

การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตป  
ด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง

CLOSED-LOOP CONTROL OF STEPPING MOTORS IN MICROSTEP EXCITATION  
MODE WITH COMPARISON ACTUAL VALUE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2541

ISBN 974-622-337-2

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 31671  
กัน, เดือน, ปี 21 S.A. 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**CLOSED-LOOP CONTROL OF STEPPING MOTORS IN MICROSTEP EXCITATION  
MODE WITH COMPARISON ACTUAL VALUE**



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

**1998**

**ISBN 974-622-337-2**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 1998**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมสแตปปีงมอเตอร์แบบระบบปิดในโหมดไมโครสแตปด้วย การเปรียบเทียบค่าจริง
นักศึกษา	นางสาวพิมพ์พิชญ์สร แฉ่มแก้ว
รหัสประจำตัว	34620049
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2541
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.นนทวัฒน์ จุลเดชะ
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์(ร่วม)	รศ.ดร.โยธิน เปรมปราณีรัชต์

### บทคัดย่อ

การควบคุมการทำงานของสแตปปีงมอเตอร์ โดยทั่วไปมักใช้การขับแบบโหมดการทำงานปกติ ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาการสั่นหรือการเกิดโอเวอร์ชูทของสแตปการเคลื่อนที่ของตัวโรเตอร์ในสแตปปีงมอเตอร์ และปัญหาอีกชนิดหนึ่งคือขนาดของสแตปปกติอาจมีขนาดใหญ่เกินไปที่จะนำไปใช้งานกับเครื่องมือต้องการความละเอียดสูงๆ เช่น ในเครื่องอ่านแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น ดังนั้นต่อมาจึงได้มีการพัฒนาให้มีการขับสแตปปีงมอเตอร์ให้มีการเคลื่อนที่ในโหมดของไมโครสแตปขึ้น เพื่อสามารถเพิ่มความละเอียดของขนาดสแตปปกติให้มากขึ้นและลดโอเวอร์ชูท โดยหลักการเดิมใช้การควบคุมแบบวงเปิด (Open-loop) ด้วยการเปลี่ยนแปลงของกระแสในเฟส 2 เฟสเป็นสัดส่วนต่อกัน โดยได้ค่ากระแสอ้างอิงจากการประมาณกราฟคุณลักษณะทอร์ค T- $\theta$  ของสแตปปีงมอเตอร์ด้วยสัญญาณไซน์ (Sine Wave) และสัญญาณลิเนียร์ (Linear) โดยให้คุณลักษณะของมอเตอร์ทั้งสองเฟสมีค่าเหมือนกันทุกประการ เพื่อให้ได้การตอบสนองของโรเตอร์เคลื่อนที่เป็นไมโครสแตปที่มีขนาดเท่ากันทุกสแตป แต่ในความเป็นจริงการควบคุมแบบวงเปิด (Open-loop Control) ไม่สามารถทราบขนาดของมุมที่เคลื่อนที่จริงได้ ดังนั้นทำให้ขนาดของไมโครสแตปทุกๆค่ามีความไม่แน่นอน วิธีการใหม่ที่จะนำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ การควบคุมการทำงานของสแตปปีงในลักษณะวงปิด (closed-loop control) เพื่อให้ตำแหน่งแกนที่เคลื่อนที่ไปมีค่าขนาดจำนวนไมโครสแตปเท่ากันทุกๆตำแหน่ง ซึ่งเป็นการแบ่งเป็นจำนวนเท่าของขนาดสแตปปกติ โดยใช้ความละเอียดของตัววัดเป็นตัวกำหนดขนาดและจำนวนตำแหน่งไมโครสแตปสูงสุดที่สามารถทำได้ต่อสแตปปกติตามความละเอียดของจำนวนพัลส์ของตัวออปติคัลเอนโค้ดเดอร์ สำหรับค่ากระแสในแต่ละเฟสของมอเตอร์ถูกควบคุมให้เป็นสัดส่วนกันในลักษณะวงปิดทั้ง 2 เฟสเมื่อรวมกันเท่ากับค่าเต็มพิกัด (rating current) ค่ากระแสทั้งสองเฟสจะเปลี่ยนแปลงเป็นอัตราส่วนตามการเคลื่อนที่จริงของมอเตอร์ ดังนั้นขนาดไมโครสแตปจึงขนาดเท่ากัน และสามารถนำไปขับโหลดได้ตามค่าทอร์คสูงสุดของสแตปมอเตอร์รับได้ โดยอาศัยค่าที่ได้จากการป้อนกลับมาจากออปติคัลเอนโค้ดเดอร์มาคำนวณเปรียบเทียบและประมวลผลด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ให้ความถูกต้องแน่นอนและแม่นยำสูงกว่าระบบเดิมทำให้เกิดการควบคุมแบบไมโครสแตปที่ถูกต้อง ซึ่งเป็นการควบคุมไมโครสแตปแบบวงจรมอเตอร์ในลักษณะฮาร์ดแวร์ทำให้ลดการเขียนโปรแกรมที่ยุ่งยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Closed-loop control of Stepping Motors in Microstep Excitation Mode with Comparison Actual Value
<b>Student</b>	Miss Pimpitchsom Ngamkaw
<b>Student ID.</b>	34620049
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Year</b>	1998
<b>Thesis Adviser</b>	Dr. Nontawat Chuladaycha
<b>Thesis Co-adviser</b>	Assoc. Prof. Dr. Yothin Prampraneerach

## ABSTRACT

In general, a the stepping motor operating in normal mode is controlled by constant voltage driving which causes problems in vibration and overshooting of stepping motion. Anothen problem is lange step size which is not suitable for high accuracy instruments such as floppy disk drive etc. Nowaday microstep excitation mode is introduced improve the efficiency of the stepping motor. The formal method uses open-loop controller in microstep excitation mode by varying current propotional or sinusoidal reference signals. These reference signals are obtained by linear approximantion of stepping motor static torque curve ( $T-\theta$ ). However, these curves are not indential for any phases to displacement angle. For the method presented in this thesis is a new technique to control step motor, so called "Closed-loop control of Stepping Motor in Microstep Excitation Mode with Comparison Actual Value." This technique compares data from set\_point to data from optical encoder circuit used by the hardware before next target position for actual positions of rotor based on microcomputer control. Summing of the two current in two winding of stepping motor is rating current. Then this technique is better than open-loop method in case of accuracy and high torque of microstep sizes.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับสแตปปีงมอเตอร์ จาก รศ.ดร.โยธิน เปรมปราณีรัชต์ และ ดร.นนทวัฒน์ จุลเดชะ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์เป็นอย่างมาก และขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง และขอขอบพระคุณ ท่านคุณพ่อ คุณแม่ที่คอยให้กำลังใจอยู่เสมอ และ คุณพรชัยยศ ศรีปัญญา พงศ์ ที่คอยให้คำปรึกษาในเรื่องวงจรต่างๆ และรวมถึงตัวโปรแกรม คุณจำลอง พิมพ์สวัสดิ์ ในอนุเคราะห์ ปรี้นเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมระบบวัดคุมและเครื่องมือวัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี มหานคร ให้ความร่วมมือทางด้านเอกสารประกอบการทำวิจัย และศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังได้ให้ความช่วยเหลือในเรื่อง ห้องทำวิจัย เพราะฉะนั้นคุณค่าและคุณประโยชน์จากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จึงขอมอบให้แด่ ผู้มีพระคุณทุกท่าน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IX
สารบัญตาราง .....	XI
สารบัญรูป.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
1.4 แนวความคิดของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ชนิด โครงสร้าง และการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ .....	5
2.1 หลักการทำงานของสเตปป์มอเตอร์.....	5
2.1.1 ลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็กในขดลวดที่พันรอบแกนเหล็ก.....	5
2.2 ชนิดของสเตปป์มอเตอร์ .....	7
2.2.1 สเตปป์มอเตอร์แบบคาร์ลัคเด็นซ์แปรค่าได้สแต็คเดียว.....	7
2.2.2 สเตปป์มอเตอร์แบบคาร์ลัคเด็นซ์แปรค่าได้มีหลายสแต็ค.....	10
2.2.3 สเตปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร .....	12
2.2.4 สเตปป์มอเตอร์แบบไฮบริด .....	12
2.3 การพันขดลวด .....	14
2.3.1 แบบโมโนฟิลาร์และไบฟิลาร์ .....	14
2.4 วิธีการหรือโหมดการกระตุ้นการขับสเตปป์มอเตอร์ .....	15
2.4.1 ลำดับการทำงานในโหมดปกติด้วยการกระตุ้นแบบหนึ่งเฟส .....	16
2.4.2 ลำดับการทำงานในโหมดปกติด้วยการกระตุ้นแบบสองเฟส .....	16
2.4.3 ลำดับการทำงานในโหมดการเคลื่อนที่แบบครึ่งสเตป.....	17
2.4.4 ลำดับการทำงานในโหมดมินิสเตปและไมโครสเตปด้วยการกระตุ้นสองเฟส .....	18
2.5 กรรมวิธีในการเดมป์ปีง .....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.6 คุณลักษณะเฉพาะของสเตปป์มอเตอร์ .....	22
2.6.1 คุณลักษณะเฉพาะทางสถิติศาสตร์ .....	22
2.6.2 คุณลักษณะเฉพาะทางพลศาสตร์ .....	23
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานการเคลื่อนที่ของสเตปป์มอเตอร์ .....	25
3.1 สมการพื้นฐานในการเคลื่อนที่.....	25
3.1.1 สเตปป์มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรและชนิดไฮบริดจ์ .....	25
3.1.2 สเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลักแตนซ์ได้ .....	30
3.2 ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของสเตปป์มอเตอร์ .....	32
3.2.1 การทำงานแบบเฟสเดียว .....	32
3.2.2 การขับด้วยแหล่งจ่ายกระแส.....	34
3.2.3 การกระตุ้นแบบสองเฟสโดยการขับด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน .....	37
3.2.4 ผลตอบสนองแบบสเตปป์เดียว .....	37
3.2.5 ทรานเฟอร์ฟังก์ชันอันดับที่สอง .....	37
3.2.6 ทรานเฟอร์ฟังก์ชันอันดับที่สาม .....	38
บทที่ 4 การควบคุมสเตปป์มอเตอร์ .....	41
4.1 วงจรลอจิกซีควเอนซ์ .....	41
4.2 การเชื่อมต่อระหว่างตัวจัดลำดับและตัวขับ.....	44
4.3 วงจรขับสเตปป์มอเตอร์.....	44
4.3.1 วงจรขับแบบขั้วเดียว .....	44
4.3.2 วงจรขับแบบสองขั้ว .....	45
4.3.3 วงจรขับแบบไมโครสเตป .....	46
4.4 ปัญหาของวงจรขับสเตปป์มอเตอร์ และการแก้ไข .....	47
4.4.1 วงจรกำจัดแรงดันเกิน .....	47
4.4.2 วงจรกำจัดแรงดันเกินโดยใช้ไดโอด.....	47
4.5 การควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ .....	47
4.5.1 การทำงานในระบบเปิด .....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.5.1 การทำงานในระบบปิด .....	50
4.5.2 การตรวจจับทิศทาง .....	50
บทที่ 5 การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง.....	51
5.1 บทนำ .....	51
5.2 การควบคุมสเตปป์มอเตอร์ แบบระบบเปิดในโหมดไมโครสเตปเพื่อเปรียบเทียบผลการ สนองกับการควบคุมแบบระบบปิดด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง .....	51
5.2.1 การคำนวณหากระแสอ้างอิงในโหมดไมโครสเตปจากกราฟของมอเตอร์ .....	51
5.2.1.1 การคำนวณหากระแสอ้างอิง โดยการประมาณค่าคุณลักษณะของกราฟ T- $\theta$ ในลักษณะเชิงเส้น .....	53
5.2.1.2 การคำนวณหากระแสอ้างอิง โดยการประมาณค่าคุณลักษณะของกราฟ T- $\theta$ ในลักษณะสัญญาณชานน์ .....	54
5.3 การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบ ค่าจริง .....	55
5.3.1 ส่วนประกอบสำหรับวงจรทำงาน .....	56
5.3.1.1 วงจรตรวจจับทิศทางเคลื่อนที่.....	57
5.3.1.2 วงจรจ่ายกระแสให้กับขดลวดของสเตปป์มอเตอร์.....	58
5.3.1.3 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาลอกโดยใช้หลักการ R-2R Radder.....	58
5.3.1.4 วงจรเปรียบเทียบตำแหน่งไมโครสเตปกับค่าการเคลื่อนที่จริงของแกน มอเตอร์.....	59
บทที่ 6 ผลการทดลอง สรุป และข้อเสนอแนะ .....	60
6.1 บทนำ .....	60
6.2 ผลการทดลอง .....	60
6.2.1 การควบคุมแบบระบบวงเปิด .....	60
6.2.1.1 การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตป ด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบสัญญาณลิเนียร์.....	61

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

- 6.2.1.1.1 ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแต้นซ์ได้แบบระบบวงเปิดในโหมตไมโครสเตป ด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบ สัญญาณลิเนียร์ที่ขนาด 1/4 ของสเตปปกติ.....62
- 6.2.1.1.2 สัญญาณแรงดันอินพุทพัลส์ที่ป้อนให้กับวงจรรีบเพื่อบังคับการจ่ายกระแสสำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิดในโหมตไมโครสเตปที่ขนาดไมโครสเตป 1/4 เท่าของสเตปปกติ...63
- 6.2.1.1.3 ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแต้นซ์ได้แบบระบบวงเปิดในโหมตไมโครสเตปด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบสัญญาณลิเนียร์ที่ขนาด 1/8 ของสเตปปกติ.....64
- 6.2.1.1.4 สัญญาณแรงดันอินพุทพัลส์ที่ป้อนให้กับวงจรรีบเพื่อบังคับการจ่ายกระแสสำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิดในโหมตไมโครสเตปที่ขนาดไมโครสเตป 1/8 เท่าของสเตปปกติ....65
- 6.2.1.1.5 ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแต้นซ์ได้แบบระบบวงเปิดในโหมตไมโครสเตปด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบสัญญาณลิเนียร์ที่ขนาด 1/16 ของสเตปปกติ.....66
- 6.2.1.1.6 สัญญาณแรงดันอินพุทพัลส์ที่ป้อนให้กับวงจรรีบเพื่อบังคับการจ่ายกระแสสำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิดในโหมตไมโครสเตปที่ขนาดไมโครสเตป 1/16 เท่าของสเตปปกติ...67
- 6.2.1.1.7 ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแต้นซ์ได้แบบระบบวงเปิดในโหมตไมโครสเตปด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบสัญญาณลิเนียร์ที่ขนาด 1/32 ของสเตปปกติ.....68
- 6.2.1.1.8 สัญญาณแรงดันอินพุทพัลส์ที่ป้อนให้กับวงจรรีบเพื่อบังคับการจ่ายกระแสสำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิดในโหมตไมโครสเตปที่ขนาดไมโครสเตป 1/32 เท่าของสเตปปกติ...69
- 6.2.1.1.9 ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแต้นซ์ได้แบบระบบวงเปิดในโหมตไมโครสเตป ด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบสัญญาณลิเนียร์ที่ขนาด 1/64 ของสเตปปกติ.....70

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

6.2.1.1.10	สัญญาณแรงดันอินพุทพัลส์ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสสำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตปที่ขนาดไมโครสเตป 1/64 เท่าของสเตปปกติ.....	71
6.2.1.1.11	ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้แบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตป ด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบสัญญาณลิเนียร์ที่ขนาด 1/128 ของสเตปปกติ.....	72
6.2.1.1.12	สัญญาณแรงดันอินพุทพัลส์ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสสำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตปที่ขนาดไมโครสเตป 1/128 เท่าของสเตปปกติ.....	73
6.2.1.1.13	ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้แบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตป ด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบสัญญาณลิเนียร์ที่ขนาด 1/372 ของสเตปปกติ.....	74
6.2.1.1.14	สัญญาณแรงดันอินพุทพัลส์ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสสำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตปที่ขนาดไมโครสเตป 1/372 เท่าของสเตปปกติ...	75
6.2.1.2	การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตป ด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบสัญญาณชายน์.....	76
6.2.1.2.1	ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้แบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตป ด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบสัญญาณชายน์ ที่ขนาด 1/4 เท่าของสเตปปกติ.....	76
6.2.1.2.2	สัญญาณแรงดันอินพุทพัลส์ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสสำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตปที่ขนาดไมโครสเตป 1/4 เท่าของสเตปปกติ...	77
6.2.1.2.3	ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้แบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตป ด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบสัญญาณชายน์ ที่ขนาด 1/8 เท่าของสเตปปกติ.....	78

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

- 6.2.1.2.4 สัญญาณแรงดันอินพุทพัลส์ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อบังคับการ  
จ่ายกระแสสำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิด  
ในโหมดไมโครสเตปที่ขนาดไมโครสเตป 1/8 เท่าของสเตปปกติ...79
- 6.2.1.2.5 ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้แบบ  
ระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตป ด้วยการประมาณค่ากระแส  
อ้างอิงแบบสัญญาณชಾಯน์ ที่ขนาด 1/16 เท่าของสเตปปกติ.....80
- 6.2.1.2.6 สัญญาณแรงดันอินพุทพัลส์ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อบังคับการ  
จ่ายกระแสสำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิด  
ในโหมดไมโครสเตปที่ขนาดไมโครสเตป 1/16 เท่าของสเตปปกติ ..81
- 6.2.1.2.7 ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้แบบ  
ระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตป ด้วยการประมาณค่ากระแส  
อ้างอิงแบบสัญญาณชಾಯน์ ที่ขนาด 1/32 เท่าของสเตปปกติ.....82
- 6.2.1.2.8 สัญญาณแรงดันอินพุทพัลส์ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อบังคับการ  
จ่ายกระแสสำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิด  
ในโหมดไมโครสเตปที่ขนาดไมโครสเตป 1/32 เท่าของสเตปปกติ..83
- 6.2.1.2.9 ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้แบบ  
ระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตป ด้วยการประมาณค่ากระแส  
อ้างอิงแบบสัญญาณชಾಯน์ ที่ขนาด 1/64 เท่าของสเตปปกติ.....84
- 6.2.1.2.10 สัญญาณแรงดันอินพุทพัลส์ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อบังคับการ  
จ่ายกระแสสำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิด  
ในโหมดไมโครสเตปที่ขนาดไมโครสเตป 1/64 เท่าของสเตปปกติ..85
- 6.2.1.2.11 ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้แบบ  
ระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการประมาณค่ากระแส  
อ้างอิงแบบสัญญาณชಾಯน์ ที่ขนาด 1/128 เท่าของสเตปปกติ.....86
- 6.2.1.2.12 สัญญาณแรงดันอินพุทพัลส์ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อบังคับการ  
จ่ายกระแสสำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิด  
ในโหมดไมโครสเตปที่ขนาดไมโครสเตป 1/128 เท่าของสเตปปกติ..87

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

6.2.1.2.13	ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคเต้นซ์ได้แบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบสัญญาณชายน์ ที่ขนาด 1/372 เท่าของสเตปปกติ.....	88
6.2.2.1.1	สัญญาณแรงดันอินพุทพัลส์ที่ป้อนให้กับวงจรถับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสสำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตปที่ขนาดไมโครสเตป 1/372 เท่าของสเตปปกติ...	89
6.2.2	การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง.....	90
6.2.2.1	ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่มีขนาดไมโครสเตปเท่ากับ 1/4 เท่าของสเตปปกติ.....	90
6.2.2.2	สัญญาณควบคุมที่ป้อนให้กับวงจรถับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้กับขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ทั้งสองเฟสสำหรับการควบคุมแบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่ขนาดไมโครสเตป 1/4 เท่ากับสเตปปกติ.....	91
6.2.2.3	ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่มีขนาดไมโครสเตปเท่ากับ 1/8 เท่าของสเตปปกติ.....	92
6.2.2.4	สัญญาณควบคุมที่ป้อนให้กับวงจรถับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้กับขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ทั้งสองเฟสสำหรับการควบคุมแบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่ขนาดไมโครสเตป 1/8 เท่ากับสเตปปกติ.....	93
6.2.2.5	ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่มีขนาดไมโครสเตปเท่ากับ 1/16 เท่าของสเตปปกติ.....	94
6.2.2.6	สัญญาณควบคุมที่ป้อนให้กับวงจรถับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้กับขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ทั้งสองเฟสสำหรับการควบคุมแบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่ขนาดไมโครสเตป 1/16 เท่ากับสเตปปกติ.....	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
6.2.2.7 ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่มีขนาดไมโครสเตปเท่ากับ 1/32 เท่าของสเตปปกติ.....	96
6.2.2.8 สัญญาณควบคุมที่ป้อนให้กับวงจรถับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้กับขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ทั้งสองเฟสสำหรับการควบคุมแบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่มีขนาดไมโครสเตป 1/32 เท่ากับสเตปปกติ.....	97
6.2.2.9 ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่มีขนาดไมโครสเตปเท่ากับ 1/64 เท่าของสเตปปกติ.....	98
6.2.2.10 สัญญาณควบคุมที่ป้อนให้กับวงจรถับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้กับขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ทั้งสองเฟสสำหรับการควบคุมแบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่มีขนาดไมโครสเตป 1/64 เท่ากับสเตปปกติ.....	99
6.2.2.11 ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่มีขนาดไมโครสเตปเท่ากับ 1/128 เท่าของสเตปปกติ.....	100
6.2.2.12 สัญญาณควบคุมที่ป้อนให้กับวงจรถับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้กับขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ทั้งสองเฟสสำหรับการควบคุมแบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่มีขนาดไมโครสเตป 1/128 เท่ากับสเตปปกติ.....	101
6.2.2.13 ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่มีขนาดไมโครสเตปเท่ากับ 1/372 เท่าของสเตปปกติ.....	102
6.2.2.14 สัญญาณควบคุมที่ป้อนให้กับวงจรถับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้กับขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ทั้งสองเฟสสำหรับการควบคุมแบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่มีขนาดไมโครสเตป 1/372 เท่ากับสเตปปกติ.....	103

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

6.2.3 ตารางเปรียบเทียบขนาดไมโครสเตป .....	104
6.2.3.1 การเปรียบเทียบสำหรับการแบ่งไมโครสเตปขนาด 1/4 เท่าของสเตป ปกติสำหรับสัญญาณชานน์, ลิเนียร์และการควบคุมแบบระบบปิดใน โหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง .....	104
6.2.3.2 การเปรียบเทียบสำหรับการแบ่งไมโครสเตปขนาด 1/8 เท่าของสเตป ปกติสำหรับสัญญาณชานน์, ลิเนียร์และการควบคุมแบบระบบปิดใน โหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง .....	104
6.2.3.3 การเปรียบเทียบสำหรับการแบ่งไมโครสเตปขนาด 1/16 เท่าของสเตป ปกติสำหรับสัญญาณชานน์, ลิเนียร์และการควบคุมแบบระบบปิดใน โหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง .....	105
6.3 สรุปผลการทดลอง.....	105
6.4 คำแนะนำและแนวทางพัฒนา .....	106
6.5 แนวทางการแก้ปัญหาและพัฒนาต่อไป .....	106
6.6 การนำไปประยุกต์ใช้กับงานอื่น.....	107
บรรณานุกรม .....	108
ภาคผนวก ก. ส่วนประกอบต่างๆของชิ้นงานวิจัย .....	109
ภาคผนวก ข. โปรแกรมที่ใช้ในการทำวิจัย .....	113
ภาคผนวก ค. บทความวิจัยในวิศวกรรมสารลาดกระบัง .....	130
ภาคผนวก ง. ผลการทดลองของการตอบสนองการควบคุมสเตปบิ่งแบบระบบวงปิดในโหมด ไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง เพิ่มเติมในกรณีขับโหลด .....	137
ประวัติผู้เขียน.....	142

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงลำดับชั้นแบบปกติด้วยการกระตุ้นหนึ่งเฟส .....	17
2.2 แสดงลำดับการทำงานในโหมดปกติด้วยการกระตุ้นแบบสองเฟส .....	18
2.3 แสดงลำดับการทำงานในโหมดปกติด้วยการกระตุ้นแบบครึ่งสเตป .....	19
4.1 สัญญลักษณ์ของวงจรถูกใช้เพื่อจัดลำดับลอจิก .....	42
6.1 แสดงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของโรเตอร์จากการควบคุมแบบระบบปิดในโหมด ไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง กับการควบคุมแบบระบบเปิดในโหมดไมโครสเตป ที่มีขนาดไมโครสเตป 1/4 เท่าของสเตปปกติ.....	104
6.2 แสดงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของโรเตอร์จากการควบคุมแบบระบบปิดในโหมด ไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง กับการควบคุมแบบระบบเปิดในโหมดไมโครสเตป ที่มีขนาดไมโครสเตป 1/8 เท่าของสเตปปกติ.....	104
6.3 แสดงการเปรียบเทียบผลการตอบสนองของโรเตอร์จากการควบคุมแบบระบบปิดในโหมด ไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง กับการควบคุมแบบระบบเปิดในโหมดไมโครสเตป ที่มีขนาดไมโครสเตป 1/16 เท่าของสเตปปกติ.....	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวคอนโทรลเลอร์สำหรับควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์	4
2.2 แสดงถึงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในลักษณะต่างๆ	6
2.3 แรงดึงดูดทำให้เกิดทอร์คหมุนอาร์เมเจอร์ให้ไปอยู่ในตำแหน่งสมดุล	7
2.4 โครงสร้างของสเตปป์มอเตอร์แบบคาร์ลัคเด็นซ์แปรค่าได้มีสเตคเดียว	8
2.5 แสดงลำดับการสวิตช์ 3 สเตปของสเตปป์มอเตอร์แบบคาร์ลัคเด็นซ์แปรค่าได้ชนิดสเตคเดียว	9
2.6 โครงสร้างของสเตปป์มอเตอร์แบบคาร์ลัคเด็นซ์แปรค่าได้มี 3 สเตค	10
2.7 แสดงถึงการหมุนของโรเตอร์และทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก	11
2.8 โครงสร้างของแม่เหล็กถาวรมี 4 เฟส	12
2.9 โครงสร้างของไฮบริดจ์สเตปป์มอเตอร์	13
2.10 วงจรแม่เหล็กของไฮบริดจ์สเตปป์มอเตอร์	13
2.11 การพันขดลวดของสเตปป์มอเตอร์	14
2.12 วงจรกระตุ้นพื้นฐาน 3 แบบ	15
2.13 ลักษณะกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดด้วยการกระตุ้นในโหมดมินิสเตปหรือไมโครสเตป	18
2.14 แสดงการเข้าสู่ตำแหน่งของโรเตอร์ในหนึ่งสเตปของการกระตุ้นแบบเฟสเดียวและสองเฟส	19
2.15 แสดงการแกว่งในการเคลื่อนที่แต่ละสเตปของสเตปป์มอเตอร์	20
2.16 การเกิดรีโซแนนซ์ในสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่าคาร์ลัคเด็นซ์ได้ขนาด 15 องศา	20
2.17 สลิปคลัทช์เดมป์เปอร์และรีซีสตีฟเดมป์ปิ้ง	21
2.18 คาปาซิทีฟเดมป์ปิ้ง และทูเฟสเดมป์ปิ้ง	21
2.19 คุณลักษณะเฉพาะ T/θ ของมอเตอร์	22
2.20 คุณลักษณะเฉพาะ T/I ของมอเตอร์	23
2.21 กราฟคุณลักษณะทางพลศาสตร์	24
3.1 โครงสร้างของสเตเตอร์และโรเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เส้นแรงแม่เหล็ก	25
3.2 สเตปมอเตอร์แบบไฮบริดจ์	27
3.3 ลักษณะการควบคุมตำแหน่ง	27
3.4 กราฟคุณลักษณะ T-θ ของมอเตอร์ด้วยการประมาณค่าโดยเส้นตรง	35
3.5 ผลตอบสนองต่อระบบอันดับที่สอง	39
3.6 เวลาที่เข้าสู่ค่าสุดท้าย	39
3.7 ค่าแอดัมปิง $\alpha$ และ $\beta$ และค่า K	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 วงจรจัดลำดับการกระตุ้นแบบเฟสเดียว 2 ทิศทางสำหรับมอเตอร์ 4 เฟส .....	42
4.2 วงจรจัดลำดับการกระตุ้นแบบสองเฟส 2 ทิศทางสำหรับมอเตอร์ 4 เฟส .....	42
4.3 วงจรจัดลำดับการกระตุ้นแบบครึ่งสเตป 2 ทิศทางสำหรับมอเตอร์ 3 เฟส .....	43
4.4 การเชื่อมต่อระหว่างตัวจัดลำดับกับตัวขับสเตปมอเตอร์ .....	43
4.5 วงจรขับแบบชั่วเดียว .....	44
4.6 วงจรขับสำหรับสเตปมอเตอร์ที่พันขดลวดแบบไบพอลาร์และใช้การขับแบบชั่วเดียว .....	45
4.7 วงจรขับแบบสองชั่ว .....	45
4.8 วงจรสมมุทธ์ของวงจรขับสำหรับสเตปมอเตอร์หนึ่งเฟส .....	47
4.9 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์ในระบบเปิด .....	48
4.10 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์ในระบบปิด .....	49
4.11 โครงสร้างของเอนโค้ดเดอร์ที่ใช้ในการตรวจจับสัญญาณ .....	49
4.12 สัญญาณที่ได้จากออปติคอลลเอนโค้ดเดอร์ 2 เซนแนล .....	50
5.1 ลักษณะของ Motor torque-displacement(T- $\theta$ ) characteristics .....	51
5.2 การประมาณค่ากระแสจากเคิร์ฟ T- $\theta$ ด้วยสมการเชิงเส้น .....	52
5.3 กระแสที่ได้จากการประมาณเคิร์ฟ T- $\theta$ ด้วยสมการเชิงเส้น .....	53
5.4 การคุณลักษณะ T- $\theta$ ที่เกิดขึ้นจริงสำหรับหนึ่งเฟส .....	53
5.5 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบระบบปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง.....	55
5.6 ผังการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง.....	56
5.7 วงจรตรวจจับทิศทางการหมุนด้วยออปติคอลลเอนโค้ดเดอร์ .....	57
5.8 วงจรขับสเตปปีงมอเตอร์ .....	58
5.9 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาลอก.....	58
5.10 วงจรการเปรียบเทียบค่าจริง.....	59
6.1 ผลการตอบสนองของมอเตอร์แบบ Single step กระตุ้นแบบสองเฟสขนาด 15 องศา .....	61
6.2 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในการควบคุมแบบลิเนียร์ที่ขนาดไมโครสเตป 1/4 เท่าของสเตปปกติ.....	62
6.3 สัญญาณอินพุทที่ป้อนให้กับวงขับเพื่อจ่ายกระแสสำหรับเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปปีงมอเตอร์ .....	63
6.4 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในการควบคุมแบบลิเนียร์ที่ขนาดไมโครสเตป 1/8 เท่าของสเตปปกติ.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.5 สัญญาณอินพุทที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 .....	65
6.6 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในการควบคุมแบบลิเนียร์ที่ขนาดไมโครสเตป 1/16 เท่าของสเตปปกติ.....	66
6.7 สัญญาณอินพุทที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปปี้งมอเตอร์.....	67
6.8 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในการควบคุมแบบลิเนียร์ที่ขนาดไมโครสเตป 1/32 เท่าของสเตปปกติ .....	68
6.9 สัญญาณอินพุทที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปปี้งมอเตอร์.....	69
6.10 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในการควบคุมแบบลิเนียร์ที่ขนาดไมโครสเตป 1/64 เท่าของสเตปปกติ .....	70
6.11 สัญญาณอินพุทที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปปี้งมอเตอร์.....	71
6.12 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในการควบคุมแบบลิเนียร์ที่ขนาดไมโครสเตป 1/128 เท่าของสเตปปกติ .....	72
6.13 สัญญาณอินพุทที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปปี้งมอเตอร์.....	73
6.14 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในการควบคุมแบบลิเนียร์ที่ขนาดไมโครสเตป 1/372 เท่าของสเตปปกติ .....	74
6.15 สัญญาณอินพุทที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปปี้งมอเตอร์.....	75
6.16 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในการควบคุมแบบชายนีที่ขนาดไมโครสเตป 1/4 เท่าของสเตปปกติ .....	76
6.17 สัญญาณอินพุทที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปปี้งมอเตอร์.....	77
6.18 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในการควบคุมแบบชายนีที่ขนาดไมโครสเตป 1/8 เท่าของสเตปปกติ .. .....	78
6.19 สัญญาณอินพุทที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปปี้งมอเตอร์.....	79
6.20 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในการควบคุมแบบชายนีที่ขนาดไมโครสเตป 1/16 เท่าของสเตปปกติ .....	80
6.21 สัญญาณอินพุทที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปปี้งมอเตอร์.....	81
6.22 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในการควบคุมแบบชายนีที่ขนาดไมโครสเตป 1/32 เท่าของสเตปปกติ.....	82
6.23 สัญญาณอินพุทที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปปี้งมอเตอร์.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.24 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในการควบคุมแบบขายน้ที่ขนาดไมโครสเตป 1/64 เท่าของสเตปปกติ .....	84
6.25 สัญญาณอินพุทที่ป้อนให้กับวงจรถับเพื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปปีงมอเตอร์.....	85
6.26 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในการควบคุมแบบขายน้ที่ขนาดไมโครสเตป 1/128 เท่าของสเตปปกติ.....	86
6.27 สัญญาณอินพุทที่ป้อนให้กับวงจรถับเพื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปปีงมอเตอร์.....	87
6.28 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในการควบคุมแบบขายน้ที่ขนาดไมโครสเตป 1/372 เท่าของสเตปปกติ.....	88
6.29 สัญญาณอินพุทที่ป้อนให้กับวงจรถับเพื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปปีงมอเตอร์.....	89
6.30 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์เมื่อถูกควบคุมด้วยการควบคุมแบบระบบวงปิด ด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่ขนาดไมโครสเตปเท่ากับ 1/4 เท่าของสเตปปกติ .....	90
6.31 สัญญาณควบคุมสำหรับวงจรถับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้กับขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปปีงมอเตอร์.....	91
6.32 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์เมื่อถูกควบคุมด้วยการควบคุมแบบระบบวงปิด ด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่ขนาดไมโครสเตปเท่ากับ 1/8 เท่าของสเตปปกติ .....	92
6.33 สัญญาณควบคุมสำหรับวงจรถับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้กับขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปปีงมอเตอร์.....	93
6.34 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์เมื่อถูกควบคุมด้วยการควบคุมแบบระบบวงปิด ด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่ขนาดไมโครสเตปเท่ากับ 1/16 เท่าของสเตปปกติ .....	94
6.35 สัญญาณควบคุมสำหรับวงจรถับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้กับขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปปีงมอเตอร์.....	95
6.36 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์เมื่อถูกควบคุมด้วยการควบคุมแบบระบบวงปิด ด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่ขนาดไมโครสเตปเท่ากับ 1/32 เท่าของสเตปปกติ .....	96
6.37 สัญญาณควบคุมสำหรับวงจรถับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้กับขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปปีงมอเตอร์.....	97
6.38 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์เมื่อถูกควบคุมด้วยการควบคุมแบบระบบวงปิด ด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่ขนาดไมโครสเตปเท่ากับ 1/64 เท่าของสเตปปกติ .....	98
6.39 สัญญาณควบคุมสำหรับวงจรถับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้กับขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปปีงมอเตอร์.....	99

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.40 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์เมื่อถูกควบคุมด้วยการควบคุมแบบระบบวงปิด ด้วยการเปรียบเทียบ ค่าจริงที่ขนาดไมโครสเตปเท่ากับ 1/128 เท่าของสเตปปกติ .....100	100
6.41 สัญญาณควบคุมสำหรับวงจรถับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้กับขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปปีงมอเตอร์.....101	101
6.42 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์เมื่อถูกควบคุมด้วยการควบคุมแบบระบบวงปิด ด้วยการเปรียบเทียบ ค่าจริงที่ขนาดไมโครสเตปเท่ากับ 1/372 เท่าของสเตปปกติ .....102	102
6.43 สัญญาณควบคุมสำหรับวงจรถับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้กับขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปปีงมอเตอร์.....103	103



## คำอธิบายสัญลักษณ์

<b>B</b>	:	ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก(เทสลา, T)
<b>D</b>	:	สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน(นิวตันเมตรวินาทีต่อเรเดียน, Nms ras <sup>-1</sup> )
<b>e</b>	:	แรงเคลื่อนทางไฟฟ้า(โวลท์, V)
<b>H</b>	:	ความเข้มของสนามแม่เหล็ก(แอมป์ต่อเมตร, Am <sup>-1</sup> )
<b>I, I</b>	:	กระแสไฟฟ้า(แอมป์แปร์, A)
<b>J</b>	:	ผลของความเฉื่อย(กิโลกรัมตารางเมตร, kg m <sup>2</sup> )
<b>k<sub>p</sub>, k<sub>v</sub></b>	:	ค่าคงที่ของสเตปมอเตอร์
<b>K<sub>T</sub></b>	:	แรงบิดคงที่(นิวตันเมตรต่อแอมป์เรเดียน, Nm A <sup>-1</sup> rad <sup>-1</sup> )
<b>L</b>	:	ค่าความเหนี่ยวนำ(เฮนรี่, H)
<b>m, N<sub>p</sub></b>	:	จำนวนเฟส
<b>M</b>	:	ค่าความเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดสองขด(เฮนรี่, H)
<b>n</b>	:	จำนวนรอบ
<b>N<sub>r</sub></b>	:	จำนวนซี่ฟันของโรเตอร์
<b>N<sub>s</sub></b>	:	จำนวนซี่ฟันของสเตเตอร์
<b>p</b>	:	จำนวนคู่ขั้วแม่เหล็ก
<b>P<sub>r</sub></b>	:	ความห่างระหว่างปลายซี่ฟันของโรเตอร์(เรเดียน, rad)
<b>P<sub>s</sub></b>	:	ความห่างระหว่างปลายซี่ฟันของสเตเตอร์(เรเดียน, rad)
<b>q</b>	:	จำนวนซี่ฟันของสเตเตอร์ต่อเฟส
<b>r, R</b>	:	ค่าความต้านทาน(โอห์ม, Ω)
<b>R<sub>s</sub></b>	:	อัตราการสเตปหรือความเร็วในการสเตป(สเตปต่อรอบ)
<b>T</b>	:	แรงบิด
<b>x</b>	:	จำนวนซี่ฟันของสเตเตอร์ต่อเฟส
<b>α</b>	:	ค่าคงตัวเวลา
<b>β</b>	:	ค่าคงที่เวลา
<b>ξ</b>	:	อัตราส่วนการแดมป์(damping ratio)
<b>ξ</b>	:	มุมการเคลื่อนที่ทางไฟฟ้า(เรเดียน, rad)
<b>θ, Θ</b>	:	มุมการเคลื่อนที่(เรเดียน, rad)
<b>φ, Φ</b>	:	ฟลักซ์แม่เหล็ก(เทสลาตารางเมตร, T m <sup>2</sup> )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำอธิบายสัญลักษณ์(ต่อ)

- $\Psi, \psi$  : ฟลักซ์แม่เหล็กเชื่อมโยง(flux link,rad s<sup>-1</sup>)
- $\omega_p$  : ความถี่ธรรมชาติ(หนึ่งต่อวินาที,s<sup>-1</sup>)
- $\omega$  : ความเร็วเชิงมุม(เรเดียนต่อวินาที, rad s<sup>-1</sup>)



# บทที่ 1

## บทนำ

ในการควบคุมสเตปป์มอเตอร์นั้น จำเป็นที่จะต้องทราบคุณลักษณะและคุณสมบัติของมอเตอร์เพื่อจะทำให้การใช้งานสเตปป์มอเตอร์ได้ตามความต้องการ สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะได้กล่าวถึงส่วนประกอบต่างๆ โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็นบทที่ 2 เป็นการอธิบายถึงคุณสมบัติเฉพาะตัวของสเตปป์มอเตอร์ทุกชนิดที่คล้ายกัน และลักษณะเฉพาะของสเตปป์มอเตอร์ในแต่ละชนิดเพื่อความเข้าใจการทำงานที่ดี สำหรับในบทที่ 3 เป็นการคำนวณด้วยการประมาณด้วยสมการตามการเคลื่อนที่ของสเตปป์มอเตอร์ชนิดต่างๆ รวมถึงโมเดลคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง ในบทที่ 4 เป็นการอธิบายถึงการทำงานในลักษณะการเคลื่อนของมอเตอร์ และในบทที่ 5 เป็นการกล่าวถึงการควบคุมการทำงานในลักษณะแบบระบบวงเปิด และแบบระบบวงปิดในลักษณะการบังคับการเคลื่อนที่ของแกนโรเตอร์ในโหมดโมโครสเตป ซึ่งเป็นการหาค่ากระแสอ้างอิงในลักษณะการประมาณค่าลิเนียร์และค่าชายน์ รวมถึงการออกแบบวงจรในการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ในแบบระบบวงปิดที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแกนโรเตอร์เป็นไมโครสเตปด้วยการเพิ่มและลดค่ากระแสของสเตปป์มอเตอร์แบบสัดส่วนของขดลวดของมอเตอร์แบบป้องกันจากตัวออปติคอลเอนโค้ดเดอร์จนกระทั่งทำให้แกนโรเตอร์เคลื่อนที่เป็นไมโครสเตปที่เท่ากันได้

### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

นิยามของสเตปป์มอเตอร์ เมื่อป้อนอินพุตด้วยสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่ค่าหนึ่งให้กับวงจรขับสเตปป์มอเตอร์จะทำให้โรเตอร์เคลื่อนที่ไปหนึ่งสเตปในแต่ละพัลส์ และขนาดมุมสเตปในแต่ละสเตปขึ้นอยู่กับารออกแบบโครงสร้างของสเตปป์มอเตอร์<sup>[1]</sup>

โดยปกติแล้วตัวสเตปป์มอเตอร์ คือ อุปกรณ์ที่เคลื่อนที่เป็นสเตปโดยการกระตุ้นด้วยวิธีทางแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัลอินพุตที่เป็นพัลส์ไปเป็นการเคลื่อนที่แบบนาลอกที่เอ้าท์พุท<sup>[2]</sup> ในบางครั้งสเตปป์มอเตอร์ถูกเรียกว่า สเตปป์มอเตอร์ (stepping motor) หรือ สเตปเปอร์มอเตอร์ (stepper motor) ซึ่งในสมัยก่อนการใช้งานของสเตปป์มอเตอร์จะมีประสิทธิภาพต่ำลุ่มมอเตอร์ชนิดเอซีและดีซีไม่ได้ แต่ในปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาทั้งทางด้านโครงสร้างการควบคุมการทำงานให้มีประสิทธิภาพและสะดวกต่อการนำไปใช้งาน โดยนำเอาเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์เข้ามาใช้ในการควบคุมการทำงาน ซึ่งบางครั้งเรียกว่าการควบคุมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ ขณะนี้สามารถพบเห็นการนำสเตปป์มอเตอร์มาใช้งานทั่วไป เช่น พรีนเตอร์, ดิสค์ไดรฟ์ และอุปกรณ์ทางเครื่องกล เป็นต้น

การควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ สำหรับการทำงานในโหมดปกติจะแบ่งการทำงานตามอัตราเร็วของสเตปแต่ละสเตปได้เป็น 2 ลักษณะ คือลักษณะที่ 1 เป็นการแบ่งเป็นการหมุนเป็นสเตป

การควบคุมการทำงานของสเต็ปปีงมอเตอร์ สำหรับการทํางานในโหมดปกติจะแบ่งการทํางานตามอัตราเร็วของสเต็ปแต่ละสเต็ปได้เป็น 2 ลักษณะ คือลักษณะที่ 1 เป็นการแบ่งเป็นการหมุนเป็นสเต็ป (discrete stepping) คือการเคลื่อนที่ไปหนึ่งสเต็ปแล้วมีการหยุดนิ่งหรือเข้าสู่สภาวะคงตัว ก่อนที่จะเคลื่อนที่ไปยังสเต็ปถัดไป โดยทั่วไปมักใช้การขับแบบลักษณะของแรงดันคงที่ในโหมดการทํางานปกติ ลักษณะที่ 2 เป็นการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง (slewing stepping) คือ เป็นการขับที่ให้สเต็ปปีงมอเตอร์ตอบสนองต่อสัญญาณพัลส์ที่ทำให้สเต็ปปีงมอเตอร์เคลื่อนด้วยเพิ่มอัตราเร็วของแต่ละสเต็ปให้เร็วขึ้น และเป็นไปอย่างต่อเนื่องไม่มีการหยุดนิ่ง โดยแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ในลักษณะหมุนเป็นสเต็ปทำให้เกิดปัญหาการออสซิลเลทหรือเรียกว่าการเกิดโอเวอร์ชูระหว่างเคลื่อนที่ในแต่ละสเต็ป ซึ่งในการใช้งานของสเต็ปปีงมอเตอร์บางประเภทไม่ต้องการ การแกว่งของแกนมอเตอร์หรือให้เกิดน้อยที่สุด และอีกปัญหาหนึ่งก็คือขนาดของสเต็ปปีงมอเตอร์มีขนาดใหญ่ตามโครงสร้างของตัวมอเตอร์ ซึ่งอาจจะใหญ่เกินไปที่จะนำไปใช้งานสำหรับงานที่ต้องการความละเอียดสูงได้ สำหรับการกระตุ้นแบบไมโครสเต็ปโหมดเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยให้ลดปัญหาดังกล่าวได้ ซึ่งในโหมดการกระตุ้นแบบไมโครสเต็ปมีหลายลักษณะด้วยกัน คือการควบคุมกระแสของสองเฟสให้มีอัตราส่วนเป็นลิเนียร์ (linear) และเป็นอัตราส่วนในลักษณะสัญญาณไซน์ (sine) เพื่อให้การเคลื่อนที่ของแกนโรเตอร์ทุกๆตำแหน่งไมโครสเต็ปมีค่าเท่ากันที่สภาวะคงตัว (steady state) เมื่อเวลาเข้าสู่ settling time จะเปรียบเสมือนเป็นการเคลื่อนที่แบบสเต็ปปีงขนาดเล็ก ซึ่งได้มีผู้ทำการวิจัยมาแล้วด้วยหลัก "การควบคุมแบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเต็ปด้วยการประมาณค่ากระแสแบบลิเนียร์และแบบสัญญาณไซน์ รวมถึงการหากระแสอ้างอิงแบบการทดสอบโดยตรง" ซึ่งให้ผลการตอบสนองของแกนมอเตอร์มีค่าขนาดไมโครสเต็ปที่มีค่าไม่เท่ากันและอาจเกิดการ miss step ได้ ดังนั้นจึงทำให้เกิดวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ได้ศึกษาถึงวิธีการควบคุมการขับสเต็ปปีงมอเตอร์ในโหมดไมโครสเต็ปหรือแบบสเต็ปปีงย่อยๆที่ทำให้ขนาดของไมโครสเต็ปมีขนาดเท่าๆกันทุกตำแหน่งได้และลดการ miss step ในระบบวงเปิดด้วย โดยเทคนิคของการควบคุมสเต็ปปีงมอเตอร์แบบวงเปิดในโหมดไมโครสเต็ปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง ซึ่งสามารถแสดงผลการทดลองที่มีขนาดของไมโครสเต็ปที่ถูกต้อง เมื่อเทียบกับการควบคุมแบบระบบวงเปิดในลักษณะไมโครสเต็ปเดียวกัน

## 1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวถึงสเต็ปปีงมอเตอร์ปัญหาที่ทำให้เกิดงานวิจัย ดังนั้นในส่วนนี้จึงเป็นการอธิบายถึงวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนมากขึ้น นั่นคือเพื่อการควบคุมให้การเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใดๆได้ถูกต้องแม่นยำที่สภาวะหยุดนิ่ง (steady state) ซึ่งสามารถกำหนดขึ้นได้จากการเคลื่อนที่เป็นสเต็ปคงที่และจำนวนองศาที่คงที่ตามโครงสร้างภายในของสเต็ปปีงมอเตอร์ โดยทั่วไปขนาดที่เล็กที่สุดประมาณ 0.5 องศาต่อสเต็ปตามโครงสร้างของสเต็ปปีงมอเตอร์ แต่ในขณะที่เคลื่อนที่ของตัวโรเตอร์ในสเต็ปปกติจะทำให้เกิดการสั่นขึ้นตามโครงสร้างของสเต็ปปีงมอเตอร์เป็นปัญหาของโครงสร้างภายในตัวสเต็ปปีงมอเตอร์จึงไม่สามารถทำให้ขนาดสเต็ปปีงเล็กมากๆได้ ดังนั้นจึงต้องการลดการสั่นของแกนในการเคลื่อนที่ในสเต็ปปกติ หรือโอเวอร์ชูลดลง จึงได้มีการพัฒนาโดยการแบ่งขนาดสเต็ปปีงปกติให้เล็กลงเพื่อช่วยลดการสั่นและสามารถควบคุมความแน่นอนของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งของแต่ละไมโครสเตปให้มีขนาดเท่ากันทุกตำแหน่งไมโครสเตป โดยไม่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างภายใน ทำให้เกิดประโยชน์สำหรับผู้ใช้งานในอนาคตที่จะนำไปประยุกต์ต่อไป ปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาขึ้นหลายวิธีด้วยกัน

สำหรับขอบเขตของการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือ การควบคุมการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์แบบระบบปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง โดยมีหลักการคือ การบังคับการไหลของกระแส ในขดลวด 2 เฟสของสเตปมอเตอร์เปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนกันด้วยค่าเปรียบเทียบป้อนกลับค่าจริงจากตัววัดการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ ให้เป็นไปตามค่าที่เกิดขึ้นจริงและมีค่าขนาดไมโครสเตปเท่ากันทุกค่าต่อสเตปปกติ กระแสที่ไหลในขดลวดที่ 1 และขดลวดที่ 2 จะมีลักษณะคล้ายรูปคลื่นซายน์ที่เพิ่มขึ้นและลดลงเท่ากัน เมื่อรวมกระแสทั้งสองเฟสเข้าด้วยกันจะมีค่าเท่ากับค่ากระแสที่เต็มพิกัดทุกๆ ตำแหน่งไมโครสเตป ด้วยการควบคุมกระแสในลักษณะวงปิดทั้งสองเฟสพร้อมกัน ตำแหน่งแกนของโรเตอร์ที่เคลื่อนที่ที่ถูกควบคุมด้วยการควบคุมจากวงจรรีเลย์ทรานซิสเตอร์ซึ่งเป็นฮาร์ดแวร์ (hardware) ทุกๆตำแหน่งไมโครสเตปซึ่งทำให้สามารถชดเชยให้แกนโรเตอร์เคลื่อนที่เป็นไมโครสเตปที่มีขนาดเท่ากันได้จริงและกระแสที่ได้ทุกตำแหน่งไมโครสเตปเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวจะมีค่าคงที่เสมอและในขณะที่ป้อนโวลต์ให้กับมอเตอร์เช่นกัน ในกาวิจัยนี้ซอฟต์แวร์ที่ใช้คือ โปรแกรมภาษาซีเป็นตัวควบคุมระบบเพื่อให้วงจรทำงาน โดยการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกด้วยการ์ดอินเตอร์เฟซมายังบอร์ดควบคุมการเปรียบเทียบค่าไมโครสเตปที่ต้องการกับการเคลื่อนที่ของแกนโรเตอร์จริง จากตัววัดสัญญาณการเคลื่อนที่ซึ่งใช้ออปติคัลเอนโค้ดเดอร์ เพื่อควบคุมวงจรรายกระแสในแต่ละเฟสที่ต้องการสำหรับการบังคับการหมุนของสเตปปีงมอเตอร์

### 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. ช่วยลดการเกิดออสซิลเลททางแม่คานิกัล คือช่วยลดการสั่นของตัวโรเตอร์ในขณะที่เคลื่อนที่ในสเตปปกติ
2. ช่วยลดการใช้ระบบเฟืองทด เนื่องจากการใช้เฟืองทดเป็นการเพิ่มโวลต์ให้กับสเตปปีงมอเตอร์
3. สามารถควบคุมการขับเคลื่อนของสเตปปีงมอเตอร์ให้มีการเคลื่อนที่ด้วยความละเอียดสูง โดยไม่ขึ้นกับโครงสร้างภายในของมอเตอร์
4. สามารถควบคุมให้โรเตอร์เคลื่อนที่เป็นลักษณะไมโครสเตปที่มีขนาดทุกๆไมโครสเตปเท่ากันได้ ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการควบคุมตำแหน่งของระบบให้ดีขึ้น
5. สามารถควบคุมสเตปปีงมอเตอร์ที่ไม่ทราบค่า Characteristics ให้เคลื่อนที่เป็นไมโครสเตปตามความต้องการ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานจริงได้
6. ลดการเขียนโปรแกรมที่มีความยุ่งยากซับซ้อน
7. สามารถใช้ควบคุมสเตปปีงมอเตอร์ชนิดใดๆได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

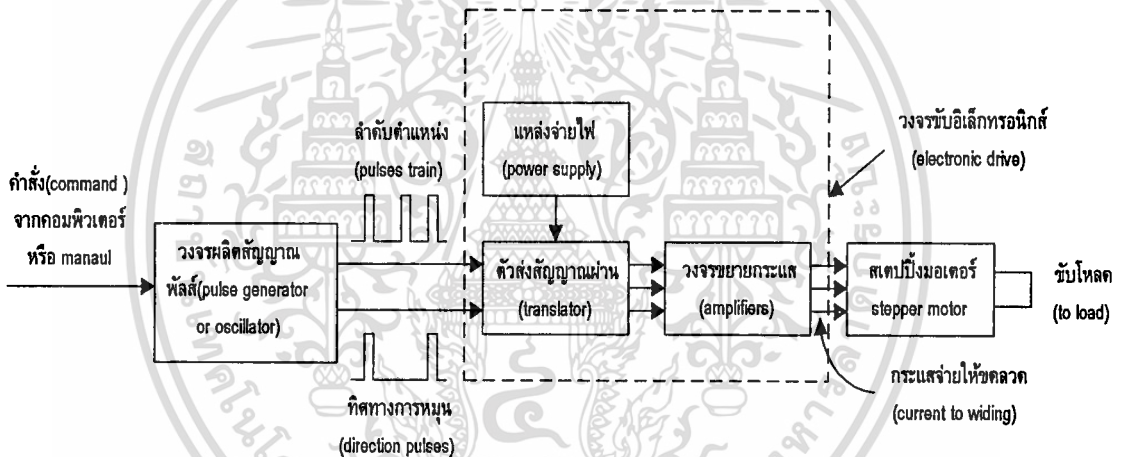
## 1.4 แนวความคิดของวิทยานิพนธ์

หลักการใหม่ที่นำเสนอ คือ การควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์แบบระบบปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง ค่ากระแสของทั้งสองเฟสของมอเตอร์เพิ่มขึ้นและลดลงเป็นสัดส่วนกันจนกว่าตำแหน่งพัลส์การเคลื่อนที่ของแกนโรเตอร์ที่วัดจากออปติคัลเอนโค้ดเดอร์มีค่าเท่ากับตำแหน่งไมโครสเตปที่กำหนดไว้จากโปรแกรมมีค่าเท่ากัน การเพิ่มและลดของกระแสทั้งสองเฟสจะหยุดเป็นคังคงที่ไว้ จนกว่าจะมีคำสั่งให้ทำงานในสเตปต่อไปและทุกตำแหน่งไมโครสเตปที่ต้องการผลรวมของกระแสจะมีค่าเต็มพิคัดของมอเตอร์ 1 เฟส โดยให้ลักษณะของกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดของเฟสที่ 1 และ เฟสที่ 2 เพิ่มขึ้นและลดลงด้วยอัตราส่วนที่เท่ากันและเป็นไปตามลักษณะการเคลื่อนที่ของแกนโรเตอร์จริง เพื่อให้ตำแหน่งแกนโรเตอร์เคลื่อนที่เป็นไมโครสเตปที่เท่ากันตามที่ต้องการ เนื่องจากมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้มีขนาดสเตปที่ใหญ่มากคือ ประมาณ 15 องศา จึงสามารถควบคุมเส้นแรงแม่เหล็กที่วิ่งผ่านซี่ฟันของแกนโรเตอร์ได้ง่ายการด้วยการควบคุมกระแส ในการควบคุมกระแสทุกๆตำแหน่งไมโครสเตปจึงจำเป็นต้องกำหนดตำแหน่งไมโครสเตปไว้ล่วงหน้า โดยการแปลงเป็นค่าตัวเลขเก็บไว้ในโปรแกรมและส่งค่าออกไปทางพอร์ทขนาด 16 บิต จากการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับวงจรภายนอกด้วยการ์ดิอินเตอร์เฟสเพื่อเข้าสู่จรเปรียบเทียบค่าที่วัดได้จากออปติคัลเอนโค้ดเดอร์ ซึ่งค่ากระแสเริ่มต้นจะกำหนดให้เฟสที่ 1 มีค่าเต็มพิคัดของมอเตอร์ และเฟสที่ 2 มีค่าเท่ากับศูนย์ จากนั้นวงจรเปรียบเทียบจะอ่านค่าตำแหน่งอ้างอิงตามจำนวนไมโครสเตปที่ต้องการจากโปรแกรมในแต่ละค่า และในขณะเดียวกันค่าที่อ่านได้จากตัวออปติคัลเอนโค้ดเดอร์จะถูกป้อนเข้ามาเปรียบเทียบพร้อมกัน ซึ่งค่าเริ่มต้นจะมีค่าเป็นศูนย์ผลการเปรียบเทียบจะถูกส่งไปยังวงจรรนาฬิกาเพื่อปล่อยพัลส์ให้กับวงจรรนับเพื่อไปเพิ่มหรือลดค่าดิจิตอลเป็นอนาลอก บังคับการไหลของกระแสในวงจรขับทั้งสองเฟสในทิศทางตรงกันข้าม เพื่อให้แกนมอเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งไมโครสเตปแรก เมื่อค่าอ้างอิงหรือตำแหน่งไมโครสเตปแรกที่ส่งมาจากพอร์ทของคอมพิวเตอร์มีค่าเท่ากับกระแสมีค่าคังคงที่เมื่อเข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมายหรือค่าสุดท้ายที่ต้องการที่ตำแหน่งไมโครสเตปนั้นๆ จนกว่าจะมีค่าอ้างอิงหรือตำแหน่งไมโครสเตปค่าต่อไป โดยสามารถแบ่งขนาดตำแหน่งไมโครสเตปย่อยออกเป็น 2 , 4 , 8 , 16 , 32 , 64 , 128 , 372 ไมโครสเตปต่อสเตปปกติ ตามความสามารถของตัววัดตำแหน่งที่สามารถวัดได้ การควบคุมการทำงานของระบบมาจากโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์

## ชนิด โครงสร้าง และการทำงานของสเตปป์มอเตอร์

### 2.1 หลักการทำงานของสเตปป์มอเตอร์

การทำงานของสเตปป์มอเตอร์ ขึ้นอยู่กับพัลส์ที่ป้อนให้กับขดลวดแต่ละเฟสของสเตปป์มอเตอร์ในลำดับที่ถูกต้องด้วยวงจรลอจิกสำหรับจัดลำดับ (sequencer logic) ด้วยค่ากระแสที่เพียงพอจากวงจรไดร์เวอร์<sup>[1]</sup> รูปที่ 2.1 แสดงถึงการควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ในลักษณะการเคลื่อนที่เป็นสเตปป์ปกติแบบต่อเนื่องและสามารถที่จะเลือกทิศทางการเคลื่อนที่ให้หมุนตามเข็มหรือทวนเข็มนาฬิกาจากการควบคุมสัญญาณเลือกทิศทางการหมุน



รูปที่ 2.1 ตัวคอนโทรลเลอร์สำหรับควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์

ในรูปที่ 2.1 สเตปป์มอเตอร์จะทำงานเมื่อเราป้อนสัญญาณพัลส์นาฬิกา (clock pulse) และสัญญาณควบคุม (control signal) ทิศทางการหมุน สำหรับตัวคอนโทรลเลอร์ของสเตปป์มอเตอร์จะอินเตอร์เฟสโดยตรงกับตัวไมโครโปรเซสเซอร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์สเตปป์มอเตอร์ หรือสามารถควบคุมแบบด้วยสวิตช์ภายนอก เนื่องจากแต่ละอินพุตพัลส์ทำให้สเตปป์มอเตอร์เคลื่อนที่ไปหนึ่งสเตปป์ปกติ การทำงานของสเตปป์มอเตอร์โดยทั่วไปแสดงอยู่ในรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นการแสดงหลักการพื้นฐานของเส้นแรงแม่เหล็กและทิศทางไหลของกระแสทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเมื่อมีการพันขดลวดรอบแกนเหล็ก

**2.1.1 ลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็กในขดลวดที่พันรอบแกนเหล็ก** สำหรับรูปที่ 2.3 เป็นส่วนประกอบของสเตปป์มอเตอร์ ที่มีแท่งแม่เหล็กถาวรติดอยู่บนเพลลาและหมุนได้อิสระเหมือนอาร์เมเจอร์ มีขั้วแม่เหล็กไฟฟ้า 2 ขั้ว ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงโลหะที่เป็นสเตเตอร์ (stator) และจากรูปตำแหน่งแกนของ

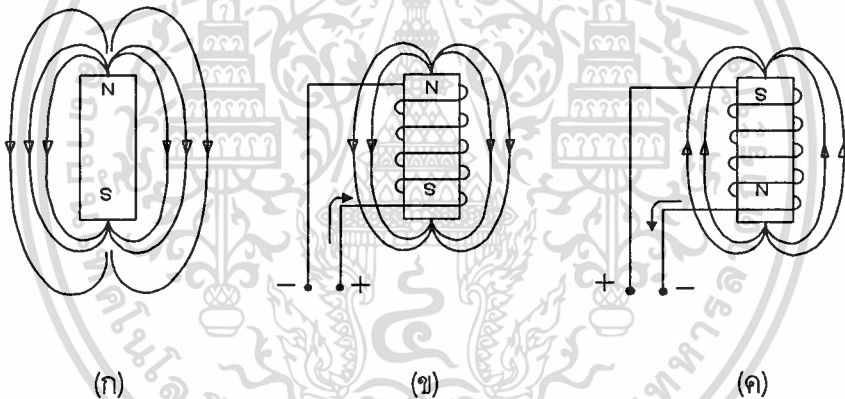
แม่เหล็กไฟฟ้า 2 ขั้ว ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโครงโลหะที่เป็นสเตเตอร์ (stator) และจากรูปตำแหน่งแกนของอาร์เมเจอร์แม่เหล็กคือ  $a'-a'$  ซึ่งต่างไปจากตำแหน่งแกนขั้วของแม่เหล็กไฟฟ้าเล็กน้อยเป็นมุม  $\theta$  แรงแม่เหล็กที่เกิดจากการดึงดูดของขั้วแม่เหล็กที่ต่างกันทำให้เกิดส่วนของแรงปกติขึ้นสามารถได้ด้วยสมการที่ (2.1)

$$F_n = F \cos \theta \quad (\text{แรงนี้จะตั้งฉากกับแกน } a'-a') \quad (2.1)$$

ทอร์กผลรวม

$$T = F_n \cdot R \quad (2.2)$$

ทำให้อาร์เมเจอร์หมุนในทิศทาง CW (clockwise) จนกว่าแกนของอาร์เมเจอร์  $a'-a'$  จะอยู่ในแนวเดียวกับแกนขั้วของสเตเตอร์ ถ้าหากมีขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าหลาย ๆ ขั้วรอบ ๆ สเตเตอร์และขั้วเหล่านี้นั้นถูก

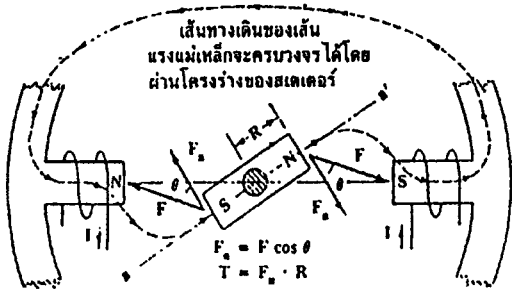


รูปที่ 2.2 แสดงถึงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในลักษณะต่าง ๆ

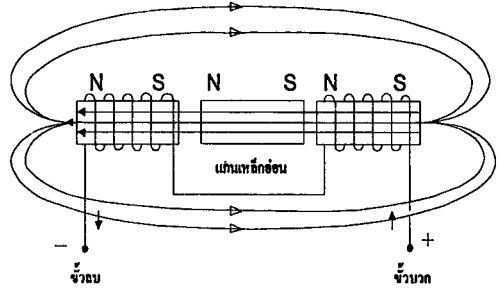
- (ก) สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากแม่เหล็กถาวร
- (ข) สนามแม่เหล็กของแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแส  $I$
- (ค) ขั้วแม่เหล็กกลับทิศทางเมื่อขดลวดถูกพันกลับทิศและทิศทางการไหลของกระแสไม่เปลี่ยนแปลง

กระตุ้นด้วยกระแสพัลส์ในรูปแบบที่เรียงลำดับกันไปอาร์เมเจอร์จะหมุนในรูปลักษณะของสเตปที่เป็นไปตามการหมุนของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการสวิตช์ที่เรียงลำดับของขดลวดขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าของสเตเตอร์ สำหรับในรูป 2.3 ข) เป็นการกลับทิศทางการหมุนให้ โดยให้กระแสกลับขั้วกับในรูป ก) แกนโรเตอร์สามารถหมุนได้เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.3 ก) แรงดึงดูดทำให้เกิดทอร์คหมุนอาร์เมเจอร์ให้ไปอยู่ในตำแหน่งสมดุล

ข) ขั้วแม่เหล็กกลับทางเมื่อป้อนกระแสกลับทิศทางอาร์เมเจอร์อยู่ในตำแหน่งสมดุล

## 2.2 ชนิดของสเตปป์มอเตอร์

สเตปป์มอเตอร์ สามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ คือ ชนิดแปรค่ารีลักแตนซ์ได้ (Variable reluctance) แบ่งออกเป็นแบบสเต็ปเดียว และหลายสเต็ป, สเตปป์มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) และสเตปป์มอเตอร์แบบไฮบริด (Hybrid) สำหรับสเตปป์มอเตอร์แบบไฮบริด แยกได้ 2 ลักษณะคือ ที่มีแม่เหล็กถาวรในตัวสเตเตอร์และ ด้วยการจับขั้ว และในหัวข้อต่อไปจะได้อธิบายรายละเอียดต่อไป

**2.2.1 สเตปป์มอเตอร์แบบคาร์รีล็คแต้นซ์แปรค่าได้ที่มีสเต็ปเดียว** สเตปป์มอเตอร์แบบคาร์รีล็คแต้นซ์แปรค่าได้ที่มีสเต็ปเดียวจะมีโรเตอร์ที่มีซี่ฟันชุดเดียว เมื่อเทียบกับชนิดที่มีหลายสเต็ปหมายถึงโรเตอร์ซี่ฟันหลายชุด และจะเท่ากับซี่ฟันของสเตเตอร์ ซึ่งโรเตอร์และสเตเตอร์ทำจากสารแม่เหล็ก จากรูปที่ 2.4 จะเป็นสเตปป์มอเตอร์ที่มี 3 เฟส แต่ละเฟสใช้ขดลวดพันบน 4 ขั้วหรือซี่ฟันของสเตเตอร์ ดังตัวอย่างที่จะอธิบายต่อไปนี้ คือ เฟสที่ 1 พันอยู่บนขั้วที่ 1, 4, 7 และ 10 ของสเตเตอร์ ดังนั้น สเตเตอร์จะมีขั้ว 12 ซี่ฟัน และในที่นี้กำหนดให้โรเตอร์มี 16 ซี่ฟัน ดังนั้นขั้วของสเตเตอร์ที่อยู่ตรงกันข้ามจะพันด้วยขดลวดลักษณะที่ต่างกันเพื่อให้มีความสมดุลระหว่างเส้นแรงแม่เหล็กเข้าและออกจากโรเตอร์ ตัวอย่างโครงสร้างและลักษณะของสเตปป์มอเตอร์แบบคาร์รีล็คแต้นซ์แปรค่าได้ที่มีสเต็ปเดียวแสดงได้ในรูปที่ 2.4 มีโครงสร้างดังนี้

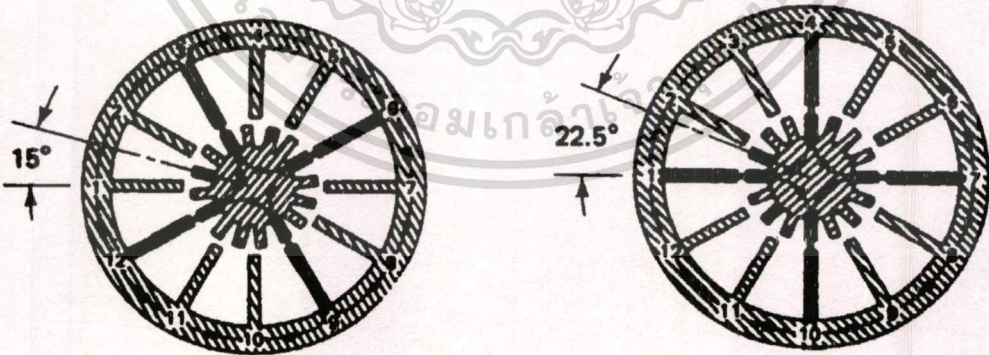
- $N_r = 16$  ; จำนวนซี่ฟันของโรเตอร์
- $N_s = 12$  ; จำนวนซี่ฟันของสเตเตอร์
- $X = 4$  โพล/เฟส ; จำนวนขั้วหารด้วยจำนวนเฟส
- $\theta = 7.5^\circ$  ; ขนาดองศาต่อสเต็ป
- $R_s = 48$  สเต็ป/รอบ ; จำนวนสเต็ปต่อรอบ

จะเกิดขึ้นระหว่างคู่ขั้ว (11,e), (8,6), และ (5,d) ดังอธิบายผ่านมาแล้วในรูปที่ 2.3 และผลที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้เกิดทอร์กระทำต่อโรเตอร์ให้หมุนไปจนกระทั่งชี้ฟัน a, d, b และ e ของโรเตอร์อยู่ในแนวเดียวกับชี้ฟันที่ 2, 5, 8 และ 11 ของสเตเตอร์ตามลำดับ ขณะเวลาดังกล่าวช่องว่างระหว่างชี้ฟันตามลำดับจะมีค่าน้อยที่สุด ผลลัพธ์ของคาร์ลัคแต้นซ์จะมีค่าต่ำที่สุด และเส้นแรงแม่เหล็กจะมีค่าสูงสุดผ่านวงจรแม่เหล็ก ที่ตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งที่สมดุลย์ของการขับเพลส 3 ในกระบวนการที่กล่าวมาแล้วโรเตอร์จะเคลื่อนที่ในทิศทาง CW หนึ่งสเตปเป็นมุม  $7.5^\circ$  สำหรับการทำงานที่สมบูรณ์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.5 คือเมื่อตำแหน่งเริ่มต้นของชี้ฟันของโรเตอร์จะเป็นลำดับ การหมุนของโรเตอร์มีทิศทางตามเข็มนาฬิกาหรือ CW เมื่อเฟสถูกขับในลักษณะเรียงลำดับ 1-3-2-1 ชี้ฟันของโรเตอร์ที่เป็นลำดับจะเคลื่อนที่ไป 3 สเตปคิดเป็นมุมได้เท่ากับ  $22.5^\circ$  โดยขับเพลสในลักษณะเรียงลำดับเดิมซ้ำใหม่อีกเมื่อต้องการให้โรเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาหรือ CW แต่ถ้าต้องการให้โรเตอร์หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาหรือ CCW ต้องกลับการเรียงลำดับเพลสเป็น 1-2-3



สเตปที่ 0 เป็นการเริ่มต้นการเคลื่อนที่ 0 องศา

สเตปที่ 1 เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้น 7.5 องศา

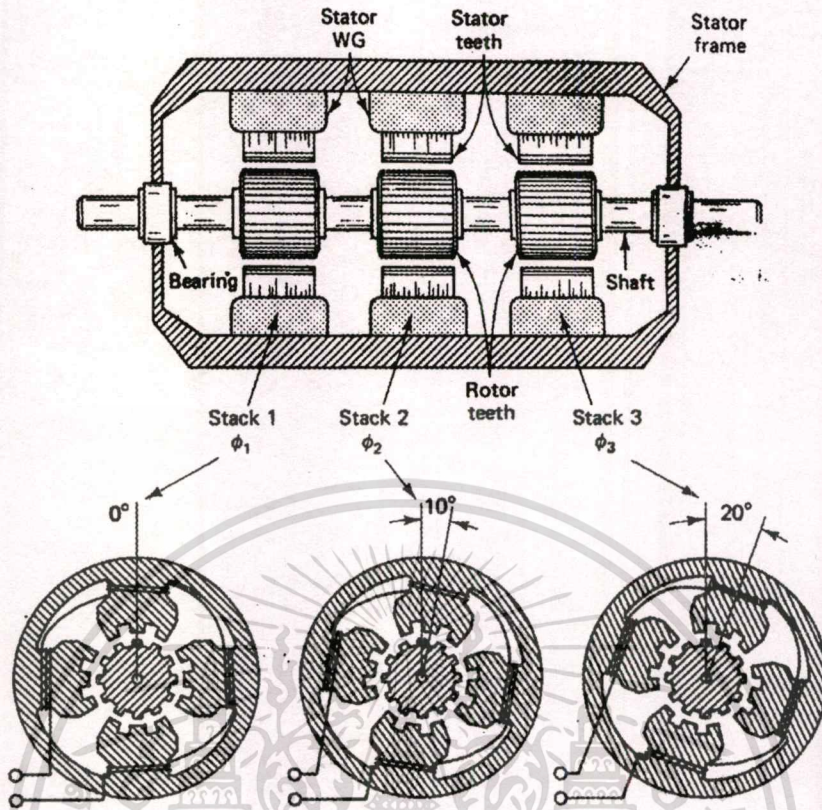


สเตปที่ 2 เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้น 15 องศา

สเตปที่ 1 เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้น 22.5 องศา

**รูปที่ 2.5** แสดงลำดับการสวิตช์ 3 สเตปของสเตปป์มอเตอร์ชนิดคาร์ลัคแต้นซ์แปรค่าได้ชนิดสเต็ปเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของสเตปป์มอเตอร์แบบรีลัคแตนซ์แปรค่าได้มี 3 สเต็ค

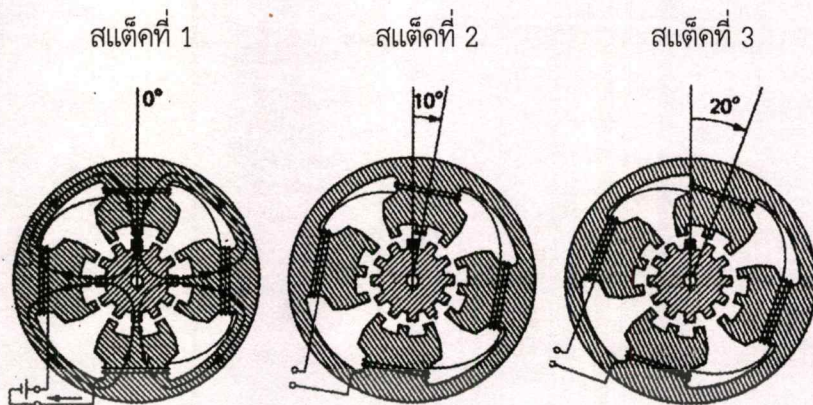
**2.2.2 สเตปป์มอเตอร์แบบรีลัคแตนซ์แปรค่าได้มีหลายสเต็ค** สเตปป์มอเตอร์แบบรีลัคแตนซ์แปรค่า และมีหลายสเต็คหรือมีมากกว่าหนึ่งสเต็คขึ้นไป คำว่าสเต็คในที่นี้หมายถึงเฟสซึ่งประกอบด้วยโรเตอร์ที่เป็นซี่ฟันและโครงร่างของสเตเตอร์อยู่รอบนอก สเตปป์มอเตอร์ชนิดที่แสดงอยู่นี้เป็นแบบที่มี 3 สเต็ค (หมายถึง 3 เฟส) และแสดงโครงร่างในรูปที่ 2.6 จากรูปสเตปป์มอเตอร์ได้ถูกออกแบบให้สเตเตอร์ของแต่ละสเต็คประกอบด้วย 4 โพล และแต่ละโพลจะมีซี่ฟัน 3 ซี่ ซึ่งต่างจากแบบสเต็คเดียว (แต่ละโพลจะมีซี่ฟันเดียว) ข้อสังเกตในแต่ละสเต็คจำนวนซี่ฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์จะมีจำนวนซี่ฟันเท่ากันซึ่งต่างกับแบบสเต็คเดียว นั่นคือจำนวนซี่ฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์จะเท่ากันไม่ได้ถ้าหากมีจำนวนซี่ฟันเท่ากันมอเตอร์จะไม่ทำงาน

สำหรับการทำงานของมอเตอร์ชนิดนี้คือ จากรูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างของโรเตอร์และสเตเตอร์ที่มี 3 สเต็ค ในแต่ละสเต็คจะมี  $N_r = N_s$  แต่ละสเต็คจะมีตำแหน่งของสเตเตอร์แตกต่างจากตำแหน่งของสเตเตอร์ในสเต็คถัดไปเท่ากับ  $10^\circ$  ส่วนซี่ฟันของโรเตอร์ทั้ง 3 อันจะประกอบอยู่บนแกนเดียวกันและได้รับการปรับแต่งให้อยู่ในแนวเดียวกันอย่างสมบูรณ์ ตามปกติการหาค่ามุมสเตป (หรือ index angle) ในที่นี้หาค่า  $\theta_1$  (index angle) ได้จากสมการ คือ

$$\theta_1 = 360^\circ/3 = 120^\circ, P_r = 360^\circ/12 = 30^\circ, N_r = N_s = 12 \text{ ซี่}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิพนธ์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

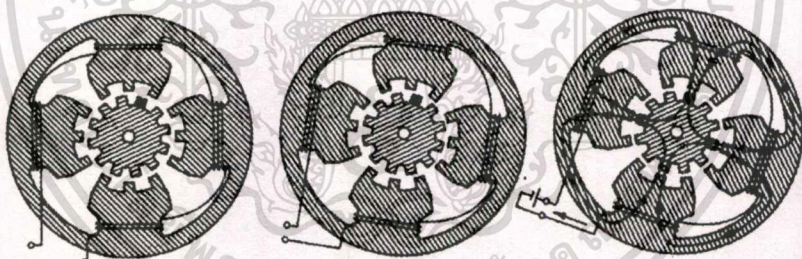
สเตปป์มอเตอร์แบบ 3 สเต็คมีโรเตอร์ 3 อันติคบนเพลลาเดียวกันทั้ง 3 สเต็คแต่มีวงจรมแม่เหล็กแยกกัน



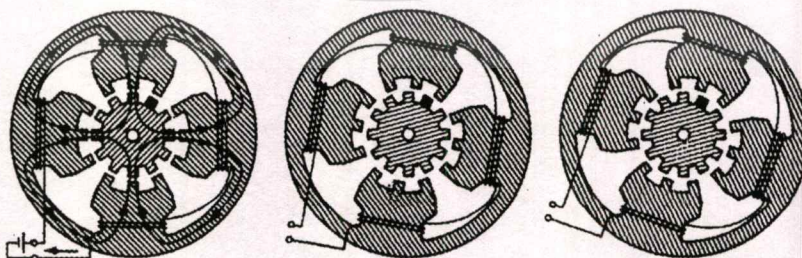
ตำแหน่งเริ่มต้น เฟสที่ 1 ได้รับการกระตุ้น



เฟสที่ 2 ได้รับการกระตุ้นเคลื่อนที่สเตปที่ 1 เป็นมุม 10°



เฟสที่ 3 ได้รับการกระตุ้นเคลื่อนที่สเตปที่ 2 เป็นมุม 20°

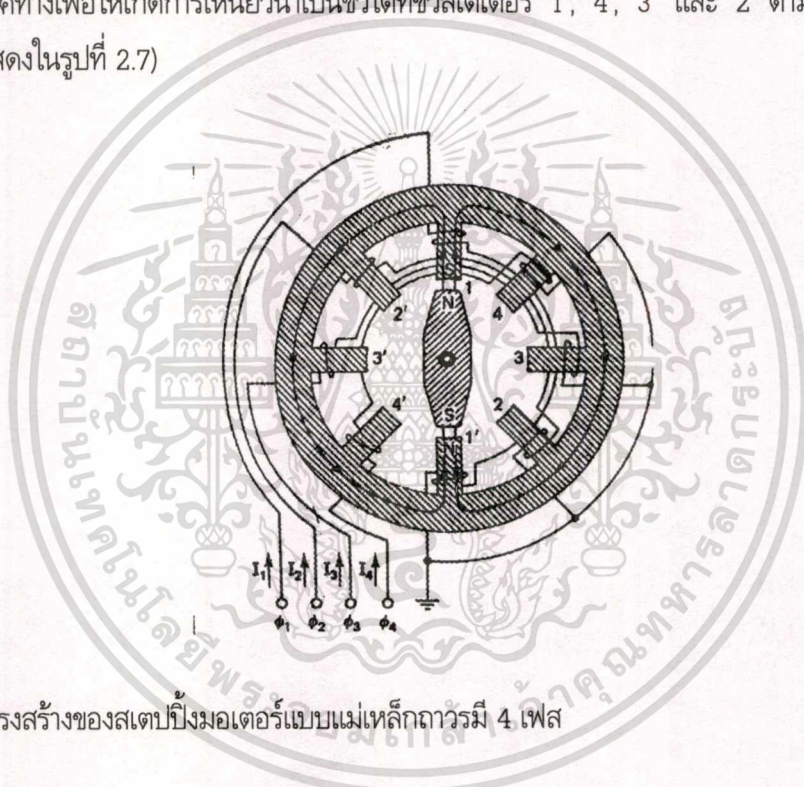


เฟสที่ 4 ได้รับการกระตุ้นเคลื่อนที่สเตปที่ 3 เป็นมุม 30°

รูปที่ 2.7 แสดงถึงตำแหน่งของโรเตอร์และทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.2.3 สเตปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร** โครงสร้างของสเตปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร แสดงได้ในรูปที่ 2.8 จากรูปเป็นสเตปป์มอเตอร์แบบ 4 เฟส แต่ละเฟสเป็นขดลวดอยู่บน 2 ขั้วของสเตปป์มอเตอร์ ดังนั้นในการออกแบบนี้สเตปป์มอเตอร์จะต้องมี 8 ขั้ว โดยโรเตอร์จะทำจากแม่เหล็กถาวรและอยู่ในแนวของขั้วสเตปป์มอเตอร์ 1 และ 1' การที่โรเตอร์หยุดตรงตำแหน่งนี้ได้ด้วยกระแส  $I_1$  ที่ไหลอยู่ในเฟส 1 จากรูปที่ 2.4 ขดลวดของเฟส  $\phi_1, \phi_4, \phi_3$  และ  $\phi_2$  (1-4-3-2 ตามลำดับ) จะได้รับพลังงานด้วยกระแสพัลส์ที่สอดคล้องกัน  $I_1, I_4, I_3$  และ  $I_2$  (กระแสแต่ละเฟสจะไหลในทิศทางที่แสดงในไดอะแกรม) แต่ละสเตปป์ โรเตอร์จะหมุนไปทางทิศตามเข็มนาฬิกา  $45^\circ = (360^\circ/8)$  เมื่อขั้วเหนือของโรเตอร์ (แม่เหล็กถาวร) หมุนไปถึงขั้วของสเตปป์มอเตอร์หมายเลข 2 ลำดับการขั้วขดลวดเฟสของสเตปป์มอเตอร์คือ 1-4-3-2 จะต้องกระทำเหมือนเดิม (เพื่อให้มอเตอร์หมุนไปตามเข็มนาฬิกาอีก  $180^\circ$ ) ยกเว้นต้องการให้หมุนกลับทิศทางใน  $180^\circ$  ที่เหลือด้วยการป้อนกระแสกลับทิศทางเพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำเป็นขั้วใต้ที่ขั้วสเตปป์มอเตอร์ 1', 4', 3' และ 2 ตามลำดับ (ทิศทางของกระแสแสดงในรูปที่ 2.7)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของสเตปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรมี 4 เฟส

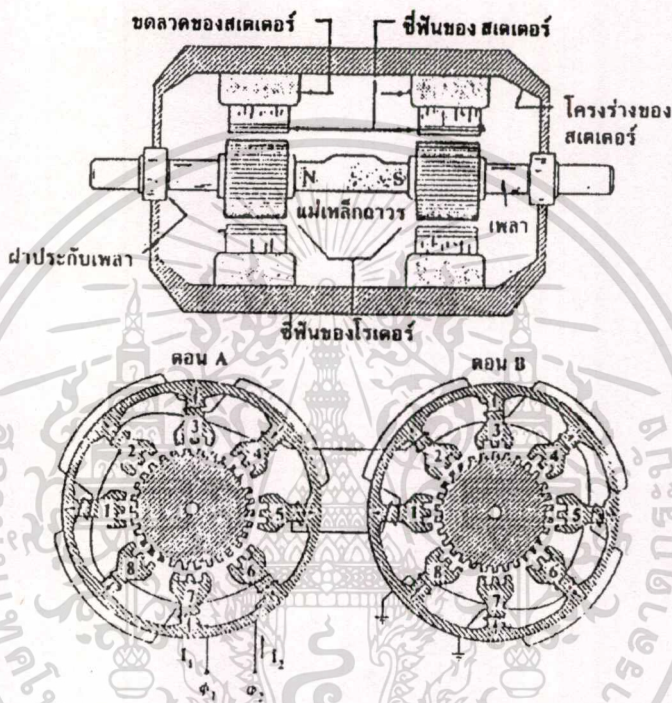
**2.2.4 สเตปป์มอเตอร์แบบไฮบริด** สเตปป์มอเตอร์ชนิดนี้มีคุณลักษณะผสมของระหว่างสเตปป์มอเตอร์ ชนิดแม่เหล็กถาวร และ ชนิดรีลัคแตนซ์แปรค่าได้ มีโครงสร้างในรูปที่ 2.8 แสดงถึงโครงสร้างของสเตปป์มอเตอร์แบบไฮบริด ซึ่งประกอบไปด้วยแม่เหล็กถาวร 2 ตอนกับแกนแม่เหล็กอยู่ระหว่าง 2 ตอน แต่ละตอนประกอบด้วยขั้วฟันของโรเตอร์และโพลของสเตปป์มอเตอร์ที่มีขั้วฟันเช่นกันและพันด้วยขดลวด รายละเอียดของลักษณะโครงสร้างของไฮบริดสเตปป์มอเตอร์มีดังนี้

1. จำนวนขั้วฟันของโรเตอร์และสเตปป์มอเตอร์ไม่เท่ากัน
2. ตอน A และตอน B มีโครงสร้างเหมือนกัน
3. ขั้วฟันของสเตปป์มอเตอร์ทั้ง 2 ตอนจะอยู่ในแนวเดียวกันอย่างถูกต้อง
4. ส่วนขั้วฟันของโรเตอร์ทั้ง 2 ตอนจะมีตำแหน่งที่แตกต่างกัน  $(1/2)P_r$  ในรูปที่ 2.8 กำหนดให้

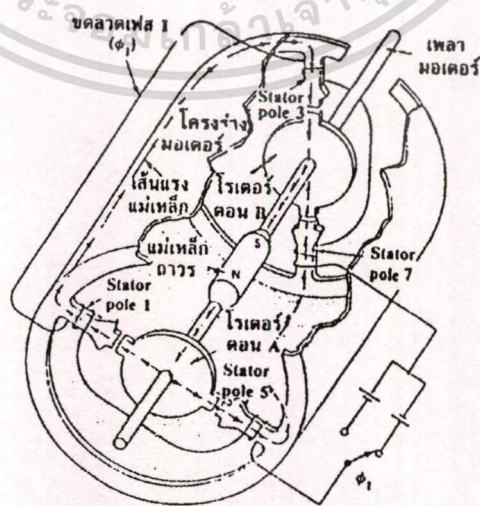
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$P_t = (360^\circ/30) = 12^\circ$  ดังนั้น ตำแหน่งซี่ฟันของโรเตอร์ทั้ง 2 ตอนจะต่างกัน  $6^\circ$ )

5. สเตเตอร์ของแต่ละตอนมี 8 โพลแบ่งออกเป็น 2 สเตเตอร์
6. เฟสที่ 1 พันขดลวดบนสเตเตอร์โพลหมายเลข 1, 3, 5 และ 7 ของทั้งตอน A และ B
7. เฟสที่ 2 พันขดลวดบนสเตเตอร์โพลหมายเลข 2, 4, 6 และ 8 ของทั้งตอน A และ B
8. แกนแม่เหล็กถาวรเหนี่ยวนำโรเตอร์ในตอน A ให้เป็นขั้วเหนือ และในตอน B เป็น ขั้วใต้  
ทิศทางเดินของสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์โพลจะขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสเฟสอธิบายได้ดังในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของไฮบริดสเตปปีงมอเตอร์



รูปที่ 2.10 วงจรแม่เหล็กของสเตปปีงมอเตอร์แบบไฮบริด

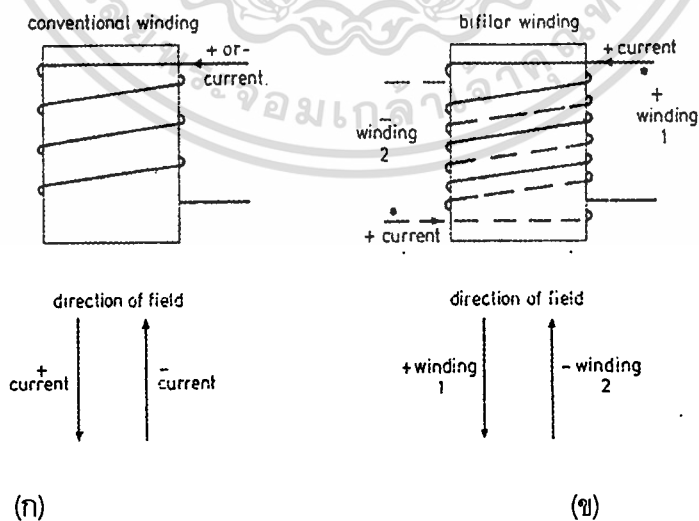
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.10 เป็นการทำงานของสเตปป์มอเตอร์แบบไฮบริด คือ เมื่อเฟส 1 ได้รับพลังงานจากกระแส  $I_1$  ( $\phi_1$ ) ในทิศทางตามลูกศร ซึ่งฟันของโรเตอร์ตอน A จะอยู่ในแนวเดียวกับซี่ฟันของสเตเตอร์ในโพลที่ 1 และ 5 ส่วนตอน B จะอยู่ในแนวเดียวกับซี่ฟันของโพลที่ 3 และ 7 เพื่อให้เพลของมอเตอร์หมุนไปในทิศทาง CW เราต้องหยุดการป้อนกระแส  $I_1$  และป้อนกระแส  $I_2$  ให้กับเฟสที่ 2 ( $\phi_2$ ) ดังนั้นเราจะต้องป้อนกระแส  $I_2$  ในทิศทางที่ถูกต้อง คือ โพลที่ 4, 8 ในตอน A และโพลที่ 2, 6 ถูกเหนี่ยวนำเพื่อให้เกิดวงจรมแม่เหล็กที่สมบูรณ์ในกรณีนี้  $I_2$  จะเป็นลบ จากรูปที่ 2.10 เป็นการลำดับการสวิตช์ (ให้กระแสไหล) ให้มอเตอร์หมุนไปในทิศทาง CW จำนวน 4 สเตป ซึ่งแสดงถึง ตำแหน่งของโรเตอร์และทิศทางการเป็นแม่เหล็กของสเตเตอร์โพลในแต่ละตอนด้วยการกำหนดทิศทางกระแสของกระแสเฟส สำหรับการหมุนในทิศทาง CW จะเป็นไปตามรูป เราสามารถกำหนดลำดับของกระแสดังนี้ คือ  $1^+, 2^-, 1^+$  และ  $1^+$  แต่ถ้าหากต้องการให้มอเตอร์หมุนไปในทิศทาง CCW ก็จะต้องเรียงลำดับการจ่ายกระแสตามนี้  $1^+, 2^+, 1^-, 2^-$  และ  $1^+$

## 2.3 การพันขดลวด

### 2.3.1 แบบโมโนฟิลาร์และแบบไบฟิลาร์

การพันขดลวดในสเตปป์มอเตอร์ชนิด วาริเอเบิลรีลักแตนซ์ แบบหลายสเต็ปใช้การพันแบบโซลินอยด์ ส่วนในไฮบริดจ์ จะเป็นการพันแบบโมโนฟิลาร์และแบบไบฟิลาร์ ในการพันแบบไบฟิลาร์ นั้นเป็นการพันของเส้นลวด 2 เส้นซ้อนทับกันบนแกนเดียวกันมีทิศทางพันตรงกันข้าม และนำปลายแยกเข้าด้วยกัน ถ้าขดลวดหนึ่งเป็นเฟสที่ 1 อีกขดหนึ่งจะเป็นเฟสที่ 3 เช่นเดียวกันถ้าหากขดลวดที่ 1 เป็นเฟสที่ 2 อีกขดหนึ่งจะเป็นของเฟสที่ 4 ในการพันแบบไบฟิลาร์มีจุดประสงค์คือ เพื่อที่จะกระตุ้นให้ขดลวดของสเตเตอร์สามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางกระแสได้



รูปที่ 2.11 การพันขดลวดของสเตปป์มอเตอร์

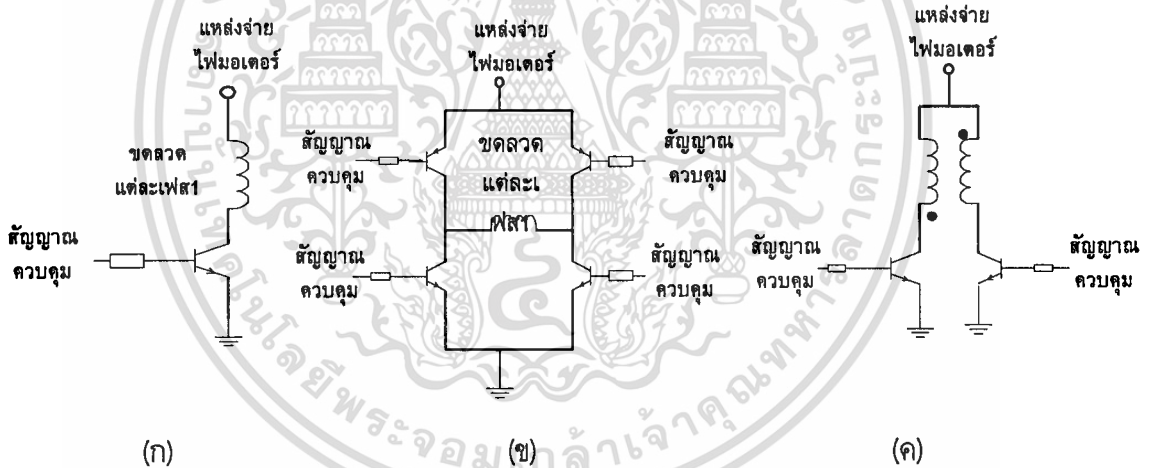
(ก) การพันแบบโมโนฟิลาร์

(ข) การพันแบบไบฟิลาร์

## 2.4 วิธีการหรือโหมดการกระตุ้นการขับสเตปป์มอเตอร์

ลักษณะของโหมดที่ใช้ในการขับสเตปป์มอเตอร์นั้น มีอยู่ด้วยการหลายแบบและที่จะอธิบายต่อไปนี้ การกระตุ้นตามการพันขดลวดในหัวข้อ การพันขดลวด ในการกระตุ้นการทำงานของคู่ขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าหรือเฟสของขดลวด สามารถกระทำได้ 3 วิธีอย่างใดอย่างหนึ่ง

1. การพันแบบโมนโพลาร์ ขั้วที่เกิดจากการกระตุ้นอาจจะเป็นขั้วเหนือหรือขั้วใต้ อย่างไม่อย่างหนึ่ง ไม่สามารถเปลี่ยนขั้วได้ในขณะใช้งาน หรือไม่สามารถสลับไปมาได้ วิธีนี้เรียกว่า การกระตุ้นแบบขั้วเดียว (Unipolar Excitation)
2. การพันแบบโมนโพลาร์ ที่สามารถกลับขั้วทิศทางของกระแสได้เนื่องจากใช้วงจรบริดจ์เป็นตัวสวิตช์ควบคุม ซึ่งวงจรบริดจ์อาจจะใช้ทรานซิสเตอร์ 4 ตัว หรือสวิตช์ 4 ตัวต่อหนึ่งเฟส วิธีนี้เรียกว่า การกระตุ้นแบบ 2 ขั้ว (Bipolar Excitation)
3. การพันแบบไบโพลาร์ สามารถที่จะกระตุ้นให้ขั้วของสเตเตอร์เป็นขั้วเหนือหรือขั้วใต้ได้ เนื่องจากการพันของขดลวดที่มี 2 ขดมีการพันกลับทิศทางกัน และอาศัยสวิตช์หนึ่งตัวต่อเฟส



รูปที่ 2.12 วงจรการกระตุ้นพื้นฐาน 3 แบบ

- (ก) การพันแบบโมนโพลาร์ กับ การกระตุ้นสเตปป์มอเตอร์แบบยูนิโพลาร์
- (ข) การพันแบบโมนโพลาร์ กับ การกระตุ้นสเตปป์มอเตอร์แบบไบโพลาร์
- (ค) การพันแบบไบโพลาร์ กับ การกระตุ้นสเตปป์มอเตอร์แบบไบโพลาร์

ลักษณะการกระตุ้นทั้ง 3 แบบ สามารถแสดงเป็นวงจรได้ในรูปที่ 2.12 เป็นวงจรการกระตุ้นพื้นฐาน ที่ในการขับหรือจ่ายกระแสให้กับขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ เมื่อต้องการให้สเตปป์มอเตอร์เคลื่อนที่หรือหมุนอย่างต่อเนื่อง จึงจำเป็นต้องจัดลำดับการกระตุ้นให้แต่ละเฟสได้รับกระแสตามลำดับและทิศทางที่ต้องการให้โรเตอร์เคลื่อนที่ไป โดยมีหลายวิธีในการกระตุ้น แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะ 4 วิธีเท่านั้นคือ การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระตุ้นแบบเฟสเดียว (Single Phase Excitation) เป็นการกระตุ้นที่ละเฟสตามจังหวะนาฬิกา , การกระตุ้นแบบสองเฟส (Two Phase Excitation) เป็นการกระตุ้นพร้อมกันที่ละสองเฟสตามจังหวะนาฬิกา , แบบกระตุ้นครึ่งสเตป (Half - Step Excitation) เป็นการรวมเอาสองแบบแรกเข้าด้วยกัน โดยสลับกันระหว่างแบบแรกและแบบที่สอง สำหรับแบบสุดท้ายคือ การกระตุ้นแบบมินิสเตป (mimistep excitation) หรือการกระตุ้นแบบไมโครสเตป (Microstep Excitation) เป็นการกระตุ้นในแบบที่สอง และให้กระแสทั้งสองเฟสเปลี่ยนแปลงขึ้นและลงเป็นสัดส่วนกันซึ่งได้จากการประมาณค่าคุณลักษณะเทอร์คของมอเตอร์

**2.4.1 ลำดับการทำงานในโหมดปกติด้วยการกระตุ้นแบบหนึ่งเฟส (one phase excitation)** จากตารางที่ 1 เป็นการแสดงลำดับการกระตุ้นในแบบหนึ่งเฟสสำหรับสเตปปีงมอเตอร์ที่มี 3 เฟส และ 4 เฟส ในเส้นแรงเงาในตารางแสดงถึงเฟสที่ถูกกระตุ้น เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนลำดับของการกระตุ้นของเฟสต่าง ๆ เป็นดังนี้ คือจากเฟส 1 ไปเฟส 2 และเฟส 3 เป็นลักษณะ CW ถ้าต้องการให้หมุนในทางกลับกันก็ต้องกระตุ้นจากเฟส 3 ไปเฟส 2 และเฟส 1 การทำงานในลักษณะนี้บางครั้งจะถูกเรียกว่า เป็นการขับแบบที่ละเฟสในโหมดหนึ่งสเตปหรือเต็มสเตป

**ตารางที่ 2.1** แสดงลำดับขับแบบปกติด้วยการกระตุ้นหนึ่งเฟส

- (ก) สำหรับสเตปปีงมอเตอร์ชนิด 3 เฟส  
(ข) สำหรับสเตปปีงมอเตอร์ชนิด 4 เฟส

ลำดับพัลส์	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ขดลวดเฟสที่ 1	on	on			on			on		
ขดลวดเฟสที่ 2			on			on			on	
ขดลวดเฟสที่ 3				on			on			on

(ก)

ลำดับพัลส์	R	1	2	3	4	5	6	7	8
ขดลวดเฟสที่ 1	on	on				on			
ขดลวดเฟสที่ 2			on				on		
ขดลวดเฟสที่ 3				on				on	
ขดลวดเฟสที่ 4					on				on

(ข)

**2.4.2 ลำดับการทำงานในโหมดปกติด้วยการกระตุ้นแบบสองเฟส(two phase excitation)** การทำงานของมอเตอร์ในลักษณะนี้เรียกว่า การทำงานที่ละสองเฟส ซึ่งมีลำดับการกระตุ้นดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์กันระหว่างตัวโรเตอร์และสเตเตอร์ในการเกิดตำแหน่งที่สมดุลกัน จากตารางที่ 2 เป็นลำดับการกระตุ้นที่ใช้สำหรับสเตปปีงมอเตอร์ชนิด 3 เฟส และ 4 เฟส การทำงานคือ เมื่อเรากระตุ้นเฟสที่ 1 และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 ด้วยพัลส์ที่ 1 ตำแหน่งแกนจะอยู่ในสภาวะสมดุลและเมื่อพัลส์ที่ 2 เข้ามาจะไปกระตุ้นให้เฟสที่ 3 ทำงาน และเฟสที่ 1 หยุด ในขณะขณะที่เฟสที่ 2 ยังคงทำงานค้างอยู่ นั่นคือจะมีอยู่ 2 เฟสที่ทำงานพร้อมกัน จะทำให้ โรเตอร์เคลื่อนที่ไปครึ่งละหนึ่งสเตป ซึ่งการเกิดลักษณะนี้เป็นการกระตุ้นในโหมตหนึ่งสเตป

ตารางที่ 2.2 แสดงลำดับการทำงานในโหมตปกติด้วยการกระตุ้นแบบสองเฟส

(ก) สำหรับสเตปปีงมอเตอร์ชนิด 3 เฟส

(ข) สำหรับสเตปปีงมอเตอร์ชนิด 4 เฟส

ลำดับพัลส์	R	1	2	3	4	5	6	7	8
ขลวดเฟสที่ 1	on	on		on	on		on	on	
ขลวดเฟสที่ 2		on	on		on	on		on	on
ขลวดเฟสที่ 3			on	on		on	on		

(ก)

ลำดับพัลส์	R	1	2	3	4	5	6	7	8
ขลวดเฟสที่ 1	on	on			on	on			
ขลวดเฟสที่ 2		on	on			on	on		
ขลวดเฟสที่ 3			on	on			on	on	
ขลวดเฟสที่ 4				on	on			on	on

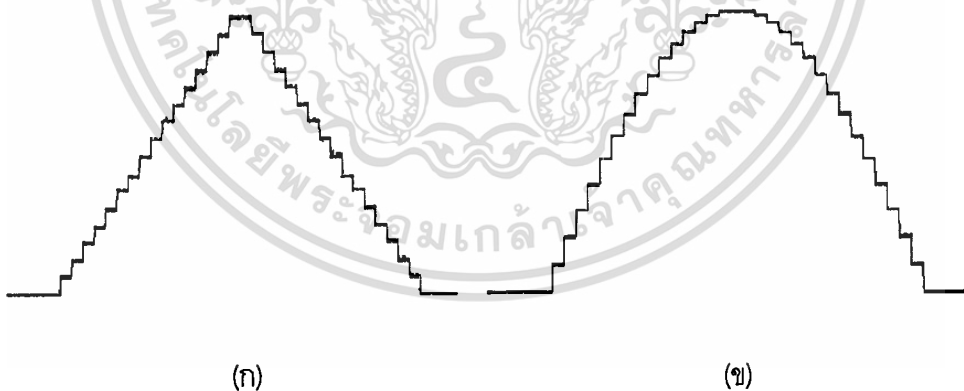
(ข)

2.4.3 ลำดับการทำงานในโหมตการเคลื่อนที่ครึ่งสเตป (half step excitation) การกระตุ้นในลักษณะนี้จะเป็นการรวมเอาการขับแบบทีละเฟสและสองเฟสมารวมกัน และได้แสดงให้เห็นในตารางที่ 4 สำหรับสเตปปีงมอเตอร์ชนิด 3 เฟส ในที่นี้จะมีสภาวะของพัลส์ 2 ตัว คือ A และ B โดย A จะแสดงถึงการเคลื่อนที่แบบการกระตุ้นทีละเฟส และ B เป็นตัวแสดงถึงการกระตุ้นทีละสองเฟส ซึ่งจะเป็นการเคลื่อนที่จากตำแหน่งสมดุล และมีลำดับการกระตุ้นในตารางที่ 3

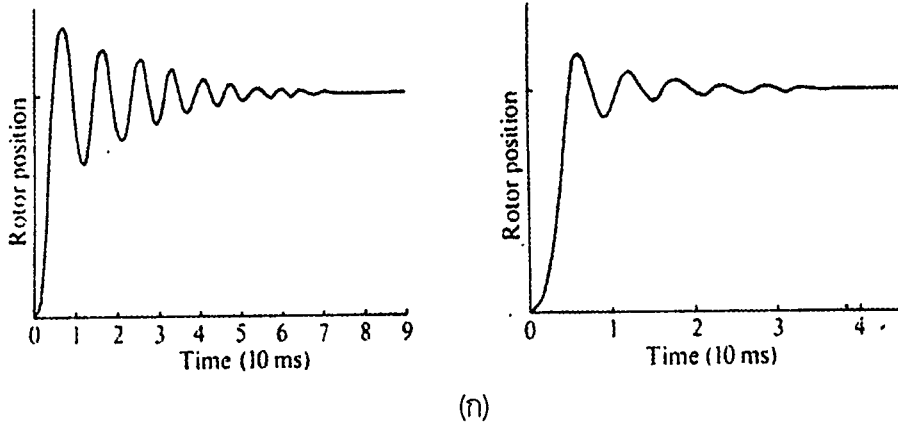
### ตารางที่ 2.3 แสดงลำดับการกระตุ้นในโหมดเฟสครึ่ง

จำนวนสเตป A	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
จำนวนสเตป B	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ขดลวดเฟสที่ 1	on	on						on	on	on			
ขดลวดเฟสที่ 2		on	on	on						on	on	on	
ขดลวดเฟสที่ 3				on	on	on						on	on
ขดลวดเฟสที่ 4						on	on	on					

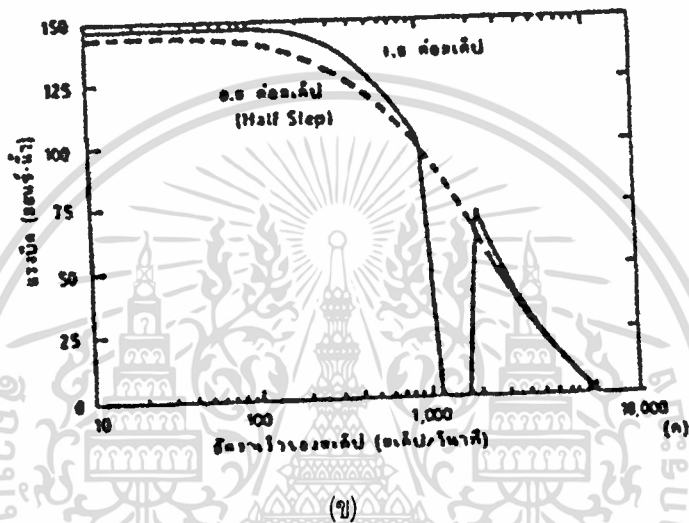
2.4.4 ลำดับการทำงานไมโครสเตปด้วยการกระตุ้นแบบสองเฟส (microstep excitation) โดยปกติแล้วสเตปปีงมอเตอร์มักจะเป็นการขับในโหมดปกติแต่จากการทำงานดังกล่าวไม่สะดวกต่อการที่จะนำไปใช้งาน จึงได้มีการพัฒนาขึ้นให้สามารถแบ่งขนาดสเตปปกติให้เล็กลงไปอีกเป็นจำนวนเท่าของสเตปปกติ ซึ่งเรียกว่าการกระตุ้นในโหมดมินิสเตปหรือไมโครสเตปขึ้นอยู่กับจำนวนสเตปย่อย ๆ เหล่านั้น ซึ่งจะเป็นการควบคุมกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดในเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ในลักษณะเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นสัดส่วนกัน โดยส่วนมากนิยมควบคุมให้กระแสทั้งสองเฟสเป็นลักษณะการประมาณจากคุณสมบัติของสเตปมอเตอร์ ในแบบลิเนียร์ และแบบซายน์ ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ลักษณะกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดด้วยการกระตุ้นในโหมดมินิสเตปหรือไมโครสเตป  
 (ก) รูปกระแสในการกระตุ้นในโหมดมินิสเตป หรือไมโครสเตปในลักษณะลิเนียร์  
 (ข) รูปกระแสในการกระตุ้นในโหมดมินิสเตป หรือไมโครสเตปในลักษณะคลื่นซายน์



(ก)



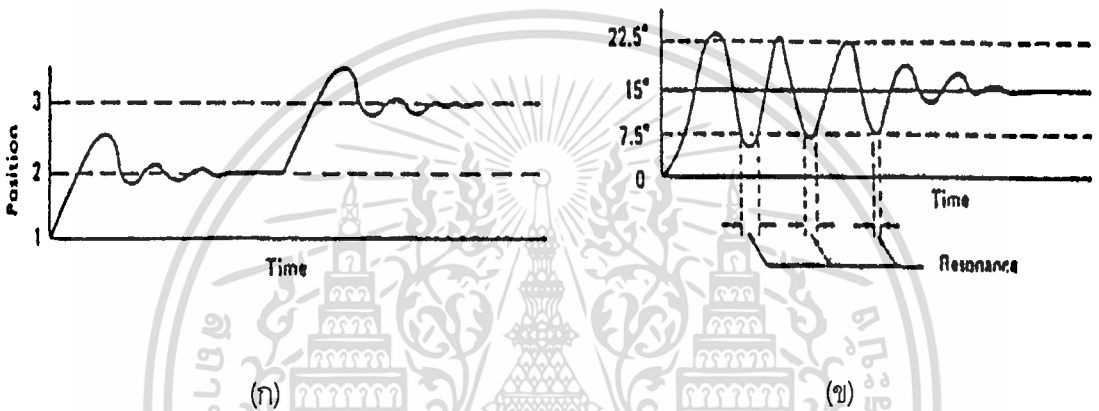
(ข)

- รูปที่ 2.14 ก) แสดงการเข้าสู่ตำแหน่งของโรเตอร์ในหนึ่งสเตปของการกระตุ้นแบบเฟสเดี่ยวและสองเฟส  
 ข) เส้นแสดงคุณลักษณะของการกระตุ้นแบบครึ่งเฟส (เส้นประ) และแบบสองเฟส (เฟสคู่)

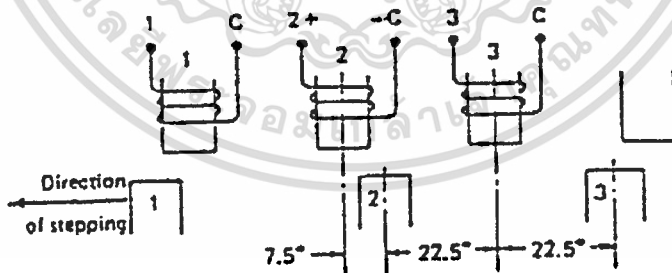
## 2.5 กรรมวิธีในการเดมป์ปีง (Damping Method)

ในกรณีที่เกิดปัญหาของรีโซแนนซ์ขึ้นกับสเตปมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้ และบางครั้งกับสเตปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร โดยเฉพาะเมื่อมีความเฉื่อยที่เกิดจากโหลดสูง รีโซแนนซ์จะเป็นตัวบ่งบอกการขาดความสามารถที่จะทำให้โรเตอร์เคลื่อนที่ตามคำสั่งได้ และบางครั้งเป็นความถี่รีโซแนนซ์ธรรมชาติของมอเตอร์เกิดขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียจังหวะของสเตปไปหรือเรียกว่าการออสซิลเลชัน (Oscillation) การเกิดเหตุการณ์นี้ เป็นการเพิ่มความเร็วในการหมุนของสเตปมอเตอร์เป็นลิเนียร์กับความถี่ที่ป้อนให้กับสเตปมอเตอร์ แต่เมื่อป้อนความถี่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าๆหนึ่ง สเตปมอเตอร์จะหยุดหมุนเนื่องจากการที่โรเตอร์หมุนตามฟลักซ์แม่เหล็กไม่ทัน เรียกว่า มอเตอร์เกิดการออสซิลเลท ซึ่งมอเตอร์แต่ละตัวมีค่าความถี่ไม่เท่ากัน และการกระตุ้นแต่ละแบบก็จะให้ความถี่ออสซิลเลทต่างกันไป เมื่อลดความถี่ที่จุดออสซิลเลทลงมอเตอร์จะไม่หมุนทันทีจนกว่าความถี่จะลดลงถึงค่าๆหนึ่ง สเตปมอเตอร์จึงจะเริ่มหมุนอีกครั้ง นั่นคือมอเตอร์มีฮิสเตอร์ซิส

การเคลื่อนที่ทางไดนามิกส์ของสเตปป์มอเตอร์จะเป็นตัวช่วยบอกถึงการหาค่ารีโซแนนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 เมื่อมอเตอร์เคลื่อนที่จากสเตปป์ที่ 1 ไปยังสเตปป์ที่ 2 จะเกิดพลังงานจลน์ขึ้นที่โรเตอร์ซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญที่ทำให้เกิดการแกว่งแดมพ์ขึ้น โดยสนามแม่เหล็กที่ช่วยเสริมกันและกันในการผลักให้โรเตอร์หมุนจะเสถียรและไหลวนในขดลวด และการสูญเสียฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loss) อย่างไรก็ตามในสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลักแตนซ์ได้ (ซึ่งไม่มีส่วนประกอบที่เป็นแม่เหล็กถาวร) ในส่วนนี้จะมีผลกระทบน้อยมากต่อค่าแดมพ์ จากรูปที่ 2.15 และ 2.16 แสดงให้เห็นถึงสถานะของการแกว่งสำหรับสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลักแตนซ์ได้ที่มีขนาด 15 องศา ซึ่งมีขั้วคู่ 2 ขั้ว ตำแหน่งแกนโรเตอร์จะแกว่งออกไป 7.5 องศา จากตำแหน่งสุดท้าย ดังนั้นจึงมีวิธีการลดค่ารีโซแนนซ์เนื่องจากการแดมพ์อยู่หลายวิธีดังนี้



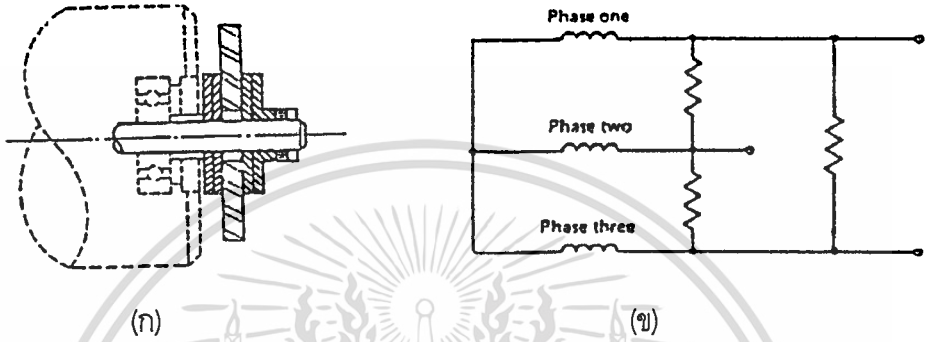
รูปที่ 2.15 ก) แสดงการแกว่งในการเคลื่อนที่แต่ละสเตปป์ของสเตปป์มอเตอร์  
ข) การรีโซแนนซ์ของสเตปป์มอเตอร์



รูปที่ 2.16 การเกิดรีโซแนนซ์ในสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลักแตนซ์ได้ขนาด 15 องศาต่อสเตปป์

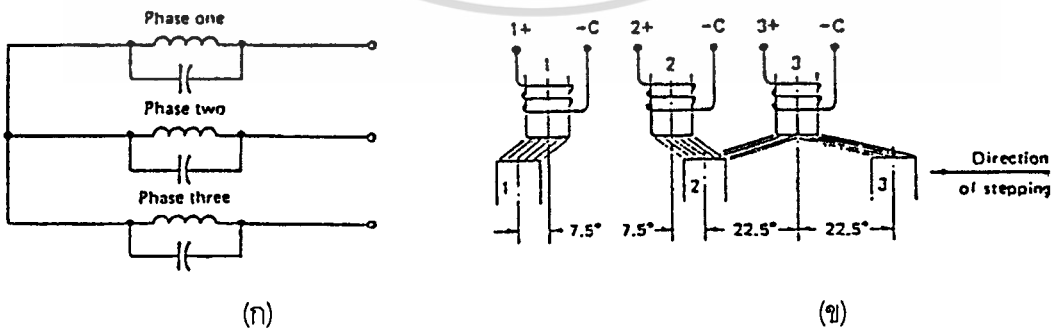
1. สลิปคลัทช์ แดมพ์ปิ้ง (Slip-Clutch Damping) เป็นวิธีที่ใช้อุปกรณ์ทรงกลเข้ามาช่วย โดยหลักการเพิ่มแรงเสียดทานในการหมุนเข้าไปในระบบ ซึ่งผลของแรงเสียดทานนี้จะทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ลดลง ผลที่ตามมาคือโอเวอร์ชูทและอันเดอร์ชูตลดลง แรงเสียดทานนี้จะถูกควบคุมโดยแรงกดจากสปริง และส่วนวงแหวนใส่เพรอนคันเอาไว้ ดังรูปที่ 2.17 ก) สำหรับการติดตั้งจะอยู่ตอนท้ายของเพลารอเตอร์ของมอเตอร์ ข้อเสียของการลดวิธีนี้คือผลตอบสนองต่อความเร็วลดลง

2. วิธีซีสตีฟแดมพ์บั้ง (Resistive Damping) เป็นวิธีหนึ่งจะช่วยลดการเกิดออสซิลเลท คือการเพิ่มตัวต้านทานเข้าไปในขดลวดสเตเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ข) ตัวต้านทานนี้จะยอมให้อัตรากระแสไหลผ่านเฟสที่ 1 ในขณะนั้นเท่ากับอัตราที่ขดลวดต้องการ และตัวความต้านทานนี้จะจำกัดกระแสส่วนที่เหลืออยู่ให้ไหลผ่านเฟสที่ 2 (กรณีกระตุ้นแบบเฟสเดียว) ดังนั้นผลที่ได้รับคือกระแสที่ไหลในเฟสที่ 2 จะทำให้เกิดแรงบิดกลับทางหรือแรงต้านการหมุนไปข้างหน้า ซึ่งแรงนี้จะป้องกันการเกิดออสซิลเลทหรือการแกว่งของโรเตอร์ได้นั่นคือไม่ให้โรเตอร์เกิดการเร่งมากเกินไปจึงทำให้ลดโอเวอร์ซุตได้



รูปที่ 2.17 ก) สลิปคลัทช์แดมพ์เปอร์  
ข) วิธีซีสตีฟแดมพ์บั้ง

3. คาปาซิตีฟแดมพ์บั้ง (Capacitive Damping) เป็นการใส่ตัวเก็บประจุเข้าไปขนานกับขดลวดสเตเตอร์ในแต่ละเฟสดังแสดงในรูปที่ 2.18 ก) วิธีนี้ทำให้แรงบิดกลับทางขึ้น จากรูปจะเห็นได้ว่าในช่วงระยะเวลาสั้นๆเมื่อฟลหนึ่งกำลังลดลงในขณะที่เดียวกันอีกสองเฟสมีกำลังเพิ่มขึ้น ตัวเก็บประจุที่เฟสหนึ่งจะคายประจุออกมา ในการคายประจุจึงเป็นการกระแสให้กับขดลวดทำให้เกิดแรงต้านขึ้นซึ่งเป็นแรงกลับทิศกับการเคลื่อนที่ของโรเตอร์



รูปที่ 2.18 ก) คาปาซิตีฟแดมพ์บั้ง (Capacitive Damping)  
ข) ทุ-เฟสแดมพ์บั้ง (Two-Phase Damping)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

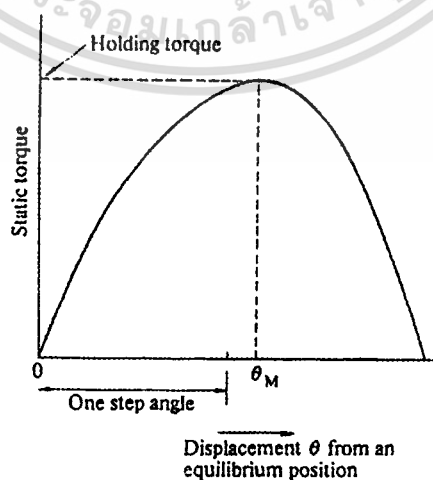
4. ทู-เฟสแดมป์บิ่ง (Two-Phase Damping) เป็นวิธีการกระตุ้นการทำงานของขดลวดไนสเตอร์พร้อมกัน 2 ชุด การกระตุ้นแบบนี้เพราะว่าเพื่อให้โรเตอร์หมุนไปอยู่ที่กลางระหว่างขดลวดสองชุดที่ถูกกระตุ้น ซึ่งจะแสดงให้เห็นอยู่ในรูปที่ 2.18 ข) มุมของการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ใหม่จะไม่แตกต่างจากการกระตุ้นแบบเฟสเดียว การกระตุ้นแบบนี้จะทำให้โรเตอร์แบ่งกำลังแรงบิดเท่าๆกันให้มาตักซึ่งกันและกันในการรวมกันของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งข้อได้เปรียบอย่างหนึ่งในการกระตุ้นแบบสองเฟสก็คือ ให้กำลังงานออกมาประมาณ 2 เท่า ของการกระตุ้นแบบเฟสเดียว

5. รีโทรทอร์ก (Retrotorque Damping) หรือเรียกว่าการแดมป์โดยอาศัยแรงบิดต้านกลับ การแดมป์ การแดมป์วิธีนี้เป็นการใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมแรงบิดต้านกลับ ใช้หลักการคร่าวๆเป็นการใช้การกระตุ้นเฟสมอเตอร์แบบเฟสเดียวเป็นการจ่ายพัลส์ให้ขดลวดที่กำลังทำงานอยู่ เพื่อให้เกิดแรงต้านกลับ ซึ่งจะช่วยให้กำจัดโอเวอร์ชูทและอันเดอร์ชูทได้ วิธีนี้ไม่ได้เพิ่มกำลังในการทำงานแต่เป็นการเพิ่มความซับซ้อนในการออกแบบวงจรมากกว่า

## 2.6 คุณลักษณะเฉพาะของสเตปมอเตอร์

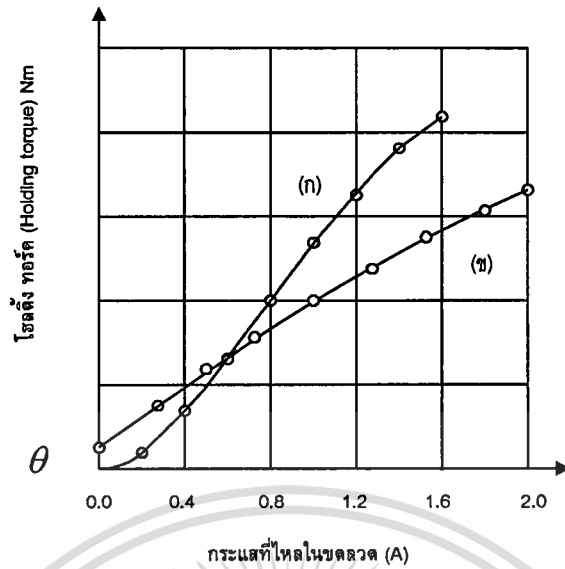
2.6.1 คุณลักษณะเฉพาะทางสถิตยศาสตร์ เป็นส่วนที่เกี่ยวข้องกับสเตปมอเตอร์โดยตรงซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับและแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะดังนี้คือ

1. คุณลักษณะเฉพาะของ  $T/\theta$  ของสเตปมอเตอร์ที่รักษาสภาวะสมดุลย์ของตำแหน่งเอาไว้ได้เนื่องจากกระแสที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ในลักษณะที่เป็นการกระตุ้นแบบเฟสเดียวและสองเฟส และแรงบิดภายนอกที่เกิดขึ้นที่แกนโรเตอร์ทำให้เกิดมุมการเคลื่อนที่ไปหนึ่งสเตปซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างมุมในการเคลื่อนที่และแรงบิดที่เกิดจากกระแส สามารถแสดงอยู่ในรูปที่ 2.19 จากรูปเส้นโค้งนี้เรียกว่าคุณลักษณะเฉพาะของ  $T/\theta$  ค่าสูงสุดของแรงบิดที่สภาวะอยู่กับที่เรียกว่า แรงบิดยึดเกาะ (Holding torque) ซึ่งเกิดขึ้นที่  $\theta = \theta_M$  แรงบิด



รูปที่ 2.19 คุณลักษณะเฉพาะ  $T/\theta$  ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### รูปที่ 2.20 คุณลักษณะเฉพาะของ T/I สเตปมอเตอร์

(ก) สำหรับสเตปมอเตอร์ชนิดแปร์คาร์รัลค์เด็นซ์ 4 เฟส มุนสเตป 1.8 องศา

(ข) สำหรับสเตปมอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์มี 2 เฟส มุนสเตป 1.8 องศา

สถิตยนี้จะไม่เคลื่อนไหวไปยังตำแหน่งสมดุยล์เดิมแต่มั่นจะต่อต้านทิศทางที่จะไปยังตำแหน่งถัดไป ดังนั้นแรงบิดยึดเกาะจะถูกจำกัดความว่าเป็นแรงบิดสูงสุดที่ใช้กับเฟลมอเตอร์ ในการกระตุ้นเฟลมอเตอร์ โดยไม่คำนึงถึงการเคลื่อนที่ต่อเนื่องที่เกิดจากแรงบิดยึดเกาะไม่ได้ถูกแยกออกจากตำแหน่งสมดุยล์เสมอ

2. คุณลักษณะของ T/I ของสเตปมอเตอร์ แรงบิดยึดเกาะที่เพิ่มขึ้นกับกระแสที่เพิ่มขึ้น มีความสัมพันธ์กัน ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.20 เป็นการเปรียบเทียบคุณลักษณะเฉพาะ T/I ของสเตปมอเตอร์ชนิดแปร์คาร์รัลค์เด็นซ์ได้กับสเตปมอเตอร์แบบไฮบริดจ์ ทั้งสองชนิดมีมุนสเตปในการเคลื่อนที่เท่ากันคือ 1.8 องศา

#### 2.6.2 คุณลักษณะเฉพาะทางพลศาสตร์

เป็นส่วนแสดงรายละเอียดเกี่ยวกับการสตาร์ทหรือการเคลื่อนที่เรียกว่าเป็นคุณลักษณะเฉพาะทางพลศาสตร์ และแสดงคุณลักษณะทางพลศาสตร์ได้ดังรูปที่ 2.21 และสามารถกำหนดส่วนสำคัญต่างๆ โดยแบ่งเป็นหัวข้อได้ดังนี้

1. คุณลักษณะของแรงบิดพลูอิน (Pull-in torque Characteristic) หรือเรียกอีกได้เป็นคุณลักษณะการสตาร์ทและอั้งถึงย่านของภาระแรงบิดเสียดทาน ซึ่งทำให้สเตปมอเตอร์สามารถสตาร์ทและหยุดโดยไม่ทำให้เกิดการสูญเสียสเตป สำหรับความถี่ต่างๆในขบวนการพัลส์สัญญาณ จำนวนของพัลส์ในลำดับการกระตุ้นที่ใช้ในการทดสอบเป็น 100 Hz หรือมากกว่านี้ เหตุผลที่ใช้ค่านั้นแทนค่าว่าสูงสุด เพราะว่ามอเตอร์ไม่สามารถสตาร์ทหรือรักษาการหมุนปกติที่ภาระแรงเสียดทานน้อยๆ

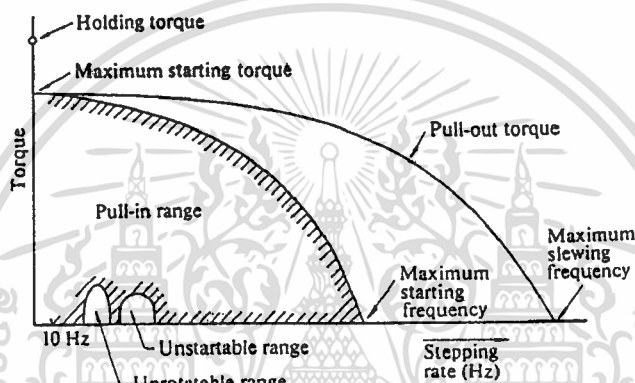
2. คุณลักษณะของแรงบิดพลูเอาท์ทอร์ก (Pull-Out Torque) หรืออาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าคุณลักษณะของการหมุนของมอเตอร์ เมื่อทดสอบมอเตอร์โดยระบบโหมดในการกระตุ้น และเพิ่มความถี่

พหุพัลส์ขึ้นเรื่อยๆ ในที่สุดสเตปมอเตอร์จะหมุนอย่างต่อเนื่อง ซึ่งขนาดของแรงเสียดทานแรงบิด และขนาดความถี่ที่สูงสุดที่ทำให้มอเตอร์หมุนได้อย่างต่อเนื่องเรียกว่า พูลเอาท์ทอร์ก

3. ความถี่สตาร์ทสูงสุด (Maximum Starting Frequency) หมายถึง ค่าของความถี่สูงสุดที่ให้สเตปมอเตอร์เริ่มและหยุดหมุนโดยไม่ทำให้เกิดการสูญเสียสเตป

4. อัตราพูลเอาท์สูงสุด (Maximum Pull-Out Rate) หมายถึง ค่าความถี่สูงสุดที่ทำให้อัตราความเร็วของสเตปมอเตอร์คงที่ หรือค่าความถี่สูงสุดที่ยังทำให้เกิดการหมุนอย่างต่อเนื่องของสเตปมอเตอร์

5. แรงบิดสูงสุดที่เริ่มสตาร์ท (Maximum Starting Torque) หรือบางครั้งเรียกว่า ค่าแรงบิดพูลอินสูงสุด (Maximum Pull-In torque) คือ แรงบิดเสียดทานสูงสุดที่ทำให้สเตปมอเตอร์สามารถสตาร์ทพร้อมกันกับขบวนพัลส์ที่ความถี่ต่ำกว่า 10 Hz



รูปที่ 2.21 กราฟคุณลักษณะทางพลศาสตร์

## ทฤษฎีพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของสเตปมอเตอร์

คุณลักษณะทางไดนามิกส์ มีความสำคัญเช่นเดียวกับคุณลักษณะทางสแตติกทฤษฎีต่างๆ ทางไดนามิกส์ ได้มีการนำเสนออยู่มากมายท่ามกลางการนำเสนอเหล่านี้ ทฤษฎีของ “ลอรเรนส์” และ “ฮิวจ์” มีความน่าสนใจและครอบคลุมถึงส่วนที่สำคัญของสเตปมอเตอร์รุ่นใหม่ๆ ดังจะได้อธิบายในรายละเอียดต่อไป

### 3.1 สมการพื้นฐานในการเคลื่อนที่

ในรูปที่ 3.1 ใช้วิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกิดการออสซิลเลท และการหน่วงเวลาทางไฟฟ้าของสเตปมอเตอร์ ในรูป ก) เป็นมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร(permanent magnet) และรูป ข) เป็นชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้(variable reluctance) แบบขั้นเดียว โดยเฟสของขดลวดทั้งสองกำหนดให้เป็นเฟส A และเฟส B ซึ่งสามารถแยกการวิเคราะห์เป็นหัวข้อได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของสเตปมอเตอร์และโรเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์เส้นแรงแม่เหล็ก

3.1.1 สเตปมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร(permanent magnet) และชนิดไฮบริด(hybrid) ค่าเส้นแรงแม่เหล็กเชื่อมโยง(flux linkage) ที่เกิดขึ้นจากแม่เหล็กถาวรมีค่าเท่ากับ  $n\Phi_m$  แรงบิดที่เกิดจากกระแสที่ไหลในขดลวด A คือ  $i_A$  และแรงบิดที่เกิดจากกระแสที่ไหลในขดลวด B คือ  $i_B$  จะได้ค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นเมื่อมีการจ่ายกระแสมีค่าเท่ากับ

$$\tau_A = -pn\Phi_m i_A \sin p\theta \quad (3.1)$$

$$\tau_B = -pn\Phi_m i_B \sin p(\theta - \lambda) \quad (3.2)$$

เมื่อ  $p$  เป็นจำนวนคู่ขั้วแม่เหล็กแต่สามารถแทนได้ด้วย  $N_r$  (จำนวนขั้วฟันของโรเตอร์) ในกรณีที่ เป็นชนิดไฮบริดจ์สเตปมอเตอร์ ที่แสดงในรูปที่ 3.1 จะพบว่าที่จุดกึ่งกลางของขั้ว A จะเป็นจุดเริ่มต้นของมุม  $\theta$  ของฟลักซ์รั้งจ (flux linkage) และ  $n\phi$  เป็นการประมาณค่ามุมของฟลักซ์รั้งจ ลักษณะการกระจายแบบไซน์

$$n\phi = n\Phi_m \cos p\theta \quad (3.3)$$

ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ขดลวดเฟส A (induc e.m.f) มีค่าเป็น

$$e_{gA} = -n \frac{d\phi}{dt} = -n \frac{d\Phi \cos p\theta}{dt} = (np\Phi_m \sin p\theta) \dot{\theta} \quad (3.4)$$

เมื่อเทียบสมการที่ (3.1) และ สมการที่ (3.4) จะได้ว่า

$$\tau_A = -e_{gA} \frac{i_A}{\omega}$$

เพราะฉะนั้นสมการ การเคลื่อนที่ของโรเตอร์มีค่าเป็น

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + pn\Phi_m i_A \sin p\theta + pn\Phi_m i_B \sin p(\theta - \lambda) = 0 \quad (3.5)$$

เมื่อ  $D$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการหน่วงจากอากาศ (damping) ซึ่งเป็นสาเหตุมาจากแรงเสียดทาน และสภาวะของแม่เหล็กไฟฟ้าอันดับที่ 2 เป็นผลที่ทำให้เกิดฮิสเทอรีซิส (hysteresis) และกระแสไหลวน ดังนั้นสมการแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดของสเตเตอร์จะได้เป็น

$$V - ri_A - L \frac{di_A}{dt} - M \frac{di_B}{dt} + \frac{d(n\Phi_m \cos p\theta)}{dt} = 0 \quad (3.6)$$

$$V - ri_B - L \frac{di_B}{dt} - M \frac{di_A}{dt} + \frac{d\{n\Phi_m \cos p(\theta - \lambda)\}}{dt} = 0 \quad (3.7)$$

เมื่อ  $V$  : ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วกระแสตรง

$L$  : ค่าความเหนี่ยวนำของแต่ละเฟส

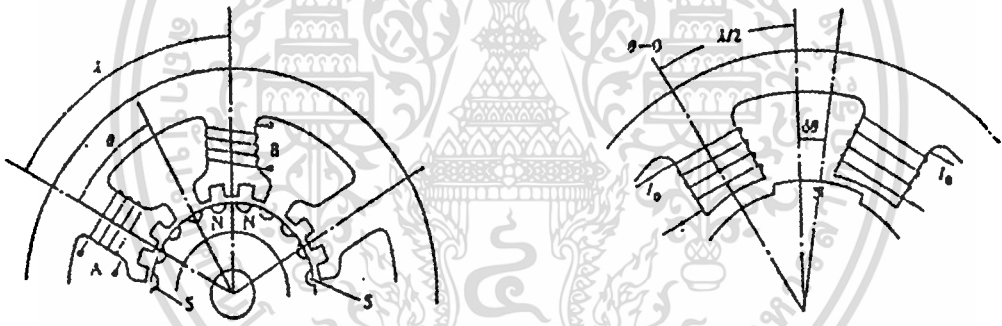
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M : ค่าความเหนี่ยวนำร่วม

r : ค่าความต้านทานของวงจรสเตเตอร์

ในสมการนี้สมมุติให้ค่า L และ ค่า m เป็นอิสระกับค่า  $\theta$  ซึ่งเป็นตัวอธิบายถึงความแตกต่างทางไดนามิกส์ ระหว่างการกระตุ้นเฟสแบบเฟสเดียวและกระตุ้นเฟสแบบสองเฟส ซึ่งสามารถจำแนกปัญหาของการกระตุ้นทั้งสองแบบ ประการแรก เรากำหนดให้  $\lambda = 0$  ในช่วงผลลัพธ์สุดท้ายคือการเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมายนั่นเอง

จากสมการที่ (3.5) ถึง (3.7) เป็นการดิฟเฟอเรนเชียลแบบลิเนียร์ เพื่อไม่ให้เกิดความยุ่งยากซับซ้อนในการวิเคราะห์ ถ้าขดลวดของสองเฟสและค่ากระแส  $i_0$  เป็นค่าคงที่ ในทิศทางไปทางซ้ายได้ ในตำแหน่งสภาวะสมดุลย์ให้เป็น  $\theta = \lambda/2$  ในรูปที่ 3.3 ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นเป็น  $\delta\theta$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา แต่ในการวิเคราะห์จะเป็นสัญญาณเพียงขนาดเล็กเท่านั้น เมื่อโรเตอร์หมุนหรือแกว่งกระแสในขดลวดทั้งสองจะเกิดการหักเหจากค่าเดิมไปเป็น  $\delta i_A(t)$  และ  $\delta i_B(t)$  ให้สมการที่ (3.5) และ สมการที่ (3.6) เป็นสมการเส้นตรง เพราะฉะนั้นสามารถพิจารณาได้ดังนี้



รูปที่ 3.2 สเต็ปมอเตอร์แบบไฮบริดจ์ ;  $p=N_r$

รูปที่ 3.3 ลักษณะการควบคุมตำแหน่ง

จากรูปที่ 3.2 และ รูปที่ 3.3 จะได้ว่า

$$\theta = \frac{\lambda}{2} + \delta\theta \quad (3.8)$$

$$i_A = I_0 + \delta i_A \quad (3.9)$$

$$i_B = I_0 + \delta i_B \quad (3.10)$$

ดังนั้นเราจะได้อ่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sin p\theta = \sin\left(\frac{p\lambda}{2} + p\delta\theta\right) = \sin\frac{p\lambda}{2}\cos p\delta\theta + \cos\frac{p\lambda}{2}\sin p\delta\theta \quad (3.11)$$

เมื่อ  $p\delta\theta$  เป็นมุมที่มีขนาดเล็กมาก

$$\cos p\delta\theta \approx 1 \quad (3.12)$$

$$\sin p\delta\theta \approx p\delta\theta \quad (3.13)$$

ดังนั้นจะลดรูปสมการที่ (3.11) ได้เป็น

$$\sin p\theta = \sin\frac{p\lambda}{2} + p\cos\frac{p\lambda}{2}(\delta\theta) \quad (3.14)$$

ในทำนองเดียวกันจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \sin p(\theta - \lambda) &= \sin p\left(\frac{p\lambda}{2} + \delta\theta - \lambda\right) = -\sin p(\delta\theta - \lambda) \\ &= -\sin\frac{p\lambda}{2} + p\cos\frac{p\lambda}{2}(\delta\theta) \end{aligned} \quad (3.15)$$

โดยเราจะแทนสมการ (3.8),(3.9),(3.10),(3.14) และ (3.15) ลงใน (3.5) เราจะได้สมการใหม่

$$\begin{aligned} J\frac{d^2(\delta\theta)}{dt^2} + D\frac{d(\delta\theta)}{dt} + pn\Phi_m(I_o + \delta i_A)\left\{\sin\frac{p\lambda}{2} + p\cos\frac{p\lambda}{2}(\delta\theta)\right\} \\ - pn\Phi_m(I_o - \delta i_B)\left\{\sin\frac{p\lambda}{2} - p\cos\frac{p\lambda}{2}(\delta\theta)\right\} = 0 \end{aligned} \quad (3.16)$$

ถ้าเราไม่สนใจสัญญาณรบกวน ( $\delta i_A \delta\theta$ ) เราก็จะได้สมการดิฟเฟอเรนเชียลแบบลิเนียร์

$$J\frac{d^2(\delta\theta)}{dt^2} + D\frac{d(\delta\theta)}{dt} + p^2\Phi_m n I_o \cos\frac{p\lambda}{2}(\delta\theta) + p\Phi_m n \left(\sin\frac{p\lambda}{2}\right)(\delta i_A + \delta i_B) = 0 \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งผลที่ตามมาจะคล้ายกับ วิธีพิจารณาในสมการ (3.16) และ (3.17) ให้เป็นสมการเส้นตรงโดย

$$r(\delta i_A) + L \frac{d(\delta i_A)}{dt} + M \frac{d(\delta i_B)}{dt} - p \Phi_m n \sin I_o \left( \frac{p\lambda}{2} \right) \frac{d(\delta \theta)}{dt} = 0 \quad (3.18)$$

$$r(\delta i_B) + L \frac{d(\delta i_B)}{dt} + M \frac{d(\delta i_A)}{dt} + p \Phi_m n \sin I_o \left( \frac{p\lambda}{2} \right) \frac{d(\delta \theta)}{dt} = 0 \quad (3.19)$$

ถ้าเราพิจารณาต่อไป เราจะพบว่า ฟังก์ชันที่แสดงตำแหน่งของโรเตอร์  $\delta \theta(t)$  หลังจากทีโรเตอร์เคลื่อนจากตำแหน่งสภาวะสมดุลเริ่มต้นที่มุม  $\theta_i$  ยิ่งไปกว่านี้ปัญหาที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งก็คือ กระแส  $i_A$  และ  $i_B$  จะเป็นอย่างไร ซึ่งในการคำนวณหาค่านั้น เราน่าที่จะแก้ปัญหาจากสมการที่สภาวะเริ่มต้น  $\delta \theta = \theta_i$  และ  $d(\delta \theta)/dt = 0$  ที่  $t=0$  เราจะแก้สมการโดยวิธีการแปลงลาปลาซโดยให้  $d/dt = s$  และ  $d^2/dt^2 = s^2$  ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$\delta \theta(t) \longrightarrow \Theta(s)$$

$$\delta i_A(t) \longrightarrow I_A(s)$$

$$\delta i_B(t) \longrightarrow I_B(s)$$

และแก้สมการได้เป็น

$$I_A = -I_B = \frac{p \Phi_m n \sin \left( \frac{p\lambda}{2} \right) (s\Theta - \theta_i)}{(r + L_p s)} \quad (3.20)$$

$$\Theta = \frac{\left[ s^2 + \left( \frac{r}{L} + \frac{D}{J} \right) s + \left( \frac{r}{L_p} \frac{D}{J} + K_p \omega_{np}^2 \right) \right]}{s^3 + \left( \frac{r}{L_p} + \frac{D}{J} \right) s^2 + \left[ \frac{r}{L_p} \frac{D}{J} + K_p \omega_{np}^2 (1 + K_p) \right] s + \left( \frac{r}{L_p} \right) \omega_{np}^2} \quad (3.21)$$

เมื่อ

$$L_p = L - M, \quad (3.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_p = \frac{n \Phi_m \sin^2 \left( \frac{p\lambda}{2} \right)}{L_p I_0 \cos \left( \frac{p\lambda}{2} \right)}, \quad (3.23)$$

$$\omega_{np}^2 = \frac{2p^2 \Phi_m n I_0 \cos \left( \frac{p\lambda}{2} \right)}{J} \quad (3.24)$$

สมการที่ (3.21) จะเป็นผลมาจากพฤติกรรม  $\theta(t)$  ซึ่งเป็นสมการที่สำคัญมาก และควรสังเกตลักษณะในเทอมส่วนของสมการกำลังสามกับเทอมในส่วนของ  $S$  มากที่สุด ซึ่งมีความหมายทางฟิสิกส์ สมการที่ (3.20) จะแสดงถึงกระแสชั่วขณะในเฟส A และเฟส B ซึ่งมีค่าเท่ากันแต่มีทิศทางตรงกันข้ามกัน

**3.1.2 สเต็ปมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลักแตนซ์ (VR สเต็ปมอเตอร์)** ในการคำนวณใช้สเต็ปมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลักแตนซ์ขั้นเดียว แต่สามารถที่จะนำไปประยุกต์กับสเต็ปมอเตอร์แบบหลายขั้นได้ โดยการหาค่าความเหนี่ยวนำร่วมเท่ากับศูนย์ ค่าความเหนี่ยวนำเฉพาะตัวและค่าความเหนี่ยวนำร่วมตามรูปที่ 3.1 (b) ซึ่งมีรูปแบบแสดงตามสมการดังนี้

$$L_A = L_0 + L \cos 2p\theta \quad (3.25)$$

$$L_B = L_0 + L \cos 2p(\theta - \lambda) \quad (3.26)$$

$$L_{AB} = M_0 + M \cos 2p\left(\theta - \frac{\lambda}{2}\right) \quad (3.27)$$

เครื่องหมายลบสำหรับ  $M_0$  ตามสมการที่ (3.27) แสดงให้เห็นว่ากระแในทิศทางบวกจะสร้างฟลักซ์ลิงค์เกจที่เป็นลบให้แก่ขดลวดชุดอื่น แรงบิดที่ถูกสร้างโดยกระแส  $i_A$  และ  $i_B$  แสดงโดยสมการ

$$\tau = \frac{1}{2} i_A^2 \frac{dL_A}{d\theta} + \frac{1}{2} i_B^2 \frac{dL_B}{d\theta} + i_A i_B \frac{dM_{AB}}{d\theta} \quad (3.28)$$

$$= i_A^2 pL \sin 2p\theta + i_B^2 pL \sin 2p(\theta - \lambda) + 2i_A i_B pM \sin 2p\left(\theta - \frac{\lambda}{2}\right) \quad (3.29)$$

สมการในการเคลื่อนที่คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + i_A^2 pL \sin 2p\theta + i_B^2 pL \sin 2p(\theta - \lambda) + 2i_A i_B pM \sin 2p(\theta - \frac{\lambda}{2}) = 0 \quad (3.30)$$

สมการคักตาไฟฟ้าสำหรับขดลวดสองชุด

$$V - ri_A - \frac{d(L_{AA} i_A)}{dt} - \frac{d(M_{AB} i_B)}{dt} = 0 \quad (3.31)$$

$$V - ri_B - \frac{d(L_{BB} i_B)}{dt} - \frac{d(M_{AB} i_A)}{dt} = 0 \quad (3.32)$$

สมการที่ถูกทำให้เป็นสมการเส้นตรงได้

$$J \frac{d^2(\delta\theta)}{dt^2} + D \frac{d(\delta\theta)}{dt} + 4p^2 I_0^2 (M + L \cos p\lambda)(\delta\theta) + 2pL_0 \sin p\lambda (\delta i_A - \delta i_B) = 0 \quad (3.33)$$

$$r(\delta i_A) + (L_0 + L \cos p\lambda) \frac{d(\delta i_A)}{dt} + (M - M_0) \frac{d(\delta i_B)}{dt} - 2pI_0 L \sin p\lambda \frac{d(\delta\theta)}{dt} = 0 \quad (3.34)$$

$$r(\delta i_B) + (L_0 + L \cos p\lambda) \frac{d(\delta i_B)}{dt} + (M - M_0) \frac{d(\delta i_A)}{dt} + 2pI_0 L \sin p\lambda \frac{d(\delta\theta)}{dt} = 0 \quad (3.35)$$

สมการที่ (3.33) ถึง (3.34) มีตัวแปร  $\delta\theta$ ,  $\delta i_A$  และ  $\delta i_B$  ที่เหมือนกันกับสมการที่ (3.17) ถึง (3.19) สำหรับ PM สเต็ปมอเตอร์ และวิธีการแก้ปัญหาของสมการเหมือนกับสภาวะเริ่มต้นคือ

$$I_A = -I_B = \frac{2pL_0 L \sin(p\lambda)(s\Theta - \theta_i)}{(r + L_v S)} \quad (3.36)$$

$$\Theta = \frac{\left[ S^2 + \left( \frac{r}{L_p} + \frac{D}{J} \right) S + \left( \frac{r}{L_v} \frac{D}{J} + K_p \omega_{nv}^2 \right) \right] \theta_i}{S^3 + \left( \frac{r}{L_v} + \frac{D}{J} \right) S^2 + \left[ \frac{r}{L_v} \frac{D}{J} + K_p \omega_{nv}^2 (1 + K_v) \right] S + \left( \frac{r}{L_v} \right) \omega_{nv}^2} \quad (3.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เมื่อ} \quad L_v = L_0 + L \cos p\lambda - M + M_0, \quad (3.38)$$

$$K_v = \frac{2L^2 \sin^2 p\lambda}{L_v (M + L \cos 2p(\theta - \lambda))} \quad (3.39)$$

$$\omega_{nv}^2 = \frac{4p^2 I_0^2 (M + L \cos p\lambda)}{J} \quad (3.40)$$

### 3.2 ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของสเต็ปมอเตอร์

จากสมการที่ (3.21) และ (3.37) จะเป็นสมการที่บอกถึงขอบเขตของตำแหน่งชั่วขณะของ  $\delta\theta$  กับสภาวะเริ่มต้น  $\delta\theta = \theta_1$  ก่อนที่จะมีคุณลักษณะของการแกว่งแบบหน่วงได้ตอบกลับมา ดังนั้นเราจึงต้องกำหนดเป็นทรานเฟอร์ฟังก์ชันของสเต็ปมอเตอร์ สเต็ปมอเตอร์ที่ใช้โดยทั่วไป จะถูกใช้เพื่อควบคุมตำแหน่ง ซึ่งจากรูปที่ 3.3 จุดกึ่งกลางของขั้วแม่เหล็กของโรเตอร์ จะถูกใช้เป็นตำแหน่งที่  $\theta = \lambda/2$  เมื่อถูกกระตุ้นเฟสทั้งสองเท่า ๆ กัน จะเป็นตัวให้ถูกแสดงค่าเป็น  $\theta = \lambda/2$  และแปลงค่าโดยวิธีลาปลาซทรานฟอร์ม ค่าที่ได้จะถูกแสดงเป็น  $\Theta_0$  และให้ทำลาปลาซทรานฟอร์มค่าตำแหน่งที่แท้จริง  $\delta\theta(t)$  ให้เป็น  $\Theta_0$  ดังนั้นจะได้ทรานเฟอร์ฟังก์ชันเป็น

$$G(s) = \frac{\Theta_0}{s + i} \quad (3.41)$$

**3.2.1 การทำงานแบบเฟสเดียว** ในสภาวะก่อนหน้าเมื่อ  $\lambda = 0$  ขดลวดทำงานอยู่หนึ่งเฟส การแก้สมการหนึ่งเฟสสามารถที่จะใส่ค่า  $\lambda = 0$  ลงในสมการสองเฟสได้ ในเทอมสุดท้ายของแต่ละสมการตั้งแต่สมการที่ (3.17) ถึง (3.19) และ (3.30) ถึง (3.32) เท่ากับศูนย์ และสมการทางกลรวมทั้งสมการทางไฟฟ้าไม่มีส่วนเกี่ยวข้อง สมการที่แปลงสำหรับ PM สเต็ปมอเตอร์ ได้จากสมการที่ (3.17) ในส่วนของ VR สเต็ปมอเตอร์จะได้จากสมการที่ (3.32) เพื่อที่จะได้ค่าในกรณีของ PM สเต็ปมอเตอร์ ใส่ค่า  $\lambda = 0$  ลงในสมการที่ (3.17) เราก็จะได้

$$J \frac{d^2(\delta\theta)}{dt^2} + D \frac{d(\delta\theta)}{dt} + 2p^2 \Phi_m n I_0 \delta\theta = 0 \quad (3.42)$$

$$\delta\theta = \theta_0 - \theta_i \quad (3.43)$$

ซึ่งสามารถเขียนสมการ (3.42) ใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J \frac{d^2 \theta_0(t)}{dt^2} + D \frac{d\theta_0(t)}{dt} + 2p^2 \Phi_M n I_0 \theta_0(t) = 2p^2 \Phi_M n I_0 \delta \theta_1 \quad (3.44)$$

ลาปลาซทรานฟอร์มของสมการเมื่อเงื่อนไขเริ่มต้น  $\theta_0 = 0$ ,  $d\theta_0/dt$  ที่  $t = 0$  คือ

$$(S^2 J + SD + 2p^2 \Phi_M n I_0) \Theta_0(S) = 2p^2 \Phi_M n I_0 \delta \theta_1 \quad (3.45)$$

จากที่ผ่านมาจะได้ทรานเฟอร์ฟังก์ชันเป็น

$$G(S) = \frac{\Theta_0}{\delta \theta_1} = \frac{2p^2 \Phi_M n I_0}{JS^2 + DS + 2p^2 \Phi_M n I_0} = \frac{\omega_{np}^2}{S^2 + \frac{SD}{J} + \omega_{np}^2} \quad (3.46)$$

เพราะฉะนั้น  $\omega_{np}$  หรือความถี่เชิงมุมธรรมชาติได้เป็น

$$\omega_{np} = \sqrt{\frac{2p^2 \Phi_M n I_0}{J}}, \quad (3.47)$$

$$\text{หรือ} \quad \omega_{np} = \sqrt{\frac{N_T K_T I_0}{J}}, \quad (3.48)$$

จากสมการที่ (3.48) ซึ่งเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าเป็นของไฮบริดจ์สเต็ปมอเตอร์,  $K_T$  เป็นค่าของแรงบิดคงที่โดย

$$K_T = 2nN_r K_T I_0 \Phi_M \quad (3.49)$$

แรงบิดรวม  $\tau$  ได้จากการรวมกันระหว่าง  $\tau_A$  และ  $\tau_B$  แต่  $\lambda=0$  สำหรับการกระตุ้นแบบหนึ่งเฟส และ  $p = N_r$  สำหรับไฮบริดจ์สเต็ปมอเตอร์ ผลสุดท้ายก็คือ

$$\tau = -2N_r n \Phi_M I_0 \sin(\delta \theta N_r) \quad (3.50)$$

ถ้าหากตำแหน่งของโรเตอร์  $\delta \theta$  เข้าใกล้ศูนย์  $\sin(N_r \delta \theta) = N_r \delta \theta$  ดังนั้นเราจะได้ออกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau = -2N_r^2 n \Phi_M I_0 \delta\theta \quad (3.51)$$

ถ้าหากแรงบิดที่เกิดขึ้นในสเต็ปมอเตอร์เป็นแบบสมการเส้นตรงตาม  $\delta\theta$  ดังนั้นจะแสดงได้ในรูป

$$\tau = -K_T N_r I_0 \delta\theta \quad (3.52)$$

เมื่อนำสมการ (3.50) และ (3.52) มาเปรียบเทียบกับกันจะพบว่าค่าคงที่ของแรงบิดตามสมการที่ (3.52) จะอยู่ในรูปของสมการ (3.49) เมื่อแทน  $p$  ด้วย  $N_r$  ในสมการที่ (3.47) และประมาณค่า  $n$  โดยใช้สมการ (3.49) เราก็จะได้จากสมการที่ (3.48) สำหรับ  $\omega_{np}$  พบว่าจำนวนรอบจะเป็น  $2n$  ให้แทนที่ด้วย  $n_r$  ก็จะได้จำนวนรอบในหนึ่งเฟสในมอเตอร์ปกติ  $K_T$  จะแสดงโดย

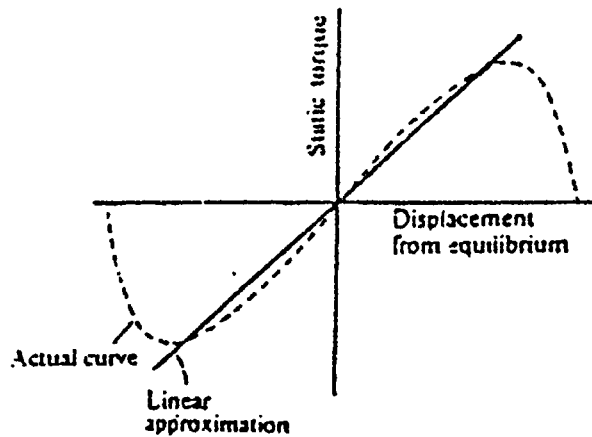
$$K_T = n_r N_r \Phi_M \quad (3.53)$$

ค่าคงที่ของแรงบิดตามที่แสดงในทางทฤษฎี แต่ค่าที่ได้จากการประมาณจาก เส้นโค้งคุณลักษณะของ  $T/\theta$  โดยวิธีเส้นตรงดังรูปที่ 3.4 ทราานเฟอร์ฟังก์ชันในรูปของสมการที่ (3.46) สามารถเขียนมาจากสมการที่ (3.21) เมื่อ  $\lambda=0$  ในกรณีนี้ค่าความเหนี่ยวนำร่วม (mutual inductance,  $M$ ) จะเหมือนกันกับค่าความเหนี่ยวนำด้วยตัวเอง (self-inductance,  $L$ ) และ  $L_p$  ของสมการที่ (3.22) เริ่มเป็นศูนย์ หลังจากทำการคูณทั้งเศษและส่วนด้วย  $L_p/r$ , เราใส่  $L_p = 0$  ก็จะได้

$$\Theta = \frac{D \left( S + \frac{D}{J} \right) \theta_i}{S^2 + \left( \frac{D}{J} \right) S + \omega_{np}^2} \quad (3.54)$$

ถ้าหากเราเปลี่ยนเศษด้วยค่าคงที่ ซึ่งก็จะทำให้ค่าของฟังก์ชันเป็นหนึ่งหน่วย เมื่อ  $S=0$  มันก็จะเป็นทราานเฟอร์ฟังก์ชัน และทราานเฟอร์ฟังก์ชันของ VR สเต็ปมอเตอร์ก็มีวิธีพิจารณาคล้าย ๆ กัน

**3.2.2 การขับโดยแหล่งจ่ายกระแส** มีหลายทางเลือกที่จะใช้วิธีการกระตุ้นจากแรงดันหรือกระแส ในสมการที่ (3.6) และ (3.7) หรือ (3.31) และ (3.32) ค่าแรงดันคงที่ที่ถูกนำมาใช้ซึ่งก็หมายความว่า แหล่งจ่ายแรงดันถูกนำมาใช้ ถ้าหากว่ามอเตอร์ถูกขับโดยแหล่งจ่ายกระแส สำหรับทราานเฟอร์ฟังก์ชันที่ขับด้วยกระแสจะนำมากล่าวไว้ด้วย



รูปที่ 3.4 กราฟคุณลักษณะ T- $\theta$  ของมอเตอร์ด้วยการประมาณค่าโดยเส้นตรง

$$\tau = CN \frac{I}{I_M} \sin \rho \quad (3.55)$$

เมื่อ  $C$  = ค่าคงที่ที่ได้จากขนาดของมอเตอร์และจำนวนรอบ

$I_M$  = ค่ากระแสสูงสุด

ค่ามุมของแรงบิด  $\rho$  มาจาก

$$\rho = \xi_i - \xi_0 \quad (3.56)$$

เมื่อ  $\xi_i$  = มุมทางไฟฟ้าของตำแหน่งโรเตอร์ที่ต้องการ

$\xi_0$  = มุมทางไฟฟ้าของตำแหน่งโรเตอร์ที่แท้จริง

จากสมการที่ (3.71) และ (3.72)<sup>[1]</sup> เมื่อเราต้องการควบคุมตำแหน่งโดยใช้การขับกระแสรูปไซน์ จะได้ว่า

$$\xi_i = \omega t \quad (3.57)$$

ซึ่งก็หมายความว่าตำแหน่งที่ต้องการจะเปลี่ยนไปตาม  $\omega$  ถ้าหาก  $\xi_i$  ถูกกำหนดที่  $\omega t_1$  ที่  $t=t_1$  ก็คาดว่าโรเตอร์จะอยู่ที่ตำแหน่ง  $\rho = 0$ ,  $\omega$  ในสมการที่ (3.57) เท่ากับความถี่เชิงมุมของแรง

เคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยจากสมการที่ (3.68) และ (3.69) (จาก Kenjo) ซึ่งมีความสัมพันธ์กันกับจำนวนของซี่ฟัน  $N_r$  และมุมทางไฟฟ้าจะสัมพันธ์กันกับมุมทางกล

$$\theta_i = \frac{\xi_i}{N_r} \quad (3.58)$$

$$\theta_0 = \frac{\xi_0}{N_r} \quad (3.59)$$

ดังนั้นแรงบิดจากสมการ (4.55) จะเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} \tau &= CN_r I_M \sin N_r(\theta_i - \theta_0) \\ &= K_T I_M N_r \sin N_r(\theta_i - \theta_0) \end{aligned} \quad (3.60)$$

เมื่อค่าคงที่ของแรงบิดเป็น

$$K_T = CN_r \quad (3.61)$$

ถ้า  $\theta_i = \theta_0$  จะได้ว่า

$$\tau \cong K_T I_M N_r (\theta_i - \theta_0) \quad (3.62)$$

สมการของการเคลื่อนที่จะเป็น

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} = K_T I_M N_r (\theta_i + \theta_0) \quad (3.63)$$

และเมื่อลาปลาซทรานฟอร์มเมื่อให้สภาวะเริ่มต้นเท่ากับศูนย์

$$(S^2 J + SD + K_T I_M N_r) \Theta(S) = K_T I_M N_r \Theta_i \quad (3.64)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการก็จะได้ทรานเฟอร์ฟังก์ชันเป็น

$$G(s) = \frac{\Theta_0}{\Theta_0} = \frac{\omega_{np}^2}{s^2 + \frac{SD}{J} + \omega_{np}^2} \quad (3.65)$$

ทรานเฟอร์ฟังก์ชันสเตปมอเตอร์ที่ขับโดยแหล่งจ่ายกระแสกระตุ้นแบบสองเฟส จะเป็น เช่นเดียวกันกับขับโดยแหล่งจ่ายแรงดันที่กระตุ้นแบบเฟสเดียว ทรานเฟอร์ฟังก์ชันสามารถที่จะได้มาจากสมการที่ (3.21) ซึ่งแหล่งจ่ายกระแสมีอิมพีแดนซ์ภายในมีค่าเป็นอนันต์ หลังจากที่ได้คูณ  $r/L$  ทั้งเทอมเศษและเทอมส่วนแล้วเราตั้งค่า  $r=\alpha$

$$\Theta = \frac{(s + \frac{D}{J})\theta_i}{s^2 + (\frac{D}{J})s + \omega_{np}^2} \quad (3.66)$$

เปลี่ยนแปลงเทอมเศษ โดยการเปลี่ยนเป็นค่าหนึ่งหน่วยเมื่อ  $s=0$  เราจะได้ทรานเฟอร์ฟังก์ชันสมการ (3.65) เป็นการหาทรานเฟอร์ฟังก์ชันของสเตปมอเตอร์แบบไฮบริดจ์และแบบแม่เหล็กถาวร สำหรับสเตปมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้ทำในแนวเดียวกัน

**3.2.3 การกระตุ้นแบบ 2 เฟส โดยการขับด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน** ทรานเฟอร์ฟังก์ชันได้มาจากสมการที่ (3.21) ในทำนองเดียวกันสเตปมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้มีรูปแบบทรานเฟอร์ฟังก์ชันที่ใกล้เคียงกัน

$$\Theta = \frac{(\frac{r}{L})\omega_{np}^2}{s^3 + (\frac{r}{L_v} + \frac{D}{J})s^2 + [\frac{r}{L_v} \frac{D}{J} + \omega_{np}^2 (1 + K_p)]s + (\frac{r}{L_p})\omega_{np}^2} \quad (3.67)$$

**3.2.4 ผลตอบสนองสเตปเดียว (Single step response)** เรามาพิจารณาถึงผลตอบสนองชั่วขณะของสเตปมอเตอร์ เราน่าที่จะเปรียบเทียบกรณีของทรานเฟอร์ฟังก์ชันอันดับที่สองกับกรณีทรานเฟอร์ฟังก์ชันอันดับที่สาม ซึ่งก็หมายถึงการเปรียบเทียบกันระหว่างการกระตุ้นเฟสแบบเฟสเดียวกับการกระตุ้นเฟสแบบสองเฟส

**3.2.5 ทรานเฟอร์ฟังก์ชันอันดับที่สอง** ทรานเฟอร์ฟังก์ชันสำหรับการขับแบบเฟสเดียวและการขับด้วยแหล่งจ่ายกระแสซึ่งเขียนได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G(s) = \frac{\Theta_0}{\Theta_i} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.68)$$

เมื่อ  $\zeta$  คือ อัตราส่วนแดมปีง (damping ratio) และมีค่ามาจาก

$$\zeta = \frac{D}{2J\omega_n} \quad (3.69)$$

จากสมการที่ (3.68) เป็นที่รู้กันทั่วไปว่าเป็นทฤษฎีของการควบคุมป้อนกลับ ผลตอบสนองเริ่มต้นหรือผลตอบสนองของ  $\Theta_0$  ต่อสแต็ปฟังก์ชันของ  $\Theta_i$  ซึ่งความแตกต่างของเส้นผลตอบสนองจะขึ้นอยู่กับขนาดของ  $\zeta$  ที่แสดงในรูปที่ 3.5 โดยทั่วไปผลตอบสนองจะแกว่งได้ก็ต่อเมื่อ  $\zeta < 1$  โดยเหตุที่ว่าอัตราส่วนแดมปีงของสแต็ปมอเตอร์ธรรมดาทั่ว ๆ ไปจะน้อยกว่า 0.5 ผลตอบสนองก็จะแกว่ง เวลาที่โรเตอร์จะเข้าสู่ตำแหน่งสภาวะสมดุลมักจะมีค่าถึง settling time เสมอ เวลา settling time แสดงได้ดังรูปที่ 3.6

**3.2.6 ทรานเฟอร์ฟังก์ชันอันดับที่สาม** สมการของการหมุนในการขับแบบสองเฟสและสมการแรงดันจะไม่เป็นอิสระต่อกัน ในสมการที่ (3.20) หรือสมการที่ (3.36) แสดงถึงเคลื่อนที่ที่ทำให้เกิด e.m.f เท่ากัน และกระแสที่กระตุ้นเฟสในทิศทางตรงกันข้าม กระแสที่เกิดขึ้นมาจะหมุนเวียนวางซ้อนทับกับกระแสเดิม  $I_0$  กระแสรวมที่มาจากแหล่งจ่ายยังคงอยู่ที่  $2I_0$  และจะไม่ถูกดูดเข้าไปในแหล่งจ่ายถ้าโรเตอร์เคลื่อนที่แบบแกว่ง กระแสก็จะไหลวนเวียนและแกว่งด้วยและจะทำให้เกิดความร้อนในขดลวด ด้วยเหตุที่ว่าปรากฏการณ์ที่แสดงบอกถึงพลังงานจลน์ของโรเตอร์จะถูกดูดซึมให้เปลี่ยนเป็นความร้อนสูญเสียแต่โรเตอร์จะแกว่งลดลงอย่างรวดเร็ว การอธิบายถึงสนามแม่เหล็กของการแกว่งแบบหนึ่งในการกระตุ้นเฟสแบบสองเฟสถูกวิเคราะห์โดย “ลอเรนสัน” และ “ฮิวจ์” ในทอมส่วนของทรานเฟอร์ฟังก์ชันถ้าให้มีค่าเท่ากับศูนย์ เราเรียกว่า “สมการคุณลักษณะ” เมื่อให้ค่าแดมปีงเป็นค่าคงที่  $D$  , ความต้านทานของอากาศสมมติให้เท่ากับศูนย์ เพราะฉะนั้นสมการคุณลักษณะของการขับแบบสองเฟสคือ

$$s^3 + \left(\frac{r}{L}\right)s^2 + \omega_n^2(1 + K_p)s + \left(-\frac{r}{L}\right)\omega_n^2 = 0 \quad (3.70)$$

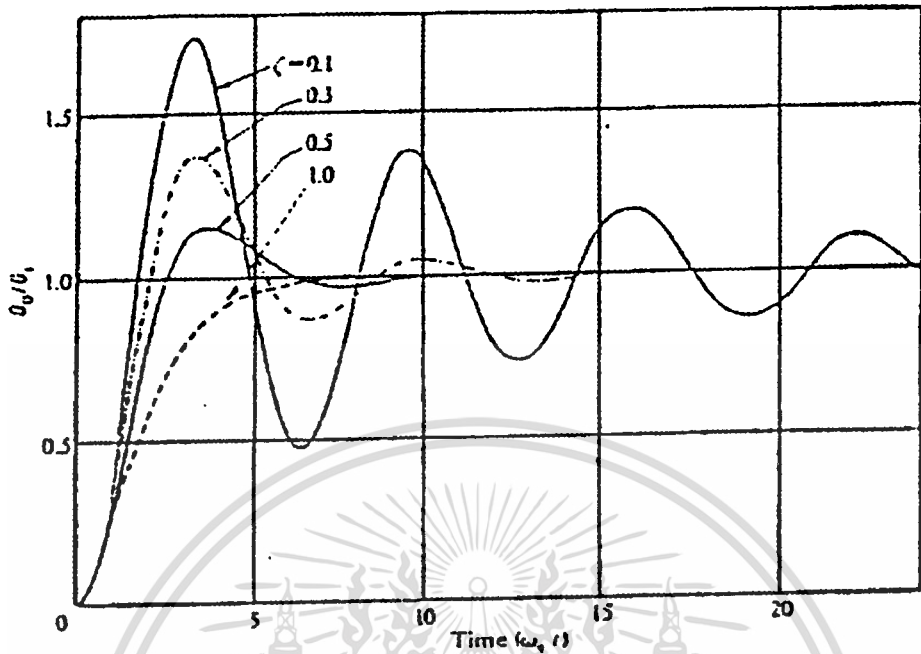
เมื่อ

$r/L$  = ส่วนของค่าคงตัวเวลาที่เป็นผลมาจากวงจร

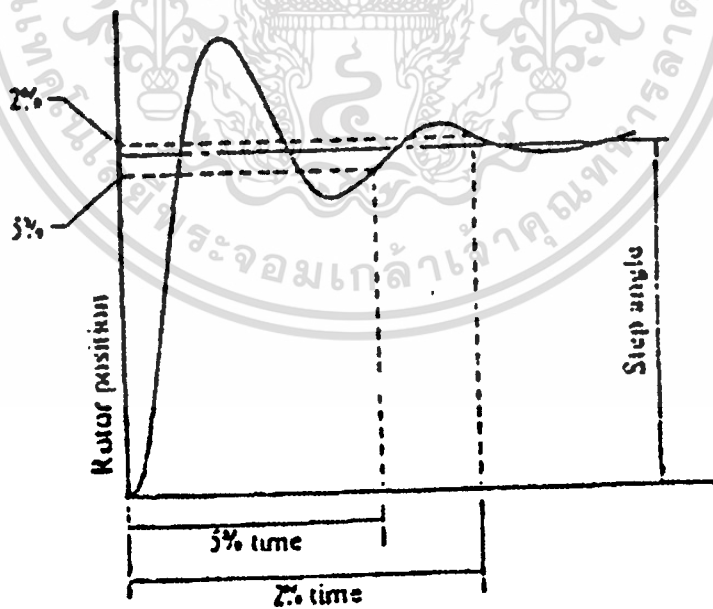
$k$  = ค่าคงที่ที่ไม่มีขนาด เป็นค่าแดมปีงซึ่งมีอยู่แล้วที่ถูกวัดได้จากมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\omega_n$  = Undamped natural frequency ของการแกว่งที่ประมาณว่าสมดุลย์

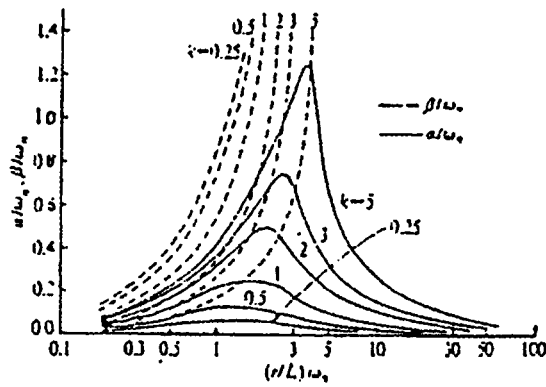


รูปที่ 3.5 ผลตอบสนองของระบบอันดับที่สอง



รูปที่ 3.6 เวลาที่เข้าสู่ค่าสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ค่าแดมปีง  $\alpha$  และ  $\beta$  และค่า  $K$  เท่ากับ  $(r/L)$

ค่ารากของสมการจะมีค่าจริงและค่าคู่สังยุคกัน (conjugate) สำหรับค่า  $0 < k < 8$  และมอดเตอร์ส่วนมากจะมีค่า  $k$  น้อยกว่า 1 ดังนั้น สมการสามารถแสดงได้เป็น

$$(s + \alpha)((s + \beta)^2 + \omega^2) = 0 \quad (3.71)$$

เมื่อแปลงสมการที่ (3.71) ให้เป็นผลตอบสนองทางเวลาก็จะเป็น

$$\theta(t) = Ae^{-\alpha t} + Be^{-\beta t} \cos(\omega t - \gamma) \quad (3.72)$$

เมื่อ  $A, B$  และ  $\lambda$  เป็นค่าคงที่ที่หามาจากสภาวะเริ่มต้น เมื่อพิจารณาถึงสมการที่ (3.72) ความเป็นไปได้ที่เข้าสู่สภาวะสมดุลง่ายได้อย่างรวดเร็วได้ ถ้า  $\alpha$  และ  $\beta$  ทั้งสองค่านี้มีขนาดใหญ่ ตัวแปร  $\alpha, \beta, \omega$  มีความสัมพันธ์กันในระบบตัวแปร  $r, L, k, \omega_n$  โดยสมการ

$$\alpha + 2\beta = rL, \quad \alpha(\beta^2 + \omega^2) = (rL)\alpha_n^2, \quad \beta^2 + \omega^2 + 2\alpha\beta = (1+k)\omega_n^2 \quad (3.73)$$

จากสมการแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 ค่า  $\beta/\omega_n$  เป็นค่าสูงสุดที่  $(r/L)\omega_n$  สำหรับในแต่ละค่า  $k$  แสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าสูงสุดแสดงได้ในสมการที่ 3.74 ถึง 3.76

$$\text{ค่าสูงสุดของ} \quad \beta / \omega_n = k / 4 \quad (3.74)$$

$$\text{ค่าของ} \quad \left(\frac{r}{L}\right)\omega_n = \left(1 + \frac{k}{2}\right) \quad (3.75)$$

$$\text{ได้ค่าเหมาะสมกับค่าของ} \quad \alpha / \omega_n = 1 \quad (3.76)$$

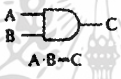

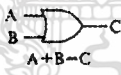

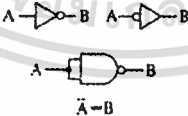
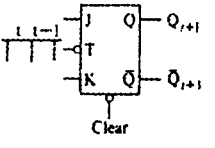
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

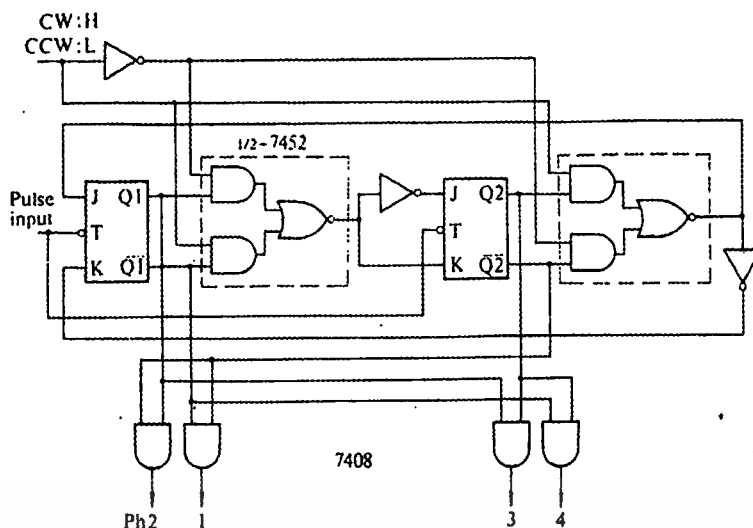
## การควบคุมสเตปปีงมอเตอร์

### 4.1 วงจรลอจิกซีควเอนซ์ (Logic Sequencers)

ลอจิกซีควเอนซ์ คือ วงจรลอจิกจะไปควบคุมลำดับการกระตุ้นเฟสมอเตอร์ เพื่อให้ตอบสนองต่อพัลส์คำสั่งหรืออินพุตพัลส์ให้เหมาะสม วงจรลอจิกที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นซีพรีจิสเตอร์ และลอจิกเกต ซึ่งวงจรเหล่านี้ซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบเป็นไอซี จึงสะดวกในการใช้งานดังได้แสดงให้เห็นในตารางที่ 4.1

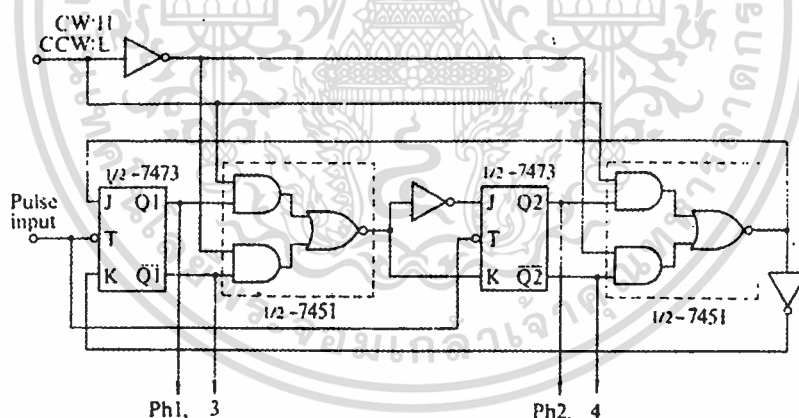
ตารางที่ 4.1 สัญลักษณ์ของวงจรลอจิกเกต สำหรับจัดลำดับลอจิก

AND	 <p><math>A \cdot B = C</math></p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Input</th> <th>Output</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	Input		Output	A	B	C	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0						
Input		Output																								
A	B	C																								
1	1	1																								
1	0	0																								
0	1	0																								
0	0	0																								
NAND	 <p><math>A \cdot B = C</math></p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Input</th> <th>Output</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	Input		Output	A	B	C	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1						
Input		Output																								
A	B	C																								
1	1	0																								
1	0	1																								
0	1	1																								
0	0	1																								
OR	 <p><math>A + B = C</math></p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Input</th> <th>Output</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	Input		Output	A	B	C	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0						
Input		Output																								
A	B	C																								
1	1	1																								
1	0	1																								
0	1	1																								
0	0	0																								
NOR	 <p><math>A + B = C</math></p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Input</th> <th>Output</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	Input		Output	A	B	C	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1						
Input		Output																								
A	B	C																								
1	1	0																								
1	0	0																								
0	1	0																								
0	0	1																								
NOT	 <p><math>A = B</math></p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Input</th> <th>Output</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	Input	Output	A	B	1	0	0	1																
Input	Output																									
A	B																									
1	0																									
0	1																									
JK-FF	 <p>Clear</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Input</th> <th colspan="2">Output</th> </tr> <tr> <th>J</th> <th>K</th> <th><math>Q_{t+1}</math></th> <th><math>\bar{Q}_{t+1}</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td><math>\bar{Q}_t</math></td><td><math>Q_t</math></td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td><math>Q_t</math></td><td><math>\bar{Q}_t</math></td></tr> </tbody> </table> <p>set reset</p> <p>The function of the table is effected when the clear terminal is on level H. If the clear terminal is on level L, output Q will be on L and <math>\bar{Q}</math> on H.</p>	Input		Output		J	K	$Q_{t+1}$	$\bar{Q}_{t+1}$	1	1	$\bar{Q}_t$	$Q_t$	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	$Q_t$	$\bar{Q}_t$
Input		Output																								
J	K	$Q_{t+1}$	$\bar{Q}_{t+1}$																							
1	1	$\bar{Q}_t$	$Q_t$																							
1	0	1	0																							
0	1	0	1																							
0	0	$Q_t$	$\bar{Q}_t$																							



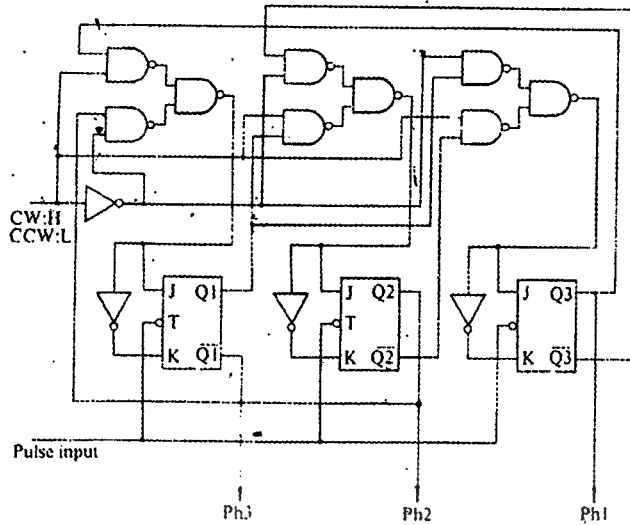
รูปที่ 4.1 วงจรจัดลำดับการกระตุ้นแบบเฟสเดียว 2 ทิศทาง สำหรับมอเตอร์ 4 เฟส

วงจรจัดลำดับสำหรับการกระตุ้นแบบสองเฟส สำหรับมอเตอร์ 4 เฟส วงจรสามารถสร้างจาก JK-FF ที่ประกอบอยู่ภายในไอซี เบอร์ 75LS73 แสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นวงจรสามารถควบคุมทิศทางการหมุนได้ 2 ทาง



รูปที่ 4.2 วงจรจัดลำดับการกระตุ้นแบบสองเฟส 2 ทิศทาง ของสเต็ปมิ่งมอเตอร์ 4 เฟส

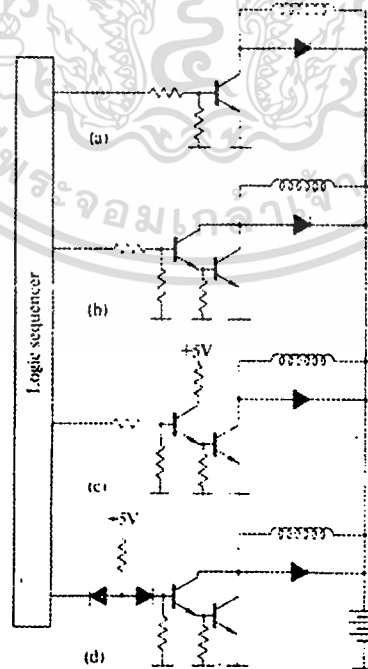
วงจรจัดลำดับสำหรับการกระตุ้นแบบครึ่งสเต็ป สำหรับมอเตอร์ 3 เฟส วงจรสามารถสร้างจาก JK-FF แสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นวงจรสามารถควบคุมทิศทางการหมุนได้ 2 ทาง



รูปที่ 4.3 วงจรจัดลำดับการกระตุ้นแบบครึ่งสเตป 2 ทิศทาง ของสเตปปีงมอเตอร์ 3 เฟส

### 4.2 การเชื่อมต่อระหว่างตัวจัดลำดับและตัวขับ

จากที่ได้ทราบมาแล้วว่าการกระตุ้นเฟสของสเตปมอเตอร์ให้ทำงานเพื่อให้โรเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งที่ต้องการ ซึ่งจำเป็นต้องมีส่วนของตัวจัดลำดับการกระตุ้นให้เป็นไปตามการเคลื่อนที่ จึงมีการเชื่อมต่อระหว่างลำดับลอจิกอินพุตพัลส์กับวงจรขับเป็นการเชื่อมต่อกันโดยตรง แต่ถ้าหากกระแสที่ขาออกจากตัวจัดลำดับไม่เพียงพอที่ไปขับให้วงจรขับจ่ายกระแสให้กับมอเตอร์ได้ จึงเป็นการใช้ทรานซิสเตอร์ขยาย 2 ภาคในรูปที่ 4.4



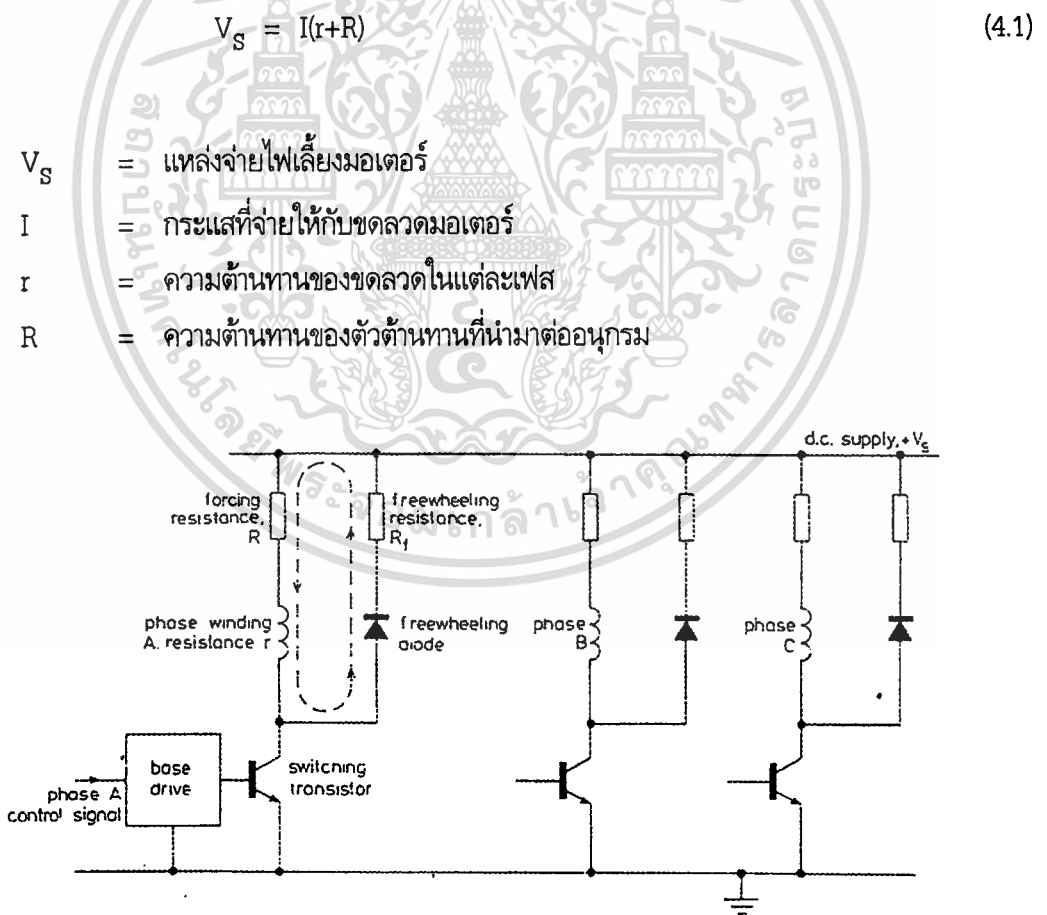
รูปที่ 4.4 การเชื่อมต่อระหว่างตัวจัดลำดับลอจิกกับตัวขับสเตปปีงมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

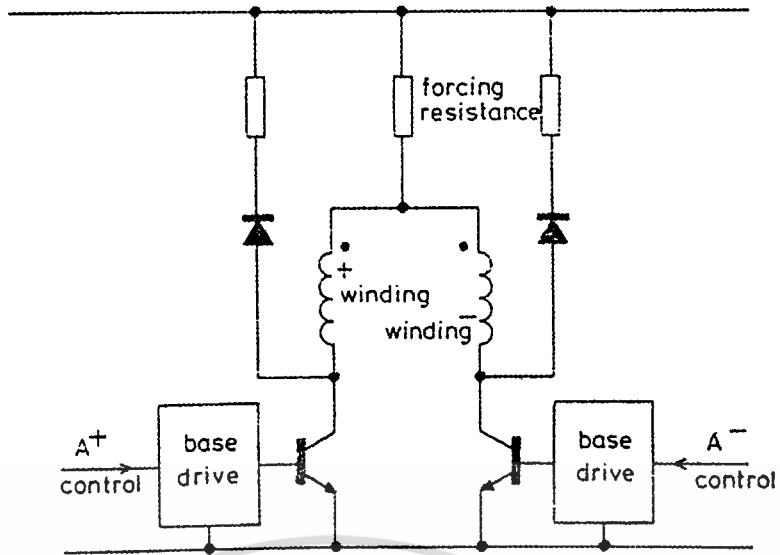
### 4.3 วงจรขับสเตปมอเตอร์ (Driver Circuit)

สัญญาณควบคุมสำหรับสเตปมอเตอร์จะเป็น Low power ตระกูล TTL แต่สเตปมอเตอร์ต้องการกระตุ้นด้วยแรงดัน 5 V และกระแส 3 A จึงจำเป็นต้องใช้วงจรควบคุมการเชื่อมต่อซึ่งได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อการเชื่อมต่อ เพราะฉะนั้นวงจรขับจึงเป็นแบบพื้นฐานที่สามารถเชื่อมต่อกับวงจรจัดลำดับได้ ซึ่งจะแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ การขับแบบขั้วเดียว (Unipolar Drive) และการขับแบบสองขั้ว (Bipolar Drive)

**4.3.1 วงจรขับแบบขั้วเดียว (Unipolar Drive Circuit)** วงจรขับนี้เป็นการขับที่ง่ายที่สุด ซึ่งสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.5 ซึ่งเป็นวงจรขับสำหรับสเตปมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลักแตนซ์ได้ที่ 3 เฟส สำหรับเฟสที่ถูกกระตุ้นจะถูกแยกเป็นอิสระกับเฟสอื่นๆ ซึ่งสัญญาณการกระตุ้นเรียกว่า สัญญาณควบคุมเฟส (Phase Control Signal) จากรูปขดลวดถูกกระตุ้นได้จากการสวิตช์ ออน ของทรานซิสเตอร์ในลักษณะอิ่มตัว (Saturated) แหล่งจ่ายไฟดีซีซึ่งจะครอบคลุมขดลวดและ forcing resistance ซึ่งทำให้เกิดกระแสเต็มพิกัดที่ขดลวดต้องการเป็นไปตามสมการที่ (4.1) และสำหรับการพันแบบไบพอลาร์ แต่ใช้วงจรขับแบบโมโนโพลาร์แสดงในรูปที่ 4.6

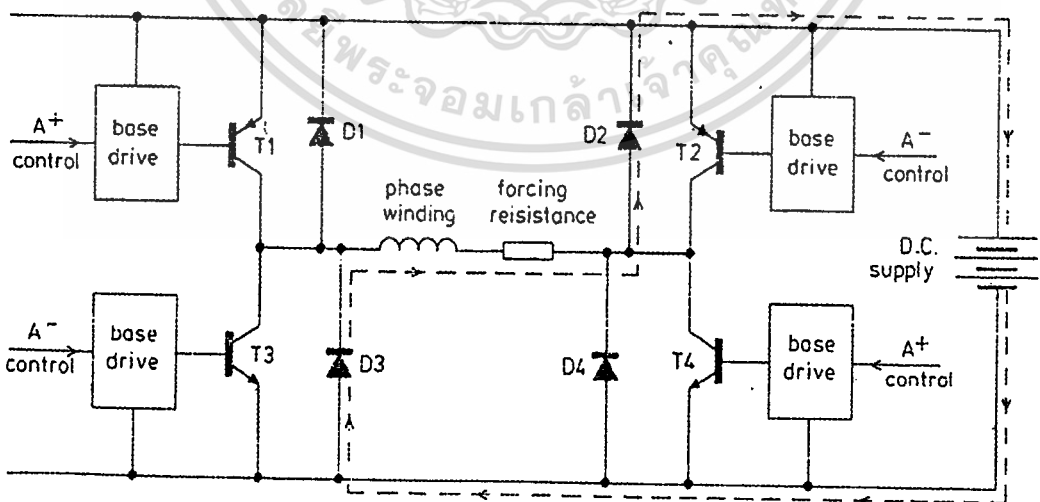


รูปที่ 4.5 วงจรขับแบบขั้วเดียว



รูปที่ 4.6 วงจรขับสำหรับสเต็ปมิ่งมอเตอร์ที่พันขดลวดแบบไบโพลาร์และใช้การขับแบบไบโพลาร์

**4.3.2 วงจรขับแบบสองขั้ว (Bipolar Drive Circuit)** การขับในลักษณะของหนึ่งเฟสแต่ใช้ทรานซิสเตอร์ 4 ตัว เพื่อบังคับทิศทางการไหลของกระแสให้เข้าขดลวดของสเต็ปมิ่งมอเตอร์ ซึ่งสามารถเลือกได้จากการให้ทรานซิสเตอร์ทำงานเป็นคู่ แสดงได้ในรูปที่ 4.7 จากรูปต้องป้อนพัลส์แบบบวกให้กับขาเบสของทรานซิสเตอร์ชนิด เอ็นพีเอ็น (NPN) ที่ต้องการให้ทำงานหรือนำกระแส และป้อนสัญญาณพัลส์แบบลบให้ทรานซิสเตอร์ชนิด พีเอ็นพี (PNP) ทั้งสองตัวต้องนำกระแสพร้อมกันตามทิศทางการไหลของกระแสที่ใช้เส้นประแสดงทิศทาง



รูปที่ 4.7 วงจรขับแบบสองขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.3.3 วงจรขับแบบไมโครสเตป(Microstep Drive Circuit)** ขนาดสเตปปกติของเตปปีงมอเตอร์ สามารถแบ่งให้เคื่อนที่เป็นสเตปเล็กๆ ซึ่งได้กล่าวถึงในบทที่ 2 และบทที่ 3 ไว้บ้างแล้ว ดังนั้นจึงอธิบายถึงวิธีการคำนวณ โดยประมาณจากแรงบิดของแต่ละเฟสซึ่งเปลี่ยนแปลงแบบซายน์ กับตำแหน่งโรเตอร์

$$T_A = -kT i_A \sin p\theta \quad (4.2)$$

$$T_B = -kT i_B \sin p\theta \quad (4.3)$$

จากหลักการโดยทั่วไปของสเตปมอเตอร์ เมื่อมีการกระตุ้นให้ขดลวดนำกระแส ซึ่งอาจจะเป็นบวกหรือลบจะทำให้การเคลื่อนที่เชิงมุมเปลี่ยนไป  $\theta/2P$  สำหรับการเคลื่อนที่หนึ่งสเตปในแต่ละครั้ง สำหรับการเคลื่อนที่เป็นไมโครสเตปสามารถกำหนดตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้จาก การจ่ายกระแสของขดลวดในเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ให้เป็นสัดส่วนกัน และให้เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องจนกว่าการเคลื่อนที่ได้ไป 1 สเตปปกติ และสามารถหากระแสทั้งสองเฟสได้ตามสมการที่ (4.4) และ (4.5)

$$i_a = i \cos p\theta \quad (4.2)$$

$$i_b = i \cos (\theta - \pi/2) \quad (4.3)$$

จะได้ทอร์คที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็น

$$\begin{aligned} T &= T_A + T_B \\ &= -kT (\sin p\theta \cos \Phi + \sin (p\theta - \pi/2) \cos (\theta - \pi/2)) \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$= -kT (\sin p\theta - \Phi) \quad (4.5)$$

และที่ตำแหน่งสมดุลย์ค่ามุมจะมีค่าเท่ากับ 0 นั่นคือ

$$p\theta = \Phi/p \quad (4.6)$$

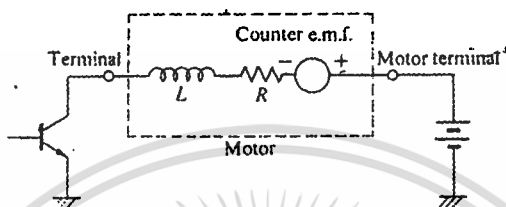
ดังนั้นจุดสมดุลย์ของโรเตอร์อยู่ที่ตำแหน่งใดๆในสเตปเล็กๆซึ่งอยู่ระหว่างสเตปปกติ  $\theta = 0, \pi/2p, \pi/p, 3\pi/2p$  เป็นต้น ดังนั้นกระแสที่เกิดขึ้นในขดลวดทั้งสองเฟสจะมีหลายระดับระหว่างสเตปปกติ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{Microstep Length} = \text{rotor length} = \text{rotor tooth pitch}/2nl \quad (4.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.4 ปัญหาของวงจรขับเคลื่อนเบรกมอเตอร์ และการแก้ไข

**4.4.1 วงจรกำจัดแรงดันเกิน (Suppression Circuit)** ปัญหาหลักสองประการคือ การยกกระดืบกระแส (Build Up Current) และการลดระดับของกระแส (Decay) เมื่อมีการให้วงจรขับทำงาน และไม่ทำงานในแต่ละเฟส และเมื่อใช้งานที่ความถี่สูงทำให้เวลาในการ ออน และออฟ ของแต่ละเฟสไม่เพียงพอซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ของแต่ละเฟส และเมื่อหยุดจ่ายพลังงานให้กับเฟสที่ถูกกระตุ้นกระแสจะไม่ลดลงทันทีแต่เป็นการลดลงอย่างช้าๆเป็นผลให้การตอบสนองของเฟสถัดมาช้าลง ซึ่งเป็นผลให้สเตรปมอเตอร์หยุดทำงานได้



รูปที่ 4.8 วงจรสมมูลของวงจรขับสำหรับสเตรปมอเตอร์หนึ่งเฟส

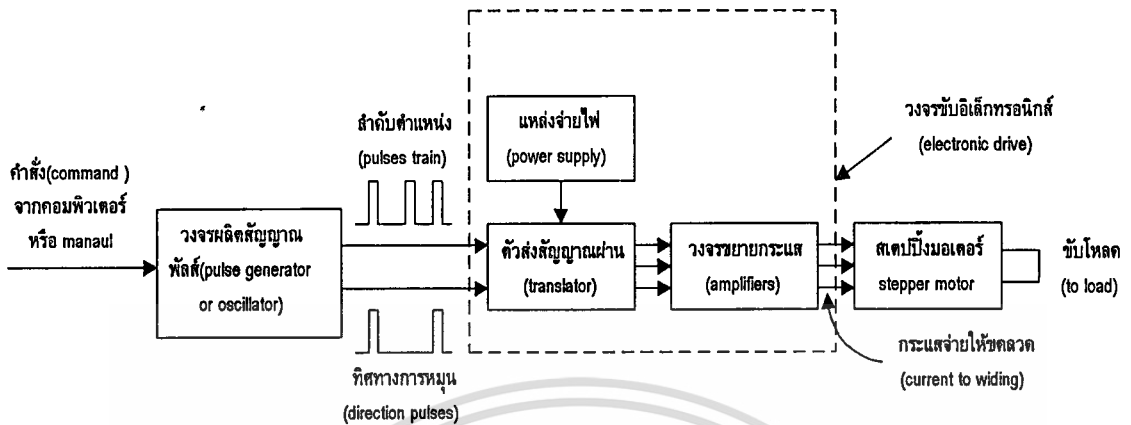
พิจารณาวงจรสมมูลของการจ่ายกระแสหรือพลังงานให้แต่ละเฟส เมื่อไม่สนใจแรงดันที่ตกคร่อมทรานซิสเตอร์ในรูปที่ 4.8 ดังนั้นกระแสในตัวในขดลวดมีค่าเท่ากับ  $V/R_M$  เมื่อทรานซิสเตอร์หยุดนำกระแสพลังงานที่เหลืออยู่ในขดลวดจะพยายามไหลในทิศทางเดิม และแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์เมื่อหยุดนำกระแสมีค่าเท่ากับ  $L_M di/dt$  จะเกิดแรงดันสไปร์ ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดันที่ตกคร่อมขดลวดคอนดักเตอร์และอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ดังนั้นจึงมีการป้องกันแรงดันกระชากนี้ด้วยวงจรกำจัดแรงดันเกินซึ่งสามารถแบ่งเป็นลักษณะของวงจรต่างๆได้ดังนี้

**4.4.2 วงจรกำจัดแรงดันเกินโดยใช้ไดโอด (Diode Suppression Circuit)** เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดของวงจรกำจัดแรงดันเกิน การต่อไดโอดในลักษณะคร่อมกับขดลวด ซึ่งเป็นลักษณะของฟรีวีลิ่งไดโอด (Free Wheeling Diode) ระหว่างที่ขดลวดนำกระแสไดโอดจะถูกรีเวสไบอัสหรือได้รับกระแสกลับทาง ซึ่งเสมือนมีอิมพีแดนซ์สูงขนานกับขดลวด แต่เมื่อขดลวดหยุดนำกระแสขั้วทั้งสองของขดลวดจะมีศักดากลับทางกับตอนนำกระแส ทำให้ไดโอดนำกระแสแทนและจะได้รับแรงดันขาเอาต์จะมีศักดาสูงกว่าขาคาโอด ดังนั้นพลังงานที่ถูกเก็บอยู่ในขดลวดจะถูกถ่ายออกมาเป็นพลังงานสูญเสียทางความต้านทานรวมของวงจร ซึ่งมีค่าต่ำมากและสามารถตัดความต้านทานของไดโอดขณะนำกระแสทิ้งได้ ดังนั้นจึงทำให้ค่าคงตัวทางเวลา (Time Constant) ของการลดระดับของกระแส

## 4.5 การควบคุมการทำงานของสเตรปมอเตอร์

**4.5.1 การทำงานในระบบวงเปิด** ในส่วนนี้จะได้กล่าวถึงลักษณะพื้นฐานต่าง ๆ ของระบบวงเปิด ซึ่งจะประกอบไปด้วย ระบบการขับ , ลำดับของการกระตุ้น , การขับตัวสเตรปมอเตอร์ , ตัวควบคุมอินพุท เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และตัวประมวลผล สำหรับสเตปมอเตอร์ที่มีโครงสร้างต่างกัน ซึ่งได้อธิบายการทำงานในหัวข้อที่ผ่านมาแล้ว ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้กล่าวถึงการทำงานของระบบควบคุมสเตปมอเตอร์ทั้งที่ประกอบกันดังรูปที่ 4.9

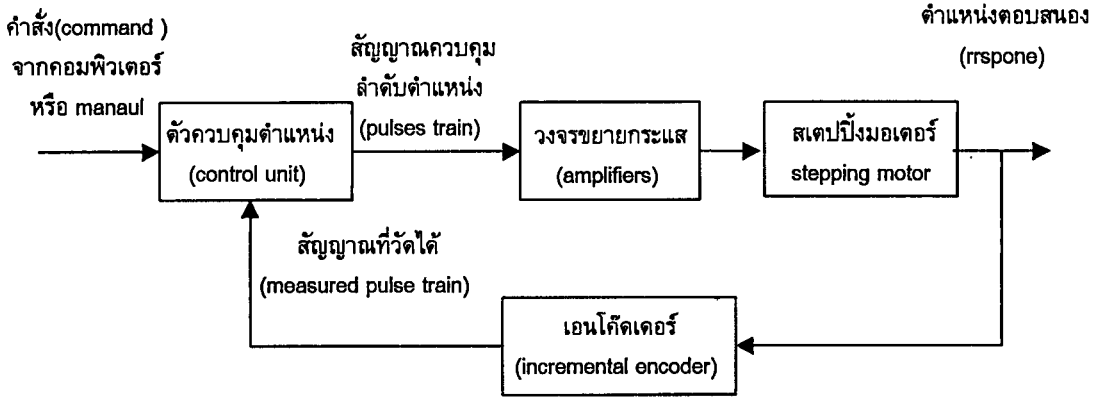


รูปที่ 4.9 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมสเตปมิงมอเตอร์ในระบบวงเปิด

จากรูที่ 4.9 เมื่อมีการป้อนสัญญาณอินพุตเข้าไปยังวงจรที่ใช้จัดลำดับการขับแล้ว จะต้องมียุสัญญาณควบคุมป้อนเข้าไปด้วยจึงจะสามารถทำให้วงจรทำงานได้ โดยสัญญาณทั้งคู่จะเป็นสัญญาณแบบลอจิกหรือสัญญาณพัลส์ ( ลักษณะการกระตุ้นการขับนั้นได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 ) การทำงาน คือถ้าเราต้องการให้มอเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งใดก็ตามเราสามารถกำหนดได้ เมื่อเรารู้ขนาดของสเตปต่อองศา และสเตปมิงมอเตอร์จะเคลื่อนที่ไปตามจำนวนพัลส์ที่เราป้อนให้ที่วงจรอินพุต ตัวประมวลผลก็จะไปบังคับการไหลของกระแสตามพัลส์ที่รับเข้ามาโดยไม่มีมีการป้อนกลับจากเอาต์พุตมายังอินพุตเพื่อตรวจสอบตำแหน่งในการเคลื่อนที่ ดังนั้นการทำงานในระบบเปิดนี้จึงมีข้อเสียหลายประการด้วยกันคือ

1. ไม่สามารถตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่จริงได้
2. ในขณะที่เคลื่อนที่แกนของโรเตอร์ทำให้เกิดการสั่นหรือการออกสลิปได้
3. ไม่สามารถรักษาระยะของความเร็วได้คือไม่สามารถทำให้เกิดความเร็วสูงๆ ได้

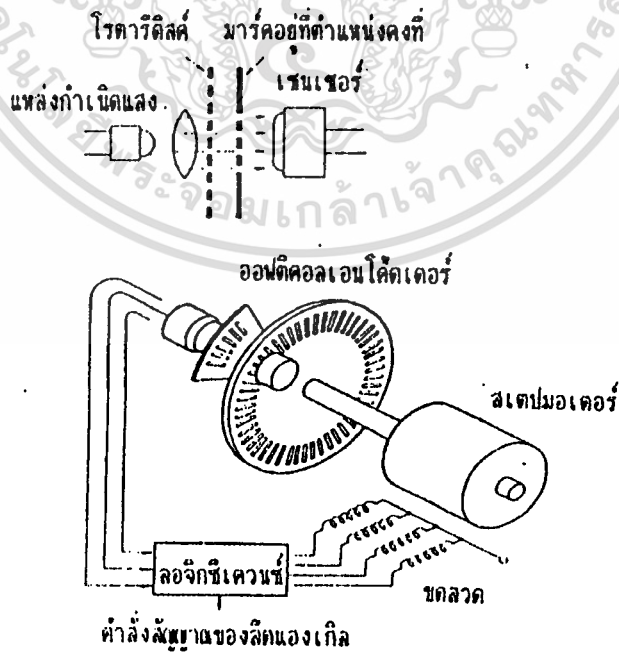
**4.5.2 การควบคุมการทำงานในระบบวงปิด** จากข้อจำกัดของระบบเปิดซึ่งจะเป็นความต้องการของระบบวงปิด คือระบบปิดนี้สามารถตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้ด้วยการป้อนกลับสัญญาณจากเอาต์พุต และสามารถควบคุมที่แน่นได้ ด้วยการตรวจจับที่ตัวโรเตอร์จากออปติคัลเอนโคเดอร์ส่วนใหญ่จะจับปลั๊กที่แกนของมอเตอร์ ซึ่งการตรวจจับนี้จะเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างวงจรนับและวงจรประมวลผล เพื่อไปบังคับการไหลของกระแสในขดลวดแต่ละเฟส เพื่อให้การสวิตช์ที่เหมาะสม การควบคุมในระบบปิดนี้ได้ถูกพัฒนาให้เหนือกว่าการควบคุมในระบบวงเปิดมาก และแสดงบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมในระบบวงปิด

### 4.6 การตรวจจับทิศทาง

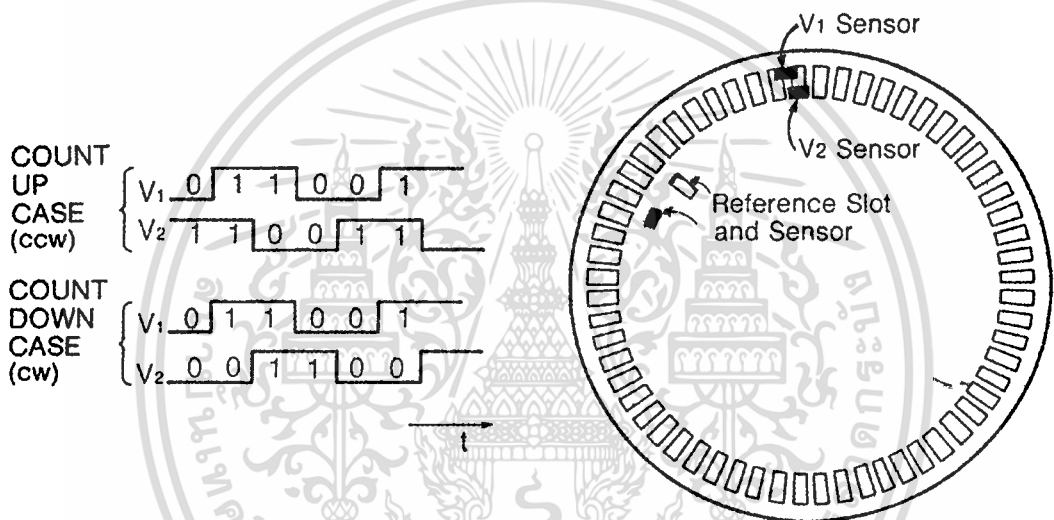
เมื่อสเตปป์มอเตอร์ถูกขับโดยอาศัยการควบคุมแบบระบบวงปิดจำเป็นต้องมีเครื่องมือในการตรวจจับการเคลื่อนที่ของตัวโรเตอร์ในลักษณะ 2 ทิศทาง ซึ่งอุปกรณ์นั้นคือ ตัวออปติคอลลเอนโค้ดเดอร์ซึ่งแสดงอยู่ในรูปที่ 5.2 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดแสง, ตัวเซ็นเซอร์, โรตารีดิสก์ และหน้ากาก การตรวจจับทิศทางทำได้ง่าย ๆ โดยให้จำนวนเซ็นเซอร์ยึดติดกับแกนของมอเตอร์ในขณะที่มอเตอร์เคลื่อนที่ตัวเซ็นเซอร์จะจับสัญญาณการเคลื่อนแต่ละสเตปและนำสัญญาณพัลส์ที่ได้นี้มาป้อนกลับมาเข้าตัวคอนโทรลเลอร์ โดยเอาท์พุทของเอนโค้ดเดอร์จะมีสัญญาณพัลส์หรือสัญญาณนาฬิกาออกมามากกว่า 1 สัญญาณคือประกอบ



รูปที่ 4.11 แสดงโครงสร้างของเอนโค้ดเดอร์ที่ใช้ในการตรวจจับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยสัญญาณจากตัวตรวจจับหรือตัวเซ็นเซอร์เป็นแชนแนล A ซึ่งจะถูกยึดไว้ในตำแหน่งที่ฟันในช่วงที่บแสง และตัวตรวจจับหรือตัวเซ็นเซอร์ที่สองเป็นแชนแนล B จะถูกยึดไว้ที่ตำแหน่งที่ฟันของหน้าที่เป็นช่วงให้แสงผ่านได้ ดังนั้นสัญญาณเข้าที่พุทของตัวตรวจจับทั้งสองจะมีสัญญาณที่มีขอบขาขึ้นต่างกัน 90 องศาสำหรับสัญญาณ Z จะเป็นตัวบ่งบอกถึงการหมุนของแกนโรเตอร์ที่ผ่านตัวตรวจจับไปครบ 360 องศาซึ่งจะให้สัญญาณออกมาเพียง 1 พัลส์เท่านั้น และอาจจะมีสัญญาณอื่นอีกขึ้นกับประโยชน์ที่จะนำไปใช้งานแต่ละประเภท ซึ่งแสดงสัญญาณดังแสดงอยู่ในรูปที่ 4.11 ส่วนรูปที่ 4.12 เป็นสัญญาณเข้าที่พุทของแชนแนล A และ แชนแนล B รวมถึงการติดตั้งงานหรือหน้ากากในการตัดแสงในขณะมอเตอร์หมุน และตัวตรวจจับการหมุนไปครบ 360 องศา ซึ่งเรียกว่าสัญญาณอินดิค (index) บางครั้งมักจะเรียกว่าสัญญาณ Z



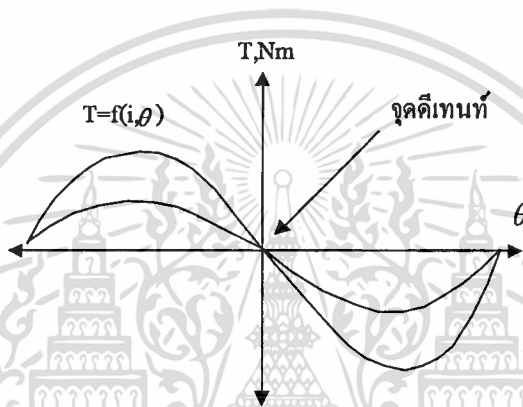
รูปที่ 4.12 สัญญาณที่ได้จากออปติคัลเอนโคเดอร์ 2 แชนแนล และตำแหน่งของตัวเซ็นเซอร์กับแหล่งกำเนิดแสง



การทำงานของสแต็ปมอเตอร์ในลักษณะการเคลื่อนที่แบบไมโครสแต็ป ขึ้นอยู่กับการควบคุมการจ่ายกระแสให้กับขดลวดของมอเตอร์ ในลักษณะ 2 เฟสพร้อมๆกัน แบบเป็นสัดส่วนกัน โดยได้จากการประมาณค่าคุณลักษณะของแรงบิด (Torque, T) ของสแต็ปมอเตอร์รอบตำแหน่งดีเทนท์ จะมีความสัมพันธ์กับกระแส (I) และตำแหน่งเชิงมุม ( $\theta$ ) ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ลักษณะของแรงบิด(torque) T, รอบจุดดีเทนท์ จะมีความสัมพันธ์กับ กระแส และ ขนาดของมุม (displacement ,  $\theta$ ) ดังแสดงในรูปที่ 5.3

เมื่อ 
$$T = f(I, \theta) \quad (5.1)$$

ถ้าจัดสมการของ T ให้อยู่ในรูปของตัวแปรเพียงตัวเดียวหรือหนึ่งตัวจะได้



รูปที่ 5.2 ลักษณะของ motor torque-displacement(T- $\theta$ ) characteristics

เมื่อให้ I เป็นค่าคงที่ จะได้สมการที่ (5.2) 
$$T = f_{\theta}(\theta) \quad (5.2)$$

เมื่อให้  $\theta$  เป็นค่าคงที่ จะได้สมการที่ (6.3) 
$$T = f_{\theta}(I) \quad (5.3)$$

ถ้าจุดดีเทนท์ที่ต้องการ  $\theta = n(\theta_s/m)$  โดยที่ m คือ จำนวนที่จะแบ่งขนาดสแต็ปปกติ  $\theta_s$  เป็นสแต็ปย่อย และ n คือ จำนวนจริง 1,2,3,.....การแสอ้างอิง  $(i)_k$  สำหรับแต่ละ n จะคำนวณได้จากสมการที่ (5.2) และ (5.3) โดยแรงบิดที่จุดดีเทนท์ที่ต้องการมีค่าเท่ากับศูนย์ โดยที่ K คือ จำนวนเฟสของมอเตอร์ภายใต้เงื่อนไข ต่อไปนี้

1. คุณสมบัติของแรงบิดที่เกิดขึ้นของมอเตอร์ที่ใช้ อันเนื่องมาจากผลรวมของกระแสเมื่อทำงานในโหมดไมโครสแต็ปจะมีค่าคงเดิม
2. ผลรวมของ Motor dissipation จะต้องไม่เกินพิกัดของมอเตอร์
3. ขนาดของไมโครสแต็ปทุกสแต็ปจะต้องเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเงื่อนไขที่ 3 มีลักษณะเชิงเส้นทุกๆตำแหน่งของโรเตอร์และเงื่อนไขที่ 2 สามารถแทนได้ด้วยสมการในรูปสามเหลี่ยม(Triangle) และซายน์(Sinusoids) จึงจะสามารถหาค่าได้ดังนี้

**5.2.1.1 การคำนวณหากระแสอ้างอิงโดยการประมาณคุณลักษณะของกราฟ T- $\theta$  ในลักษณะเชิงเส้น (Linear Approximation to T- $\theta$  Characteristics)** ในการประมาณกราฟคุณลักษณะของ T- $\theta$  ในลักษณะเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 5.4 ลักษณะเคิร์ฟสามารถหาค่า T ได้จาก

$$T_1 = -K_1 I_1 \theta \quad (5.10)$$

$$T_2 = -K_2 I_2 \theta + K_0 I_2 \quad (5.11)$$

เมื่อ

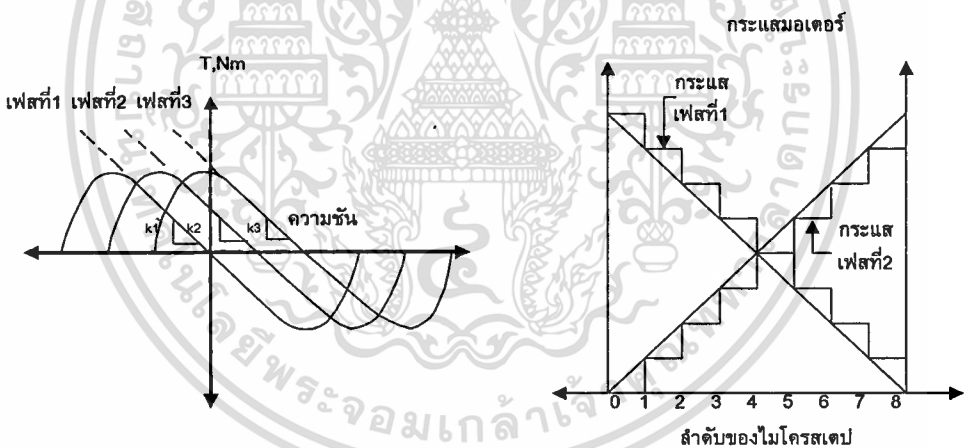
$I_1$  คือกระแสของขดลวดเฟสที่ 1

$I_2$  คือกระแสของขดลวดเฟสที่ 2

$K_1$  คือแรงบิดคงที่ของขดลวดเฟสที่ 1

$K_0, K_2$  คือแรงบิดคงที่ของขดลวดเฟสที่ 2

$\theta$  คือ ตำแหน่งไมโครสเตปที่ต้องการ



**รูปที่ 5.3** การประมาณค่ากระแสจากเคิร์ฟ T- $\theta$  ด้วยสมการเชิงเส้น

**รูปที่ 5.4** กระแสที่ได้จากการประมาณเคิร์ฟ T- $\theta$  ด้วยสมการเชิงเส้น

$T_2, T_1$  คือ แรงบิดที่เกิดขึ้นจากกระแสของเฟสที่ 1 และ เฟสที่ 2 ซึ่งภายใต้เงื่อนไข ผลรวมของ

$$T_2 + T_1 = 0 \quad (5.12)$$

รวมสมการที่ (6.10),(6.11),(6.12) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\theta = \frac{K_0 I_2}{K_1 I_1 + K_2 I_2} \quad (5.13)$$

ถ้าการประมาณให้เคอร์ฟคุณลักษณะของแต่ละเฟสมีค่าเท่ากันแล้ว  $K_1 = K_2$  และความชันของเคอร์ฟ T- $\theta$  ของมอเตอร์ที่ตำแหน่งใหม่จะเท่ากับเคอร์ฟ T- $\theta$  เดิม นั่นคือ

$$\frac{d(T_1 + T_2)}{d\theta} = -K_1 = -K_2 = -K \quad (5.8)$$

และสมการที่ (5.14) จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อ

$$I_2 + I_1 = 1 \quad (5.15)$$

ดังนั้นจะได้

$$\theta = \frac{K_0 I_2}{K} \quad (5.16)$$

$$I_2 = 1 - \frac{\theta}{S} \quad (5.17)$$

แสดงให้เห็นว่าในกรณีนี้กระแสในเฟสที่ 1 จะลดลงในลักษณะของสเตปที่เป็นช่วงๆ (Discret Step) ในขณะที่กระแสในขดลวดของเฟสที่ 2 จะเพิ่มขึ้นในขนาดสเตปที่เท่ากันแสดงดังรูปที่ 5.4

**5.2.1.2 การคำนวณหาค่ากระแสอ้างอิงโดยการประมาณกราฟคุณลักษณะของมอเตอร์ด้วยค่า Sine (Sine approximation to T- $\theta$  Characteristics)** จากรูปที่ 5.3 สามารถที่จะประมาณ เคอร์ฟ T- $\theta$  ได้ด้วยค่าซายน์ ได้ดังนี้

$$T_1 = -T_0 I_1 \sin\theta \quad (5.5)$$

$$T_2 = T_0 I_2 \sin(\theta + \theta_s) \quad (5.6)$$

เมื่อ  $T_1 + T_2 = 0$  ที่จุดดีเทนท์ และ

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\tan\theta}{\tan\theta \cos\theta_s + \sin\theta_s} \quad (5.7)$$

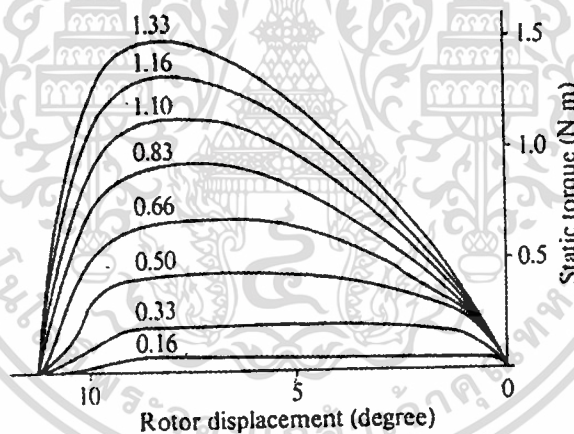
เพื่อที่จะคงคุณลักษณะของเคอร์ฟ T- $\theta$  เมื่อทำงานในโหมดไม่โครสเตป จึงกำหนดให้แรงบิดที่ตำแหน่งใดๆ รวมกันเท่ากับ  $T_1$  หรือ  $T_2$  ดังนั้นจะได้

$$T_0 T_2 \sin(\theta + \theta_s) - T_0 T_1 \sin\theta = T_0 \sin(\theta_s)/m \quad (5.8)$$

เมื่อ  $\theta' = \theta - \theta_s/m; m = 1, 2, 3, \dots$  เมื่อนำสมการที่ (5.7) และ (5.8) มารวมกันเพื่อหาค่า  $I_1$  จะได้

$$I_1 = \frac{\frac{\sin \frac{\theta}{m}}{\tan \theta}}{\frac{\sin(\theta + \frac{\theta}{m}) - \sin \theta}{\tan \theta \cos \frac{\theta}{m} + \sin \frac{\theta}{m}}} M \quad (5.9)$$

จากสมการที่ (5.14) และ (15) สามารถที่จะหา  $I_1$  และ  $I_2$  ทุกๆตำแหน่งดีเทนท์ที่ต้องการได้ เมื่อได้ค่ากระแสอ้างอิงที่คำนวณได้เหล่านี้แล้ว จากนั้นจะถูกแปลงเป็นค่าทางเชิงตัวเลขและเก็บไว้ในหน่วยความจำซึ่งอยู่บนคอมพิวเตอร์และส่งค่าที่ได้ออกไปยังวงจรรีบและความคุมกระแสต่อไป และในรูปที่ 5.5 เป็นกราฟคุณลักษณะที่เกิดขึ้นจริงในหนึ่งเฟสของสเตปป์มอเตอร์



รูปที่ 5.5 กราฟคุณลักษณะ T- $\theta$  ที่เกิดขึ้นจริงสำหรับหนึ่งเฟส

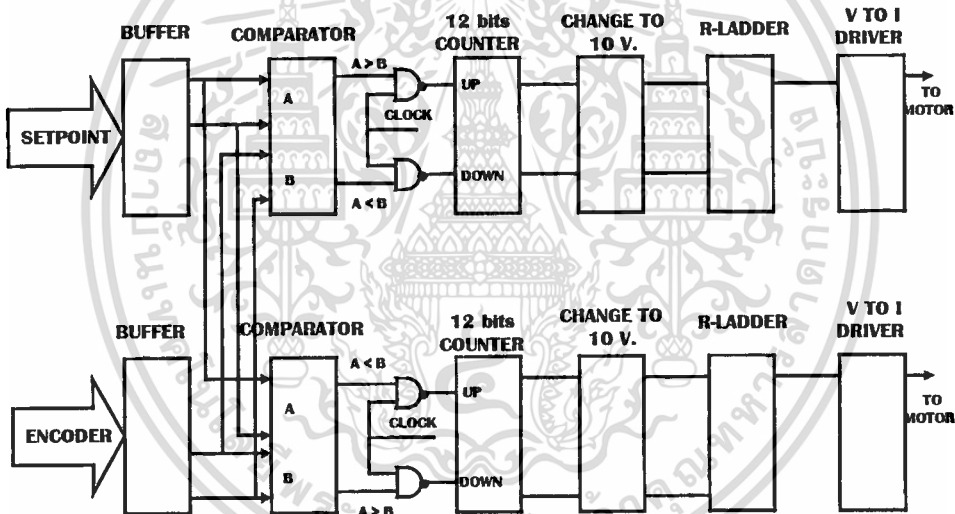
### 5.3 การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบปิดในโหมดไมโครสเตปการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง

สำหรับวงจรถ่ายงานจริงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ทำการออกแบบและพัฒนาจนกระทั่งได้วงจรถ่ายทดลองออกมาแล้วได้ผลตามวัตถุประสงค์ ซึ่งวงจรถ่ายที่ใช้ในระบบปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง ประกอบด้วยหลายส่วนด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.7 การทำงานของบล็อกลำโพงจากตำแหน่งไมโครสเตปที่ต้องการถูกกำหนดไว้ในโปรแกรม ซึ่งเป็นจำนวนพัลส์ต่อไมโครสเตป จากนั้นจะส่งค่าเหล่านี้ผ่านทางพอร์ตของการ์ดอินเตอร์เฟสขนาด 16 บิตออกไปยังวงจรถ่ายเปรียบเทียบ เป็นตำแหน่งอ้างอิงจากนั้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรเปรียบเทียบจะทำการอ่านค่าจากตำแหน่งเอนโค้ดเดอร์ ซึ่งได้ค่ามาจากวงจรมอเตอร์ตำแหน่งพัลส์จากเอนโค้ดเดอร์ ซึ่งขณะเริ่มต้นหรือเป็นค่าเซ็ทพอยท์แรกจะพบว่าตำแหน่งที่เอนโค้ดเดอร์มีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นวงจรเปรียบเทียบจะสั่งให้วงจรมอเตอร์ปล่อยสัญญาณให้กับวงจรมอเตอร์ให้กับวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก ขนาด 12 บิต โดยให้เฟสที่ 1 มีค่ากระแสเต็มพิค และเฟสที่ต้องการให้หมุนตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกา จะถูกเลือกจากตัวโปรแกรมไว้แล้ว ซึ่งเฟสนี้จะมีค่าเริ่มต้นที่ให้กระแสเป็น 0 จากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มค่าขึ้นไป และในขณะเดียวกัน เฟสที่ 1 จะลดค่าลงเรื่อยๆ เช่นกัน ซึ่งอัตราการลดหรือเพิ่มจะเป็นค่าเดียวกัน ในขณะเดียวกันวงจรเปรียบเทียบจะทำการอ่านค่าจากเอนโค้ดเดอร์มาเปรียบเทียบจนกว่าตำแหน่งที่แกนของโรเตอร์เท่ากับตำแหน่งไมโครสแตปที่ต้องการ

### 5.3.1 วงจรประกอบการทำงาน

จากรูปที่ 5.6 เป็นแผนผังการทำงานของในส่วนวงจรภายนอกคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกระแสให้กับวงจรมอเตอร์ของสองเฟสในสเตปป์มอเตอร์ ส่วนในรายละเอียดของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้อธิบายในหัวข้อต่อไป



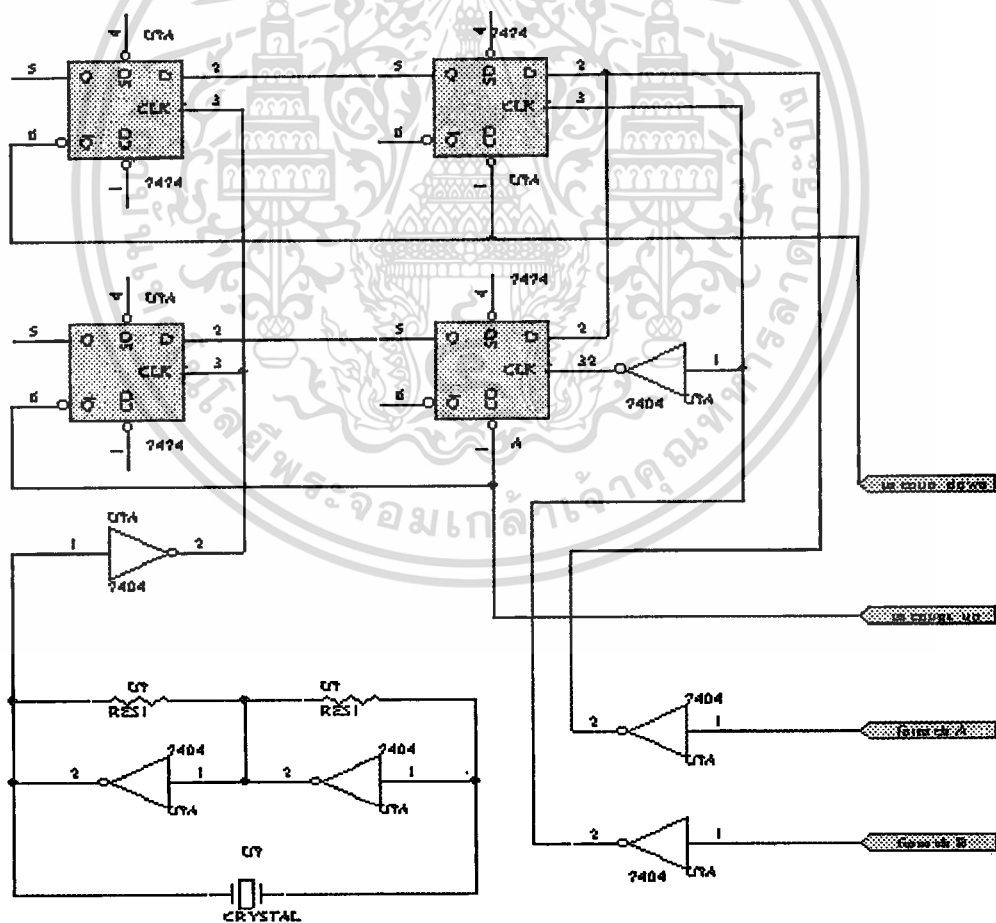
รูปที่ 5.6 แผนผังควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบปิดในโหมดไมโครสแตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง

ระบบโดยรวมประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ที่มีการอินเตอร์เฟสภายใน ซึ่งได้ต่อขยายพอร์ตออกมามีขนาด 16 บิต ซึ่งพอร์ตเสมือนพอร์ตข้อมูล (data port) รับข้อมูลจากโปรแกรมภาษาซีจากตัวเลขเป็นดิจิทัลส่งเข้าวงจรเปรียบเทียบขนาด 16 บิต ซึ่งวงจรเปรียบเทียบจะทำการเปรียบเทียบค่าที่ส่งผ่านมาจากคอมพิวเตอร์ กับค่าที่อ่านได้จากตัววัดตำแหน่งคือออปติคัลเอนโค้ดเดอร์ ซึ่งแปลงค่าจำนวนพัลส์ที่ได้จากการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ด้วยวงจรมอเตอร์ขนาด 16 บิต เมื่อผลการเปรียบเทียบจะได้เป็นค่าผิดพลาดที่วงจรมอเตอร์ต้องชดเชย ดังนั้นการชดเชยทำได้จากวงจรมอเตอร์ที่สามารถปรับค่าความถี่ได้ตามความต้องการของการเคลื่อนที่ของแกนโรเตอร์ นั่นคือเป็นการเพิ่มหรือลดค่าดิจิทัลไปอนาลอกของวงจรมอเตอร์ให้มีค่าเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็วเมื่อความถี่ของสัญญาณนาฬิกาสูงและเปลี่ยนแปลงช้าเมื่อสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่ต่ำ ซึ่ง

ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่นี้สามารถปรับได้ตามการเปลี่ยนแปลงมอเตอร์ เช่น ถ้าในกรณีขับโหลด และไม่ขับโหลดความถี่ของสัญญาณนาฬิกาจะไม่เท่ากันและสำหรับสเตปป์มอเตอร์ในแต่ละตัวจะใช้ความถี่ต่างกันด้วยเช่นกัน และสำหรับวงจรมีขนาด 12 บิต ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวส่งค่าดิจิตอลเข้าสู่วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลไปเป็นสัญญาณอนาลอก เพื่อให้ขอลวดทั้งสองเฟสที่ต้องการลดค่ากระแสให้เป็นส่วนหนึ่ง และขดลวดของเฟสที่ต้องการเพิ่มค่ากระแสให้เป็นวงจรม้วนขึ้น เมื่อได้ค่าสัญญาณเป็นอนาลอกจะถูกส่งเข้าวงจรขับที่เรียกว่า วงจรโวลท์เทจควบคุมกระแส (voltage control current) ของทั้งสองเฟสของมอเตอร์ วงจรขับทำหน้าที่จ่ายกระแสตามที่ขดลวดต้องการตามค่า ดิจิตอลเป็นอนาลอก เพื่อบังคับการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ให้มีขนาดไมโครสเตปที่มีขนาดเท่ากันตามค่าตำแหน่งเซ็ทพอยท์ ซึ่งถูกแบ่งเป็นเท่าของสเตปปกติ

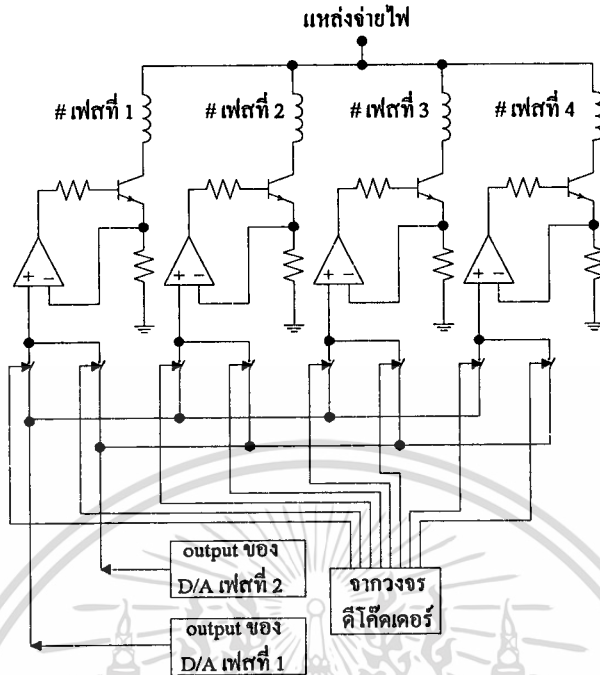
**5.3.1.1 วงจรตรวจจับทิศทางการเคลื่อนที่** การตรวจจับทิศทางการเคลื่อนที่ของออปติคัลเอนโค้ดเดอร์ เป็นวงจรดิจิตอลที่ประกอบไปด้วย IC ตระกูล TTL เบอร์ 7474 จำนวน 2 ตัว ซึ่งภายในเป็นวงจรมัลติฟลิป-ฟล็อป ทำหน้าที่ตรวจจับทิศทางการหมุนเพื่อให้วงจรมีสัญญาณทำการนับสัญญาณพัลส์ที่ได้จาก ออปติคัลเอนโค้ดเดอร์ตามทิศทางการหมุนของมอเตอร์



**รูปที่ 5.7** วงจรตรวจจับทิศทางการหมุนด้วยออปติคัลเอนโค้ดเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.1.2 วงจรจ่ายกระแสให้กับขดลวดของสเตปป์มอเตอร์

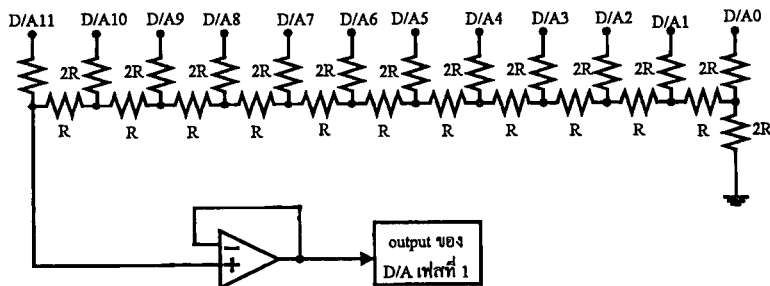


รูปที่ 5.8 วงจรขับสเตปป์มอเตอร์

จากรูปที่ 5.8 ทำหน้าที่รับค่าแรงดันที่จะได้จากวงจรแปลงค่าดิจิตอลเป็นอนาลอก ผ่านวงจรเลือกเฟสการทำงาน เพื่อบังคับการขับให้ได้ทิศทางหมุนตามความต้องการของโปรแกรมทำให้ขา non-inverting มีศักดาเป็นบวก ซึ่งเมื่อเทียบกับขา inverting ซึ่งเป็นแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน ซึ่งทำหน้าที่ตรวจจับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดของมอเตอร์ ถ้ากระแสที่ไหลผ่านมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าความต้องการหรือทำให้ตำแหน่งของแกนเคลื่อนที่ตามค่ากระแสที่เกิดจากการขับของทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่เป็นลิวสวิชต์

### 5.3.1.3 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาลอก โดยใช้หลักการ R-2R Radder

วงจรในส่วนนี้ทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่ได้จากวงจรมับซึ่งเป็นการนับสัญญาณนาฬิกาที่ปรับความถี่ได้ เพื่อเป็นการเพิ่มแรงดันให้กับอินพุทของวงจรมับ เป็นการบังคับจ่ายกระแสให้ขดลวดของทรานซิสเตอร์ต่อไป

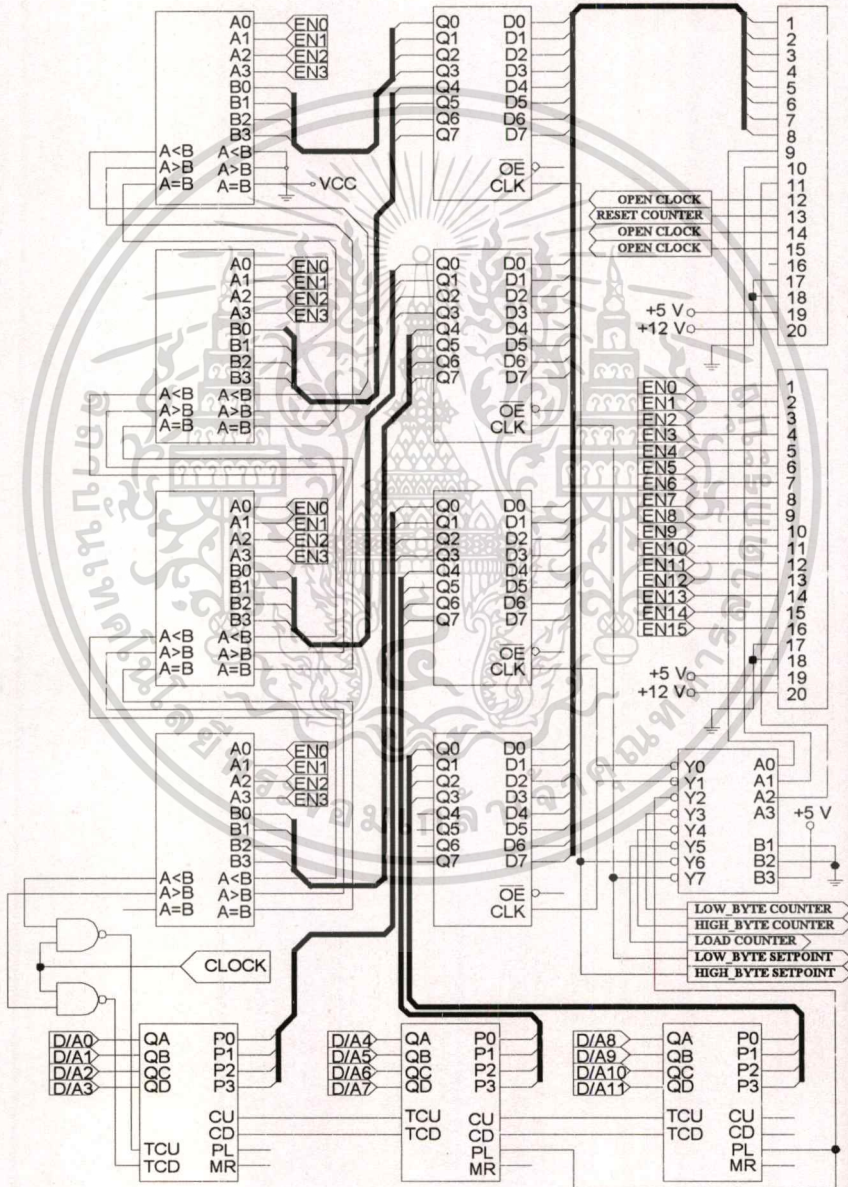


รูปที่ 5.9 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.1.4 วงจรเปรียบเทียบค่าอ้างอิงตำแหน่งไมโครสเตปกับค่าการเคลื่อนที่ของแกนมอเตอร์

จากรูปที่ 5.11 เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่รับค่าตำแหน่งอ้างอิงจากโปรแกรมผ่านทางพอร์ทขนานขนาด 16 บิต และอ่านค่าตำแหน่งแกนโรเตอร์จากวงจรนับพัลส์ของตัวออปติคัลเอนโค้ดเดอร์ มาเปรียบเทียบซึ่งเป็นการเปรียบเทียบพร้อมกัน 4 บิตแรก และส่งผลไปยัง 4 บิตต่อไปเรื่อยๆ ซึ่งผลการเปรียบเทียบสุดท้ายจะถูกส่งออกไปยังวงจรปล่อยสัญญาณนาฬิกาให้วงจรนับและเป็นการสัญญาณดิจิทัลไปเป็นสัญญาณนาฬิกาซึ่งได้แสดงในหัวข้อที่ผ่านมาแล้ว และส่งต่อไปยังขั้วสเตปปีงมอเตอร์เพื่อป้องกันการหมุนของแกนโรเตอร์



รูปที่ 5.10 วงจรการเปรียบเทียบค่าอ้างอิงและค่าการเคลื่อนที่จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการทดลอง สรุป และข้อเสนอแนะ

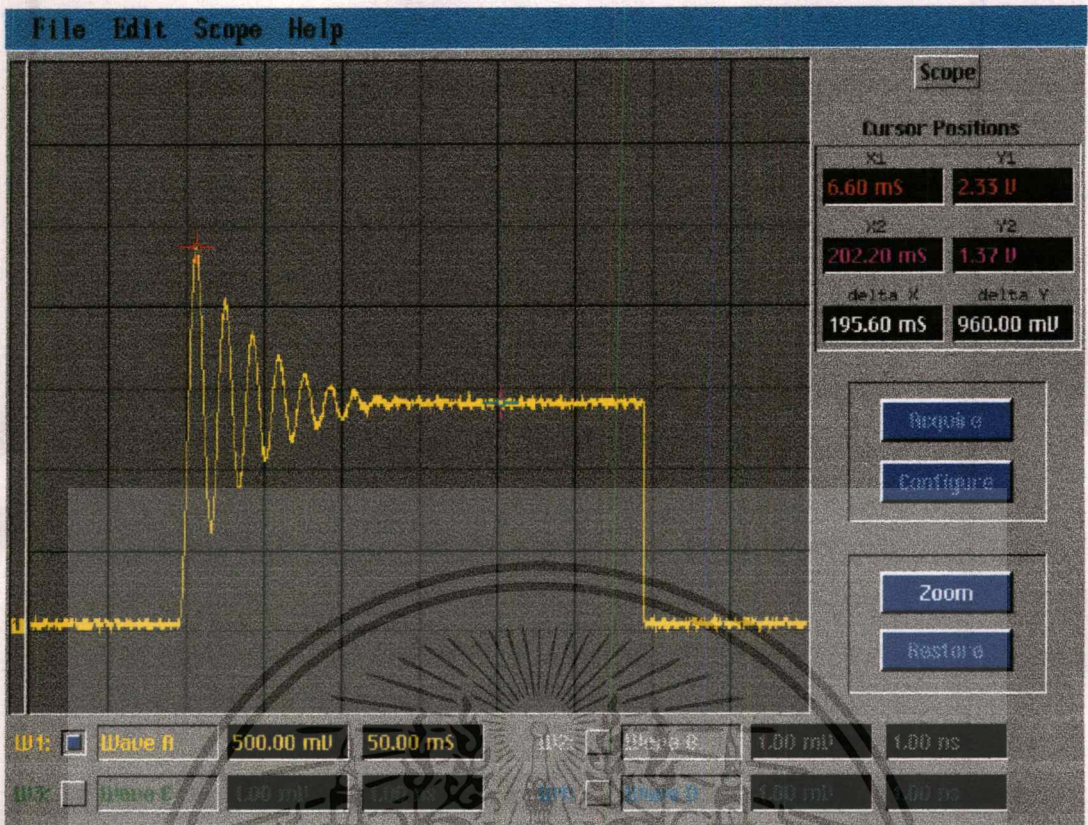
### 6.1 บทนำ

จากการทดลอง ได้แบ่งทำการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ในส่วนที่หนึ่งเป็นการทดลองสำหรับการควบคุมสแต็ปมอเตอร์ระบบเปิด (Open-loop) ซึ่งจะแบ่งลักษณะการเคลื่อนที่ออกเป็น 2 ลักษณะคือ แบบสเต็ปปกติ (Single step) และให้เคลื่อนที่เป็นไมโครสเต็ป (Microstep) โดยให้กระแสอินพุทของเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 เพิ่มขึ้นและลดลงในลักษณะสัญญาณไซน์ (Sine) และลักษณะสัญญาณลิเนียร์ (Linear) หรือเป็นลักษณะสัดส่วนกัน (proportional) ในส่วนที่สองเป็นการทดลองการควบคุมสแต็ปมอเตอร์แบบวงปิด (Closed-loop) ในการควบคุมแบบระบบปิดนี้ใช้หลักการควบคุมกระแสอินพุทของทั้งสองเฟสให้เป็นสัดส่วนกันตามการเคลื่อนที่จริงของแกนโรเตอร์ ซึ่งแกนของโรเตอร์ต้องเคลื่อนที่เป็นไมโครสเต็ปและขนาดของไมโครสเต็ปต้องมีขนาดเท่ากันทุกๆไมโครสเต็ปพบว่าสามารถควบคุมให้สแต็ปมิ่งมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลักแตนซ์ได้ที่มีขนาดสเต็ป ปกติ 15 องศา เมื่อขับแบบหนึ่งเฟสให้มีขนาดสเต็ปย่อยได้สูงสุดตามความสามารถในการวัดของออปติคัล เอนโคเดอร์วัดได้ คือ 372 พัลส์ต่อสเต็ปปกติ เมื่อออปติคัลเอนโคเดอร์มีความละเอียด 10,000 พัลส์ต่อ 360 องศา โดยสามารถควบคุมให้การตอบสนองของโรเตอร์มีขนาดไมโครสเต็ปทุกตำแหน่งไมโครสเต็ปมีค่าเท่ากัน เมื่อควบคุมกระแสทั้งสองเฟสให้จ่ายกระแสตามความต้องการในการเคลื่อนที่จริง ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อวัดสัญญาณกระแสของทั้งสองจะมีลักษณะคล้ายๆสัญญาณรูปคลื่นไซน์ทั้งสองเฟสทำให้สามารถควบคุมให้สแต็ปมอเตอร์ตอบสนองเป็นไมโครสเต็ปที่มีขนาดเท่ากันได้ และได้ทำการทดลองขับโหลดระบบสามารถควบคุมให้โรเตอร์เคลื่อนที่เป็นไมโครสเต็ปเท่ากันได้เช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองแบบระบบปิดกับระบบเปิด จะเห็นว่าการควบคุมสแต็ปมิ่งมอเตอร์แบบระบบปิดด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงมีประสิทธิภาพดีกว่าอย่างมาก ซึ่งได้แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบระบบเปิดในรูปที่ 6.1 ถึง 6.43

### 6.2 ผลการทดลอง

#### 6.2.1 การควบคุมแบบระบบวงเปิด

ในการทดลองสำหรับการควบคุมสแต็ปมิ่งมอเตอร์แบบระบบเปิดซึ่งได้คำนวณค่ากระแสอ้างอิงสำหรับตำแหน่งไมโครสเต็ป ด้วยการประมาณค่าคุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์ในรูปของสัญญาณกระแสของเฟสที่ 1 และเฟสที่เป็นแบบสัญญาณสัดส่วนกันโดยมีสโลปหรือความชันในการเพิ่มขึ้นและลดลงของกระแสเท่ากัน จะเห็นว่าการตอบสนองของโรเตอร์ไม่สามารถทำให้ขนาดของไมโครสเต็ป ที่เคลื่อนที่ไปมีค่าเท่ากันทุกตำแหน่งได้ แสดงในรูปที่ 6.1 เป็นการตอบสนองแบบสเต็ปปกติ 1 สเต็ป

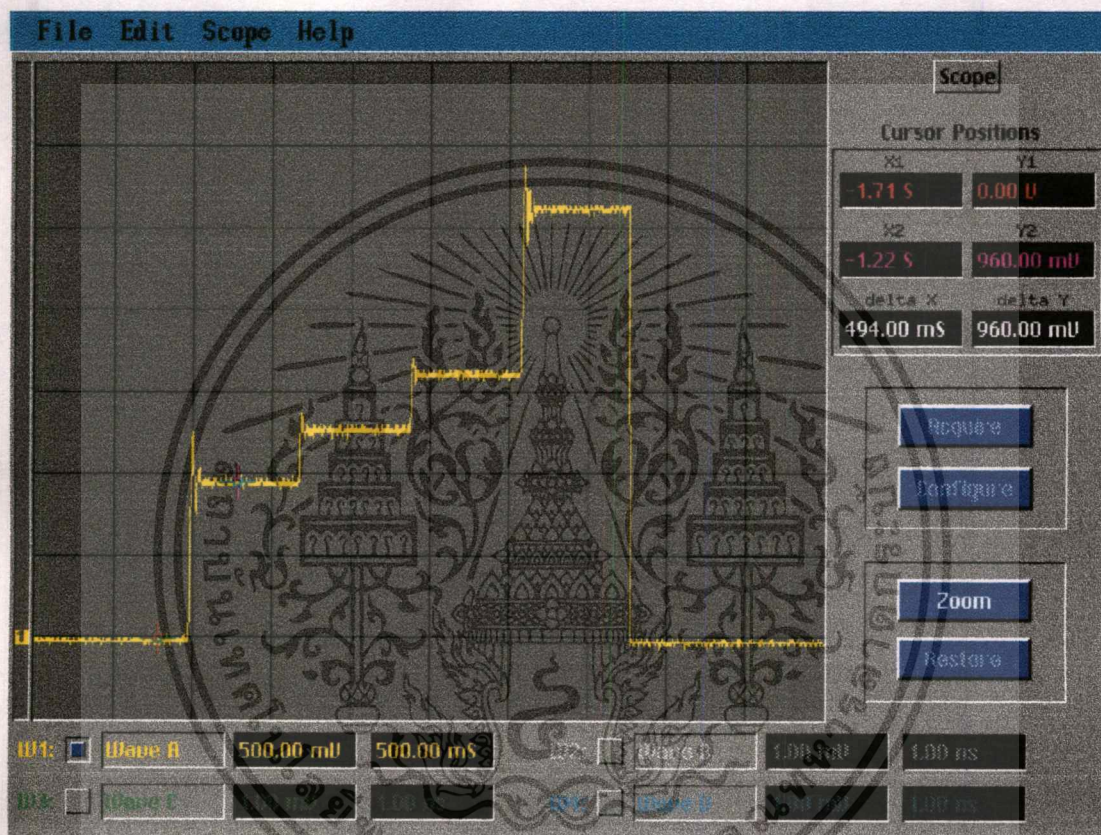


รูปที่ 6.1 ผลการตอบสนองของมอเตอร์แบบ single step กระตุ้นแบบสองเฟสขนาด 15 องศา

### 6.2.1.1 ผลการควบคุมสเตรปมอเตอรืแบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตป โดยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบสัญญาณลิเนียร์

เมื่อป้อนสัญญาณควบคุมการจ่ายกระแสให้สเตปมอเตอร์ในลักษณะรูปคลื่นชานท์ สำหรับระบบเปิดแล้วการตอบสนองของโรเตอร์ไม่สามารถควบคุมให้การเคลื่อนที่เป็นไมโครสเตปที่มีขนาดเท่ากันทุกตำแหน่งไมโครสเตปได้ จึงได้ทดลองให้กระแสอ้างอิงในลักษณะสัญญาณสัดส่วนหรือแบบลิเนียร์เพื่อดูผลการตอบสนองของโรเตอร์ ดังได้แสดงผลการทดลองอยู่ในรูป ซึ่งจะแบ่งออกเป็นสเตปย่อยของสเตปปกติ ตั้งแต่ 4 ไมโครสเตปต่อสเตปปกติ ถึง 372 ไมโครสเตปต่อสเตปปกติ ซึ่งเป็นความละเอียดสูงที่สามารถทำได้ เนื่องจากความสามารถของตัววัดการเคลื่อนที่สามารถทำได้ สำหรับการเคลื่อนที่ 372 สเตปย่อยต่อสเตปปกตินี้ เป็นการเคลื่อนที่ไปไมโครสเตปละ 1 พัลส์ หรือเท่ากับ 0.036 องศาต่อไมโครสเตป

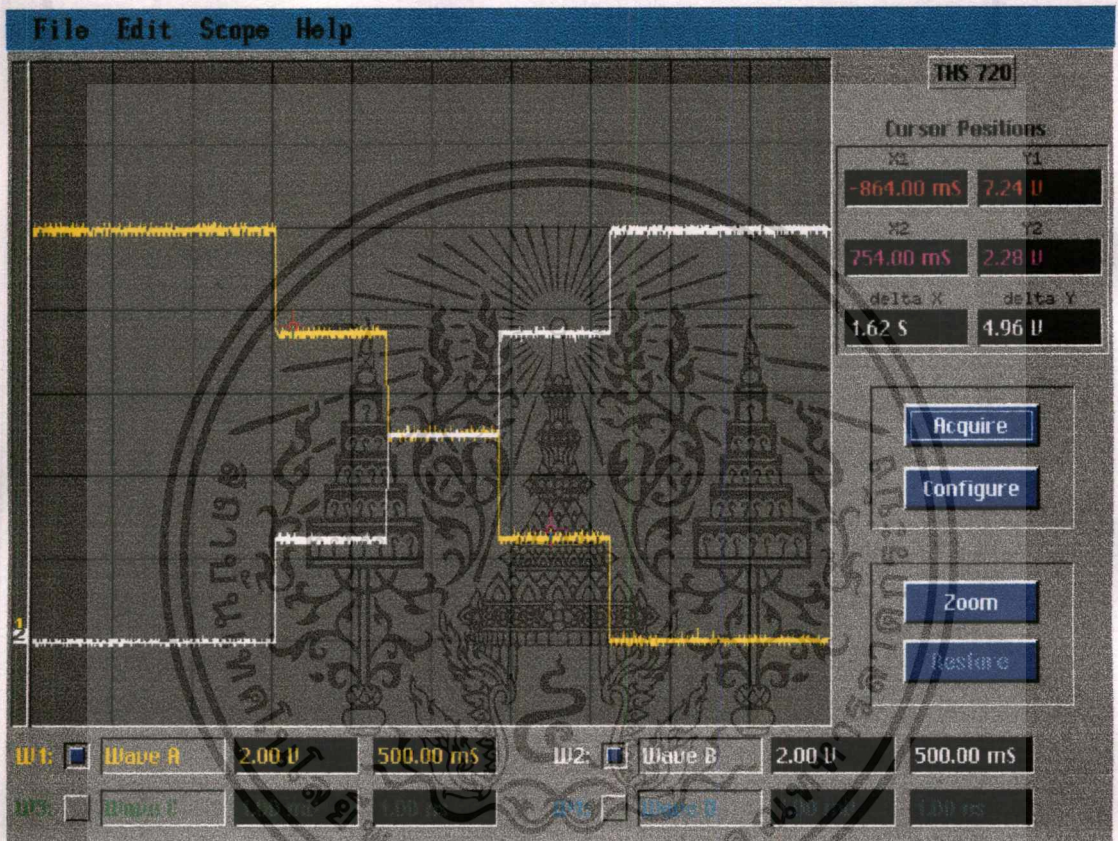
6.2.1.1.1 ผลการควบคุมสเตรปปีงมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนท์ได้แบบระบบวงเปิดใน โหมดไมโครสเตปด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบลิเนียร์ที่ขนาด 1/4 เท่าของสเตปปกติ



รูปที่ 6.2 การเคลื่อนที่ของมอเตอร์ที่ขนาดไมโครสเตป 1/4 เท่าของสเตปปกติ

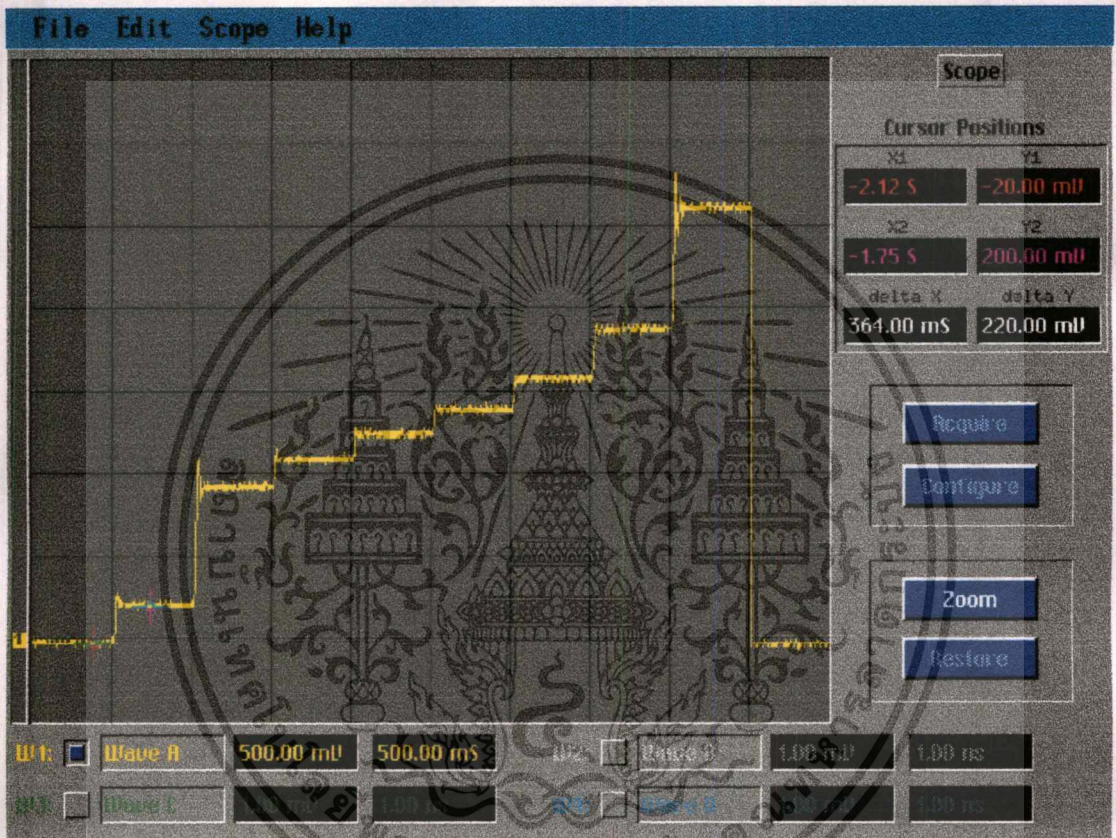
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.1.1.2 สัญญาณแรงดันอินพุทพัลส์ ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อบังคับการจ่ายกระแส  
สำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตป  
ที่ขนาดไมโครสเตป 1/4 เท่าของสเตป ปกติ



รูปที่ 6.3 สัญญาณอินพุทที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสสำหรับเฟสที่ 1 แลเฟสที่ 2 ของสเตปป์มอเตอร์

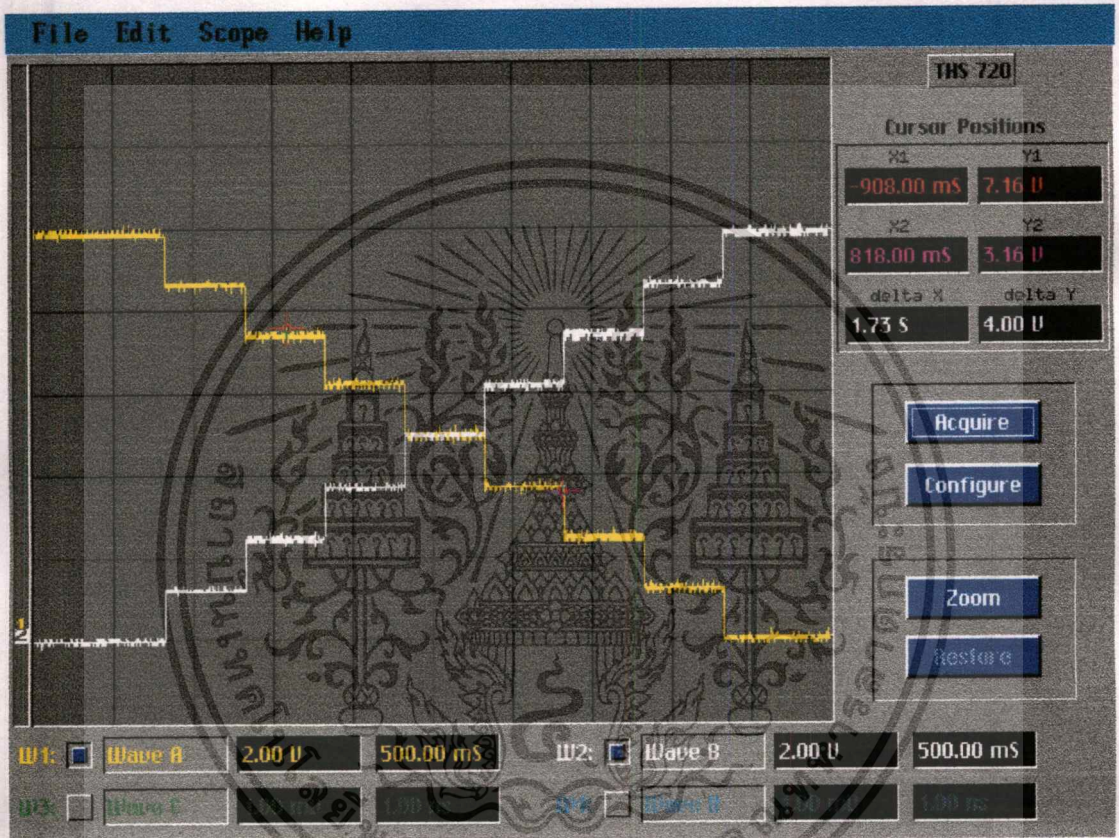
6.2.1.1.3 ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้แบบระบบวงเปิด  
ในโหมดไมโครสเตป ด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบลิเนียร์ ที่ขนาด  
1/8 เท่าของสเตปปกติ



รูปที่ 6.4 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ที่ขนาดไมโครสเตป 1/8 เท่าของสเตปปกติ

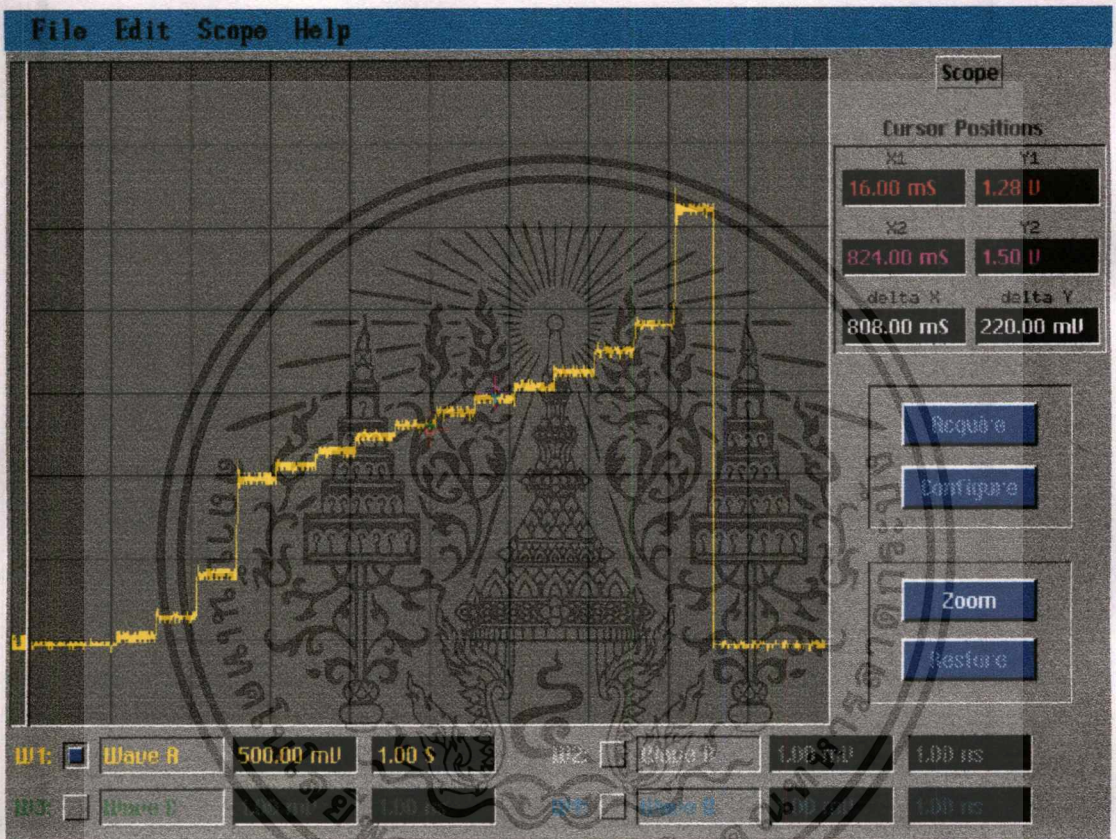
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.1.1.4 สัญญาณแรงดันอินพุทพัลส์ ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อบังคับการจ่ายกระแส  
สำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตป  
ที่ขนาดไมโครสเตป 1/8 เท่าของสเตปปกติ



รูปที่ 6.5 สัญญาณอินพุทพัลส์ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสสำหรับเฟสที่ 1 แลเฟสที่ 2 ของสเตปป์มอเตอร์

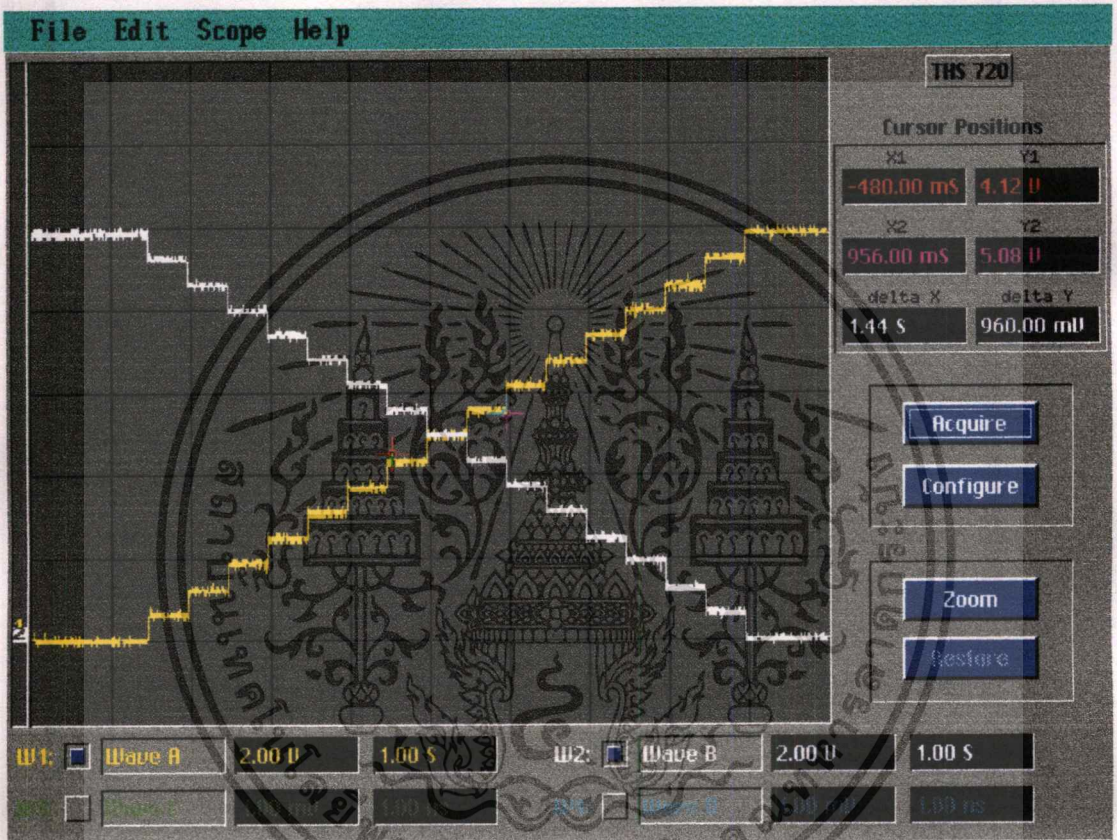
6.2.1.1.5 ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้แบบระบบวงเปิดใน โหมดไมโครสเตป ด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบลิเนียร์ ที่ขนาด 1/16 เท่าของสเตปปกติ



รูปที่ 6.6 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ที่ขนาดไมโครสเตป 1/16 เท่าของสเตปปกติ

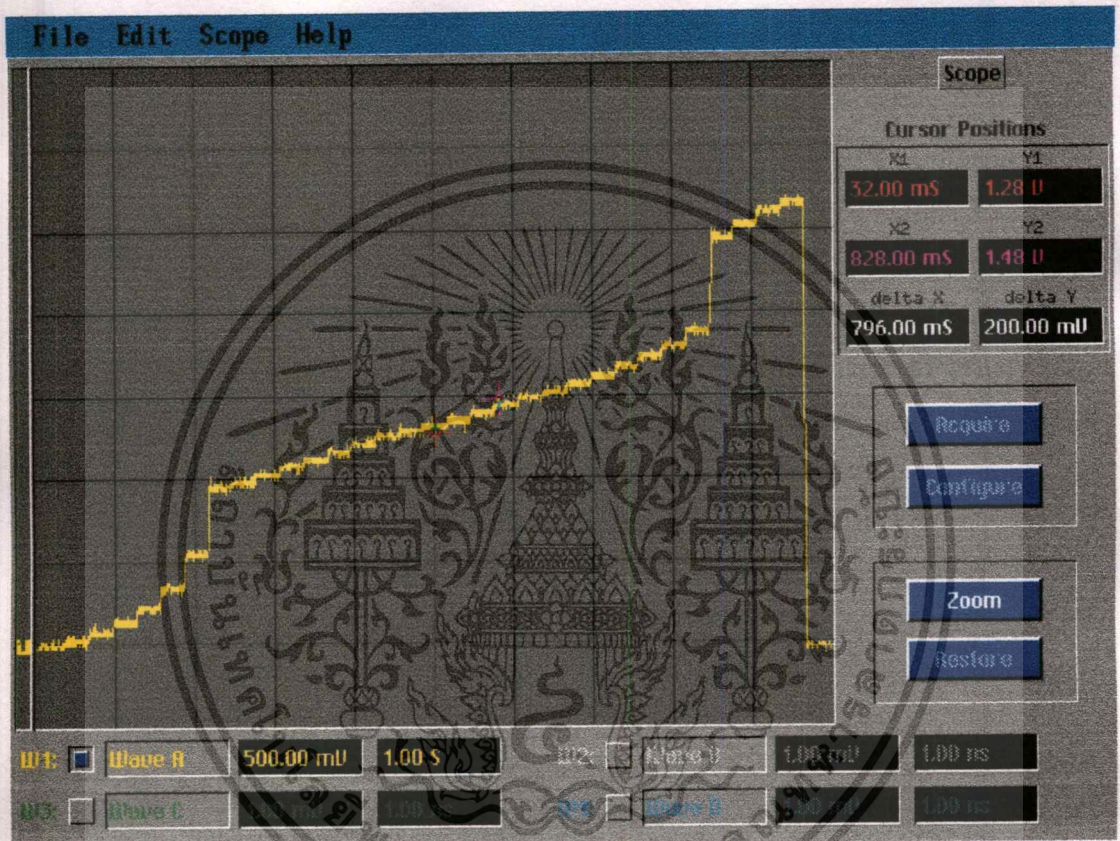
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.1.1.6 สัญญาณแรงดันอินพุทพัลส์ ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อบังคับการจ่ายกระแส สำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตป ที่ขนาดไมโครสเตป 1/16 เท่าของสเตปปกติ



รูปที่ 6.7 สัญญาณอินพุทที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสสำหรับเฟสที่ 1 แลเฟสที่ 2 ของสเตปป์มอเตอร์

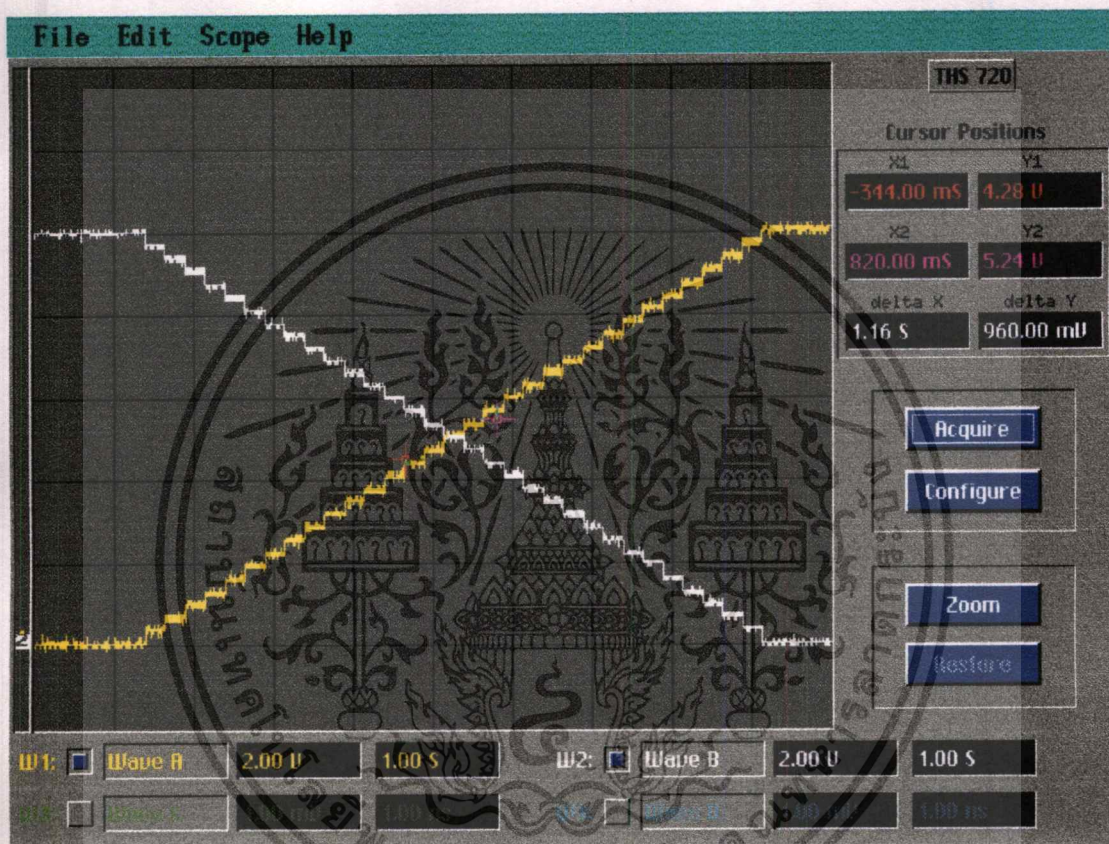
6.2.1.1.7 ผลการควบคุมสเตรปปีงมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้แบบระบบวงเปิดใน โหมดไมโครสเตป ด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบลิเนียร์ ที่ขนาด 1/32 เท่าของสเตปปกติ



รูปที่ 6.8 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ที่ขนาดไมโครสเตป 1/32 เท่าของสเตปปกติ

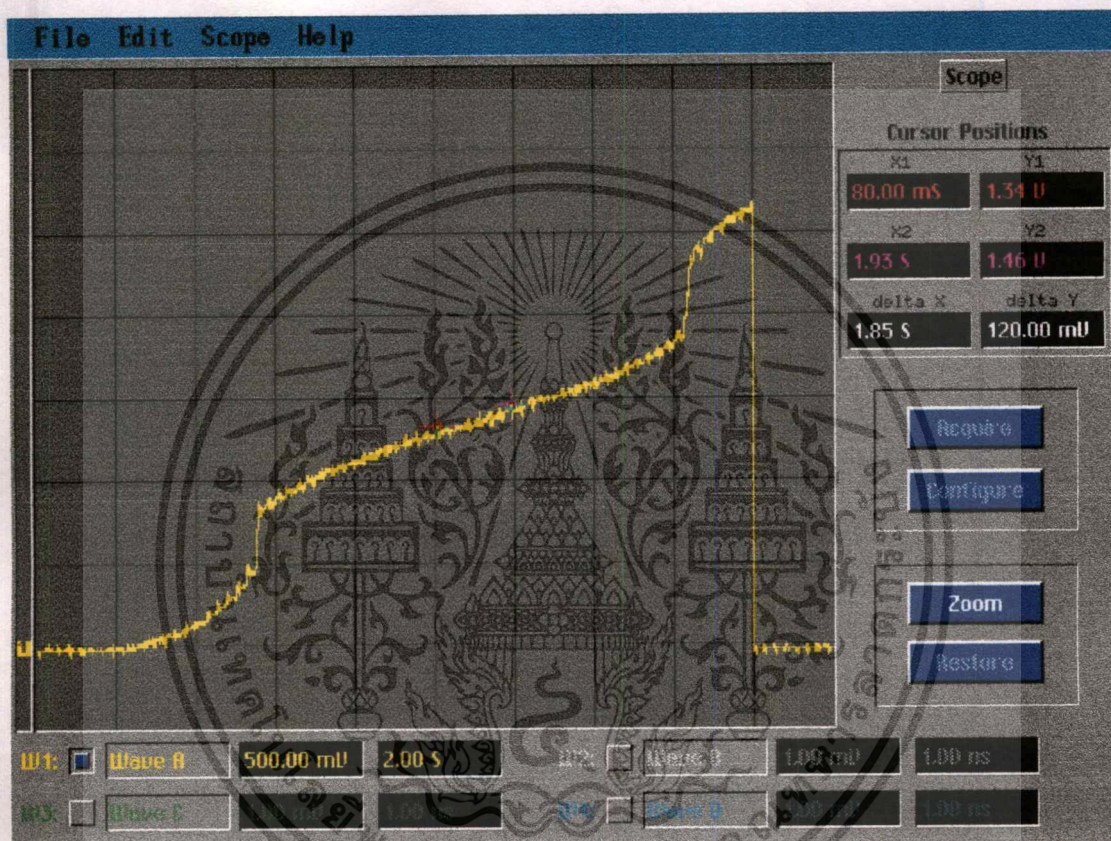
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.1.1.8 สัญญาณแรงดันอินพุทพัลส์ ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อบังคับการจ่ายกระแส สำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตป ที่ขนาดไมโครสเตป 1/32 เท่าของสเตปปกติ



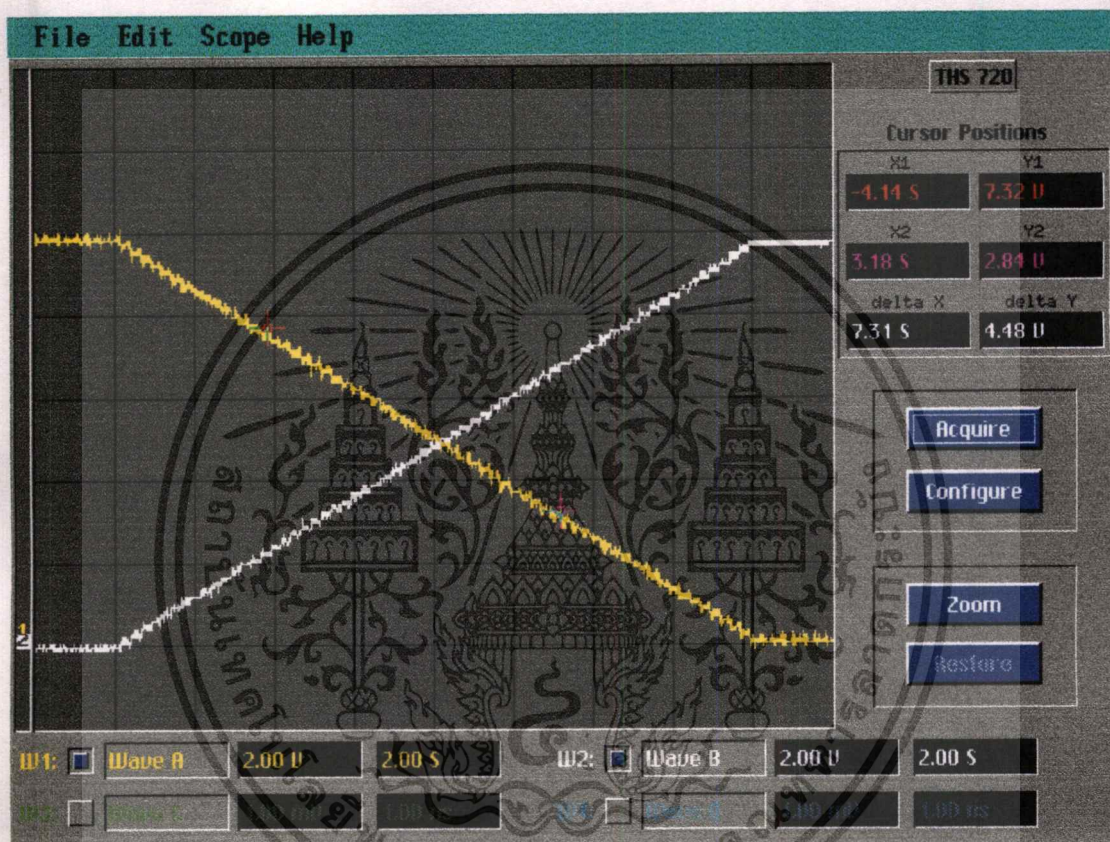
รูปที่ 6.9 สัญญาณอินพุทที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสสำหรับเฟสที่ 1 แลเฟสที่ 2 ของสเตปป์มอเตอร์

6.2.1.1.9 ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้แบบระบบวงเปิดใน โหมดไมโครสเตป ด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบลิเนียร์ ที่ขนาด 1/64 เท่าของสเตปปกติ



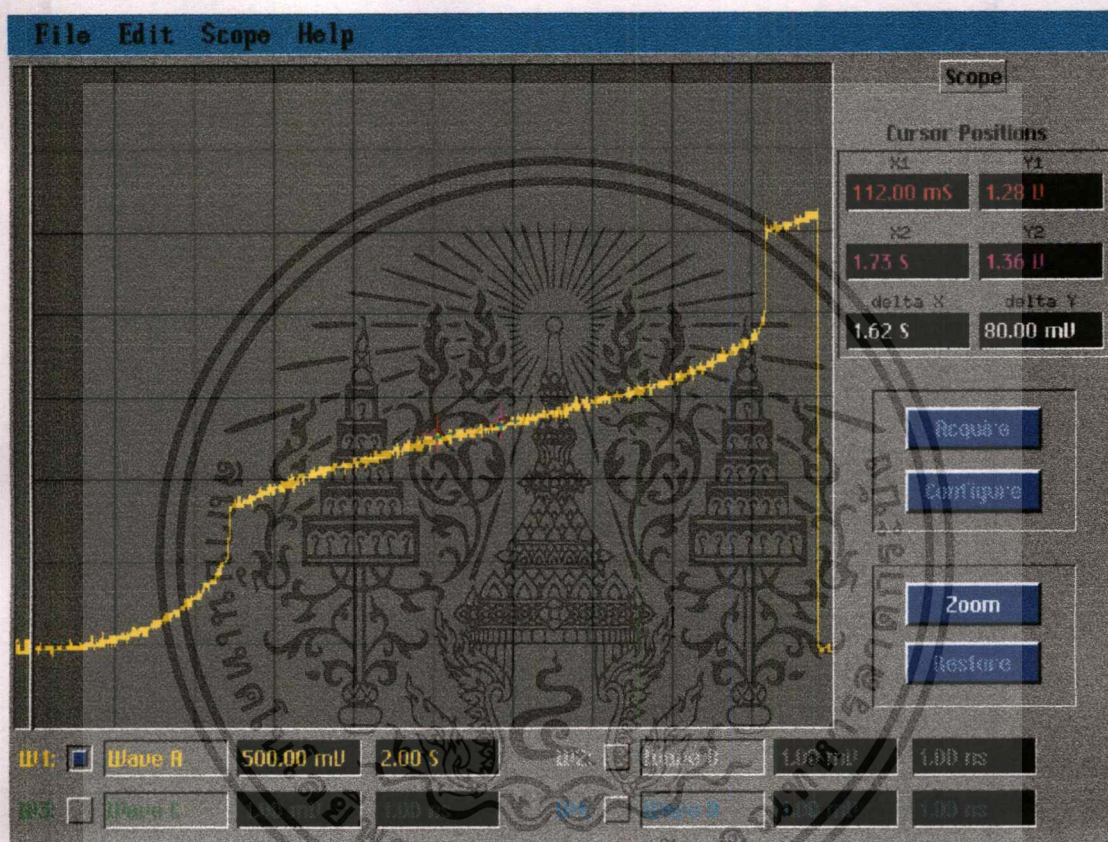
รูปที่ 6.10 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ที่ขนาดไมโครสเตป 1/64 เท่าของสเตปปกติ

6.2.1.1.10 สัญญาณแรงดันอินพุตพัลส์ ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อบังคับการจ่ายกระแส สำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตป ที่ขนาดไมโครสเตป 1/64 เท่าของสเตปปกติ



รูปที่ 6.11 สัญญาณอินพุตพัลส์ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสสำหรับเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของ สเตปป์มอเตอร์

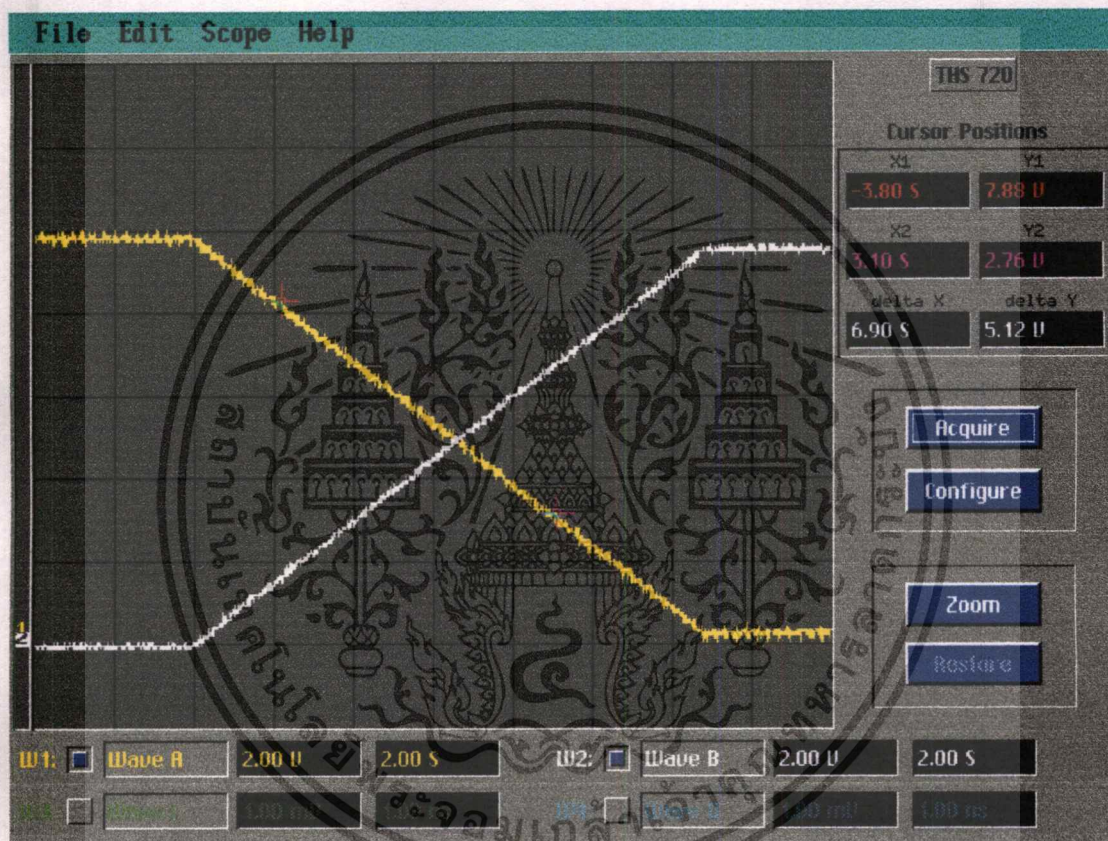
6.2.1.1.11 ผลการควบคุมสเตรปปีงมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้แบบระบบวงเปิด  
ในโหมดไมโครสเตป ด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบลิเนียร์ ที่ขนาด  
1/128 เท่าของสเตปปกติ



รูปที่ 6.12 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ที่ขนาดไมโครสเตป 1/128 เท่าของสเตปปกติ

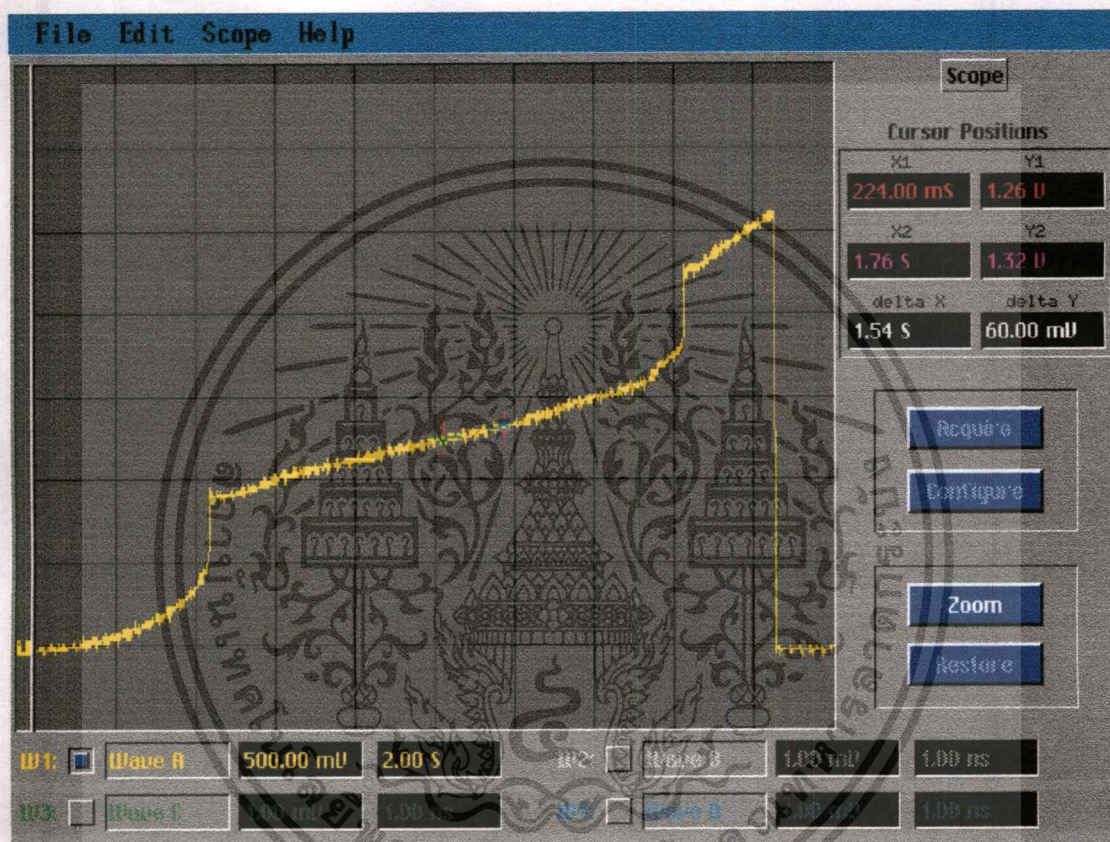
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.1.1.12 สัญญาณแรงดันอินพุทพัลส์ ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อบังคับการจ่ายกระแส สำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบเปิดในโหมดไมโครสเตป ที่ขนาดไมโครสเตป 1/128 เท่าของสเตปปกติ



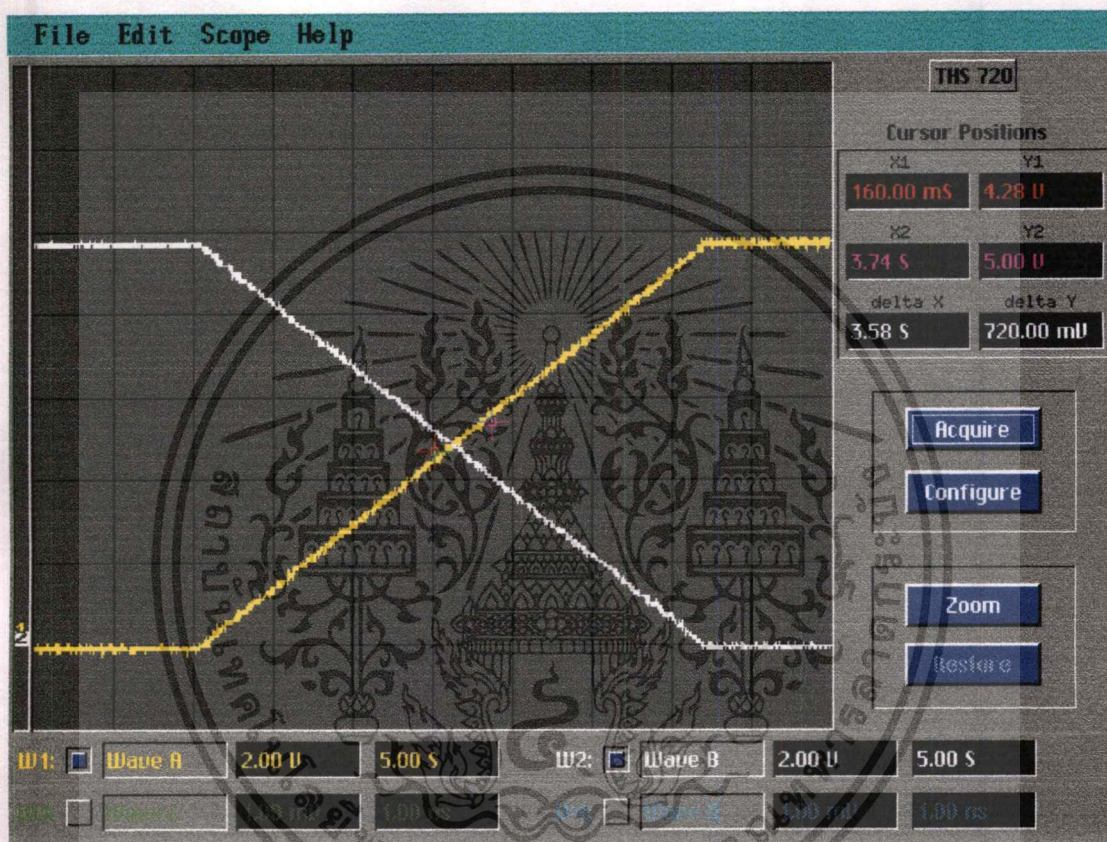
รูปที่ 6.13 สัญญาณอินพุทที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสสำหรับเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปป์มอเตอร์

6.2.1.1.13 ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้แบบระบบวงเปิด  
ในโหมดไมโครสเตป ด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบลิเนียร์ ที่  
ขนาด 1/372 เท่าของสเตปปกติ



รูปที่ 6.14 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ที่ 1/372 เท่าของสเตปปกติ

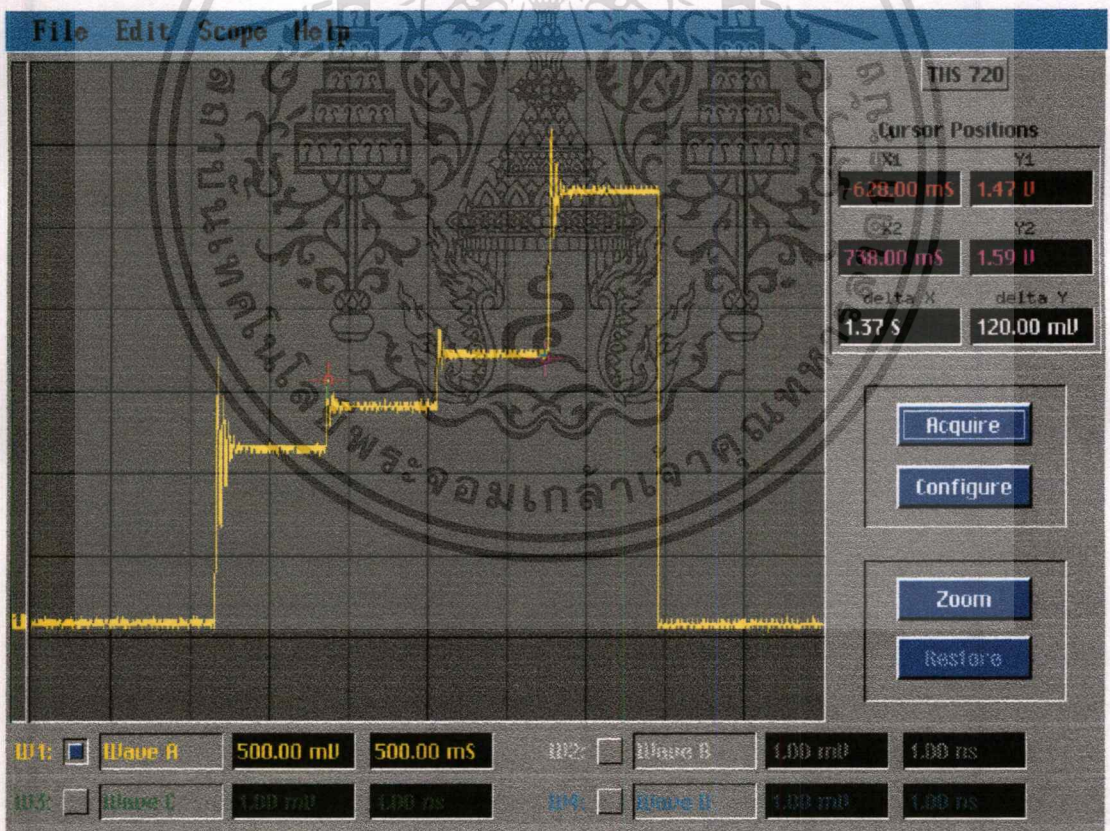
6.2.1.1.14 สัญญาณแรงดันอินพุทพัลส์ ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อบังคับการจ่ายกระแส  
สำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตป ที่  
ขนาดไมโครสเตป 1/372 เท่าของสเตปปกติ



รูปที่ 6.15 สัญญาณอินพุทที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสสำหรับเฟสที่ 1 แลเฟสที่ 2 ของสเตปป์มอเตอร์

**6.2.1.2 ผลการควบคุมแบบระบบวงเปิดด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบสัญญาณชานน์**  
เมื่อป้อนสัญญาณควบคุมการจ่ายกระแสให้สเตปมอเตอร์ในลักษณะรูปคลื่นชานน์ สำหรับระบบเปิดแล้ว การตอบสนองของโรเตอร์ไม่สามารถควบคุมให้การเคลื่อนที่เป็นไมโครสเตปที่มีขนาดเท่ากันทุกตำแหน่ง ไมโครสเตป ได้ ดังได้แสดงผลการทดลองอยู่ในรูป ซึ่งจะแบ่งออกเป็นสเตปย่อยของสเตปปกติตั้งแต่ 4 ไมโครสเตปต่อสเตปปกติ ถึง 372 ไมโครสเตปต่อสเตปปกติ ซึ่งเป็นความละเอียดสูงที่สามารถทำได้ เนื่องจากความสามารถของตัววัดการเคลื่อนที่สามารถทำได้ สำหรับการเคลื่อนที่ 372 สเตปย่อยต่อสเตปปกตินี้ เป็นการเคลื่อนที่ไปไมโครสเตปละ 1 พัลส์ หรือเท่ากับ 0.036 องศาต่อไมโครสเตป

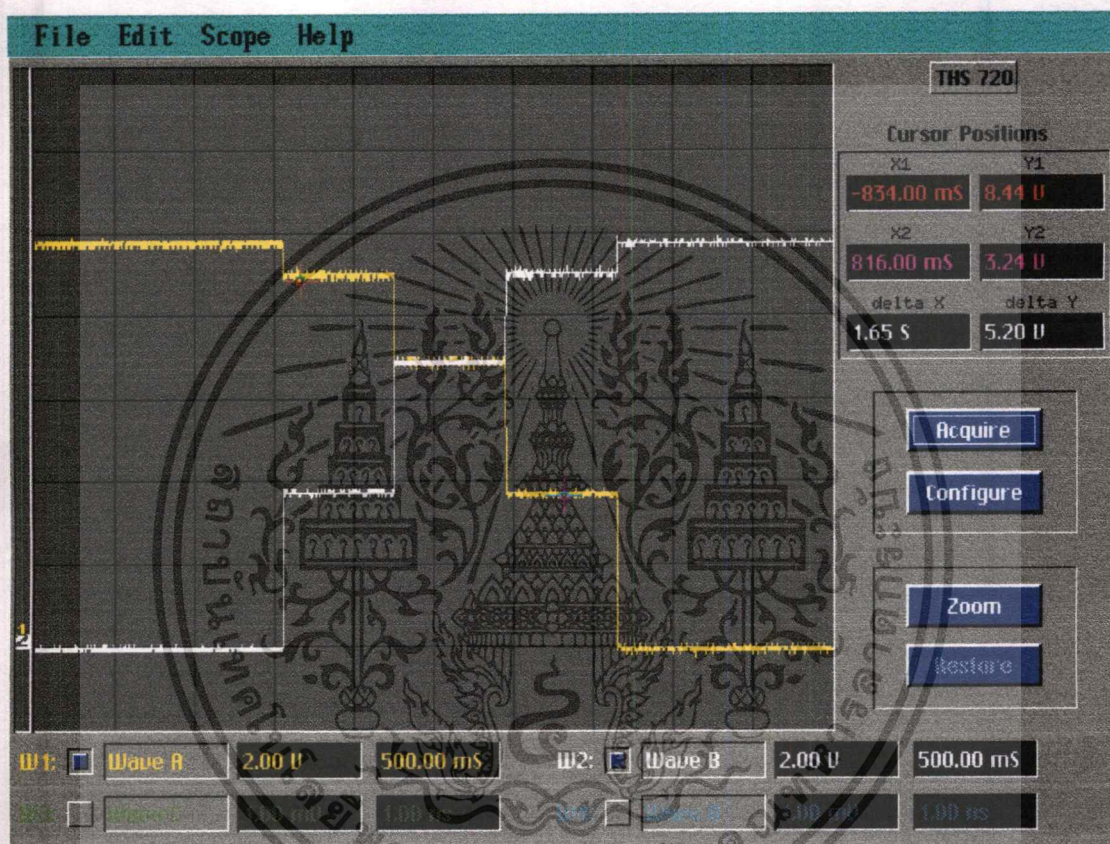
**6.2.1.2.1 ผลการควบคุมสเตปบีงมอเตอร์ชนิดแปรค่ารัลค์แดนซ์ได้แบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตป ด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบสัญญาณชานน์ ที่ขนาด 1/4 เท่าของสเตปปกติ**



**รูปที่ 6.16** การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ที่ขนาดไมโครสเตป 1/4 เท่าของสเตปปกติ

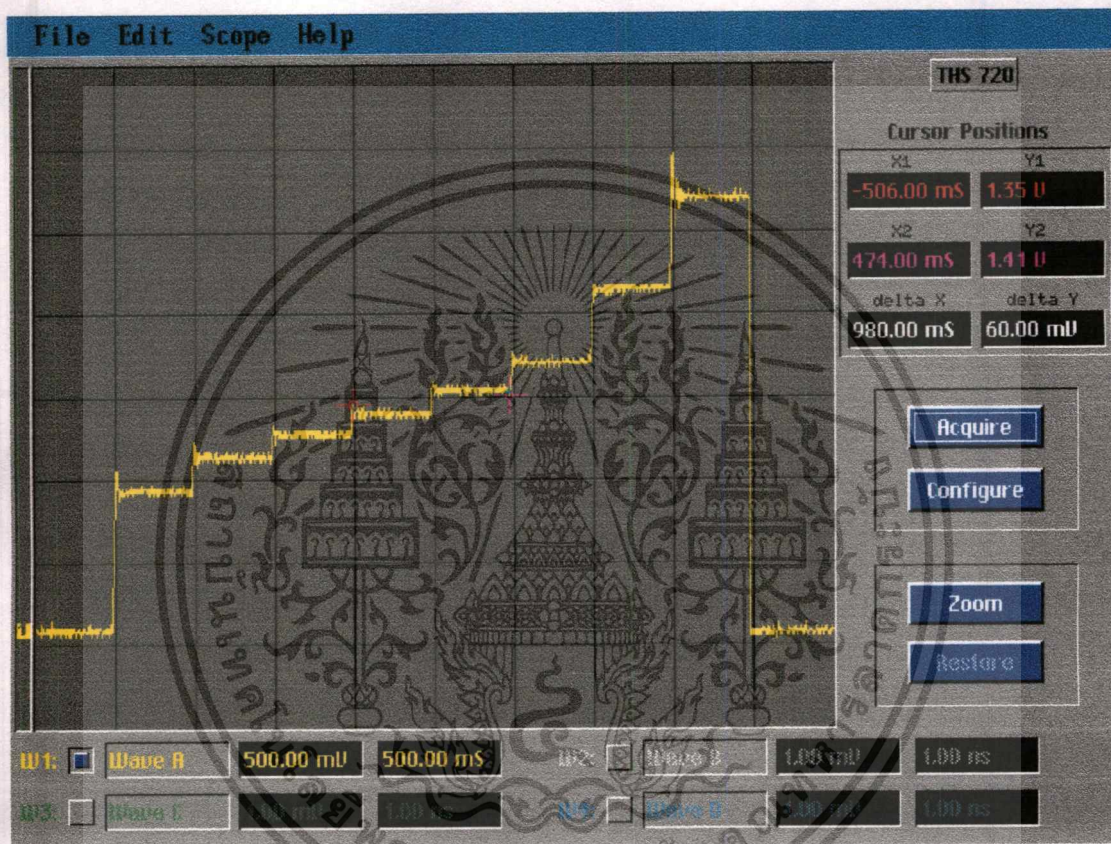
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.1.2.2 สัญญาณแรงดันอินพุตพัลส์ ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อบังคับการจ่ายกระแส  
สำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตปที่  
ขนาดไมโครสเตป 1/4 เท่าของสเตปปกติ



รูปที่ 6.17 สัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสสำหรับเฟสที่ 1 แลเฟสที่ 2 ของสเตปป์มอเตอร์

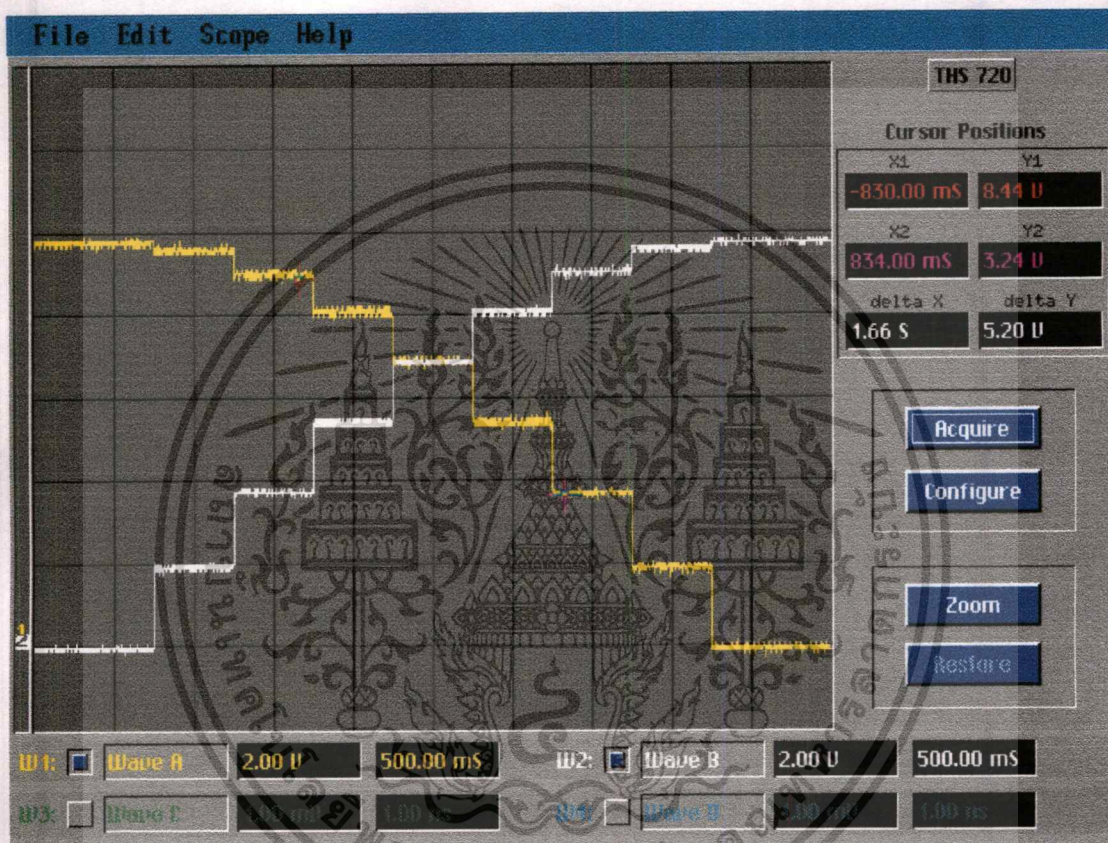
6.2.1.2.3 ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้แบบระบบวงเปิดใน โหมดไมโครสเตป ด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบสัญญาณชานน์ ที่ ขนาดไมโครสเตป 1/8 เท่าของสเตปปกติ



รูปที่ 6.18 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ที่ไมโครสเตป 1/8 เท่าของสเตปปกติ

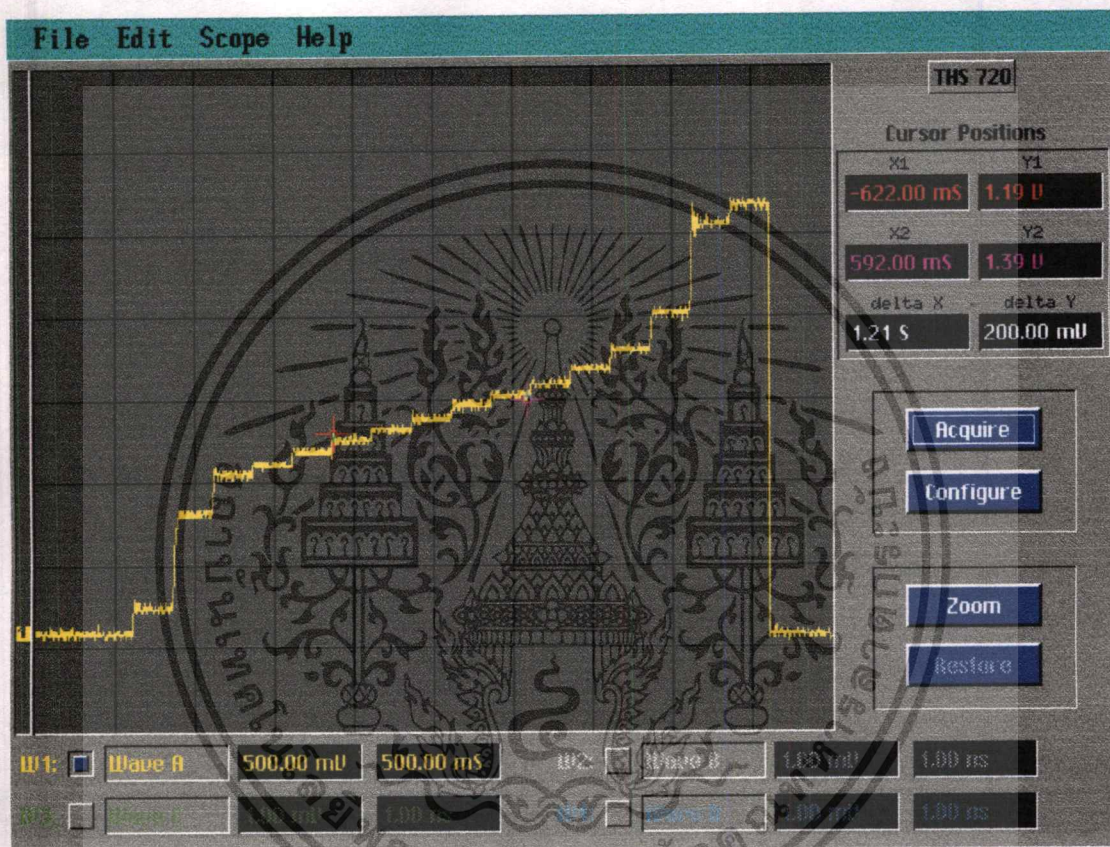
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.1.2.4 สัญญาณแรงดันอินพุทพัลส์ ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อบังคับการจ่ายกระแส สำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิด ในโหมดไมโครสเตปที่ ขนาดไมโครสเตป 1/8 เท่าของสเตปปกติ



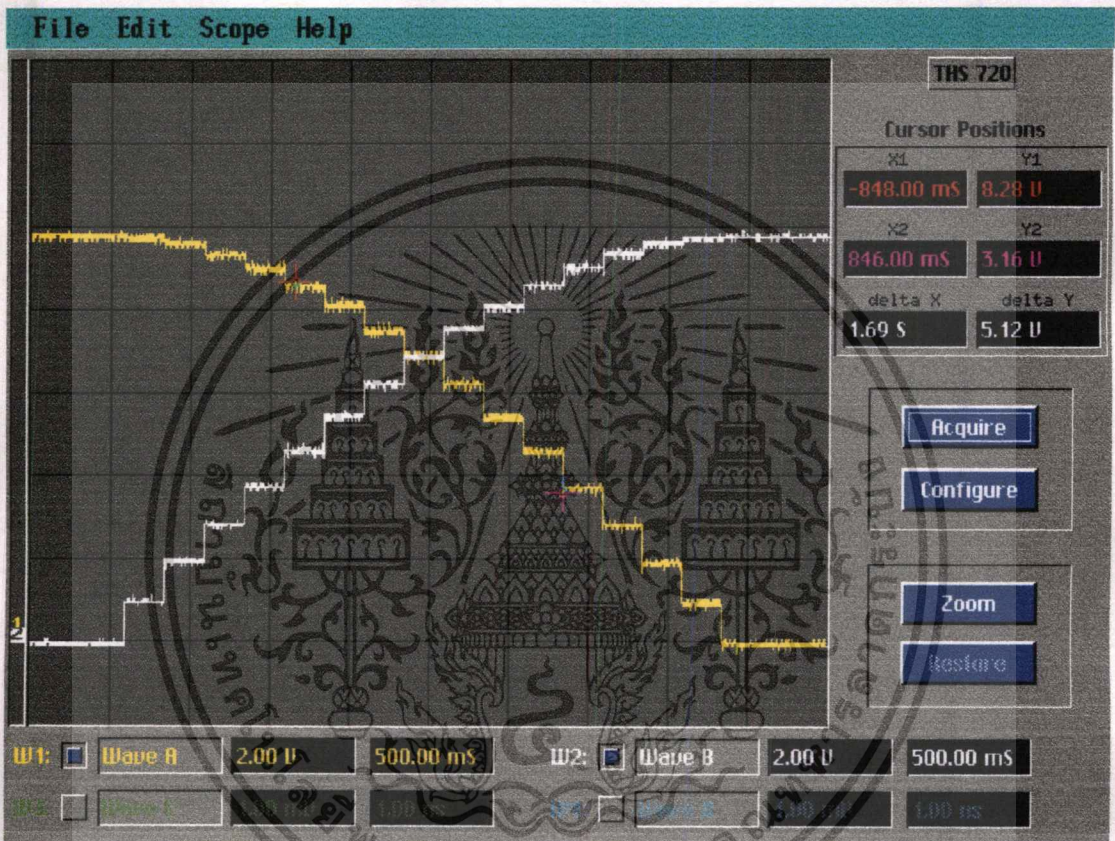
รูปที่ 6.19 สัญญาณอินพุทพัลส์ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสสำหรับเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปป์มอเตอร์

6.2.1.2.5 ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้แบบระบบวงเปิดใน โหมดไมโครสเตป ด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบสัญญาณชานร์น ที่ ขนาด 1/16 เท่าของสเตปปกติ



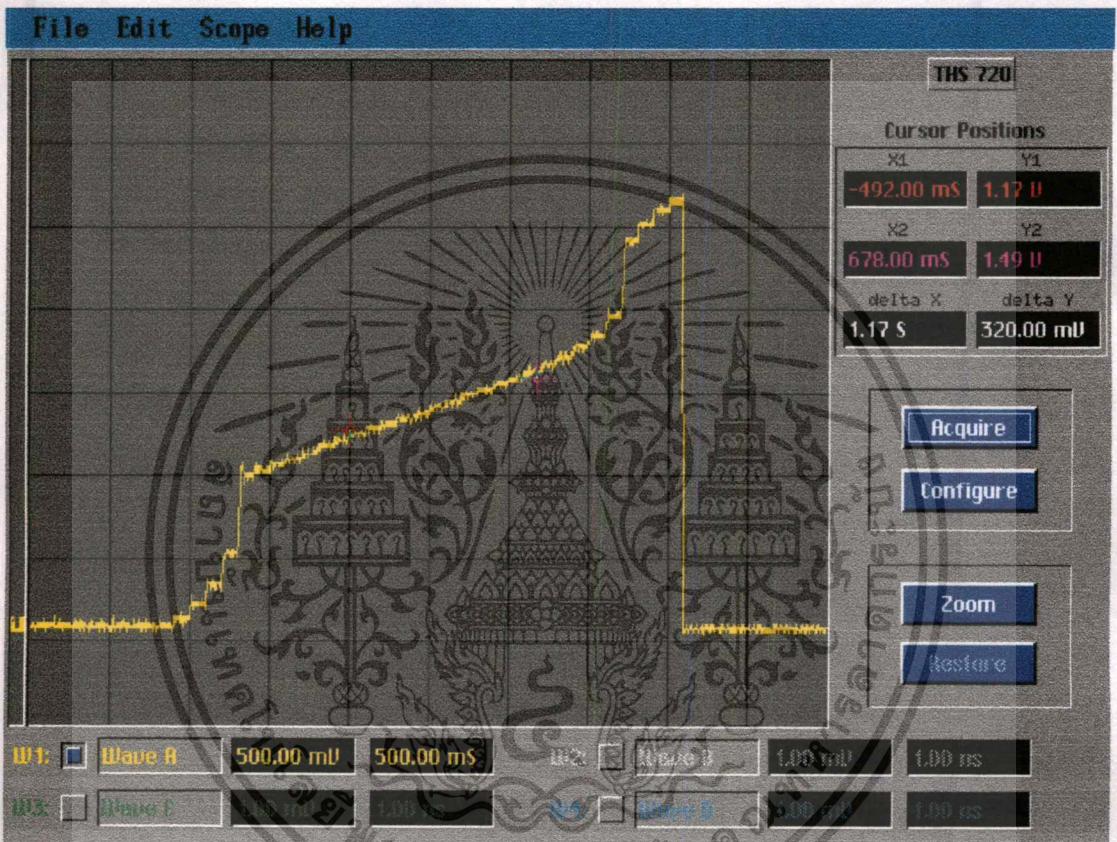
รูปที่ 6.20 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ที่ไมโครสเตป 1/16 เท่าของสเตปปกติ

6.2.1.2.6 สัญญาณแรงดันอินพุตพัลส์ ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อบังคับการจ่ายกระแส สำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิด ในโหมดไมโครสเตปที่ ขนาดไมโครสเตป 1/16 เท่าของสเตปปกติ



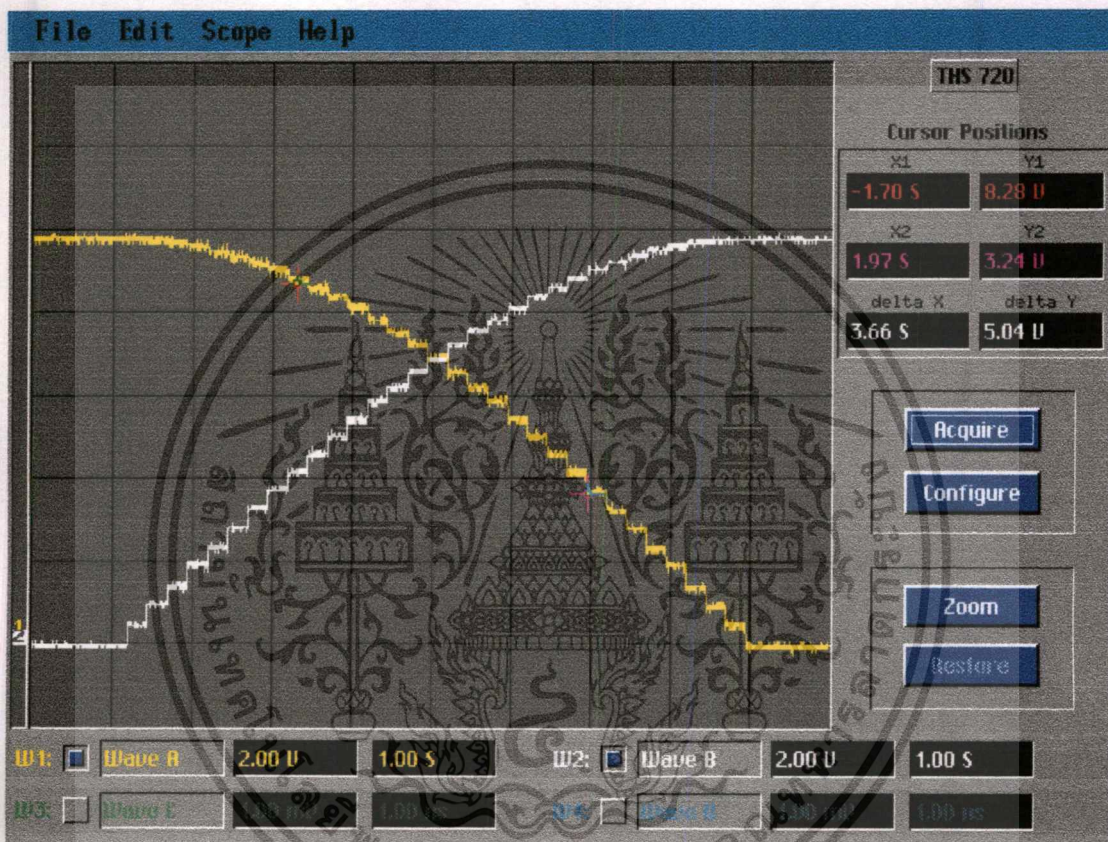
รูปที่ 6.21 สัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสสำหรับเฟสที่ 1 แลเฟสที่ 2 ของสเตปป์มอเตอร์

3.2.1.2.6 ผลการควบคุมสเตรปปีงมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้แบบระบบวงเปิดใน โหมดไมโครสเตปด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบสัญญาณชาน์ ที่ ขนาด 1/32 เท่าของสเตปปกติ



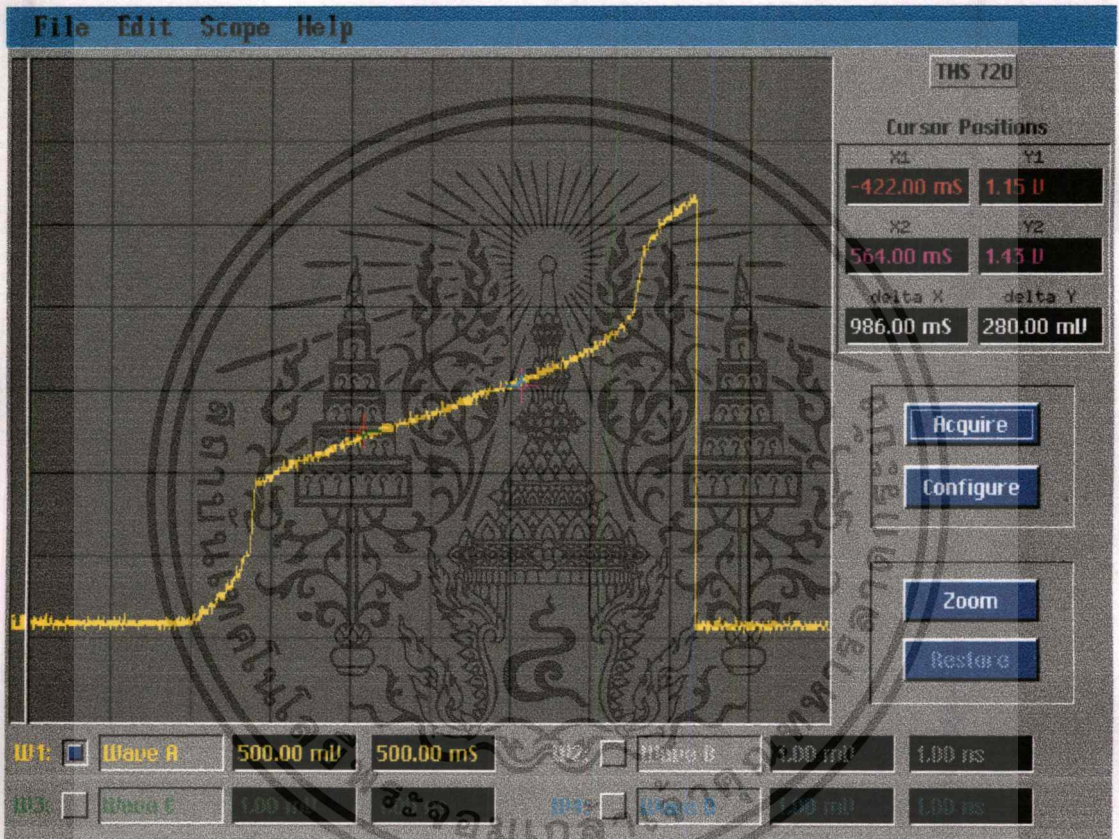
รูปที่ 6.22 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในการควบคุมแบบชาน์ที่ขนาดไมโครสเตป 1/32 เท่าของสเตปปกติ

6.2.1.2.7 สัญญาณแรงดันอินพุตพัลส์ ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อบังคับการจ่ายกระแส  
สำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิด ในโหมดไมโครสเตปที่  
ขนาดไมโครสเตป 1/32 เท่าของสเตปปกติ



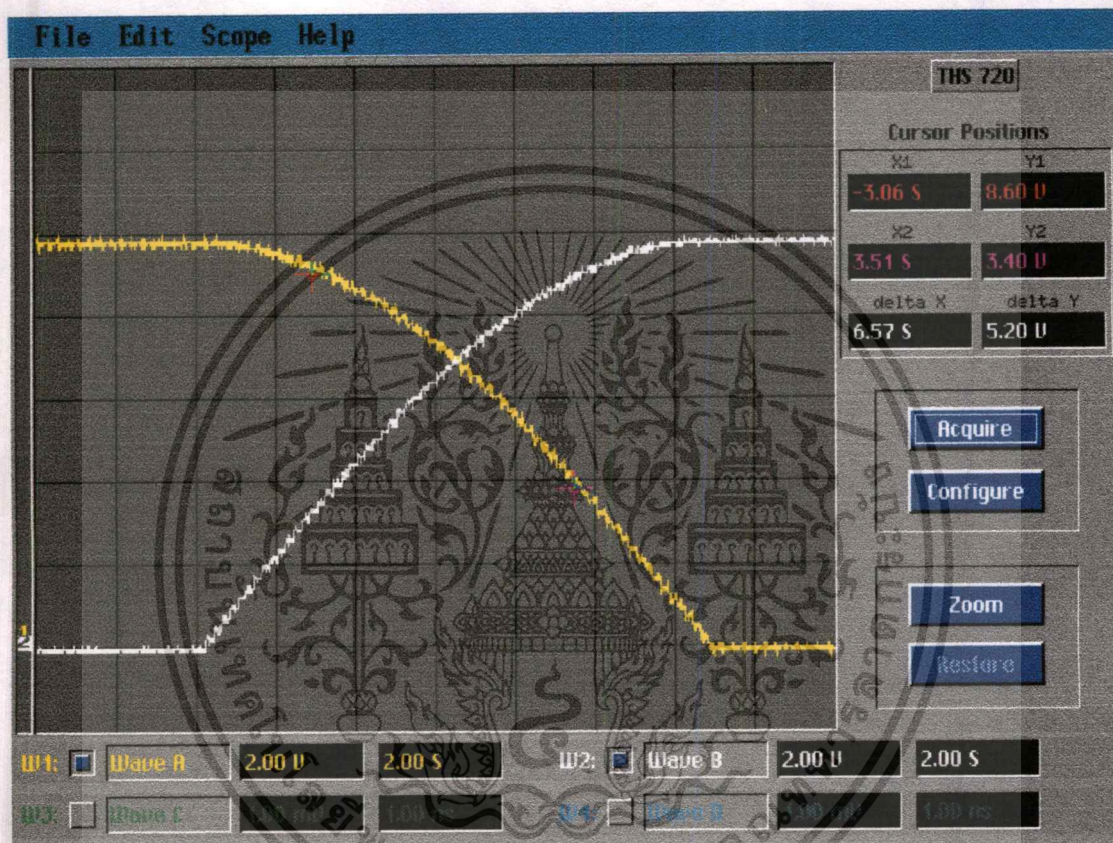
รูปที่ 6.23 สัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสสำหรับเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปป์มอเตอร์

6.2.1.2.8 ผลการควบคุมสเตปิ้งมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้แบบระบบวงเปิด  
ในโหมดไมโครสเตปด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบสัญญาณชายนีที่  
ขนาด 1/64 เท่าของสเตปปกติ



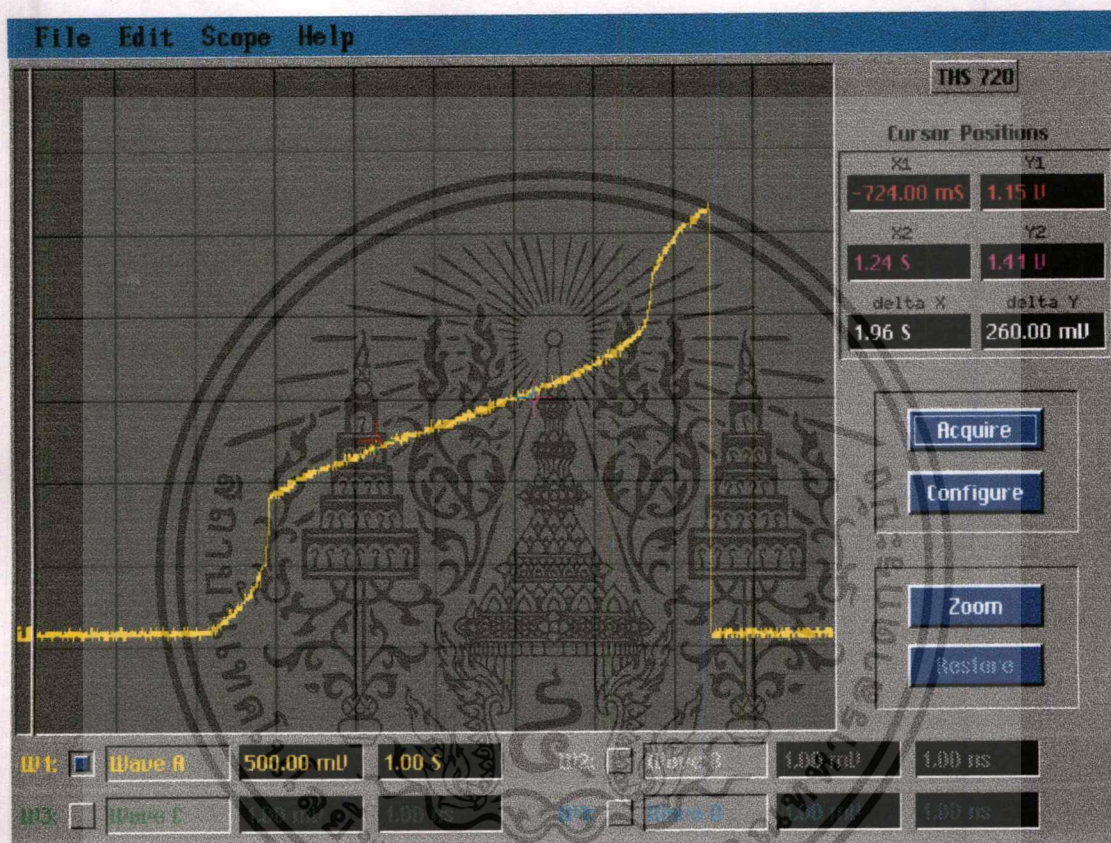
รูปที่ 6.24 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในการควบคุมแบบชายนีที่ขนาดไมโครสเตป 1/64 เท่าของสเตปปกติ

6.2.1.2.9 สัญญาณแรงดันอินพุทพัลส์ ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อบังคับการจ่ายกระแส  
สำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตป  
ที่ขนาดไมโครสเตป 1/64 เท่าของสเตปปกติ



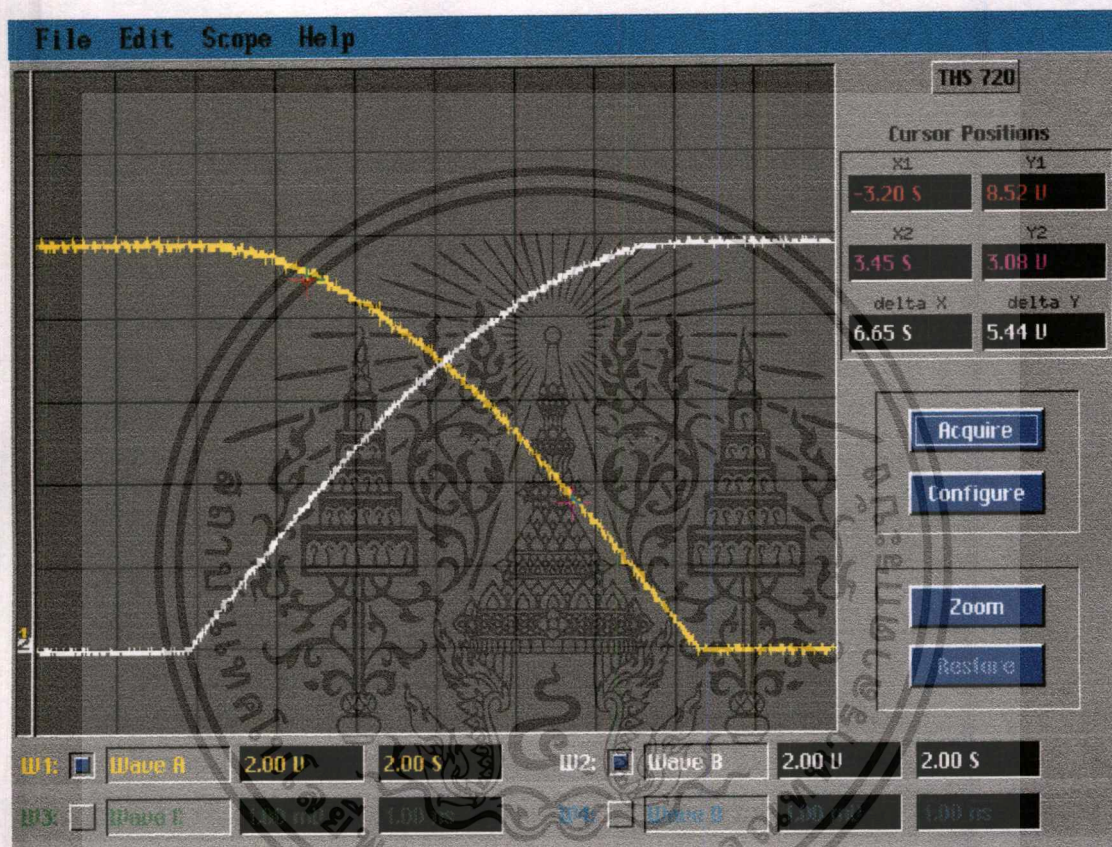
รูปที่ 6.25 สัญญาณอินพุทที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสสำหรับเฟสที่ 1 แลเฟสที่ 2 ของสเตปป์มอเตอร์

6.2.1.2.10 ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ ได้แบบระบบวงเปิด  
ในโหมดไมโครสเตปด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบสัญญาณชานท์ที่  
ขนาด 1/128 เท่าของสเตปปกติ



รูปที่ 6.26 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในการควบคุมแบบชานท์ที่ขนาดไมโครสเตป 1/128 เท่าของสเตปปกติ

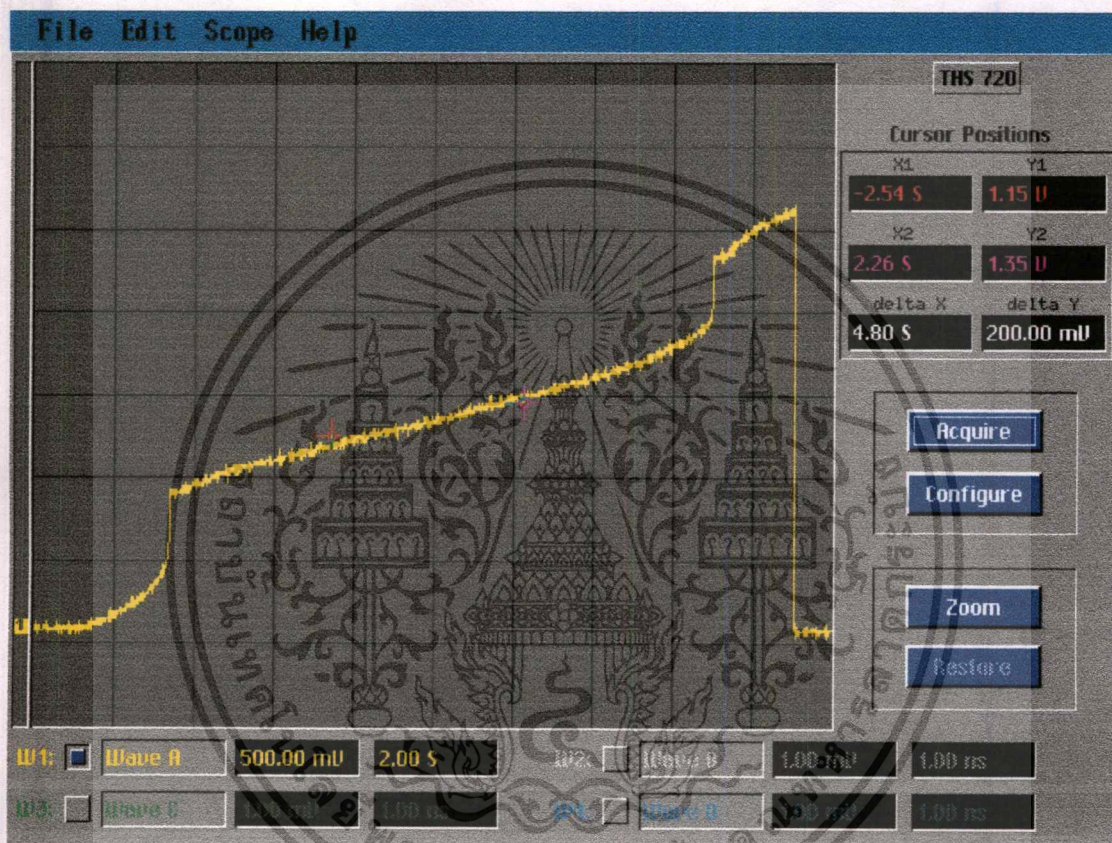
6.2.1.2.11 สัญญาณแรงดันอินพุตพัลส์ ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อบังคับการจ่ายกระแส สำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตป ที่ขนาดไมโครสเตป 1/128 เท่าของสเตปปกติ



รูปที่ 6.27 สัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสสำหรับเฟสที่ 1 แลเฟสที่ 2 ของสเตปป์มอเตอร์

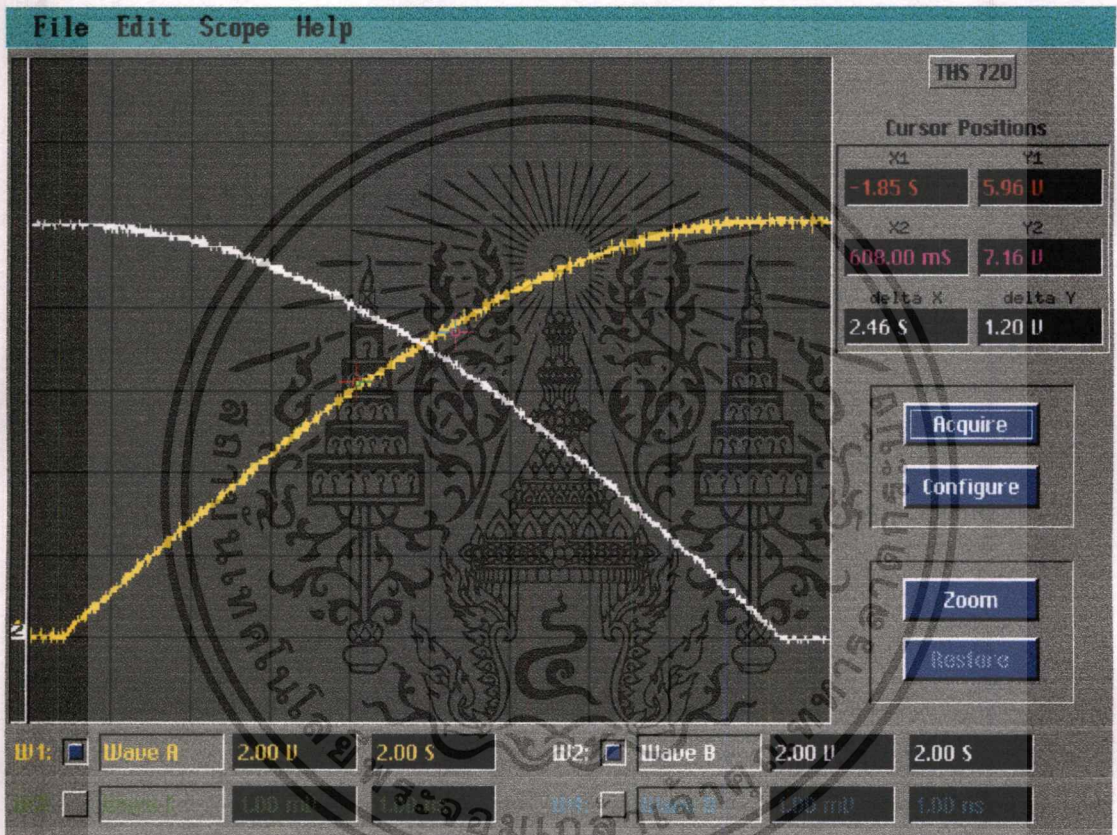
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.1.2.12 ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้แบบระบบวงเปิด  
ในโหมดไมโครสเตปด้วยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบสัญญาณชานท์ที่  
ขนาด 1/372 เท่าของสเตปปกติ



รูปที่ 6.28 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ในการควบคุมแบบชานท์ที่ขนาดไมโครสเตป 1/372 เท่าของสเตปปกติ

6.2.1.2.13 สัญญาณแรงดันอินพุตพัลส์ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อบังคับการจ่ายกระแส สำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงเปิดในโหมดไมโครสเตป ที่ขนาดไมโครสเตป 1/372 เท่าของสเตปปกติ

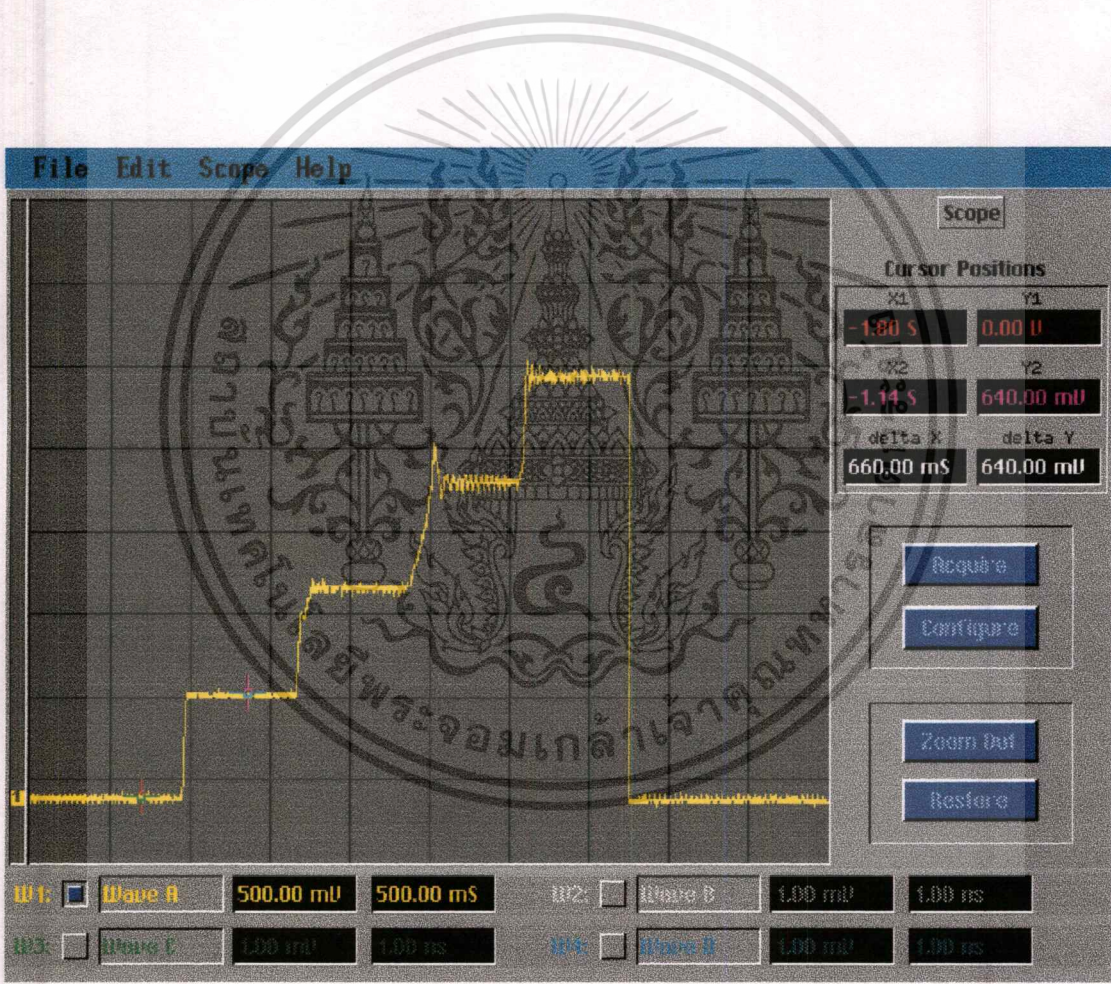


รูปที่ 6.29 สัญญาณอินพุตพัลส์ที่ป้อนให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสสำหรับเฟสที่ 1 แลเฟสที่ 2 ของสเตปป์มอเตอร์

### 6.2.2 การควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตป ด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง

เป็นผลงานวิจัยสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นหลักการใหม่และเป็นหลักการที่สามารถทำให้โรเตอร์สามารถเคลื่อนที่เป็นไมโครสเตปที่มีขนาดไมโครสเตปเท่ากันทุกๆตำแหน่งไมโครสเตปที่ต้องการได้ เนื่องเป็นการควบคุมให้กระแสทั้งสองเฟสเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นสัดส่วนกันในลักษณะการเคลื่อนที่ของแกนโรเตอร์จริงๆ จึงสามารถชดเชยข้อเสียของการควบคุมแบบระบบวงเปิดที่ได้ประมาณค่ากระแสอ้างอิงในแบบซายน์และลิเนียร์

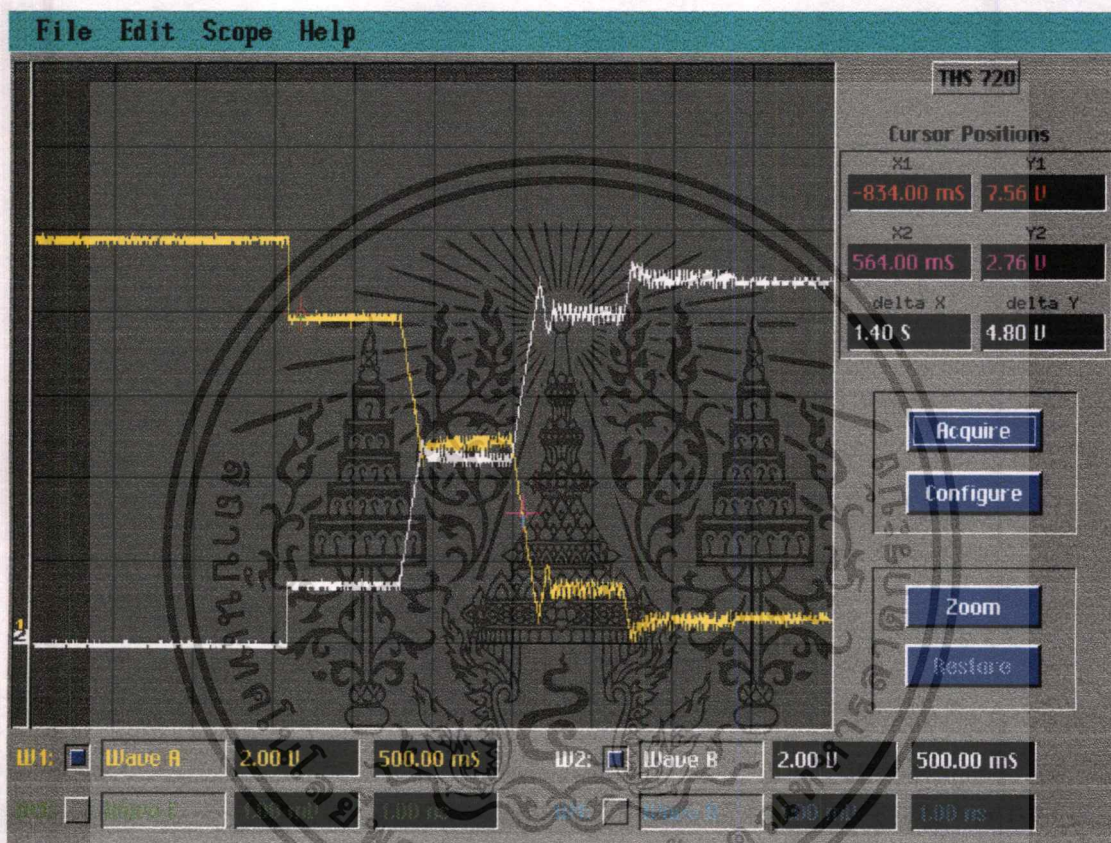
#### 6.2.2.1 ผลการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง ที่มีขนาดไมโครสเตปเท่ากับ 1/4 เท่าของสเตปปกติ



รูปที่ 6.30 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ เมื่อถูกควบคุมด้วยการควบคุมแบบระบบวงปิดด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงขนาด 1/4 เท่าของสเตป

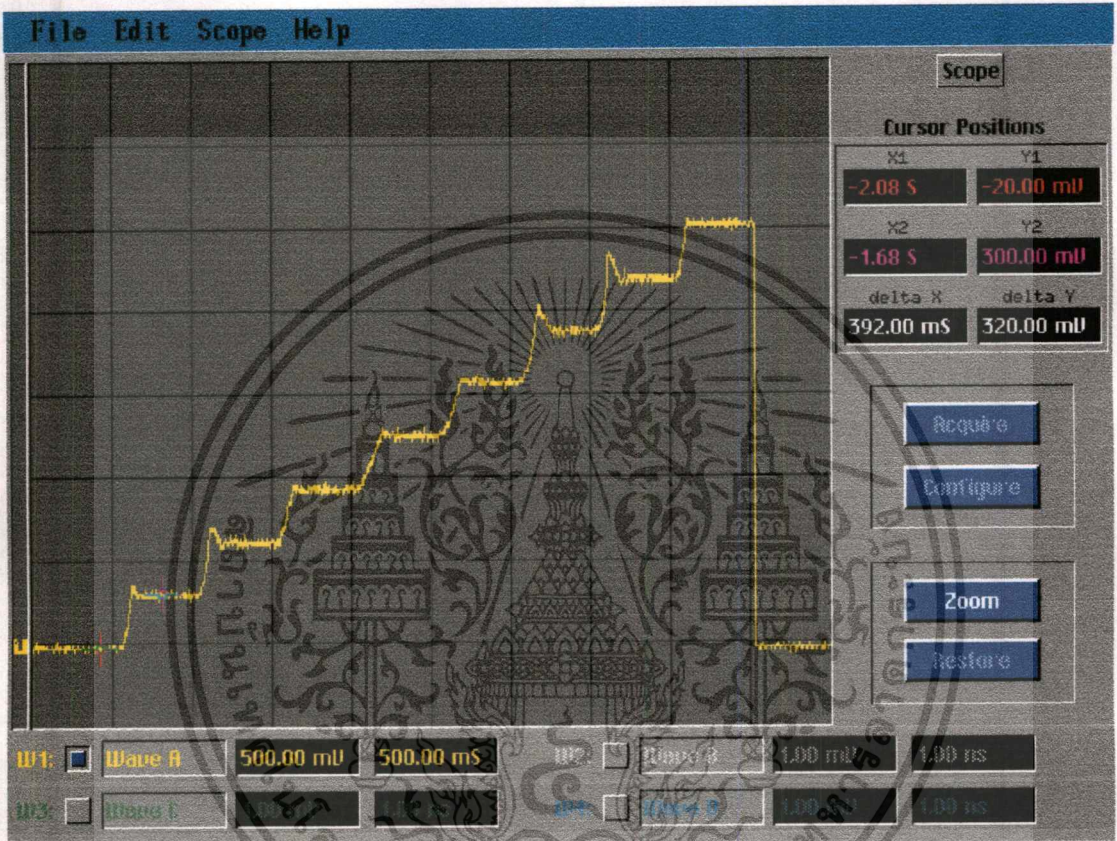
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.2.2 สัญญาณควบคุมที่ป้อนให้วงจรขับ เพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้กับขดลวดของ สเตปปีงมอเตอร์ทั้งสองเฟสสำหรับการควบคุมแบบระบบวงปิดในโหมดไมโคร สเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง ที่ขนาดไมโครสเตป 1/4 เท่าของสเตปปกติ



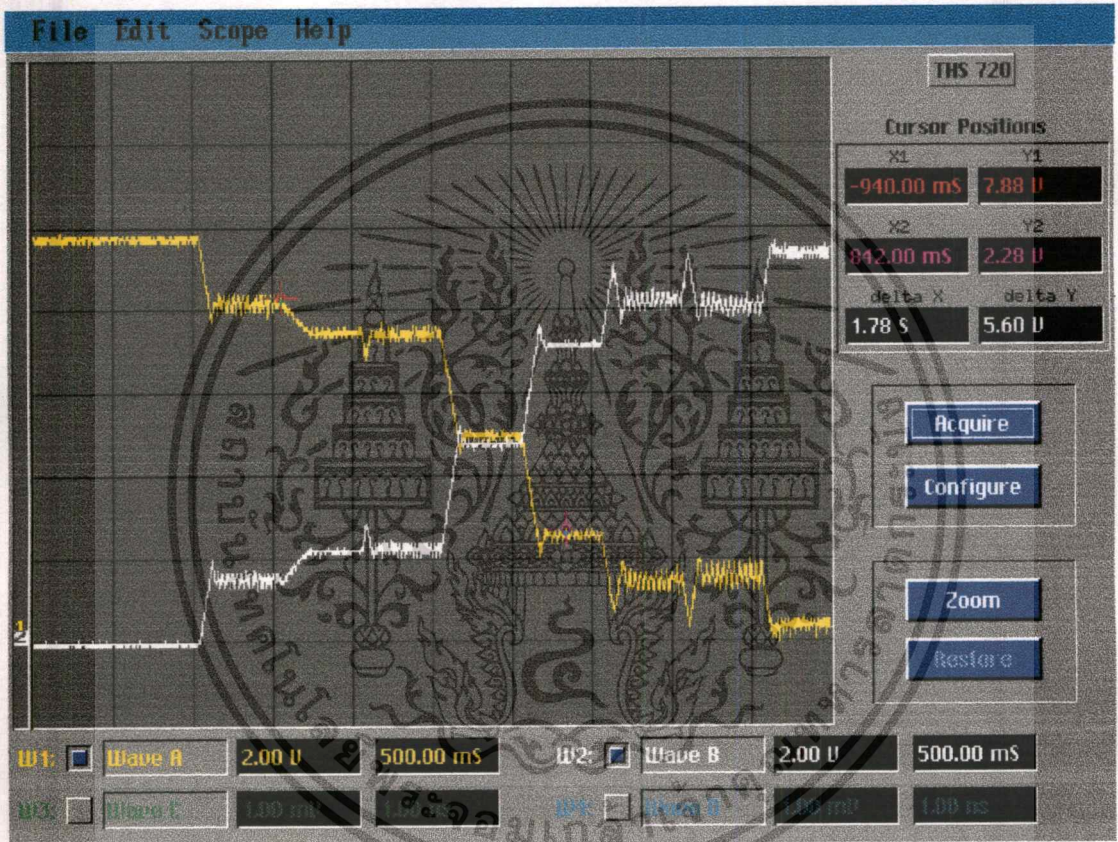
รูปที่ 6.31 สัญญาณควบคุมสำหรับวงจรขับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้ขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปปีงมอเตอร์

### 6.2.2.3 ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงปิด ในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่มีขนาดไมโครสเตปเท่ากับ 1/8 เท่าของสเตปปกติ



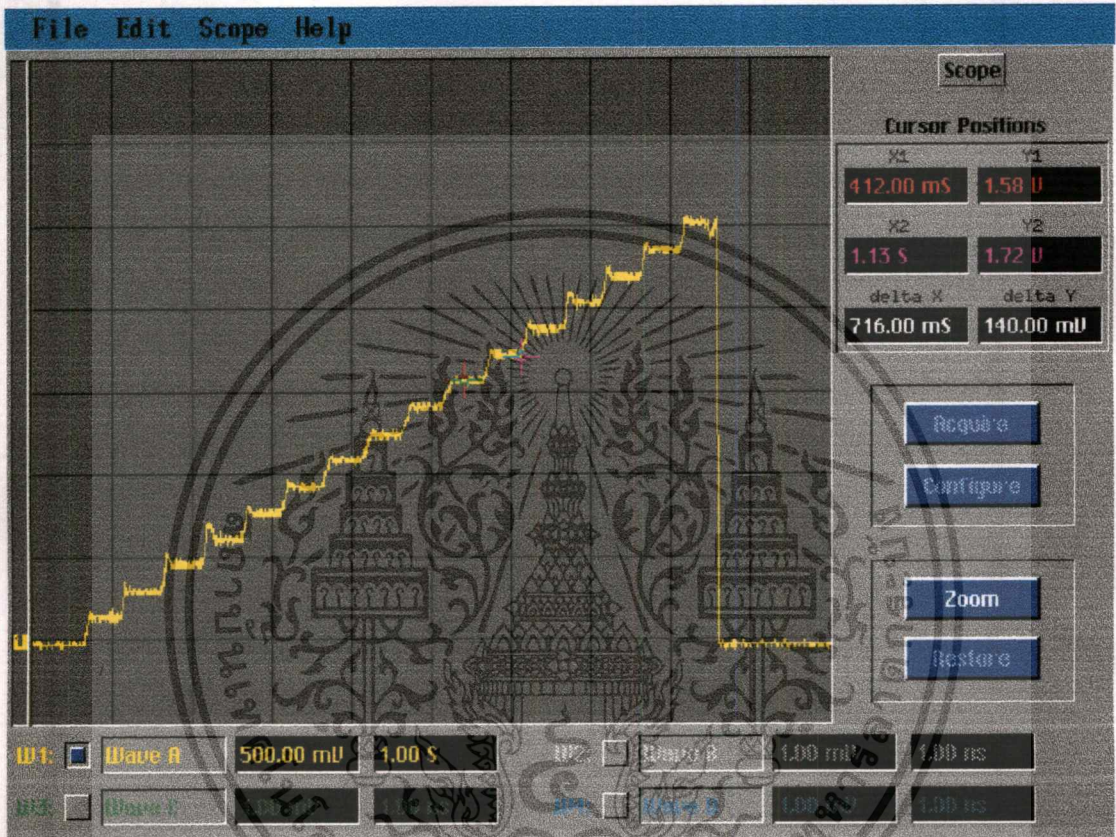
รูปที่ 6.32 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ เมื่อถูกควบคุมด้วยการควบคุมแบบระบบวงปิดด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงขนาด 1/8 เท่าของสเตป

6.2.2.4 สัญญาณควบคุมที่ป้อนให้วงจรถับ เพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้กับขดลวดของ สเตปมอเตอร์ทั้งสองเฟสสำหรับการควบคุมแบบระบบวงปิดในโหมดไมโคร สเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง ที่ขนาดไมโครสเตป 1/8 เท่าของสเตปปกติ



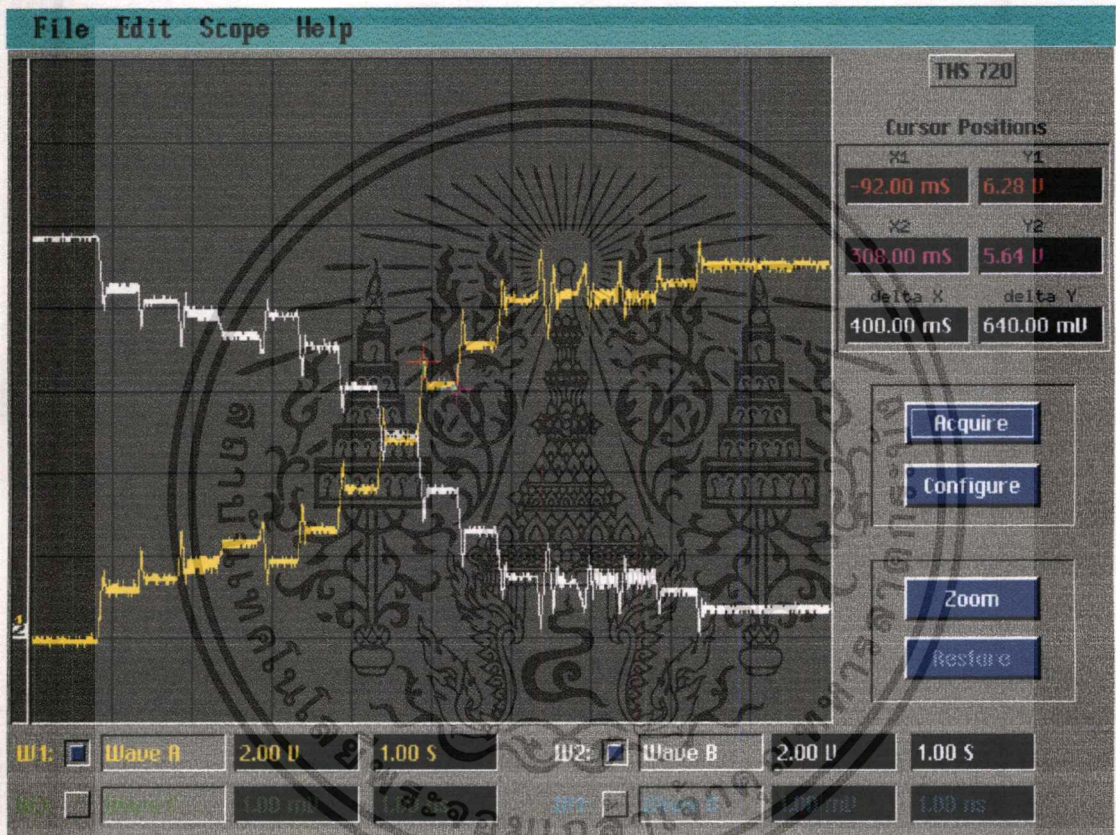
รูปที่ 6.33 สัญญาณควบคุมสำหรับวงจรถับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้ขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปมิ่ง

6.2.2.5 ผลการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบระบบวงปิด ในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่มีขนาดไมโครสเตปเท่ากับ 1/16 เท่าของสเตปปกติ



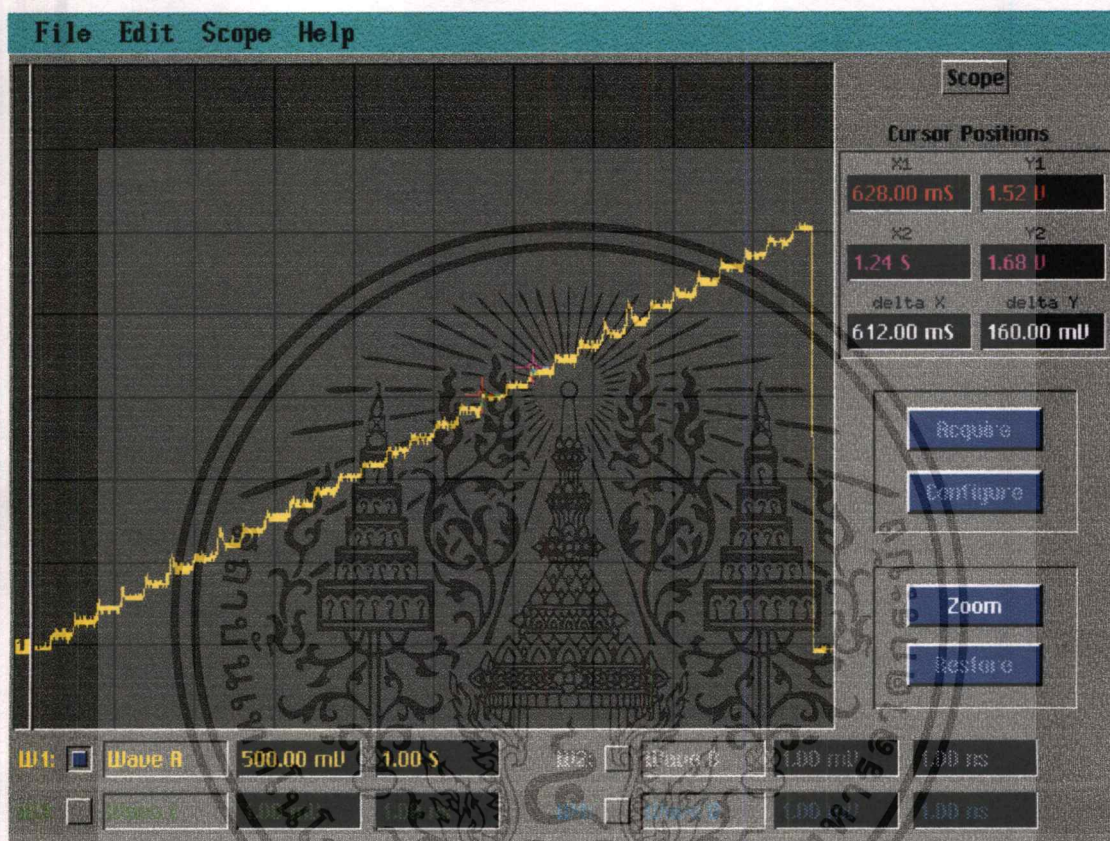
รูปที่ 6.34 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ เมื่อถูกควบคุมด้วยการควบคุมแบบระบบวงปิดด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงขนาด 1/16 เท่าของสเตป

6.2.2.6 สัญญาณควบคุมที่ป้อนให้วงจรถับ เพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้กับขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ทั้งสองเฟสสำหรับการควบคุมแบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่ขนาดไมโครสเตป 1/16 เท่าของสเตปปกติ



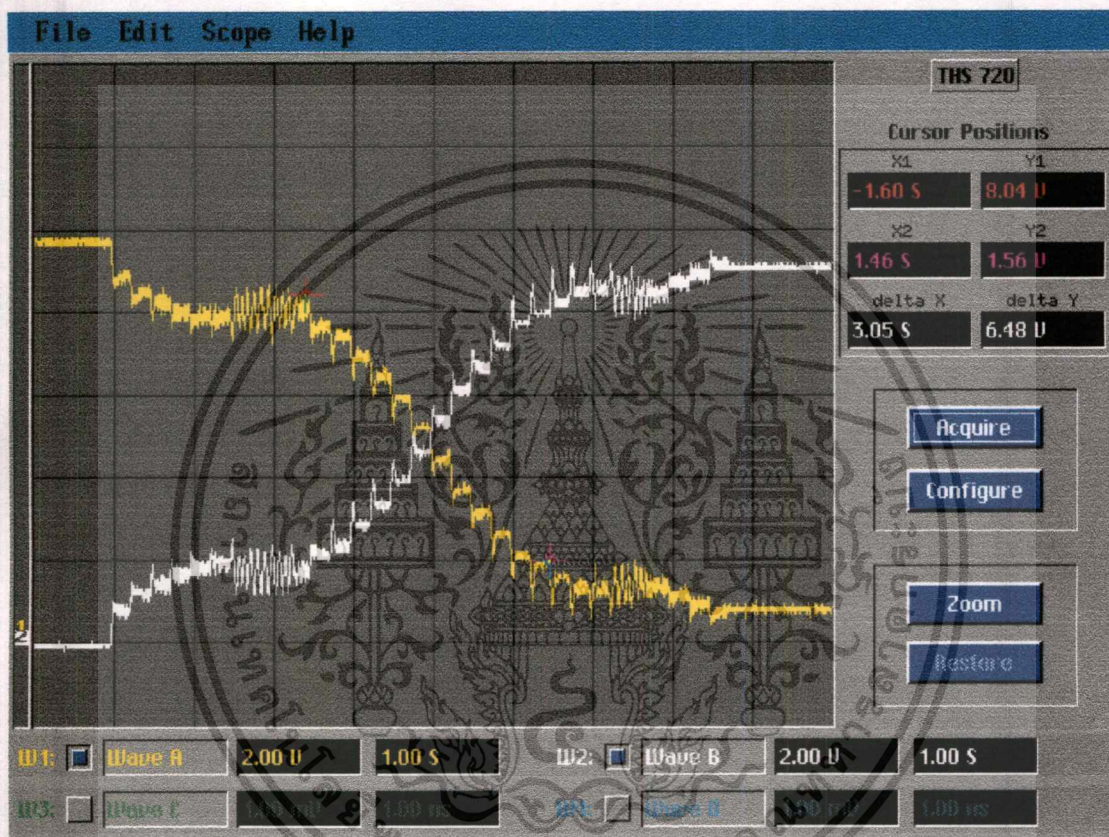
รูปที่ 6.35 สัญญาณควบคุมสำหรับวงจรถับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้ขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปป์มอเตอร์

6.2.2.7 ผลการควบคุมสเตปป์งมอเตอร์แบบระบบวงปิด ในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่มีขนาดไมโครสเตปเท่ากับ  $1/32$  เท่าของสเตปปกติ



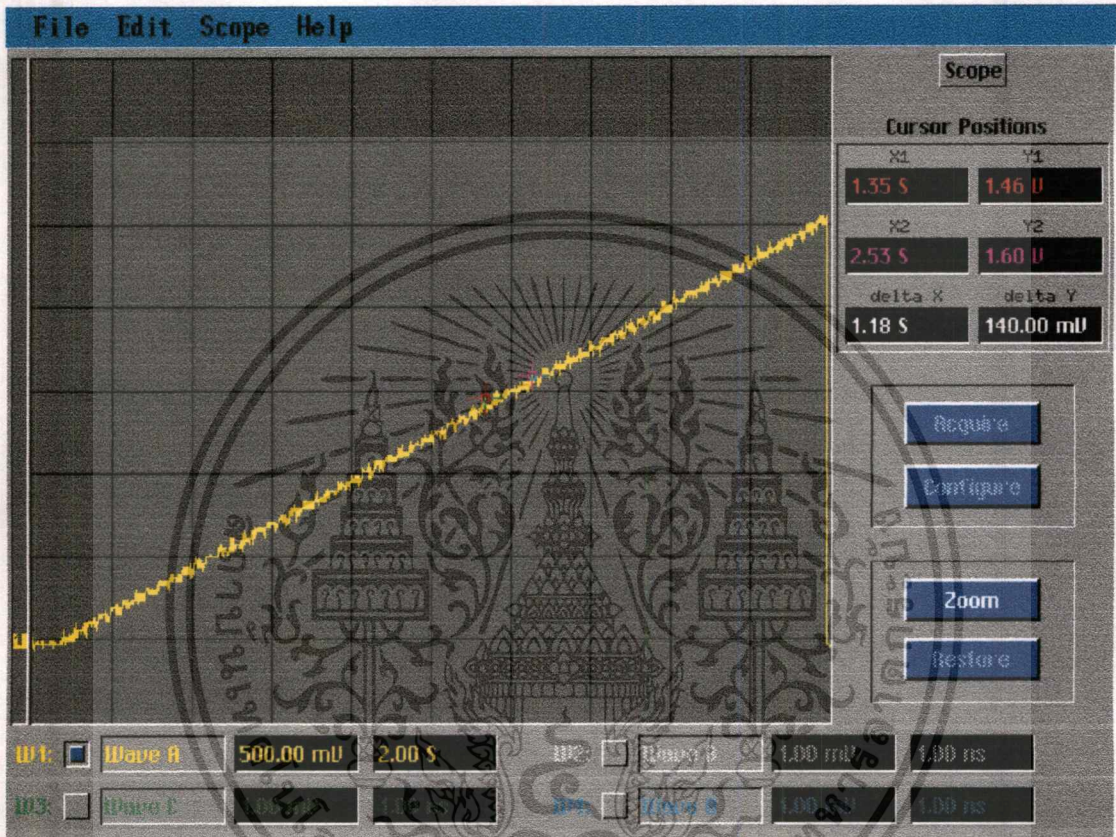
รูปที่ 6.36 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ เมื่อถูกควบคุมด้วยการควบคุมแบบระบบวงปิดด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงขนาด  $1/32$  เท่าของสเตป

6.2.2.8 สัญญาณควบคุมที่ป้อนให้วงจรถับ เพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้กับขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ทั้งสองเฟสสำหรับการควบคุมแบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่ขนาดไมโครสเตป 1/32 เท่าของสเตปปกติ



รูปที่ 6.37 สัญญาณควบคุมสำหรับวงจรถับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้ขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปป์ม

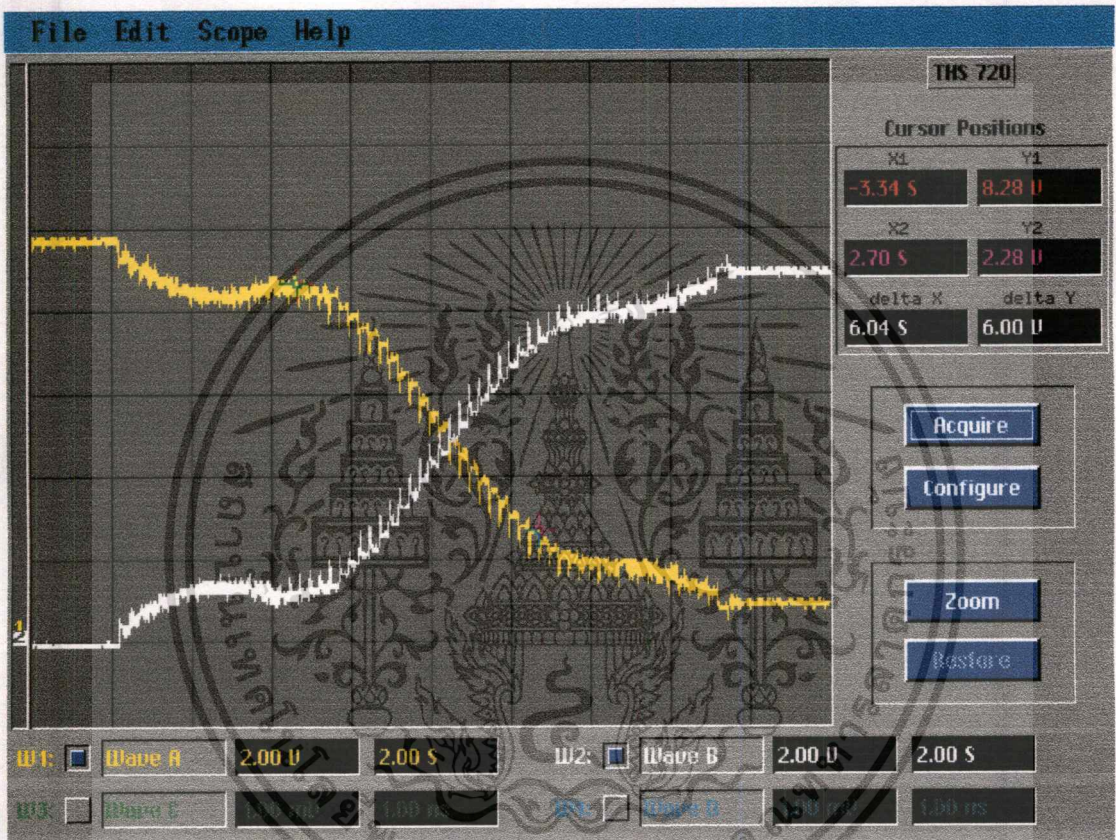
6.2.2.9 ผลการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบระบบวงปิด ในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่มีขนาดไมโครสเตปเท่ากับ  $1/64$  เท่าของสเตปปกติ



รูปที่ 6.38 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ เมื่อถูกควบคุมด้วยการควบคุมแบบระบบวงปิดด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงขนาด  $1/64$  เท่าของสเตป

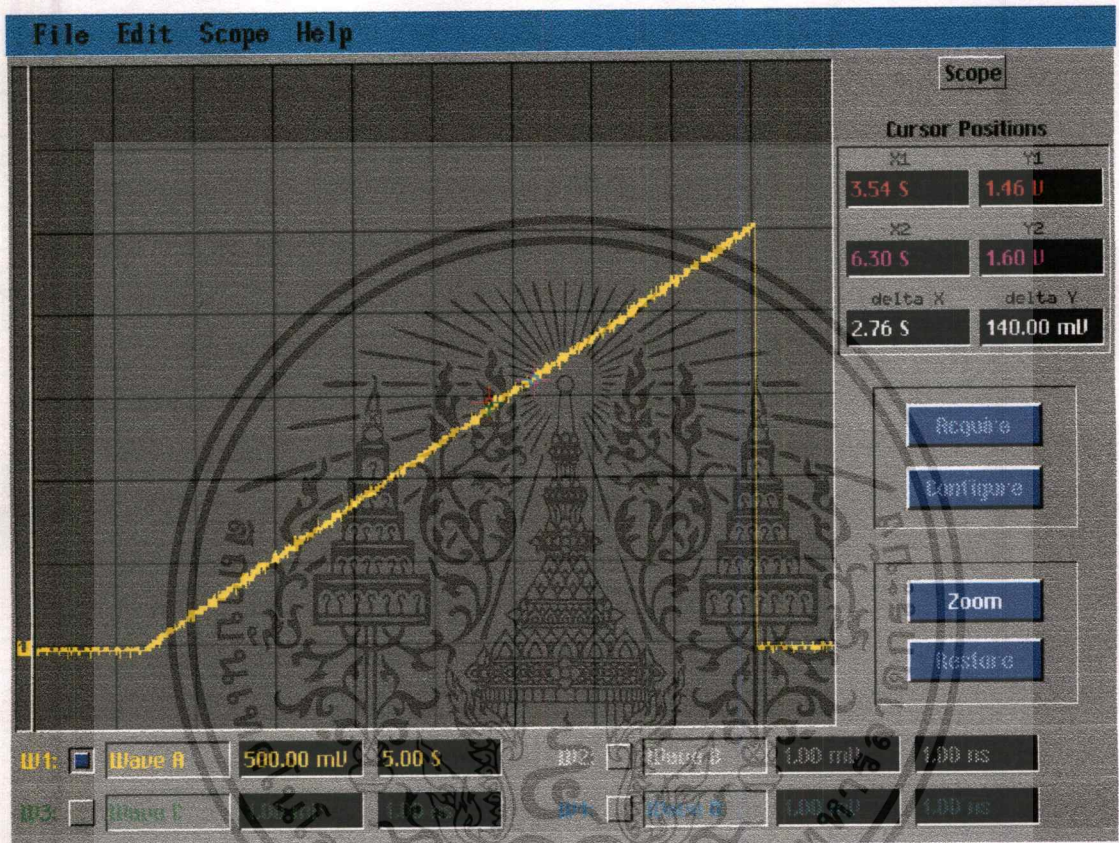
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.2.10 สัญญาณควบคุมที่ป้อนให้วงจรขับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้กับขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ทั้งสองเฟสสำหรับการควบคุมแบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่ขนาดไมโครสเตป 1/64 เท่าของสเตปปกติ



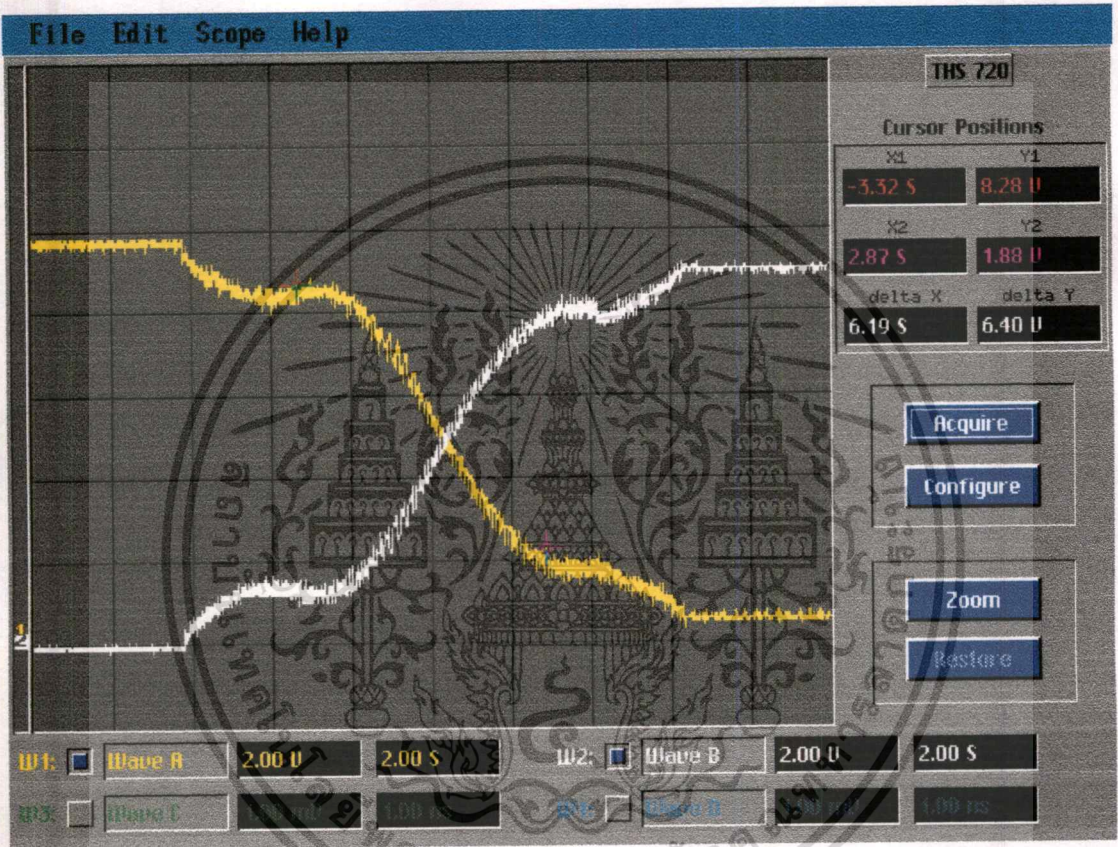
รูปที่ 6.39 สัญญาณควบคุมสำหรับวงจรขับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้ขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปป์มอเตอร์

6.2.2.11 ผลการควบคุมสเตปป์ิ่งมอเตอร์แบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่มีขนาดไมโครสเตปเท่ากับ  $1/128$  เท่าของสเตปปกติ



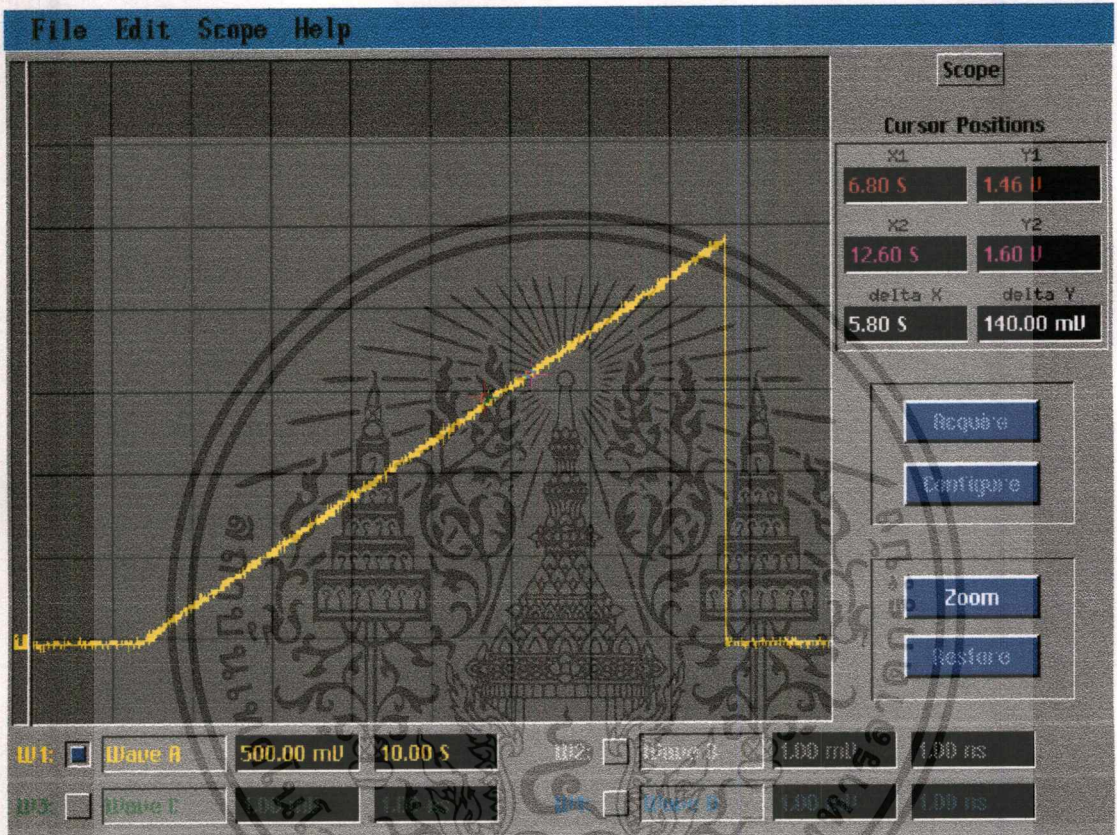
รูปที่ 6.40 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ เมื่อถูกควบคุมด้วยการควบคุมแบบระบบวงปิดด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงขนาด  $1/128$  เท่าของสเตป

6.2.2.12 สัญญาณควบคุมที่ป้อนให้วงจรขับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้กับขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ทั้งสองเฟสสำหรับการควบคุมแบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่ขนาดไมโครสเตป 1/128 เท่าของสเตปปกติ



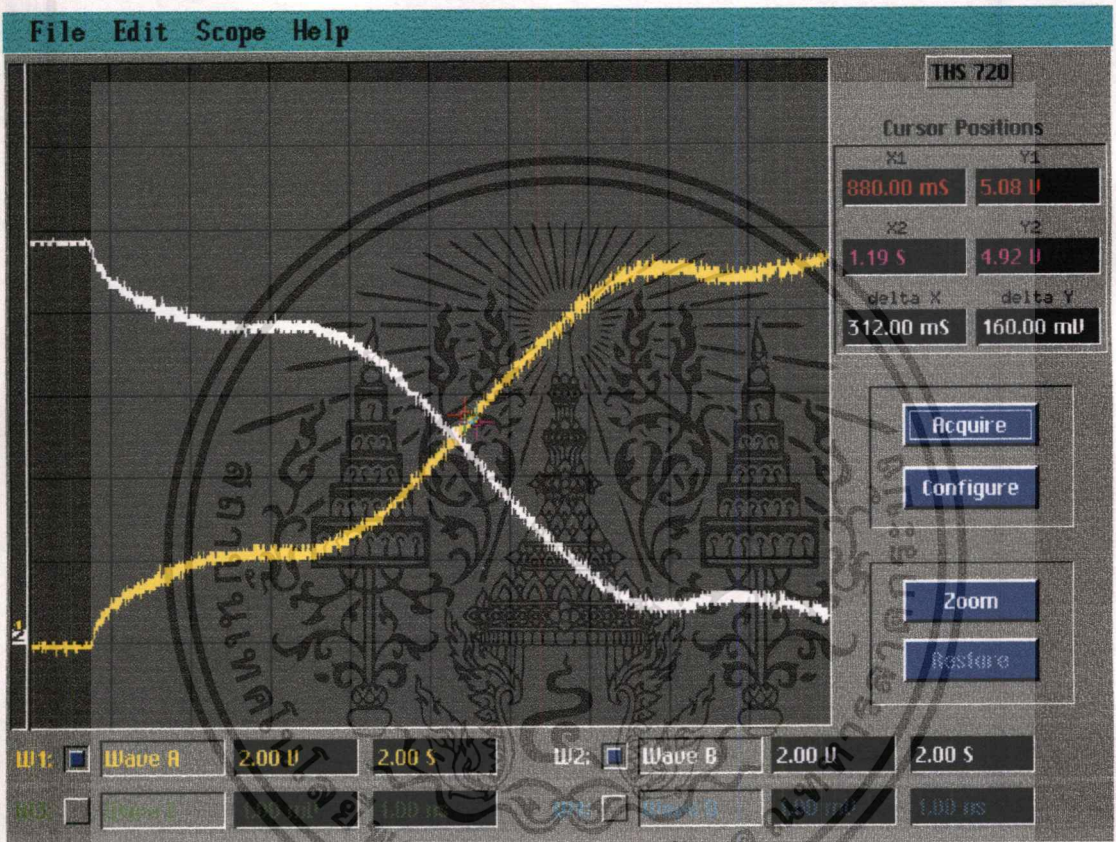
รูปที่ 6.41 สัญญาณควบคุมสำหรับวงจรขับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้ขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปป์มอเตอร์

6.2.2.13 ผลการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง ที่มีขนาดไมโครสเตปเท่ากับ  $1/372$  เท่าของสเตปปกติ



รูปที่ 6.42 การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ เมื่อถูกควบคุมด้วยการควบคุมแบบระบบวงปิดด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงขนาด  $1/372$  เท่าของสเตป

6.2.2.14 สัญญาณควบคุมที่ป้อนให้วงจรถับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้กับขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ทั้งสองเฟส สำหรับการควบคุมแบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงที่ขนาดไมโครสเตป 1/372 เท่าของสเตปปกติ



รูปที่ 6.43 สัญญาณควบคุมสำหรับวงจรถับเพื่อบังคับการจ่ายกระแสให้ขดลวดเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ของสเตปป์มอเตอร์

### 6.2.3 ตารางเปรียบเทียบขนาดไมโครสเตป

ผลการทดลองที่ได้แสดงในข้อที่ผ่านมาพบว่า การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบปิดด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง เป็นผลการทดลองที่ดีที่สุดที่สามารถควบคุมให้สเตปป์มอเตอร์เคลื่อนที่เป็นไมโครสเตปด้วยขนาดที่เท่ากันทุกตำแหน่งไมโครสเตปได้ และได้แสดงค่าการเปรียบเทียบตำแหน่งและขนาดของไมโครสเตปที่สามารถวัดผลได้ ซึ่งวัดผลเปรียบเทียบได้ตั้งแต่ 4 เท่า ถึง 16 เท่าของสเตปปกติเท่านั้น

#### 6.2.3.1 การเปรียบเทียบสำหรับการแบ่งไมโครสเตปขนาด 1/4 เท่าของสเตปปกติ สำหรับค่ากระแสอ้างอิงแบบสัญญาณชายนสัญญาณลิเนียร์ และการควบคุมแบบระบบปิดด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง

ตารางที่ 6.1 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของโรเตอร์จากการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบปิดในโหมดไมโครสเตปและการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบเปิดในโหมดไมโครสเตปที่ขนาด 1/4 ไมโครสเตปต่อสเตปหนึ่งไมโครสเตปมีขนาด 640 mV

จำนวนสเตป	1	2	3	4
ขนาดสเตปที่วัดได้จากการควบคุมระบบปิด (mV)	640	640	640	640
ขนาดสเตปได้จากสัญญาณอ้างอิงแบบชายน (mV)	1000	340	400	840
ขนาดสเตปได้จากสัญญาณอ้างอิงแบบลิเนียร์ (mV)	920	360	360	920

#### 6.2.3.2 การเปรียบเทียบสำหรับการแบ่งไมโครสเตปขนาด 1/8 เท่าของสเตปปกติ สำหรับค่ากระแสอ้างอิงแบบสัญญาณชายนสัญญาณลิเนียร์ และการควบคุมแบบระบบปิดด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง

ตารางที่ 6.2 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของโรเตอร์จากการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบปิดในโหมดไมโครสเตปและการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบเปิดในโหมดไมโครสเตปที่ขนาด 1/8 ไมโครสเตปต่อสเตปหนึ่งไมโครสเตปมีขนาด 320 mV

จำนวนสเตป	1	2	3	4	5	6	7	8
ขนาดสเตปที่วัดได้จากการควบคุมระบบปิด(mV)	320	320	320	320	320	320	320	320
ขนาดสเตปได้จากสัญญาณอ้างอิงแบบชายน (mV)	800	240	100	60	80	100	500	700
ขนาดสเตปได้จากสัญญาณอ้างอิงแบบลิเนียร์ (mV)	220	700	180	160	160	200	300	740

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3.2.3 การเปรียบเทียบสำหรับการแบ่งไมโครสเตปขนาด 1/16 เท่าของสเตปปกติ สำหรับค่า กระแสอ้างอิงแบบสัญญาณชายน์สัญญาณลิเนียร์ และการควบคุมแบบระบบปิด ด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง

ตารางที่ 6.3 แสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองของโรเตอร์จากการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบระบบปิด ในโหมดไมโครสเตปและการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบระบบเปิดในโหมดไมโครสเตปที่ ขนาด 1/16 ไมโครสเตปต่อสเตปหนึ่งไมโครสเตปมีขนาด 160 mV

จำนวนสเตป	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ขนาดสเตปที่วัดได้ จากการควบคุม(mV) ระบบปิด	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160
ขนาดสเตปได้จาก สัญญาณอ้างอิงแบบ ชายน์ (mV)	220	540	240	20	40	20	20	20	20	20	20	20	80	120	520	60
ขนาดสเตปได้จาก สัญญาณอ้างอิงแบบ ลิเนียร์ (mV)	60	120	260	560	80	100	80	80	60	60	80	100	100	120	160	170

## 6.3 สรุปผลการทดลอง

สรุปได้ว่าการควบคุมกระแสของสเตปมอเตอร์ในเฟสที่ 1 เฟส 2 ให้เป็นสัดส่วนกัน ที่ตำแหน่ง ไมโครสเตปที่ต้องการ โดยให้กระแสทั้งสองเฟสเพิ่มขึ้นและลดลงตามการเคลื่อนที่จริงจะทำให้ควบคุม ตำแหน่งของแกนโรเตอร์ให้มีขนาดเท่ากันตลอดช่วงที่ต้องการได้ซึ่งการควบคุมให้อัตราการเพิ่มและลดกระแส ของทั้งสองเฟสสามารถใช้การควบคุมแบบวงปิดด้วยการเปรียบเทียบค่าจริงจะสามารถชดเชยการตอบสนอง ให้เคลื่อนที่เป็นไมโครสเตปที่เท่ากัน เนื่องจากการวัดการเคลื่อนที่ด้วยออปติคัลเอนโค้ดเดอร์ สำหรับการ ออกแบบวงจรมีความสำคัญมากที่สุดที่จะทำให้มอเตอร์ตอบสนองได้ตำแหน่งที่ต้องการจริง และการควบคุม แบบไมโครสเตป ทำให้ลดการเกิดโอเวอร์ชูตได้มากกว่า 50 % ดังแสดงรูปการตอบสนอง และค่าเวลาคงตัว (Settling Time) ของการแบ่งขนาดสเตปที่ขนาดสูงสุด 372 ไมโครสเตปต่อสเตปปกติได้น้อยที่สุด 20 มิลลิ วินาที (msec) ต่อขนาดหนึ่งไมโครสเตป ขนาดของน้ำหนักสูงสุดที่ใช้ทดสอบประมาณ 500 กรัม ผลของควบคุมแบบระบบวงปิดสำหรับการกระตุ้นแบบไมโครสเตปนี้ สามารถลดการ miss step ได้ และการควบคุม ด้วยฮาร์ดแวร์เร็วกว่าซอฟต์แวร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.4 คำแนะนำและแนวทางพัฒนา

ในการทดลองพบปัญหาต่างๆมากมาย ซึ่งจะแบ่งได้เป็นข้อๆดังนี้

1. ความละเอียดของตัววัด หรือออปติคอลเอนโค้ดเดอร์มีผลต่อความละเอียดของมุมสเตปย่อยที่ต้องการถ้าหากตัววัดมีความละเอียดมากก็จะสามารถควบคุมให้มอเตอร์เคลื่อนได้ตามต้องการ
2. ราคาของออปติคอลเอนโค้ดเดอร์มีราคาค่อนข้างสูงมาก หาซื้อค่อนข้างยาก
3. ขนาดของวงจรควบคุมแบบวงปิดส่วนเปรียบเทียบค่าจริงนั้นมีขนาดใหญ่มาก ถ้าหากต้องการแสดงผลให้มีขนาดองศามาก ทำให้ขนาดวงจรนับและวงจรขับ 7 เซกซ์เมนต์ ( 7 segments) มีจำนวนมากตามไปด้วย และ ผลคือต้องเพิ่มวงจรเปรียบเทียบต่อตำแหน่งมากขึ้น
4. วงจรขับแบบกระแสคงที่ หรือ โวลเตจควบคุมกระแสให้แต่ละเฟสมีขนาดใหญ่ เนื่องจากการติดแผ่นระบายความร้อน
5. การควบคุมให้มอเตอร์หมุนต่อเนื่องมีปัญหาในการสวิสช์เมื่อเปลี่ยนเฟสทำให้ขนาดของสเตปย่อยที่รอยต่อควบคุมให้เท่ากันยาก เนื่องจากความละเอียดของเอนโค้ดเดอร์ที่ไม่สัมพันธ์กับตำแหน่งไมโครสเตป และเนื่องจากโครงสร้างภายในสเตปมอเตอร์เอง

## 6.5 แนวทางการปัญหาในการพัฒนาต่อไป

ในการพัฒนาการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลักแตนซ์ได้นี้ หรือสำหรับสเตปปีงมอเตอร์ชนิดอื่นสามารถใช้วิธีการเหล่านี้ได้เช่นกัน ซึ่งเป็นวิธีการพัฒนาสำหรับการควบคุมแบบระบบวงปิดเท่านั้น

1. สำหรับความละเอียด และราคาแพงของเอนโค้ดเดอร์ อาจแก้ไขได้ โดยใช้โพเทนติโอมิเตอร์แบบ สองรอบ และใช้วงจรอินสตรูเม้นแอมป์ไฟเฟอร์ ช่วยปรับความละเอียด หรือใช้วงจรบริดจ์ในการควบคุมความแตกต่างของตำแหน่งแกนโรเตอร์ที่เคลื่อนที่ไป
2. สำหรับวงจรเปรียบเทียบซึ่งใช้วงจรประเภท TTL ทำให้มีจำนวนตัวอุปกรณ์มาก การแก้ไขทำได้โดยใช้อุปกรณ์ประเภทไมโครแกรมได้ เป็นไอซีสำเร็จรูป ควรดูในเรื่องราคาประกอบ
3. ขนาดของตัวแสดงผล สามารถลดได้ด้วยการใช้ dotmatrixc แทน โดยใช้โปรแกรมเข้าช่วย หรือใช้จอคอมพิวเตอร์เป็นตัวแสดงผล เนื่องจากใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมระบบอยู่แล้ว
4. วงจรขับที่ต้องใช้แผ่นระบายความร้อนขนาดใหญ่ สามารถลดขนาดจากการเปลี่ยนวงจรขับเป็นแบบพัลส์วิท หรือลดเพิ่มขนาดความต้านทานในการป้อนกลับแรงดันที่ไหลผ่านขดลวด
5. ใช้โปรแกรมควบคุมช่วยร่วมกับวงจร ซึ่งอาจจะทำให้ตัวโปรแกรมจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และวงจรอาจจะซับซ้อนขึ้น แต่ในส่วนของฮาร์ดแวร์จะมีขนาดเล็กลง
6. สามารถนำหลักการทำงานและวงขับไปใช้พัฒนากับสเตปมอเตอร์ชนิดอื่น หรือกับดีซีมอเตอร์ได้

## 6.6 การนำไปประยุกต์ใช้กับงานอื่น

การนำไปประยุกต์ใช้งาน สามารถทำได้คือนำไปหมุนจานดาวเทียม เครื่องพล็อตเตอร์ เครื่องปรับตำแหน่ง X-Y สำหรับกล้องจุลทรรศน์ เครื่องเจาะแผ่นปรีน และสำหรับเครื่องที่ต้องการอ้างอิงในเรื่องตำแหน่งที่ต้องการความละเอียดสูงต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

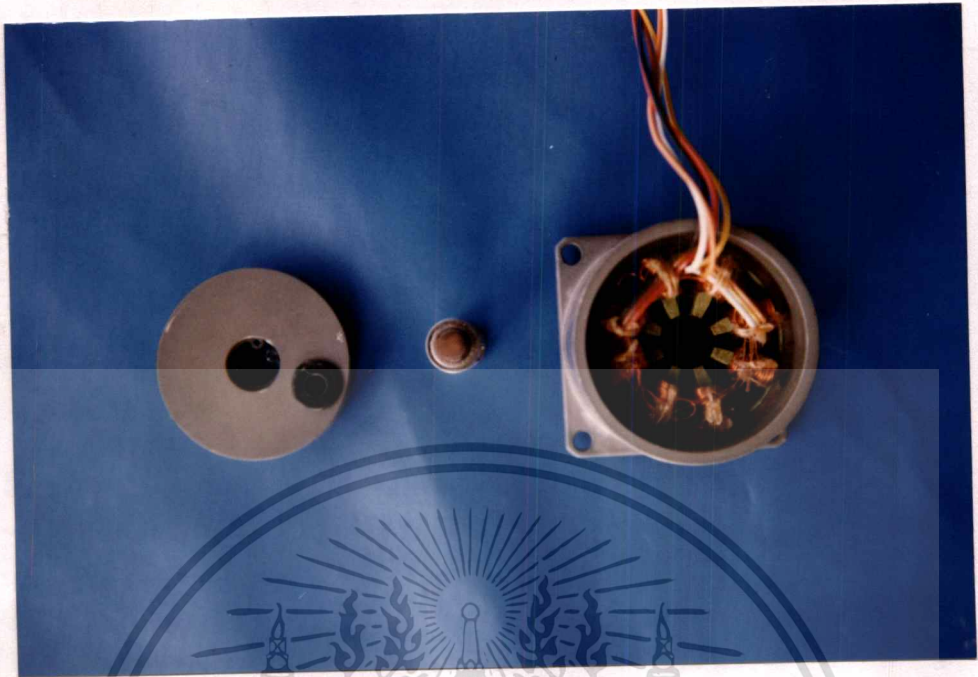
## บรรณานุกรม

- ชาวดิ พิชัยรัตน์ , “การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงจรถัดโดยใช้หลักการของไมโครสเตป”,วิทยานิพนธ์  
มหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย , สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง , ประจำปี  
การศึกษา 2536.
- วุฒิชัย ลังชกุล , “การขับเคลื่อนมอเตอร์ในโหมดไมโครสเตปด้วยสัญญาณที่ได้จากการ ทดสอบ  
สัญญาณโดยตรง” ,วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้า  
คุณทหารลาดกระบัง , ประจำปีการศึกษา 2538
- คณะวิศวกรรมศาสตร์ , “วิศวกรรมลาดกระบัง” , เดือนเมษายน 2532 , ฉบับที่ 4  
B.E.C , “Export edition : Tecnical Sale and Support”
- CARL HELMERS, “Robotics Age in the Beginning”, HAYDEN BOOK  
Company, INC., Hasboruck Heights, New Jersey. 1983.
- MUHAMMED F. TAHMAN, A.N. POO. AND C.S. CHANG, “Approaches to Design of  
ministepping Step Motor Controllers and Their Accuracy Considerations”, IEEE  
Trans. Ind. Electron., vol. IE-32 , NO.3 pp.229-233, AUG. 1985.
- MUHAMMED F. TAHMAN, AUN-NEOW POO, “An Application Oriented Test Procedure for  
Designing Microstepping Step Motor Controls”, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. IE-35  
, NO.4 pp.552-555, NOV. 1988.
- P.P. Acarnley, “STEPPING MOTOR: a guide to modern theory and practice” IEE Control  
Engineering Series 19. Peter Peregrinus Ltd., London, UK., 1982.
- Takashi Kenjio , “Stepping motor an their microprocessor controls “ , Claren Press , Oxford ,  
1986.
- Walter G. Jung , “IC OP-AMP COOKBOOK”, Howard W. Sams & Co., Inc., 1977.

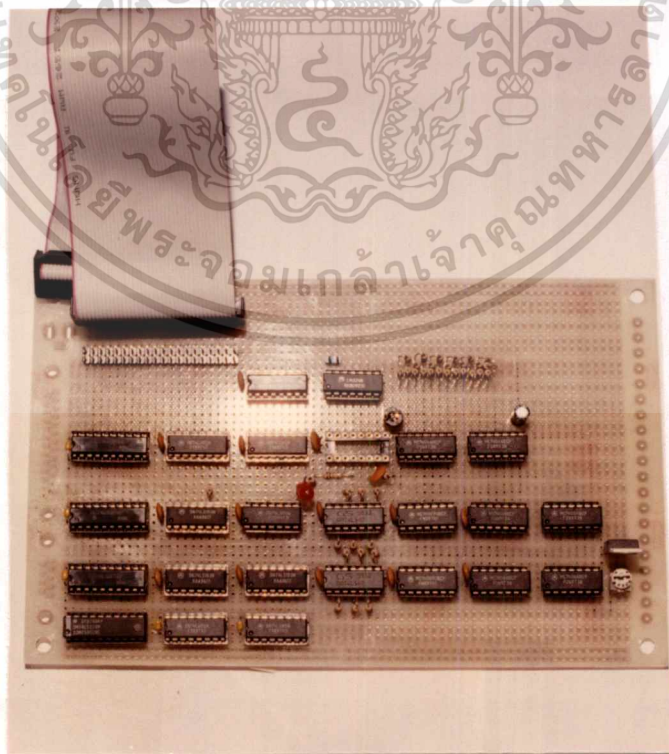


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวสแตมป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ได้ขนาด 15 องศาต่อสแตมป์ที่ใช้ในงานวิจัย

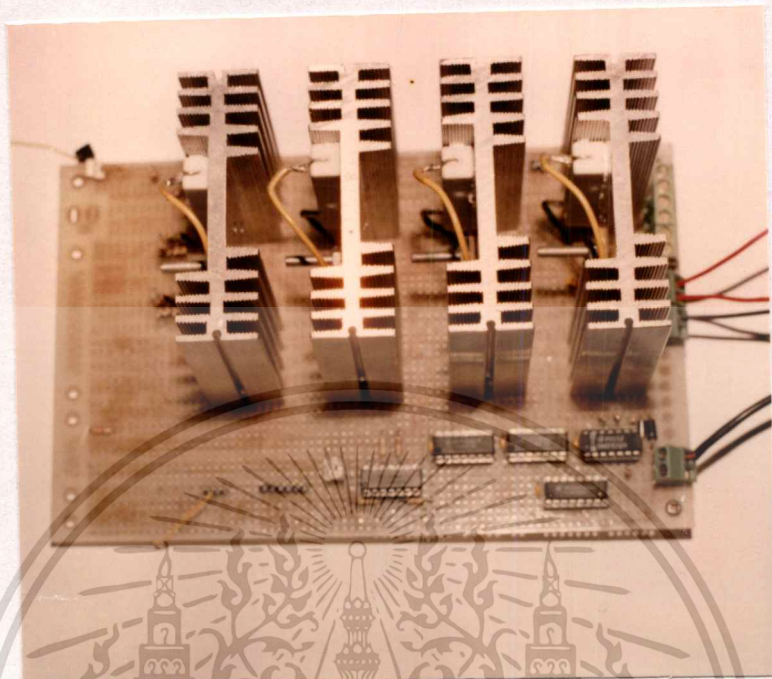


วงจรเปรียบเทียบตำแหน่งไมโครสแตมป์ที่ต้องการกับการเคลื่อนที่จริงของโรเตอร์ สำหรับบอร์ดควบคุมเฟสที่ 1

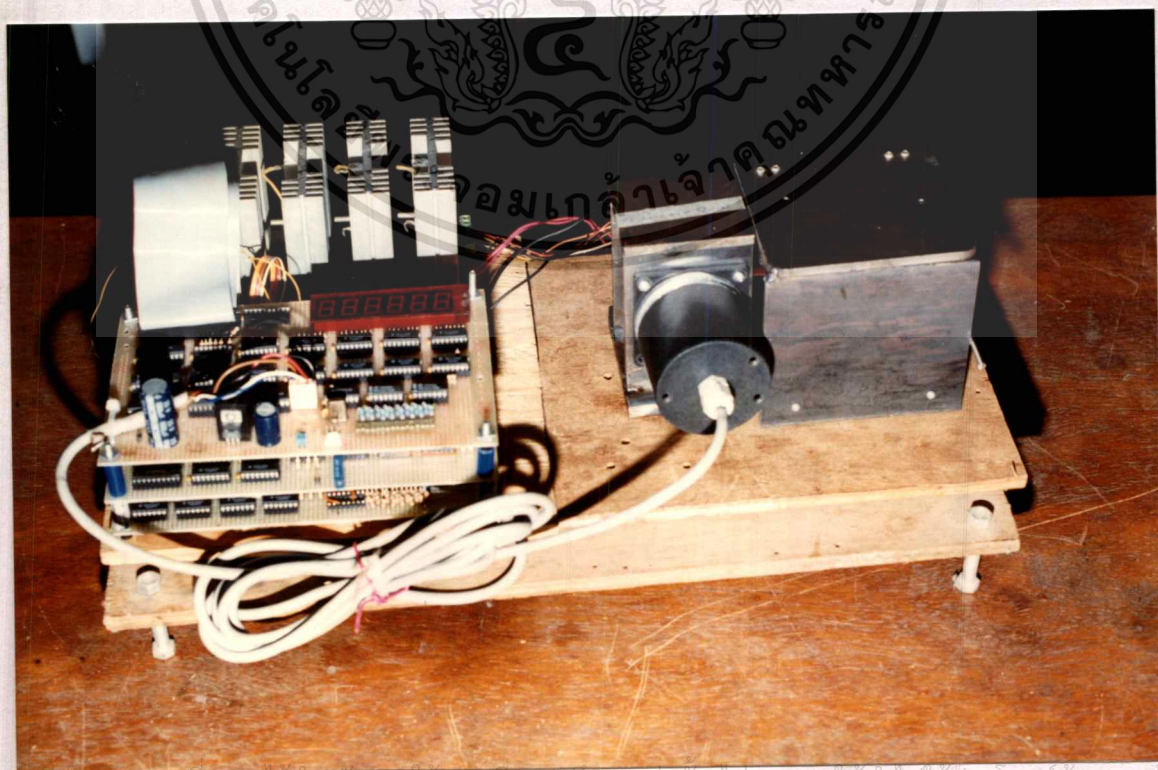


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### วงจรขับสเตปปีงมอเตอร์



ประกอบเป็นชุดทดลองจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/*****/

/*   File name :   812PG.H                               */
/*   Purpose :   Header File of ACL-812PG Library         */
/*   Date :      5/15/1994                               */
/*   Version :   1.0                                     */
/*                                                     */

/*   Copyright ADCLONE Inc. (c) 1994 all right reserved */
/*****/

/*****/

/* Constant Definitions                               */
/*****/

/*----- for card number -----*/
#define   CARD_1   0   /* possible value of card_number */
#define   CARD_2   1

/*----- for DMA channel number-----*/
#define   DMA_CH_1   1   /* possible dma_ch_no of AD... */
#define   DMA_CH_3   3

/*----- for IRQ channel number-----*/
#define   IRQ2      2   /* possible irq_ch_no of AD... */
#define   IRQ3      3
#define   IRQ4      4
#define   IRQ5      5
#define   IRQ6      6
#define   IRQ7      7
#define   IRQ9      9
#define   IRQ11     11
#define   IRQ13     13
#define   IRQ15     15

/*----- for AD gain level-----*/
#define   AD_GAIN_1   0   /* possible ad_gain value */
#define   AD_GAIN_2   1

```

```

#define      AD_GAIN_4      2
#define      AD_GAIN_8      3
#define      AD_GAIN_16     4

/*----- for AD mode -----*/
#define      AD_MODE_0      0      /* External Trig, Software Polling */
#define      AD_MODE_1      1      /* Software Trig, Software Polling */
#define      AD_MODE_2      2      /* Timer Trig, DMA Transfer */
#define      AD_MODE_3      3      /* External Trig, DMA Transfer */
#define      AD_MODE_4      4      /* External Trig, Soft/Int transfer*/
#define      AD_MODE_5      5      /* Soft Trig, Soft/Int transfer*/
#define      AD_MODE_6      6      /* Timer Trig, Soft/Int transfer*/
#define      AD_MODE_7      7      /* N.U. */

/*----- for AD status-----*/
#define      AD_DMA_STOP     0      /* for AD_DMA status */
#define      AD_DMA_RUN      1
#define      AD_INT_STOP     0      /* for AD_INT status */
#define      AD_INT_RUN      1

/*----- for DA, DI and DO -----*/
#define      DA_CH_1         0      /* possible da_ch_no of DA */
#define      DA_CH_2         1
#define      DI_LO_BYTE      0      /* for port_no of DI */
#define      DI_HI_BYTE      1      /* for port_no of DI */
#define      DO_LO_BYTE      0      /* for port_no of DO */
#define      DO_HI_BYTE      1      /* for port_no of DO */

/*----- for Mode of Timer #0-----*/
#define      TIMER_MODE0     0      /* Timer : Terminal Count */
#define      TIMER_MODE1     1      /* Timer : Programmer One-shot */
#define      TIMER_MODE2     2      /* Timer : Frq. Generator */
#define      TIMER_MODE3     3      /* Timer : Square Wave Generator*/
#define      TIMER_MODE4     4      /* Timer : Counter, Soft Trigger*/
#define      TIMER_MODE5     5      /* Timer : Counter, Hard Trigger*/

/*----- Error Number-----*/
#define      NoError         0

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#define Board_No_Init      1
#define Invalid_Board_Number  2
#define Base_Address_Error  3
#define Port_Error         4
#define Invalid_DI_Channel   5
#define Invalid_DA_Channel   6
#define Invalid_Timer_Value  7
#define Invalid_Timer_Mode   8
#define Invalid_AD_Channel   9
#define Invalid_AD_Gain     10
#define Invalid_Mode        11
#define Invalid_IRQ_Channel  12
#define Invalid_DMA_Channel  13
#define AD_Aquire_Time_Out   14
#define AD_DMA_Not_Set      15
#define AD_INT_Not_Set      16

/*****
/* Functions Decalarations
*****/
/*****
/*----- Initialization -----*/
extern int _812_Initial(int card_number,int base_address);
extern int _812_Switch_Card_No(int card_number);

/*----- Digital Input -----*/
extern int _812_DI(int port_no,unsigned char *data);
extern int _812_DI_Channel(int di_ch_no,unsigned int *data);

/*----- Digital Output -----*/
extern int _812_DO(int port_no,unsigned char data);

/*----- DA -----*/

```

```

extern int _812_DA(int ch_no,unsigned int data);

/*----- AD -----*/
extern int _812_AD_Set_Channel(int ad_ch_no);
extern int _812_AD_Set_Gain(int ad_gain);
extern int _812_AD_Set_Mode(int ad_mode);
extern int _812_AD_Soft_Trig(void);
extern int _812_AD_Aquire(int *ad_data);
extern int _812_CLR_IRQ(void);

extern int _812_AD_DMA_Start(int ad_ch_no,int ad_gain,int dma_ch_no,int irq_no,int
count,int *ad_buffer,int c1,int c2);
extern int _812_AD_DMA_Status(int *status,int *count);
extern int _812_AD_DMA_Stop(int *count);

extern int _812_AD_INT_Start(int ad_ch_no,int gain,int irq_no,int count,int *ad_buffer,int
c1,int c2);
extern int _812_AD_INT_Status(int *status,int *count);
extern int _812_AD_INT_Stop(int *count);
/*----- Timer -----*/
extern int _812_AD_Timer(int c1,int c2);
extern int _812_TIMER_Start(int timer_mode,unsigned int c0);
extern int _812_TIMER_Read(unsigned int *counter_value);
extern int _812_TIMER_Stop(unsigned int *counter_value);

```

```

/*****/
/*   File name :   การควบคุมเบรระบบเปิดใหม่ดไมโครสเตป โดยการประมาณค่าการเส
อ้างอิงแบบสัญญาณชายน์                                     */
/*   Purpose :   ควบคุมการเคลื่อนที่เป็นไมโครสเตป                                     */
/*   Date   :   1998                                       */
/*   Version :   1.0                                       */
/*   โปรแกรมโดย พิมพ์พิชญ์สร แจ่มแก้ว                                       */
/*****/

#include<stdio.h>
#include<dos.h>
#include<conio.h>
#include<stdlib.h>
#include"c:\step_thy\812pg.c"
#include<math.h>
main() // 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13
14 15 16
{
    char RET = 0x0d;
    char LF  = 0x0a;
    unsigned int RESET_EN = 0x28;
    unsigned int START_EN = 0x38;
    unsigned int POINT_LOW = 0x3e; // all _up for #1 borad
    unsigned int LOW_BYTE_UP = 0x38;
    unsigned int HIGH_BYTE_UP = 0x39;
    unsigned int LOAD_COUNT_UP = 0x3a;
    unsigned int POINT_HIGH = 0x3f; // all _down for #1 borad
    unsigned int LOW_BYTE_DOWN = 0x3b;
    unsigned int HIGH_BYTE_DOWN = 0x3c;
    unsigned int LOAD_COUNT_DOWN = 0x3d;
    unsigned int EN_CLK_UP = 0x30;
    unsigned int EN_CLK_TWO_PH = 0x10; // open 2 ph clock
    unsigned int EN_CLK_DOWN = 0x18;
    unsigned int DI_CLK_UP = 0x38; //closed clock 2 ph

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

unsigned int DI_CLK_DOWN = 0x3b;
unsigned int EXCITE0 = 0x00; //excited phase 1 and 2
unsigned int EXCITE1 = 0x40; //excited phase 2 and 3
unsigned int EXCITE2 = 0x80; //excited phase 3 and 4
unsigned int EXCITE3 = 0xC0; //excited phase 4 and 1
unsigned int i,BUF,HIGH_BUF,LOW_BUF,DELAY,HIGH_BUF1,LOW_BUF1;
double j,k;
int BUFFER,err,data;
unsigned char ENDATA;//read data of encoder
clrscr();
if(_812_Initial(CARD_1,0x0320)!=NoError)
    printf("ACL-812PG Initialization Error\n");

_812_DO(DO_HI_BYTE,(LOW_BYTE_DOWN | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x0FF);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(HIGH_BYTE_DOWN | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x0F);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(POINT_LOW | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(POINT_HIGH | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(LOAD_COUNT_DOWN | EXCITE1));
_812_DO(DO_HI_BYTE,(LOW_BYTE_UP | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(HIGH_BYTE_UP | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(LOAD_COUNT_UP | EXCITE1));
_812_DO(DO_HI_BYTE,(RESET_EN | EXCITE1));
printf("Any key to start system\n");
getch();
for (j=0.0;j<=90.0;j=j+1.40625 ) //45=2step,22.5=4step,
{
    k=378.0*sin((j*3.141592654*2)/360.0); //11.25=8step,5.625=16step

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    BUF=abs((int)k);
    LOW_BUF = BUF & 0x0ff;          //2.8125=32step,1.40625=64step
    HIGH_BUF = (BUF >> 8) & 0x0ff;
    _812_DO(DO_HI_BYTE,(POINT_LOW | EXCITE1));
//0.703125=128step,0.3515625=256step
    _812_DO(DO_LO_BYTE,LOW_BUF);
    _812_DO(DO_HI_BYTE,(POINT_HIGH | EXCITE1)); //0.036=386step
    _812_DO(DO_LO_BYTE,HIGH_BUF);
    _812_DO(DO_HI_BYTE,(EN_CLK_TWO_PH | EXCITE1));
    delay(250);
}
getch();
_812_DO(DO_HI_BYTE,(RESET_EN | EXCITE1));
_812_DO(DO_HI_BYTE,(LOW_BYTE_UP | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(HIGH_BYTE_UP | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(LOAD_COUNT_UP | EXCITE1));
_812_DO(DO_HI_BYTE,(LOW_BYTE_DOWN | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(HIGH_BYTE_DOWN | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(POINT_HIGH | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(LOAD_COUNT_DOWN | EXCITE1));
_812_DO(DO_HI_BYTE,(RESET_EN | EXCITE1));
    delay(1);
return;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/*****/
/*   File name :   การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบเปิดในโหมดไมโครสเตป   */
/*   โดยการประมาณค่ากระแสอ้างอิงแบบสัญญาณลิเนียร์   */
/*   Purpose :   ควบคุมการเคลื่อนที่เป็นไมโครสเตป   */
/*   Date :   1998   */
/*   Version :   1.0   */
/*   โปรแกรมโดย   พิมพ์พิชญ์สร   แก้มแก้ว   */
/*****/

```

```

#include<stdio.h>
#include<dos.h>
#include<conio.h>
#include<stdlib.h>
#include"c:\step_thy\812pg.c"
#include<math.h>
main()
14 15 16
{
    char RET = 0x0d;
    char LF  = 0x0a;
    unsigned int board_down[128],board_up[128];
    unsigned int RESET_EN = 0x28;
    unsigned int START_EN = 0x38;
    unsigned int POINT_LOW = 0x3e;// all _up for #1 borad
    unsigned int LOW_BYTE_UP = 0x38;
    unsigned int HIGH_BYTE_UP = 0x39;
    unsigned int LOAD_COUNT_UP = 0x3a;
    unsigned int POINT_HIGH = 0x3f; // all _down for #1 borad
    unsigned int LOW_BYTE_DOWN = 0x3b;
    unsigned int HIGH_BYTE_DOWN = 0x3c;
    unsigned int LOAD_COUNT_DOWN = 0x3d;
    unsigned int EN_CLK_UP = 0x30;
    unsigned int EN_CLK_TWO_PH = 0x10; // open 2 ph clock
    unsigned int EN_CLK_DOWN = 0x18;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

unsigned int DI_CLK_UP = 0x38; //closed clock 2 ph
unsigned int DI_CLK_DOWN = 0x3b;
unsigned int EXCITE0 = 0x00; //excited phase 1 and 2
unsigned int EXCITE1 = 0x40; //excited phase 2 and 3
unsigned int EXCITE2 = 0x80; //excited phase 3 and 4
unsigned int EXCITE3 = 0xC0; //excited phase 4 and 1
unsigned int i,j,BUF,HIGH_BUF,LOW_BUF,DELAY,HIGH_BUF_DOWN,
                LOW_BUF_DOWN,HIGH_BUF_UP,LOW_BUF_UP,PH1,PH2;
int BUFFER,err,data;
unsigned char ENDATA;//read data of encoder
clrscr();
if(_812_Initial(CARD_1,0x0320)!=NoError)
    printf("ACL-812PG Initialization Error\n");
_812_DO(DO_HI_BYTE,(LOW_BYTE_DOWN | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0xFF);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(HIGH_BYTE_DOWN | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x0F);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(POINT_LOW | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(POINT_HIGH | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(LOAD_COUNT_DOWN | EXCITE1));
_812_DO(DO_HI_BYTE,(LOW_BYTE_UP | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(HIGH_BYTE_UP | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(LOAD_COUNT_UP | EXCITE1));
_812_DO(DO_HI_BYTE,(RESET_EN | EXCITE1));
    printf("Any key to start system\n");
_812_DO(DO_HI_BYTE,(START_EN | EXCITE1));
PH1=0xFFFF;
PH2=0X000;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

for (i=0;i<=256;i++)
{
    LOW_BUF_DOWN = PH1 & 0x0ff;
    HIGH_BUF_DOWN = (PH1 >> 8) & 0x0ff;
    LOW_BUF_UP    = PH2 & 0X0FF;
    HIGH_BUF_UP   = (PH2 >> 8) & 0X0FF;
    _812_DO(DO_HI_BYTE,(LOW_BYTE_DOWN | EXCITE1));
    _812_DO(DO_LO_BYTE,LOW_BUF_DOWN);
    _812_DO(DO_HI_BYTE,(HIGH_BYTE_DOWN | EXCITE1));
    _812_DO(DO_LO_BYTE,HIGH_BUF_DOWN);
    _812_DO(DO_HI_BYTE,(LOW_BYTE_UP | EXCITE1));
    _812_DO(DO_LO_BYTE,LOW_BUF_UP);
    _812_DO(DO_HI_BYTE,(HIGH_BYTE_UP | EXCITE1));
    _812_DO(DO_LO_BYTE,HIGH_BUF_UP);
    _812_DO(DO_HI_BYTE,(LOAD_COUNT_UP | EXCITE1));
    _812_DO(DO_HI_BYTE,(LOAD_COUNT_DOWN | EXCITE1));
    delay(75);
    PH1 = PH1-0X00F;
    PH2 = PH2+0X00F;
}
_812_DO(DO_HI_BYTE,(LOW_BYTE_UP | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(HIGH_BYTE_UP | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(LOAD_COUNT_UP | EXCITE1));
_812_DO(DO_HI_BYTE,(LOW_BYTE_DOWN | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(HIGH_BYTE_DOWN | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(LOAD_COUNT_DOWN | EXCITE1));
_812_DO(DO_HI_BYTE,(RESET_EN | EXCITE1));

return;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

/*****/
/*   File name :   การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบเปิดในโหมดไมโครสเตป   */
/*   โดยการเปรียบเทียบค่าจริง   */
/*   Purpose :   ควบคุมการเคลื่อนที่เป็นไมโครสเตปที่มีขนาดไมโครสเตปเท่ากันทุกตำแหน่ง   */
/*   Date :   1998   */
/*   Version :   1.0   */
/*   โปรแกรมโดย   พิมพ์พิชญ์สร   แจ่มแก้ว   */
/*****/

#include<stdio.h>
#include<dos.h>
#include<conio.h>
#include<stdlib.h>
#include"c:\step_thy\812pg.c"
#include<math.h>
main() // 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13
14 15 16
{
    char RET = 0x0d;
    char LF = 0x0a;
    unsigned int RESET_EN = 0x28;
    unsigned int START_EN = 0x38;
    unsigned int POINT_LOW = 0x3e; // all _up for #1 borad
    unsigned int LOW_BYTE_UP = 0x38;
    unsigned int HIGH_BYTE_UP = 0x39;
    unsigned int LOAD_COUNT_UP = 0x3a;
    unsigned int POINT_HIGH = 0x3f; // all _down for #1 borad
    unsigned int LOW_BYTE_DOWN = 0x3b;
    unsigned int HIGH_BYTE_DOWN = 0x3c;
    unsigned int LOAD_COUNT_DOWN = 0x3d;
    unsigned int EN_CLK_UP = 0x30;
    unsigned int EN_CLK_TWO_PH = 0x10; // open 2 ph clock
    unsigned int EN_CLK_DOWN = 0x18;
    unsigned int DI_CLK_UP = 0x38; //closed clock 2 ph

```

```

unsigned int DI_CLK_DOWN = 0x3b;
unsigned int EXCITE0 = 0x00; //excited phase 1 and 2
unsigned int EXCITE1 = 0x40; //excited phase 2 and 3
unsigned int EXCITE2 = 0x80; //excited phase 3 and 4
unsigned int EXCITE3 = 0xC0; //excited phase 4 and 1
unsigned int i,j,BUF,HIGH_BUF,LOW_BUF,DELAY,HIGH_BUF_DOWN,
        LOW_BUF_DOWN,HIGH_BUF_UP,LOW_BUF_UP;
int BUFFER,err,data;
unsigned char ENDDATA;//read data of encoder
clrscr();
if(_812_Initial(CARD_1,0x0320)!=NoError)
    printf("ACL-812PG Initialization Error\n");

_812_DO(DO_HI_BYTE,(LOW_BYTE_DOWN | EXCITE1));
    _812_DO(DO_LO_BYTE,0x0FF);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(HIGH_BYTE_DOWN | EXCITE1));
    _812_DO(DO_LO_BYTE,0x0F);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(POINT_LOW | EXCITE1));
    _812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(POINT_HIGH | EXCITE1));
    _812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(LOAD_COUNT_DOWN | EXCITE1));
    _812_DO(DO_HI_BYTE,(LOW_BYTE_UP | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
    _812_DO(DO_HI_BYTE,(HIGH_BYTE_UP | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
    _812_DO(DO_HI_BYTE,(LOAD_COUNT_UP | EXCITE1));
_812_DO(DO_HI_BYTE,(RESET_EN | EXCITE1));
    printf("Any key to start system\n");
    getch();
for (i=0x00c;i<=0x180;i=i+ 0x00c)
    {

```

```
        LOW_BUF = i & 0x0ff;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

HIGH_BUF = (i >> 8) & 0x0ff;
_812_DO(DO_HI_BYTE,(POINT_LOW | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,LOW_BUF);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(POINT_HIGH | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,HIGH_BUF);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(EN_CLK_TWO_PH | EXCITE1));
delay(280);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(DI_CLK_UP | EXCITE1));

}

/*
_812_AD_Set_Channel(1);
_812_AD_Set_Gain(AD_GAIN_1);
_812_AD_Set_Mode(AD_MODE_1);
if(( err = _812_AD_Aquire(&data)) !=NoError)
{
    printf("Error No.=%d\n",err);
}
else {
    data = (data << 1) & 0x0fff;
    data = data;
    LOW_BUF_DOWN = data & 0x0ff;
    HIGH_BUF_DOWN = (data >> 8) & 0x0ff;
    printf("data ph2 = %x ",data);
}

_812_AD_Set_Channel(2);
_812_AD_Set_Gain(AD_GAIN_1);
_812_AD_Set_Mode(AD_MODE_1);
if(( err = _812_AD_Aquire(&data)) !=NoError)
{
    printf("Error No.=%d\n",err);
}
else {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

data = (data << 1) & 0x0fff;
data=data;
LOW_BUF_UP = data & 0x0fff;
HIGH_BUF_UP = (data >> 8) & 0x0fff;
printf("data ph2 = %x ",data);

```

```

printf("data ph1 = %x ",data);

```

```

}

```

```

_812_DO(DO_HI_BYTE,(LOW_BYTE_DOWN | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,LOW_BUF_DOWN);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(HIGH_BYTE_DOWN | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,HIGH_BUF_DOWN);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(LOAD_COUNT_DOWN | EXCITE1));
_812_DO(DO_HI_BYTE,(LOW_BYTE_UP | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,LOW_BUF_UP);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(HIGH_BYTE_UP | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,HIGH_BUF_UP);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(LOAD_COUNT_UP | EXCITE1));

DELAY = 500;
_812_DO(DO_HI_BYTE,(POINT_LOW | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x2c);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(POINT_HIGH | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x01);

do {
_812_DO(DO_HI_BYTE,(EN_CLK_TWO_PH | EXCITE1));
delay(1);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(DI_CLK_UP | EXCITE1));
delay(2);
DELAY = DELAY - 3;
_812_DI(DI_LO_BYTE,&LOW_BUF);
}while (LOW_BUF < 0x2A);

// _812_DO(DO_HI_BYTE,(EN_CLK_TWO_PH | EXCITE1));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

delay(DELAY);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(DI_CLK_UP | EXCITE1));
DELAY = 500;
_812_DO(DO_HI_BYTE,(POINT_LOW | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x38);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(POINT_HIGH | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x01);
do {
_812_DO(DO_HI_BYTE,(EN_CLK_TWO_PH | EXCITE1));
delay(1);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(DI_CLK_UP | EXCITE1));
delay(2);
DELAY = DELAY - 3;
_812_DI(DI_LO_BYTE,&LOW_BUF);
}while (LOW_BUF < 0x2F);
// _812_DO(DO_HI_BYTE,(EN_CLK_TWO_PH | EXCITE1));
delay(DELAY);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(DI_CLK_UP | EXCITE1));
DELAY = 500;
_812_DO(DO_HI_BYTE,(POINT_LOW | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x44);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(POINT_HIGH | EXCITE1));
_812_DO(DO_LO_BYTE,0x01);
do {
_812_DO(DO_HI_BYTE,(EN_CLK_TWO_PH | EXCITE1));
delay(1);
_812_DO(DO_HI_BYTE,(DI_CLK_UP | EXCITE1));
delay(2);
DELAY = DELAY - 3;
_812_DI(DI_LO_BYTE,&LOW_BUF);
}while (LOW_BUF < 0x30);
// _812_DO(DO_HI_BYTE,(EN_CLK_TWO_PH | EXCITE1));
delay(DELAY);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        _812_DO(DO_HI_BYTE,(DI_CLK_UP | EXCITE1));
    */
    /*   for (i=0x12C;i<=0x180;i=i+ 0x00c)
        {
            LOW_BUF = i & 0x0ff;
            HIGH_BUF = (i >> 8) & 0x0ff;
            _812_DO(DO_HI_BYTE,(POINT_LOW | EXCITE1));
            _812_DO(DO_LO_BYTE,LOW_BUF);
            _812_DO(DO_HI_BYTE,(POINT_HIGH | EXCITE1));
            _812_DO(DO_LO_BYTE,HIGH_BUF);
            _812_DO(DO_HI_BYTE,(EN_CLK_TWO_PH | EXCITE1));
            delay(500);
            _812_DO(DO_HI_BYTE,(DI_CLK_UP | EXCITE1));
        }
    */
    // getch();
    _812_DO(DO_HI_BYTE,(LOW_BYTE_UP | EXCITE1));
    _812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
    _812_DO(DO_HI_BYTE,(HIGH_BYTE_UP | EXCITE1));
    _812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
    _812_DO(DO_HI_BYTE,(LOAD_COUNT_UP | EXCITE1));
    _812_DO(DO_HI_BYTE,(LOW_BYTE_DOWN | EXCITE1));
    _812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
    _812_DO(DO_HI_BYTE,(HIGH_BYTE_DOWN | EXCITE1));
    _812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
    _812_DO(DO_HI_BYTE,(POINT_HIGH | EXCITE1));
    _812_DO(DO_LO_BYTE,0x00);
    _812_DO(DO_HI_BYTE,(LOAD_COUNT_DOWN | EXCITE1));
    _812_DO(DO_HI_BYTE,(RESET_EN | EXCITE1));
    delay(1);
    return;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การควบคุมตำแหน่งของสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิด ในโหมดไมโครสเตป

## The closed-loop position control of stepping motors in microstep excitation mode

พิมพ์พิชญ์สร แจ่มแก้ว โยธิน เปรมปราณีรัชต์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอในผลงานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ ด้วยการกำหนดค่าเซ็ทพอยท์มาเก็บไว้ก่อนล่วงหน้าทุกๆไมโครสเตป จากนั้นจึงนำมาเปรียบเทียบกับค่าจริงของการเคลื่อนที่ไปด้วยวงจรมอเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ โดยอาศัยค่าการเคลื่อนที่จริงที่เกิดขึ้นจากการป้อนกลับมาจากออปติคัลเอนโคเดอร์ สำหรับตำแหน่งอ้างอิงถูกส่งมาจากไมโครคอมพิวเตอร์ ผ่านทางการ์ดอินเตอร์เฟซระบบ เพื่อลดปัญหาการสั่นหรือการเกิดโอเวอร์ชูทในการเคลื่อนที่เป็นสเตปของตัวโรเตอร์ในสเตปป์มอเตอร์ และสำหรับการสเตปป์กอดิจิตอลที่มีขนาดใหญ่เกินไปที่จะนำไปใช้งานกับเครื่องมือที่ต้องการความละเอียดสูง เช่น เครื่องอ่านแผ่นบันทึกข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น และเพื่อให้เกิดความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

### Abstract

This paper presents a development of the closed-loop of stepping motors in microstep excitation mode and comparison with actual value interfacing to microcomputer by feedback from optical encoder. Then, it can be used to reduce the over-shoot and precision of rotor movement with high accuracy.

### 1. บทนำ

เป็นการนำหลักการ การควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ใน โหมดไมโครสเตปด้วยระบบฮาร์ดแวร์ ด้วยการกำหนดขนาดของจำนวนสเตปป์ย่อยตามต้องการ ซึ่งได้มีการคำนวณตำแหน่งที่ต้องการเพื่อให้ตำแหน่งไมโครสเตปมีขนาดเท่ากัน โดยให้การเปลี่ยนแปลง

ของกระแสในเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 มีอัตราส่วนเพิ่มขึ้นและลดเป็นสัดส่วนในลักษณะสัญญาณซายน์และลักษณะการนำค่าที่เคลื่อนที่จริงจากแกนโรเตอร์ที่ได้จากออปติคัลเอนโคเดอร์ที่มีความละเอียดสูง นำมาเปรียบเทียบกับค่าไมโครสเตปที่ต้องการทุกๆค่าที่โรเตอร์เคลื่อนที่ไป โดยค่ากระแสได้จากวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลไปเป็นอนาลอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

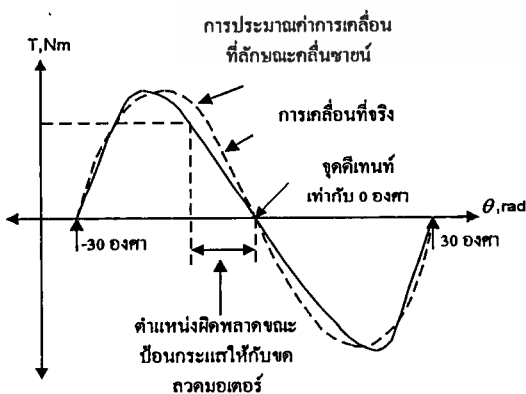
การควบคุมตำแหน่งเป้าหมายมาจากไมโครคอมพิวเตอร์ทางคาร์ดิอินเตอร์เฟส เพื่อให้หัวจรเปรียบเทียบตำแหน่งแกนโรเตอร์เป็นตัวปรับค่าดิจิทัลเป็นอนาลอกให้หัวจรขับจ่ายค่ากระแสแต่ละเฟสของสเตปป์มอเตอร์ตามต้องการ

## 2. หลักการทำงานเบื้องต้น

โดยปกติแล้วสามารถแบ่งชนิดของสเตปป์มอเตอร์ได้ 3 แบบใหญ่ๆด้วยกัน ตามโครงสร้างทางฟิสิกส์ เพื่อเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน และในงานวิจัยนี้ได้เลือกชนิดสเตปป์มอเตอร์แบบแปรค่ารีลัคแตนซ์ เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนเหมาะสำหรับการทำงานในโหมดไมโครสเตปได้เป็นอย่างดี เพราะว่าแกนที่ทำด้วยเหล็กอ่อนหรือเหล็กผสมซิลิกอน จึงทำตัวไม่เป็นแม่เหล็กถาวร ในขณะที่ไม่มีการจ่ายกระแส และง่ายต่อการควบคุมกระแสในแต่ละเฟส

### 2.1 การทำงานในโหมดปกติ

การใช้งานสเตปป์มอเตอร์ที่ขนาดปกติทำได้ โดยการจัดลำดับการจ่ายกระแสให้แก่ขดลวดตามอัตราความต้องการหรือค่าพิคกิด(rated value) ตามโครงสร้างของมอเตอร์ที่ออกแบบไว้ ซึ่งอาจจะเป็นการจ่ายกระแส 1 หรือ 2 เฟสพร้อมกัน ซึ่งขนาดมุมในสเตปปกติจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของมอเตอร์แต่ละชนิดเช่นกัน การหมุนของแกนโรเตอร์ซึ่งอาจจะเป็นทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกาก็ตาม ทำให้เกิดทอร์กที่มุมต่างๆของโรเตอร์และจุดที่มีทอร์กหรือแรงต้านน้อยที่สุดเรียกว่า จุดติเทนท์ หรือจุดสมดุลย์ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงคุณลักษณะทอร์กและจุดติเทนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทอร์กของสเตปป์มอเตอร์

## 2.2 การควบคุมการเคลื่อนที่ในโหมดไมโครสเตป

การเคลื่อนที่ของสเตปป์มอเตอร์ในลักษณะการเคลื่อนที่แบบไมโครสเตป ขึ้นอยู่กับการควบคุมการจ่ายกระแสให้กับขดลวดของมอเตอร์ในลักษณะ 2 เฟสพร้อมๆกันแบบเป็นสัดส่วนกัน ซึ่งลักษณะการควบคุมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ แบบวงเปิด และแบบวงปิด ทั้งสองระบบให้หลักการเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกัน สำหรับทฤษฎีการเคลื่อนที่ซึ่งจะได้นำมากล่าวในที่นี้ เพื่อเป็นตัวแสดงถึงผลตอบสนองในการควบคุม และในการท้าวิจัยได้ใช้สเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลัคแตนซ์ที่มีขนาด 15 องศา และรูปที่ 2 ใช้วิเคราะห์การเคลื่อนที่ตำแหน่งแกนโรเตอร์

$$L_A = L_0 + L \cos 2p\theta \tag{1}$$

$$L_B = L_0 + L \cos 2p(\theta - \lambda) \tag{2}$$

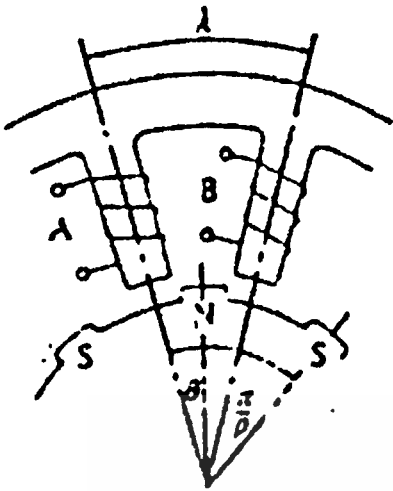
$$M_{AB} = -M_0 + M \cos 2p\left(\theta - \frac{\lambda}{2}\right) \tag{3}$$

- เมื่อ
- $L_A$  = ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเฟส A
  - $L_B$  = ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเฟส B
  - $M_{AB}$  = ค่าความเหนี่ยวนำร่วมของขดลวดเฟส A และเฟส B
  - $p$  = คู่โพลของขดลวด
  - $\theta$  = ตำแหน่งมุมของแกนโรเตอร์ที่หมุนไป
  - $\lambda$  = มุมสเตปของสเตปป์มอเตอร์

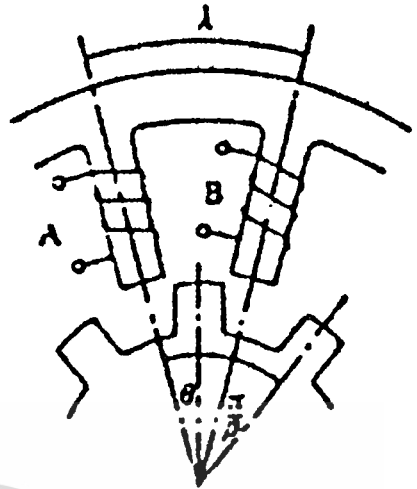
สำหรับเครื่องหมายลบข้างหน้า  $M_0$  แสดงให้เห็นว่ากระแสมีทิศทางเป็นบวกทำให้เกิดฟลักซ์มีทิศทางเป็นลบให้กับขดลวดชุดอื่น ซึ่งจะได้แรงบิด ( $\tau$ ) ที่เกิดจากกระแสในเฟส A และ เฟส B ได้ตามสมการที่ (4)

$$\tau = \frac{1}{2} i_A^2 \frac{dL_A}{d\theta} + \frac{1}{2} i_B^2 \frac{dL_B}{d\theta} + i_A i_B \frac{dM_{AB}}{d\theta} \tag{4}$$

$$= -\left\{ i_A^2 p L \sin 2p\theta + i_B^2 p L \sin 2p(\theta - \lambda) + 2i_A i_B p M \sin 2p\left(\theta - \frac{\lambda}{2}\right) \right\}$$



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 ลักษณะของสเตปป์มอเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์การเคลื่อนที่

(ก) ลักษณะสเตปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์และชนิดแม่เหล็กถาวร

(ข) ลักษณะสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลักแตนซ์

ดังนั้นจะได้สมการในการเคลื่อนที่สำหรับสเตปป์มอเตอร์

$$J \frac{d^2\theta}{dr^2} + D \frac{d\theta}{dt} + i_A^2 pL \sin 2p\theta + i_B^2 pL \sin 2p(\theta - \lambda) + \frac{r(\delta i_A) + (L_0 + L \cos p\lambda) \frac{d(\delta i_A)}{dt} + (M - M_0) \frac{d(\delta i_B)}{dt}}{2pI_0 L \sin p\lambda} \frac{d(\delta\theta)}{dt} - 2i_A i_B pM \sin 2p\left(\theta - \frac{\lambda}{2}\right) = 0 \tag{5}$$

และได้ค่าศักดาไฟฟ้าสำหรับขดลวดทั้งสองคือ สมการที่ (6) และสมการที่ (7) ตามลำดับ

$$V - ri_A - \frac{d(L_{AA}i_A)}{dt} - \frac{d(M_{AB}i_B)}{dt} = 0 \tag{6}$$

$$-ri_B - \frac{d(L_{BB}i_B)}{dt} - \frac{d(M_{AB}i_A)}{dt} = 0 \tag{7}$$

ในการวิเคราะห์มักถูกทำให้เป็นสมการเส้นตรงเพื่อง่ายในการวิเคราะห์ จึงได้ตามสมการที่ (8) ถึงสมการที่ (10)

$$J \frac{d^2(\delta\theta)}{dr^2} + D \frac{d(\delta\theta)}{dt} + 4p^2 I_0^2 (M + L \cos p\lambda)(\delta\theta) + 2pI_0 L \sin p\lambda (\delta i_A - \delta i_B) = 0, \tag{8}$$

$$r(\delta i_B) + (L_0 + L \cos p\lambda) \frac{d(\delta i_B)}{dt} + (M - M_0) \frac{d(\delta i_A)}{dt} - 2pI_0 L \sin p\lambda \frac{d(\delta\theta)}{dt} = 0, \tag{10}$$

ดังนั้นจึงสามารถหาค่ากระแสทั้งสองเฟส ที่ทำให้เกิดแรงบิดระหว่างระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ได้ และจะได้ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของการขับแบบสองเฟสได้ในสมการที่ (12)

$$I_A = -I_B = \frac{2pL_0 L \sin(p\lambda)(s\theta - \theta_i)}{(r + L_v s)} \tag{11}$$

$$\theta(s) = \frac{\left\{ s^2 + \left( \frac{r}{L_v} + \frac{D}{J} \right) s + \frac{r}{L_v} \frac{D}{J} + k_p \omega_m^2 \right\} \theta_i}{s^3 + \left( \frac{r}{L_v} + \frac{D}{J} \right) s^2 + \left\{ \frac{r}{L_v} \frac{D}{J} + \omega_m^2 (1 + k_v) \right\} s + \left( \frac{r}{L_v} \right) \omega_m^2} \tag{12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อค่าของตัวแปรเป็นดังนี้

$$L_v = L_0 + L \cos p\lambda - M + M_0$$

$$K_v = \frac{2L^2 \sin^2 p\lambda}{L_v(M + L \cos p\lambda)}$$

$$\omega_{nv}^2 = \frac{4p^2 I_0^2 (M + L \cos p\lambda)}{J}$$

เมื่อ

$$K_v = \text{ค่าคงที่ของสเตปป์มอเตอร์}$$

$$\omega_{nv} = \text{ความถี่ธรรมชาติของสเตปป์มอเตอร์}$$

$$= \frac{416.66}{32} = 13.02 \quad \text{พัลส์}$$

$$\text{จำนวนพัลส์} = 13 \quad \text{พัลส์/สเตปป์ย่อย} \quad (14)$$

สำหรับรูปที่ 2 ก) เป็นรูปที่ใช้วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของสเตปป์มอเตอร์ใช้สำหรับสเตปป์มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรกับแบบไฮบริดจ์ รูปที่ 2 ข) ใช้สำหรับสเตปป์มอเตอร์ชนิดแปรค่ารีลักแตนซ์ จากรูปที่ 2 ข) พิจารณาสมการที่ (11) จะเห็นว่าถ้าหากต้องการควบคุมตำแหน่งของแกนโรเตอร์ สามารถทำได้โดยการควบคุมให้กระแสในเฟส A และเฟส B กระตุ้นให้มีอัตราการเพิ่มและลดของกระแสเป็นสัดส่วนกัน เมื่อรวมกระแสทั้งสองเฟสเข้าด้วยกันแล้วจะเท่ากับกระแสหนึ่งเฟสที่อัตราเต็มพิกัดของมอเตอร์ ดังนั้นในการควบคุมตำแหน่งไมโครสเตปป์ใช้หลักการควบคุมแบบวงเปิดเป็นการประมาณค่ากระแสแบบลิเนียร์และซายน์ แบบวงปิดใช้หลักการวิเคราะห์หาค่าเป็นตัวอ้างอิงในการออกแบบวงจรขับสเตปป์มอเตอร์

### 3. การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิดในโหมดไมโครสเตป

จุดประสงค์หลักของระบบการควบคุมแบบวงปิดคือควบคุมให้แกนโรเตอร์ของสเตปป์มอเตอร์เคลื่อนที่เป็นไมโครสเตปตามที่ต้องการ โดยให้การเคลื่อนที่ของแกนโรเตอร์เป็นลักษณะเป็นสเตปป์ย่อยและมีขนาดตำแหน่งไมโครสเตปเท่ากับทุกค่า ซึ่งมีหลักการทำงานคือ กำหนดตำแหน่งแกนโรเตอร์จากตัววัดตำแหน่งคือเอนโค้ดเดอร์ สำหรับไมโครสเตปย่อยแต่ละสเตปป์ย่อยสามารถกำหนดได้จากขนาดสเตปป์ปกติ หารด้วยตำแหน่งไมโคร

สเตปป์ที่ต้องการ สำหรับสเตปป์มอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 15 องศาต่อสเตปป์ปกติ และใช้เอนโค้ดเดอร์เป็นตัวตรวจวัดขนาดมุมในการเคลื่อนที่ที่มีขนาด 10000 พัลส์ต่อรอบ เพราะฉะนั้น 1 สเตปป์ปกติจะมีจำนวนพัลส์เท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{ตำแหน่งเอนโค้ดเดอร์} &= \frac{10000}{360^\circ} \times 15^\circ \quad \text{พัลส์/สเตปป์} \\ &= 416.666 \quad \text{พัลส์/สเตปป์} \quad (13) \end{aligned}$$

เมื่อต้องการแบ่งเป็น 32 สเตปป์ย่อย จะได้จำนวนพัลส์ต่อหนึ่งสเตปป์ย่อย

$$= \frac{416.66}{32} = 13.02 \quad \text{พัลส์}$$

$$\text{จำนวนพัลส์} = 13 \quad \text{พัลส์/สเตปป์ย่อย} \quad (14)$$

ในการกำหนดตำแหน่งเอนโค้ดเดอร์ต้องคำนึงถึงค่าการผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ การผิดพลาดในการเคลื่อนที่เนื่องจากคุณสมบัติโครงสร้างภายในของตัวสเตปป์มอเตอร์ ทำให้ในการเคลื่อนที่จริงของแกนโรเตอร์จะทำให้เกิดมุมผิดพลาด (error) ลักษณะที่ 2 เป็นการผิดพลาดเนื่องจากตัววัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนโรเตอร์ คือ ออปติคอลลเอนโค้ดเดอร์มีขนาดจำนวนพัลส์ไม่เท่ากับจำนวนไมโครสเตปป์ย่อยที่ต้องการ ดังได้แสดงในสมการที่ (13) ถึง สมการที่ (14) จึงประมาณค่าได้เป็น 12 พัลส์ต่อตำแหน่งไมโครสเตปป์ 32 สเตปป์ต่อสเตปป์ปกติทำให้เกิดมุมผิดพลาดไป 32 พัลส์เกิดมุมผิดพลาดไปคำนวณได้จากสมการที่ (15)

$$\frac{360}{10,000} = 0.036^\circ = 0.036 \times 32 = 1.152^\circ \quad (15)$$

เพราะฉะนั้นค่ามุมสูงสุดที่แบ่งไมโครสเตปป์ได้จะเป็น  $15 - 1.152 = 13.848$  องศา สำหรับขนาดสเตปป์ปกติ 15 องศา เมื่อนับรวมจำนวนพัลส์ของไมโครสเตปป์รวมกันจะเท่ากับ 387 พัลส์ต่อ 13.848 องศา ในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ เป็นการควบคุมแบบระบบวงปิดคงได้อธิบายมาแล้วข้างต้น โดยเมื่อคำนวณหาค่าตำแหน่งไมโครสเตปป์ที่ต้องการได้แล้วถูกแปลงค่าเป็นเชิงตัวเลข ด้วยโปรแกรมบนเครื่องคอมพิวเตอร์ และส่งผ่านค่าออกไปทางวงจร ดิจิตอลทูล

อนาล็อกที่มีความละเอียด 12 bits ผ่านการ์ดเชื่อมต่อระหว่างตัวคอมพิวเตอร์และวงจรมอเตอร์ เพื่อไปควบคุมการจ่ายกระแสให้กับขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ในเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 ต่อไป ซึ่งถ้าหากการเคลื่อนที่ของแกนสเตปป์มอเตอร์มีค่า มากกว่าหรือน้อยกว่าค่าที่กำหนดซึ่งเป็นจำนวนพัลส์ วงจรเปรียบเทียบกับตำแหน่งของมอเตอร์ จะส่งผลการเปรียบเทียบไปยังวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกและส่งค่าให้กับวงจรขับเพื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดทั้งสองเฟสในทิศทางตรงข้ามกัน ทำการชดเชยจนกระทั่งแกนโรเตอร์เข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมายได้ อย่างไรก็ตามค่ากระแสรวมระหว่างเฟสที่ 1 และเฟสที่ 2 จะมีค่าประมาณกระแสเฟส (rating current) ทุกตำแหน่ง ไมโครสเตปเป็นไปตามทฤษฎีตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานได้ในรูปที่ 3

ความแตกต่างอย่างชัดเจน ในการควบคุมแบบระบบวงปิด ให้ผลตอบสนองดีกว่าในระบบวงเปิด

5. สรุป

จากการทดลองในการควบคุมตำแหน่งของสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิดด้วยระบบฮาร์ดแวร์ สามารถควบคุมตำแหน่งของแกนโรเตอร์ได้ตามต้องการและมีขนาดไมโครสเตปเท่ากันมีความเร็วในการทำงานสูงสเตปป์มอเตอร์ทำงานมีประสิทธิภาพดีมาก เมื่อเทียบกับการควบคุมแบบระบบวงเปิดด้วยการวัดผลตอบสนองของแกนโรเตอร์ แต่ระบบวงปิดจะมีราคาแพงกว่าเนื่องจากออปติคัลเลนไอคิเดออร์ วงจรขับสำคัญกับการควบคุมกระแสในขดลวดของสเตปป์มอเตอร์มาก

6. เอกสารอ้างอิง

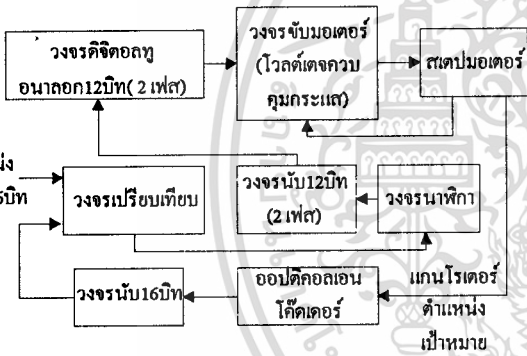
[1] ชาวดิ พิชัยรัตน์, "การควบคุมสเตปมอเตอร์แบบวงปิดโดยใช้หลักการของไมโครสเตป", วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ประจำปีการศึกษา 2536.

[2] วุฒิชัย สังข์กุล, "การขับสเตปป์มอเตอร์ในโหมดไมโครสเตปด้วยสัญญาณที่ได้จากการทดสอบโดยตรง", วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ประจำปีการศึกษา 2538.

[2] T. Kenjo, "Stepping motor and their microprocessor controls", Claren Press, Oxford, 1986.

[3] M. F.Rahman, A.N. Poo and C.S. Chang, "Approaches to design of ministeping stepmotor controller and their accuracy cosiderations", IEEE, Trans. on Industrial Electronics, Vol.IE-32, No.3, PP.229-233, Aug.1985

[4] M. F.Rahman, A.N. Poo and C.S. Chang, "Application Oriented Test Procedure for designing microstepping stepper motor controllers", IEEE, Trans. on Industrial Electronics, Vol.35, No.4, November 1988.

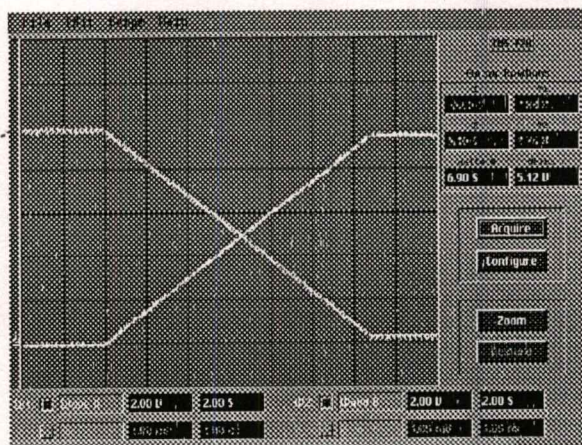
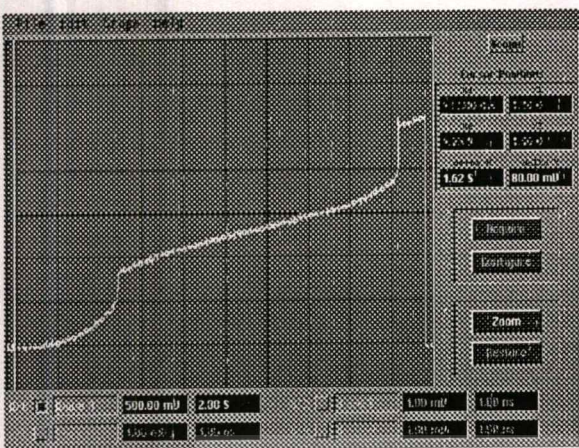


รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบ

4. ผลการทดลอง

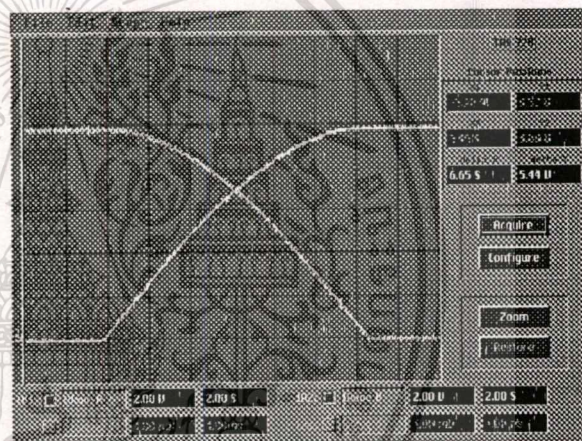
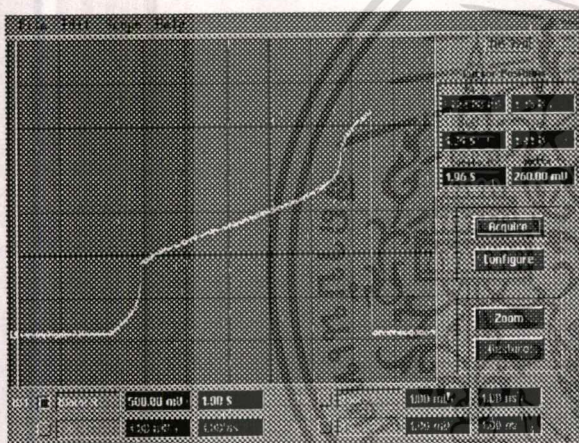
จากการทดลองระบบสามารถควบคุมผลตอบสนองตำแหน่งไมโครสเตปย่อยได้ตามความละเอียดของตัววัด ซึ่งผลการวิจัยได้ทดลองแบ่งสเตปย่อยสูงสุดได้ 128 สเตปย่อยต่อสเตปปกติขนาด 15 องศา ตามความละเอียดของออปติคัลเลนไอคิเดออร์และสามารถควบคุมตำแหน่งไมโครสเตปมีขนาดเท่ากันและถูกต้อง แสดงผลการทดลองในรูปที่ 4 ถึงรูปที่ 9 เป็นผลการตอบสนองโดยวัดตำแหน่งแกนโรเตอร์หมุนเป็นไมโครสเตป จากการประมาณค่ากระแสเป็นลักษณะสัญญาณชานน์(ระบบวงเปิด) เปรียบเทียบกับผลการเคลื่อนที่แบบระบบวงปิดและเป็นการทดลองของการควบคุมแบบระบบวงปิด จะเห็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



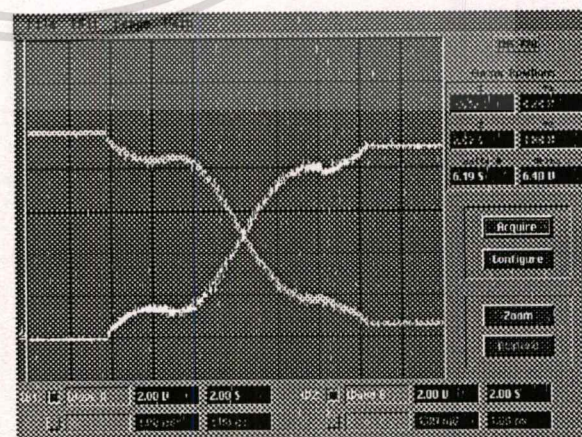
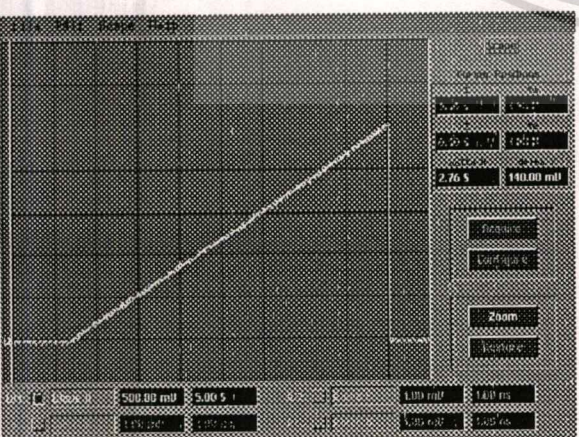
รูปที่ 4 ตำแหน่งแกนโรเตอร์ที่การประมาณค่ากระแสแบบลิเนียร์ขนาดไมโครสเตป 1/128 เท่าของสเตป

รูปที่ 7 กระแสที่จ่ายให้กับขดลวดเฟสที่ 1 และ 2 แบบลิเนียร์ขนาดไมโครสเตป 1/128 เท่าของสเตป



รูปที่ 5 ตำแหน่งแกนโรเตอร์ ที่การประมาณค่ากระแสแบบซายน์ขนาดไมโครสเตป 1/128 เท่าของสเตป

รูปที่ 8 กระแสที่จ่ายให้กับขดลวดเฟสที่ 1 และ 2 แบบซายน์ขนาดไมโครสเตป 1/128 เท่าของสเตป



รูปที่ 6 ตำแหน่งแกนโรเตอร์ในระบบวงปิดด้วยขนาดโมโครสเตป 1/128 เท่าของสเตปปกติ

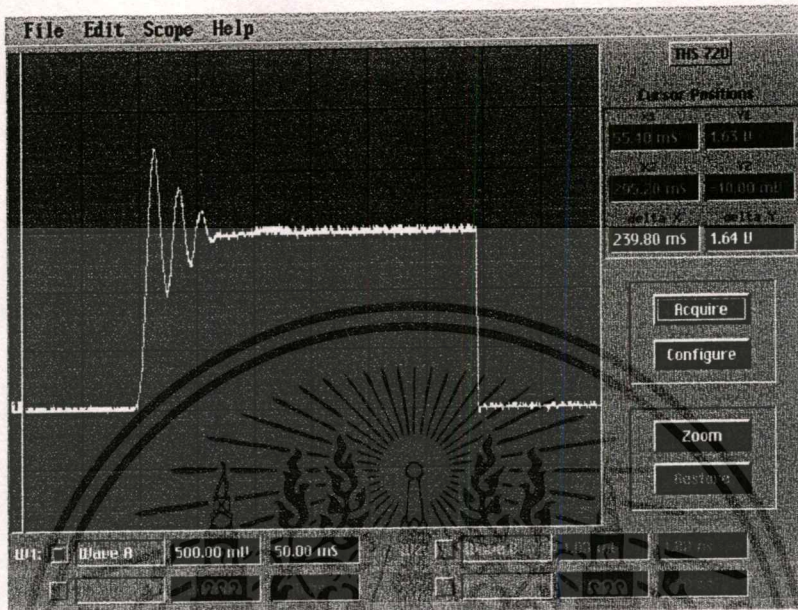
รูปที่ 9 กระแสที่จ่ายให้กับขดลวดเฟสที่ 1 และ 2 ในระบบวงปิดขนาด ไมโครสเตป 1/128 เท่าของสเตป

ไม่ว่าการณ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.  
**ผลการทดลองของการตอบสนองของการควบคุมสเตรปปีมोटอร์แบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วย  
 การเปรียบเทียบค่าจริงเพิ่มเติมในกรณีขับโหลด**

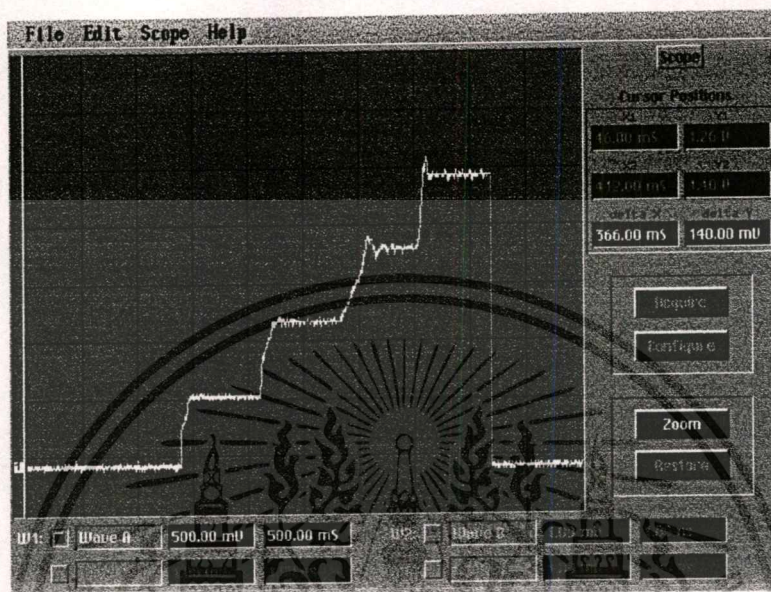
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตอบสนองของการควบคุมสแตปีงแบบสแตปปกติในการขับแบบสองเฟส  
เพิ่มเติมในกรณีขับโหลด

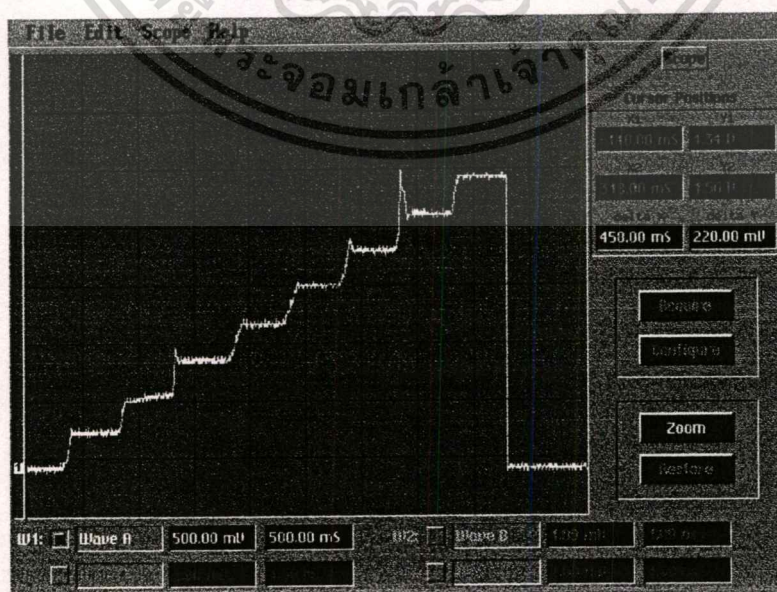


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการตอบสนองของแกนโรเตอร์ จากการควบคุมสเต็ปมอเตอร์แบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเต็ปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง ที่มีขนาดไมโครสเต็ปเท่ากับ  $1/4$  เท่าของสเต็ปปกติ ในขณะที่ทำการขับโหลด

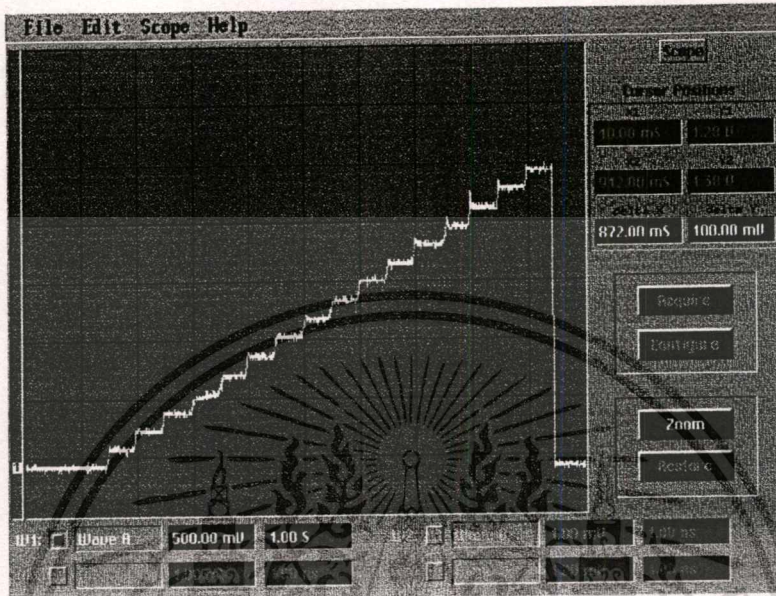


ผลการตอบสนองของแกนโรเตอร์ จากการควบคุมสเต็ปมอเตอร์แบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเต็ปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง ที่มีขนาดไมโครสเต็ปเท่ากับ  $1/8$  เท่าของสเต็ปปกติ ในขณะที่ทำการขับโหลด

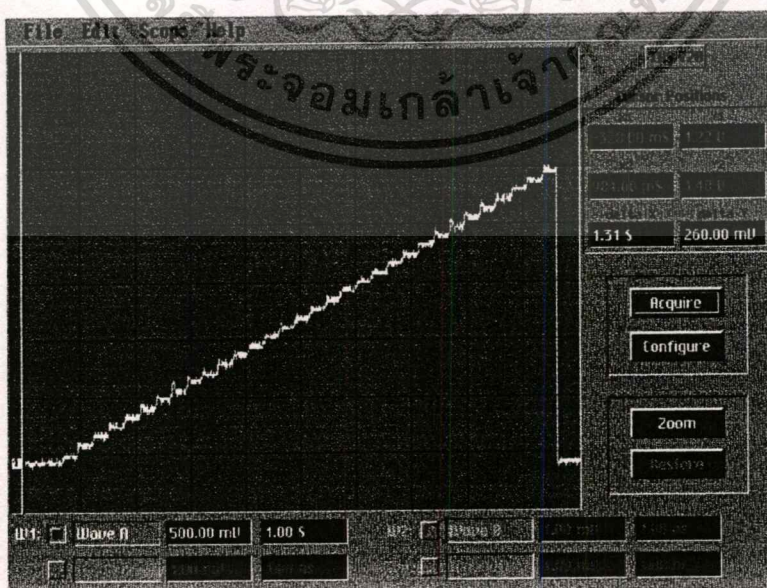


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการตอบสนองของแก๊สโรเตอร์ จากการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง ที่มีขนาดไมโครสเตปเท่ากับ  $1/16$  เท่าของสเตปปกติ ในขณะที่ทำการขับโหลด

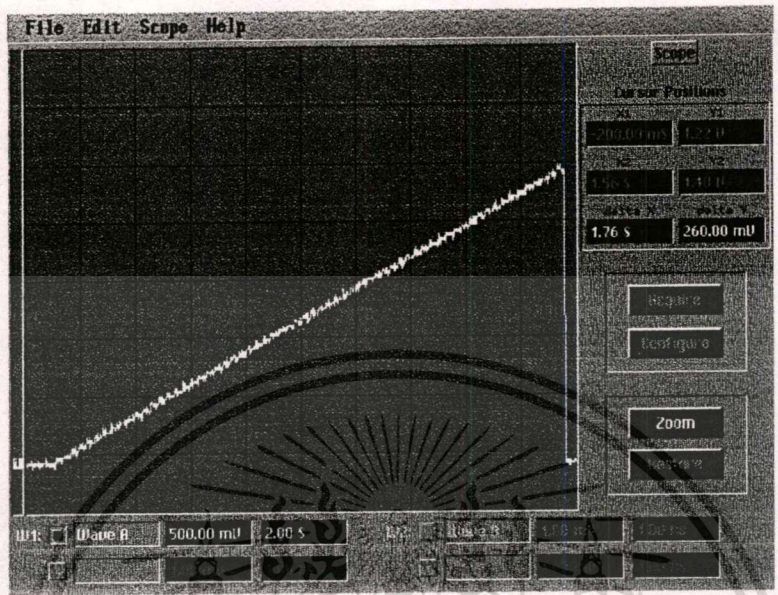


ผลการตอบสนองของแก๊สโรเตอร์ จากการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง ที่มีขนาดไมโครสเตปเท่ากับ  $1/32$  เท่าของสเตปปกติ ในขณะที่ทำการขับโหลด

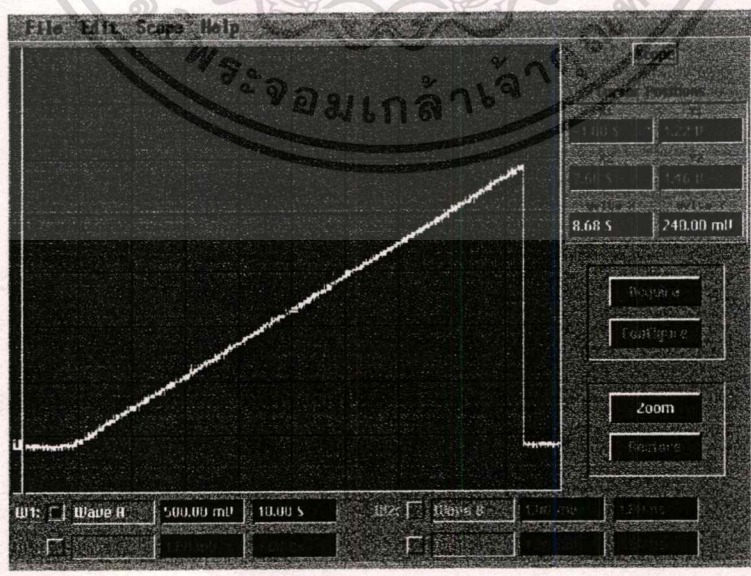


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการตอบสนองของแกนโรเตอร์ จากการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง ที่มีขนาดไมโครสเตปเท่ากับ 1/64 เท่าของสเตปปกติ ในขณะที่ทำการขับโหลด



ผลการตอบสนองของแกนโรเตอร์ จากการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบระบบวงปิดในโหมดไมโครสเตปด้วยการเปรียบเทียบค่าจริง ที่มีขนาดไมโครสเตปเท่ากับ 1/32 เท่าของสเตปปกติ ในขณะที่ทำการขับโหลด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นางสาว พิมพ์พิชญ์สร แ่มแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 1 กรกฎาคม พ.ศ. 2508 ที่จังหวัดพิจิตร สำเร็จ การศึกษาปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ (อศบ.) จากสถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2533 และประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง(อิเล็กทรอนิกส์ ทัวไป) ปีการศึกษา 2530 จากวิทยาลัยเทคนิคมีนบุรี

ประวัติการทำงาน ปี พ.ศ. 2527 ทำงานที่บริษัทประกอบเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ ตำแหน่งช่าง ทดสอบ ปี พ.ศ. 2528 เข้ารับราชการตำแหน่งช่างอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรม ศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปี พ.ศ. 2538 ทำงานที่บริษัทซัมมิต อิเล็กทรอนิกส์ ตำแหน่งวิศวกรตรวจสอบคุณภาพ แผนก Drum and Motor และเดินทางไปอบรมที่ ประเทศสิงคโปร์ 2 สัปดาห์ ที่บริษัท Sony Precision Electronic Center (SPEC) ปี พ.ศ. 2539 เข้าทำ งานที่บริษัท M-Control ตำแหน่ง ผู้ช่วยผู้จัดการทางเทคนิค ปี พ.ศ. 2540 เข้าทำงานที่มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีมหานคร คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมระบบวัดคุมและเครื่องมือวัด ตำแหน่งอาจารย์ ประจำ จนถึงปัจจุบัน

