

การควบคุมสเตรปปีงมอเตอร์แบบวงปิดด้วยเทคนิคลีดแองเกิล

CLOSED-LOOP CONTROL OF STEPPING MOTOR
WITH LEAD ANGLE TECHNIQUE

อาณนที ศรีสว่าง

ARNON SRISAWANG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

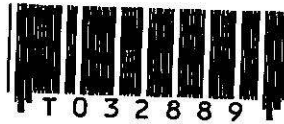
พ.ศ. 2542

ISBN 974-622-416-5

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบวงปิดด้วยเทคนิคลีดแองเกิล

CLOSED-LOOP CONTROL OF STEPPING MOTOR
WITH LEAD ANGLE TECHNIQUE



อานนท์ ศรีสว่าง
ARNON SRISAWANG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2542

ISBN 974-622-416-6

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 32889
วัน, เดือน, ปี..... 14 ส.ย. 2542

**CLOSED-LOOP CONTROL OF STEPPING MOTOR
WITH LEAD ANGLE TECHNIQUE**

ARNON SRISAWANG

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

1999

ISBN 974-622-416-6

COPYRIGHT 1999

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

| | |
|---------------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิดด้วยเทคนิคลีดเองเกิด |
| นักศึกษา | นายอานนท์ ศรีสว่าง |
| รหัสประจำตัว | 39061059 |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| พ.ศ. | 2542 |
| อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ | ดร.นนทวัฒน์ จุลเดชะ |
| อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม | รศ.ดร.โยธิน เปรมปราณีรัชต์ |

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้ นำเสนอวิธีการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิดด้วยวิธีลีดเองเกิด เพื่อให้ผลการตอบสนองการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ดีขึ้น เมื่อเทียบกับการควบคุมแบบวงเปิดทั่วไป โดยใช้ซอฟต์แวร์คอนโทรลเลอร์ต่อเข้ากับสเตปป์มอเตอร์ เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์บอกตำแหน่งการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ หลังจากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะประมวลผลสัญญาณพัลส์ เพื่อสร้างพัลส์กระตุ้นสเตปป์มอเตอร์ที่ควบคุมแบบวงปิดให้มีลีดเองเกิดที่เหมาะสม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิดด้วยวิธีลีดเองเกิดมีความเร็วที่สูงขึ้นและเข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมายด้วยเวลาที่สั้นกว่าการควบคุมแบบวงเปิด นอกจากนี้โปรไฟล์ความเร็วยังแสดงให้เห็นว่าโรสไทน์มีค่าน้อยลงด้วยเหมือนกันและระบบควบคุมนี้สามารถตรวจสอบความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้

| | |
|--------------------------|---|
| Thesis Title | Closed-Loop Control of Stepping Motor with Lead Angle Technique |
| Student | Mr.Arnon Srisawang |
| Student ID. | 39061059 |
| Degree | Master of Engineering in Electrical Engineering |
| Programme | Electrical Engineering |
| Year | 1999 |
| Thesis Advisor | Dr.Nontawat Chuladaycha |
| Thesis Co-Advisor | Assoc.Prof.Dr.Yothin Premprancerach |

ABSTRACT

This research paper presents the closed-loop control of stepping motor with lead angle method for improving the operating respond in comparing with the general open-loop control. An optical encoder is coupled with stepping motor in order to generate pulse signals which give information of the rotor position to the microcomputer. After the pulse signals have been processed by the microcomputer, driving pulse will make suitable lead angle for the closed-loop control of the stepping motor. The experimental results show that the closed-loop control of stepping motor with lead angle method has higher steady state velocity, and reach the final position with shorter time than the open-loop control. Besides, the velocity profiles show the shorter of the rise time as well and therefore this control system can be used in detecting stepping error.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับการดำเนินการศึกษาและวิจัยจาก ดร.นนทวัฒน์ จุลละเดชะ และรองศาสตราจารย์ ดร.โยธิน เปรมปราณีรัชต์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นผู้สร้างกำลังใจในการการศึกษาเล่าเรียน และเป็นผู้ให้ทุกสิ่งทุกอย่างมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ เพื่อนนักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือในการแนะนำและให้ข้อมูลในการวิจัย มาจนสำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น มาโดยตลอด

สุดท้ายขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

อานนท์ ศรีสว่าง

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VI |
| สารบัญรูป..... | VII |
| | |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 แนวคิดการนำเสนอวิทยานิพนธ์..... | 1 |
| 1.2 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์..... | 2 |
| | |
| บทที่ 2 สเตปปีงมอเตอร์..... | 4 |
| 2.1 หลักการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์..... | 4 |
| 2.2 ประเภทของสเตปปีงมอเตอร์..... | 5 |
| 2.3 รูปแบบการกระตุ้นสเตปปีงมอเตอร์..... | 9 |
| 2.4 วงจรขับสเตปปีงมอเตอร์..... | 11 |
| 2.5 คุณลักษณะแรงบิด..... | 15 |
| | |
| บทที่ 3 การควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบวงปิด..... | 20 |
| 3.1 หลักการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบวงปิด..... | 20 |
| 3.2 เอนโคเดอร์..... | 21 |
| 3.3 ความสัมพันธ์ของลีดเองเกิดกับแรงบิดสแตติก..... | 23 |
| 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสวิดชิงเองเกิดกับลีดเองเกิด..... | 29 |
| 3.5 ผลของลีดเองเกิด..... | 31 |
| 3.6 การควบคุมความเร็วด้วยวิธีพัลส์อินเจกชัน..... | 33 |
| 3.7 ผลการตอบสนองของสวิดชิงเองเกิดและพัลส์อินเจกชัน..... | 34 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 4 ระบบควบคุมสเตรปปีงมอเตอร์แบบวงปิดด้วยวิธีลีดเองเกิด..... | 36 |
| 4.1 ส่วนประกอบของการควบคุมสเตรปปีงมอเตอร์แบบวงปิด..... | 36 |
| 4.2 วงจรวัดการผลตอบสนองการทำงาน ofsเตรปปีงมอเตอร์..... | 41 |
| บทที่ 5 การทดลองการควบคุมสเตรปปีงมอเตอร์..... | 46 |
| 5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย..... | 47 |
| 5.2 การทดลองควบคุมการขับสเตรปปีงมอเตอร์แบบวงเปิด..... | 49 |
| 5.3 การทดลองควบคุมการขับสเตรปปีงมอเตอร์แบบวงปิด..... | 58 |
| 5.4 สรุปผลการทดลอง..... | 64 |
| บทที่ 6 วิจารณ์ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... | 70 |
| 6.1 วิจารณ์ผลการทดลอง..... | 70 |
| 6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนาต่อไปในอนาคต..... | 71 |
| บรรณานุกรม..... | 72 |
| ภาคผนวก..... | 73 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 80 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 แสดงลักษณะสัญญาณ เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟส..... | 9 |
| 2.2 แสดงลักษณะสัญญาณ เมื่อกระตุ้นแบบทีละสองเฟส..... | 10 |
| 2.3 แสดงสัญญาณ เมื่อกระตุ้นแบบทีละครึ่งสเตป..... | 10 |
| 3.1 ความสัมพันธ์ของลีดแองเกิล, ตำแหน่งสมมูลทำงานแบบเฟสเดียว, และเฟสที่กระตุ้นในสเตปปีงมอเตอร์ 4 เฟส ภายใต้การกำหนดสวิตชิง ที่ตำแหน่งสมมูลทำงานสองเฟส..... | 26 |
| 5.1 แสดงผลการตอบสนองของสเตปปีงมอเตอร์ เมื่อควบคุมแบบวงปิดและแบบวงเปิด..... | 66 |
| 5.2 แสดงค่าลีดแองเกิลที่เหมาะสมต่อระยะการสเตป ตั้งแต่เริ่มหมุนจนหยุดหมุน..... | 66 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 2.1 แสดงหลักการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิด..... | 4 |
| 2.2 โครงสร้างของสเตปป์มอเตอร์ประเภทคาร์ลิกแดนซ์แปรค่าได้..... | 5 |
| 2.3 ลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวด..... | 6 |
| 2.4 แสดงโครงสร้างของสเตปป์มอเตอร์ประเภทแม่เหล็กถาวร..... | 7 |
| 2.5 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กในสเตปป์มอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์..... | 8 |
| 2.6 แสดงวงจรขับสเตปป์มอเตอร์แบบยูนิโพลาร์..... | 12 |
| 2.7 แสดงการปรับปรุงการเพิ่มกระแสในวงจรขับโดยใช้ตัวความต้านทาน..... | 12 |
| 2.8 แสดงวงจรขับสเตปป์มอเตอร์แบบไบโพลาร์..... | 14 |
| 2.9 แสดงวงจรขับแบบบริดจ์..... | 14 |
| 2.10 แสดง คุณลักษณะทางสแตติกของสเตปป์มอเตอร์ขนาดสามเฟส..... | 16 |
| 2.11 แสดง กราฟคุณลักษณะของแรงบิด (T) ต่อมุมสเตป (θ)..... | 17 |
| 2.12 แสดงความสัมพันธ์คุณลักษณะของแรงบิดต่อกระแสของสเตปป์มอเตอร์ ขนาดสี่เฟส มุมสเตปเท่ากับ 1.8 องศา..... | 17 |
| 2.13 แสดงคุณลักษณะทางไดนามิกของสเตปป์มอเตอร์..... | 18 |
| 3.1 แสดง การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิด..... | 20 |
| 3.2 แสดง ตัวอย่างกลไกของ อินทีเมนทอน ออฟติคอลลอน โคเดเจอร์..... | 21 |
| 3.3 แสดง สัญญาณจากการตรวจนับตำแหน่งทิศทางการเคลื่อนตำแหน่งของ โรเตอร์..... | 22 |
| 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดสแตติก (T) กับระยะตำแหน่งเชิงมุม (θ)..... | 23 |
| 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลีดเองเกิดกับแรงบิดสแตติกของสเตปป์มอเตอร์ ขนาด 4 เฟส..... | 23 |
| 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแส เมื่อทำงานด้วย ลีดเองเกิด 1 สเตป..... | 24 |
| 3.7 แสดงลักษณะแรงบิดที่เพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มลีดเองเกิดในช่วงอัตราความเร็วสูง..... | 25 |
| 3.8 แสดงกราฟความเร็วของการสเตปป์เบื่องต้น ตามที่มีในตารางที่ 3.1..... | 27 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.9 แสดงความแตกต่างของลีดเองเกิด เมื่อกระตุ้นแบบทีละสองเฟส ในสเตปป์ิงมอเตอร์ ขนาด 4 เฟส..... | 28 |
| 3.10 แสดง การกำหนดลีดเองเกิดและสวิตชิงเองเกิด..... | 29 |
| 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสถานะความเร็วคงตัวและลีดเองเกิดค่าต่าง ๆ..... | 30 |
| 3.12 แสดง กราฟของแรงบิดสแตติกของสเตปป์ิงมอเตอร์ขนาด 3 เฟส และมุมสเตปป์ 15 องศา..... | 31 |
| 3.13 แสดง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับสวิตชิงเองเกิดที่ความถี่ต่ำ และความถี่สูง..... | 32 |
| 3.14 แสดงการสวิตซ์ของแรงบิดจาก โหมดเพิ่มความเร็ว ไปสู่โหมดลดความเร็ว..... | 33 |
| 3.15 แสดงเส้นแรงบิด ผลจากการใช้พัลส์อินเจกชัน..... | 34 |
| 3.16 แสดงค่าแรงบิดสแตติกของการใช้การใช้สองพัลส์อินเจกชัน..... | 35 |
| 4.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมสเตปป์ิงมอเตอร์แบบวงปิด โดยใช้ ไมโครคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน..... | 36 |
| 4.2 ชุดระบบทดลองโดยรวมที่ใช้ในการวิจัย..... | 37 |
| 4.3 วงจรอินเตอร์เฟส 8255..... | 38 |
| 4.4 วงจรอินเตอร์เฟส 8255 ที่ใช้ในการทดลอง..... | 38 |
| 4.5 วงจรขับกำลังกระแสของสเตปป์ิงมอเตอร์ขนาด 4 เฟส แบบยูนิโพลาร์..... | 39 |
| 4.6 วงจรขับสเตปป์ิงมอเตอร์ขนาด 4 เฟส แบบยูนิโพลาร์ที่ใช้ในการทดลอง..... | 39 |
| 4.7 วงจรบัฟเฟอร์สัญญาณระหว่างวงจรอินเตอร์เฟสกับฮาร์ดแวร์ส่วนต่างๆ..... | 40 |
| 4.8 บล็อกไดอะแกรมวงจรสังเกตผลการควบคุมตำแหน่ง..... | 41 |
| 4.9 วงจรนับขนาด 16 บิต แบบสองทิศทาง..... | 41 |
| 4.10 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก (DAC) แบบ R-2R Ladder..... | 42 |
| 4.11 ลักษณะรูปสัญญาณของเอาต์พุตวงจรสังเกตผลการควบคุมตำแหน่ง..... | 42 |
| 4.12 วงจรนับขึ้น-ลง แบบไบนารี ขนาด 16 บิต..... | 43 |
| 4.13 วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก (DAC) ขนาด 16 บิต..... | 43 |
| 4.14 บล็อกไดอะแกรมของวงจรสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงความเร็ว หรือโปรไฟล์ความเร็ว..... | 44 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.15 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน (F/V) เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงความเร็ว หรือโปรไฟล์ความเร็ว..... | 44 |
| 4.16 ลักษณะรูปสัญญาณของเอาต์พุตวงจรสังเกตการเปลี่ยนแปลงความเร็ว หรือโปรไฟล์ความเร็ว..... | 45 |
| 4.17 วงจรแปลงสัญญาณความถี่เป็นแรงดัน (F/V) ที่ใช้งานจริง..... | 45 |
| 5.1 แสดงลักษณะของสเตปป์มอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง..... | 47 |
| 5.2 ลักษณะของออฟติคัลเลน โคคเคอร์ที่ใช้ในการทดลอง..... | 48 |
| 5.3 ลักษณะของอินเวอร์เซียโฮลคที่ใช้ในการทดลอง..... | 49 |
| 5.4 แสดงลักษณะการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิด..... | 50 |
| 5.5 บล็อกไดอะแกรมของการวัดโปรไฟล์การเปลี่ยนแปลงความเร็ว..... | 50 |
| 5.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็ว เมื่อป้อนความถี่พัลส์อินพุท 100 Hz. กระตุ้นแบบทีละเฟส และระยะทางการเคลื่อนที่ 1000 สเตป..... | 51 |
| 5.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็ว เมื่อป้อนความถี่พัลส์อินพุท 200 Hz. กระตุ้นแบบทีละเฟส และระยะทางการเคลื่อนที่ 1000 สเตป..... | 51 |
| 5.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็ว เมื่อป้อนความถี่พัลส์อินพุท 300 Hz. กระตุ้นแบบทีละเฟส และระยะทางการเคลื่อนที่ 1000 สเตป..... | 52 |
| 5.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็ว เมื่อป้อนความถี่พัลส์อินพุท 400 Hz. กระตุ้นแบบทีละเฟส และระยะทางการเคลื่อนที่ 1000 สเตป..... | 52 |
| 5.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็ว เมื่อป้อนความถี่พัลส์อินพุท 445 Hz. กระตุ้นแบบทีละเฟส และระยะทางการเคลื่อนที่ 1000 สเตป..... | 53 |
| 5.11 แสดงโปรไฟล์ความเร็ว เมื่อป้อนความถี่พัลส์อินพุท 450 Hz. กระตุ้นแบบทีละเฟส และระยะทางการเคลื่อนที่ 1000 สเตป ซึ่งสเตปป์มอเตอร์เกิดออกสซิจเลตในการเคลื่อนที่ขึ้น..... | 53 |
| 5.12 บล็อกไดอะแกรมของการวัดโปรไฟล์การเปลี่ยนแปลงความเร็ว..... | 54 |
| 5.13 บล็อกไดอะแกรมการวัดผลการควบคุมตำแหน่ง..... | 54 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 5.14 ผลของโปรไฟล์ความเร็วการเคลื่อนที่ เมื่อความถี่พัลส์อินพุท 440 Hz. กระตุ้นแบบทีละเฟส ระยะทางการเคลื่อนที่ 265 สเตป และไม่มีมือเนอร์เซียโฮลด์..... | 55 |
| 5.15 ผลของการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ เมื่อความถี่พัลส์อินพุท 440 Hz. กระตุ้นแบบทีละเฟส ระยะทางการเคลื่อนที่ 265 สเตป และไม่มีมือเนอร์เซียโฮลด์..... | 56 |
| 5.16 ผลของโปรไฟล์ความเร็วการเคลื่อนที่ เมื่อความถี่พัลส์อินพุท 440 Hz. กระตุ้นแบบทีละเฟส ระยะทางการเคลื่อนที่ 265 สเตป และมีมือเนอร์เซียโฮลด์ 200 กรัม..... | 56 |
| 5.17 ผลของการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ เมื่อความถี่พัลส์อินพุท 440 Hz. กระตุ้นแบบทีละเฟส ระยะทางการเคลื่อนที่ 265 สเตป และมีมือเนอร์เซียโฮลด์ 200 กรัม..... | 56 |
| 5.18 ผลของโปรไฟล์ความเร็วการเคลื่อนที่ เมื่อความถี่พัลส์อินพุท 440 Hz. กระตุ้นแบบทีละเฟส ระยะทางการเคลื่อนที่ 265 สเตป และมีมือเนอร์เซียโฮลด์ 400 กรัม..... | 57 |
| 5.19 ผลของการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ เมื่อความถี่พัลส์อินพุท 440 Hz. กระตุ้นแบบทีละเฟส ระยะทางการเคลื่อนที่ 265 สเตป และมีมือเนอร์เซียโฮลด์ 400 กรัม..... | 57 |
| 5.20 แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบวงปิด โดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน..... | 58 |
| 5.21 บล็อกไดอะแกรมของการวัดผลการควบคุมตำแหน่ง..... | 59 |
| 5.22 บล็อกไดอะแกรมของการวัดการเปลี่ยนแปลงความเร็ว..... | 59 |
| 5.23 ผลของโปรไฟล์ความเร็วการเคลื่อนที่ เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟสระยะทาง การเคลื่อนที่ 265 สเตป และไม่มีมือเนอร์เซียโฮลด์ ซึ่งสามารถตอบสนอง ความถี่ได้สูงถึง 1847.8 Hz. | 60 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 5.24 ผลของการควบคุมตำแหน่ง เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟส ระยะทาง การเคลื่อนที่ 265 สเตป และไม่มีอิเนอร์เซียโหลด ซึ่งสามารถตอบสนอง ความถี่ได้สูงถึง 1847.8 Hz. | 60 |
| 5.25 ผลของโปรไฟล์ความเร็วการเคลื่อนที่ เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟส ระยะทาง การเคลื่อนที่ 265 สเตป และมีอิเนอร์เซียโหลด 200 กรัม ซึ่งสามารถ ตอบสนองความถี่ได้สูงถึง 1847.8 Hz. | 61 |
| 5.26 ผลของการควบคุมตำแหน่ง เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟส ระยะทาง การเคลื่อนที่ 265 สเตป และมีอิเนอร์เซียโหลด 200 กรัม ซึ่งสามารถตอบสนอง ความถี่ได้สูงถึง 1847.8 Hz. | 61 |
| 5.27 ผลของโปรไฟล์ความเร็วการเคลื่อนที่ เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟส ระยะทาง การเคลื่อนที่ 265 สเตป และมีอิเนอร์เซียโหลด 400 กรัม ซึ่งสามารถตอบสนอง ความถี่ได้สูงถึง 1847.8 Hz. | 62 |
| 5.28 ผลของการควบคุมตำแหน่ง เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟส ระยะทาง การเคลื่อนที่ 265 สเตป และมีอิเนอร์เซียโหลด 400 กรัม ซึ่งสามารถตอบสนอง ความถี่ได้สูงถึง 1847.8 Hz. | 62 |
| 5.29 ผลของโปรไฟล์ความเร็วการเคลื่อนที่ เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟส และไม่มีอิเนอร์เซียโหลด แต่กำหนดคลิดแองเกิลเท่ากับ 2 สเตป คงที่ | 62 |
| 5.30 ผลของโปรไฟล์ความเร็วการเคลื่อนที่ เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟส และไม่มีอิเนอร์เซียโหลด แต่กำหนดคลิดแองเกิลเท่ากับ 1.5 สเตป คงที่ | 62 |
| 5.31 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงความ เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟส..... | 67 |
| 5.32 แสดงกราฟไรส์ไทม์ เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟส..... | 68 |
| 5.33 แสดงกราฟระยะเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟส..... | 69 |

บทที่ 1

บทนำ

การขับสเตปปีงมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปนั้น โดยการป้อนคำสั่งพัลส์จากแหล่งกำเนิดพัลส์ จากภายนอกและจะถือว่าสเตปปีงมอเตอร์ทำงานตามคำสั่งพัลส์ทุกๆ คำสั่ง การทำงานแบบนี้เรียกว่า การควบคุมแบบระบบวงเปิด (Open-loop system control) การขับแบบระบบวงเปิดเป็นที่นิยม และยอมรับกันอย่างกว้างขวางในการประยุกต์ใช้ควบคุมความเร็ว (Speed) และตำแหน่ง (Position) แม้ว่าผลการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ในทางปฏิบัติจะมีข้อจำกัด เมื่อควบคุมการทำงานภายใต้การขับแบบระบบวงเปิด ซึ่งมีข้อบกพร่องของคำสั่งพัลส์ที่ป้อนเมื่อมีความถี่ของพัลส์ที่ป้อนสูงขึ้น, แรงเฉื่อยโหลด (Load inertia) มากเกินไป นอกจากนี้การควบคุมการขับแบบระบบวงเปิดการเคลื่อนที่ของสเตปปีงมอเตอร์ยังมีโอกาสเกิดออสซิลเลต (Oscillate) ขึ้นง่ายด้วย

1.1 แนวคิดการนำเสนอวิทยานิพนธ์

จากข้อบกพร่องของการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบวงเปิดที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป จึงมีแนวคิดในการพัฒนาระบบควบคุมการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ให้ดีขึ้น โดยมีระบบการป้อนกลับทางตำแหน่ง (Position feedback) เพื่อใช้กำหนดการป้อนคำสั่งพัลส์ให้ขลดวดของสเตปปีงมอเตอร์แต่ละเฟสให้มีการสวิตช์ที่เหมาะสม การควบคุมประเภทนี้เรียกว่า การควบคุมแบบระบบวงปิด (Closed-loop system control) ดังนั้น การขับแบบระบบวงปิดจึงต้องมีการตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่โรเตอร์ของสเตปปีงมอเตอร์ เพื่อต้องการรับรู้ตำแหน่งของโรเตอร์ (Rotor position) การตรวจจับตำแหน่งที่ใช้เป็นแบบตัวเข้ารหัสด้วยแสง (Optical encoder) และเชื่อมต่อเข้ากับแกนหมุนของสเตปปีงมอเตอร์ ซึ่งผลจากการควบคุมแบบระบบวงปิด ทำให้สเตปปีงมอเตอร์สามารถตอบสนองความถี่ได้สูงขึ้น การเริ่มหมุนจะมีไรส์ไทม์ (Rise time) เร็วขึ้น และช่วงเวลาเข้าสู่สภาวะความเร็วคงที่เร็วขึ้น โดยไม่เกิดการออสเลตหรือสเตรปผิดพลาดในการเคลื่อนที่

แนวคิดดังกล่าวจะใช้หลักการควบคุมมุมในการสวิตช์ของสัญญาณคำสั่งอินพุทพัลส์ด้วยวิธีลีดแองเกิล (Lead angle method) การกำหนดมุมของสัญญาณพัลส์กระตุ้นสเตปปีงมอเตอร์ จะพิจารณาจากกราฟของแรงบิดสแตติกด้วยว่าเมื่อจ่ายกระแสให้แก่สเตปปีงมอเตอร์แล้วสามารถให้ค่าแรงบิดเฉลี่ยได้สูงสุด ทั้งนี้การกำหนดค่าลีดแองเกิลที่เหมาะสมจะต้องพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของกระแสต่อเวลาด้วย เพราะการกำหนดค่าลีดแองเกิลให้ได้ค่าแรงบิดสูงสุดตลอดไปนั้นไม่สามารถทำให้สเตปปีงมอเตอร์ตอบสนองการทำงานของพัลส์กระตุ้นที่ป้อนให้แก่สเตปปีงมอเตอร์

ได้ เนื่องจากในความเป็นจริงกระแสไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ทันทีทันใดย่อมเกิดการหน่วงของกระแสต่อเวลา ดังนั้นการกำหนดค่าลัดเองเกิดจึงต้องเปลี่ยนค่าไปให้เหมาะสมกับความเร็วของสเตปป์มอเตอร์ สเตปป์มอเตอร์จึงจะสามารถตอบสนองการทำงานของพัลส์กระตุ้นสเตปป์มอเตอร์ได้ทุกๆ พัลส์ ในทางปฏิบัติจะควบคุมมุมในการสวิทช์ด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ภายใต้ภาษาปาสคาล (Pascal language) โดยไมโครคอมพิวเตอร์จะรับสัญญาณมาจากออปติคัลเอนโคเดอ (Optical encoder) ในรูปของสัญญาณพัลส์มาประมวลผลที่ไมโครคอมพิวเตอร์ เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์อินพุตไปกระตุ้นวงจรขับสเตปป์มอเตอร์ให้จ่ายกระแสแก่ขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ให้มีลัดเองเกิดที่ได้ค่าแรงบิดสแตติกสูงสุด เพื่อให้สเตปป์มอเตอร์สามารถผลตอบสนองการทำงานได้ดีกว่าการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิด

1.2 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาระบบควบคุมการขับของสเตปป์มอเตอร์ เพื่อให้สเตปป์มอเตอร์สามารถตอบสนองต่อความถี่ได้สูงขึ้น และง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงหรือมีความซับซ้อนในการควบคุมแบบวงปิดน้อยลง การควบคุมแบบระบบวงปิดจะใช้ออปติคัลเอนโคเดอ (Optical encoder) เป็นตัวป้อนสัญญาณกลับ ซึ่งมีความละเอียดของสัญญาณเอาท์พุต 6000 พัลส์ต่อรอบ และใช้สเตปป์มอเตอร์ขนาดเล็กมีความละเอียด 200 สเตปป์ต่อรอบ ค่าความต้านทาน 24 โอห์มต่อเฟส ค่ากระแส 0.5 แอมแปร์ต่อเฟส และค่าแรงดัน 12 โวลต์ต่อเฟส จึงทำให้อัตราความเร็วรอบของมอเตอร์มีความสัมพันธ์กันกับสัญญาณพัลส์ที่กระตุ้นวงจรขับ ในวิทยานิพนธ์นี้จะเสนอการปรับมุมในการสวิทช์ให้เหมาะสมเพื่อเพิ่มค่าแรงบิดของสเตปป์มอเตอร์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ ประกอบด้วยเนื้อหาทั้งหมด 6 บท ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของปัญหาที่เกิดจากการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิด แนวคิดและหลักการโดยสังเขปในการพัฒนาการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิด วัตถุประสงค์และขอบเขตของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงหลักการงานเบื้องต้นของสเตปป์มอเตอร์ ประเภทของสเตปป์มอเตอร์, หลักการทำงานในระบบวงเปิด, โหมดการกระตุ้นและวงจรขับสเตปป์มอเตอร์รวมถึงคุณลักษณะแรงบิดทางสแตติกและไดนามิก

บทที่ 3 กล่าวถึงการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิด ด้วยวิธีลัดเองเกิด แสดงการควบคุมความเร็วโดยการปรับระดับค่าแรงบิดตามทฤษฎีคุณลักษณะแรงบิดสแตติก ด้วยวิธีลัดเองเกิด และวิธีพัลส์อินเจกชัน ที่มีผลทำให้ค่าลัดเองเกิดเปลี่ยนไป เพื่อควบคุมค่าสวิทช์เองเกิดอีกครั้งหนึ่ง ให้เหมาะสม

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบระบบการควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิด ด้วยหลักการของลิกแองเกิล วงจรควบคุม วงจรทดสอบการทำงานของสเตปป์มอเตอร์

บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดลองการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิด ด้วยวิธีลิตแองเกิล รวมถึงบทสรุปผลการทดลอง

บทที่ 6 กล่าวถึงข้อวิจารณ์ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ เพื่อเป็นแนวทางวิธีการพัฒนาต่อไปในอนาคต

ภาคผนวก บทความวิชาการ ที่ได้ตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมลาดกระบัง

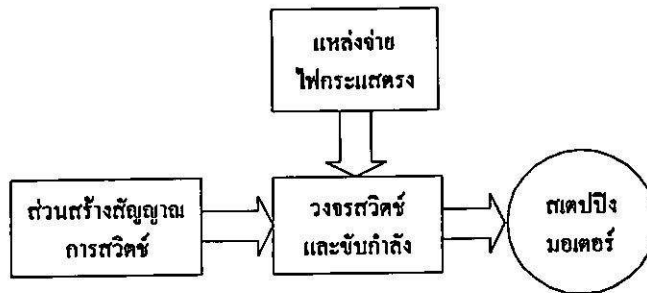
บทที่ 2

สเตรปึงมอเตอร์

สเตรปึงมอเตอร์เป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้า (Electrical machines) ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานเชิงกล ซึ่งมีอินพุตเป็นกลุ่มของแรงดัน ไบนารีและเอาต์พุตเป็นลักษณะของการเคลื่อนที่เชิงมุมเป็นสเตรป และสามารถกำหนดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของอาร์มุนได้อย่างเที่ยงตรงแน่นอน ซึ่งง่ายต่อการควบคุมหรือประยุกต์ใช้งาน การนำสเตรปึงมอเตอร์ไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ นั้น จะต้องเข้าใจเกี่ยวกับประเภทและการควบคุมการขับเคลื่อนสเตรปึงมอเตอร์รวมถึงวงจรขับเคลื่อนสเตรปึงมอเตอร์ขั้นพื้นฐาน ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงต่อไป

2.1 หลักการควบคุมสเตรปึงมอเตอร์

สเตรปึงมอเตอร์เป็นเครื่องกลไฟฟ้าที่ควบคุมการทำงานด้วยสัญญาณอินพุตเชิงตัวเลขแบบไบนารี (Binary numerically) ซึ่งอยู่ในรูปสัญญาณพัลส์ ดังนั้นการควบคุมการทำงานของสเตรปึงมอเตอร์ จะขึ้นอยู่กับสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับอินพุตของระบบขับเคลื่อนสเตรปึงมอเตอร์ รูปที่ 2.1 แสดงถึงหลักการพื้นฐานของการควบคุมการขับเคลื่อนสเตรปึงมอเตอร์แบบวงเปิด ซึ่งตัวควบคุมประกอบด้วยส่วนสร้างสัญญาณสวิทช์หรือพัลส์ วงจรสวิทช์และขับกำลัง



รูปที่ 2.1 แสดงหลักการควบคุมสเตรปึงมอเตอร์แบบวงเปิด

วงจรสวิทช์จะใช้อุปกรณ์ประเภททรานซิสเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นอิเล็กทรอนิกส์สวิทช์ วงจรขับกำลังจะทำหน้าที่จ่ายกระแสให้แก่สเตรปึงมอเตอร์ และส่วนสร้างสัญญาณการสวิทช์ได้จากอุปกรณ์ดิจิทัลไอซีหรือไมโครโปรเซสเซอร์ ซึ่งสะดวกต่อการควบคุมสเตรปึงมอเตอร์ จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าสเตรปึงมอเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าทางดิจิทัลเป็นการเคลื่อนที่เชิงกล ซึ่งสาเหตุที่ทำให้สเตรปึงมอเตอร์มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากข้อดีดังต่อไปนี้

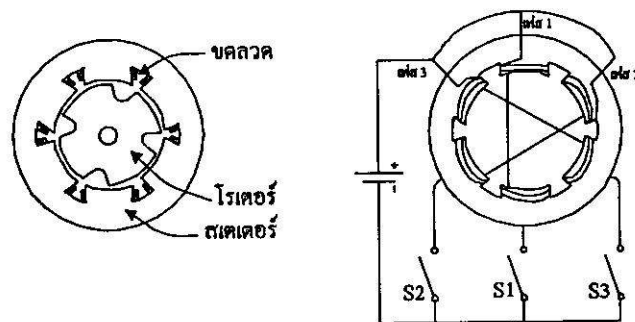
1. โดยปกติจะไม่ต้องการส่วนป้อนกลับของสัญญาณ เพื่อควบคุมตำแหน่งหรือความเร็ว ทำให้วงจรที่ใช้ควบคุมต้นทุนต่ำ

2. ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเคลื่อนที่ จะไม่สะสมหรือเพิ่มขึ้น
3. สเตปปีงมอเตอร์ทำงานได้สมบูรณ์ เมื่อทำงานร่วมกับอุปกรณ์ดิจิทัลและคอมพิวเตอร์

2.2 ประเภทของสเตปปีงมอเตอร์

สเตปปีงมอเตอร์สามารถแบ่งออกได้ตามลักษณะโครงสร้างและการทำงานเป็น 3 ประเภท ดังนี้

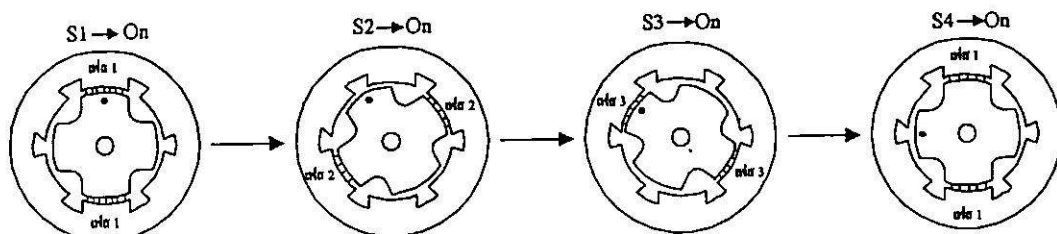
2.2.1 สเตปปีงมอเตอร์ประเภทรีลัคแตนซ์แปรค่าได้ (Variable reluctance stepping Motor) สเตปปีงมอเตอร์ประเภทนี้ หรือเรียกว่า วีอาร์-สเตปปีงมอเตอร์ (VR-Stepping motor) เป็นสเตปปีงมอเตอร์ที่มีลักษณะการทำงานที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจมากที่สุด ตัวอย่างโครงสร้างของสเตปปีงมอเตอร์ขนาด 3 เฟส (Phase) ซึ่งมีจำนวนขั้วที่สเตเตอร์ (Stator) เท่ากับ 6 ขั้ว แต่แต่ละคู่ของขั้วที่อยู่ตรงกันข้ามจะเป็นเฟสเดียวกัน เนื่องจากมีขดลวดขดเดียวกันพันอยู่ในลักษณะค่ออนุกรม ส่วนโรเตอร์ (Rotor) จะมีจำนวนขั้วเท่ากับ 4 ขั้ว แกนของโรเตอร์และสเตเตอร์ ปกติแล้วจะทำจากแผ่นเหล็กบางๆ ที่มีส่วนผสมของซิลิกอน (Laminated silicon steel) แต่โรเตอร์ที่ทำจากแท่งซิลิกอนจะเป็นที่นิยมใช้กันมาก วัสดุที่ใช้ทำโรเตอร์และสเตเตอร์จะต้องมีค่าความซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability) และเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux) ที่สามารถผ่านได้ง่าย เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก (Magnetomotive field) สูงสุด



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของสเตปปีงมอเตอร์ ประเภทรีลัคแตนซ์แปรค่าได้

ในรูปที่ 2.2 สมมติให้ขั้วที่ตรงกันข้ามคือ ขั้วที่ 1, 2 และ 3 เป็นขั้วเหนือ (N) และขั้วที่ 1', 2', และ 3' เป็นขั้วใต้ (S) เมื่อแต่ละเฟสถูกกระตุ้นให้ทำงานกระแสในแต่ละเฟสจะถูกควบคุมด้วยลำดับของการปิดหรือเปิดสวิตช์ ถ้ากระแสถูกจ่ายให้กับขดลวดเฟสที่ 1 หลังจากนั้น เมื่อเฟสที่ 1 ถูกเปิดออกและเฟสที่ 2 ถูกจ่ายกระแสเข้ามา ค่าความต้านทานแม่เหล็กของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นทันที ทำให้โรเตอร์หมุนทวนเข็มนาฬิกาด้วยมุม 30 องศา และที่ตำแหน่งนี้ ค่าความต้านทานแม่เหล็กก็จะมีค่าต่ำสุด การเคลื่อนที่ในลักษณะดังกล่าวนี้ ในแต่ละ

ครึ่งของการกระตุ้นแต่ละเฟส เรียกว่า “สเตป” (Step) ดังนั้นถ้าเราจัดลำดับการจ่ายกระแสให้แก่แต่ละเฟสของมอเตอร์ดังนี้ 1, 2, 3, และ 1 แล้ว ลักษณะการเคลื่อนที่ของโรเตอร์จะเคลื่อนกลับมายังตำแหน่งเริ่มต้นดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวด

นอกจากนี้ ณ ตำแหน่งอยู่ในแนวเดียวกันกับขั้วฟันโรเตอร์ ตำแหน่งขั้วสเตเตอร์ ณ ตำแหน่งนี้ค่าความต้านทานแม่เหล็ก (Magnetic reluctance) จะมีค่าต่ำสุด เรียกว่า “ตำแหน่งสมดุล” (Equilibrium position)

โครงสร้างพื้นฐานของสเตปป์มอเตอร์ ประเภทรีลักแตนซ์แปรค่าได้ จะมีลักษณะสำคัญควรพิจารณา ดังนี้

1) ช่องว่างอากาศ (Air gap) ควรแคบที่สุด ซึ่งหมายถึงช่องว่างระหว่างขั้วฟันของสเตเตอร์และโรเตอร์ในสเตปป์มอเตอร์ควรจะแคบที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้เกิดค่าแรงบิด (Torque) สูงสุด และเนื่องจากช่องอากาศที่แคบจะให้จำนวนเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetomotive force) หนาแน่นมากกว่าช่องอากาศที่กว้าง นั่นหมายความว่า แรงบิดที่ได้ก็จะสูงกว่าด้วย และผลที่ตามมาคือ ความเที่ยงตรงของโรเตอร์ก็จะสูงตามขึ้นไปด้วย โดยทั่วไปขนาดของช่องอากาศจะมีค่าประมาณ 30 ถึง 100 ไมโครเมตร

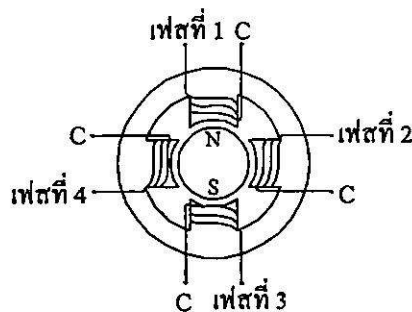
2) ขนาดมุมสเตปที่เล็ก โครงสร้างของสเตปป์มอเตอร์ประเภทรีลักแตนซ์แปรค่าได้ ขนาด 3 และ 4 เฟส และมีขนาดมุมสเตปเท่ากัน คือ เท่ากับ 15 องศาต่อสเตป แต่จะมีโครงสร้างต่างกัน ซึ่งขนาด 3 เฟส มีขั้วฟันของสเตเตอร์จำนวน 12 ขั้วฟัน และโรเตอร์จำนวน 8 ขั้วฟัน ส่วนขนาด 4 เฟส จะมีขั้วฟันของสเตเตอร์จำนวน 8 ขั้วฟัน และโรเตอร์ 6 ขั้วฟัน

ความสัมพันธ์ของขนาดมุมสเตป (θ_s), จำนวนเฟส (m), จำนวนขั้วฟันของโรเตอร์ (N_r) และจำนวนสเตป (S) ได้จากสมการ (2.1) ต่อไปนี้

$$S = 360/\theta_s = mn_r \quad (2.1)$$

จากสมการ (2.1) จะเห็นว่า ถ้าต้องการลดขนาดมุมสเตป (θ_s) จะต้องเพิ่มจำนวนซี่ฟันของโรเตอร์ให้สูงขึ้น แต่ถ้าต้องเพิ่มจำนวนซี่ฟันของโรเตอร์ให้สูงขึ้นจำนวนซี่ฟันของสเตเตอร์ก็จะต้องเพิ่มตามด้วยดังหลักการที่อธิบายผ่านมา

2.2.2 สเตปป์มอเตอร์ประเภทแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet stepping motor)
สเตปป์มอเตอร์ประเภทนี้ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า พีเอ็ม-สเตปป์มอเตอร์ (PM Stepping motor) เป็นสเตปป์มอเตอร์ที่มีโรเตอร์จะทำจากแม่เหล็กถาวร จึงเรียกสเตปป์มอเตอร์ประเภทนี้ว่า “สเตปป์มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร” ซึ่งตัวอย่างประเภท 4 เฟส ของสเตปป์มอเตอร์ประเภทนี้แสดงในรูปที่ 2.4 โดยโรเตอร์จะเป็นทรงกระบอกทำจากแม่เหล็กถาวรและสเตเตอร์มีจำนวน 4 ซี่ฟัน แต่ละซี่ฟันจะมีขดลวดพันล้อมรอบอยู่ สมมติทุกเฟสขดลวดขั้ว C ต่อเข้ากับขั้วบวกของแหล่งจ่ายไฟ ถ้าแต่ละเฟสถูกกระตุ้นให้ทำงานด้วยลำดับเฟส 1, เฟส 2, เฟส 3 และเฟส 4 ตามลำดับ จะทำให้โรเตอร์จะเคลื่อนที่ตามเข็มนาฬิกา ซึ่งจะมีขนาดมุมสเตปขนาด 90 องศาต่อสเตป สำหรับในตัวอย่างนี้ ถ้าต้องการลดขนาดของสเตปป์ ลงจะต้องทำการเพิ่มจำนวนซี่ฟันของตัวสเตเตอร์และจำนวนขั้วแม่เหล็กบนโรเตอร์ขึ้น

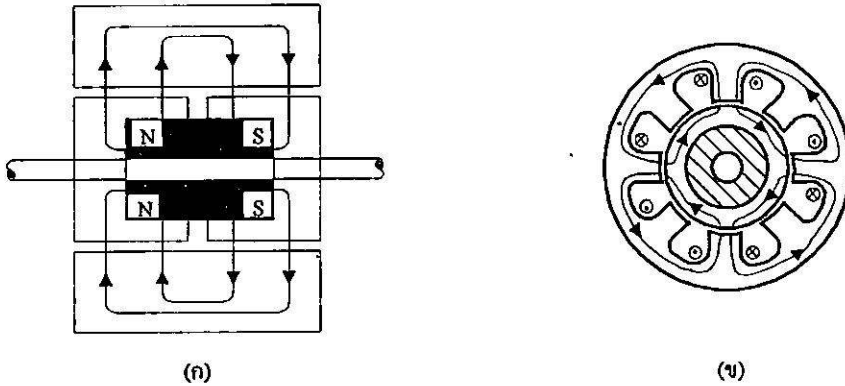


รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของสเตปป์มอเตอร์ประเภทแม่เหล็กถาวร

โรเตอร์ของสเตปป์มอเตอร์ประเภทนี้ สามารถเคลื่อนที่มาหยุด ณ ตำแหน่งที่แน่นอนได้ แม้ว่าจะหยุดกระตุ้นให้ทำงานก็ตาม ตำแหน่งดังกล่าวเรียกว่า “ตำแหน่งดีเทนท์” (Detent position) ซึ่งปกติแล้ว ตำแหน่งดีเทนท์จะตรงกับตำแหน่งสมดุล เมื่อเฟสใดเฟสหนึ่งถูกกระตุ้นให้ทำงาน

ข้อเสียของสเตปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร คือ ขนาดมุมสเตปใหญ่ ทำให้มีความละเอียดของสเตปต่อรอบน้อย เนื่องการสร้างแม่เหล็กถาวรให้มีหลายขั้วทำได้ยาก ทำให้ไม่สามารถทำให้มีขนาดสเตปเล็กลงได้ สเตปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรส่วนใหญ่จะมีโครงสร้างเล็ก ทำให้ค่าแรงบิดที่ได้ต่อหน่วยปริมาตรมีค่าต่ำ ถ้าต้องการปรับปรุงประสิทธิภาพในเรื่องแรงบิดแม่เหล็กถาวรที่ใช้จะต้องทำมาจากสารแม่เหล็กที่มีประสิทธิภาพความเป็นแม่เหล็กสูง

2.2.3 สเตปปีงมอเตอร์ประเภทไฮบริดจ์ (Hybrid stepping motor) สเตปปีงมอเตอร์ประเภทไฮบริดจ์เป็นสเตปปีงมอเตอร์ที่มีหลักการทำงานผสมผสานกันระหว่างสเตปปีงมอเตอร์ประเภทแม่เหล็กถาวรกับชนิดรีลักแตนซ์แปรค่าได้ จริงได้ชื่อว่า “สเตปปีงมอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์”



รูปที่ 2.5 แสดงเส้นแรงแม่เหล็กในสเตปปีงมอเตอร์ประเภทไฮบริดจ์

- (ก) เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กบนแกนโรเตอร์
 (ข) เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านขดลวด

ลักษณะโครงสร้างของแกนสเตเตอร์ของสเตปปีงมอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์ จะมีลักษณะคล้ายกับสเตปปีงมอเตอร์ชนิดรีลักแตนซ์แปรค่าได้ แต่จะต่างกันที่การพันขดลวด กล่าวคือประเภทรีลักแตนซ์แปรค่าได้ ขดลวด 1 ขด จากทั้งหมด 2 ขดในเฟสเดียว จะพันบนแกนสเตเตอร์เพียงขดเดียว ในขณะที่สเตปปีงมอเตอร์ประเภทไฮบริดจ์ขนาด 4 เฟส โพล (Pole) ของสเตเตอร์จะมีขดลวด 2 ขด ซึ่งขดลวดทั้งสองบนโพลของสเตเตอร์นี้จะพันในลักษณะไบฟีลาร์ (Bifilar) ซึ่งจะมีขั้วสนามแม่เหล็กที่ต่างกันเมื่อถูกกระตุ้นให้ทำงาน ส่วนโรเตอร์ของสเตปปีงมอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์จะเป็นแม่เหล็กรูปทรงระบอบที่วางตัวตามแกนโรเตอร์ ซึ่งมีทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.5(ก) โดยแต่ละโพลของแม่เหล็กจะถูกล้อมรอบด้วยซี่เหล็กอ่อนซึ่งโดยทั่วไปจะทำด้วยเหล็กซินเทอริค (Sintered steel) หรือแท่งเหล็กซิลิคอน (Solid silicon steel) ซี่ฟันของเหล็กอ่อนทั้งสองด้าน (เหนือและใต้) จะมีตำแหน่งเยื้องกันครึ่งหนึ่งของซี่ฟัน และสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดสเตเตอร์มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.5(ข)

2.3 รูปแบบการกระตุ้นสเตปปีงมอเตอร์

รูปแบบการกระตุ้น (Modes of stepping motor) คือ การจัดลำดับสัญญาณกระตุ้นวงจรขดลวด เพื่อควบคุมทิศทางในการหมุนของสเตปปีงมอเตอร์ ซึ่งการกระตุ้นสเตปปีงมอเตอร์มีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ ดังนี้

2.3.1 การกระตุ้นแบบทีละเฟส (One-phase excitation) ตารางที่ 2.1 แสดงลำดับสัญญาณเพื่อขับเคลื่อนแต่ละเฟสของสเตปป์มอเตอร์ขนาด 3 และ 4 เฟส ในโหมดของการขับเคลื่อนทีละเฟส โดยในส่วนของพื้นที่แรงงานั้นจะเป็นสถานะของการจ่ายพลังงานให้แก่สเตปป์มอเตอร์ เมื่อของการให้สเตปป์มอเตอร์หมุนจะทำการจ่ายพลังงานให้แก่แต่ละเฟส ของสเตปป์มอเตอร์เรียงลำดับกันไป เช่น ในสเตปป์มอเตอร์ขนาด 3 เฟส ดังนี้ เฟส 1, เฟส 2, เฟส 3, เฟส 1,... และถ้าต้องการให้สเตปป์มอเตอร์หมุนในทิศทางตรงกันข้าม โดยการจ่ายพลังงานให้แก่แต่ละเฟสในทิศทางตรงกันข้ามด้วย ดังนี้ เฟส 3, เฟส 2, เฟส 1, เฟส 3,... หรือในสเตปป์มอเตอร์ขนาด 4 เฟส ก็ทำนองเดียวกัน

ตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะสัญญาณ เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟส

(ก) สเตปป์มอเตอร์ขนาด 3 เฟส

| สัญญาณพัลส์ | R | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| เฟส 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| เฟส 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| เฟส 3 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |

(ข) สเตปป์มอเตอร์ขนาด 4 เฟส

| สัญญาณพัลส์ | R | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| เฟส 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| เฟส 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| เฟส 3 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| เฟส 4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |

R = รีเซ็ต (Reset)

2.3.2 การกระตุ้นแบบทีละสองเฟส (Two-phases excitation) การลำดับสัญญาณเพื่อขับเคลื่อนของสเตปป์มอเตอร์แบบทีละสองเฟส ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งเป็นสเตปป์มอเตอร์ขนาด 3 เฟส และ 4 เฟส ตามลำดับ จะเห็นว่า การกระตุ้นแบบทีละสองเฟส ขณะที่กระแสที่กระตุ้นเฟสหนึ่งสวิตช์ไปสู่อีกเฟสหนึ่งนั้น ในเฟสที่ 3 ยังคงอยู่ในสถานะของการกระตุ้น

ตารางที่ 2.2 แสดงลักษณะสัญญาณ เมื่อกระตุ้นแบบทีละสองเฟส

(ก) สเตปป์มอเตอร์ขนาด 3 เฟส

| สัญญาณพัลส์ที่ | R | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| เฟส 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| เฟส 2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| เฟส 3 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |

(ข) สเตปป์มอเตอร์ขนาด 4 เฟส

| สัญญาณพัลส์ที่ | R | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| เฟส 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| เฟส 2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| เฟส 3 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| เฟส 4 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |

R = รีเซ็ต (Reset)

การกระตุ้นแบบทีละสองเฟส จะมีข้อดีว่าการกระตุ้นแบบทีละเฟส คือ จะให้การตอบสนองต่อแบบซึ่งเกิดสเตปได้ดีกว่า

2.3.3 การกระตุ้นแบบทีละครึ่งสเตป (Half step excitation) การกระตุ้นสเตปป์มอเตอร์แบบทีละครึ่งสเตป เป็นการรวมกันระหว่างการกระตุ้นแบบทีละเฟสและแบบทีละสองเฟส โดยลักษณะการจัดลำดับการจ่ายพลังงานแต่ละเฟสแสดงดังตารางที่ 2.3 เป็นลักษณะการกระตุ้นสเตปป์มอเตอร์ขนาด 3 เฟส ซึ่งจะมีสัญญาณนาฬิกาที่ใช้อยู่ 2 สัญญาณ คือ สัญญาณ (A) เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟส และสัญญาณ (B) เป็นการกระตุ้นแบบทีละสองเฟส ซึ่งจะกระตุ้นสลับกันระหว่างแบบทีละเฟสกับแบบทีละสองเฟส ดังนั้น โรเตอร์จะเคลื่อนที่ทีละครึ่งสเตป ซึ่งจะส่งผลให้การเคลื่อนตำแหน่งของโรเตอร์ลดการสั่นลง (Suppress oscillation)

ตารางที่ 2.3 แสดงลักษณะสัญญาณ เมื่อกระตุ้นแบบทีละครึ่งสเตป

| สัญญาณพัลส์ (A) | R | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | | | | |
|-----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| สัญญาณพัลส์ (B) | R | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| เฟส 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| เฟส 2 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| เฟส 3 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |

R = รีเซ็ต (Reset)

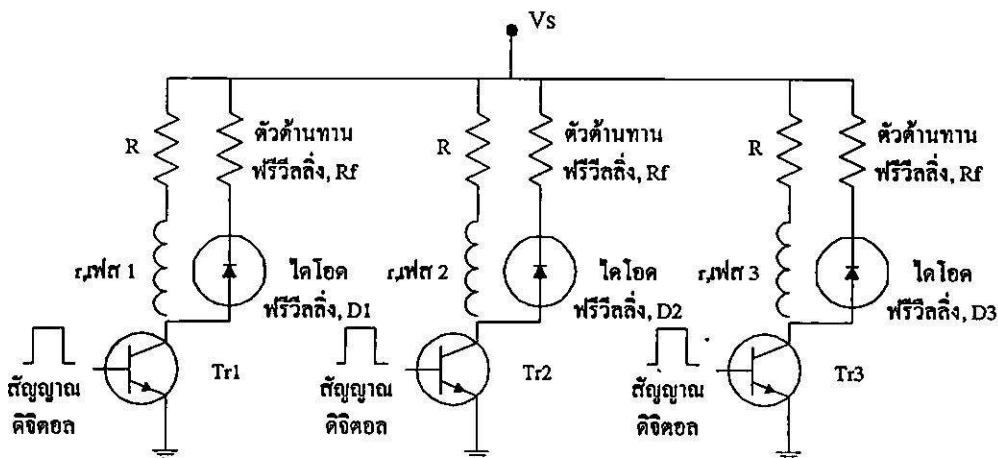
2.4 วงจรขับสเตปปีงมอเตอร์

สเตปปีงมอเตอร์ชนิดคาร์ลัคแดนซ์แปรค่าได้ โดยทั่วไปมีเฟสอย่างน้อย 3 เฟส ซึ่งแต่ละเฟสต้องการเพียงแค่ควบคุมการปิด, เปิด สวิตช์ให้กระแสไหลผ่านขดลวดเท่านั้น ขั้วหรือทิศทางการไหลของกระแสไม่มีผลต่อสเตปปีงมอเตอร์ ดังนั้นวงจรขับของสเตปปีงมอเตอร์ชนิดคาร์ลัคแดนซ์แปรค่าได้ จึงเป็นวงจรขับอย่างง่ายที่เรียกว่า วงจรขับแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar) เนื่องจากให้กระแสไหลในทิศทางเดียว ส่วนลดสเตปปีงมอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์หรือชนิดแม่เหล็กถาวร ส่วนใหญ่มักจะมี 2 เฟส ขั้วหรือทิศทางการไหลของกระแสเป็นสิ่งที่มีความสำคัญต่อการเคลื่อนที่ของสเตปปีงมอเตอร์ ดังนั้นจึงต้องใช้วงจรขับที่เรียกว่า วงจรขับแบบไบโพลาร์ (Bipolar) ที่สามารถให้กระแสไหลได้ใน 2 ทิศทาง[4] ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.4.1 วงจรขับแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar drive circuit) วงจรขับแบบยูนิโพลาร์นี้ เป็นวงจรขับอย่างง่ายที่นิยมใช้ขับสเตปปีงมอเตอร์ชนิดคาร์ลัคแดนซ์แปรค่าได้ วงจรขับของสเตปปีงมอเตอร์ในแต่ละเฟสจะถูกแยกออกจากกันเพื่อใช้กระแสขดลวดในแต่ละเฟส วงจรขับนี้จะได้รับการควบคุมด้วยสัญญาณควบคุมที่มีค่ากำลังงานต่ำ เช่น สัญญาณจากไอซี TTL ดังในรูปที่ 2.6

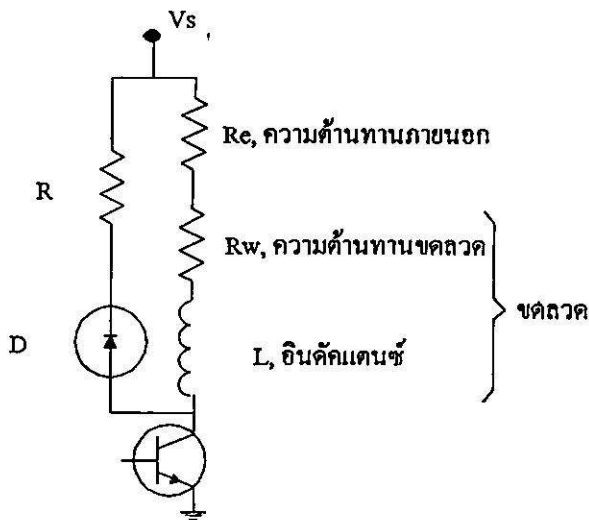
ขดลวดแต่ละเฟสจะได้รับการกระตุ้นจากการสวิตช์ของทรานซิสเตอร์ จนกระแสที่ไหลผ่านขดลวดถึงจุดอิมิตัวของทรานซิสเตอร์ภายใต้สภาวะการณีนี้นี้ แหล่งจ่ายไฟดีซี (DC. Supply) จะตกคร่อมขนานไปกับ ตัวต้านทานบังคับ (R_p , Force resistance) ที่ต่ออนุกรมกับขดลวดอยู่ ดังนั้น แหล่งจ่ายไฟดีซี จะถูกเลือกให้ผลัดกระแสจนมีค่าถึงพิกัดที่ขดลวดของมอเตอร์ตามต้องการ โดยที่ผลรวมโวลต์ตกคร่อมขดลวดกับตัวต้านทานต้องมีค่าเท่ากับผลรวมของกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานในขดลวด (r) กับตัวต้านทาน (R_p) คือ[4]

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



รูปที่ 2.6 แสดงวงจรขับสเตปมอเตอร์แบบยูนิโพลาร์

โดยทั่วไปแล้วขดลวดจะมีค่าคงที่ของเวลา (Time constant = L/R) ที่มีค่ายาวนาน ซึ่งเป็นตัวทำให้กระแสไหลเพิ่มขึ้นได้ช้า ดังนั้นการทำให้กระแสไหลเพิ่มขึ้นได้เร็วคือการทำให้ค่าคงที่ของเวลามีค่าน้อยลง โดยการเพิ่มค่าตัวต้านทาน (R_f) ให้มีค่ามากขึ้นตามสัดส่วนกับแหล่งจ่ายไฟ ส่วนตัวต้านทานและไดโอดฟรีวิลลิง (Free wheeling diode) จะทำหน้าที่ช่วงระยะบายกระแสให้ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงทรานซิสเตอร์หยุดทำงาน

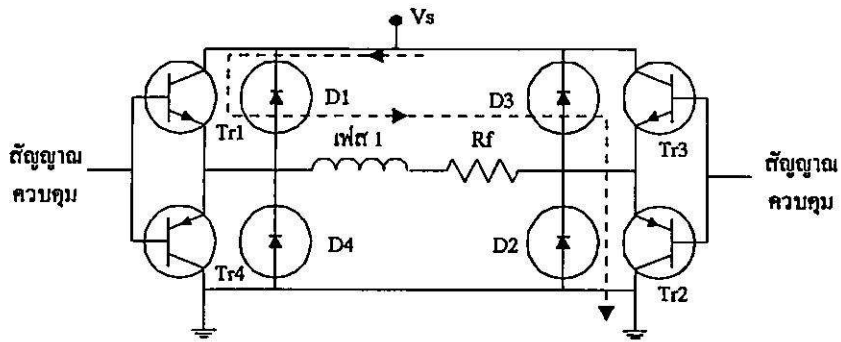


รูปที่ 2.7 แสดงการปรับปรุงการเพิ่มกระแสในวงจรขับโดยใช้ตัวความต้านทาน

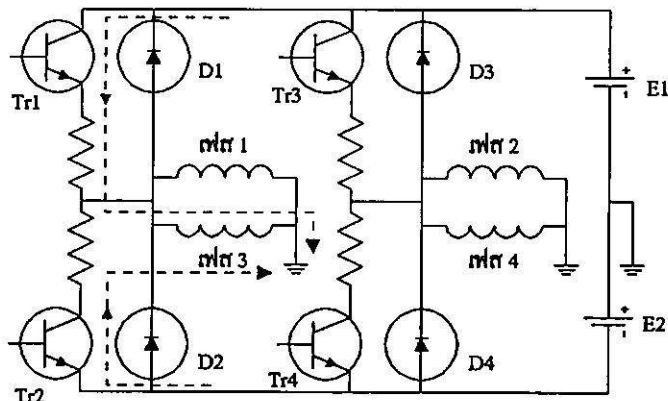
การปรับปรุงการเพิ่มกระแส (Improvement of build-up current) เมื่อทรานซิสเตอร์ถูกกระตุ้นให้ทำงาน ผลของความเหนี่ยวนำ (Inductance) จะหน่วงกระแสจากภาคจ่ายไฟไปยังทรานซิสเตอร์ เป็นผลให้การตอบสนองการทำงานของวงจรขับช้าลงจึงมีวิธีการต่างๆ เพื่อที่จะเพิ่มการตอบสนองของวงจรให้สูงขึ้น ดังนี้

การใช้ค่าความต้านทานเพิ่มเข้าไปยังวงจรทางขา C ของทรานซิสเตอร์ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด ในกรณีนี้ค่าคงที่ของเวลา (Time constant) ของวงจรภายในสภาวะคงตัว (Steady-state) จะลดลงจาก L/R_w เป็น $L/(R_s + R_w)$ ในวงจรลักษณะนี้จะมีข้อเสีย คือ กำลังงานสูญเสียที่เกิดขึ้นที่ความต้านทานที่ต่อเพิ่มเข้าไปจะมีค่าสูง ตัวอย่าง เช่น เมื่อวงจรมันทำงานในลักษณะการขับที่ละเฟสความต้านทานของขดลวดแต่ละเฟสเท่ากับ 1.5 กระแสพิกัดเท่ากับ 4 A. และใช้แหล่งจ่ายไฟ 24 V. ดังนั้นจะต้องใช้ความต้านทาน R_s เพิ่มเข้าไป 4.5 ในแต่ละเฟส ดังนั้นกำลังงานสูญเสียที่ R_s จะมีประมาณ $4.5 \times 4^2 = 72$ W. และจะมีค่าเป็นสองเท่าเมื่อขับแบบที่ละสองเฟส [1]

2.4.2 วงจรขับแบบไบโพลาร์ (Bipolar drive circuit) วงจรขับแบบไบโพลาร์นี้จะนิยมใช้กับสเตปปีงมอเตอร์ชนิดไฮบริดจ์หรือชนิดแม่เหล็กถาวร เนื่องจากวงจรมันสามารถให้กระแสไหลได้ 2 ทิศทาง ในขดลวดของมอเตอร์เพียงหนึ่งเฟส โดยทรานซิสเตอร์จะทำงานเป็นคู่ เพื่อให้กระแสไหลผ่านขดลวดในทิศทางที่ถูกต้องดังในรูปที่ 2.8 เมื่อกระตุ้นขดลวดด้วยสัญญาณบวก จะทำให้ Tr_1 กับ Tr_2 ทำงานอยู่ในสถานะปิดวงจร กระแสจะไหลออกจากแหล่งจ่ายไฟผ่าน Tr_1 ไปสู่ขดลวดผ่านตัวต้านทาน R_f ไหลลงสู่ Tr_2 แล้วลงสู่กราวด์ (Ground) ในทางตรงกันข้าม เมื่อกระตุ้นด้วยสัญญาณลบจะทำให้ Tr_3 กับ Tr_4 ทำงานคืออยู่ในสถานะปิดวงจร โดยกระแสจะไหลกลับทิศทางทรานซิสเตอร์ทั้ง 4 ตัวนี้ในวงจรแบบบริดจ์นี้ จะทำหน้าที่แยกขาเบสของวงจรขับออกจากกัน ในวงจรแบบบริดจ์นี้จะมีไดโอด 4 ตัวต่อในทิศทางแบบย้อนกลับขนานไปกับทรานซิสเตอร์ทั้ง 4 ตัว โดยทำหน้าที่เป็นฟรีวิลลิงไดโอด (Free wheeling diode) เมื่อสภาวะที่ Tr_1 กับ Tr_2 หยุดจ่ายกระแส กระแสที่ไหลผ่านขดลวดจะเริ่มลดลง โดยกระแสจะไหลผ่านไดโอด D_3 กับ D_4 กลับสู่แหล่งจ่ายไฟ วงจรขับแบบนี้จะช่วยให้พลังงานที่สะสมอยู่ในขดลวดหลังจากที่ทรานซิสเตอร์หยุดทำงานกระจายกลับสู่แหล่งจ่ายไฟนอกจากนี้วงจรขับแบบบริดจ์เป็นวงจรขับที่มีประสิทธิภาพสูง เมื่อเปรียบเทียบกับการขับแบบยูนิโพลาร์ที่ผ่านมา เนื่องจากมีลักษณะการขับแบบไบโพลาร์ที่ทุกเฟสของมอเตอร์กระแสจะสามารถไหลได้ทั้ง 2 ทิศทาง[1] วงจรขับไบโพลาร์แบบบริดจ์นี้สามารถนำไปใช้ขับสเตปปีงมอเตอร์ชนิดคาร์คัตแดนซ์แปรค่าได้ด้วย ค่ากระแสที่ไหลในฟรีวิลลิงไดโอดในวงจรขับแบบไบโพลาร์นี้จะลดลงอย่างรวดเร็วกว่าวงจรขับแบบยูนิโพลาร์ เนื่องจากทิศทางกระแสที่ไหลจะอยู่ในลักษณะตรงกันข้ามกับแหล่งจ่ายไฟ ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องเพิ่มค่าตัวต้านทานฟรีวิลลิงลงในวงจรขับแบบไบโพลาร์นี้ [4]



รูปที่ 2.8 แสดงวงจรขับสเตปป์มอเตอร์แบบไบโพลาร์



รูปที่ 2.9 แสดงวงจรขับแบบบริดจ์

วงจรขับแบบบริดจ์มีอยู่ด้วยกัน 2 ลักษณะ ลักษณะแรกดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งสามารถสรุปลักษณะการทำงานและหน้าที่ของวงจรได้ ดังนี้

1. ถ้าสเตปป์มอเตอร์มี 8 ขั้ว ที่มีลักษณะการต่อแยกอิสระออกจากกัน ถูกต่อให้มีลักษณะดังในรูปที่ 2.29 แล้ว ขั้วของขดลวดเฟส 1 และเฟส 3 จะมีลักษณะเหมือนกันตลอดเมื่อมีกระแสไหลผ่านไม่ว่าทิศทางใด ดังนั้นในกรณีนี้สเตปป์มอเตอร์จะทำงานในลักษณะของมอเตอร์ 2 เฟส
2. เพื่อป้องกันความเสียหายอันเนื่องมาจากการทำงานที่พร้อมกันในเวลาเดียวกัน ของทรานซิสเตอร์ 2 ตัว เช่น Tr1 และ Tr2 หรือ Tr3 และ Tr4 จำเป็นจะต้องมีวงจรหน่วงเวลาซึ่งในตัวอย่างใช้อุปกรณ์ความต้านทานต่อเพิ่มเข้าไปดังแสดงในรูป [1]
3. ไดโอดชัฟเฟรสเซอร์ ไดโอดที่ต่อขนานกับทรานซิสเตอร์จะทำหน้าที่ลดแรงดันกระชาก (Spike voltage) อันเนื่องมาจากทรานซิสเตอร์ตัวใดตัวหนึ่งเปิดวงจร และยังคงมีหน้าที่ต่างไปจากในวงจรขับแบบยูนิโพลาร์อีก กล่าวคือ ถ้า Tr1 กำลังนำกระแสทิศทางของกระแสจะมีทิศทางดังถูกสรเส้นประในรูป 2.9 ทันทีที่ Tr1 หยุดทำงาน และ Tr2 ทำงานต่อ กระแสในขดลวดจะไม่ไหลกลับแต่ยังจะไหลวนผ่าน D2 ไปยังแหล่งจ่ายไฟ E(2) ซึ่งแสดงทิศทางของถูกสรเส้นประในรูป ซึ่งอาจกล่าวได้ว่ากระแสจากขั้วลบของ E(2) ถูกจ่ายออกมาหรืออีกนัยหนึ่งเป็นการเก็บประจุ

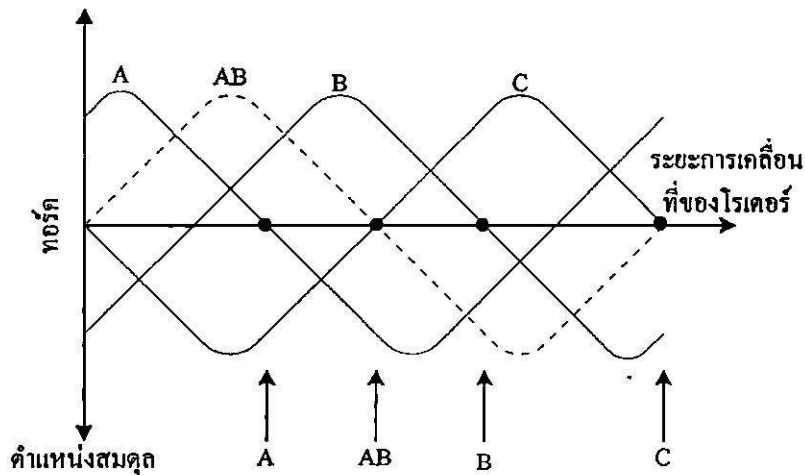
(Charge) ให้กับแบตเตอรี่หรือพลังงานจากสนามแม่เหล็กจ่ายกลับคืนไปยังแหล่งจ่ายไฟ ต่างกับการขับแบบยูนิโพลาร์ที่พลังงานนี้สูญญหายไปกับอุปกรณ์ภายในวงจร เช่น ขดลวด, ไดโอด และ อุปกรณ์ค่าความต้านทาน ซึ่งเป็นข้อดีของวงจรขับแบบบริดจ์นี้ [1]

4. การเปลี่ยนทิศทางของกระแสในขดลวดของมอเตอร์ ในการขับแบบยูนิโพลาร์ หลังจาก ที่ทรานซิสเตอร์หยุดทำงาน จะใช้อุปกรณ์ซัพเพรสเซอร์ลดกระแสไหลวนที่เกิดขึ้น ส่วนในกรณี ของการขับแบบไบโพลาร์นี้ จะจ่ายแรงดันอันหนึ่งเพื่อให้กระแสไหลกลับทาง กล่าว คือ หลังจาก ที่ กระแสค้างแสดงด้วยเส้นประในรูปกลายเป็นศูนย์ กระแสอีกอันหนึ่งจะเกิดขึ้นผ่าน Tr2 ในทิศทาง ตรงกันข้าม [1]

2.5 คุณสมบัติแรงบิด

การศึกษาคุณสมบัติของสเตปป์มอเตอร์ เพื่อให้สามารถควบคุมการทำงานของสเตปป์ มอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพ ต้องศึกษาถึงคุณสมบัติต่างๆ เช่น คุณสมบัติเกี่ยวกับแรงบิด (Torque) หรือแรงบิด ค่าของความถี่สูงสุดที่มอเตอร์สามารถตอบสนองได้ คุณสมบัติเกี่ยวกับกระแสซึ่งมี ความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงค่าแรงบิด ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ศึกษาได้จากกราฟแสดงคุณ ติบัติของสเตปป์มอเตอร์

2.5.1 คุณสมบัติแรงบิดสถิติก (Static torque characteristic) คุณสมบัติทางสถิติก หมายถึงคุณสมบัติในสภาวะที่มอเตอร์หยุดนิ่งไม่มีการเคลื่อนไหวซึ่งสามารถแสดงได้โดยกราฟ ของแรงบิดในรูปที่ 2.10 ตำแหน่งของการหมุน คือ ตำแหน่งซีฟันของโรเตอร์และซีฟันของสเต เตอร์ที่มีความสัมพันธ์กันอยู่ในแนวเดียวกันและคงอยู่ในตำแหน่งนี้อย่างไม่มีกำหนด จนกว่าจะได้ รับสัญญาณกระตุ้นครั้งต่อไปที่ตำแหน่งสมดุลของโรเตอร์จะมีค่าแรงบิดเป็นศูนย์ ซึ่งถ้าโรเตอร์มี การเคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง สเตปป์มอเตอร์ก็จะทำการสร้างสมดุลให้กับโหลด (Load) โดยการสร้างแรงบิดขึ้นมา ในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางเคลื่อนที่ ผลของแรงบิดกับ การเคลื่อนที่ของโรเตอร์จะมีลักษณะคล้ายกับรูปคลื่นไซน์ (Sine wave)

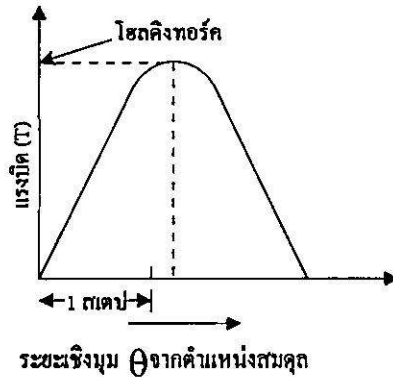


รูปที่ 2.10 แสดง คุณลักษณะทางสถติกของสเตปิ่งมอเตอร์ขนาดสามเฟส

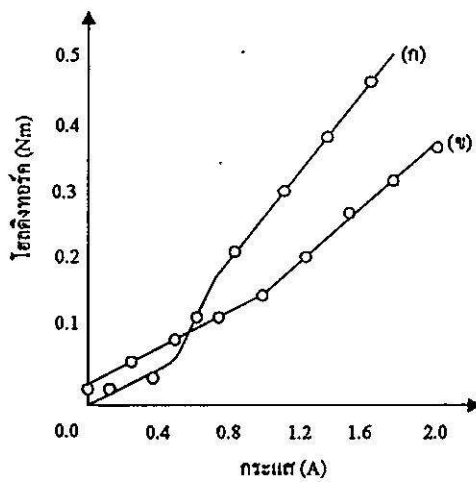
แรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้น จะขึ้นอยู่กับกระแสที่จ่ายให้เฟสนั้นๆ โดยที่แรงบิดนี้ เรียกว่า สภาพคองแรงบิด (Holding torque) หรือแรงบิดสถติก (Static torque) และลักษณะความสัมพันธ์ ที่เกิดขึ้นระหว่างค่าของแรงบิดกับกระแสที่เปลี่ยนแปลงไปจะเป็นลักษณะเชิงเส้น แต่ก็จะมีขีดจำกัดอยู่ที่จุดอิ่มตัวของทั้งโรเตอร์และสเตเตอร์ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแม่เหล็ก โดยที่จุดอิ่มตัวนี้จะไม่มีการเพิ่มขึ้นของแรงบิดแม้ว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของกระแสเฟสก็ตาม ค่าของแรงบิดจะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อตำแหน่งของโรเตอร์อยู่ที่ระยะครึ่งหนึ่งของระยะซึ่งโรเตอร์ สเตปิ่งมอเตอร์มีโอกาสที่จะเกิดการลื่นไถลไปยังตำแหน่งสมดุคอื่นได้นั้นคือเราจะถือว่าจุดนี้เป็นจุดวิกฤต เมื่อเราต้องการให้สเตปิ่งมอเตอร์มีค่าตำแหน่งที่ถูกต้อง เราจำเป็นต้องใช้สเตปิ่งมอเตอร์ที่มีค่าแรงบิดสูงสุด ที่มากกว่าค่าแรงบิดของค่าการภายนอกหรือแรงบิดโหลดของสเตปิ่งมอเตอร์

คุณลักษณะทางสถติกจะแสดงความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

1. คุณลักษณะของแรงบิดกับมุมสเตป (T/θ Characteristics) ในรูปที่ 2.11 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ แรงบิดสถติกสูงสุดที่เกิดขึ้นเรียกว่า สภาพคองแรงบิดหรือ โฮลดิ้งทอร์ก (Holding torque) ที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง $\theta = \theta_{\text{max}}$ ตำแหน่งที่เกิดสภาพคองแรงบิดนี้จะมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งสมดุคของโรเตอร์ ซึ่งสภาพคองแรงบิดก็คือลักษณะของการบิดขั้นมูลฐานทั้งหมดของมอเตอร์ แสดงถึงแรงบิดที่มีการสะสมอยู่ที่ตัวมอเตอร์ โดยจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่งของโรเตอร์ แรงบิดสถติกจะมีจุดเริ่มต้นที่สภาพคองแรงบิด



รูปที่ 2.11 แสดง กราฟคุณลักษณะของแรงบิด (T) ต่อมุมสเตป (θ)



รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์คุณลักษณะของแรงบิดต่อกระแส

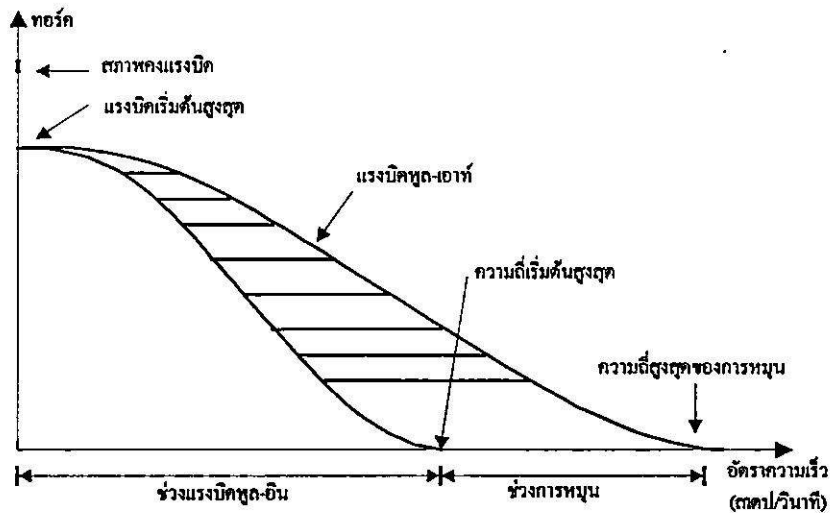
ของสเตปป์มอเตอร์ขนาดสี่เฟส มุมสเตปเท่ากับ 1.8 องศา

(ก) สเตปป์มอเตอร์ประเภทแปรค่าความต้านทานทางแม่เหล็ก

(ข) สเตปป์มอเตอร์ประเภทไฮบริดจ์

2. คุณลักษณะของแรงบิดกับกระแส (T/I Characteristics) รูปที่ 2.12 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพคงแรงบิดกับกระแสที่จ่ายให้กับเฟสต่างๆ ของสเตปป์มอเตอร์ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของโรเตอร์ผ่านจุดสมจุดเริ่มต้น ถ้าแรงเสียดทานมีค่ามากกว่าแรงบิดโรเตอร์จะหยุดก่อนถึงตำแหน่งสมจุด ความไม่แน่นอนของตำแหน่งจากจุดสมจุดคือความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่ง ค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งนี้จะไม่มีการสะสม การลดค่าความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งต้องลดโหลดหรือเพิ่มโวลติจทอร์ค

2.5.2 คุณสมบัติทางไดนามิก (Dynamic torque characteristic) การพิจารณาคุณสมบัติทางไดนามิกของสเตปป์มอเตอร์จะเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของมอเตอร์หรือความสามารถในการสร้างแรงบิดที่สัมพันธ์กับความเร็วตั้งแต่สเตปป์มอเตอร์เริ่มต้นหมุน คุณสมบัติเหล่านี้สามารถศึกษาได้จากคู่มือของบริษัทผู้ผลิต ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.13 เป็นการแสดงคุณสมบัติของสเตปป์มอเตอร์ตัวหนึ่ง ซึ่งจะบอกถึงรายละเอียดการทำงานดังนี้



รูปที่ 2.13 แสดงคุณสมบัติทางไดนามิกของสเตปป์มอเตอร์

1. คุณสมบัติแรงบิด พูล-อิน (Pull-In torque characteristics) เป็นคุณสมบัติของสเตปป์มอเตอร์สามารถเริ่มต้นหมุน (Start) โดยอ้างอิงค่าแรงบิดเริ่มต้นที่ค่าแรงบิดเสียดทานของโหลด (Friction load torque) ซึ่งมอเตอร์สามารถเริ่มต้นหมุนและหยุด (Stop) หรือเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามโดยปราศจากการสูญเสียของสัญญาณพัลส์อินพุทที่ป้อนให้

2. คุณสมบัติแรงบิดพูล-เอาท์ (Pull-out torque characteristics) ถ้าสเตปป์มอเตอร์ทำงานในช่วงความถี่แรงบิดพูล-เอาท์ สเตปป์มอเตอร์จะไม่สามารถหยุดหรือเปลี่ยนทิศทางการหมุนเพื่อเริ่มต้นหมุนใหม่ได้ ดังนั้น ในช่วงการทำงานนี้จึงเรียกว่า ช่วงการหมุน (Slew-range) การทำงานในช่วงการหมุนจะอยู่ระหว่างช่วงกราฟแรงบิดพูล-อินกับแรงบิดพูล-เอาท์ เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์การตอบสนองการหมุนในช่วงความถี่ต่างๆ จนถึงความถี่สูงสุดที่สเตปป์มอเตอร์สามารถจะตอบสนองได้ และตอบสนองการทำงานนี้ยังต้องขึ้นอยู่กับวงจรขับอีกด้วย แรงบิดพูล-เอาท์ ของสเตปป์มอเตอร์ไม่ได้ถูกจำกัดการทำงานไว้จุดใดจุดหนึ่งหรือมีทรานเฟอร์ฟังก์ชันเข้ามาเกี่ยวข้องเหมือนในกรณีของ ดีซี มอเตอร์ (DC Motor) แต่จะกำหนดการทำงานด้วยเส้นกราฟกราฟพูล-เอาท์นี้ สามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยขึ้นอยู่กับวงจรขับเคลื่อน ในขณะที่แรงบิดพูล-เอาท์ลด

ลงจะทำให้ความถี่การหมุนสูงขึ้น และในทางตรงกันข้ามถ้าความถี่การหมุนลดลงจะทำให้แรงบิด
พูล-เอาท์ สูงขึ้น

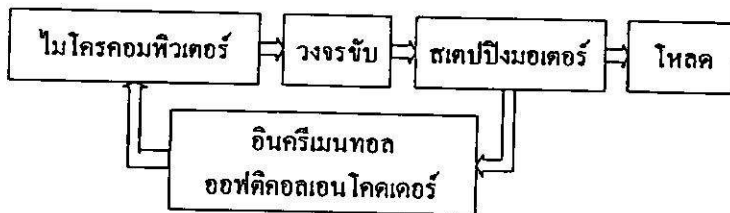
บทที่ 3

หลักการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ แบบวงปิดด้วยวิธีการของลีดแองเกิล

สิ่งสำคัญที่สุดของการประยุกต์ใช้งานสเตปป์มอเตอร์ ก็คือระบบการควบคุมการขับเคลื่อน สเตปป์มอเตอร์ ซึ่งการควบคุมสเตปป์มอเตอร์สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือแบบวงเปิด (Open-loop) และแบบวงปิด (Closed loop) สิ่งสำคัญที่สุดของการประยุกต์ใช้งานสเตปป์มอเตอร์ ก็คือระบบการควบคุมการขับเคลื่อนสเตปป์มอเตอร์ ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการของ ลีดแองเกิล สำหรับการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิด เพื่อปรับปรุงผลการทำงานของสเตปป์ มอเตอร์ให้ดีขึ้น

3.1 หลักการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิด

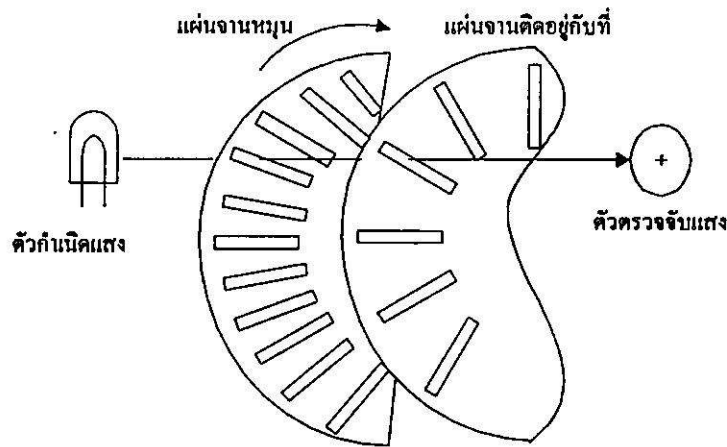
การควบคุมแบบวงปิดมีหลายชนิด ในที่นี้จะกล่าวถึงการควบคุมแบบวงปิดด้วยการควบคุมสวิดชิงแองเกิลหรือลีดแองเกิล ดังรูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของการควบคุมการทำงานของสเตปป์ มอเตอร์แบบวงปิด มีอินทรีย์เมนทอลออปติคอลลเอนโคดเดอร์ (Incremental optical encoder) หรือเรียกว่า เอนโคดเดอร์ (Encoder) ซึ่งจะทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์ตามผลการตอบสนองของ การเคลื่อนที่ของสเตปป์มอเตอร์ เพื่อป้อนสัญญาณกลับมาควบคุมการเคลื่อนที่ในสเตปป์ถัดไปของ ตัวสเตปป์มอเตอร์ ดังนั้นจะต้องป้อนพัลส์คำสั่งแรก เพื่อให้สเตปป์มอเตอร์เริ่มต้นทำงานก่อน และหลังจากนั้นเอนโคดเดอร์จะสร้างสัญญาณป้อนกลับบอกสถานะของโรเตอร์แก่ไมโคร คอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลคำสั่งพัลส์ในสเตปป์ต่อไปให้เหมาะสม จึงส่งผลให้การควบคุมแบบวงปิด นี้มีเสถียรภาพของระบบดีขึ้น



รูปที่ 3.1 แสดงการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิด

3.2 เอนโคเดอร์

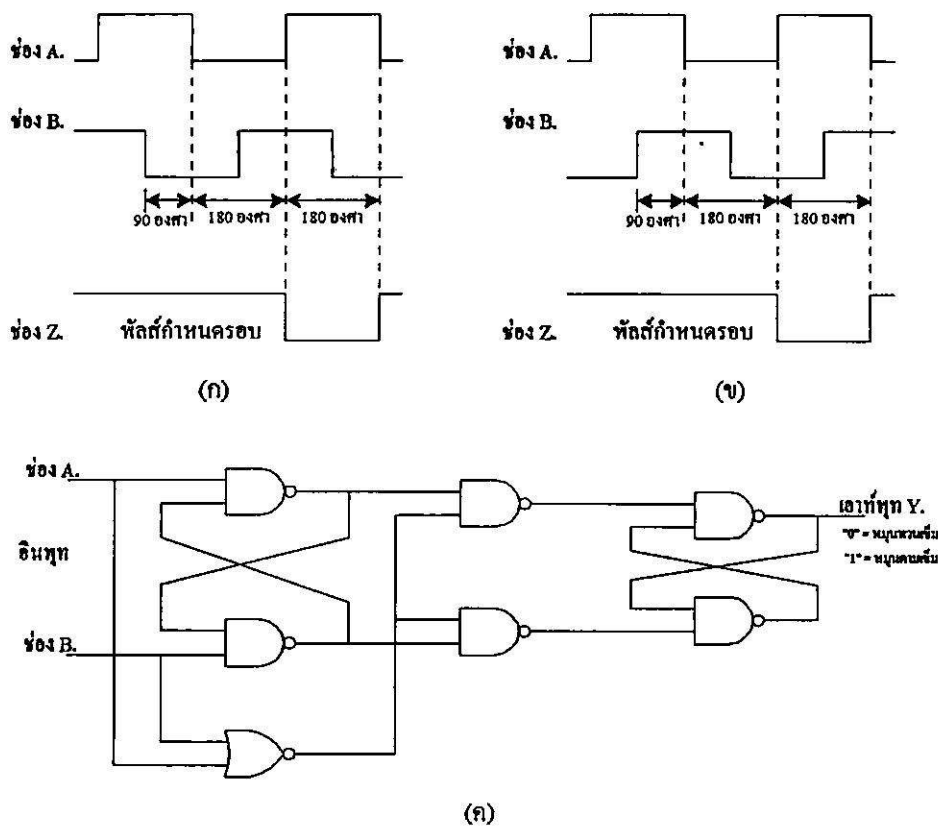
การตรวจนับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ ซึ่งนิยมใช้เอนโคเดอร์แบบแสง หรือเรียกว่า ออปติคัลเอนโคเดอร์ (Optical encoder) สำหรับใช้ในระบบที่ต้องการควบคุมตำแหน่งหรือความเร็วของสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิด โดยตัวออปติคัลเอนโคเดอร์จะเป็นตัวสร้างสัญญาณพัลส์ป้อนกลับมาควบคุมรักษาตำแหน่งการเคลื่อนที่ของสเตปป์มอเตอร์ ออปติคัลเอนโคเดอร์มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ตัวกำเนิดแสง (Light source), ตัวตรวจจับแสง (Sensor), แผ่นจานหมุน (Rotary disk), และแผ่นจานติดอยู่กับที่ (Stationary) บนแผ่นจานหมุนและแผ่นจานติดอยู่กับที่ ซึ่งทำเป็นช่องสำหรับให้ตัวกำเนิดแสงส่งแสงผ่านตรงไปยังตัวตรวจจับแสง ดังแสดงในรูปที่ 3.2 สำหรับออปติคัลเอนโคเดอร์ที่ใช้วัดความเร็วต่างๆ อาจไม่ต้องมีแผ่นจานติดอยู่กับที่ก็ได้ ส่วนตัวกำเนิดแสงอาจจะเป็นหลอดไฟหรือตัวกำเนิดแสงชนิดไดโอด (LED)



รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างกลไกของออปติคัลเอนโคเดอร์

สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากเอนโคเดอร์โดยตรงจะมีระดับสัญญาณไม่เพียงพอในการควบคุมหรือสำหรับการประมวลผลสัญญาณ ดังนั้น จึงต้องมีวงจรขยายและแปลงรูปร่างของสัญญาณอยู่ในตัวเอนโคเดอร์เสมอ สัญญาณที่ถูกคลื่นที่ได้จากตัวเอนโคเดอร์ปัดจี้จะเป็นรูปสัญญาณสามเหลี่ยมหรือรูปคลื่นซายน์ รูปสัญญาณเหล่านี้สามารถทำให้เป็นรูปสัญญาณสี่เหลี่ยมได้ โดยการต่อตัวเปรียบเทียบ (Comparator) เข้ากับภาคขยายเชิงเส้นของตัวเอนโคเดอร์ จึงทำให้ได้สัญญาณเอาต์พุตเป็นรูปสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 3.3(ก) และรูปที่ 3.3(ข) ซึ่งแสดงถึงสัญญาณเอาต์พุตชนิดสองช่องสัญญาณ คือ สัญญาณช่อง A และ B ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตระหว่างสองช่องนี้จะมีเฟสต่างกัน 90 องศาทางไฟฟ้าและระดับสัญญาณจะมี 2 ระดับ คือ “0” และ “1” โดยขึ้นอยู่กับทิศทางการหมุนของเพลา สมมติถ้าเพลาหมุนตามเข็มนาฬิกา สัญญาณช่อง A มีระดับเป็น “1” ก่อนช่อง “B” อยู่ 90 องศาทางไฟฟ้า เป็นต้น เอนโคเดอร์บางชนิดอาจมีสัญญาณเอาต์พุต 1 ช่อง และบางชนิด

อาจจะมีสัญญาณพัลส์ที่แสดงถึงจำนวนรอบของการหมุน ดังรูปที่ 3.3(ก), (ข) โดยเป็นสัญญาณช่อง Z ซึ่งสัญญาณพัลส์จะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นหนึ่งพัลส์ต่อเมื่อเพลลาหมุนไปหนึ่งรอบ เพื่อใช้อ้างอิงว่าเพลลาหมุนไปหนึ่งรอบ

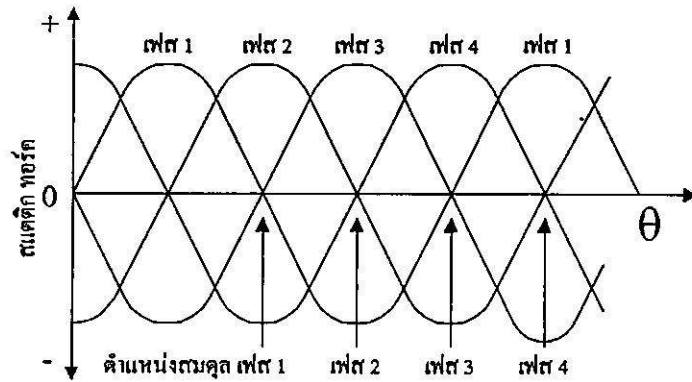


รูปที่ 3.3 แสดงสัญญาณเอาต์พุตของเอนโคเดอร์ และวงจรลอจิกตรวจจับทิศทางการเคลื่อนตำแหน่งของโรเตอร์

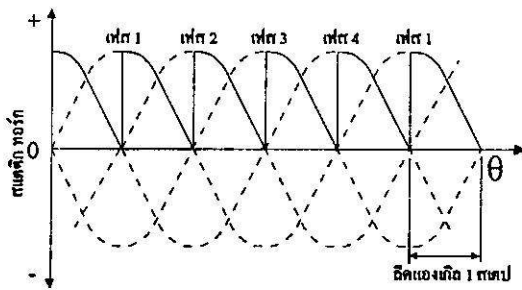
วงจรลอจิกในรูปที่ 3.3(ค) เป็นวงจรตรวจจับทิศทางการเคลื่อนตำแหน่งของโรเตอร์ วงจรจะมีสัญญาณอินพุต 2 ช่อง คือ ช่อง A และช่อง B โดยจะต่อเข้ากับเอาต์พุตของเอนโคเดอร์ เพื่อเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณที่เหลื่อมและสัญญาณเอาต์พุต คือ ช่อง Y แสดงเครื่องหมายบอกทิศทางการเคลื่อนตำแหน่งของโรเตอร์ในรูปของสัญญาณลอจิก 2 ระดับ คือ ลอจิก “1” แสดงว่าโรเตอร์เคลื่อนตำแหน่งในทิศตามเข็มนาฬิกา (CW) และลอจิก “0” แสดงว่าโรเตอร์เคลื่อนตำแหน่งในทิศทวนเข็มนาฬิกา (CCW)

3.3 ความสัมพันธ์ของลิตเองเกิดกับแรงบิดสแตติก

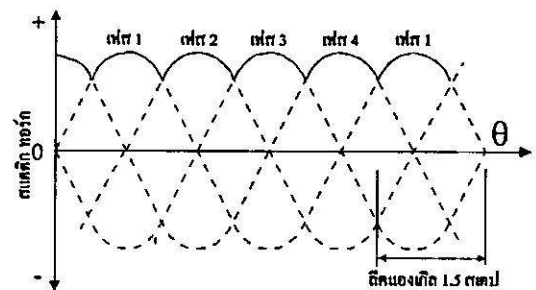
แรงบิดสแตติกของสเตรปป์มอเตอร์ขนาด 4 เฟส สามารถประมาณค่าได้ด้วยรูปคลื่นไซน์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



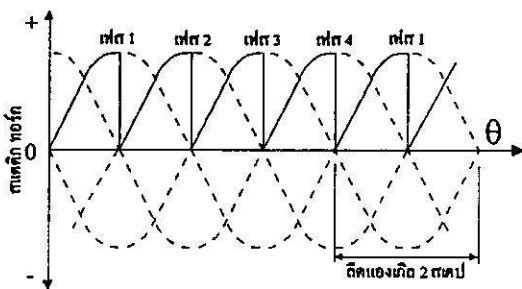
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดสแตติก (T) กับระยะตำแหน่งเชิงมุม (θ)



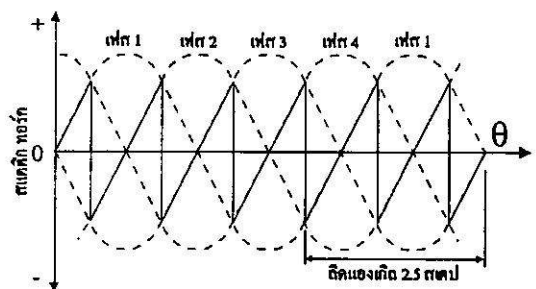
(ก) ลิตเองเกิด 1 สเตป



(ข) ลิตเองเกิด 1.5 สเตป



(ค) ลิตเองเกิด 2 สเตป

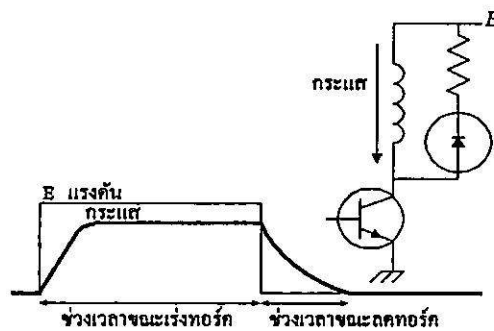


(ง) ลิตเองเกิด 2.5 สเตป

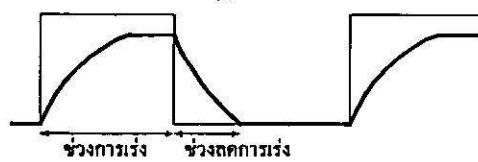
รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลิตเองเกิดกับแรงบิดสแตติกของสเตรปป์มอเตอร์ขนาด 4 เฟส

เมื่อกระตุ้นสเตรปิงมอเตอร์ในโหมดแบบที่เลฟต์ด้วยลีดแองเกิล 1 สเตป ผลของแรงบิดสแตติกที่เปลี่ยนแปลงตามระยะตำแหน่งเชิงมุมมีค่าตามเส้นที่บ แสดงแสดงในรูปที่ 3.3(ก) จะเห็นว่าเมื่อโรเตอร์เคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งสมดุลจะหยุดกระตุ้นในเฟสนี้และจะเปลี่ยนไปกระตุ้นในเฟสถัดไป รูปที่ 3.5(ข) แสดงผลของแรงบิดสแตติกที่ให้ค่ามากที่สุด เมื่อลีดแองเกิล คือ 1.5 สเตป

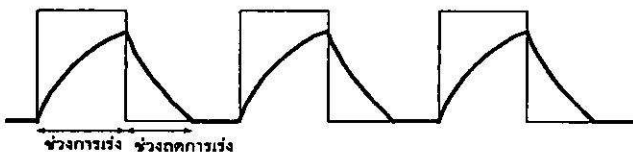
ในรูปที่ 3.5(ง) เมื่อกำหนดให้ลีดแองเกิล คือ 2.5 สเตป ผลของแรงบิดสแตติกที่ได้คือ ศูนย์ หมายความว่าในกรณีนี้ อัตราความเร็วที่ได้จะต่ำสุดหรือไม่มีความเร็ว เพราะค่าแรงบิดสมดุลกันหรือค่าแรงบิดบวกกับลบมีค่าเท่ากัน จึงมีค่าแรงบิดเฉลี่ยเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตามหากสเตรปิงมอเตอร์อยู่ในช่วงการวิ่งลีดแองเกิลเหล่านี้ สเตรปิงมอเตอร์สามารถสร้างแรงบิดเพื่อรักษาอัตราเร่งหรือรักษาระดับความเร็วไว้ได้ เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่เวลาคงที่ของขดลวด ซึ่งกราฟแรงบิดในรูปที่ 3.5 เป็นการสมมุติภายใต้การสร้างกระแสที่ค่าสูงสุดอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ทรานซิสเตอร์ทำงาน (Turned on) ความจริงกระแสจะไม่สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่จะถูกหน่วงเวลาก่อนกระแสมีค่าสูงสุด เนื่องจากการเหนี่ยวนำของขดลวด



(ก) ความเร็วสูง



(ข) ความเร็วกลาง

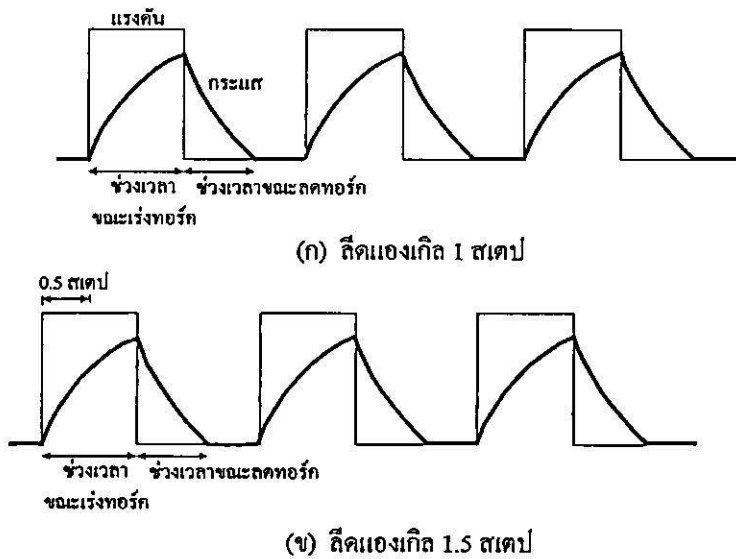


(ค) ความเร็วต่ำ

รูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแส เมื่อทำงานด้วยลีดแองเกิล 1 สเตป

ในรูป 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ที่แสดงถึงความแตกต่างของอัตราการสเตรปิงระหว่าง (ก) ความเร็วต่ำ, (ข) ความเร็วกลาง, และ (ค) ความเร็วสูง ในช่วง

ทรานซิสเตอร์เปิด (ON) จะเกิดค่าแรงบิดบวกขึ้น ส่งผลให้สเตปป์ิงมอเตอร์มีอัตราความเร็วเพิ่มขึ้น และหลังจากทรานซิสเตอร์ปิด (OFF) ซัพเพสเซอร์ไดโอด มีผลทำให้แรงบิดลดช้าลง ในขณะที่อัตราความเร็วต่ำผลแรงบิดที่ลดช้าลงพอจะมองข้ามไปได้ ในรูปที่ 3.6 (ข) และ (ค) ในขณะที่ความเร็วเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบระยะเวลาแรงบิดบวกจะมีระยชเวลาน้อยลงจึงทำให้ผลแรงบิดเฉลี่ยลดลง ดังนั้นค่าแรงบิดสูงสุดจะไม่สูงในเวลานาน ในขณะที่ลีดแองเกิลประมาณ 1.0 สเตป หมายถึงแรงบิดและอัตราความเร็วสูงสุดที่เพิ่มขึ้นนั้นด้วยการเพิ่มลีดแองเกิล ดังนั้น กระแสที่สร้างจะมีเวลาล้าหลังไปแทนที่โดยส่วนโค้งขณะทรานซิสเตอร์เปิด (Turning on) ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะแรงบิดที่เพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มลีดแองเกิลในช่วงอัตราความเร็วสูง

3.3.1 ลีดแองเกิลขณะเริ่มหมุนและลีดแองเกิลขณะหมุน ในขณะที่ระบบออกแบบมาให้ตำแหน่งโรเตอร์ต้องอยู่ตรงตำแหน่งกลางระหว่างตำแหน่งสวิตชิงที่ต่อกัน การหยุดหมุนหรือเริ่มหมุน (Stopping or starting) ลีดแองเกิลจะต้องน้อยกว่าในช่วงการวิ่งต่อเนื่อง 0.5 สเตป ตัวอย่างในตารางที่ 3.1 เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟสและตำแหน่งสุดท้ายที่โรเตอร์ถูกกระตุ้นอยู่ที่ตำแหน่ง P1 จะต้องกระตุ้น เฟส 1 เท่านั้น และทำนองเดียวกันจะกระตุ้นเฟส 2 โรเตอร์ก็ต้องอยู่ตำแหน่ง P2 เช่นกัน ในแถวที่สองของตารางที่ 3.1 จะเห็นว่า การหมุนทางทิศ CW และ CCW ทั้งสองทิศทางจะมีความสอดคล้องกัน เมื่อใดสเตปป์ิงมอเตอร์หยุดหมุนด้วยลีดแองเกิล 0 สเตป แต่เมื่อสเตปป์ิงมอเตอร์เคลื่อนที่ไปทิศทางใดทิศทางหนึ่งแล้ว ลีดแองเกิลจะเป็น 0.5 สเตป ซึ่งมีความต่างกัน 0.5 สเตป แม้แต่กระตุ้นแบบสองเฟสก็ตาม สมมุติให้สเตปป์ิงมอเตอร์เริ่มหันจากตำแหน่ง P1 ด้วยการกระตุ้น เฟส 1 ตามลีดแองเกิลในแถวที่ 2 เมื่อสเตปป์ิงมอเตอร์เริ่มเคลื่อนที่ไปทางทิศ CW แล้ว จะควบคุมการหมุนด้วยลีดแองเกิลในแถวที่ 5 คือ 2.0 สเตป ดังนั้น เฟสปัจจุบันที่ถูกกระตุ้นคือ เฟส 2

และ เฟส 3 ตำแหน่งสมดุลของการกระตุ้นจะเป็นตำแหน่ง S3 ซึ่งมีระยะห่างจาก P1 เท่ากับ 1.5 สเตป ดังนั้น ลีดเองเกิดช่วงการเริ่มหมุนจะน้อยกว่า 2.0 สเตป อยู่ 0.5 สเตป

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์ของลีดเองเกิด, ตำแหน่งสมดุลทำงานแบบเฟสเดียว, และเฟสที่กระตุ้น ในสเตปป์มอเตอร์ 4 เฟส ภายใต้การกำหนดสวิตชิงที่ตำแหน่งสมดุลทำงานสองเฟส

| CW ลีดเองเกิด | S1 S2 S3 S4 S5 S6 | | | | | | CW |
|------------------|-------------------|------|------|------|------|----|------------------|
| | P1 | P2 | P3 | P4 | P1 | P2 | |
| 0 | 4, 1 | 1, 2 | 2, 3 | 3, 4 | 4, 1 | #1 | |
| 0.5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | #2 | หยุดหมุน, CW |
| 1.0 | 1, 2 | 2, 3 | 3, 4 | 4, 1 | 1, 2 | #3 | |
| 1.5 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | #4 | กลับทางหมุน, CW |
| 2.0 | 2, 3 | 3, 4 | 4, 1 | 1, 2 | 2, 3 | #5 | เร่งความเร็ว, CW |
| 2.5 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | #6 | |
| 3.0 | 3, 4 | 4, 1 | 1, 2 | 2, 3 | 3, 4 | #7 | |
| 3.5 (-0.5) | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | #8 | ลดความเร็ว, CW |

| CCW ลีดเองเกิด | S1 S2 S3 S4 S5 S6 | | | | | | CCW |
|-------------------|-------------------|------|------|------|------|----|--------------------|
| | P1 | P2 | P3 | P4 | P1 | P2 | |
| 0 | 1, 2 | 2, 3 | 3, 4 | 4, 1 | 1, 2 | #1 | |
| 0.5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | #2 | หยุดหมุน, CCW |
| 1.0 | 4, 1 | 1, 2 | 2, 3 | 3, 4 | 4, 1 | #3 | |
| 1.5 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | #4 | กลับทางหมุน, CCW |
| 2.0 | 3, 4 | 4, 1 | 1, 2 | 2, 3 | 3, 4 | #5 | เร่งความเร็ว, CCW, |
| 2.5 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | #6 | |
| 3.0 | 2, 3 | 3, 4 | 4, 1 | 1, 2 | 2, 3 | #7 | |
| 3.5 (-0.5) | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | #8 | ลดความเร็ว, CCW |

หมายเหตุ (1) P1, P2, P3, และ P4 คือ ตำแหน่งสมดุล เมื่อกระตุ้นแบบเฟสเดียว

(2) S1, S2 คือ ตำแหน่งสวิตชิงที่กำหนดไว้

#1: มีผลต่อการเบรค; เพื่อแน่ใจว่าไม่หมุนกลับ

#2: ไม่เหมาะสำหรับการวิ่งต่อเนื่อง; ใช้สำหรับตำแหน่งสุดท้าย

#3: ไม่เหมาะสำหรับการหมุน

#4: เหมาะสำหรับขณะเริ่มหมุน, การหมุนด้วยความเร็วต่ำ

#5: เหมาะสำหรับการเริ่มหมุน/การเร่งความเร็ว

#6: ไม่เหมาะสำหรับการให้สเตปป์มอเตอร์เริ่มหมุน แต่เพื่อใช้ในระหว่างการหมุนด้วยความเร็วสูง

#7: สเตปป์มอเตอร์เริ่มหมุนในทิศทางตรงข้าม, ช่วงการหมุนด้วยความเร็วสูงในทิศทางปกติ

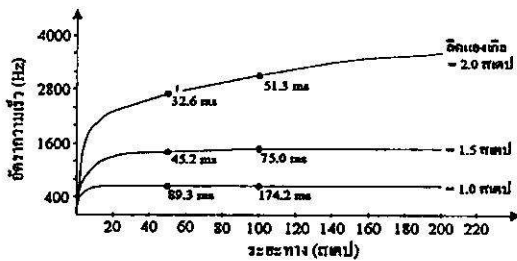
#8: เหมาะสำหรับการเบรค

ความสัมพันธ์ระหว่างลีดเองเกิดกับตำแหน่งสมดุลด้วยการกระตุ้นแบบทีละเฟสและการกระตุ้นเฟสต่างๆ ในตารางที่ 3.1 เป็นแบบหมุนสองทิศทาง ตัวอย่าง ให้ลีดเองเกิด คือ 1.5 สเตป เมื่อโรเตอร์หมุนมาตรงตำแหน่งสวิตชิง S2 คือ เฟส2 หยุดทำงาน และ เฟส 3 ทำงาน ระยะจาก S2 ไปถึงตำแหน่งสมดุลของการกระตุ้น เฟส 3 คือ 1.5 สเตป หาก เฟส 4 ทำงาน จาก S2 ลีดเองเกิด คือ

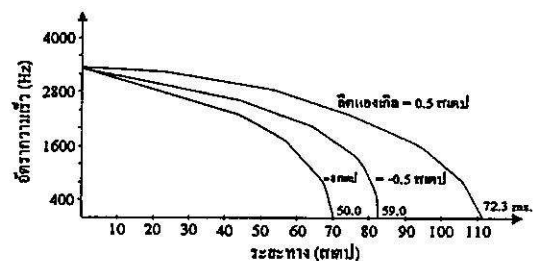
2.5 สเตป ซึ่งเป็นการทำงานในแถวที่ 6 ดังนั้น การกระตุ้นแบบทีละเฟสจะได้ลีดแองเกิล 0.5, 1.5, 2.5, และ 3.5 สเตป ลีดแองเกิล 3.5 สเตป จะเปรียบเสมือน -0.5 สเตป หาก เฟส 2 และ เฟส 3 ทำงานที่ S2 ในทิศ CW จะตรงกับการทำงานในแถวที่ 3 คือลีดแองเกิล 1 สเตป ดังนั้น ตำแหน่งสมมูลถัดไป เมื่อกระตุ้นเฟส 2 และ เฟส 3 พร้อมกันสวิตจึงคือตำแหน่ง S3 เป็นระยะ 1 สเตป จากตำแหน่ง S2 การขับแบบทีละสองเฟสจะได้ลีดแองเกิล 0, 1.0, 2.0, และ 3.0 สเตป

3.3.2 ลีดแองเกิลสำหรับการเร่งและการลดความเร็ว ในขณะที่ทำการหยุดสเตปปีงมอเตอร์หลังจากทำการเร่งแล้ว ลีดแองเกิลจำเป็นต้องใหญ่กว่า 1.0 สเตป รูปที่ 3.8(ก) แสดงตัวอย่างคุณลักษณะบางความเร็วตั้งแต่เริ่มต้น เพื่อเปรียบเทียบลีดแองเกิลที่มีความต่างกัน คือ 1.0, 1.5, 2.0 สเตป จะเห็นว่าลีดแองเกิล 1.0 สเตป มีผลการเร่งความเร็วน้อยกว่าลีดแองเกิล 2.0 สเตป ที่มีผลการเร่งที่ดีกว่าการเปลี่ยนลีดแองเกิลให้เป็นค่ามากขึ้นต้องแน่ใจก่อนว่าสเตปปีงมอเตอร์เร่งความเร็วขึ้นไปแล้ว จึงเปลี่ยนลีดแองเกิลเป็น 2.0 สเตป ซึ่งมีผลต่ออัตราเร่งความเร็วดีกว่า

การลดความเร็วของโรเตอร์ควรกำหนดให้ลีดแองเกิลเป็นศูนย์ หรือเป็นค่าบวกหรือลบน้อยๆ รูปที่ 3.8(ข) แสดงกราฟเมื่อเริ่มลดความเร็วการสเตปด้วยค่าลีดแองเกิล -0.5, 0, และ 0.5 สเตป



(ก)



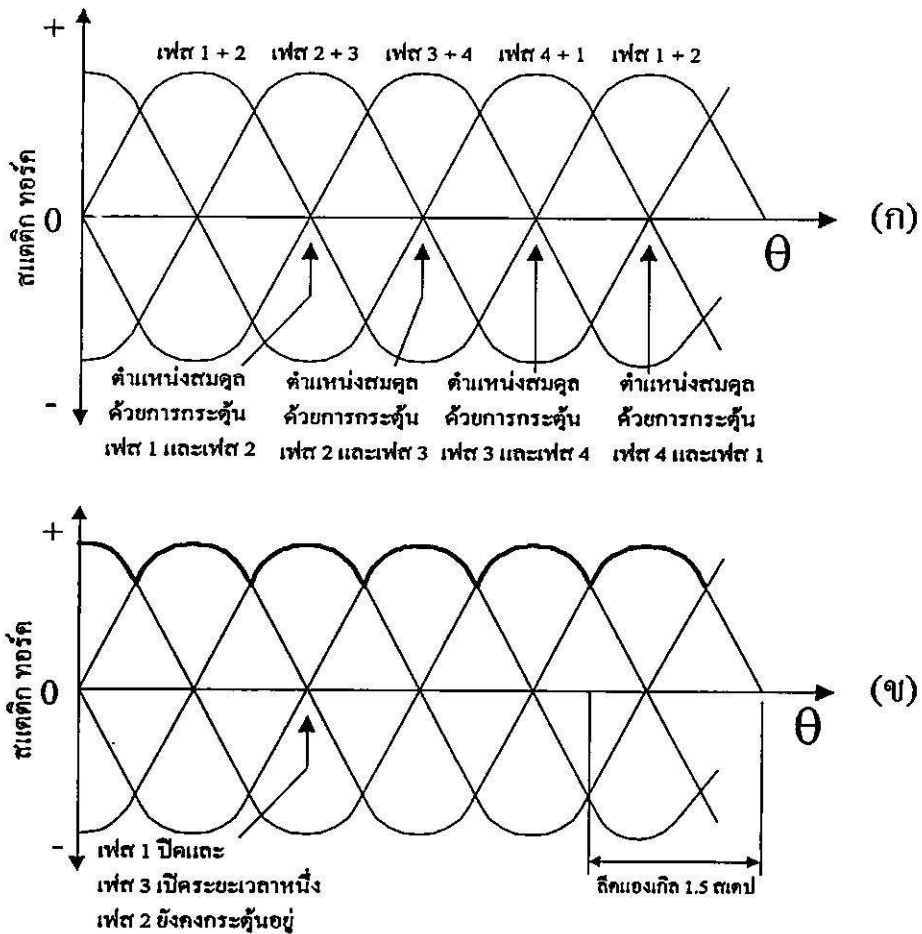
(ข)

รูปที่ 3.8 แสดงกราฟความเร็วของการสเตปเบื้องต้น ตามที่มีในตารางที่ 3.1

(ก) ลีดแองเกิล 1.0, 1.5, และ 2.0 สเตป สำหรับการเร่งความเร็ว

(ข) ลีดแองเกิล -0.5, 0, และ 0.5 สเตป สำหรับการลดความเร็ว

3.3.3 ลีดเองเกิดสำหรับการกระตุ้นแบบทีละสองเฟส การกระตุ้นแบบทีละสองเฟสมีการเปลี่ยนแปลงค่าแรงบิดสแตติกตามระยะตำแหน่งมุม ซึ่งมีลักษณะเป็นสัญญาณซายน์ ดังแสดงในรูปที่ 3.9(ก) ในการกระตุ้นแบบทีละ 2 เฟส ของสเตปป์มอเตอร์ขนาด 4 เฟส บางตำแหน่งสมมูลแรงบิดอาจเหมือนกับเป็นการกระตุ้นแบบเฟสเดียว เช่น กระตุ้นให้โรเตอร์เคลื่อนที่มายังตำแหน่งสมมูลแรงบิดของเฟส 1 และเฟส 2 เมื่อหยุดกระตุ้นเฟส 1 และยังไม่ทันกระตุ้นเฟส 3 จะเหมือนกับกระตุ้นเฟส 2 ด้วยลีดเองเกิด 2 สเตป เป็นต้น เส้นแรงบิดสแตติกในรูป 3.9(ข) แสดงการกระตุ้นด้วยลีดเองเกิด 1.5 สเตป

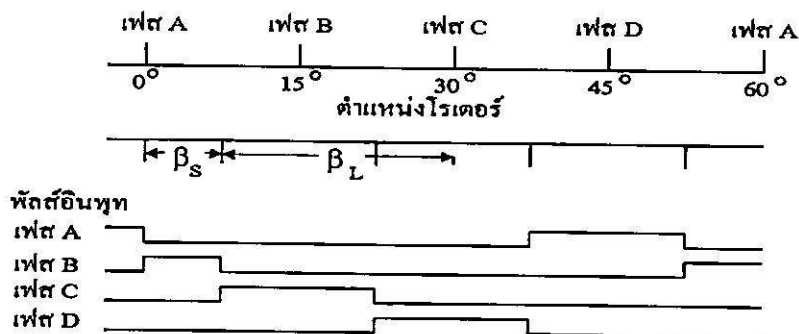


รูปที่ 3.9 แสดงความแตกต่างของลีดเองเกิด เมื่อกระตุ้นแบบทีละสองเฟสในสเตปป์มอเตอร์ขนาด 4 เฟส

3.3.4 การกระตุ้นแบบที่ละเฟสและสองเฟสร่วมกัน ส่วนใหญ่การทำงานแบบวงปิด จะใช้ เอนโคเดอร์เป็นตัวตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ ซึ่งต้องมีจำนวนเอาท์พุทพัลส์ต่อรอบมากกว่าสเตปต์ออบ ไม่เช่นนั้นลีดเองเกิดจะไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากการประยุกต์ใช้งานต่างๆ ลีดเองเกิดมักมีขีดจำกัด เช่น ตัวอย่างขีดจำกัดของเอนโคเดอร์ที่มีค่าเอาท์พุท 200 พัลส์ต่อรอบ และสเตปป์มอเตอร์มีจำนวน 200 สเตปต์ออบ เมื่อกระตุ้นแบบที่ละเฟสค่าลีดเองเกิดที่กำหนดได้ คือ 0, 1, 2, และ 3 สเตป และอีกตัวเลือกหนึ่ง เมื่อกระตุ้นแบบที่ละสองเฟสค่าลีดเองเกิดที่กำหนดได้ คือ 0.5, 1.5, 2.5, และ 3.5 สเตป ไม่ว่าจะกำหนดให้เป็นการกระตุ้นแบบที่ละเฟสหรือที่ละสองเฟสก็ตามจะขึ้นอยู่กับเอนโคเดอร์ใช้ด้วย และเลือกว่าจะกระตุ้นแบบที่ละเฟสหรือแบบสองเฟส หากเลือกกระตุ้นทั้งแบบที่ละเฟสและสองเฟส ก็จะทำให้ระบบมีลีดเองเกิดที่ต่างกันถึง 8 ค่า

3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสวิตชิงเองเกิดกับลีดเองเกิด

การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงจรปิด จำเป็นต้องเข้าใจความหมายของสวิตชิงเองเกิด และลีดเองเกิดตำแหน่งสมดุลแรงบิดของสเตปป์มอเตอร์กำหนดด้วยเฟสที่กำลังถูกกระตุ้น เมื่อหยุดกระตุ้นเฟสเดิมและกระตุ้นเฟสถัดไปค่อยไปเรื่อยๆ สเตปป์มอเตอร์จะหมุนไปอย่างต่อเนื่องในทิศทางเดียวกันทำให้เกิดการสวิตซ์ของเฟส ซึ่งการสวิตซ์ของเฟสจะมีความสัมพันธ์กับตำแหน่งสมดุลแรงบิดของการหมุนของเฟสสเตปป์มอเตอร์



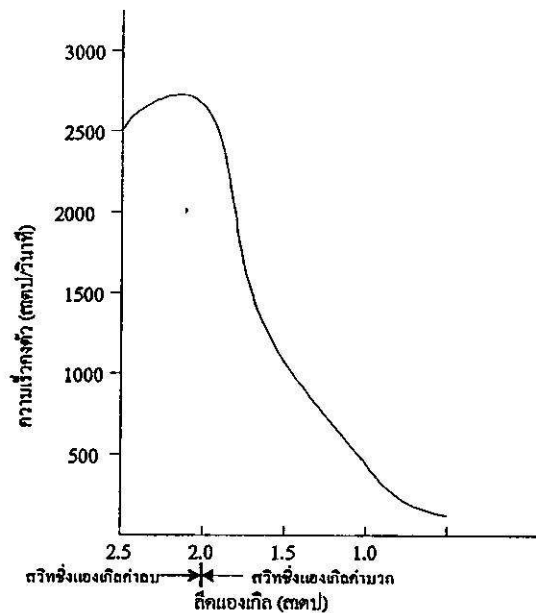
รูปที่ 3.10 แสดงการกำหนดระยะลีดเองเกิดและสวิตชิงเองเกิด

รูปที่ 3.10 แสดงการกำหนดระยะสวิตชิงเองเกิดและลีดเองเกิด ปกติสวิตชิงเองเกิดจะเกี่ยวข้องกับตำแหน่งสมดุลแรงบิดของเฟสที่กำลังถูกกระตุ้น ส่วนลีดเองเกิดจะมีความสัมพันธ์กับสวิตชิงเองเกิด แต่ไม่เกี่ยวข้องกับการใช้การใช้อเอนโคเดอร์ รูปที่ 3.10 แสดงขบวนการป้อนพัลส์อินพุทในแต่ละเฟสของสเตปป์มอเตอร์ขนาดสามเฟส ซึ่งพัลส์อินพุทเหล่านี้ไม่ได้เกิดจากเอนโคเดอร์ แต่เกิดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณอื่น ซึ่งการลำดับของพัลส์อินพุทจะมีช่วงเวลาของการออน (ON) และออฟ (OFF) ของแต่ละเฟส โดยจะขึ้นอยู่กับกำหนดสวิตชิงเองเกิด โดยช่วงเวลาของสวิตชิงเองเกิดกำหนดให้เป็นมุม β_s ที่เกิดหลังจากสเตปป์มอเตอร์เคลื่อนที่ผ่านตำแหน่ง

สมดุลแรงบิดและเกิดสัญญาณพัลส์ป้อนกลับจากเอนโคเดอร์ ดังนั้น สัญญาณพัลส์ป้อนกลับที่เกิดขึ้นจากเอนโคเดอร์จะเป็นมุม β_s หลังจากตำแหน่งสมดุลแรงบิด จากรูปรูปที่ 3.4 สามารถพิจารณาได้ว่าพัลส์อินพุทที่เริ่มต้นป้อนให้กับสเตปมอเตอร์เป็นสถานะเริ่มต้นนั้นกำหนดให้เป็นเฟส A อยู่ในสถานะทำงาน (หรือตำแหน่งสมดุลแรงบิด คือ เฟส A) ถ้าสเตปมอเตอร์สวิทช์จากเฟส A ไปเฟส B ดังนั้น สเตปมอเตอร์จะเริ่มเคลื่อนที่เป็นมุม β_s หลังจากตำแหน่งสมดุลแรงบิดของเฟส A และจะเกิดพัลส์ป้อนกลับเพื่อเป็นคำสั่งควบคุมให้เฟส C ทำงานและเป็นคำสั่งให้เฟส B หยุดทำงาน สัญญาณพัลส์ป้อนกลับนี้จะถูกป้อนกลับมาควบคุมการออน และออฟก่อนสเตปมอเตอร์จะเคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งสมดุลแรงบิดของเฟส C ส่วนลีดเองเกิดคือระยะทางระหว่างตำแหน่งที่เกิดการสวิทช์ของเฟส B กับจุดสมดุลของเฟส C ในรูปที่ 3.10 กำหนดให้ลีดเองเกิดมีมุมเป็น β_L ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสวิทชิงเองเกิด β_s ได้ว่า

$$\beta_L = 2r - \beta_s \quad (3.1)$$

เมื่อ r คือมุมสเตปของสเตปมอเตอร์



รูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสถานะความเร็วคงตัวและลีดเองเกิดค่าต่าง ๆ

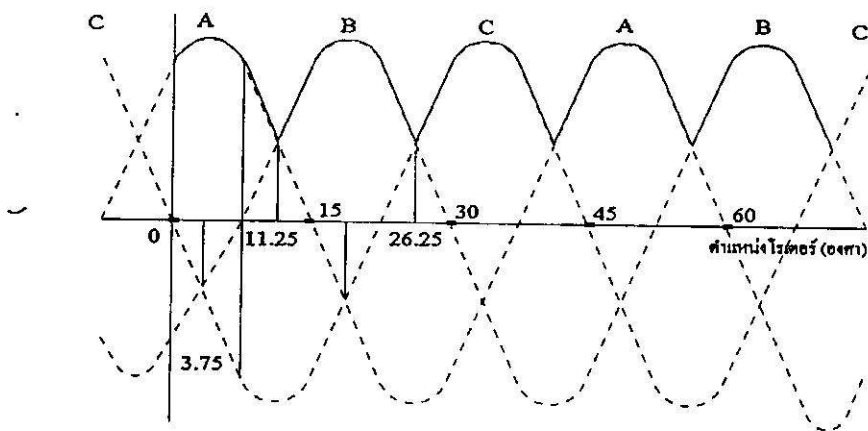
การเปลี่ยนแปลงของลีดเองเกิดจะมีผลต่อการเพิ่มความเร็ว (Acceleration), การลดความเร็ว (Deceleration) และสถานะความเร็วคงตัว (Steady speed) ของสเตปมอเตอร์ ซึ่งกล่าวได้ว่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดของสเตปมอเตอร์ คือ ลีดเองเกิด โดยทั่วไปสวิทชิงเองเกิดขนาดเล็กๆ หรือลีดเองเกิดขนาดใหญ่จะให้ความเร็วคงตัวที่สูง ในรูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง

ความเร็วคงตัวกับลีดเองเกิดของสเตปมอเตอร์ ลีดเองเกิดที่มากกว่าสองสเตปจะได้ค่ามุมของสวิดซิงเองเกิดเป็นค่าลบ ซึ่งทำได้โดยใช้วิธีการของพัลส์อินเจกชัน (Pulse injection) ซึ่งวิธีการนี้มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานและการตอบสนองต่อความถี่ของสเตปมอเตอร์

3.5 ผลของลีดเองเกิด

การใช้เอนโคเดอร์เป็นตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของโรเตอร์และส่งข้อมูลกลับไปยังวงจรจัดลำดับการกระตุ้นขดลวดเฟสต่างๆ ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งโรเตอร์ ที่แสดงกับเฟสที่ถูกกระตุ้นจะกำหนดในทอมของลีดเองเกิด

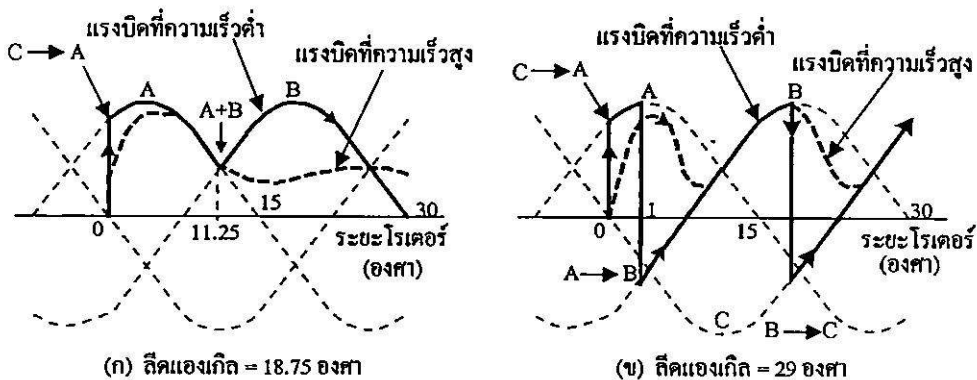
สมมติว่าถ้าขับสเตปมอเตอร์แบบทีละเฟส เมื่อเฟสที่ 1 ถูกกระตุ้นและกำหนดให้เป็นตำแหน่งสมดุลงบิต เมื่อเฟสที่ 2 ถูกกระตุ้นและหยุดจ่ายพลังงานให้กับเฟสที่ 1 ในกรณีนี้ลีดเองเกิดจะมีค่าเป็น 1 สเตป เมื่อสเตปมอเตอร์เคลื่อนไปถึงตำแหน่งสมดุลงบิตของเฟสที่ 2 และเอนโคเดอร์ส่งสัญญาณป้อนกลับให้วงจรจัดลำดับการกระตุ้นเพื่อให้รับรู้ว่าสเตปมอเตอร์เคลื่อนที่ไป 1 สเตปลีดเองเกิด และให้วงจรจัดลำดับการกระตุ้นสร้างสัญญาณ เพื่อกระตุ้นเฟสถัดไปให้เคลื่อนที่ต่อไป ซึ่งการจ่ายพลังดังกล่าวให้เหมาะสมในแต่ละเฟสสามารถควบคุมได้ด้วยสัญญาณป้อนกลับของเอนโคเดอร์



รูปที่ 3.12 แสดงกราฟแรงบิดสแตติกของสเตปมอเตอร์ขนาด 3 เฟสและมุมสเตป 15 องศา

กราฟลักษณะโครงสร้างแรงบิดสแตติกของสเตปมอเตอร์ มีประโยชน์ที่จะขยายความเข้าใจว่าการควบคุมแบบวงปิดได้ง่ายขึ้น ในรูปที่ 3.12 แสดงลักษณะกราฟแรงบิดสแตติกของสเตปมอเตอร์ขนาด 3 เฟส กำหนดให้ตำแหน่งสมดุลงบิตอยู่ที่เฟส C ซึ่งสเตปมอเตอร์จะให้ค่าแรงบิดมากที่สุด เมื่อให้สเตปมอเตอร์อยู่ที่ศูนย์กลาง (Holding torque position) จากรูปกำหนดให้สวิดซิงเองเกิดเท่ากับ 11.25 องศา หรือลีดเองเกิดเท่ากับ 18.75 (1.25 สเตปลีดเองเกิด) ในการกระตุ้นเฟส A จะทำให้สเตปมอเตอร์หมุนไปข้างหน้าตำแหน่งสมดุลงบิตเฟส A (หรือที่

ตำแหน่ง 15 องศา) วิธีการเพิ่มค่าแรงบิดให้กับเฟส A เมื่อโรเตอร์เคลื่อนที่จากตำแหน่งสมดุลของเฟส C (θ เท่ากับศูนย์องศา) มาถึงตำแหน่ง 11.25 องศา จะต้องเปลี่ยนการกระตุ้นจากเฟส A เป็นเฟส B ซึ่งมีลิตแอง เกิด 18.75 องศา ซึ่งจะได้อผลของแรงบิดเพิ่มขึ้นดังแสดงโดยเส้นทึบ



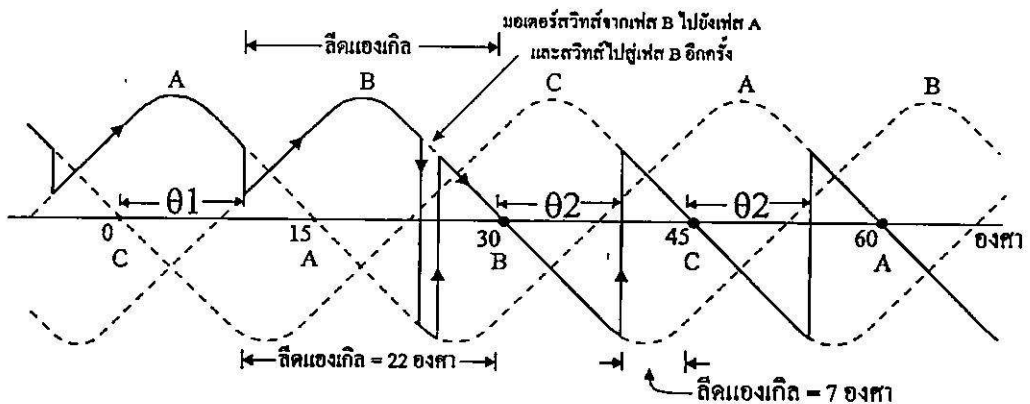
รูปที่ 3.13 แสดง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับสวิตซิงแองเกิลที่ความถี่ต่ำและความถี่สูง

ในความเป็นจริงกระแสแต่ละเฟสของสเตปป์มอเตอร์ ไม่ได้เพิ่มขึ้นหรือลดลงในเวลาเดียวกัน ดังนั้น ช่วงเวลาในการยกระดับแรงบิดจะจำกัด ทำให้ขบวนการสวิตซิงขึ้นอยู่กับช่วงเวลากระแสเพิ่มหรือลด ช่วงเวลาของการเพิ่มหรือการลดของกระแสขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์หลายอย่างด้วยกัน คือ ความต้านทานของตัวควบคุมและค่าความต้านทานขดลวด ค่าความเหนี่ยวนำภายในของขดลวด เช่น ความเหนี่ยวนำตัวเอง (Self-Inductance), มุขวลอินดักแตนซ์ (Mutual-Inductance) ซึ่งทำให้ขดลวดของสเตปป์มอเตอร์เกิดแรงดันย้อนกลับ (Back-emf) นอกจากนี้ยังมีการเกิดการอ้อมตัวของสเตปป์มอเตอร์อีกด้วย ดังนั้น จึงเป็นเรื่องยากที่จะวิเคราะห์หาลิตแองเกิลที่เหมาะสมเพื่อรักษาค่าแรงบิดสูงสุดไว้ สัญญาฉบับต้องประยุกต์ให้เข้ากับตำแหน่งในการสวิตซิง ในอุดมคติที่ความเร็วต่ำมีเวลาามากสำหรับเวลาในการยกกระแส (Build up time) ดังนั้น จึงต้องการสวิตซิงก่อนที่ลิตแองเกิลค่าต่ำ ที่ความถี่สูงลิตแองเกิลจะมีค่าสูง เพราะมีเวลาสำหรับการยกกระแสน้อยลงดังนั้นการควบคุมในอุดมคติจึงต้องการป้อนกลับทางตำแหน่ง และการป้อนกลับทางความเร็วเพื่อเป็นข้อมูลที่เหมาะสมในการควบคุมการเคลื่อนที่ของสเตปป์มอเตอร์

3.6 การควบคุมความเร็วด้วยวิธีพัลส์อินเจกชัน

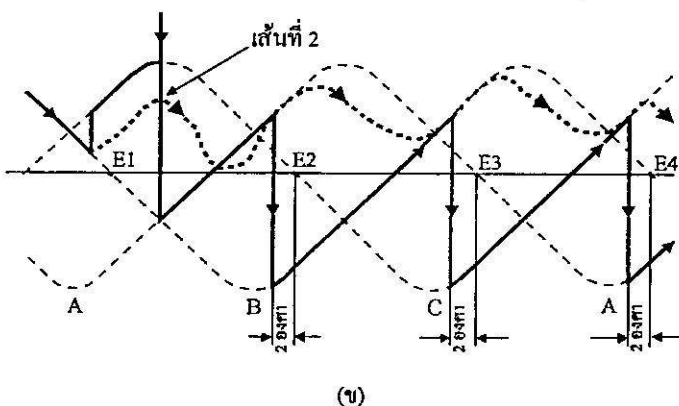
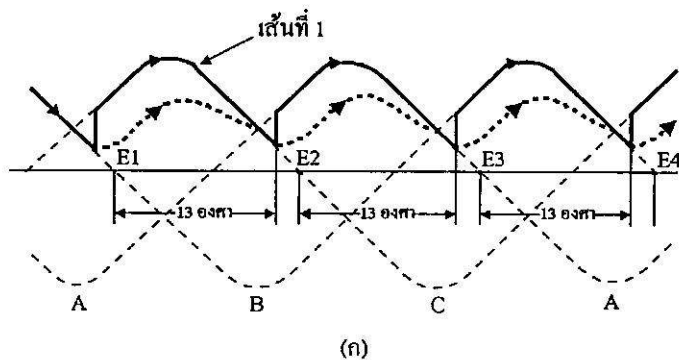
ถ้าใช้การป้อนกลับทางตำแหน่ง (Positional feedback) จะต้องเลือกมุมที่สเตปป์มอเตอร์ สวิตช์จากค่าแรงบิดหนึ่งไปสู่อีกแรงบิดหนึ่ง โดยยังคงค่าเฉลี่ยของแรงบิดสูง ในการเปลี่ยนค่าลีดแองเกิลจะต้องเป็นค่าซึ่งสเตปป์มอเตอร์สามารถเริ่มต้นเคลื่อนที่ได้ สเตปป์มอเตอร์ที่กำลังอธิบายนี้ ต้องมากกว่า 18.75 องศา เมื่อแต่ละลีดแองเกิล มีค่าน้อยกว่านี้จะมีผลทำให้ค่าเฉลี่ยแรงบิดต่ำ สเตปป์มอเตอร์ขนาด 15 องศา จะมีลีดแองเกิล เกิดอยู่ในช่วง 11.5 ถึง 29 องศา ที่ลีดแองเกิล 18.75 องศา จะให้ค่าแรงบิดสูงสุด ลีดแองเกิลควรมีค่าต่ำที่ความถี่ต่ำและควรมีค่าสูงที่ความถี่สูง

ที่บางตำแหน่งของการควบคุมสเตปป์มอเตอร์จะต้องสวิตช์จากโหมดเพิ่มความเร็วไปสู่โหมดลดความเร็ว เมื่ออยู่ในโหมดลดความเร็ว โดยใช้วิธีการของพัลส์อินเจกชัน (Pulses injection) เรียงลำดับกัน คือ ฟอร์เวิร์ดพัลส์ (Forward pulses) รีเวิร์ดพัลส์ (Reverse pulses) และสคิปพัลส์ (Skip pulses) ในรูปที่ 3.14 แสดงลักษณะวิธีการของพัลส์อินเจกชันซึ่งเป็นผลให้ลีดแองเกิลลดลงและค่าแรงบิดเป็นลบ ทำให้สเตปป์มอเตอร์เคลื่อนที่ช้าลง



รูปที่ 3.14 แสดงการสวิตช์ของแรงบิดจากโหมดเพิ่มความเร็วไปสู่โหมดลดความเร็ว

เมื่อมีเงื่อนไขแน่นอนอนสเตปป์มอเตอร์สามารถลดความเร็วโดยใช้วิธีการของพัลส์อินเจกชันได้รูปที่ 3.15 แสดงแรงบิดสแตติกของสเตปป์มอเตอร์แบบสามเฟสขนาด 15 องศา กราฟที่ 1 ของรูป 3.15(ก) แสดงค่าแรงบิดเมื่อลีดแองเกิลเท่ากับ 17 องศา ดังนั้นที่ลีดแองเกิลที่มีค่าต่ำ จะอยู่ในสถานะความเร็วคงตัวรูปที่ 3.15(ข) แสดงค่าแรงบิดหลังจากใช้พัลส์พิเศษแล้วที่จุด 1 ลีดแองเกิลจะเป็น 32 องศา ค่าเฉลี่ยของแรงบิดจะมีค่าสูงขึ้นดังนั้นมอเตอร์จะมีความเร็วสูงขึ้น เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเฉพาะลีดแองเกิลเริ่มต้นมีค่าน้อยๆ ถ้าลีดแองเกิลเริ่มต้นมีค่ามาก จะมีผลให้ไปลดความเร็วของสเตปป์มอเตอร์



รูปที่ 3.15 แสดงเส้นแรงบิด ผลจากการใช้พัลส์อินเจกชัน

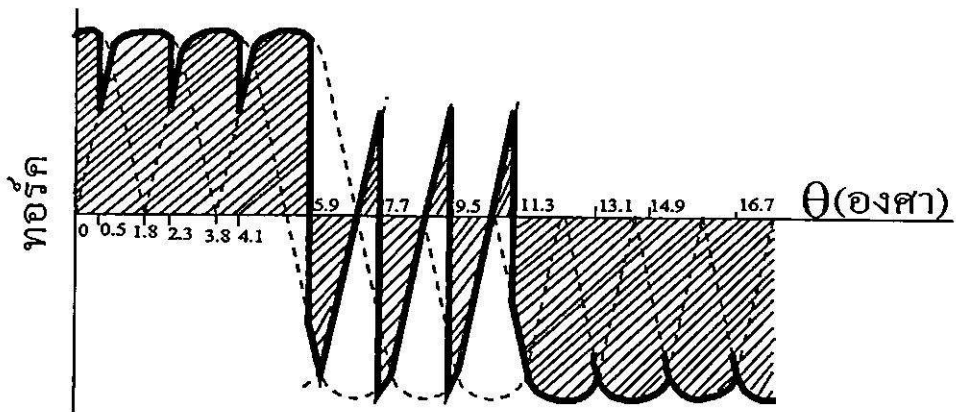
(ก) เส้นแรงบิด ขณะที่มีมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วคงตัว

(ข) เส้นแรงบิด หลังจากการใช้พัลส์อินเจกชัน

3.7 ผลการตอบสนองของสวิตชิงแองเกิลและพัลส์อินเจกชัน

กราฟแสดงแรงบิดสแตติกของสเตปมอเตอร์สี่เฟสขนาด 1.8 องศาต่อสเตป แสดงดังในรูปที่ 3.16 สวิตชิงแองเกิลที่จุดเริ่มต้น $1 = 0.5$ องศา (ลีดแองเกิล = 3.1 องศา) ค่าแรงบิดจะมีค่าเป็นบวกที่สวิตชิงแองเกิลใกล้ศูนย์องศา (ลีดแองเกิลขนาดสองสเตป) มีค่าแรงบิดมากที่สุด

เมื่อพิจารณาเวลาที่ต้องการสำหรับการยกกระดุมกระแสและลดกระดุมกระแส ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าสวิตชิงแองเกิลขนาดเล็กจะให้ค่าแรงบิดสูงกว่า ซึ่งค่าแรงบิดจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อสวิตชิงแองเกิลค่าลดลงต่ำกว่าศูนย์กลายเป็นค่าลบ ทำได้โดยวิธีการของพัลส์อินเจกชันหนึ่งพัลส์



รูปที่ 3.16 แสดงค่าแรงบิดสแตติกจากการใช้สองพัลส์อินжекชัน

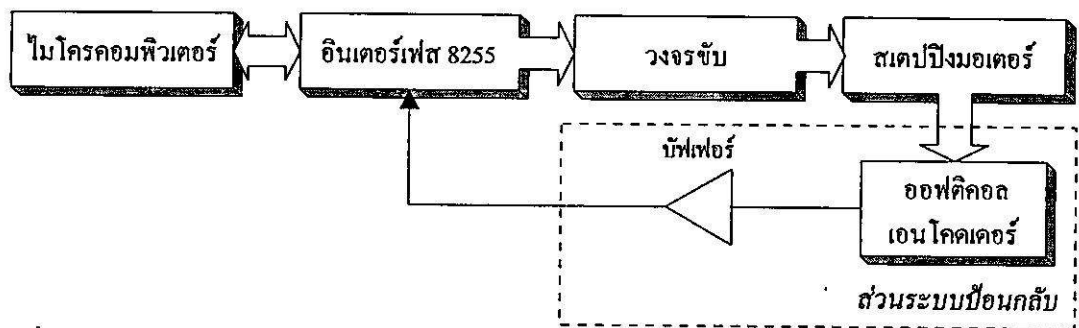
สำหรับสเตปมอเตอร์ขนาดสี่เฟสจะมีมุมของสวิตช์น้อย ดังนั้น จะมีผลในการในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่ในการทำงาน การใช้วิธีการของพัลส์อินжекชันช่วยให้สเตปมอเตอร์ทำงานได้ที่ความถี่สูงและใช้สองพัลส์อินжекชันสำหรับ โหมดของการลดความถี่ลงมาจากความถี่ปานกลางหรือความถี่สูงและการใช้ สามพัลส์อินжекชันสำหรับลดความเร็วลงมาจากความถี่สูงมาก และสำหรับการหยุดต้องใช้ θ_2 มากกว่า 0.5 สเตป

บทที่ 4

ระบบควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบวงปิดด้วยวิธีลัดเองเกิด

สิ่งสำคัญที่สุดของการประยุกต์ใช้งานสเตปปีงมอเตอร์ ก็คือระบบการควบคุมการขับเคลื่อนสเตปปีงมอเตอร์ ซึ่งการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือแบบวงเปิด (Open-loop) และแบบวงปิด (Closed loop) ในบทนี้จะกล่าวถึงระบบการควบคุมการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์แบบวงปิด การควบคุมแบบวงปิดนี้ก็มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี แต่กล่าวจะกล่าวเฉพาะวิธีลัดเองเกิดและจะกล่าวถึงระบบการทดสอบการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์อีกด้วย เพื่อดูผลการตอบสนองการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์

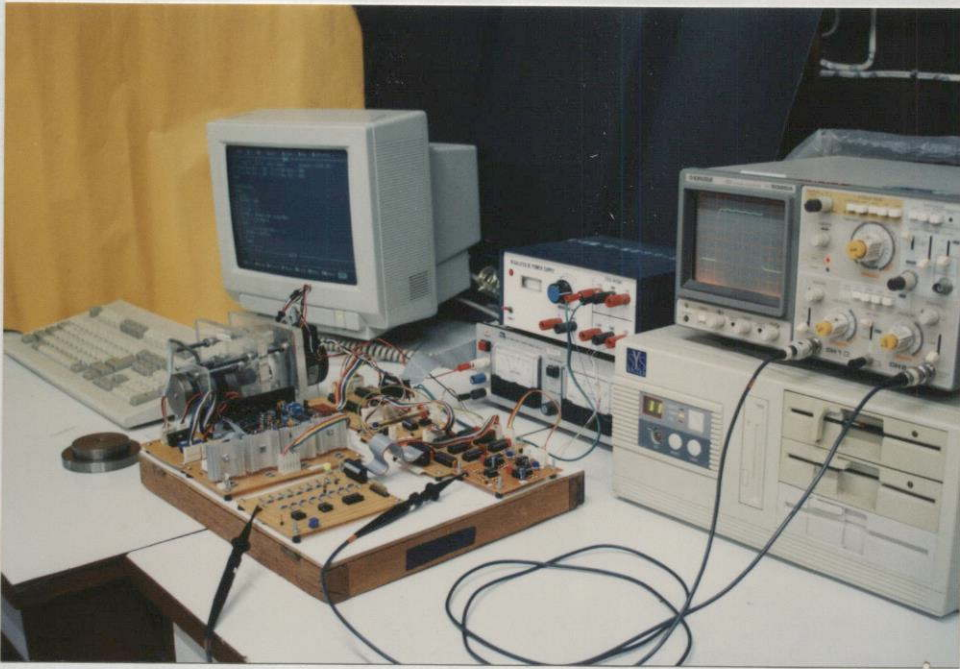
4.1 ส่วนประกอบของการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบวงปิด



รูปที่ 4.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบวงปิด

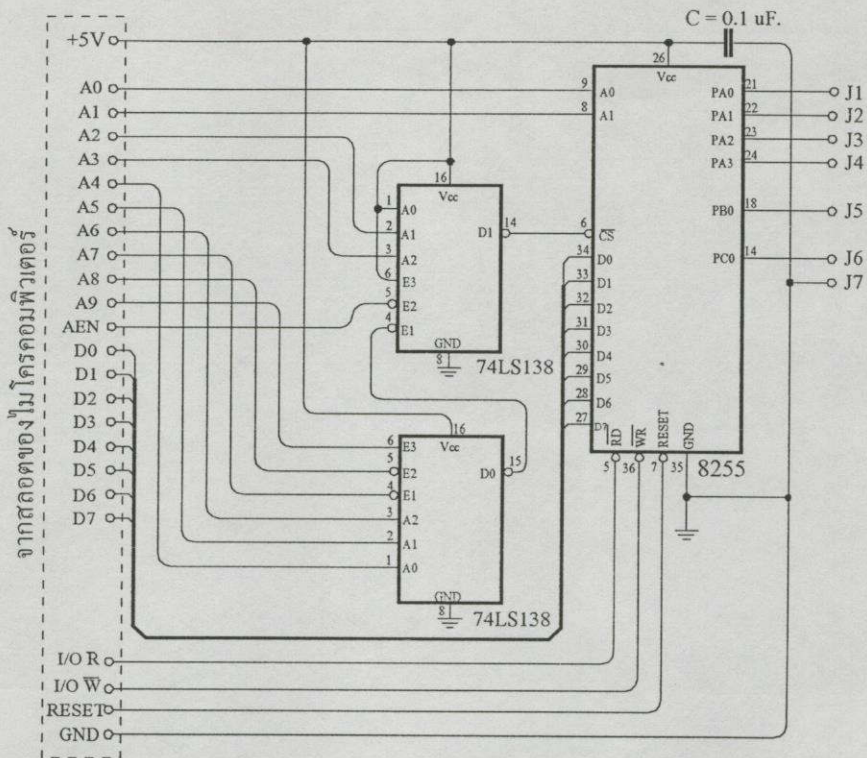
โดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน

จากรูปที่ 4.1 แสดงระบบการควบคุมการขับเคลื่อนสเตปปีงมอเตอร์แบบวงปิด ในบล็อกไดอะแกรมนี้ระบบประกอบด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์กระวางจรับและจัดลำดับสัญญาณพัลส์กระตุ้นวงจรถับให้มีมุมสวิดชิงที่ต้องการ หรือให้มีลัดเองเกิดที่เหมาะสม ระบบการควบคุมแบบวงปิดนี้จะต้องมีส่วนของการป้อนกลับ ซึ่งประกอบด้วยออปติคัลเอนโคเดอร์ โดยเพลขาของออปติคัลเอนโคเดอร์จะดับปลึงกับเพลขาของสเตปปีงมอเตอร์ เพื่อให้ออปติคัลเอนโคเดอร์ทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์ตามการเคลื่อนตำแหน่งของสเตปปีงมอเตอร์ และส่งสัญญาณพัลส์นี้ผ่านวงจรับพัลส์และวงจรับขนาด 16 บิต เพื่อแปลงสัญญาณจากออปติคัลเอนโคเดอร์ ซึ่งเป็นสัญญาณอนุกรมให้เป็นสัญญาณขนาน ขนาด 16 บิตก่อนที่จะป้อนผ่านวงจรับอินเทอร์เฟซ สำหรับป้อนกลับ ไปยังไมโครคอมพิวเตอร์

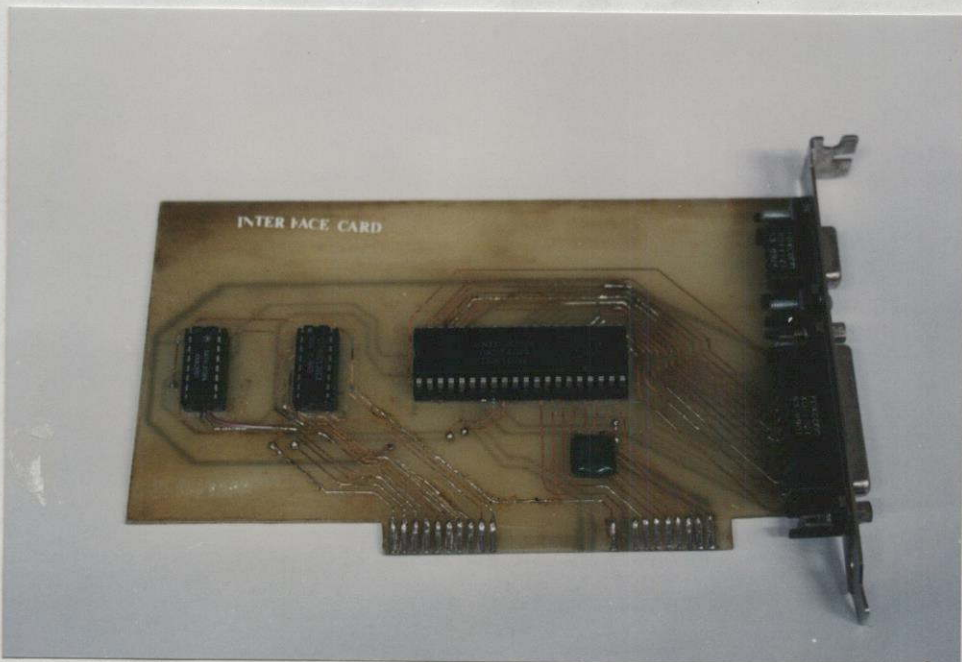


รูปที่ 4.2 ชุดระบบทดลองโดยรวมที่ใช้ในงานวิจัย

4.1.1 อินเทอร์เฟซ ส่วนนี้จะทำหน้าที่เชื่อมต่อรับส่งสัญญาณระหว่างไมโครคอมพิวเตอร์กับวงจรถับและส่วนระบบป้อนกลับ โดยใช้ไอซีทำหน้าที่อินเทอร์เฟซสัญญาณ เบอร์ PIO8255 มีความสามารถในการรับส่งสัญญาณได้สูงสุด 24 บิต โดยรับ-ส่งสัญญาณได้ครั้งละ 8 บิต แสดงในรูปที่ 4.8

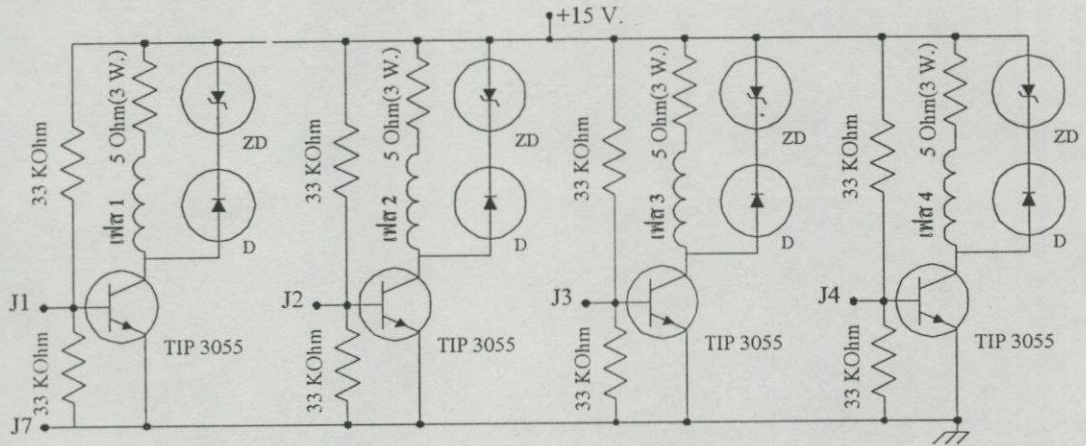


รูปที่ 4.3 วงจรอินเทอร์เฟซ 8255

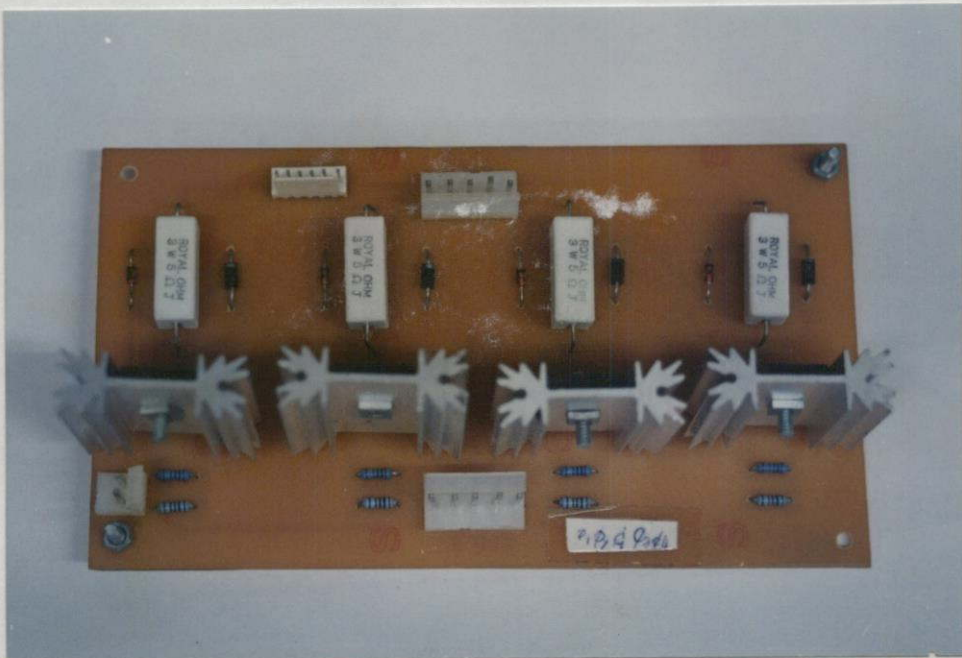


รูปที่ 4.4 วงจรอินเทอร์เฟซ 8255 ที่ใช้ในการทดลอง

4.1.2 วงจรขับกำลังสเตปปีงมอเตอร์ ในส่วนนี้ก็เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ขยายกระแสจากวงจรอินเตอร์วงจรขับใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ TIP3055 ทำหน้าที่ขยายกระแสและต่อวงจรแบบยูนิโพลาร์ แสดงวงจรดังรูปที่ 4.9



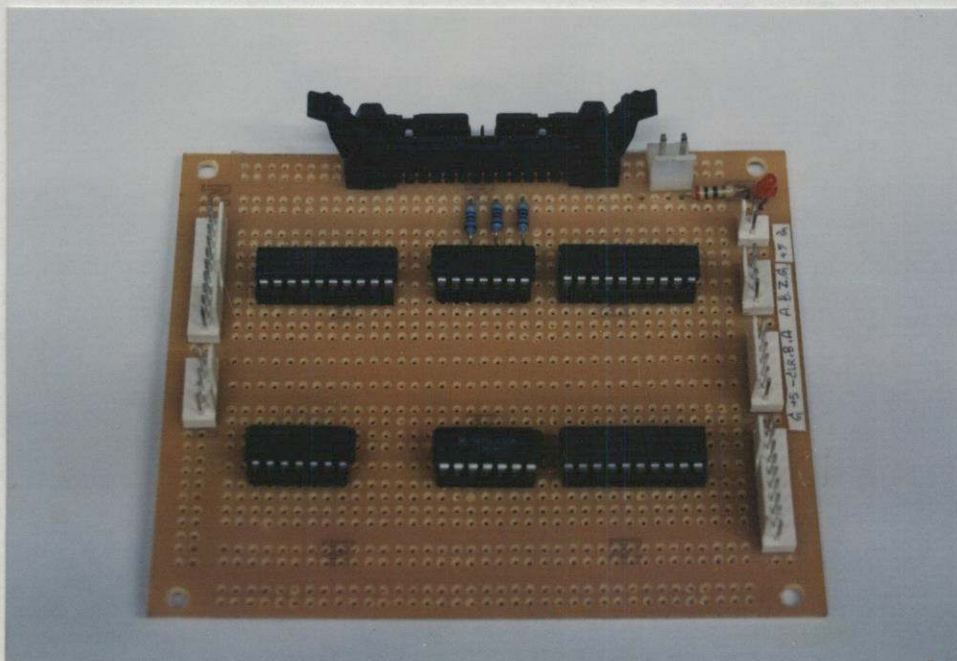
รูปที่ 4.5 วงจรขับกำลังกระแสของสเตปปีงมอเตอร์ขนาด 4 เฟส แบบยูนิโพลาร์



รูปที่ 4.6 วงจรขับสเตปปีงมอเตอร์ขนาด 4 เฟส แบบยูนิโพลาร์ ที่ใช้ในการทดลอง

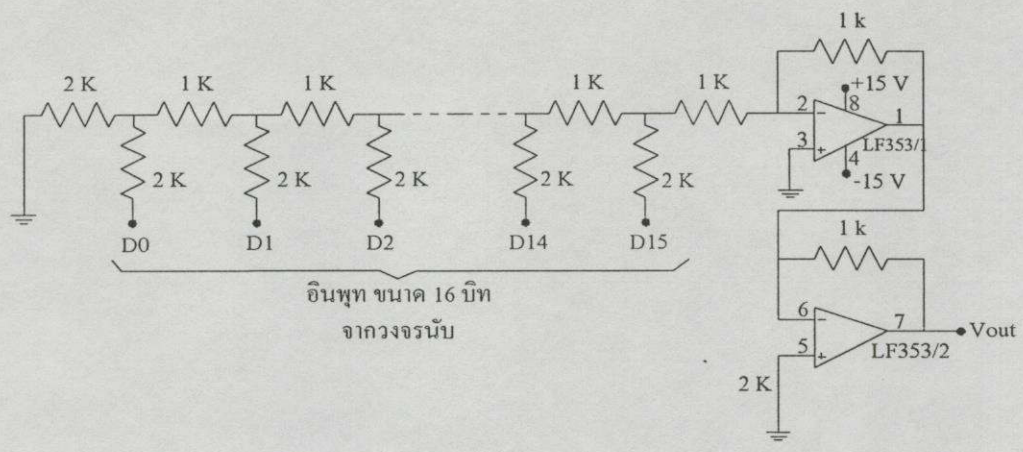
4.1.3 ส่วนระบบป้อนกลับ ในส่วนนี้เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบ วงปิด ซึ่งต้องใช้อินทิเกรตเออร์หรือเอนโคเดอร์ (รายละเอียดส่วน

ประกอบและหลักการทำงานของเอนโคเดอร์ก่่าวไว้ในข้อที่ 3.1 แล้ว) สำหรับตรวจเช็คตำแหน่ง การเคลื่อนที่ของสเตปปีงมอเตอร์และพร้อมทั้งสร้างสัญญาณพัลส์ป้อนกลับผ่านบัฟเฟอร์ และอิน เตอร์เฟส เพื่อส่งไปยังไมโครคอมพิวเตอร์ โดยที่ตัวเอนโคเดอร์จะสร้างสัญญาณพัลส์ที่ แปรผันตรงกับการหมุนของเพลสเตปปีงมอเตอร์ จากนั้นไมโครคอมพิวเตอร์จะนำเอา สัญญาณป้อนกลับมาประมวลผล เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์อินพุท สำหรับกระตุ้นขดลวดของสเตป ปีงมอเตอร์ในสเตปต่อไปให้มีระยะลิดแองเกิลตามต้องการหรือให้เหมาะสม

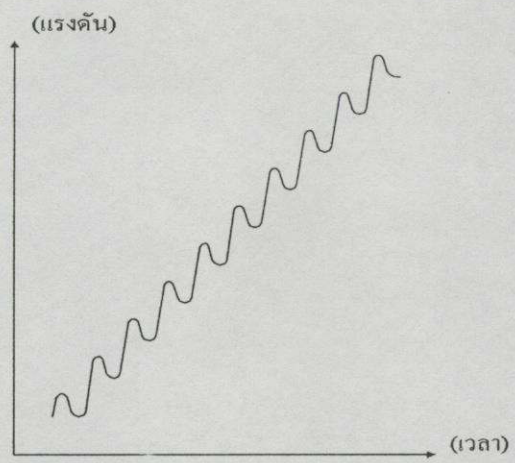


รูปที่ 4.7 วงจรบัฟเฟอร์สัญญาณระหว่างวงจรอินเตอร์เฟสกับฮาร์ดแวร์ส่วนต่างๆ

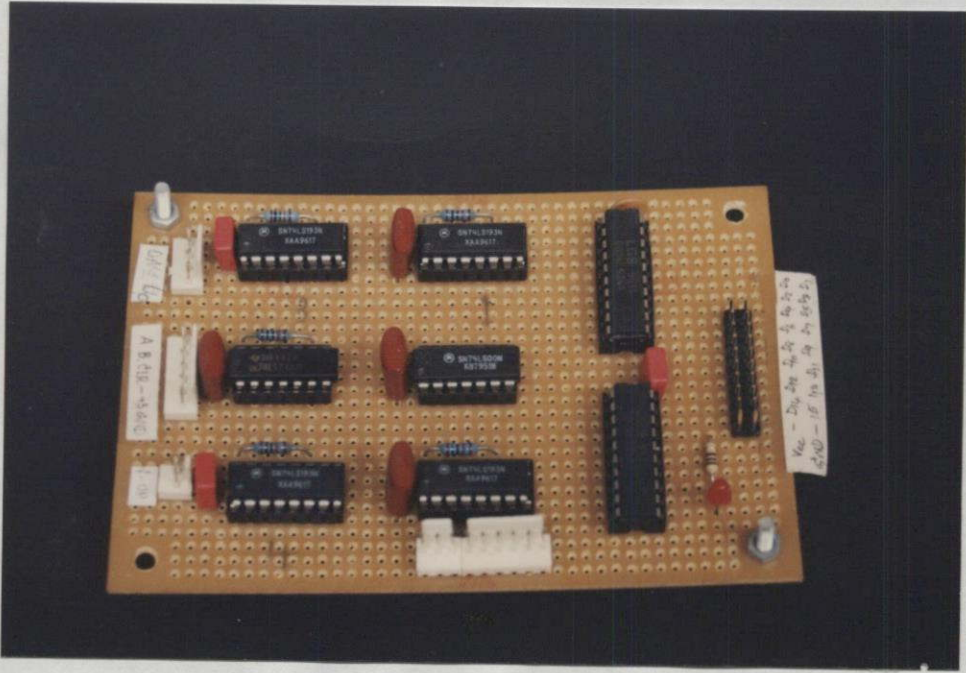
4.2 วงจรวัดผลการตอบสนองการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์



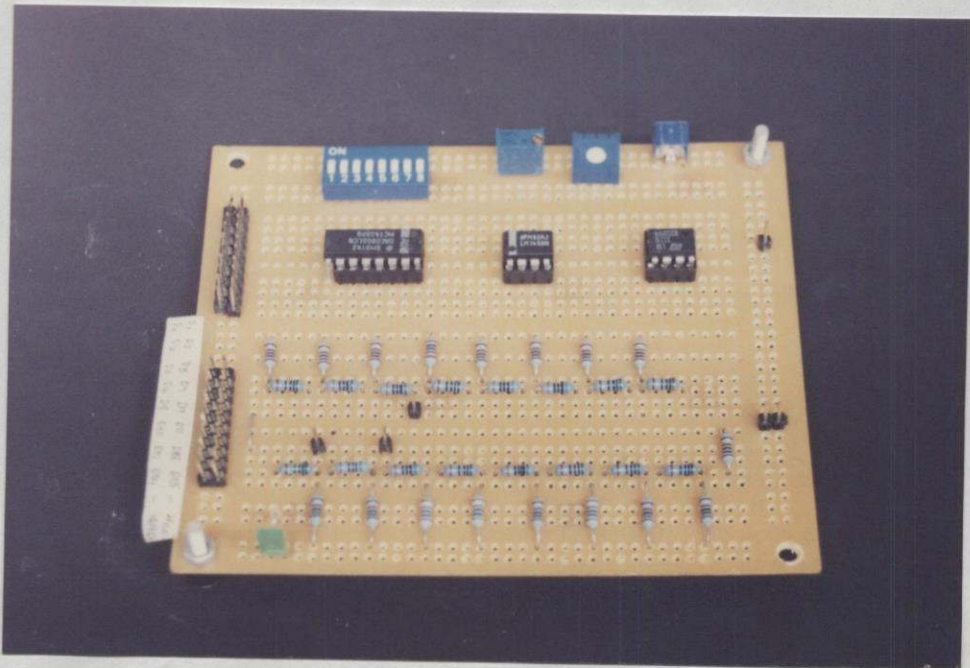
รูปที่ 4.10 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก (DAC) แบบ R-2R Ladder



รูปที่ 4.11 ลักษณะรูปสัญญาณของเอาต์พุตวงจรสังเกตุผลการควบคุมตำแหน่ง



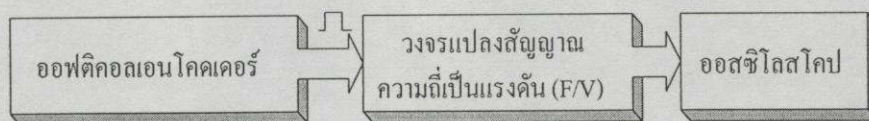
รูปที่ 4.12 วงจรนับขึ้น-ลง แบบไบนารี



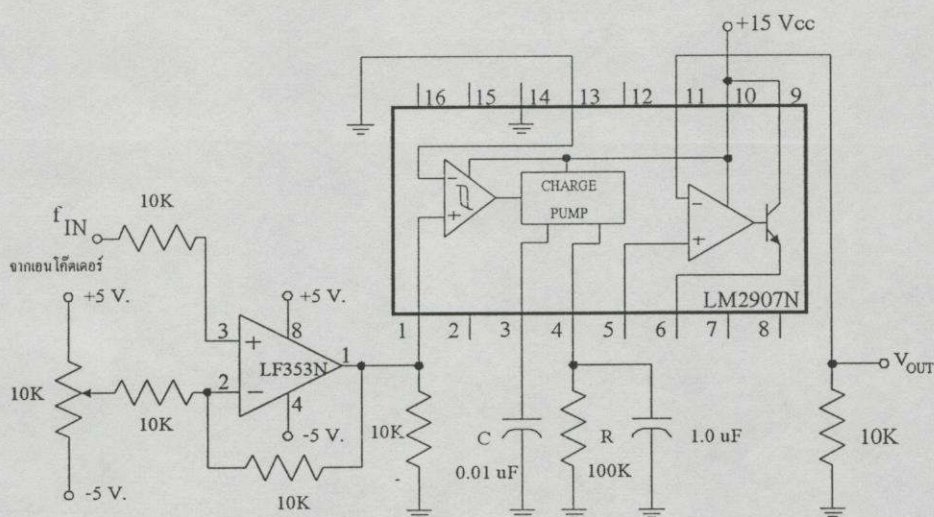
รูปที่ 4.13 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก (DAC)

4.2.2 วงจรวัดโปรไฟล์ความเร็ว วงจรส่วนนี้สร้างขึ้นมาเพื่อวัดผลการเปลี่ยนแปลงความเร็วหรือการเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ต่อเวลาของสเตปป์มอเตอร์ วงจร

วัดโปร-ไฟล์ความเร็วนี้จะต้องใช้สัญญาณจากออสซิลโลสโคปโคเคอร์ จำนวน 1 ช่องสัญญาณ เพื่อป้อนสัญญาณเข้าวงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน (Frequency to voltage : F/V) ซึ่งแสดงบล็อกไดอะแกรมดังนี้

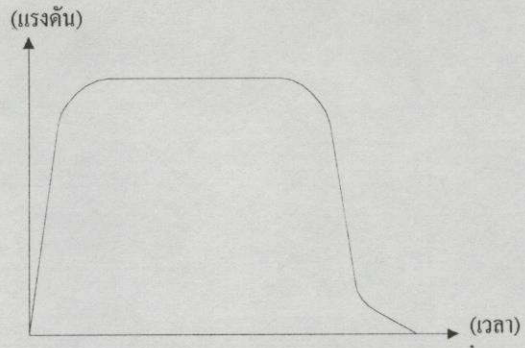


รูปที่ 4.14 บล็อกไดอะแกรมของวงจรสังเกตผลการเปลี่ยนแปลงความเร็วหรือโปรไฟล์ความเร็ว

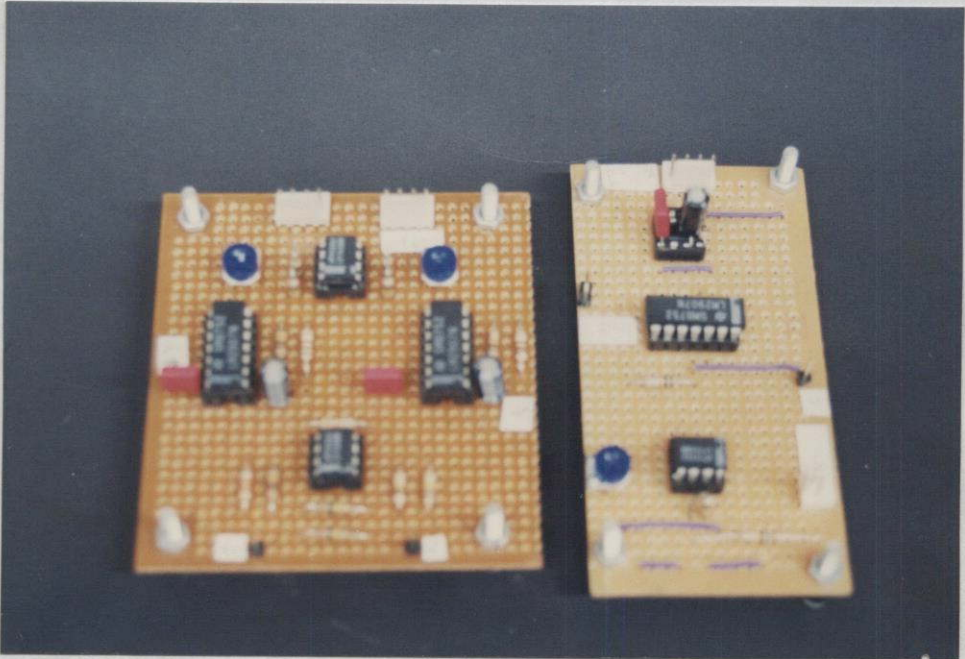


$$V_{OUT} = V_{CC} f_{IN} CR$$

รูปที่ 4.15 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดัน (F/V) เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงความเร็วหรือโปรไฟล์ความเร็ว



รูปที่ 4.16 ลักษณะรูปสัญญาณของเอาต์พุตวงจรสังเกตโพรไฟล์ความเร็ว



รูปที่ 4.17 วงจรแปลงสัญญาณความถี่เป็นแรงดัน (F/V)

บทที่ 5

ผลการทดลองการควบคุมสเตปปีงมอเตอร์

การทดลองควบคุมสเตปปีงมอเตอร์ที่สร้างขึ้นแบ่งเป็นสองระบบ คือ การทดลองการควบคุมแบบระบบวงเปิดและการควบคุมแบบระบบวงปิด ในการทดลองควบคุมสเตปปีงมอเตอร์ทั้งสองระบบขับเคลื่อนสเตปปีงมอเตอร์แบบทีละเฟส เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการควบคุมของระบบทั้งสอง โดยการวัดโปรไฟล์ความเร็วเพื่อดูผลการตอบสนองความถี่ของสัญญาณพัลส์อินพุตและวัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของสเตปปีงมอเตอร์

การทดลองควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบวงเปิด เป็นการกระตุ้นแบบทีละเฟสและในขณะที่ไม่มีโหลด สำหรับความถี่ที่ป้อนให้แก่อินพุตจะเพิ่มขึ้นจากความถี่ 100 Hz. ทีละ 100 Hz. จนกว่าสเตปปีงมอเตอร์ไม่สามารถตอบสนองความถี่ที่ป้อนให้ได้ การสังเกตผลการตอบสนองความถี่ของสเตปปีงมอเตอร์ โดยการวัดโปรไฟล์การเปลี่ยนแปลงความเร็วของสเตปปีงมอเตอร์ว่าเกิดออกซิเดชันขึ้นหรือไม่ จากนั้นจะเป็นการทดสอบว่าสเตปปีงมอเตอร์สามารถทำงานในขณะความถี่อินพุตที่ค่าสูงสุด เมื่อมีโหลดค่าต่าง เพื่อพิจารณาว่าสเตปปีงมอเตอร์สามารถให้ค่าแรงบิดและตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้ดีเพียงใด โดยการวัดโปรไฟล์ความเร็วพร้อมกับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของโรเตอร์สเตปปีงมอเตอร์และยังสามารถพิจารณาผลการตอบสนองของไรส์ไทม์ (Rise time) และช่วงเวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ (Settling time) ได้อีกด้วย

การควบคุมการขับเคลื่อนสเตปปีงมอเตอร์แบบวงปิดด้วยหลักการของลีดเองเกิด การควบคุมแบบวงปิดก็เป็นการกระตุ้นแบบทีละเฟสเช่นเดียวกับการควบคุมแบบวงเปิด ซึ่งหลักการกำหนดค่าลีดเองเกิดที่เหมาะสมนั้น จะพิจารณาจากกราฟคุณลักษณะแรงบิดของสเตปปีงมอเตอร์ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 การสตาร์ท (Start) สเตปปีงมอเตอร์จะกำหนดให้ค่าลีดเองเกิดมีค่าประมาณ 1.5 สเตป เมื่อสเตปปีงมอเตอร์วิ่งเข้าสู่ความเร็วคงที่ (Settling time) หรือช่วงการหมุน ค่าของลีดเองเกิดเปลี่ยนค่าเป็นประมาณ 0.5 สเตป การสังเกตว่าสเตปปีงมอเตอร์ไม่สามารถตอบสนองได้จากการวัดโปรไฟล์ความเร็ว เพื่อดูว่าเกิดออกซิเดชันขึ้นหรือไม่ จากนั้นจะเป็นการทดสอบว่าสเตปปีงมอเตอร์สามารถทำงานในขณะความถี่อินพุตที่ค่าสูงสุด ถ้ามีโหลดค่าต่าง เพื่อพิจารณาว่าสเตปปีงมอเตอร์สามารถให้ค่าแรงบิดและตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้ดีเพียงใด โดยการวัดโปรไฟล์ความเร็วพร้อมกับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของโรเตอร์สเตปปีงมอเตอร์ และยังสามารถพิจารณาผลการตอบสนองของไรส์ไทม์ (Rise time) และช่วงเวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ (Settling time) ได้อีกด้วย

5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

อุปกรณ์ในการทดลองสำหรับการทำวิจัยนี้ ประกอบด้วย 3 อย่าง หลักๆ คือ สเตปปีงมอเตอร์, เอนโคเดอร์, และ โหลด ซึ่งมีรายละเอียดทางคุณสมบัติดังต่อไปนี้

5.1.1 สเตปปีงมอเตอร์ คุณสมบัติของสเตปปีงมอเตอร์ที่ใช้แสดงดังรูปที่ 5.1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ชนิดไฮบริดจ์ ขดลวดพันแบบยูนิโพลาร์
2. ขนาด 1.8 องศาต่อสเตป, จำนวน 200 สเตปต่อรอบ
3. จำนวนขดลวดเท่ากับ 4 เฟส
4. ค่าความต้านทาน 60 โอห์มต่อเฟส
5. ค่าแรงดันตกคร่อมขดลวด 12 โวลต์ต่อเฟส
6. ค่ากระแสไหลผ่านขดลวด 200 มิลลิแอมแปร์ต่อเฟส



รูปที่ 5.1 แสดงลักษณะของสเตปปีงมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

5.1.2 ออฟติคอลลีนโคคเตอร์ คุณลักษณะของเอนโคคเตอร์ที่ใช้แสดงดังรูปที่ 5.2 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ชนิดแบบออฟติคอลลีนครีเมนต์เอนโคคเตอร์ (Optical increment encoder)
2. ความละเอียดของสัญญาณเอาต์พุต 6000 พัลส์ต่อรอบ
3. จำนวนสัญญาณเอาต์พุต 3 ช่อง (ช่อง A, B, และ Z = พัลส์ต่อรอบ)
3. ลักษณะการต่อขั้วสัญญาณเอาต์พุตใช้งานแบบ R-Pull-Up ($V_{OUT} = 5$ โวลต์)
4. ค่าแรงดันไฟเลี้ยง 5-28 โวลต์



รูปที่ 5.2 ลักษณะของออฟติคอลลีนโคคเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

5.1.2 อินอร์เชียโหลด คุณลักษณะของอินอร์เชียโหลดที่ใช้แสดงดังรูปที่ 5.3 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. อินอร์เชียโหลดขนาด 200 กรัม
2. อินอร์เชียโหลดขนาด 400 กรัม

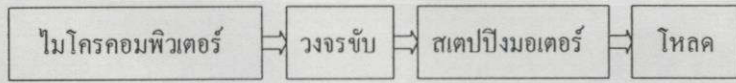


รูปที่ 5.3 ลักษณะของอินอร์เชียโหลด (Inertia load) ที่ใช้ในการทดลอง
ด้านซ้ายคืออินอร์เชียโหลดขนาด 400 กรัม และด้านขวาคือโหลดขนาด 200 กรัม

5.2 การควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์แบบวงเปิด

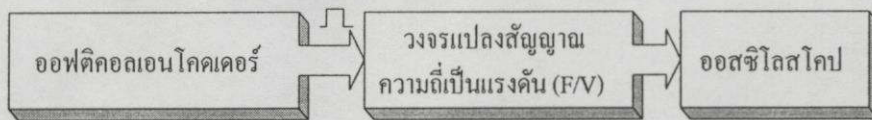
การทดลองควบคุมสเตปมอเตอร์แบบวงเปิด เป็นการกระตุ้นแบบทีละเฟสและในขณะที่ไม่มีโหลด สำหรับความถี่ที่ป้อนให้แก่อินพุท ความถี่จะเพิ่มขึ้นทีละ 100 Hz. จากความถี่ 100 Hz. จนกว่าสเตปมอเตอร์ไม่สามารถตอบสนองความถี่ที่ป้อนให้ได้ การสังเกตว่าสเตปมอเตอร์ไม่สามารถตอบสนองได้จากการวัดโปรไฟล์ความเร็ว เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงความเร็วของสเตปมอเตอร์ว่าเกิดออสซิลเลชันหรือไม่ จากนั้นจะเป็นการทดสอบว่าสเตปมอเตอร์สามารถทำงานในขณะความถี่อินพุทที่ค่าสูงสุด ถ้ามีโหลดค่าต่าง เพื่อพิจารณาว่าสเตปมอเตอร์สามารถให้ค่าแรงบิดและตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้ดีเพียงใด โดยการวัดโปรไฟล์ความเร็วพร้อมกับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของโรเตอร์สเตปมอเตอร์ และยังสามารถพิจารณาผลการตอบสนองของไรส์ไทม์ (Rise time) และช่วงเวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ (Settling time) ได้อีกด้วย

การควบคุมการขับเคลื่อนแบบวงเปิดเป็นการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ที่นิยมใช้กันทั่วไป ลักษณะการควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิดแสดงดังในรูปที่ 5.3

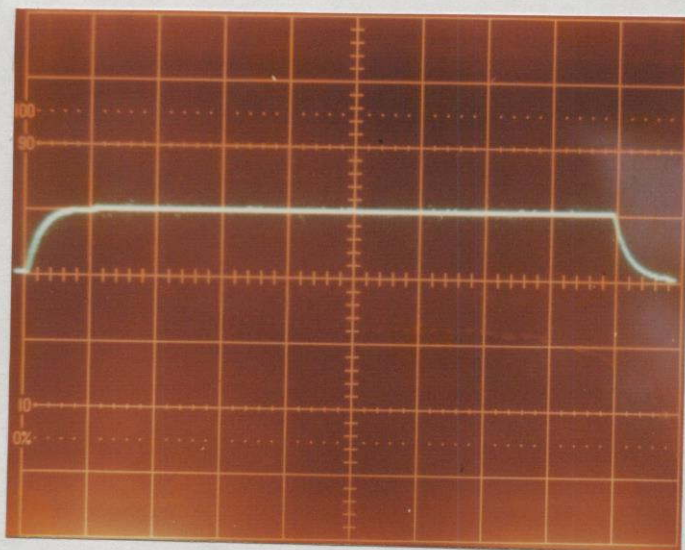


รูปที่ 5.4 แสดงลักษณะการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิด

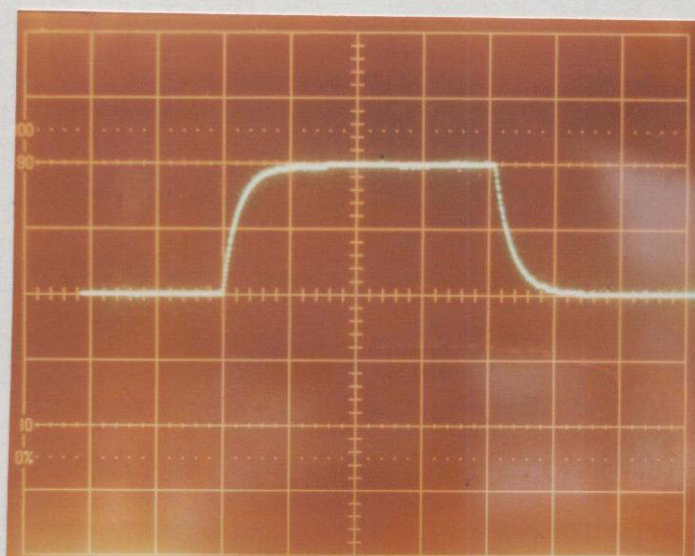
5.2.1 ผลการวัดโปรไฟล์ความเร็ว ในการวัดโปรไฟล์ความเร็ว เพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ของสเตปป์มอเตอร์ เมื่อ กำหนดระยะทางการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นจนถึงเป้าหมายเท่ากับ 1000 สเตป และป้อนความถี่อินพุตพัลส์เริ่มต้นเท่ากับ 100 Hz. แล้วเพิ่มความถี่สูงขึ้นจนกว่าสเตปป์มอเตอร์หยุดทำงานหรือหยุดตอบสนองความถี่อินพุตพัลส์หรือเกิดออสซิลเลต ซึ่งได้ผลดังในรูปที่ 5.1 ถึงรูปที่ 5.6 ตามลำดับ



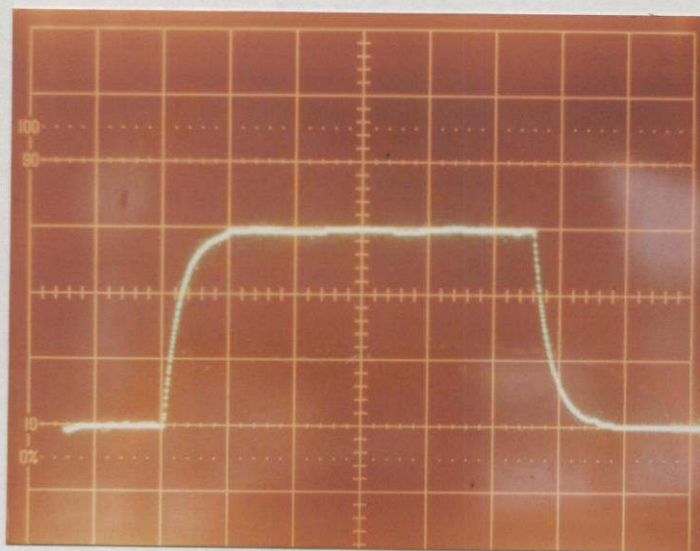
รูปที่ 5.5 บล็อกไดอะแกรมของการวัดโปรไฟล์การเปลี่ยนแปลงความเร็ว



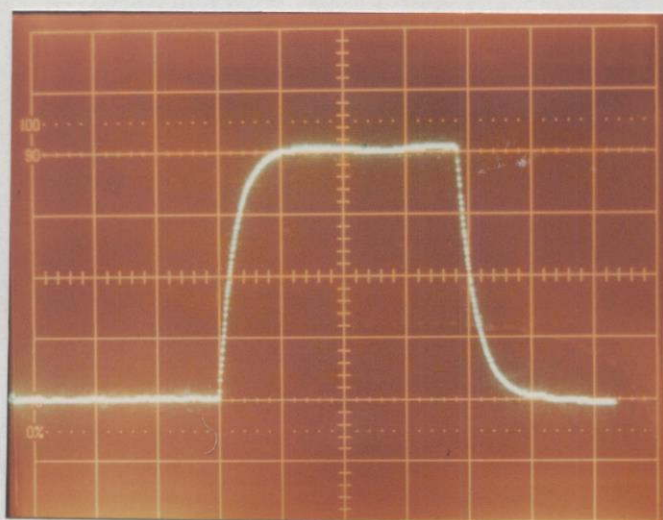
รูปที่ 5.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็ว เมื่อป้อนความถี่พัลส์อินพุต 100 Hz.
 กระตุ้นแบบทีละเฟส และระยะทางการเคลื่อนที่ 1000 สเตป
 เวลา : 10 Sec. (1 Sec./DIV), แรงดัน : 0.5 Volt. (0.5 Volt/DIV)



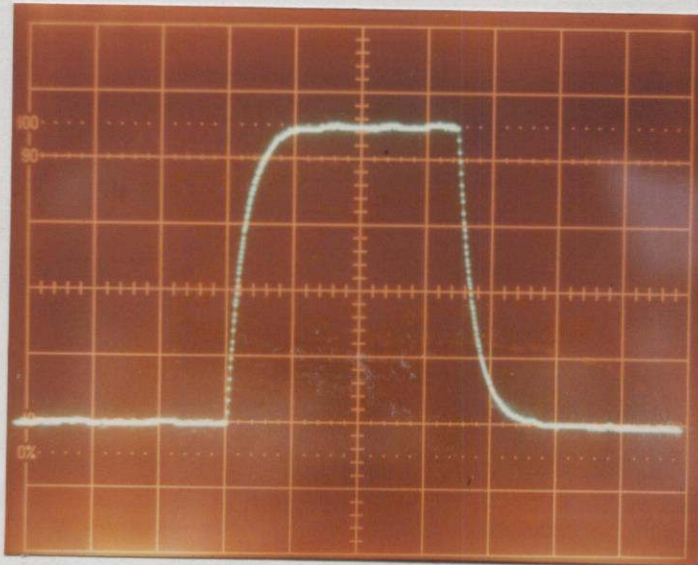
รูปที่ 5.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็ว เมื่อป้อนความถี่พัลส์อินพุต 200 Hz.
 กระตุ้นแบบทีละเฟส และระยะทางการเคลื่อนที่ 1000 สเตป
 เวลา : 5 Sec. (1 Sec./DIV), แรงดัน : 1 Volt. (0.5 Volt/DIV)



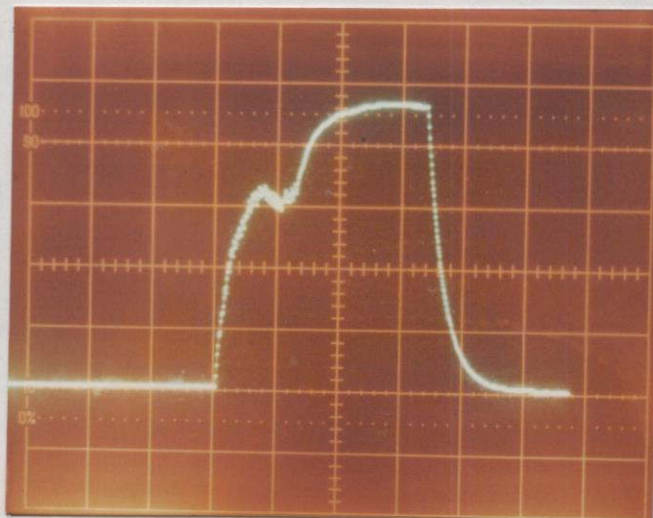
รูปที่ 5.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็ว เมื่อป้อนความถี่พัลส์อินพุท 300 Hz.
 กระตุ้นแบบทีละเฟส และระยะทางการเคลื่อนที่ 1000 สเตป
 เวลา : 3.3 Sec. (0.5 Sec./DIV), แรงดัน : 1.5 Volt. (0.5 Volt/DIV)



รูปที่ 5.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็ว เมื่อป้อนความถี่พัลส์อินพุท 400 Hz.
 กระตุ้นแบบทีละเฟส และระยะทางการเคลื่อนที่ 1000 สเตป
 เวลา : 2.5 Sec. (0.5 Sec./DIV), แรงดัน : 2 Volt. (0.5 Volt/DIV)

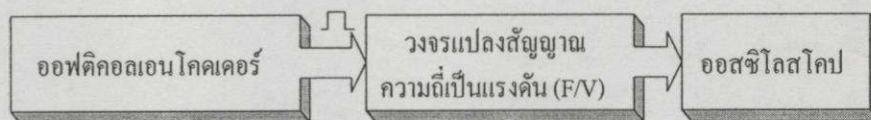


รูปที่ 5.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็ว เมื่อป้อนความถี่พัลส์อินพุท 445 Hz.
 กระตุ้นแบบทีละเฟส และระยะทางการเคลื่อนที่ 1000 สเตป
 เวลา : 2.25 Sec. (0.5 Sec./DIV), แรงดัน : 2.25 Volt. (0.5 Volt/DIV)

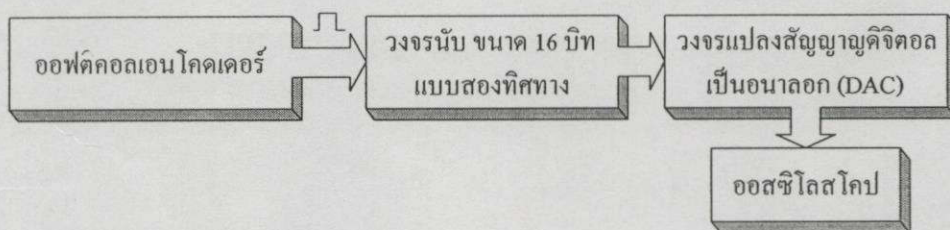


รูปที่ 5.11 แสดงโปรไฟล์ความเร็ว เมื่อป้อนความถี่พัลส์อินพุท 450 Hz. กระตุ้นแบบทีละเฟส
 และระยะทางการเคลื่อนที่ 1000 สเตป
 ซึ่งสเตปปีงมอเตอร์เกิดออสซิลเลตในการเคลื่อนที่ขึ้น
 เวลา : 0.5 Sec./DIV, แรงดัน : 0.5 Volt/DIV

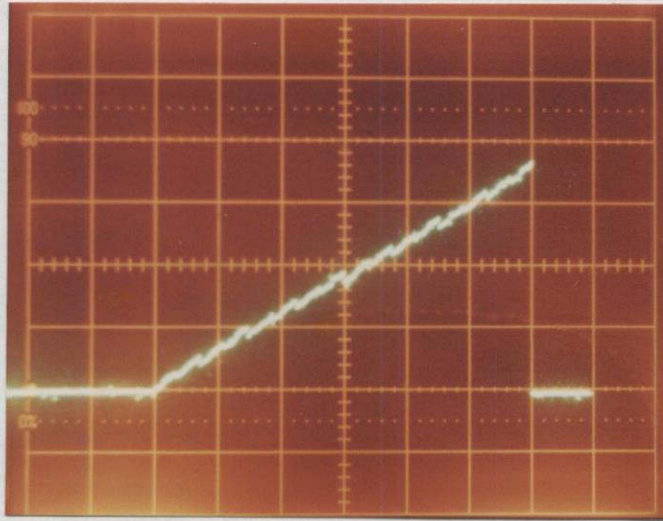
5.2.2 ผลการวัดการควบคุมตำแหน่งและโปรไฟล์ความเร็ว ในการวัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ และโปรไฟล์ความเร็ว เพื่อดูความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและความเร็วในการเคลื่อนที่ของสเตปปีงมอเตอร์ เมื่อกำหนดระยะทางการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นจนถึงเป้าหมายเท่ากับ 1000 สเตป, โหลด 0, 200, 400 กรัม ตามลำดับ, และความถี่อินพุทพัลส์เท่ากับ 440 Hz. ซึ่งถือว่าเป็นค่าความถี่สูงสุดที่สเตปปีงมอเตอร์สามารถตอบสนองได้ดีที่สุด ซึ่งมีการวัดดังรูปที่ 5.12 และ 5.13 และผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 5.14 ถึงรูปที่ 5.19 ตามลำดับ



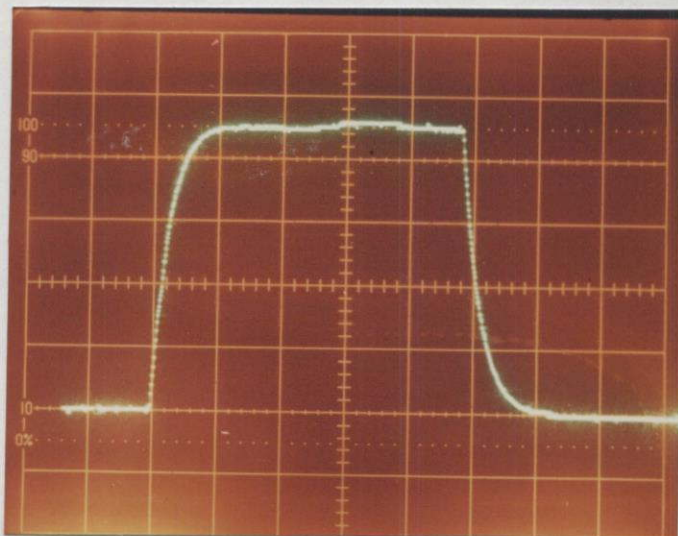
รูปที่ 5.12 บล็อกไดอะแกรมของการวัดโปรไฟล์การเปลี่ยนแปลงความเร็ว



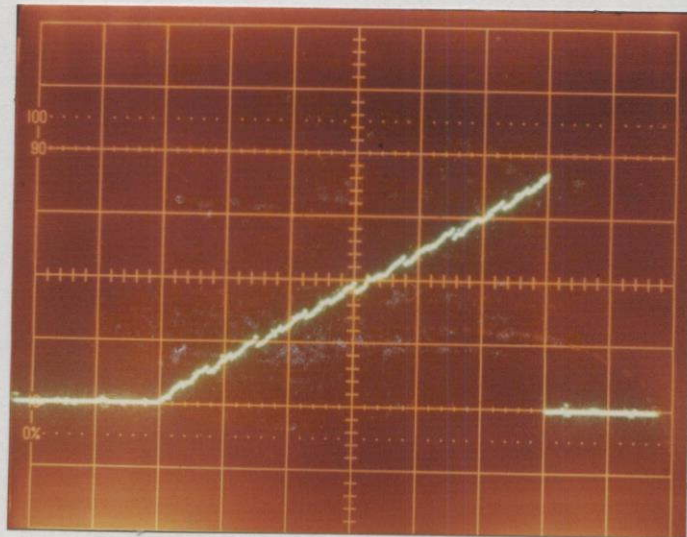
รูปที่ 5.13 บล็อกไดอะแกรมการวัดผลการควบคุมตำแหน่ง



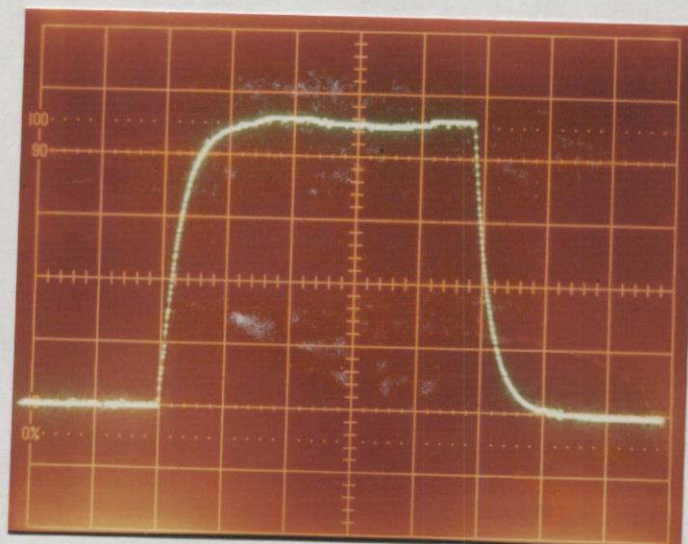
รูปที่ 5.14 ผลของโปรไฟล์ความเร็วการเคลื่อนที่ เมื่อความถี่พัลส์อินพุท 440 Hz.
 กระตุ้นแบบทีละเฟส ระยะทางการเคลื่อนที่ 265 สเตป และไม่มีอินอร์เซียโหลด
 เวลา : 0.6 Sec. (0.1 Sec./DIV), แรงดัน : 0.5 Volt/DIV



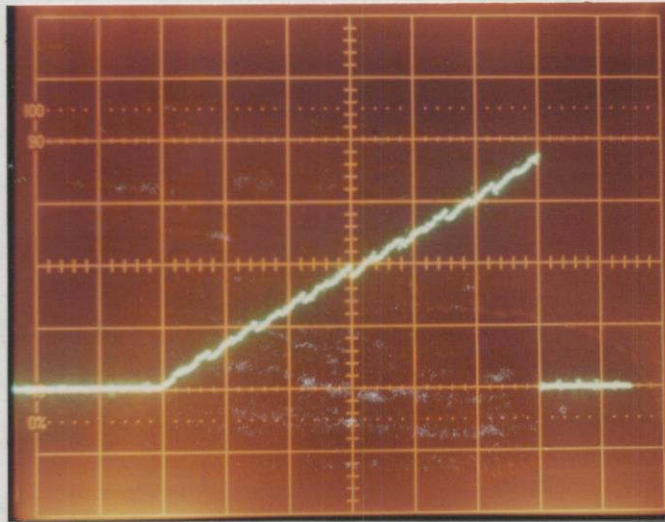
รูปที่ 5.15 ผลของโปรไฟล์ความเร็วการเคลื่อนที่ เมื่อความถี่พัลส์อินพุท 440 Hz.
 กระตุ้นแบบทีละเฟส ระยะทางการเคลื่อนที่ 265 สเตป และไม่มีอินอร์เซียโหลด
 เวลา : 0.6 Sec. (0.1 Sec./DIV), แรงดัน : 0.5 Volt/DIV



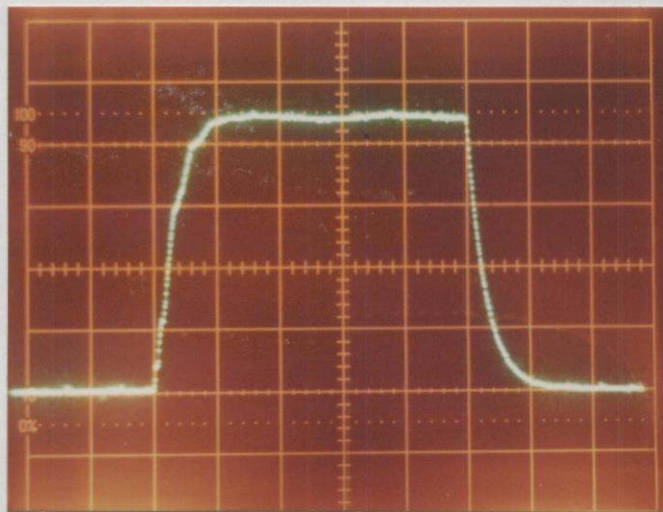
รูปที่ 5.16 ผลของโปรไฟล์ความเร็วการเคลื่อนที่ เมื่อความถี่พัลส์อินพุท 440 Hz.
 กระตุ่นแบบทีละเฟส ระยะทางการเคลื่อนที่ 265 สเตป และมีอินเนอร์เซียโหลด 200 กรัม
 เวลา : 0.6 Sec. (0.1 Sec./DIV), แรงแดัน : 0.5 Volt/DIV



รูปที่ 5.17 ผลของโปรไฟล์ความเร็วการเคลื่อนที่ เมื่อความถี่พัลส์อินพุท 440 Hz.
 กระตุ่นแบบทีละเฟส ระยะทางการเคลื่อนที่ 265 สเตป และมีอินเนอร์เซียโหลด 200 กรัม
 เวลา : 0.6 Sec. (0.1 Sec./DIV), แรงแดัน : 0.5 Volt/DIV



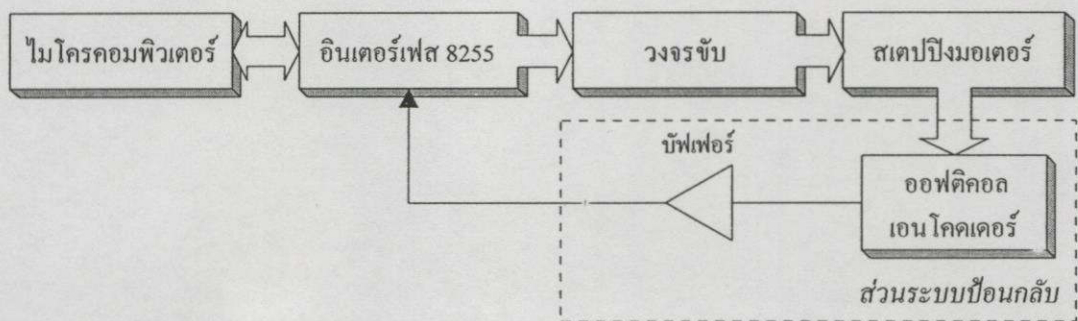
รูปที่ 5.18 ผลของโปรไฟล์ความเร็วการเคลื่อนที่ เมื่อความถี่พัลส์อินพุท 440 Hz.
 กระตุ่นแบบทีละเฟส ระยะทางการเคลื่อนที่ 265 สเตป และมีเอนอร์ซีชโหลด 400 กรัม
 เวลา : 0.6 Sec. (0.1 Sec./DIV), แรงดัน : 0.5 Volt/DIV



รูปที่ 5.19 ผลของโปรไฟล์ความเร็วการเคลื่อนที่ เมื่อความถี่พัลส์อินพุท 440 Hz.
 กระตุ่นแบบทีละเฟส ระยะทางการเคลื่อนที่ 265 สเตป และมีเอนอร์ซีชโหลด 400 กรัม
 เวลา : 0.6 Sec. (0.1 Sec./DIV), แรงดัน : 0.5 Volt/DIV

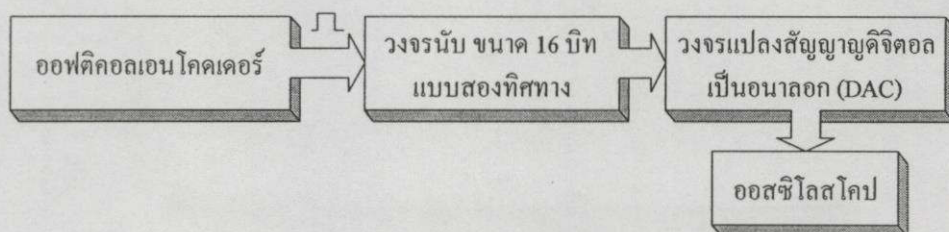
5.3 การควบคุมการขับสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิด

การควบคุมการขับสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิดด้วยหลักการของลีดเองเกิด โดยมีลักษณะการควบคุมดังรูปที่ 5.20 ซึ่งเป็นการควบคุมแบบวงปิดก็เป็นการกระตุ้นแบบที่ละเฟสเช่นเดียวกับการควบคุมแบบวงเปิด ซึ่งหลักการกำหนดค่าลีดเองเกิดที่เหมาะสมนั้น จะพิจารณาจากกราฟคุณลักษณะแรงบิดของสเตปป์มอเตอร์ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 การสตาร์ท (Start) สเตปป์มอเตอร์จะกำหนดให้ค่าลีดเองเกิดมีค่าประมาณ 1.5 สเตปป์ เมื่อสเตปป์มอเตอร์วิ่งเข้าสู่ความเร็วคงที่ (Settling time) หรือช่วงการหมุน ค่าของลีดเองเกิดเปลี่ยนค่าเป็นประมาณ 0.5 สเตปป์ การสังเกตว่าสเตปป์มอเตอร์ไม่สามารถตอบสนองได้จากการวัดโปรไฟล์ความเร็ว เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงความเร็วของสเตปป์มอเตอร์ว่าเกิดออสซิลเลชันหรือไม่ จากนั้นจะเป็นการทดสอบว่าสเตปป์มอเตอร์สามารถทำงานในขณะความถี่อินพุตที่ค่าสูงสุด ถ้ามีอินเนอร์เซียโหลดค่าต่าง เพื่อพิจารณาว่าสเตปป์มอเตอร์สามารถให้ค่าแรงบิดและตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้ดีเพียงใด โดยการวัดโปรไฟล์ความเร็วพร้อมกับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของโรเตอร์สเตปป์มอเตอร์ และยังสามารถพิจารณาคุณภาพการตอบสนองของไรส์ไทม์ (Rise time) และช่วงเวลาเข้าสู่สภาวะคงที่ (Settling time) ได้อีกด้วย

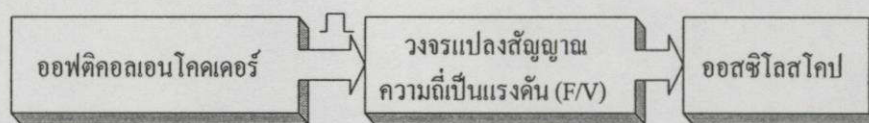


รูปที่ 5.20 แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิด โดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงาน

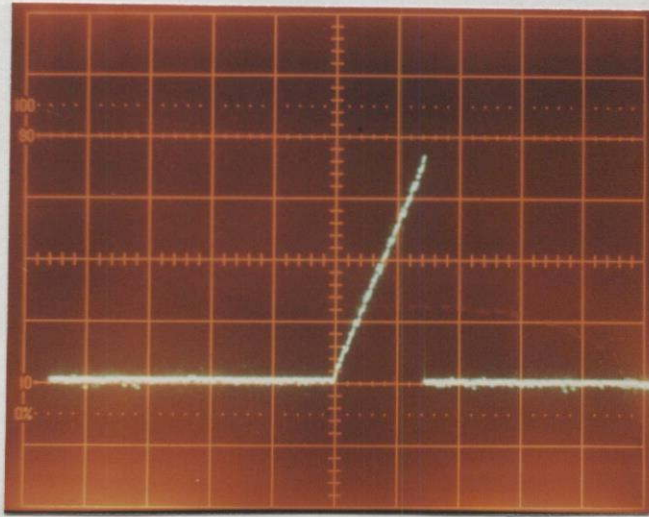
5.3.1 ผลการควบคุมตำแหน่งและโปรไฟล์ความเร็ว ในการวัดความสัมพันธ์ระหว่างการควบคุมตำแหน่งกับโปรไฟล์ความเร็ว เพื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งการเคลื่อนที่และความเร็วของสเตปปีงมอเตอร์ เมื่อกำหนดระยะทางการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นจนถึงเป้าหมายเท่ากับ 265 สเตป และกำหนดคลิดเองเกิดที่เหมาะสม คือช่วงสเตปปีงมอเตอร์เริ่มสตาร์ทให้คลิดเองเกิดเท่ากับ 1.5 สเตป ช่วงการหมุนเท่ากับ 2.0 สเตป และช่วงสต่อปเท่ากับ 0.5, 0 สเตป ตามลำดับ ส่วนค่าคลิดเองเกิดที่ไม่เหมาะสม คือค่าที่ไม่มีผลต่อการเพิ่มของแรงบิดที่เหมาะสม เมื่อพิจารณาจากกราฟแรงบิดสแตก ซึ่งมีการวัดดังในรูปที่ 5.21 และ 5.22 ส่วนผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 5.23 ถึงรูปที่ 5.29 ตามลำดับ



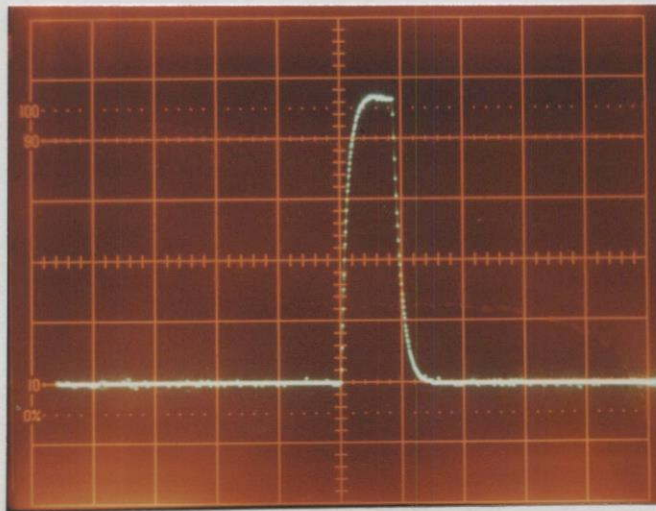
รูปที่ 5.21 บล็อกไดอะแกรมของการวัดผลการควบคุมตำแหน่ง



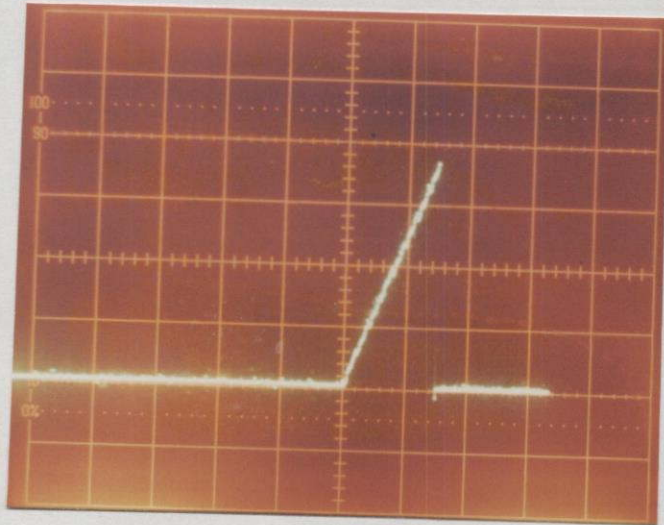
รูปที่ 5.22 บล็อกไดอะแกรมของการวัดผลการเปลี่ยนแปลงความเร็ว



รูปที่ 5.23 ผลการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟส ระยะทางการเคลื่อนที่ 265 สเตป และไม่มีอินอร์เซียโหลด ซึ่งสามารถตอบสนองความถี่ได้สูงถึง 1892.8 Hz.
เวลา : 0.14 Sec. (0.1 Sec./DIV), แรงดัน : 2 Volt/DIV

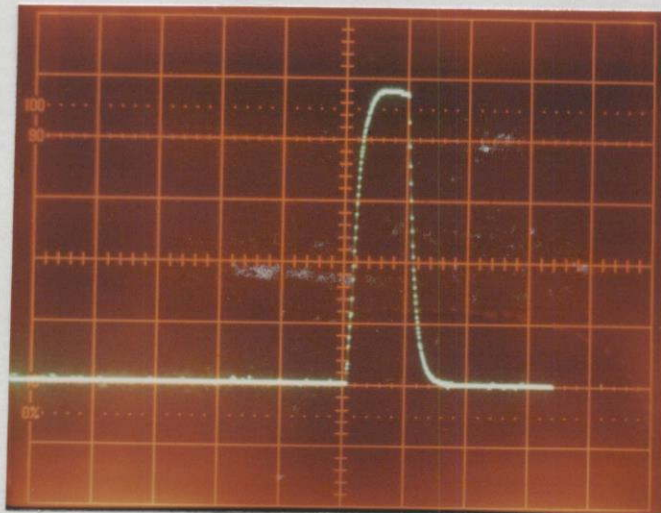


รูปที่ 5.24 ผลของการควบคุมตำแหน่ง เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟส ระยะทางการเคลื่อนที่ 265 สเตป และไม่มีอินอร์เซียโหลด ซึ่งสามารถตอบสนองความถี่ได้สูงถึง 1892.8 Hz.
เวลา : 0.14 Sec. (0.1 Sec./DIV), แรงดัน : 2 Volt/DIV



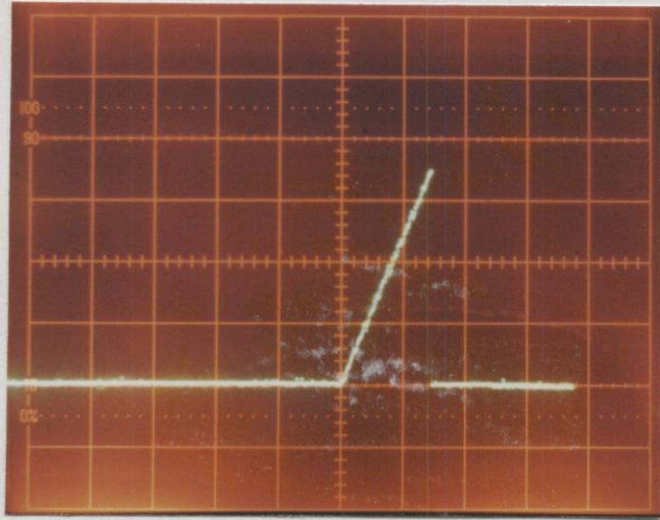
รูปที่ 5.25 ผลการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟส ระยะทางการเคลื่อนที่ 265 สเตป และอินเนอร์เซียโหลดขนาด 200 กรัมซึ่งสามารถตอบสนองความถี่ได้สูงถึง 1866.1 Hz.

เวลา : 0.142 Sec. (0.1 Sec./DIV), แรงดัน : 2 Volt/DIV



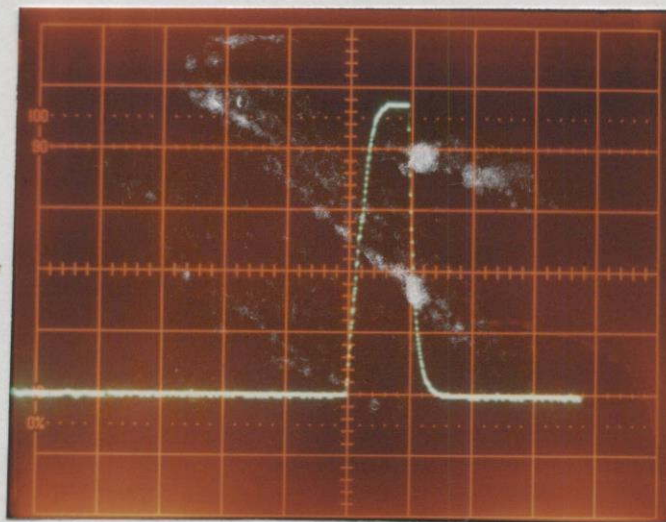
รูปที่ 5.26 ผลของการควบคุมตำแหน่ง เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟส ระยะทางการเคลื่อนที่ 265 สเตป และมีอินเนอร์เซียโหลด 200 กรัม ซึ่งสามารถตอบสนองความถี่ได้สูงถึง 1866.1 Hz.

เวลา : 0.142 Sec. (0.1 Sec./DIV), แรงดัน : 2 Volt/DIV



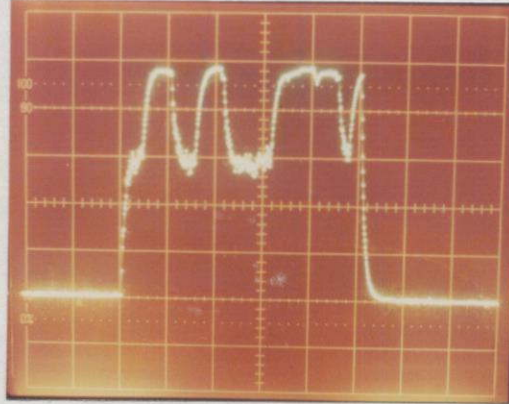
รูปที่ 5.27 ผลการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟส ระยะทางการเคลื่อนที่ 265 สเตป และมีอินอร์เชียโหลด 400 กรัม ซึ่งสามารถตอบสนองความถี่ได้สูงถึง 1866.1 Hz.

เวลา : 0.142 Sec. (0.1 Sec./DIV), แรงดัน : 2 Volt/DIV

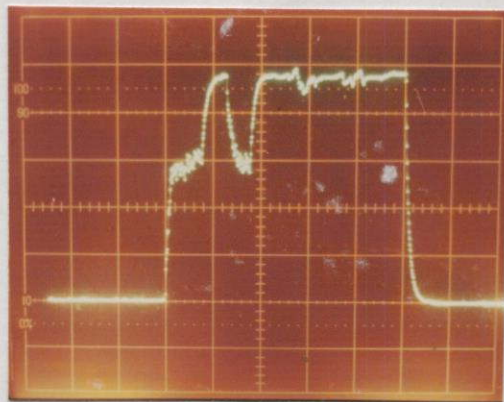


รูปที่ 5.28 ผลของการควบคุมตำแหน่ง เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟส ระยะทางการเคลื่อนที่ 265 สเตป และมีอินอร์เชียโหลด 400 กรัม ซึ่งสามารถตอบสนองความถี่ได้สูงถึง 1866.1 Hz.

เวลา : 0.142 Sec. (0.1 Sec./DIV), แรงดัน : 2 Volt/DIV



รูปที่ 5.29 ผลของโปรไฟล์ความเร็วการเคลื่อนที่ เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟส และไม่มี
อินอร์ซีชียโหลด ระยะทาง 1000 สเตป และลีดเองเกิดเท่ากับ 2 สเตป คงที่
ซึ่งเกิดออสซิลเลชัน เนื่องจากกำหนดลีดเองเกิดไม่เหมาะสม
เวลา : 0.1 Sec./DIV, แรงดัน : 2 Volt/DIV



รูปที่ 5.30 ผลของโปรไฟล์ความเร็วการเคลื่อนที่ เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟส
และไม่มีอินอร์ซีชียโหลด ระยะทาง 1000 สเตป และลีดเองเกิดเท่ากับ 1.5 สเตป คงที่
ซึ่งเกิดออสซิลเลชัน เนื่องจากกำหนดลีดเองเกิดไม่เหมาะสม
เวลา : 0.1 Sec./DIV, แรงดัน : 2 Volt/DIV

5.4 สรุปผลการทดลอง

ในการทดลองควบคุมการทำงานของสเตรปปีงมอเตอร์ทั้งแบบวงเปิดและแบบวงปิด ซึ่งใช้สเตรปปีงมอเตอร์ ขนาด 4 เฟส ขนาดสเตป 1.8 องศาต่อสเตป หรือ 48 สเตปต่อรอบ และการควบคุมแบบวงปิดใช้ตัวออฟดีคอลลอนโคคเตอร์ ขนาดสัญญาณเอาต์พุต 6000 พัลส์ต่อรอบ เป็นตัวสร้างสัญญาณป้อนกลับ เพื่อบอกตำแหน่งการเคลื่อนที่แต่ละสเตปของโรเตอร์ การควบคุมสเตรปปีงมอเตอร์แบบวงปิดใช้วิธีลีดเองเกิดเพื่อกำหนดสวิดจิงเองเกิดให้กับสัญญาณอินพุตที่เหมาะสม

จากการทดสอบการเปรียบเทียบผลการตอบสนองความถี่ของอินพุตพัลส์ที่ป้อนให้แก่สเตรปปีงมอเตอร์และค่าไรส์ไทม์เพื่อพิจารณาคุณภาพแรงบิด วิธีการควบคุมแบบวงเปิดขณะไม่มีโหลด โดยการเริ่มป้อนความถี่พัลส์อินพุตจากความถี่ต่ำแล้วเพิ่มความถี่สูงขึ้นจนกว่าสเตรปปีงมอเตอร์ไม่สามารถตอบสนองความถี่ที่ป้อนให้ได้หรือสเตรปปีงมอเตอร์เริ่มมีความผิดพลาดทางตำแหน่งการเคลื่อนที่ ซึ่งแสดงออกมาในรูปของการเปลี่ยนแปลงความเร็วและตำแหน่งการเคลื่อนที่ เพื่อเปรียบเทียบกับหลักการใหม่ที่นำเสนอ คือ การควบคุมการทำงานของสเตรปปีงมอเตอร์แบบวงปิดด้วยวิธีลีดเองเกิด หลักการใหม่นี้สามารถเพิ่มอัตราการตอบสนองของความถี่พัลส์อินพุตที่ป้อนให้แก่สเตรปปีงมอเตอร์ได้สูงกว่าการควบคุมแบบวงเปิด นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบผลแรงบิดที่โหลดเดียวกันจะเห็นว่า การควบคุมแบบวงเปิดจะให้ผลแรงบิดน้อยกว่าการควบคุมแบบวงปิด ซึ่งผลของแรงบิดนี้สามารถพิจารณาได้จากค่าความชันหรือค่าเวลาของไรส์ไทม์ (Rise time) ซึ่งจะเห็นว่า การควบคุมแบบวงปิดจะมีความชันของโปรไฟล์ความเร็วมากกว่าการควบคุมแบบวงเปิด

จากการทดลองพบว่า การกำหนดค่าลีดเองเกิดที่เหมาะสมต้องพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงบิดสเตตติกของแต่ละเฟสต่อตำแหน่งการเคลื่อนที่ของโรเตอร์จากกราฟคุณลักษณะแรงบิดสเตตติก ทั้งนี้การกำหนดลีดเองเกิดต้องคำนึงถึงความเร็วในการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ด้วย ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ช่วงความเร็วด้วยกัน ช่วงแรก คือ ช่วงการเริ่มหมุนหรือสตาร์ท (Starting) ค่าลีดเองเกิดที่เหมาะสมประมาณ 1.5 สเตป หลังจากสเตรปปีงมอเตอร์เริ่มหมุนแล้วเข้าสู่สภาวะช่วงการหมุน (Slew) หรือช่วงการวิ่ง (Running) เมื่อความเร็วคงที่ค่าลีดเองเกิดควรอยู่ประมาณ 2.0 สเตป ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟคุณลักษณะแรงบิดสเตตติกแล้วจะเห็นว่าขณะลีดเองเกิด 2.0 สเตป ผลของแรงบิดที่ได้ คือ ศูนย์ แต่จะไม่เป็นเช่นนั้น เพราะผลเกิดจากสเตรปปีงมอเตอร์มีความเร็วสูงขึ้น ส่งผลให้ความเร็วในการเปิด-ปิด (Turning On-Off) ของทรานซิสเตอร์ในภาคขยายกำลังกระแส ช่วงทรานซิสเตอร์ทำการเปิดและการปิดวงจร เพื่อจ่ายกระแสให้แก่ขดลวดของสเตรปปีงมอเตอร์ จะเกิดการหน่วงเวลาของกระแสขณะเพิ่มและลดลงของกระแส เมื่อเทียบกับระยะเวลาเคลื่อนที่ของโรเตอร์แต่ละสเตป ซึ่งระยะเวลาการสเตปของโรเตอร์จะมีเวลาช้ากว่าการจ่ายกระแสให้แก่ขดลวดอยู่ประมาณ 0.5 สเตป ดังนั้น การกำหนดลีดเองเกิด 2.0 สเตปจะเสมือนกับกำหนดลีดเองเกิด 1.5 สเตป เมื่อกลับไปพิจารณาคุณลักษณะของแรงบิดสเตตติกแล้ว ถ้าลีดเองเกิด 1.5 สเตป ผลของแรงบิดเฉลี่ยสำหรับสเตรปปีงมอเตอร์ขนาด 4 เฟส จะได้ผลแรงบิดสูงสุด ด้วยเหตุนี้

สเตปป์มอเตอร์จึงสามารถตอบสนองความถี่ได้สูงขึ้นตามค่าแรงบิดนั่นเอง การหมุนช่วงที่สาม คือ การหยุด การหยุดหมุนสเตปป์มอเตอร์นี้ มีข้ออยู่ที่หยุดการป้อนสัญญาณพัลส์กระตุ้นขดลวดเลข จำเป็นต้องลดความเร็วในการสเตปป์ให้เข้าสู่สถานะที่สเตปป์มอเตอร์สามารถหยุดการหมุนได้ก่อน แล้วจึงสามารถหยุดการหมุนของสเตปป์มอเตอร์ได้ ดังนั้นจึงต้องแบ่งการกำเนิดเป็นสองค่า คือ การลดความเร็ว ลิดเองเกิดค่าน้อยๆ ประมาณ ± 0.5 สเตปป์ และการหยุด ลิดเองเกิด คือ 0 สเตปป์ ซึ่งหากกำหนดลิดเองเกิดไม่เหมาะสม จะทำให้สเตปป์มอเตอร์ไม่สามารถสร้างแรงบิดให้สเตปป์มอเตอร์หมุนหรือเคลื่อนที่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.29 และ รูปที่ 5.30

เมื่อพิจารณาถึงผลแรงบิด เมื่อควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิดโดยเทียบกับการควบคุมแบบวงเปิด ขณะมีโหลดและความถี่อินพุทพัลส์สูงสุด ขณะควบคุมแบบวงเปิดสามารถตอบสนองความถี่ได้เพียงประมาณ 440 Hz. แต่การควบคุมแบบวงปิดสามารถตอบสนองความถี่ได้สูงถึงประมาณ 1,890 Hz. ผลของแรงบิดที่เพิ่มขึ้นนี้สามารถพิจารณาได้จากค่าไรส์ไทม์ของโปรไฟล์ความเร็ว เมื่อขับโหลดขนาด 400 กรัม ควบคุมแบบวงเปิด มีค่าไรส์ไทม์ คือ 1.5 Sec. และการควบคุมแบบวงปิด ค่าไรส์ไทม์ คือ 0.17 Sec. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าถึงประมาณ 4 เท่า ดังนั้น จึงแสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบวงปิดย่อมมีค่าแรงบิดสูงกว่าการควบคุมแบบวงเปิดประมาณ 4 เท่า จึงส่งผลให้การตอบสนองความถี่ของสัญญาณอินพุทพัลส์ของการควบคุมแบบวงปิดจึงสูงกว่าการควบคุมแบบวงเปิดประมาณ 4 เท่าเช่นกัน

จึงสรุปได้ว่า จากผลการทดลองพบว่าการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิดด้วยวิธีลิดเองเกิด เมื่อโหลดมีค่าคงที่และกำหนดให้ลิดเองเกิดมีความเหมาะสม สเตปป์มอเตอร์สามารถตอบสนองการทำงานได้ดีกว่าการควบคุมแบบวงเปิด ดังแสดงผลตารางที่ 5.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า อัตราความถี่สูงสุด, ความเร็วคงที่, ช่วงเวลาเข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมาย, และสเตปป์ต่อวินาที ดีกว่าการควบคุมแบบวงเปิดถึง 36 % นอกจากนี้ไรส์ไทม์ และเวลาเข้าสู่สถานะคงตัวลดลงถึง 35 % และระบบยังสามารถตรวจสอบความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ของสเตปป์มอเตอร์ได้.

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการตอบสนองของสเตปป์มอเตอร์ เมื่อควบคุมแบบวงเปิดและแบบวงปิด

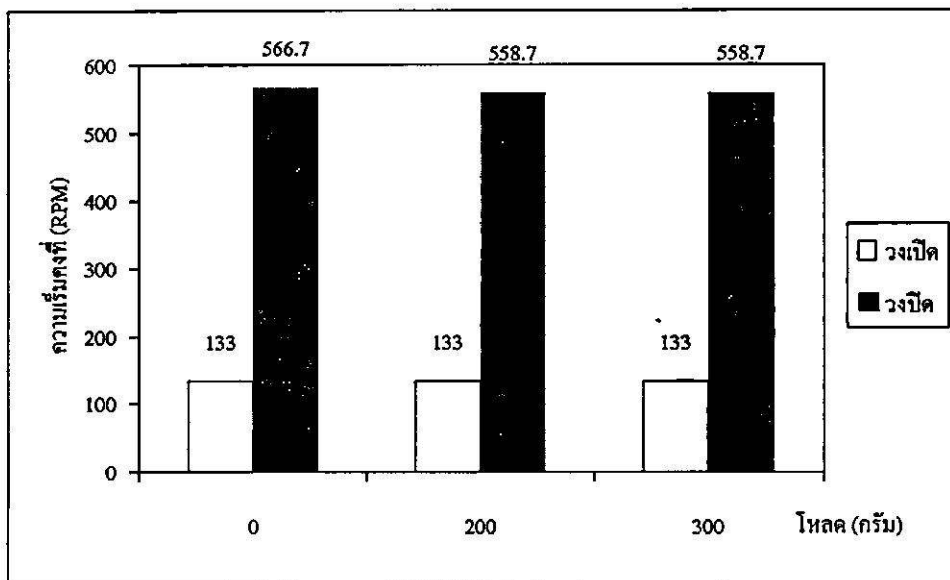
| ผลการตอบสนอง ของสเตปป์มอเตอร์ | โหลด (กรัม) | ลักษณะการควบคุม | | |
|--|----------------|-----------------|------------|------------------|
| | | แบบวงเปิด | แบบวงปิด | |
| ความถี่คงที่สูงสุด | - | 444.4 Hz. | 1892.8 Hz. | เพิ่มขึ้น 76.5 % |
| | 200 | 444.4 Hz. | 1866.1 Hz. | เพิ่มขึ้น 76.1 % |
| | 400 | 444.4 Hz. | 1866.1 Hz. | เพิ่มขึ้น 76.1 % |
| ความเร็วคงที่สูงสุด (RPM) | - | 133 rpm. | 566.7 rpm. | เร็วขึ้น 76.10 % |
| | 200 | 133 rpm. | 558.7 rpm. | เร็วขึ้น 76.10 % |
| | 400 | 133 rpm. | 558.7 rpm. | เร็วขึ้น 76.60 % |
| ช่วงเวลาเข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมาย ด้วยระยะทาง 265 สเตป | - | 0.6 Sec. | 0.14 Sec. | ลดลง 76.60 % |
| | 200 | 0.6 Sec. | 0.142 Sec. | ลดลง 76.30 % |
| | 400 | 0.6 Sec. | 0.142 Sec. | ลดลง 76.30 % |
| ช่วงไรส์ไทม์ (Rise time) | - | 1.1 Sec. | 0.042 ms. | ลดลง 54.54 % |
| | 200 | 1.2 Sec. | 1.0 Sec. | ลดลง 16.60 % |
| | 400 | 1.5 Sec. | 1.2 Sec. | ลดลง 20.00 % |
| เวลาสู่สภาวะคงตัว (Settling time) | - | 1.8 Sec. | 0.6 Sec. | ลดลง 66.60 % |
| | 200 | 1.6 Sec. | 0.6 Sec. | ลดลง 62.50 % |
| | 400 | 1.6 Sec. | 0.6 Sec. | ลดลง 62.50 % |

หมายเหตุ

Step per second to RPM = $sps/3.34$; สำหรับสเตปป์มอเตอร์ ขนาด 1.8 องศาต่อสเตปป์
และเมื่อ sps คือ Step per second. (Hz.)

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าลีดแองเกิลที่เหมาะสมต่อระยะการสเตปป์ ตั้งแต่เริ่มหมุนจนหยุดหมุน

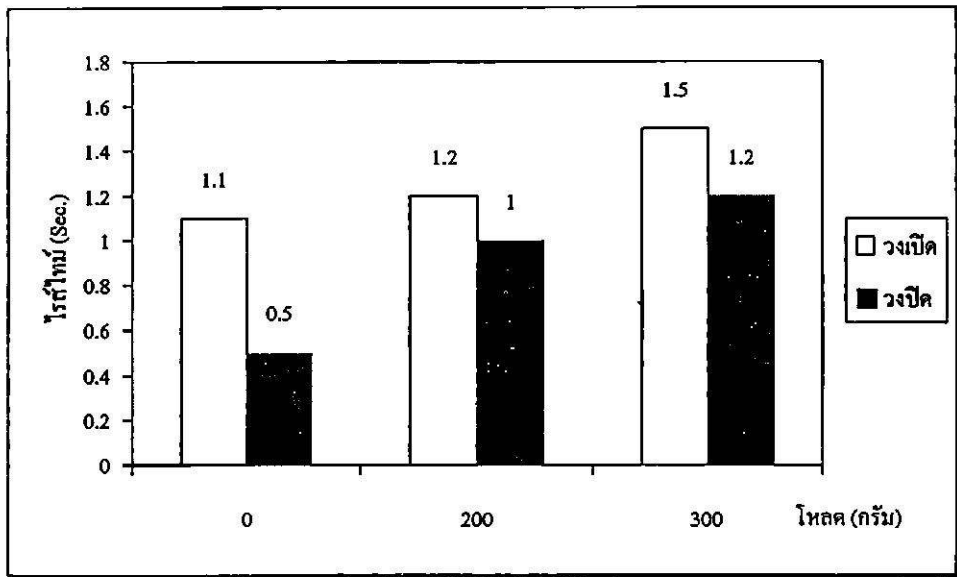
| ระยะทาง (สเตปป์) | ช่วงสตาร์ท | ช่วงความคงที่ | ช่วงสต่อป | |
|----------------------|------------|---------------|-----------|---|
| | 10 | 252 | 2 | 1 |
| ค่าลีดแองเกิล (องศา) | 1.5 | 2.0 | 0.5 | 0 |



รูปที่ 5.31 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงความเร็ว เมื่อกระตุ้นแบบที่กะเฟส

วงเปิด คือ การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิด

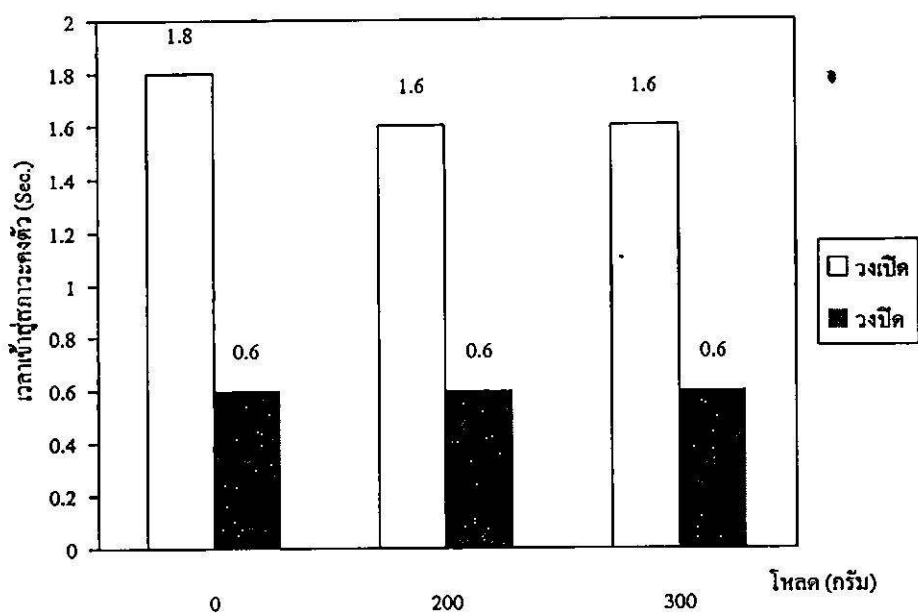
วงปิด คือ การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิด



รูปที่ 5.32 แสดงกราฟไรต์ไทม์ เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟส

วงเปิด คือ การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิด

วงปิด คือ การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิด



รูปที่ 2.33 แสดงกราฟระยะเวลาเข้าสู่ภาวะคงตัว เมื่อกระตุ้นแบบทีละเฟส

วงเปิด คือ การควบคุมสเตรปิงมอเตอร์แบบวงเปิด

วงปิด คือ การควบคุมสเตรปิงมอเตอร์แบบวงปิด

วิจารณ์ผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงวิธีการแก้ปัญหา ผลการตอบสนองความถี่สัญญาณพัลส์กระตุ้น วงจรขับสเตปป์มอเตอร์ เนื่องจากการควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์โดยทั่วไปเป็นการควบคุมแบบวงเปิด สเตปป์มอเตอร์ไม่สามารถตอบสนองความถี่ได้สูงสุดที่ควรจะเป็นไปได้ การควบคุมแบบวงปิดสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ใช้วิธีการลีดเองเกิดเพื่อควบคุมสวิดจิงเองเกิดของสัญญาณพัลส์ให้มีระยะมุมเหมาะสม หลักการกำหนดคลิดเองเกิดที่เหมาะสมจะพิจารณาจากคุณลักษณะของแรงบิดสแตติกการควบคุมแบบวงจรปิดทำได้โดยการสร้างสัญญาณป้อนกลับไปยังส่วนควบคุมซึ่งมีสองวิธีคือ การใช้เอนโคเดอร์สร้างสัญญาณป้อนกลับ และการใช้วิธีการตรวจจับรูปคลื่นของกระแสโดยในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้วิธีการสร้างสัญญาณป้อนกลับโดยออฟติคอลเอนโคเดอร์เพื่อตรวจสอบตำแหน่งที่เคลื่อนที่ไปจริง ซึ่งจุดประสงค์หลักของการควบคุมแบบวงจรปิดคือทำให้สเตปป์มอเตอร์สามารถตอบสนองความถี่ได้สูงขึ้น โดยใช้วิธีการลีดเองเกิดเพื่อกำหนดมุมสวิดจิงให้เหมาะสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแรงบิดเพื่อให้สเตปป์มอเตอร์สามารถตอบสนองความถี่ที่สูงขึ้น โดยวัตถุประสงค์หลัก คือ การปรับปรุงให้สเตปป์มอเตอร์สามารถตอบสนองความถี่ได้สูงขึ้นและสามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง ซึ่งที่ผ่านมาการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิดด้วยวิธีลีดเองเกิดนั้นจะเน้นให้สเตปป์มอเตอร์สามารถตอบสนองความถี่ได้สูงขึ้นเพียงอย่างเดียว

6.1 วิจารณ์ผลการทดลอง

โดยทั่วไปการควบคุมสเตปป์มอเตอร์จะเป็นแบบวงเปิด โดยการป้อนสัญญาณพัลส์เข้าที่อินพุทของวงจรถับทีละพัลส์ เพื่อกระตุ้นขดลวดของสเตปป์มอเตอร์เพื่อให้สเตปป์มอเตอร์เคลื่อนที่ไปแต่ละสเตป แต่การควบคุมแบบวงเปิดนี้ ไม่สามารถควบคุมระยะมุมของสัญญาณพัลส์ที่ป้อนวงจรถับได้หรือไม่สามารถควบคุมมุมการสวิดจิงหรือลีดเองเกิดได้ แม้ว่าจะควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ก็ตาม เนื่องจากไม่มีระบบป้อนกลับ เพื่อบอกผลการตอบสนองการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ที่เคลื่อนที่ไปแต่ละสเตป ดังนั้น จึงได้มีการสร้างชุดควบคุมการทำงานของสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิดขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว ซึ่งการควบคุมแบบวงจรปิดทำได้โดยการสร้างสัญญาณป้อนกลับไปยังส่วนควบคุมซึ่งมีสองวิธี คือ การใช้เอนโคเดอร์สร้างสัญญาณป้อนกลับและการใช้วิธีการตรวจจับรูปคลื่นของกระแส โดยในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้วิธีการสร้างสัญญาณป้อนกลับโดยออฟติคอลเอนโคเดอร์เพื่อตรวจสอบตำแหน่งที่เคลื่อนที่ไปจริง ซึ่งจุดประสงค์หลักของการควบคุมแบบวงจรปิด คือ ทำให้สเตปป์มอเตอร์สามารถตอบสนองความถี่

ได้สูงขึ้น โดยใช้วิธีการตัดเองเกิดเพื่อควบคุมสวิตชิงเองเกิดให้เหมาะสม การกำหนดสวิตชิงเองเกิดนี้จะพิจารณาจากคุณลักษณะของสแต็คทอร์คเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแรงบิดให้สแต็คปิงมอเตอร์สามารถตอบสนองความถี่ที่สูงขึ้นเพียงอย่างเดียว

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาต่อไปในอนาคต

ลักษณะการควบคุมการทำงานของสแต็คปิงมอเตอร์ในงานวิจัยนี้ จะอยู่ในลักษณะควบคุมแบบวงปิด เพื่อให้สแต็คปิงมอเตอร์สามารถตอบสนองความถี่ได้สูงขึ้น โดยการเพิ่มประสิทธิภาพของแรงบิด ดังนั้น ขณะโรเตอร์เคลื่อนที่แต่ละสแต็คจะเกิดโอเวอร์ชูตขึ้นมาก ถ้าสามารถพัฒนาต่อไปในอนาคตควรแก้ปัญหาโอเวอร์ชูตที่เกิดขึ้นได้ จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมตำแหน่งได้ดียิ่งขึ้น เพื่อประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางขึ้นกว่านี้ นอกจากนี้ หากสามารถออกแบบวงจรควบคุมให้มีประสิทธิภาพที่สูงและใช้ต้นทุนที่ต่ำแล้ว จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานทั้งในเชิงอุตสาหกรรมและพาณิชย์ต่อไปในอนาคตได้

บรรณานุกรม

- [1] Benjamin C. Kuo, "Theory and Application of Step Motor", West Publishing Co., 1974
- [2] Benjamin C. Kuo, "Step Motors and Control systems", SRL Publishing Company, 1979
- [3] P.P. Acarnley, "Stepping Motor: a guide to modern theory and practice", IEE Control Engineering Series 19, Peter Peregrinus Ltd. On behalf of Institution of Electrical Engineers, 1982
- [4] Takashi Kenjo, "Stepping Motor and their microprocessor control", caren press, Oxford, 1986
- [5] อานนท์ ศรีสว่าง, โยชิน เปรมปราชญ์ "การควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบวงปิดด้วยวิธีคิดแองเกิล" วิศวกรรมสารลาดกระบัง, ปีที่ 15 ฉบับที่ 2 ธันวาคม, 2541

ภาคผนวก

บทความวิชาการที่ได้ตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมลาดกระบัง
เรื่อง การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิดด้วยวิธีคางเคล

การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิดด้วยวิธีลีดเองเกิด

Closed-Loop Control of Stepping Motor With Lead Angle Method.

อาเนห์ ศรีสว่าง

โยธิน เปรมปราณีร์ช

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

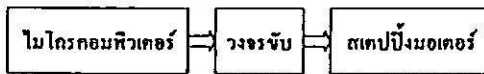
บทความวิจัยนี้ ขอนำเสนอวิธีการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิดด้วยวิธีลีดเองเกิด เพื่อให้ผลการตอบสนองการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ดีขึ้น เมื่อเทียบกับการควบคุมแบบวงเปิดทั่วไป โดยใช้ฮอปติกอลเอนโค้ดเคอร์ต่อกับสเตปป์มอเตอร์ เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์บอกตำแหน่งการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ส่งไปยังไมโครคอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นไมโครคอมพิวเตอร์จะประมวลผลสัญญาณพัลส์ เพื่อสร้างพัลส์กระตุ้นสเตปป์มอเตอร์ที่ควบคุมแบบวงปิดให้มีลีดเองเกิดที่เหมาะสม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิดด้วยวิธีลีดเองเกิด มีความเร็วที่สูงขึ้น และเข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมายด้วยเวลาที่สั้นกว่าการควบคุมแบบวงเปิด นอกจากนี้ โปรไฟล์ความเร็วยังแสดงให้เห็นว่าโรตัทิมมีค่าน้อยลงด้วยเหมือนกัน และระบบควบคุมนี้สามารถตรวจสอบความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้

Abstract

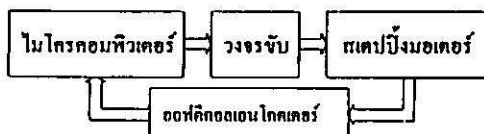
This research paper presents the closed-loop control of stepping motor with lead angle method for increasing the operating respond when comparing with the general open-loop control. The optical encoder is coupled with the stepping motor for generating the pulses signal which give the information of the rotor position to the microcomputer, after the pulses signal is processed by the microcomputer, it will provide the driving pulse which have the suitable lead angle for the closed-loop control of the stepping motor. The experimental results shown that the closed-loop control of the stepping motor with lead angle has a higher steady state velocity and reach the final position with shorter time than the open-loop control, besides the velocity profile shown the smaller rise time as well and the step error can be checked by this control system.

1. บทนำ

การควบคุมสเตปป์มอเตอร์ โดยทั่วไปนิยมการควบคุมแบบวงเปิด[1] ในรูปที่ 1.(ก) แสดงลักษณะการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิด ซึ่งควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ โดยไมโครคอมพิวเตอร์จะทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์ เพื่อป้อนให้กับอินพุทของวงจรรับ เพื่อกระตุ้นขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ ให้เคลื่อนที่ไปยังในตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการ ซึ่งง่ายต่อการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่และอัตราความเร็ว ทำให้สะดวกต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานทั่วไป[2] แต่การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิด ผลการตอบสนองการทำงานของสเตปป์มอเตอร์จะถูกจำกัด เนื่องจากไม่มีการป้อนกลับ จึงไม่สามารถรู้ได้ว่าสเตปป์มอเตอร์สามารถทำงานตามพัลส์ที่กระตุ้นทุกพัลส์หรือไม่ หรือเกิดออสซิลเลต (oscillate) ขึ้นหรือไม่ เมื่อความถี่ของคำสั่งพัลส์อินพุทสูงเกินที่สเตปป์มอเตอร์ จะสามารถตอบสนองการทำงานได้ [3]



(ก) การควบคุมแบบวงเปิด



(ข) การควบคุมแบบวงปิด

รูปที่ 1. แสดงการควบคุมสเตปป์มอเตอร์ด้วยไมโครคอมพิวเตอร์

ดังนั้น ในบทความนี้จะนำเสนอวิธีการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิดด้วยวิธี ลิตแองเกิล (lead-angle) เพื่อให้ผลการตอบสนองการทำงานของสเตปป์มอเตอร์ดีขึ้น เมื่อเทียบกับการควบคุมแบบวงเปิด ในรูปที่ 1.(ข) แสดงลักษณะการควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิด โดยนำเอาออปติคัลเอนโคเดอร์ (optical-encoder) ต่อเข้ากับสเตปป์มอเตอร์

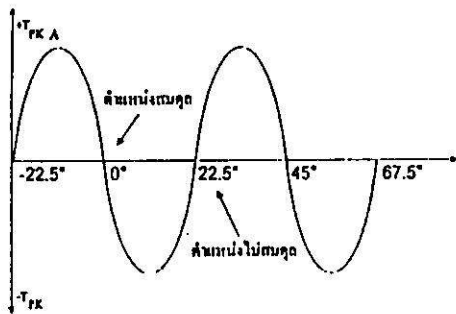
เพื่อให้ออปติคัลเอนโคเดอร์ผลิตสัญญาณพัลส์เพื่อบอกตำแหน่งการเคลื่อนที่ของโรเตอร์ (rotor) เพื่อป้อนกลับไปให้ไมโคร-คอมพิวเตอร์ หลังจากนั้นไมโครคอมพิวเตอร์จะประมวลผลสัญญาณพัลส์ เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์กระตุ้นขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ ให้มีลิตแองเกิลที่เหมาะสม จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบวงปิดด้วยวิธีลิตแองเกิล มีผลทำให้ความเร็วคงที่สูงกว่าการควบคุมแบบวงเปิด นอกจากนั้นโปรไฟล์ (profile) ความเร็วยังแสดงให้เห็นว่าไรส์ไทม์ (rise time) มีค่าน้อยลงด้วยเหมือนกัน และระบบสามารถตรวจสอบความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้.

2. คุณลักษณะแรงบิด

การควบคุมสเตปป์มอเตอร์ ให้มีประสิทธิภาพที่ดีนั้น จำเป็นต้องศึกษาคุณลักษณะแรงบิดที่มีความสัมพันธ์ต่อตำแหน่งการเคลื่อนที่ของโรเตอร์, การตอบสนองต่อความถี่ เป็นต้น ซึ่งคุณลักษณะเหล่านี้ศึกษาได้จากกราฟแสดงคุณลักษณะของสเตปป์มอเตอร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 แรงบิดโฮลดิ้ง

แรงบิดโฮลดิ้ง (holding torque) เป็นค่าแรงบิดสูงสุดของสเตปป์มอเตอร์ขณะ โรเตอร์หยุดนิ่ง เมื่อสเตปป์มอเตอร์มีโหลดเชื่อมต่อเข้ากับโรเตอร์ สเตปป์มอเตอร์จะสร้างแรงบิดโฮลดิ้ง เพื่อรักษาความสมดุลระหว่างแรงบิดโฮลดิ้งกับแรงบิดโหลดให้มีค่าแรงบิดเท่ากัน ซึ่งเรียกว่า ตำแหน่งสมดุลแรงบิด (equilibrium torque position) หรือตำแหน่งสมดุล ดังนั้น เมื่อโรเตอร์อยู่ที่ตำแหน่งสมดุลแรงบิดจึงมีค่าแรงบิดเป็นศูนย์ ถ้าโรเตอร์เคลื่อนที่ข้ามตำแหน่งสมดุลแรงบิดไป จะส่งผลให้คำสั่งพัลส์กระตุ้นขดลวดกับการสเตปป์ของโรเตอร์ ไม่ซิงโครไนซ์ (synchronism) กัน ดังนั้น สเตปป์มอเตอร์ ควรมีค่าแรงบิดโฮลดิ้งสูงกว่าแรงบิดโหลดเสมอ



รูปที่ 2. แสดงผลของแรงบิด โหลดคิ่งในเฟส A ของสเต็ปป์มอเตอร์ขนาด 4 เฟส

ในรูปที่ 2. แสดงถึงคุณลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดตติงกับตำแหน่งของโรเตอร์ (θ) ซึ่งมีลักษณะการสร้างแรงบิดคล้ายรูปไซน์ ดังนั้นจากคุณสมบัติของรูปคลื่นไซน์ สามารถประมาณค่าแรงบิดด้วยฟังก์ชันไซน์ได้ ดังนี้

$$T_A = - T_{pk} \sin(P\theta) \tag{2.1}$$

เมื่อ

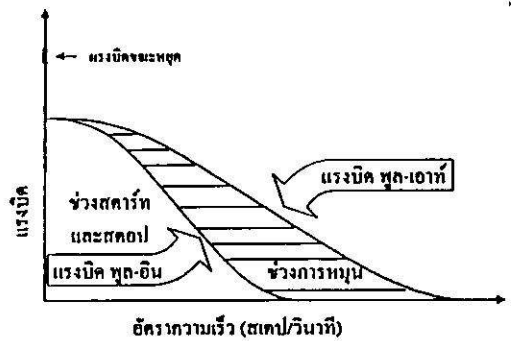
- T_A คือ ค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในเฟส A
- T_{pk} คือ ค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟส
- P คือ จำนวนเฟสของสเต็ปป์มอเตอร์
- θ คือ ระยะตำแหน่งการเคลื่อนที่ของโรเตอร์

และเฟสอื่น ๆ ก็ในทำนองเดียวกัน[1]

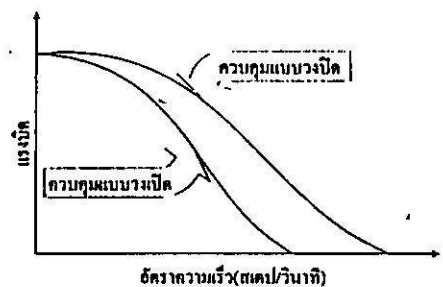
2.2 แรงบิดพูล-เอาท์ (pull-out torque)

เป็นการพิจารณาความสามารถการสร้างแรงบิดในช่วงความเร็วต่างๆ จนถึงความเร็วสูงสุดที่สเต็ปป์มอเตอร์สามารถตอบสนองได้ โดยแสดงด้วยกราฟคุณสมบัติการตอบสนองแรงบิดต่อความเร็วของสเต็ปป์มอเตอร์ กราฟแสดงคุณสมบัติการทำงานของสเต็ปป์มอเตอร์ที่กล่าวนี้ บริษัทผู้ผลิตสเต็ปป์มอเตอร์จะเป็นผู้กำหนดคุณสมบัติการทำงานของสเต็ปป์มอเตอร์ ซึ่งมีลักษณะดังในรูปที่ 3. โดยกำหนดให้สเต็ปป์มอเตอร์ทำงานเฉพาะภายใต้เส้นกราฟเท่านั้นและจะเห็นว่า เมื่อค่าแรงบิดลดลงการตอบสนองความเร็วก็จะสูงขึ้น ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับกระบวนการควบคุมสเต็ปป์มอเตอร์ด้วย ถ้าควบคุม

แบบวงเปิด สเต็ปป์มอเตอร์จะทำงานอยู่ภายใต้เส้นกราฟแรงบิดพูล-อิน เท่านั้น ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ของโรเตอร์แต่ละสเต็ปเกิดการผิดพลาด แต่การควบคุมแบบวงปิด สเต็ปป์มอเตอร์สามารถทำงานได้ใกล้เคียงกับค่ากราฟช่วงแรงบิดพูลเอาท์ ดังนั้นผลการตอบสนองการทำงานระหว่าง การควบคุมแบบวงเปิดกับแบบวงปิด จึงมีลักษณะดังรูปที่ 4 [4]



รูปที่ 3. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดพูล-อิน กับแรงบิดพูล-เอาท์ ของสเต็ปป์มอเตอร์



รูปที่ 4. แสดงเส้นกราฟแรงบิดต่ออัตราความเร็ว

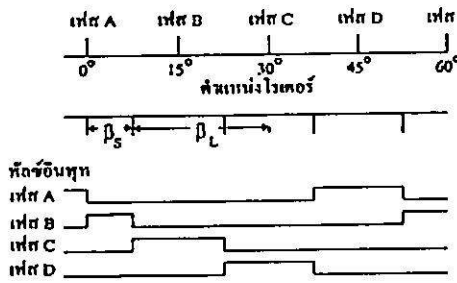
2.3 แรงบิดพูล-อิน (pull-in torque)

สเต็ปป์มอเตอร์ สามารถสตาร์ท (start) และสตอป (stop) ได้โดยปราศจากการสูญเสียของคำสั่งพัลส์อินพุตได้ในช่วงแรงบิดพูล-อิน เท่านั้น โดยความถี่สูงสุดของคำสั่งพัลส์จะกำหนดด้วยค่าแรงบิดพูล-อิน หรือค่าแรงเสียดทานของแรงบิดโหลด (friction load torque) ในรูปที่ 3. ช่วงของอัตราการสเต็ประหว่างแรงบิดพูล-อิน

กับแรงบิดทูล-เออร์ เรียกว่า ช่วงการหมุน (slew rang) ในการทำงานช่วงการหมุน สเตปปีงมอเตอร์จะไม่สามารถหยุดหมุนได้ทันที เนื่องจากสเตปปีงมอเตอร์มีความถี่ในการสลับที่สูงกว่าความถี่ช่วงแรงบิดทูล-อิน จึงจำเป็นต้องลดความถี่ลงเข้าสู่ช่วงแรงบิดทูล-อิน ก่อนแล้วจึงจะสามารถหยุดหรือเปลี่ยนทิศทางการหมุนได้[5]

3. ความสัมพันธ์ของสวิทซ์แองเกิลกับดิคเองเกิล

การควบคุมสเตปปีงมอเตอร์แบบวงปิด จำเป็นต้องเข้าใจหลักการของดิคเองเกิล ซึ่งขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงมุมในการสวิทซ์หรือเรียกว่า สวิทซ์แองเกิล (switching angle)[5]



รูปที่ 5. แสดงการกำหนดสวิทซ์แองเกิลและดิคเองเกิล

สวิทซ์แองเกิล จะมีความเกี่ยวข้องกับตำแหน่ง สมดุลแรงบิดของเฟสที่ถูกกระตุ้น สำหรับดิคเองเกิลจะมีความสัมพันธ์กับสวิทซ์แองเกิล ในรูปที่ 5. แสดงขบวนการป้อนพัลส์อินพุท หรือสัญญาณพัลส์กระตุ้นขดลวดของสเตปปีงมอเตอร์แต่ละเฟส ซึ่งค่าตั้งพัลส์อินพุทเหล่านี้ไม่ได้เกิดจากเอนโค๊ดเคอร์ แต่เกิดจากแหล่งผลิตสัญญาณจากภายนอกและควบคุมการทำงานด้วย ไมโคร-คอมพิวเตอร์ โดยการประมวลผลของสัญญาณป้อนกลับจากเอนโค๊ดเคอร์ เพื่อควบคุมมุมในการสวิทซ์ให้มีช่วงเวลาของการออน (on) และออฟ (off) ในแต่ละเฟส โดยสวิทซ์แองเกิลจะมีมุมเริ่มต้นที่จุดสมดุลแรงบิด โดยกำหนดให้สวิทซ์แองเกิลมีมุมเป็น β_s ถ้าให้สเตปปีงมอเตอร์มีสถานะเริ่มที่สมดุลแรงบิดเฟส A (เฟส A ออน) เมื่อสเตปปีงมอเตอร์สวิทซ์จากเฟส A

ไปเฟส B โรเตอร์ของสเตปปีงมอเตอร์จะเริ่มเคลื่อนที่เป็นมุม β_s พร้อมกับผลิตสัญญาณพัลส์ป้อนกลับมาควบคุมการออฟเฟส B และออน เฟส C ก่อนโรเตอร์จะเคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งสมดุลแรงบิดของเฟส C ซึ่งเรียกว่า ระยะเวลาแองเกิล โดยกำหนดให้ดิคเองเกิลแทนด้วย β_L ดังนั้นจากความสัมพันธ์กับสวิทซ์แองเกิลกับดิคเองเกิล ในรูปที่ 5 จะได้ว่า[5]

$$\beta_L = 2r - \beta_s$$

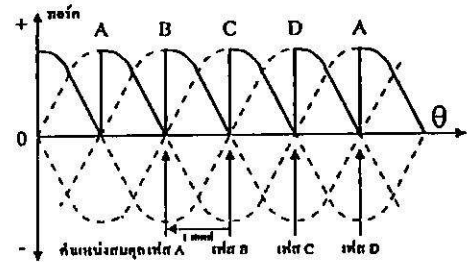
เมื่อ

r คือ ระยะเวลาต่อสเตป

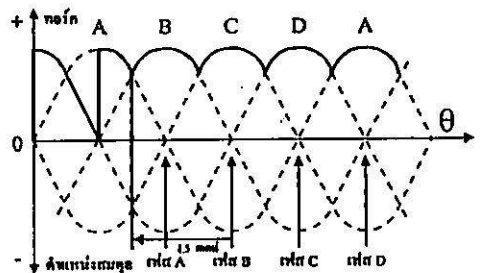
β_L คือ ระยะเวลาแองเกิล

β_s คือ ระยะเวลาสวิทซ์แองเกิล

4. ผลของแรงบิดตัดต่อกิตต่อดิคเองเกิล



(ก) ดิคเองเกิล 1 สเตป



(ข) ดิคเองเกิล $1 \frac{1}{2}$ สเตป

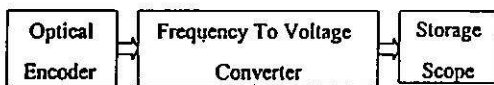
รูปที่ 6. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดิคเองเกิลกับระยะโรเตอร์

สเตปปีงมอเตอร์ที่ควบคุมแบบวงปิด สามารถเปลี่ยนค่าของแรงบิดตัดตกได้ โดยเปลี่ยนค่าดิคเองเกิล

ของสัญญาณพัลส์อินพุตที่จะกระตุ้นขดลวดของสเตปป์มอเตอร์ตามคุณลักษณะของค่าแรงบิดสแตติก ผลของแรงบิดสแตติกของสเตปป์มอเตอร์ขนาด 4 เฟส เมื่อตำแหน่งสมมูลแรงบิดเริ่มต้นที่เฟส D และค่าลิกแองเกิล 1 สเตป ผลของแรงบิดจะได้เหมือนกับการควบคุมแบบวงเปิดทั่วไป แสดงโดยเส้นทึบในรูปที่ 6.(ก) ถ้าลิกแองเกิลมีมุม 1.5 สเตป ผลของแรงบิดจะมีค่าใกล้เคียงกับช่วงแรงบิดพูลเออร์หรือค่าแรงบิดสูงสุด แสดงให้เห็นดังในรูป 6.(ข) คิวซ์เส้นทึบ[4]

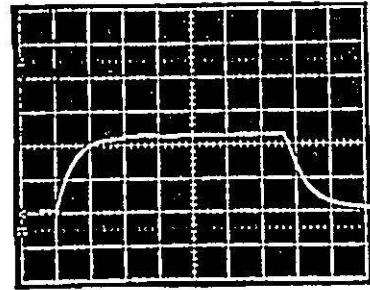
5. ผลการทดลอง

ในการทดลองใช้สเตปป์มอเตอร์ขนาด 4 เฟส, ชนิดไฮบริด (hybrid), รุนเกลื่อนที่ 1.8 องศาต่อสเตป, และจำนวน 200 สเตปต่อรอบ การควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบวงปิด ให้ระยะลิกแองเกิลมีความเหมาะสมเพื่อให้ได้ความเร็วในการสเตปป์สูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 1.(ข)



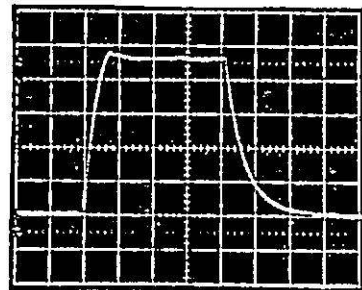
รูปที่ 7 แสดงการวัด โปรไฟล์การเคลื่อนที่ของโรเตอร์

ในรูปที่ 7 แสดงการวัดผลการตอบสนองการทำงานของสเตปป์มอเตอร์แบบวงเปิด และแบบวงปิด โดยกำหนดให้ตำแหน่งเคลื่อนที่ จากตำแหน่งเริ่มต้นจนถึงตำแหน่งเป้าหมาย เป็นจำนวน 800 สเตป และมีโพลคงที่ โดยได้ผลการทดลอง ดังนี้



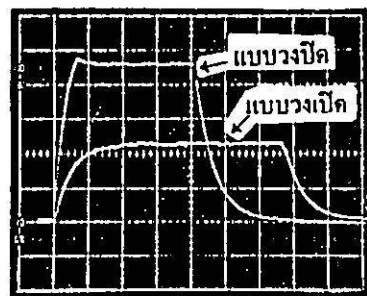
เวลา = 0.66 ms. (TIME/DIV = 0.1 ms.)

รูปที่ 8 แสดง โปรไฟล์ความเร็ว ของสเตปป์มอเตอร์ เมื่อควบคุมแบบวงเปิด



เวลา = 0.42 ms. (TIME/DIV = 0.1 ms.)

รูปที่ 9 แสดง โปรไฟล์ความเร็วของสเตปป์มอเตอร์ เมื่อควบคุมแบบวงปิด, ลิกแองเกิล 1.5 สเตป



TIME/DIV = 0.1 ms.

รูปที่ 10 เปรียบเทียบโปรไฟล์ความเร็วระหว่าง การควบคุมแบบวงเปิดกับแบบวงปิด

6. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า การควบคุมสเตปป์ิงมอเตอร์แบบวงปิดด้วยวิธีคิดเองเกิด เมื่อโหลดมีค่าคงที่ และกำหนดให้ติดเองเกิดเท่ากับ 1.5 สเตป สเตปป์ิงมอเตอร์ สามารถตอบสนองการทำงานได้ดีขึ้นกว่าการควบคุมแบบวงเปิด จากผลการทดลองในตารางที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเร็วคงที่, ความถี่ของคำสั่งพัลส์, เวลาต่อระยะการสเตป, และสเตปป์ิงต่อวินาที ดีกว่าการควบคุมแบบวงเปิดถึง 36 % นอกจากนี้ไรส์ไทม์ (rise-time) และเวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว (settling time) ก็ใช้เวลาน้อยกว่าถึง 35 % และระบบสามารถตรวจสอบความผิดพลาดของคำสั่งพัลส์กับการสเตปได้.

ตารางที่ 1 แสดงผลการตอบสนองของสเตปป์ิงมอเตอร์เมื่อควบคุมแบบวงเปิดและแบบวงปิด

| ผลการตอบสนองของสเตปป์ิงมอเตอร์ | ลักษณะการควบคุม | |
|--|-----------------|------------------------------|
| | แบบวงเปิด | แบบวงปิด |
| ความเร็วคงที่สูงสุด | 453 rpm. | 712 rpm. (เร็วขึ้น 36 %) |
| ความถี่ของคำสั่งพัลส์ | 1515 Hz. | 2380 Hz. (เพิ่มขึ้น 36 %) |
| สเตปป์ิงต่อวินาที (step per sec.) | 0.000825 ms. | 0.000525 ms. (ลดลง 36 %) |
| ช่วงไรส์ไทม์ (Rise time) | 0.12 ms. | 0.042 ms. (ลดลง 35 %) |
| เวลาเข้าสู่สภาวะคงตัว (Settling time) | 0.2 ms. | 0.07 ms. (ลดลง 35 %) |

เอกสารอ้างอิง

- [1] P.P.Acamley, "Stepping Motor: A Guide To Modern Theory and Practice," 2nd edition. Stevenage, UK:Peregrinus, 1984.
- [2] P.John Clarkson and Paul P.Acamley, "Closed-Loop Control of Stepping Motors," IEEE Trans. Ind. Appl., vol.24, no.4, pp. 685-691, 1988.

- [3] Benjamin. C. Kuo, "Theory and Application of Step Motor," West Publishing Co., 1974.
- [4] Benjamin. C. Kuo, "Step Motor and Control System," SRL Publishing Co., 1979.
- [5] Takaski Kenjo, "Stepping Motor and Their microprocessor control," Clarendon press, Oxford, 1986.

ประวัติผู้เขียน

นายอานนท์ ศรีสว่าง เกิดเมื่อวันที่ 11 ธันวาคม 2513 ที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา สำเร็จการศึกษาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล ปีการศึกษา 2535

ปี พ.ศ. 2536 เข้าทำงานอยู่ในตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล