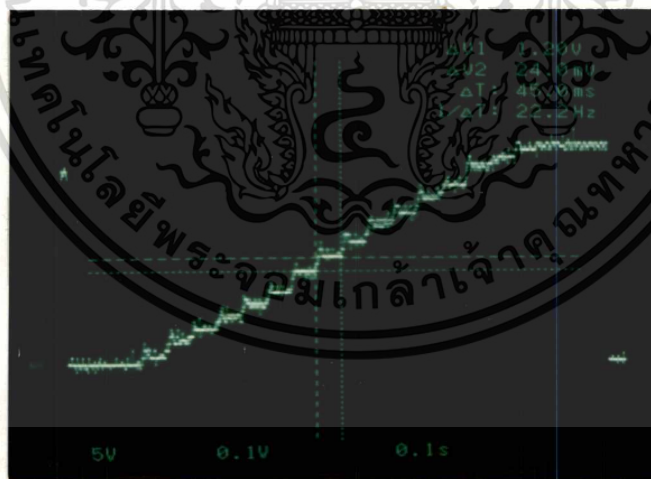
แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/16 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 102(ต่อ)



(ข) สเต็ปที่ 7



(ข) สเต็ปที่ 8

แสดงขนาดไมโครสเต็ปแต่ละสเต็ปที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/16 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสแต็ปที่ได้ เมื่อขนาดสแต็ปเท่ากับ 1/32 เท่า ของขนาดสแต็ปปกติ โดยสังเกตจากความเป็นเชิงเส้นของรูปสัญญาณที่ได้ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ด้วยสมการเชิงเส้น หรือ สัญญาณแบบที่เป็นสัดส่วนกัน สมการชานน์และสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

ผลการทดลองควบคุมด้วยสัญญาณชานน์

ภาพที่ 103

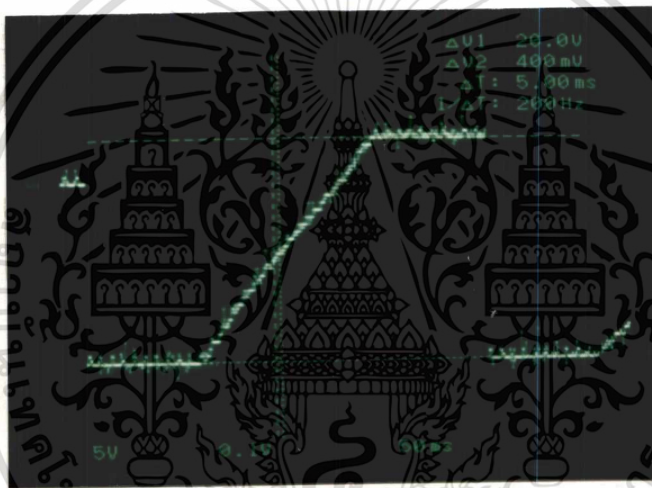


แสดงความเป็นเชิงเส้นของขนาดสแต็ปที่ได้เมื่อขนาดสแต็ปเป็น 1/32 เท่า ของขนาดสแต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ของสแต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสมการชานน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองควบคุมด้วยสัญญาณเชิงเส้น

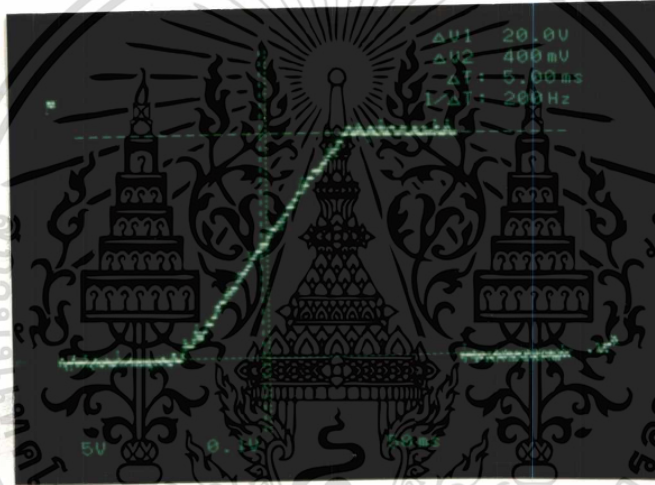
ภาพที่ 104



แสดงความเป็นเชิงเส้นของขนาดสเต็ปที่ได้เมื่อขนาดสเต็ปเป็น $1/32$ เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเต็ปปิ้งมอเตอร์ด้วยสมการเชิงเส้น

ผลการทดลองด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

ภาพที่ 105



แสดงความเป็นเชิงเส้นของขนาดสเกปที่ได้เมื่อนำขนาดสเกปเป็น 1/32 เท่า ของขนาดสเกปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลดปัญหาการเกิดโอเวอร์ชูท

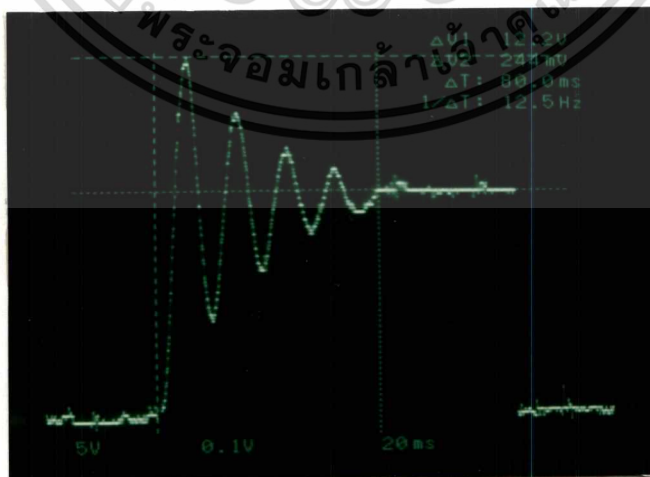
การทดสอบความสามารถในการลดปัญหาการเกิดโอเวอร์ชูทของตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนหมุนของสเต็ปปีงมอเตอร์ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณอ้างอิงที่ได้จากการทดสอบโดยตรง เมื่อขนาดสเต็ปปกติ ถูกแบ่งเป็น 4 และ 8 ส่วนตามลำดับ เปรียบเทียบกับเมื่อสเต็ปปีงมอเตอร์ทำงานที่ขนาดสเต็ปปกติ

ตารางที่ 15

แสดงขนาดของโอเวอร์ชูท ของตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนหมุน สเต็ปปีงมอเตอร์ เมื่อทำงานด้วยขนาดสเต็ปปกติ เปรียบเทียบกับเมื่อทำงานใน โหมดไมโครสเต็ป 1/4 และ 1/8 เท่า ตามลำดับ

ขนาดสเต็ป	โอเวอร์ชูท (Vp)
ปกติ	244.0 mV(100%)
1/4 เท่า	68.7 mV(28.15%)
1/8 เท่า	6.75 mV(2.77%)

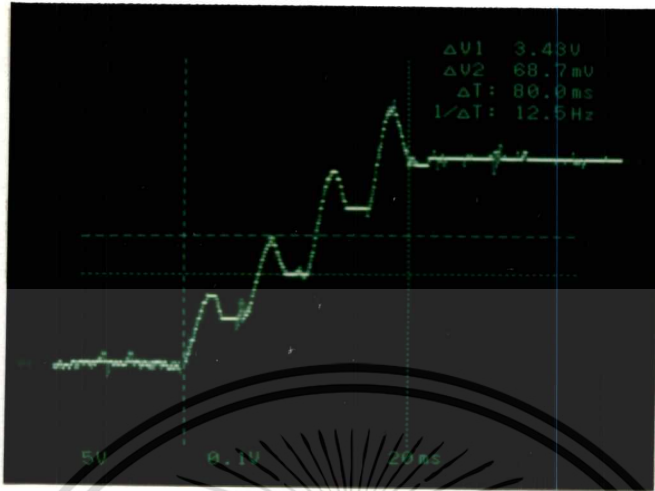
ภาพที่ 106



แสดงลักษณะการเกิดโอเวอร์ชูทของตำแหน่งการเคลื่อนที่ ของสเต็ปปีงมอเตอร์ เมื่อทำงาน ด้วยขนาดสเต็ปปกติ

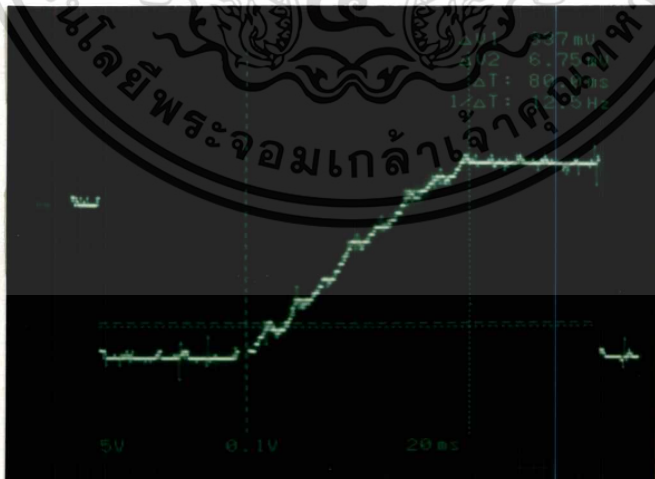
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 107



แสดงลักษณะการเกิดโอเวอร์ชูทของตำแหน่งการเคลื่อนที่ของสตีปปีงมอเตอร์ เมื่อทำงานในโหมดไมโครสตีป ที่ขนาดสตีปเท่ากับ 1/4 ของขนาดสตีปปกติ

ภาพที่ 108



แสดงลักษณะการเกิดโอเวอร์ชูทของตำแหน่งการเคลื่อนที่ของสตีปปีงมอเตอร์ เมื่อทำงานในโหมดไมโครสตีป ที่ขนาดสตีปเท่ากับ 1/8 ของขนาดสตีปปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองควบคุมการทำงานของสเต็ปป์มอเตอร์ ให้ทำงานในโหมดไมโครสเต็ปโดยใช้ สเต็ปป์มอเตอร์ 4 เฟส ชนิดคาร์ลัคแดนซ์แปรค่าได้ ขนาดสเต็ปเท่ากับ 7.5 องศาต่อสเต็ป หรือ 48 สเต็ปต่อรอบ แบ่งขนาดสเต็ปปกติออกเป็น 1/4, 1/8, 1/16 และ 1/32 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ หรือ จำนวนสเต็ปต่อรอบเป็น 192, 384, 768 และ 1,536 สเต็ปต่อรอบตามลำดับ โดยเปรียบเทียบผลความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสเต็ปที่ได้เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณอ้างอิงที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเต็ปป์มอเตอร์ด้วยสมการซายน์และสมการเชิงเส้นเปรียบเทียบกับหลักการใหม่ที่น่าเสนอคือ การควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง จากผลการทดลองการควบคุมสเต็ปป์มอเตอร์ด้วยหลักการใหม่นี้จะให้ขนาดของไมโครสเต็ปที่ได้เที่ยงตรงกว่าเช่นที่ขนาดไมโครสเต็ปเป็น 1/16 เท่าของขนาดสเต็ปปกติ ขนาดสเต็ปที่ต้องการคือ 24.0 mV ช่วงค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดสเต็ปเมื่อควบคุมด้วยสัญญาณซายน์มีค่าระหว่าง -11.5 ถึง 25.7 mV เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณเชิงเส้นมีค่าเท่ากับ -12.3 ถึง 11.0mV และเมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรงจะมีค่าเท่ากับ -4.0 ถึง 6.0 mV ตามลำดับ และจำนวนของสเต็ปย่อยที่ต้องการที่มีขนาดถูกต้องนั้นเมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรงจะมีจำนวนสูงเช่น ที่ขนาดสเต็ปเท่ากับ 1/16 เท่าของขนาดสเต็ปปกติ จะมีถึง 9 สเต็ป ในขณะที่เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณซายน์และควบคุมด้วยสัญญาณเชิงเส้นจำนวนของสเต็ปย่อยที่ต้องการที่มีขนาดถูกต้องนั้นจะมีจำนวนต่ำมากคือเท่ากับ 0 และ 1 สเต็ปตามลำดับ ดังแสดงผลการเปรียบเทียบขนาดไมโครสเต็ปที่ได้และค่าความคลาดเคลื่อนจากขนาดสเต็ปที่ต้องการด้วยตารางและกราฟดังต่อไปนี้

เมื่อควบคุมให้สเต็ปป์มอเตอร์ทำงานที่ขนาดไมโครสเต็ปเท่ากับ 1/8 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ โดยขนาดสเต็ปที่ต้องการคือ 48 mV

ตารางที่ 16

แสดงการเปรียบเทียบขนาดไมโครสเต็ปที่ได้และค่าความคลาดเคลื่อน เมื่อสเต็ปปิ้งมอเตอร์
ทำงานที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/8 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ โดยตาราง (ก) เมื่อควบคุม
ด้วยสัญญาณชายนี และ (ข) เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณเชิงเส้น

สัญญาณชายนี								
สเต็ปที่	1	2	3	4	5	6	7	8
ขนาดสเต็ปที่วัดได้(mV)	48.2	88.2	66.2	46.2	22.2	16.2	34.2	44.2
ค่าความคลาดเคลื่อน(mV)	0.2	46.2	18.2	-1.8	-25.8	-31.8	-13.8	-3.8
ช่วงความคลาดเคลื่อน	= -31.8 ถึง 46.2 mV (-66.25% ถึง 83.75%)							
จำนวนสเต็ปที่มีขนาดถูกต้อง	= 0 สเต็ป							

(ก)

สัญญาณเชิงเส้น								
สเต็ปที่	1	2	3	4	5	6	7	8
ขนาดสเต็ปที่วัดได้(mV)	38.0	58.2	52.2	40.2	36.2	50.2	42.2	54.2
ค่าความคลาดเคลื่อน(mV)	-10.0	10.2	4.2	-7.8	-11.8	2.2	-5.8	6.2
ช่วงความคลาดเคลื่อน	= -11.8 ถึง 10.2 mV (-24.58% ถึง 21.25%)							
จำนวนสเต็ปที่มีขนาดถูกต้อง	= 0 สเต็ป							

(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 16(ต่อ)

แสดงการเปรียบเทียบขนาดไมโครสเต็ปที่ได้และค่าความคลาดเคลื่อน เมื่อสเต็ปปั๊มมอเตอร์
ทำงานที่ขนาดสเต็ปเป็น $1/8$ เท้า ของขนาดสเต็ปปกติ โดยตาราง
(ค) เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

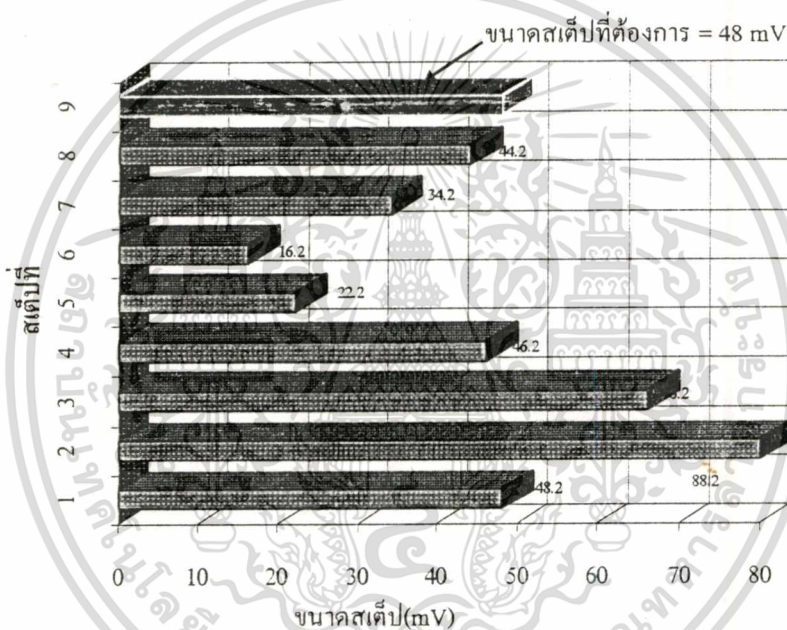
สัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง								
สเต็ปที่	1	2	3	4	5	6	7	8
ขนาดสเต็ปที่วัดได้(mV)	46.0	48.0	46.0	48.0	48.0	54.5	47.0	48.0
ค่าความคลาดเคลื่อน(mV)	-2.0	0.0	-2.0	0.0	0.0	6.5	-1.0	0.0
ช่วงความคลาดเคลื่อน	= -2.0 ถึง 6.5 mV (-4.16% ถึง 13.54%)							
จำนวนสเต็ปที่มีขนาดถูกต้อง	= 4 สเต็ป							

(ค)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

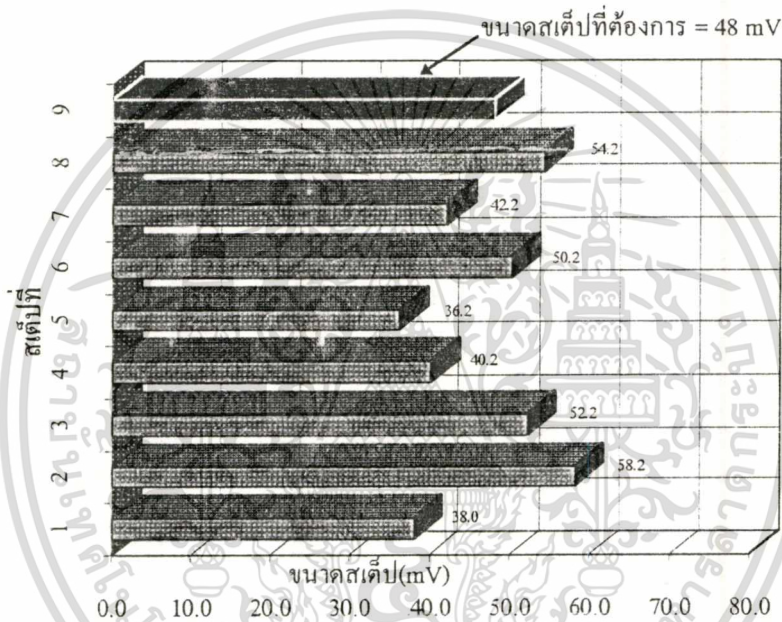
กราฟแสดงความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสเต็ปที่ได้จากตารางที่ 16

ภาพที่ 109



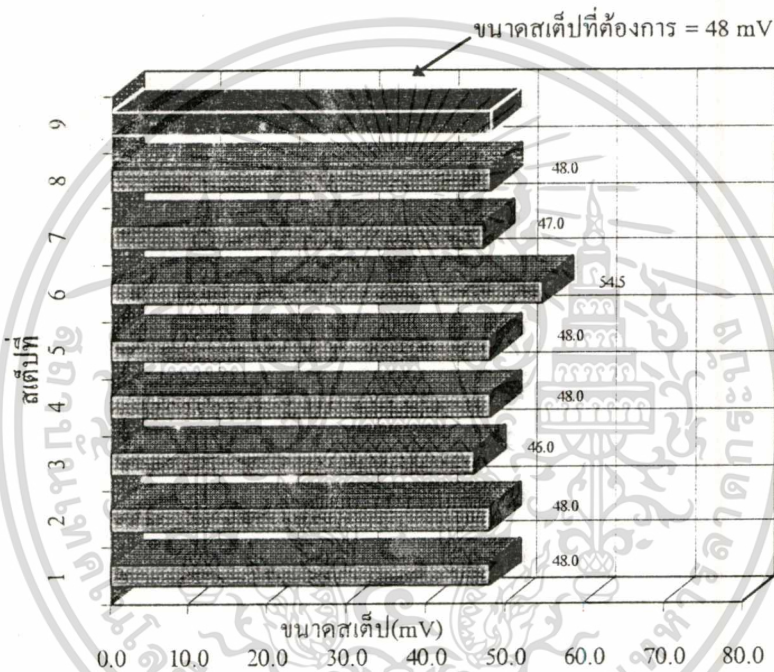
กราฟแสดงความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสเต็ปที่ได้ เมื่อควบคุมให้สเต็ปปิ้งมอเตอร์ทำงานที่ขนาดสเต็ปเท่ากับ 1/8 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วย สัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T-θ ด้วยสมการชายน์

ภาพที่ 109(ต่อ)



กราฟแสดงความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสเต็มที่ได้ เมื่อควบคุมให้สเต็มปิ้งมอเตอร์ทำงานที่ขนาดสเต็มเท่ากับ 1/8 เท่า ของขนาดสเต็มปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ด้วยสมการเชิงเส้น

ภาพที่ 109(ต่อ)



กราฟแสดงความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสเต็มที่ได้ เมื่อควบคุมให้สเต็มปิ้งมอเตอร์ทำงานที่ขนาดสเต็มเท่ากับ 1/8 เท่า ของขนาดสเต็มปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณควบคุมที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

เมื่อควบคุมให้สเต็ปป์มอเตอร์ทำงานที่ขนาดไมโครสเต็ปเท่ากับ 1/16 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ โดยขนาดสเต็ปที่ต้องการคือ 24 mV

ตารางที่ 17

แสดงการเปรียบเทียบขนาดไมโครสเต็ปที่ได้และค่าความคลาดเคลื่อน เมื่อสเต็ปป์มอเตอร์ทำงานที่ขนาดสเต็ปเป็น 1/16 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ โดยตาราง (ก) เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณชานน์ (ข) เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณเชิงเส้น และ (ค) เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

สัญญาณชานน์																
สเต็ปที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ขนาดสเต็ปที่วัดได้(mV)	23.5	49.7	33.7	32.5	26.2	27.2	14.2	15.5	13.5	12.5	22	15	23.2	25.0	25.2	25.2
ค่าความคลาดเคลื่อน(mV)	-51	25.7	9.7	-8.5	2.2	3.2	-9.8	-8.5	-10.5	-11.5	-2	-9	-0.8	1.0	1.2	1.2
ช่วงความคลาดเคลื่อน	= -11.5 ถึง 25.7 mV (-47.92% ถึง 107.08%)															
จำนวนสเต็ปที่มีขนาดถูกต้อง	= 0 สเต็ป															

(ก)

สัญญาณเชิงเส้น																
สเต็ปที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ขนาดสเต็ปที่วัดได้(mV)	14.0	35.0	25.7	33.5	29.7	27.5	23.7	25.5	16	24	11.7	23.0	25.5	25.5	25.5	15.5
ค่าความคลาดเคลื่อน(mV)	-10	11	1.7	9.5	5.7	3.5	-0.3	1.5	-8	0	-12.3	-1	1.5	1.5	1.5	-8.5
ช่วงความคลาดเคลื่อน	= -12.3 ถึง 11.0 mV (-51.25% ถึง 45.83%)															
จำนวนสเต็ปที่มีขนาดถูกต้อง	= 1 สเต็ป															

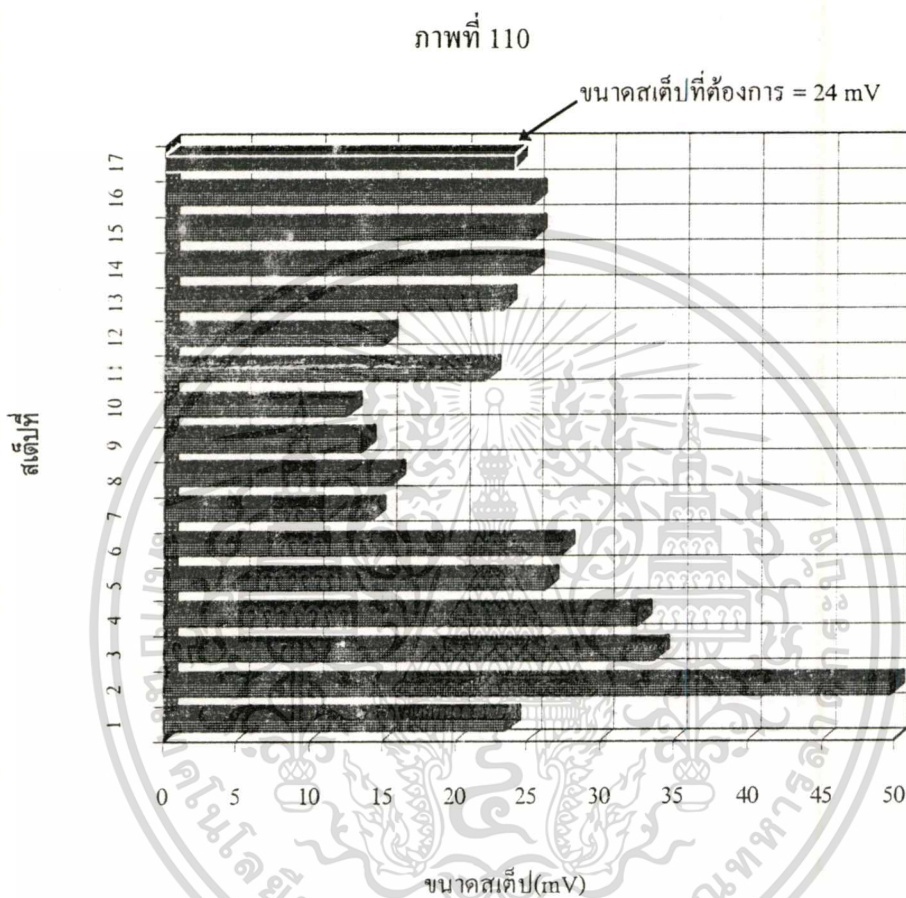
(ข)

สัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง																
สเต็ปที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ขนาดสเต็ปที่วัดได้(mV)	20.0	24.0	24.0	24.0	24.0	23.0	30.0	24.0	24.0	28.0	25.0	24.0	24.0	27.0	23.0	24.0
ค่าความคลาดเคลื่อน(mV)	-4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1.0	6.0	0.0	0.0	4.0	1.0	0.0	0.0	3.0	-1.0	0.0
ช่วงความคลาดเคลื่อน	= -4.0 ถึง 6.0 mV (-16.66% ถึง 25.0%)															
จำนวนสเต็ปที่มีขนาดถูกต้อง	= 9 สเต็ป															

(ค)

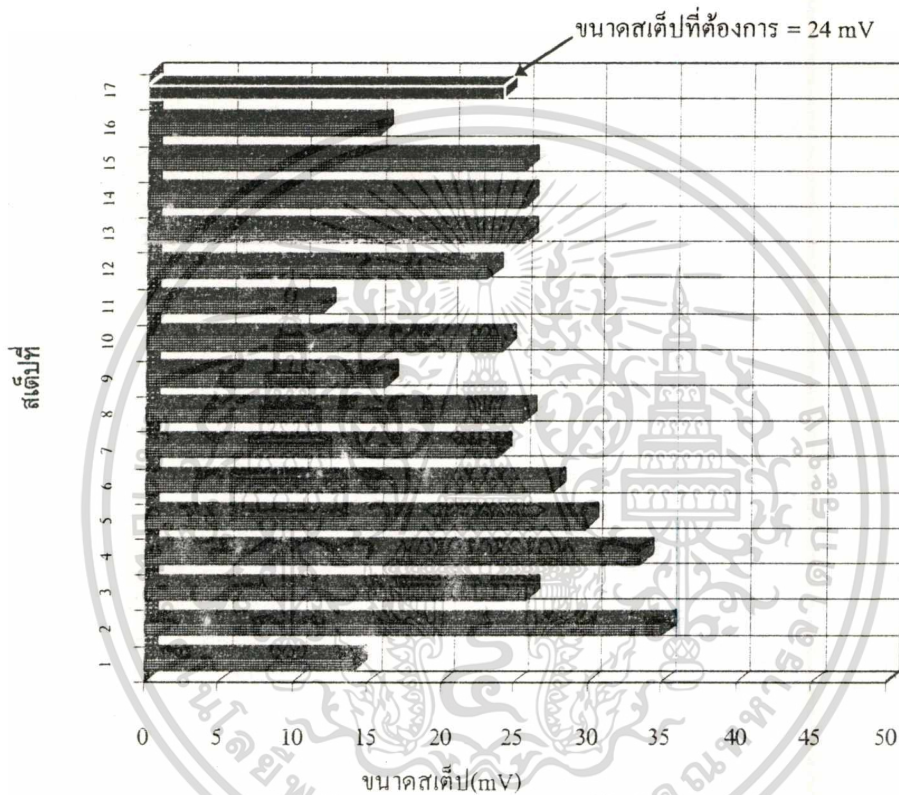
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสเต็ปที่ได้จากตารางที่ 17



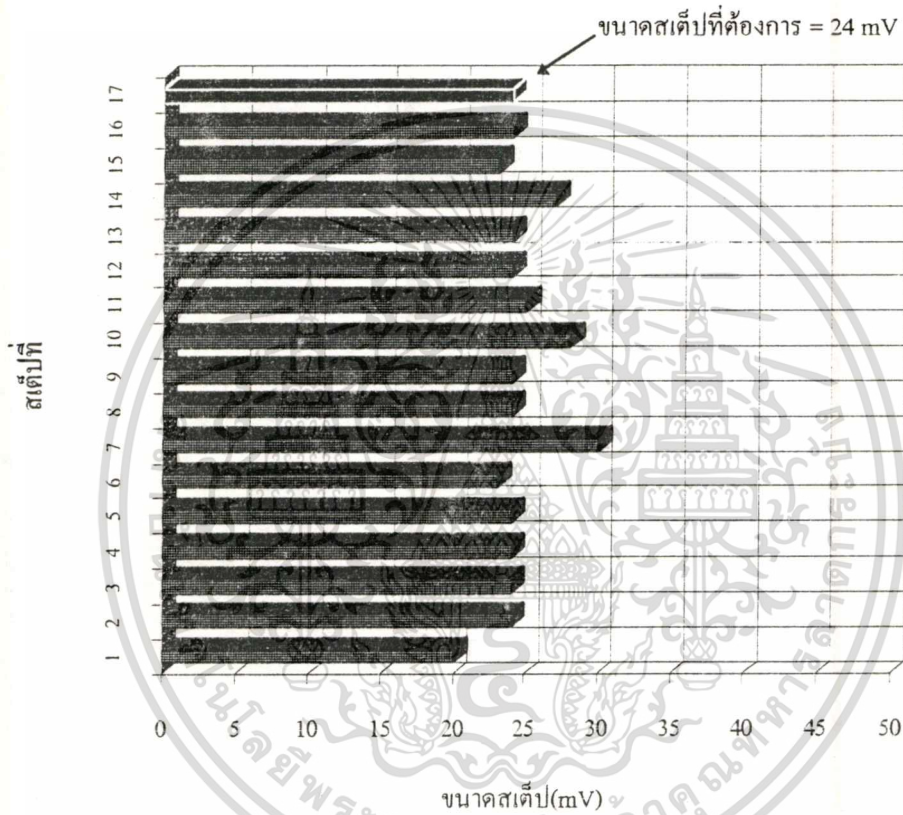
กราฟแสดงความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสเต็ปที่ได้ เมื่อควบคุมให้สเต็ปปิ้งมอเตอร์ทำงานที่ขนาดสเต็ปเท่ากับ 1/16 เท่า ของขนาดสเต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ด้วยสมการซาซัน

ภาพที่ 110(ต่อ)



กราฟแสดงความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสแต็ปที่ได้ เมื่อควบคุมให้สแต็ปปีงมอเตอร์ทำงานที่ขนาดสแต็ปเท่ากับ $1/16$ เท่า ของขนาดสแต็ปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะ T- θ ด้วยสมการเชิงเส้น

ภาพที่ 110(ต่อ)



กราฟแสดงความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสตีปที่ได้ เมื่อควบคุมให้สตีปปีงมอเตอร์ทำงานที่ขนาดสตีปเท่ากับ 1/16 เท่า ของขนาดสตีปปกติ เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณควบคุมที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

ความสามารถในการลดโอเวอร์ชูท ของตำแหน่งการเคลื่อนที่แกนหมุนของสแต็ปปีงมอเตอร์

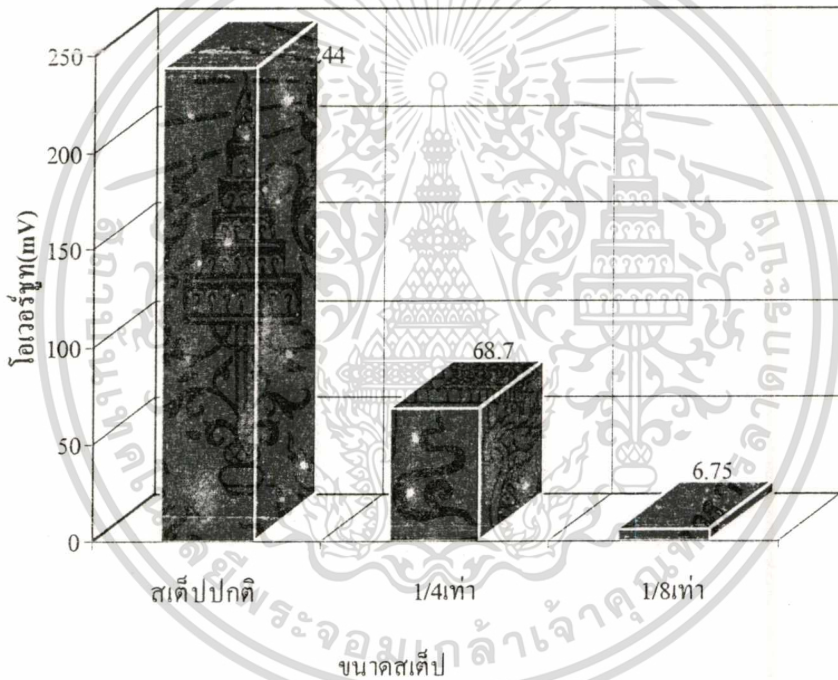
เมื่อสแต็ปปีงมอเตอร์ทำงานในโหมดไมโครสแต็ป จะสามารถลดปัญหาการเกิดโอเวอร์ชูทได้มาก ดังแสดงตัวอย่างความสามารถในการลดโอเวอร์ชูทในตารางที่ 18 และกราฟในภาพที่ 111 กล่าวคือ เมื่อสแต็ปปีงมอเตอร์ทำงานที่ขนาดสแต็ปปกติ ค่าแรงดัน V_p เท่ากับ 244.0 mV ในขณะที่เมื่อควบคุมด้วยหลักการไมโครสแต็ปที่ขนาดสแต็ปเป็น 1/4 และ 1/8 เท่าของขนาดสแต็ปปกติ ค่าแรงดัน V_p เท่ากับ 68.7 mV และ 6.75 mV ตามลำดับ

ตารางที่ 18

แสดงค่าแรงดัน V_p ของโอเวอร์ชูทที่เกิดขึ้นเมื่อสแต็ปปีงมอเตอร์ทำงานด้วยขนาดสแต็ปปกติ เปรียบเทียบกับเมื่อควบคุมให้ทำงานในโหมดไมโครสแต็ปที่ขนาดสแต็ปเป็น 1/4 และ 1/8 เท่า

ขนาดสแต็ป	โอเวอร์ชูท (V_p)
ปกติ	244.0 mV(100%)
1/4 เท่า	68.7 m(28.15%)
1/8 เท่า	6.75 mV(2.77%)

ภาพที่ 111



กราฟแสดงความสามารถในการลดโอเวอร์ชูทของสตีลปิ้งมอเตอร์ เมื่อทำงานในโหมด ไมโครสตีล

บทที่ 6

วิจารณ์ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

วิจารณ์ผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอวิธีการควบคุมสเต็ปป์มอเตอร์ให้ทำงานในโหมดไมโครสเต็ปแบบใหม่ คือ การควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง แทนการควบคุมแบบเก่าคือ ควบคุมด้วยสัญญาณชานน์และสัญญาณเชิงเส้นซึ่งได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะแรงบิด T- θ ของสเต็ปป์มอเตอร์ด้วยสมการชานน์และสมการเชิงเส้นตามลำดับ โดยวัตถุประสงค์หลักคือ การปรับปรุงขนาดของไมโครสเต็ปที่ได้ให้มีความเที่ยงตรงสูงขึ้น สามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์หรือประยุกต์ใช้งานได้จริง ซึ่งที่ผ่านมาการควบคุมสเต็ปป์มอเตอร์ให้ทำงานในโหมดไมโครสเต็ปนั้นจะเน้นที่การลดปัญหาการเกิดโอเวอร์ชูทของตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนหมุนสเต็ปป์มอเตอร์เพียงอย่างเดียว

การขับสเต็ปป์มอเตอร์ในโหมดไมโครสเต็ปแบบเดิมนั้น คือ การขับด้วยสัญญาณชานน์และสัญญาณเชิงเส้นนั้น จะได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะแรงบิด T- θ ของสเต็ปป์มอเตอร์ด้วยสมการชานน์และสมการเชิงเส้นตามลำดับ แต่เนื่องจากกราฟคุณลักษณะ T- θ ของสเต็ปป์มอเตอร์ในแต่ละเฟสจะมีลักษณะไม่เหมือนกัน อีกทั้งยังมีลักษณะไม่เชิงเส้นซึ่งไม่เหมาะต่อการคำนวณหาค่าสัญญาณควบคุมในแต่ละเฟสของสเต็ปป์มอเตอร์ด้วยสมการ ตรีโกณมิติเช่นสมการชานน์หรือสมการเชิงเส้น ดังนั้นเมื่อควบคุมสเต็ปป์มอเตอร์ด้วยสัญญาณที่ได้จากการประมาณกราฟคุณลักษณะแรงบิด T- θ นี้ จะทำให้ขนาดไมโครสเต็ปที่ต้องการมีขนาดที่ไม่เที่ยงตรงเท่าที่ควร เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าววิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอวิธีการหาสัญญาณควบคุมเพื่อใช้ควบคุมให้สเต็ปป์มอเตอร์ทำงานในโหมดไมโครสเต็ปแบบใหม่โดยใช้วิธีทดสอบโดยตรงแทนวิธีหาสัญญาณควบคุมด้วยการประมาณกราฟคุณลักษณะแรงบิด T- θ แบบเก่าที่ผ่านมา กล่าวคือ จะใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ ทดสอบหาปริมาณการจ่ายกระแสที่เหมาะสมในแต่ละเฟสเพื่อหาว่า ณ ทุกๆ ตำแหน่งไมโครสเต็ปที่ต้องการนั้น ค่ากระแสในแต่ละเฟสควรมีค่าเป็นเท่าใดก่อนการนำมาใช้ควบคุม สเต็ปป์มอเตอร์ให้ทำงานในโหมดไมโครสเต็ป ดังนั้นเมื่อควบคุมสเต็ปป์มอเตอร์ให้ทำงานในโหมดไมโครสเต็ปด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรงนี้จะให้ความเที่ยงตรงของขนาดสเต็ปป์สูงกว่าเมื่อควบคุมในลักษณะเก่าที่ผ่านมา

ผลของการการทดลองที่ได้นั้น วิธีการใหม่ที่น่าเสนอคือ วิธีควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรงนั้นจะให้ขนาดของไมโครสเต็ปที่ได้สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับหลักการเดิมคือ ควบคุมด้วยสัญญาณชานน์และสัญญาณเชิงเส้น เช่น ที่ขนาดไมโครสเต็ปเป็น 1/16 เท่าของขนาดสเต็ปปกติ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดสเต็ปที่ต้องการคือ 24 mV (วัดจากเอาต์พุตของภาคสังเกตุลักษณะของสเต็ป) หลักการใหม่ที่น่าเสนอคือ ควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง ช่วงความผิดพลาดของขนาดสเต็ปที่ได้มีค่าระหว่าง -4.0 mV ถึง 6.0 mV หรือผิดพลาดเท่ากับ -16.66% ถึง 25.0% ของขนาดสเต็ปที่ต้องการ ควบคุมด้วยสัญญาณเชิงเส้นมีค่าระหว่าง -12.3 mV ถึง 11.0 mV หรือเท่ากับ -51.25% ถึง 45.83% และเมื่อควบคุมด้วยสัญญาณชานี่ ความผิดพลาดของขนาดสเต็ปที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง -11.5 mV ถึง 25.7 mV หรือผิดพลาด-47.92% ถึง 107.08% ของขนาดสเต็ปที่ต้องการ อีกทั้งจำนวนไมโครสเต็ปที่ได้ที่มีขนาดไม่ผิดพลาดไปจากขนาดที่ต้องการยังมีจำนวนสูงเมื่อควบคุมด้วยหลักการใหม่ เช่น ที่จำนวนไมโครสเต็ปเป็น 16 สเต็ปของขนาดสเต็ปปกติ จะมีถึง 9 สเต็ป ในขณะที่เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณเชิงเส้นมีเพียงสเต็ปเดียวที่มีขนาดถูกต้อง และเมื่อควบคุมด้วยสัญญาณชานี่ไม่มีขนาดสเต็ปที่ถูกต้องเลย

ข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนาต่อไปในอนาคต

ความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสเต็ปที่ได้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการด้วยกันได้แก่ ชนิดและโครงสร้างของตัวสเต็ปปิ้งมอเตอร์ที่ใช้, ประสิทธิภาพของวงจรที่ใช้ควบคุมปริมาณกระแสในแต่ละเฟสของสเต็ปปิ้งมอเตอร์, ความละเอียดของออปติคัลเอ็นโคดเดอร์ที่ใช้ และลักษณะการควบคุมหรือขับสเต็ปปิ้งมอเตอร์ เป็นต้น

ลักษณะการควบคุมหรือขับสเต็ปปิ้งมอเตอร์ของงานวิจัยชิ้นนี้จะอยู่ในลักษณะรูปเปิด ซึ่งหากพัฒนาต่อไปโดยควบคุมในลักษณะรูปปิดแล้ว ความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสเต็ปที่ได้จะมีค่าสูงขึ้น อีกทั้งการควบคุมสเต็ปปิ้งมอเตอร์ให้ทำงานในโหมดไมโครสเต็ปนั้น ต้นทุนวงจรควบคุมของระบบจะสูงกว่าวงจรควบคุมในโหมดการทำงานปกติมาก ดังนั้นหากสามารถออกแบบวงจรควบคุมของระบบไมโครสเต็ปให้มีประสิทธิภาพสูงโดยใช้ต้นทุนต่ำแล้ว จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน

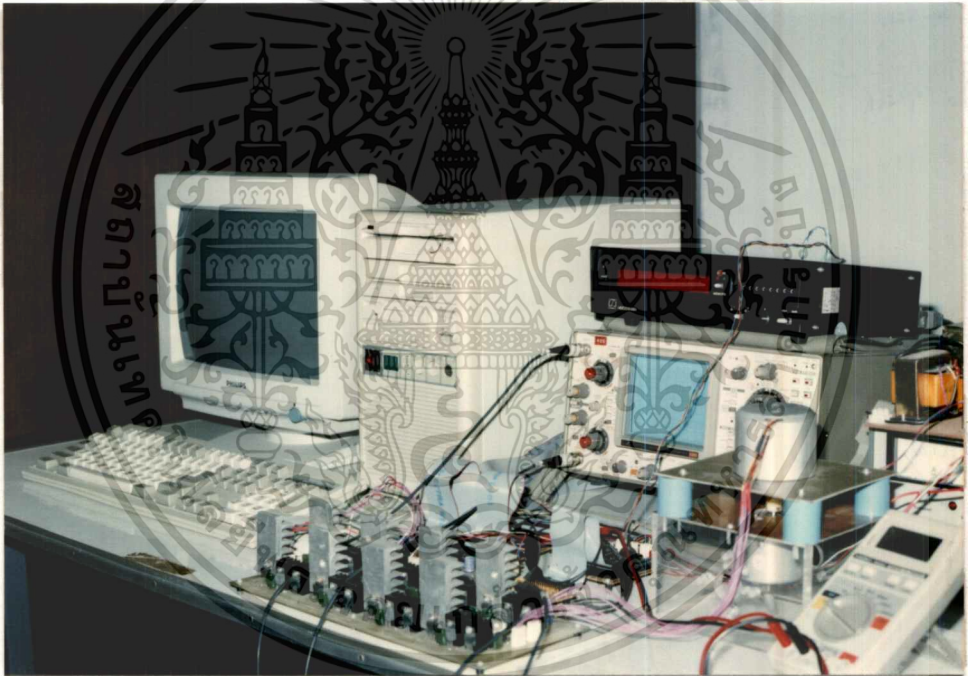
บรรณานุกรม

- [1] Muhammed F. Rahman, Aun-Neow Poo, "An Application Oriented Test Procedure for Designing Microstepping Step Motor Controllers," IEEE Transaction on industrial Electronics, VOL.35, NO.4, November 1988.
- [2] Muhammed F. Rahman, Aun-Neow Poo, "Approaches to Design of Ministepping Step Motor Controllers and Their Accuracy Consideration," IEEE transaction on industrial Electronics, VOL.IE-32, August 1985.
- [3] Takashi Kenjo, "Stepping motor an their microprocessor controls," Claren Press, Oxford, 1986.
- [4] P.P. Acarnley, "Stepping motors : a guild to modern theory and practice," IEE Control Engineering Service 19, Peter Peregrius Ltd., 1982
- [5] โยชิน เปรมปราณีร์ชต์, "ระบบเซอร์โวและอิเล็กทรอนิกส์คอนโทรลมอเตอร์," ตำราชุดวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2533
- [6] วุฒิชัย สังข์กุล "วิธีการหากระแสอ้างอิงเพื่อใช้ควบคุมสเต็ปมอเตอร์ให้ทำงานในโหมดไมโครสเต็ป," วารสารวิศวกรรมสาร, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, ฉบับที่ 4, เมษายน พ.ศ. 2538
- [7] ชาวดี พิษฐ์รัตน์, "การควบคุมสเต็ปมอเตอร์แบบวงจรถัดโดยใช้หลักการของไมโครสเต็ป," คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2536



ส่วนต่างๆ ของระบบที่ใช้ในการวิจัยเรื่องการควบคุมสตีปีงมอเตอร์
ในโหมดไมโครสตีปีด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง

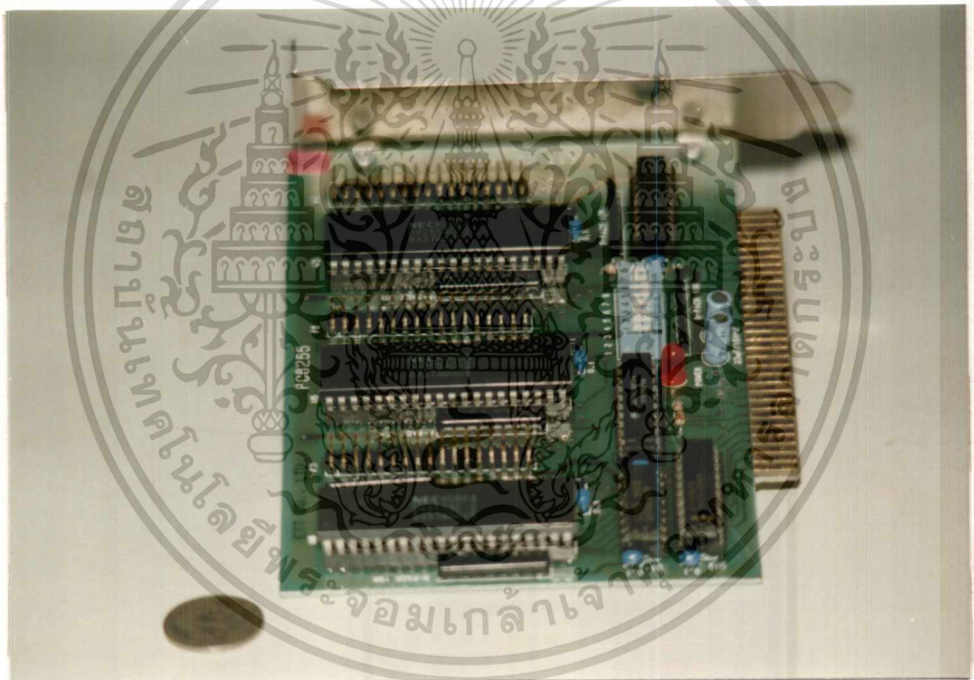
ภาพที่ 113



แสดงระบบ โดยรวมทั้งหมดที่ใช้ในการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

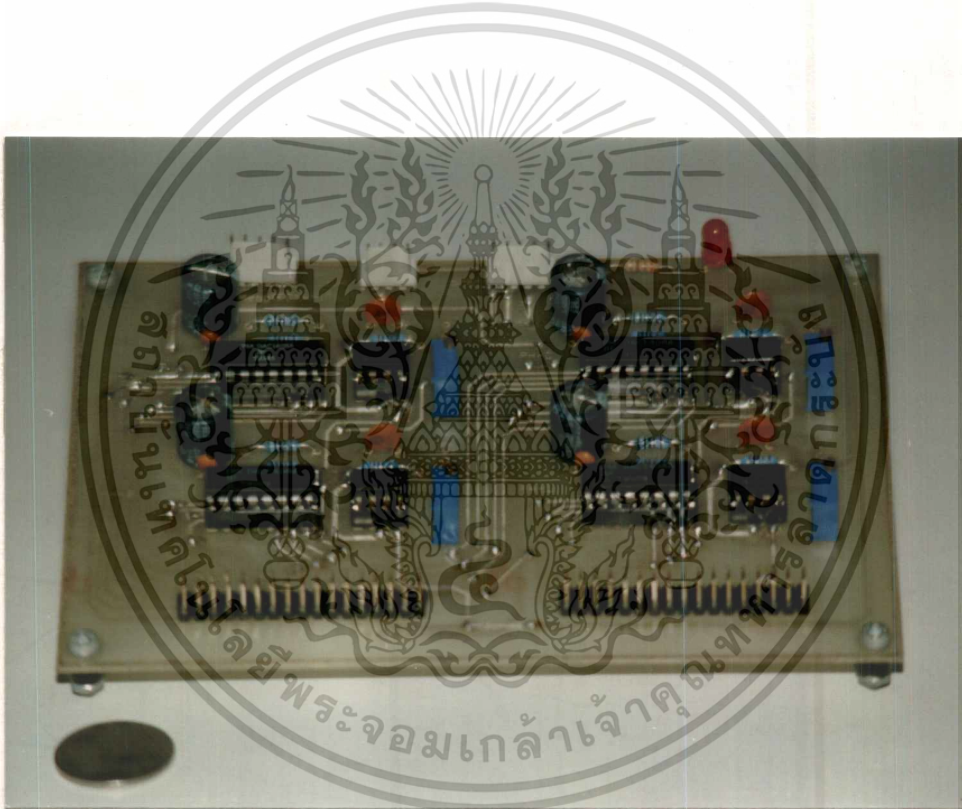
ภาพที่ 114



แสดงส่วนของวงจรที่ใช้อินเตอร์เฟซกับคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

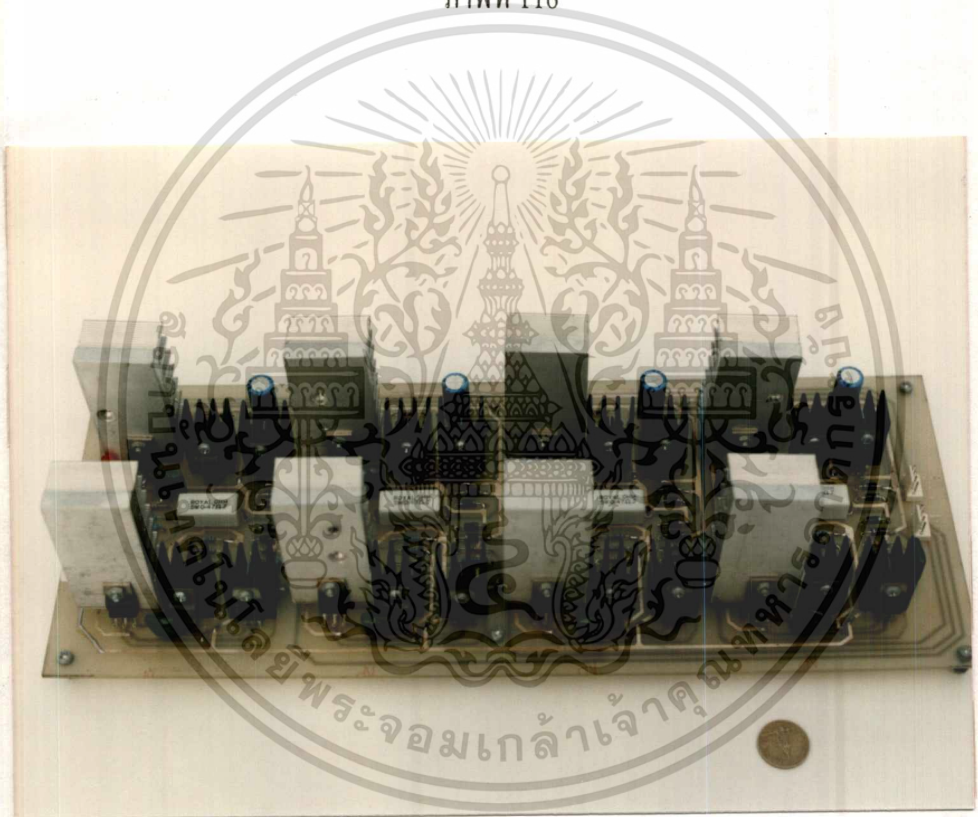
ภาพที่ 115



แสดงวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (DAC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

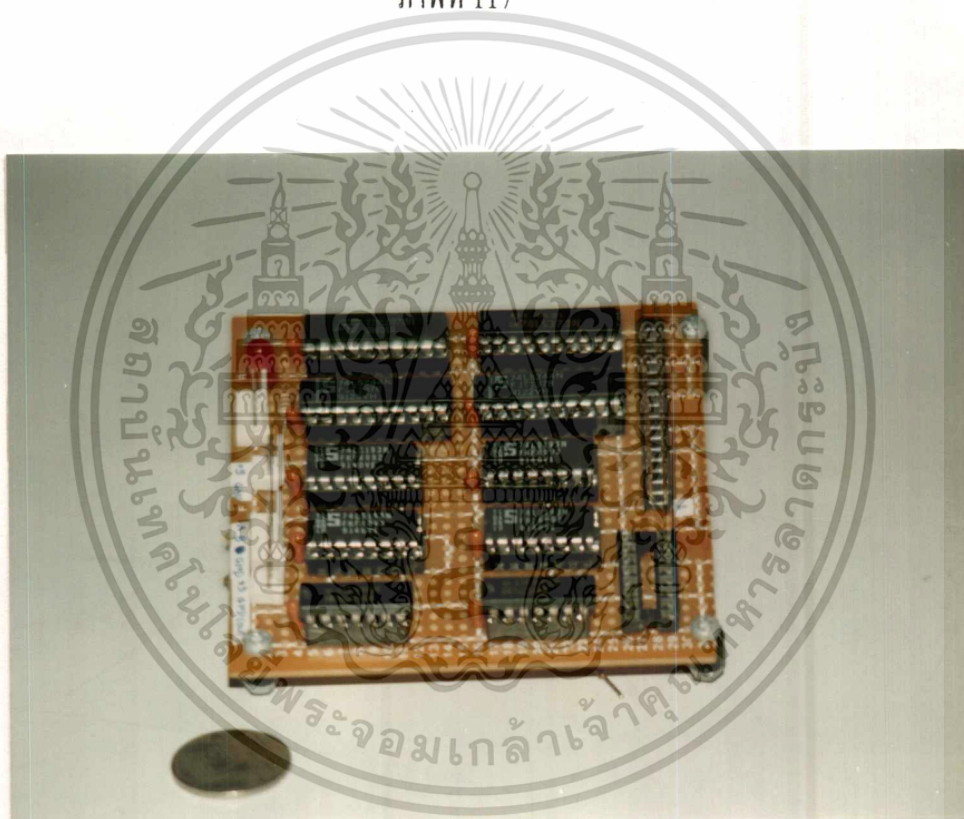
ภาพที่ 116



แสดงวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส (V to I) และภาคขับกำลังสเต็ปิ่งมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

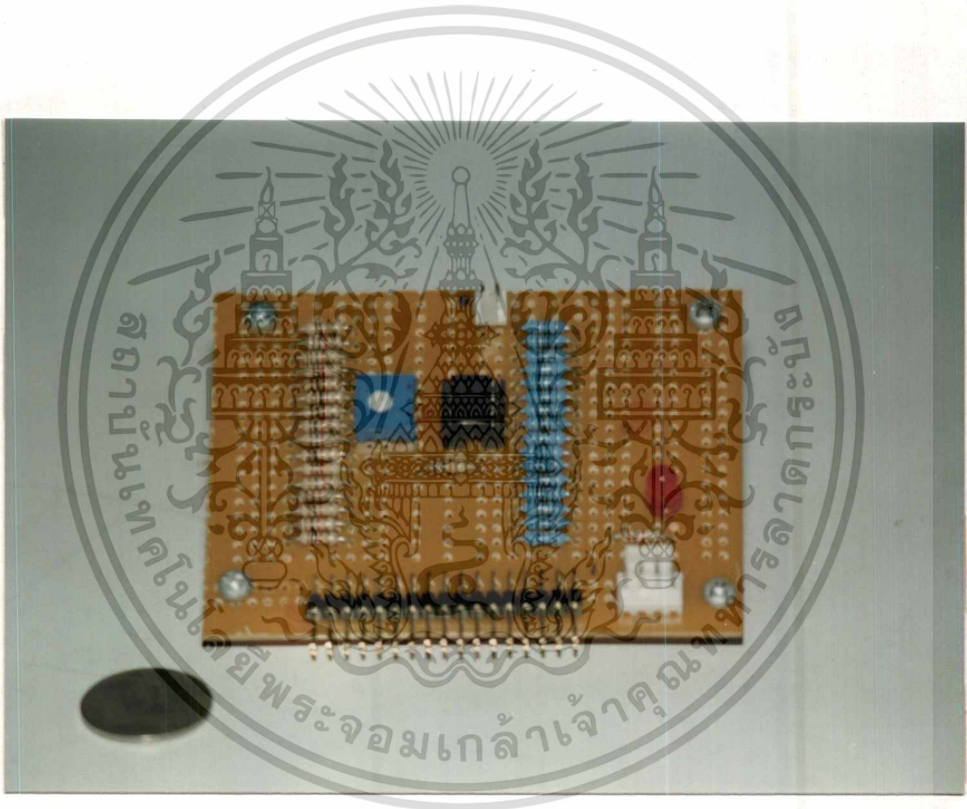
ภาพที่ 117



แสดงวงจรนับ 16 บิต แบบไบโตรีกซ์ขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

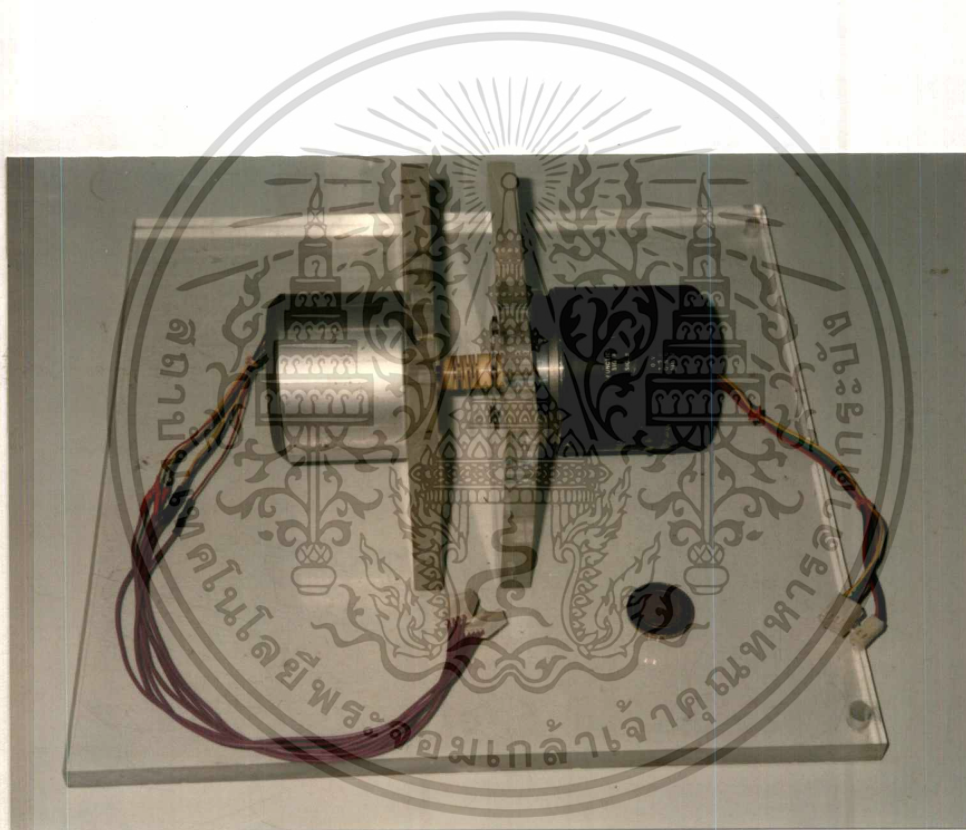
ภาพที่ 118



แสดงวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกแบบ R-2R ที่ใช้สังเกตลักษณะการเคลื่อนที่ของ
สตีป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 119



แสดงลักษณะของสตีปปีงมอเตอร์และออฟติคอลลีน โค้ดเดอร์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลของสแต็ปป์มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. รุ่น ID27
2. ผลิตโดยบริษัท ฟิลิปส์
3. ชนิดคาร์ลัคแดนซ์แปรค่าได้
4. ขนาดสแต็ปเท่ากับ 7.5 องศาต่อสแต็ป
5. จำนวนเฟสเท่ากับ 4 เฟส
6. ค่าพิคตทางแรงดันเท่ากับ 2.25 โวลต์ต่อเฟส
7. ค่าพิคตทางกระแสเท่ากับ 1.0 แอมป์ต่อเฟส

ข้อมูลของออฟติคอสเ็นโค้ดเดอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. รุ่น RD 5400-22-1
2. ผลิตโดยบริษัท Nikon
3. ความละเอียดเท่ากับ 5400 พัลส์ต่อรอบ(เท่ากับ 10800 พัลส์ต่อรอบ เมื่อทำงานร่วมกับวงจร

คุณ 2)

4. หน้าที่ของแต่ละขา

ขาที่	หน้าที่
1	สัญญาณ A
2	-
3	สัญญาณ B
4	-
5	-
6	-
7	0V
8	+5V
9	GND
10	สัญญาณ Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
//-----//
//
//          "Direct Test"
//  This program is designed to find the current references of stepping motor
//          working in microstep excitation mode based on direct test.
//          Designed by
//          Wutthichai Sangkhakul
//          MEng.(EE),KMITL
//-----//
```

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <conio.h>
#include <iostream.h>
#include <dos.h>
#include <math.h>
```

```
#define PH1          0x304
#define PH2          0x302
#define PH3          0x301
#define PH4          0x300
#define STORAGE_PORT 0x30a
#define CONTROL_8255_1 0x303
#define CONTROL_8255_2 0x307
#define CONTROL_8255_3 0x30b
#define DIGIT1_2      0x305
#define DIGIT3_4      0x306
#define DIGIT5_6      0x308
#define DIGIT7_8      0x309
#define NUM_OF_SUBSTEP 8
#define MAX_CURRENT   0xff
#define MIN_CURRENT   0x00
#define DELAY_LOOP    5000
```

```
unsigned long get_position();
int hex_to_dec(int hex_data);
int free_run(int x4_step);
int clear_all_phase();
int delay_time(int delay_loop);
```

```
main()
{
    unsigned vary_down_phase;
    unsigned stable_phase;
    unsigned vary_up_phase;
    unsigned out_of_group_phase;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

unsigned long all_left_post[MAX_CURRENT+1];
unsigned long all_right_post[MAX_CURRENT+1];
unsigned long left_ref_post[(NUM_OF_SUBSTEP/2)+1];
unsigned long right_ref_post[(NUM_OF_SUBSTEP/2)+1];
unsigned long left_half_stepsize,left_substep_size;
unsigned long right_half_stepsize,right_substep_size;
unsigned long max_error,temp_error;
unsigned long left_min_error[(NUM_OF_SUBSTEP/2)+1];
unsigned long right_min_error[(NUM_OF_SUBSTEP/2)+1];
unsigned long error_tbl[8][(NUM_OF_SUBSTEP/2)+1];
int substep,ref_num;
int left_i_ref[(NUM_OF_SUBSTEP/2)+1];
int right_i_ref[(NUM_OF_SUBSTEP/2)+1];
int current_ref_tbl[8][(NUM_OF_SUBSTEP/2)+1];
int current,temp_current;
int group,tbl_num=0;
char keychk;

outp(CONTROL_8255_1,0x80); //initial 8255 port
outp(CONTROL_8255_2,0x8b);
outp(CONTROL_8255_3,0x92);
outp(STORAGE_PORT,0xff); //disable storage port
clear_all_phase();

clrscr();
free_run(5);

for(group=1;group<=4;group++){
if(group==1){
    vary_down_phase    = PH3;
    stable_phase       = PH4;
    vary_up_phase      = PH1;
    out_of_group_phase = PH2;
}
else if(group==2){
    vary_down_phase    = PH4;
    stable_phase       = PH1;
    vary_up_phase      = PH2;
    out_of_group_phase = PH3;
}
else if(group==3){
    vary_down_phase    = PH1;
    stable_phase       = PH2;
    vary_up_phase      = PH3;
    out_of_group_phase = PH4;
}
else{
    vary_down_phase    = PH2;
    stable_phase       = PH3;

```

```

    vary_up_phase          = PH4;
    out_of_group_phase     = PH1;
}

printf("\nprocessing group of phase %d.....",group);
//start process
outp(stable_phase,0xff);
outp(vary_up_phase,0x00);
outp(out_of_group_phase,0x00);
delay(500);

//get all left position
for(current=MAX_CURRENT;current>=MIN_CURRENT;current--)
{
    outp(vary_down_phase,current);
    delay(50);
    all_left_post[current] = get_position();
}

//get all right position
for(current=MIN_CURRENT;current<=MAX_CURRENT;current++)
{
    outp(vary_up_phase,current);
    delay(50);
    all_right_post[current] = get_position();
}

//create table of reference position on left size
left_half_stepsize = all_left_post[MIN_CURRENT]-
all_left_post[MAX_CURRENT];
left_half_stepsize = labs(left_half_stepsize);
left_substep_size = left_half_stepsize/NUM_OF_SUBSTEP*2;
for(substep=0;substep<=NUM_OF_SUBSTEP/2;substep++)
{

left_ref_post[substep]=all_left_post[MAX_CURRENT]+(left_substep_size*substep);
}

//create table of reference position on right size
right_half_stepsize = all_right_post[MAX_CURRENT]-
all_right_post[MIN_CURRENT];
right_half_stepsize = labs(right_half_stepsize);
right_substep_size = right_half_stepsize/NUM_OF_SUBSTEP*2;
for(substep=0;substep<=NUM_OF_SUBSTEP/2;substep++)
{

right_ref_post[substep]=all_right_post[MIN_CURRENT]+(right_substep_size*substep);
}
}
printf("done");

```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

//find current reference of left size
for(ref_num=0;ref_num<=NUM_OF_SUBSTEP/2;ref_num++)
{
    left_min_error[ref_num] = left_ref_post[ref_num]-
all_left_post[MIN_CURRENT];
    left_min_error[ref_num] = labs(left_min_error[ref_num]);
    temp_current = MIN_CURRENT;
    temp_error = left_min_error[ref_num];
    for(current=MIN_CURRENT;current<=MAX_CURRENT;current++)
    {
        max_error = left_ref_post[ref_num]-all_left_post[current];
        max_error = labs(max_error);
        if(left_min_error[ref_num]>max_error)
        {
            left_min_error[ref_num] = max_error;
            left_i_ref[ref_num] = current;
            temp_current = current;
            temp_error = max_error;
        }
        left_i_ref[ref_num] = temp_current;
        left_min_error[ref_num] = temp_error;
    }
}

//find current reference of right size
for(ref_num=0;ref_num<=NUM_OF_SUBSTEP/2;ref_num++)
{
    right_min_error[ref_num] = right_ref_post[ref_num]-
all_right_post[MAX_CURRENT];
    right_min_error[ref_num] = labs(right_min_error[ref_num]);
    temp_current = MAX_CURRENT;
    temp_error = right_min_error[ref_num];
    for(current=MAX_CURRENT;current>=MIN_CURRENT;current--)
    {
        max_error = right_ref_post[ref_num]-all_right_post[current];
        max_error = labs(max_error);
        if(right_min_error[ref_num]>max_error)
        {
            right_min_error[ref_num] = max_error;
            right_i_ref[ref_num] = current;
            temp_current = current;
            temp_error = max_error;
        }
        right_i_ref[ref_num] = temp_current;
        right_min_error[ref_num] = temp_error;
    }
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

//save current reference and minimum error
//left size
for(ref_num=0;ref_num<=NUM_OF_SUBSTEP/2;ref_num++)
{
    current_ref_tbl[tbl_num][ref_num] = left_i_ref[ref_num];
    error_tbl[tbl_num][ref_num] = left_min_error[ref_num];
}
tbl_num++;
//right size
for(ref_num=0;ref_num<=NUM_OF_SUBSTEP/2;ref_num++)
{
    current_ref_tbl[tbl_num][ref_num] = right_i_ref[ref_num];
    error_tbl[tbl_num][ref_num] = right_min_error[ref_num];
}
tbl_num++;

}
clear_all_phase();
printf("\nprocessing....done");

//display current reference and error
do
{
    clrscr();
    printf("\npress number of reference table which you want to see(0-7)");
    printf("\nor any key number to quit");
    scanf("%d",&tbl_num);
    if(tbl_num<0 || tbl_num>7)
        break;
    printf("\ntable number:%d",tbl_num);
    for(ref_num=0;ref_num<=NUM_OF_SUBSTEP/2;ref_num++)
    {
        printf("\ncurrent reference[%2d] = %2x
hex",ref_num,current_ref_tbl[tbl_num][ref_num]);
        printf("\terror = %2d",error_tbl[tbl_num][ref_num]);
    }
    printf("\npress any key");
    getch();
}
while(tbl_num>=0 && tbl_num<=7);

clrscr();
printf("\npress any key to run stepping motor");
getch();
clrscr();
printf("\nnow! stepping motor is running in D1/%d mode",NUM_OF_SUBSTEP);
printf("\n
press any key to quit");
while(!kbhit()){
    tbl_num = 0;

```

```

for(group=1;group<=4;group++){
  if(group==1){
    vary_down_phase    = PH3;
    stable_phase       = PH4;
    vary_up_phase      = PH1;
    out_of_group_phase = PH2;
  }
  else if(group==2){
    vary_down_phase    = PH4;
    stable_phase       = PH1;
    vary_up_phase      = PH2;
    out_of_group_phase = PH3;
  }
  else if(group==3){
    vary_down_phase    = PH1;
    stable_phase       = PH2;
    vary_up_phase      = PH3;
    out_of_group_phase = PH4;
  }
  else{
    vary_down_phase    = PH2;
    stable_phase       = PH3;
    vary_up_phase      = PH4;
    out_of_group_phase = PH1;
  }

  outp(stable_phase,0xff);
  outp(vary_up_phase,0x00);
  outp(out_of_group_phase,0x00);
  for(ref_num=0;ref_num<=NUM_OF_SUBSTEP/2;ref_num++)
  {
    if(ref_num==0){
      outp(vary_down_phase,MAX_CURRENT);
      delay_time(DELAY_LOOP/2);
    }
    else if(ref_num==NUM_OF_SUBSTEP/2){
      outp(vary_down_phase,MIN_CURRENT);
      delay_time(DELAY_LOOP/2);
    }
    else{
      outp(vary_down_phase,current_ref_tbl[tbl_num][ref_num]);
      delay_time(DELAY_LOOP);
    }
  }
  tbl_num++;
  for(ref_num=0;ref_num<=NUM_OF_SUBSTEP/2;ref_num++)
  {
    if(ref_num==0){
      outp(vary_up_phase,MIN_CURRENT);

```

```

        delay_time(DELAY_LOOP/2);
    }
    else if(ref_num==NUM_OF_SUBSTEP/2){
        outp(vary_up_phase,MAX_CURRENT);
        delay_time(DELAY_LOOP/2);
    }
    else{
        outp(vary_up_phase,current_ref_tbl[tbl_num][ref_num]);
        delay_time(DELAY_LOOP);
    }
}
tbl_num++;
}
}

clear_all_phase();
printf("\n\nmotor is stopped");
getch();
return(0);
}

//-----//
//          get_position()          //
//          read position from shaft encoder //
//-----//
unsigned long get_position()

{
    unsigned long dat_dig1_2,dat_dig3_4;
    unsigned long dat_dig5_6;
    unsigned long valid_post;

    outp(STORAGE_PORT,0x00);          //storage command
    delay(15);
    dat_dig1_2 = inp(DIGIT1_2);        //read position
    dat_dig3_4 = inp(DIGIT3_4);
    dat_dig5_6 = inp(DIGIT5_6);
    outp(STORAGE_PORT,0xff);          //storage release command
    delay(15);

    dat_dig1_2 = hex_to_dec(dat_dig1_2);
    dat_dig3_4 = hex_to_dec(dat_dig3_4);
    dat_dig5_6 = hex_to_dec(dat_dig5_6);

    valid_post = dat_dig1_2+(dat_dig3_4*100)+(dat_dig5_6*10000);

    return(valid_post);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

//-----//
//          hex_to_dec(hex_data)          //
//          convert heximal data to decimal data          //
//-----//
int hex_to_dec(int hex_data)

```

```

{
    int dec_data;
    if(hex_data>=0x90)
        dec_data = hex_data-54;
    else if(hex_data>=0x80)
        dec_data = hex_data-48;
    else if(hex_data>=0x70)
        dec_data = hex_data-42;
    else if(hex_data>=0x60)
        dec_data = hex_data-36;
    else if(hex_data>=0x50)
        dec_data = hex_data-30;
    else if(hex_data>=0x40)
        dec_data = hex_data-24;
    else if(hex_data>=0x30)
        dec_data = hex_data-18;
    else if(hex_data>=0x20)
        dec_data = hex_data-12;
    else if(hex_data>=0x10)
        dec_data = hex_data-6;
    else dec_data = hex_data;

    return(dec_data);
}

```

```

//-----//
//          free_run(x4_step)          //
//          run stepping motor with defined step          //
//          48 steps = 1 round          //
//-----//

```

```

int free_run(int x4_step)
{
    int loop;
    for(loop=1;loop<=x4_step;loop++)
    {
        outp(PH1,0xff);outp(PH2,0x00);
        outp(PH3,0x00);outp(PH4,0x00);
        delay(50);
        outp(PH1,0x00);outp(PH2,0xff);
        outp(PH3,0x00);outp(PH4,0x00);
        delay(50);
        outp(PH1,0x00);outp(PH2,0x00);
    }
}

```

```

    outp(PH3,0xff);outp(PH4,0x00);
    delay(50);
    outp(PH1,0x00);outp(PH2,0x00);
    outp(PH3,0x00);outp(PH4,0xff);
    delay(50);
}
    outp(PH1,0xff);outp(PH2,0x00);
    outp(PH3,0x00);outp(PH4,0x00);
    delay(50);
return(0);
}

//-----//
//                               clear_all_phase()                               //
//-----//
int clear_all_phase()
{
    outp(PH1,0x00);outp(PH2,0x00);
    outp(PH3,0x00);outp(PH4,0x00);
    delay(50);

    return(0);
}

//-----//
//                               delay_time()                               //
//-----//
int delay_time(int delay_loop)

{
    int loop_count;
    for(loop_count=1;loop_count<=delay_loop;loop_count++);
    //nothing to do
    return(0);
}
//-----//

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

//-----//
//          “Direct tested 1:16 step response observer”          //
//    This program designed for observed the step response of stepping motor by //
//drives the stepping motor in microstep excitation mode with Direct tested signal 1:16//
//-----//
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <dos.h>
#include <math.h>
#include <iostream.h>

#define PH1          0x300
#define PH2          0x301
#define PH3          0x302
#define PH4          0x304
#define STORAGE_PORT 0x30a
#define COUNTER_CTRL 0X309
#define CONTROL_8255_1 0x303
#define CONTROL_8255_2 0x307
#define CONTROL_8255_3 0x30b

int clear_counter();
int clear_all_phase();
int latch_counter();
int delay_time(int delay_loop);
int clear(int t_clear);
int latch(int t_latch);

int main(void)
{
    //declare port No.
    outp(CONTROL_8255_1,0x80); //initial 8255 port
    outp(CONTROL_8255_2,0x8b);
    outp(CONTROL_8255_3,0x90);
    outp(STORAGE_PORT,0xff); //disable storage port

    clrscr();
    clear_counter();
    clear_all_phase();

    int cnt;
    int data1[64] = {0,15,23,36,52,69,89,109,128,143,159,175,
191,207,223,239,255,239,223,207,191,175,
159,143,128,109,90,69,57,38,31,15,0,0,0,
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
0,0,0,0,0,0,0,0};

    int data2[64] = {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,15,23,
36,52, 69,89,109,128,143,159,175,191,207,
223,239,255,239, 223,207,191,175,159,143,
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

        delay(20);
        latch(25);
    }
}
clrscr();
clear_all_phase();
clear_counter();

return(0);
}
//-----//
//                clear_all_phase()                //
//-----//
int clear_all_phase()
{
    outp(PH1,0x00);outp(PH2,0x00);
    outp(PH3,0x00);outp(PH4,0x00);
    delay(1);

    return(0);
}
//-----//
//                delay_time()                //
//-----//
int delay_time(int delay_loop)
{
    int loop_count;
    for(loop_count=1;loop_count<=delay_loop;loop_count++);
    //do nothing
    return(0);
}
//-----//
//                clear_counter()                //
//-----//
int clear_counter()
{
    outp(COUNTER_CTRL,0x03);                //clear counter
    delay_time(10);
    outp(COUNTER_CTRL,0x02);
    delay_time(10);
    return(0);
}
//-----//
//                latch_counter()                //
//-----//
int latch_counter()
{
    outp(COUNTER_CTRL,0x00);                //Latch

```

```

    delay(45);                                //blank Hi
    outp(COUNTER_CTRL,0x02);
    return(0);
}
//-----//
//                latch()                    //
//-----//
int latch(int t_latch)
{
    outp(COUNTER_CTRL,0x00);                  //Latch
    delay(t_latch);                          //blank Hi
    outp(COUNTER_CTRL,0x02);
    return(0);
}
//-----//
//                clear()                    //
//-----//
int clear(int t_clear)
{
    outp(COUNTER_CTRL,0x03);                  //clear counter
    delay_time(t_clear);
    outp(COUNTER_CTRL,0x02);
    delay_time(t_clear);
    return(0);
}
//-----//

```



```

        latch(25);
    }
}
clrscr();
clear_all_phase();
clear_counter();

return(0);
}
//-----//
//                clear_all_phase()                //
//-----//
int clear_all_phase()
{
    outp(PH1,0x00);outp(PH2,0x00);
    outp(PH3,0x00);outp(PH4,0x00);
    delay(1);

    return(0);
}
//-----//
//                delay_time()                //
//-----//
int delay_time(int delay_loop)
{
    int loop_count;
    for(loop_count=1;loop_count<=delay_loop;loop_count++);
    //do nothing
    return(0);
}
//-----//
//                clear_counter()                //
//-----//
int clear_counter()
{
    outp(COUNTER_CTRL,0x03);                //clear counter
    delay_time(10);
    outp(COUNTER_CTRL,0x02);
    delay_time(10);
    return(0);
}
//-----//
//                latch_counter()                //
//-----//
int latch_counter()
{
    outp(COUNTER_CTRL,0x00);                //Latch
    delay(45);                               //blank Hi

```

เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่แนะนำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    outp(COUNTER_CTRL,0x02);
    return(0);
}
//-----//
//                latch()                //
//-----//
int latch(int t_latch)
{
    outp(COUNTER_CTRL,0x00);           //Latch
    delay(t_latch);                   //blank Hi
    outp(COUNTER_CTRL,0x02);
    return(0);
}
//-----//
//                clear()                //
//-----//
int clear(int t_clear)
{
    outp(COUNTER_CTRL,0x03);           //clear counter
    delay_time(t_clear);
    outp(COUNTER_CTRL,0x02);
    delay_time(t_clear);
    return(0);
}
//-----//

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


```

        latch(25);
    }
}
clrscr();
clear_all_phase();
clear_counter();

return(0);
}
//-----//
//                clear_all_phase()                //
//-----//
int clear_all_phase()
{
    outp(PH1,0x00);outp(PH2,0x00);
    outp(PH3,0x00);outp(PH4,0x00);
    delay(1);

    return(0);
}
//-----//
//                delay_time()                //
//-----//
int delay_time(int delay_loop)
{
    int loop_count;
    for(loop_count=1;loop_count<=delay_loop;loop_count++);
    //do nothing
    return(0);
}
//-----//
//                clear_counter()                //
//-----//
int clear_counter()
{
    outp(COUNTER_CTRL,0x03);                //clear counter
    delay_time(10);
    outp(COUNTER_CTRL,0x02);
    delay_time(10);
    return(0);
}
//-----//
//                latch_counter()                //
//-----//
int latch_counter()
{
    outp(COUNTER_CTRL,0x00);                //Latch
    delay(45);                               //blank Hi

```

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    outp(COUNTER_CTRL,0x02);
    return(0);
}
//-----//
//                latch()                //
//-----//
int latch(int t_latch)
{
    outp(COUNTER_CTRL,0x00);           //Latch
    delay(t_latch);                   //blank Hi
    outp(COUNTER_CTRL,0x02);
    return(0);
}
//-----//
//                clear()                //
//-----//
int clear(int t_clear)
{
    outp(COUNTER_CTRL,0x03);           //clear counter
    delay_time(t_clear);
    outp(COUNTER_CTRL,0x02);
    delay_time(t_clear);
    return(0);
}
//-----//

```



```

printf("\n\n\t PRESS ANY KEY TO STOP MOTOR");
while(!kbhit()){
    //exitation
    for(int d_count=0;d_count<4;d_count++){
        outp(PH1,data1[d_count]);
        outp(PH2,data2[d_count]);
        outp(PH3,data3[d_count]);
        outp(PH4,data4[d_count]);
        delay(80);
        latch(50);
        clear(5);
        latch(50);
    }
}
clear_counter();
clear_all_phase();
clrscr();
return(1);
}
//-----//
//                clear_all_phase()                //
//-----//
int clear_all_phase()
{
    outp(PH1,0x00);outp(PH2,0x00);
    outp(PH3,0x00);outp(PH4,0x00);
    delay(1);

    return(0);
}
//-----//
//                delay_time()                //
//-----//
int delay_time(int delay_loop)
{
    int loop_count;
    for(loop_count=1;loop_count<=delay_loop;loop_count++);
    //do nothing
    return(0);
}
//-----//
//                clear_counter()                //
//-----//
int clear_counter()
{
    outp(COUNTER_CTRL,0x03);
    delay_time(10);
    outp(COUNTER_CTRL,0x02);
    delay_time(10);
}

```

```

        return(0);
    }
//-----//
//                latch_counter()                //
//-----//
int latch_counter()
{
    outp(COUNTER_CTRL,0x00);           //Latch
    delay(45);                         //blank Hi
    outp(COUNTER_CTRL,0x02);
    return(0);
}
//-----//
//                latch()                //
//-----//
int latch(int t_latch)
{
    outp(COUNTER_CTRL,0x00);           //Latch
    delay(t_latch);                   //blank Hi
    outp(COUNTER_CTRL,0x02);
    return(0);
}
//-----//
//                clear()                //
//-----//
int clear(int t_clear)
{
    outp(COUNTER_CTRL,0x03);           //clear counter
    delay_time(t_clear);
    outp(COUNTER_CTRL,0x02);
    delay_time(t_clear);
    return(0);
}
//-----//

```




ISSN 0125-0523

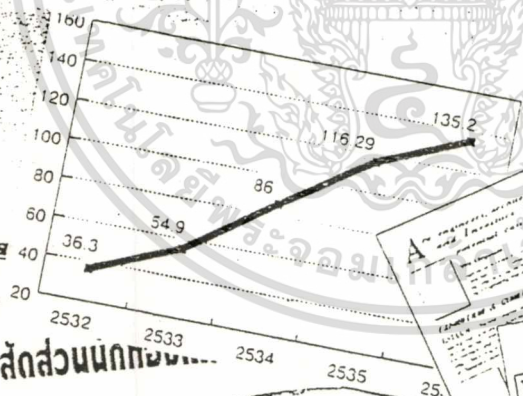
THAILAND ENGINEERING JOURNAL ปีที่ 48 เล่มที่ 4 เมษายน 2538

รวม 40 หน้า

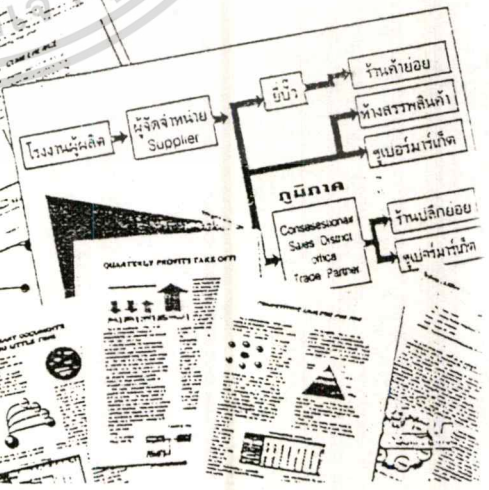
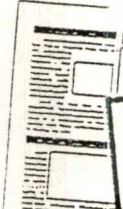
วิศวกรรมศาสตร์

ISO 9000

- สถาบันประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุมการสอบหรือไม่
- คุณสมบัติการบุคคลศาสตร์ของนอร์ดำ
- ระบบซีเอ็มเอทเคอบเสรินเสินโยปาน
- ระบบเอกสารในการบริหารคุณภาพตามระบบ ISO 9000
- การใช้ประโยชน์ใหม่ของภาคทึบจากโรงงานขนาดสาทรน



สัดส่วนนักของ...



The 15th International Exhibition and Conference on Engineering and Technology
18-21 August 1995
TECHNOLOGY FOR MEGA PROJECTS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการหากระแสอ้างอิงเพื่อใช้ควบคุมสเต็ปปีง

มอเตอร์ให้ทำงานในโหมดไมโครสเต็ป

Approaches to determine current references for stepping motor working in microstep excitation mode

วุฒิชัย สังขกุล

นักศึกษาระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ดร.โยธิน เปรมปราณีรัชต์

รองศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

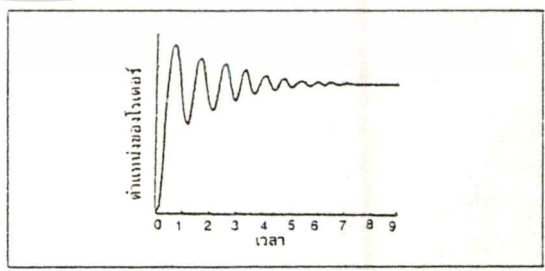
บทความนี้บรรยายถึงการหากระแสอ้างอิง (Current reference) หรือกระแสควบคุมที่จะจ่ายให้กับวงจรควบคุมการจ่ายกระแสและวงจรมอเตอร์สเต็ปปีงมอเตอร์เพื่อให้สเต็ปปีงมอเตอร์ทำงานในโหมดไมโครสเต็ป (Microstep excitation mode) ซึ่งได้แก่วิธีการคำนวณจากกราฟคุณลักษณะของมอเตอร์ (Torque-displacement stepping motor characteristics curve) และวิธีทดสอบโดยตรง โดยใช้หลักการป้อนกลับของตำแหน่งการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ จากนั้นใช้ไมโครโปรเซสเซอร์มาช่วยในการตรวจสอบตำแหน่งของโรเตอร์และควบคุมปริมาณการจ่ายกระแสให้แก่ขดลวดของมอเตอร์แต่ละเฟส ดังจะกล่าวถึงรายละเอียดของวิธีทดสอบโดยตรงนี้ในส่วนต่อไปของบทความ จากนั้นเปรียบเทียบความเที่ยงตรงของขนาดไมโครสเต็ปที่ได้เมื่อใช้กระแสอ้างอิงจากวิธีต่าง ๆ ดังกล่าวนั้นมาใช้งาน

Abstract

This paper describes methods of calculating current references for microstep stepping motor controllers from T-θ motor characteristics curve. An implementation based on direct test is presented. This methods takes into account motor nonlinearities. At the end of this paper, microstep accuracy so obtained is compared with other methods.

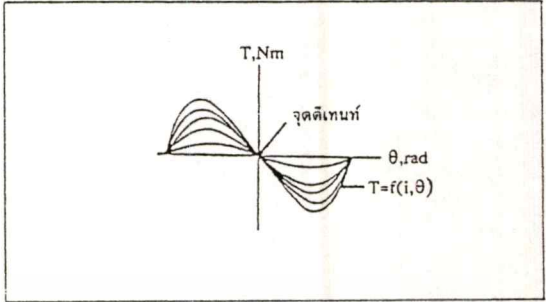
บทนำ

ขนาดสเต็ปของสเต็ปปีงมอเตอร์โดยทั่วไปจะมีขนาดเล็กสุดไม่เกิน 0.5 องศาต่อสเต็ป ซึ่งบางครั้งใหญ่เกินไปที่จะนำไปใช้งาน เช่น ในระบบเครื่อง plotter, plotter และระบบ robot arm เป็นต้น ในระบบเหล่านี้เมื่อต้องการความละเอียดของขนาดสเต็ปมากขึ้นก็มักจะใช้ระบบเฟืองทด (Gearing) เข้าช่วย ยิ่งไปกว่านั้นการใช้งานสเต็ปปีงมอเตอร์ด้วยขนาดสเต็ปปกติยังเกิดปัญหา overshoot ของตำแหน่งการเคลื่อนที่ของตัวโรเตอร์ของมอเตอร์อีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 1 การทำไมโครสเต็ป (Microstep) หรือมินิสเต็ป (Ministep) เป็นการเพิ่มความละเอียดของขนาดสเต็ปปกติของสเต็ปปีงมอเตอร์ให้สูงขึ้นและลดปัญหาการเกิด overshoot ได้อีกด้วย



รูปที่ 1 ปัญหาการเกิด overshoot ของสเต็ปปีงมอเตอร์

การใช้งานสเต็ปมอเตอรืในขนาดสเต็ปปกติทำได้โดยการ จัดลำดับการจ่ายกระแสให้แก่ขดลวดของมอเตอรืจำนวนหนึ่งซึ่งปกติ จะเป็น 1 หรือ 2 ขด จากนั้นโรเตอรืจะหาจุดหรือเส้นทางที่มีค่าความต้านทานแม่เหล็ก (Reluctance path) ต่ำสุดเรียกว่า จุดติเทนท์ (Detent position) ปริมาณของกระแสที่จ่ายให้แก่แต่ละเฟส นั้นโดยมากมักจะมืค่าคงที่ที่ค่าจำกัด (rated value) ของมอเตอรืนั้นๆ และขนาดของสเต็ปจะถูกกำหนดโดยลักษณะโครงสร้างของมอเตอรืนั้นๆ เพื่อที่จะทำไมโครสเต็ปจะต้องทำการควบคุมการจ่ายปริมาณกระแสให้แก่ขดลวดของมอเตอรืทั้ง 2 เฟส ในเวลาเดียวกันด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดจุดติเทนท์ใหม่ย่อยๆ ขึ้นอีกในระหว่างจุดติเทนท์ปกติ ดังนั้นหลักสำคัญในการออกแบบระบบไมโครสเต็ปก็คือ การออกแบบสร้างส่วนควบคุมการจ่ายกระแส (Current controller) ของขดลวดแต่ละเฟสของสเต็ปมอเตอรื ดังแสดงหลักการในรูปที่ 2 ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือส่วนสร้างกระแสอ้างอิง (I_{ref}) และ ส่วนขับและควบคุมกระแสของสเต็ปมอเตอรื



รูปที่ 3 ลักษณะของ motor torque-displacement (T-θ) characteristics.

$$T = f(i, \theta) \tag{1}$$

ถ้าจัดสมการของ T ให้อยู่ในรูปของตัวแปรเพียงหนึ่งตัวจะได้

$$T = f_i(\theta), \text{ เมื่อให้ } i \text{ คงที่} \tag{2}$$

และ

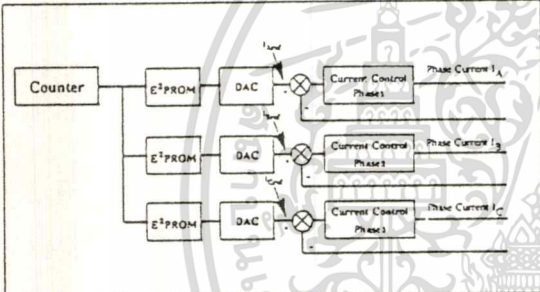
$$T = f_\theta(i), \text{ เมื่อให้ } \theta \text{ คงที่} \tag{3}$$

ถ้าจุดติเทนท์ ที่ต้องการอยู่ที่มุม $n(\theta_s/m)$ โดยที่ m คือ จำนวนที่จะแบ่งขนาดสเต็ปปกติ θ_s เป็นสเต็ปย่อยๆ และ n คือ จำนวนจริง 1, 2, 3, กระแสอ้างอิง (i_k) สำหรับแต่ละ n จะคำนวณได้จากสมการที่ (2) และ (3) โดยแรงบิดที่จุดติเทนท์ที่ต้องการมีค่าเท่ากับคูณโดยที่ K คือจำนวนเฟสของมอเตอรืภายใต้เงื่อนไขต่อไปนี้

- 1) คุณสมบัติของแรงบิดที่เกิดขึ้นของมอเตอรืที่ใช้ อันเนื่องมาจากผลรวมของกระแสเมื่อทำงานโหมดไมโครสเต็ปจะมีค่าคงเดิม
- 2) ผลรวมของ Motor Dissipation จะต้องไม่เกินค่าจำกัดของมอเตอรื
- 3) ขนาดของไมโครสเต็ปทุกสเต็ปจะต้องมีขนาดเท่ากัน

ในเงื่อนไขที่ 3 มีลักษณะเชิงเส้นทุกๆ ตำแหน่งของโรเตอรื และเงื่อนไขที่ 2 สามารถแทนได้ด้วยสมการในรูป Triangle และ Sinusoids จึงสามารถที่จะหากระแสอ้างอิงได้ดังนี้

1. การคำนวณหากระแสอ้างอิง โดยการประมาณคุณลักษณะของกราฟ T-θ ในลักษณะเชิงเส้น (Linear Approximation to T-θ Characteristics)
- ในการประมาณกราฟคุณลักษณะของ T-θ ในลักษณะเชิงเส้นแสดงดังรูปที่ 4 สามารถเขียนสมการได้ดังนี้



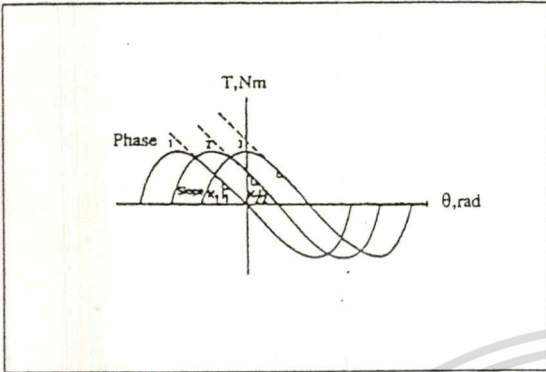
รูปที่ 2 หลักการของไมโครสเต็ป สเต็ปมอเตอรืคอนโทรลเลอร์

จากรูปที่ 2 จะเห็นกระแสอ้างอิง (I_{ref}) ที่จะจ่ายให้แก่แต่ละเฟสของมอเตอรืจะต้องหาณก่อนว่าค่าที่เหมาะสมที่จะให้ได้นั้นขนาดไมโครสเต็ปตามต้องการนั้นมีค่าเป็นเท่าใด จากนั้นบันทึกลงหน่วยความจำ E²PROM และใช้วงจรนับซีต้าแห่ง (Address) ของหน่วยความจำนี้ อ่านค่าข้อมูลของกระแสอ้างอิงในแต่ละเฟสออกมาแปลงเป็นสัญญาณควบคุมกระแสในแต่ละเฟสของมอเตอรือีกทีหนึ่ง ซึ่งวิธีการหากระแสอ้างอิงดังกล่าวนี้มีอยู่ด้วยกันหลายวิธีดังต่อไปนี้

การคำนวณหากระแสอ้างอิงในโหมดไมโครสเต็ปจากกราฟคุณลักษณะของมอเตอรื (Calculation of microstep current reference from Motor T-θ Characteristics)

ลักษณะของแรงบิด (Torque) T, ของสเต็ปมอเตอรืรอบจุดติเทนท์ จะมีความสัมพันธ์กับกระแส i และ displacement, θ ดังแสดงในรูปที่ 3 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 การประมาณเคิร์ฟ T-θ ด้วยสมการเชิงเส้น

$$T_1 = -K_1 I_1 \theta \tag{4}$$

$$T_2 = -K_2 I_2 \theta + K_0 I_2 \tag{5}$$

โดยที่ I_1 และ I_2 คือกระแสของขดลวดที่ 1 และ 2 ส่วนค่า K_1 คือค่าแรงบิดคงที่ของเฟสที่ 1 และ K_0, K_2 คือค่าแรงบิดคงที่ของเฟสที่ 2 ที่ตำแหน่งไมโครสเต็ป θ ที่ต้องการ T_1 และ T_2 จะต้องให้ผลรวมของแรงบิดเท่ากับศูนย์นั่นคือ

$$T_1 + T_2 = 0 \tag{6}$$

รวมสมการ (4), (5), และ (6) เข้าด้วยกันจะได้

$$\theta = \frac{K_0 I_2}{K_1 I_1 + K_2 I_2} \tag{7}$$

ถ้าประมาณให้เคิร์ฟคุณลักษณะของแต่ละเฟสมีค่าเท่ากันแล้ว $K_1 = K_2$ และความชันของเคิร์ฟ T-θ ของมอเตอร์ที่ตำแหน่งใหม่จะต้องเท่ากับเคิร์ฟ T-θ เดิมนั้นคือ

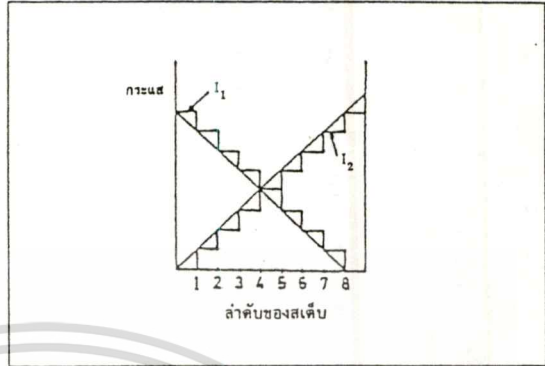
$$\frac{d}{d\theta} (T_1 + T_2) = -K_1 = -K_2 = -K \tag{8}$$

ดังนั้นสมการที่ 8 จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อ $I_1 + I_2 = 1$ (9)

ดังนั้นจะได้ $\theta = \frac{K_0 I_2}{K}$ (10)

และจะได้ $I_1 = 1 - \frac{\theta}{\theta_s}$ (11)

แสดงให้เห็นว่าในกรณีนี้กระแสในเฟส 1 จะลดลงในลักษณะของสเต็ปที่เป็นช่วง ๆ (Discrete Step) ในขณะที่กระแสในขดลวดเฟสที่ 2 จะเพิ่มขึ้นในขนาดสเต็ปที่เท่ากันแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 กระแสอ้างอิงที่ได้จากการประมาณ T-θ curve ด้วยสมการเชิงเส้น

2. การคำนวณหากระแสอ้างอิงโดยการประมาณกราฟคุณลักษณะของมอเตอร์ด้วยค่า Sine (Sine Approximation to T-θ Characteristics)

จากรูปที่ 4 สามารถที่จะประมาณเคิร์ฟ T-θ ได้ด้วยค่าชายนี้นี้

$$T_1 = -T_0 I_1 \sin \theta \tag{12}$$

$$T_2 = T_0 I_2 \sin (\theta + \theta_s) \tag{13}$$

กำหนดให้ $T_1 + T_2 = 0$ ที่จุดไมโครสเต็ปใดแทนที่จะได้

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\tan \theta}{\tan \theta \cos \theta_s + \sin \theta_s} \tag{14}$$

เพื่อที่จะคงคุณลักษณะของเคิร์ฟ T-θ เมื่อทำงานในโหมดไมโครสเต็ปจึงกำหนดให้แรงบิดที่ตำแหน่งใด ๆ ของไมโครสเต็ปจากหลาย ๆ จุดมีค่าเท่ากับ T_1 หรือ T_2 ดังนั้นจะได้

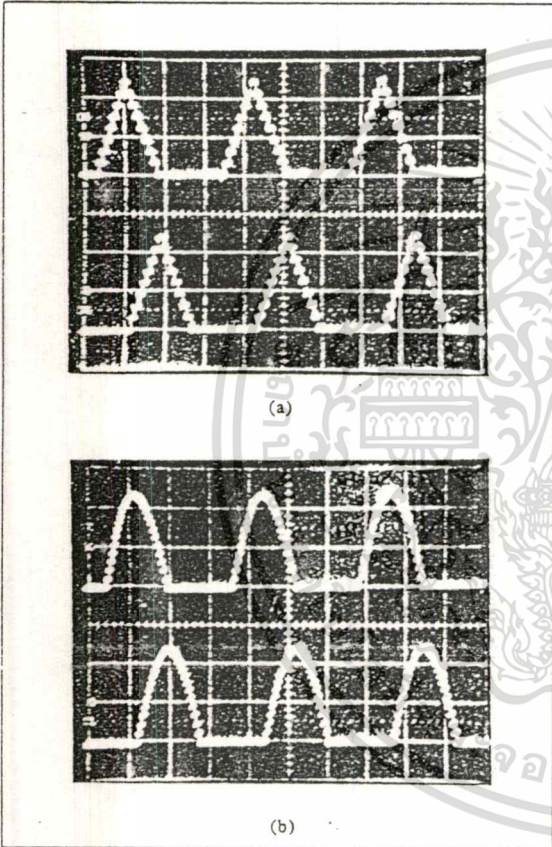
$$T_0 T_2 \sin (\theta' + \theta_s) - T_0 I_1 \sin \theta' = T_0 \sin \frac{(\theta_s)}{M} \tag{15}$$

โดยที่ $\theta' = \theta - \frac{\theta_s}{M}$ และ $M = 1, 2, 3, \dots$

เมื่อรวมสมการที่ (14) และ (15) เข้าด้วยกันจะได้

$$I_1 = \frac{\sin(\theta_s/m)}{\tan\theta \sin(\theta' + \theta_s) - \sin\theta'} \quad (16)$$

จากสมการที่ (14) และ (16) สามารถที่จะหา I_1 และ I_2 ทุก ๆ ตำแหน่งที่ตำแหน่งที่ต้องการได้ เมื่อได้ค่ากระแสอ้างอิงที่คำนวณได้แล้วแล้ว จากนั้นจะถูกแปลงเป็นค่าทางเชิงเลขเก็บไว้ใน E²PROM ต่อไป ในรูปที่ 8 (a) และ (b) แสดงลักษณะสัญญาณอ้างอิงที่ได้รับจากการประมาณค่ากราฟคุณลักษณะ T-θ ด้วยสมการลิเนียร์และซาตนตามลำดับ



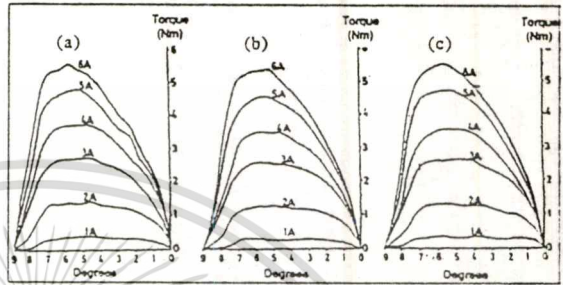
รูปที่ 8 ลักษณะสัญญาณที่ได้

- (a) สัญญาณกระแสอ้างอิงแบบลิเนียร์
- (b) สัญญาณกระแสอ้างอิงแบบรูปคลื่นซาตน

การคำนวณทั้ง 2 แบบที่ผ่านมานั้นค่อนข้างหยาบเกินไป เนื่องจากสาเหตุดังต่อไปนี้

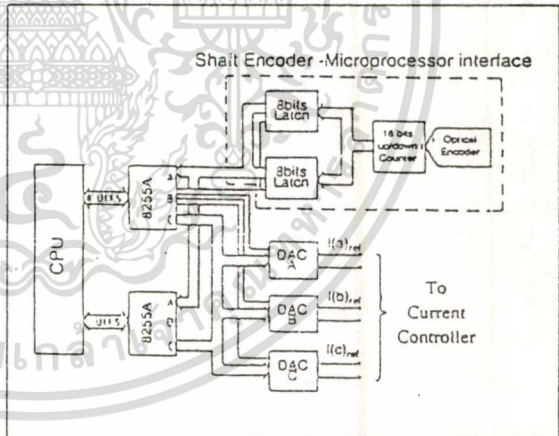
1. เป็นการประมาณโดยการสมมติให้วงจรแม่เหล็กอยู่ในลักษณะเชิงเส้น
2. คุณลักษณะของแรงบิดของแต่ละเฟสสมมติให้มีลักษณะเท่ากัน
3. ประมาณเคิร์ฟ T-θ โดยใช้การประมาณเดียวกันตลอดทั้งเคิร์ฟ

ในรูปที่ 7 (a) - (c) แสดงลักษณะของกราฟคุณลักษณะ T-θ ที่เกิดขึ้นจริงในแต่ละเฟส จะเห็นว่าไม่เหมาะที่จะประมาณด้วยสมการธรรมดาๆ เนื่องจากมีลักษณะไม่เชิงเส้น เพื่อจะจัดปัญหาในลักษณะไม่เชิงเส้นนี้จึงได้นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์และไมโครโปรเซสเซอร์เข้ามาช่วย โดยใช้วิธีทดสอบโดยตรง ดังแสดงหลักการในรูปที่ 8



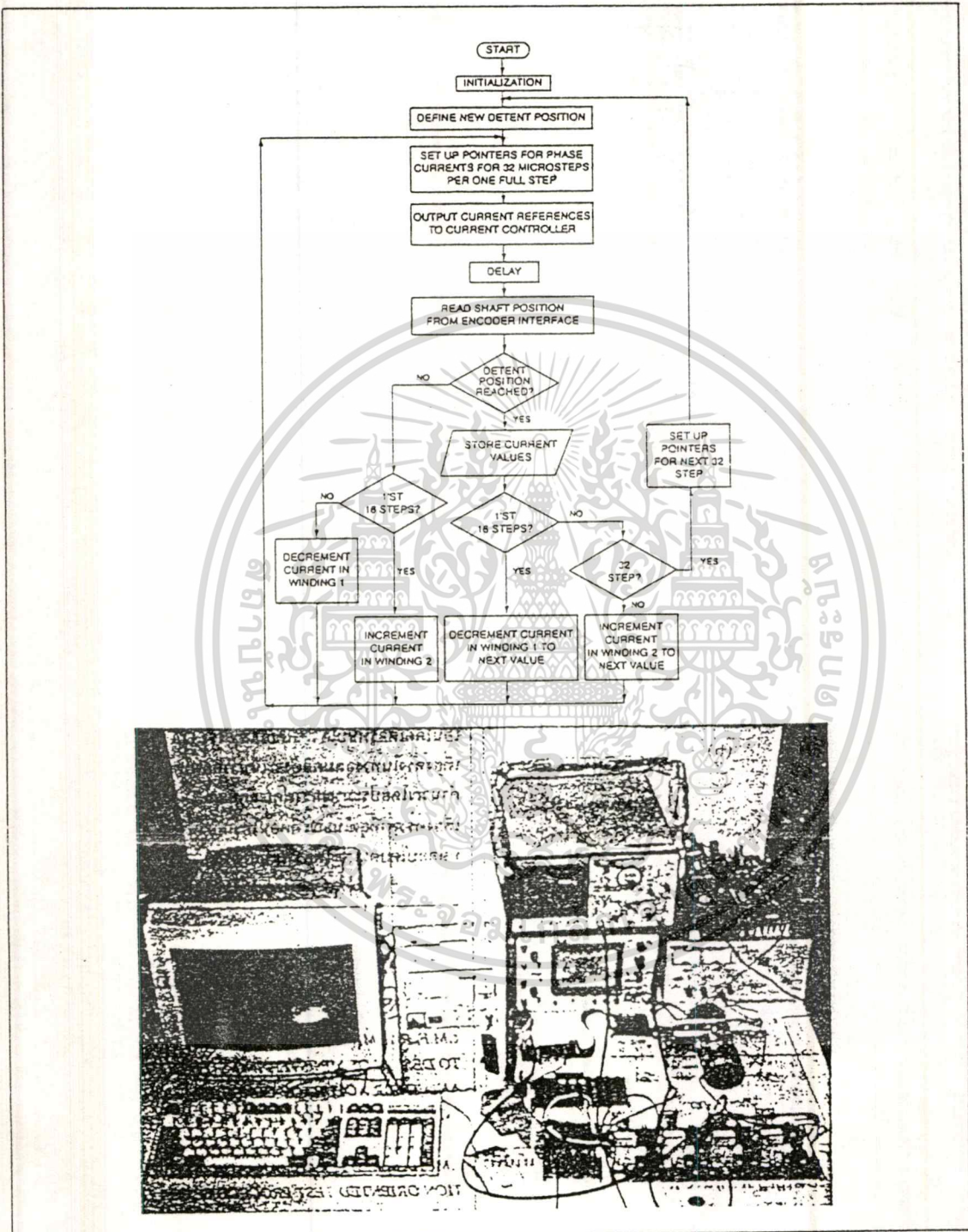
รูปที่ 7 กราฟคุณลักษณะที่เกิดขึ้นจริงในแต่ละเฟสของสเต็ปปีงมอเตอร์ (a)เฟสที่ 1 (b)เฟสที่ 2 (c)เฟสที่ 3

วิธีการหากระแสอ้างอิงโดยวิธีทดสอบโดยตรงโดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์(The Microprocessor Based Direct-Test Procedure to Determine Microstep Current Reference.)

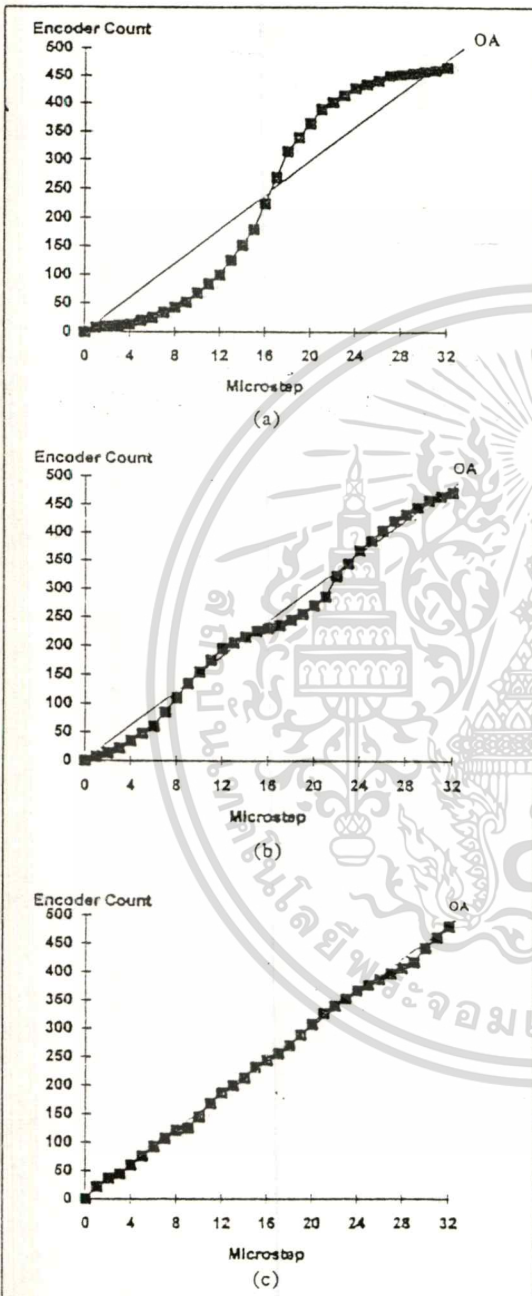


รูปที่ 8 หลักการของวิธีทดสอบโดยตรง

ในส่วนของวงจรในรูปที่ 8 นี้จะถูกแทนเข้าไปในส่วน E²PROM และส่วนวงจรนับในรูปที่ 8 ไมโครโปรเซสเซอร์จะเป็นตัวจ่ายกระแสอ้างอิงไปยังวงจรแปลงสัญญาณทางดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาลอก(DAC) และโดยการใช้การป้อนกลับจากออฟติคัลเอ็นโค้ดเดอร์มายังไมโครโปรเซสเซอร์เพื่อตรวจสอบตำแหน่งของโรเตอร์โดยใช้โปรแกรมที่มีหลักการดังแสดงในฟลิวชาร์ทรูปที่ 9 ซึ่งมีหลักการดังนี้



รูปที่ ๑ flowchart ของโปรแกรมที่ใช้ในการหากระแสอ้างอิงด้วยวิธีทดสอบโดยตรงและระบบที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบความเที่ยงตรงของขนาดสเต็ปที่ได้เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณที่ได้จาก
 (a) การประมาณด้วยสมการเส้นตรง
 (b) การประมาณด้วยสมการฮอนน์
 (c) วิธีทดสอบโดยตรง

เลือกกระแสในชดสวดเฟสที่ 1 ที่ให้ค่าทอร์กคงที่สูงสุด (Maximum Holding Torque) เท่ากับค่าพิคคของมอเตอร์ จากนั้นเพิ่มกระแสในชดสวดที่ 2 ด้วยค่าคงที่ที่ละเอียดกว่าสเต็ปการลดลงของกระแสในชดสวดที่ 1 จนกระทั่งตำแหน่งของโรเตอร์เคลื่อนมายังจุดไมโครสเต็ปที่ต้องการจากนั้นบันทึกค่ากระแสในชดสวดที่ 1 และ 2 ลงในหน่วยความจำ ซึ่งจะทำการซ้ำลักษณะเช่นนี้ทุกๆไมโครสเต็ป จนถึงครั้งแรกของขนาดสเต็ปปกติ สำหรับครั้งหลังของขนาดสเต็ปปกติชดสวดที่ 2 จะถูกเลือกเช่นเดียวกับในกรณีของครั้งแรกของขนาดสเต็ปปกติ โดยกระแสในชดสวดที่ 1 จะถูกลดด้วยค่าที่ละเอียดกว่าสเต็ปการเพิ่มขึ้นของกระแสในชดสวดเฟสที่ 2 จนกระทั่งตำแหน่งของโรเตอร์เคลื่อนที่มายังตำแหน่งที่ต้องการ บันทึกค่ากระแสที่ได้ลงในหน่วยความจำ ทำเช่นนี้จนครบครั้งหลังของขนาดสเต็ปปกติ จากนั้นเลื่อนไปทำยังเฟส 2,3 และเฟส 3,1 ตามลำดับ

การพิจารณาความเที่ยงตรงของตำแหน่งของโรเตอร์ที่ได้เมื่อใช้การคำนวณหากระแสอ้างอิงแบบต่างๆมาใช้งาน

ในการทดลองใช้ VR สเต็ปปึงมอเตอร์ชนิด 3 เฟส ขนาดสเต็ปเท่ากับ 8 องศาสเต็ป ถูกแบ่งออกเป็น 32 สเต็ปย่อยๆโดยมีวงจรออฟดีคอลลเอ็นเค็ดเดอรัที่ให้สัญญาณ 28800 พัลซ์ต่อรอบ สำหรับตรวจสอบความเที่ยงตรงของแต่ละสเต็ป โดยในรูปที่ 10 (a)-(c) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งแต่ละไมโครสเต็ปและค่าจากเอ็นเค็ดเดอรัที่นับได้ โดยมีเส้นตรง OA เป็นเส้นตรงแสดงความเที่ยงตรงในทางอุดมคติตั้งจะเห็นว่าคอนโทรเลอร์ที่ใช้หลักการคำนวณโดยประมาณการพหุคูณลักษณะ T-θ ด้วยค่าลิเนียร์จะให้ความเที่ยงตรงต่ำที่สุดในขณะที่คอนโทรเลอร์ที่หลักการหากระแสอ้างอิงด้วยวิธีทดสอบโดยตรง จะให้ความเที่ยงตรงสูงสุด

เอกสารอ้างอิง

1. M.F. RAHMAN, A.N. POO, AND C.S. CHANG, "APPROACHES TO DESIGN OF MINISTEPING STEP MOTOR CONTROLLERS AND THEIR ACCURACY CONSIDERATIONS", IEEE TRANS. IND. ELECTRON., VOL. IE-32, NO.1, PP. 229-233, AUG. 1985
 2. MUHAMMED F. RAHMAN, AUN-NEOW POO, "AN APPLICATION ORIENTED TEST PROCEDURE FOR DESIGNING MICROSTEPING STEP MOTOR CONTROLLERS", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VO. 35, NO. 4, NOVEMBER 1988.

ประวัติผู้เขียน -

นายวุฒิชัย สังข์กุล เกิดวันที่ 27 เมษายน 2512 ที่จังหวัดสมุทรสงคราม สำเร็จการศึกษาปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา อิเล็กทรอนิกส์อุตสาหกรรม จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2534 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2535 ระหว่างศึกษาต่อจนถึงปัจจุบันได้เข้าทำงานกับ บริษัท อีสต์เอเชียติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด ในตำแหน่งวิศวกรอิเล็กทรอนิกส์

