



ปีการศึกษา 2530

Pattern Tracking System



โดย

นาย สุนัย วิจิตรภัทร

นาย ชัยเลิศ ฉัตรนิรมงคล

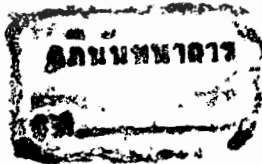
นาย สกล กิ่งสุวรรณ

นาย อานันท์ ตันติจรัสชิน

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. โกศล เพ็ชรสุวรรณ

รศ.ดร. โยธิน เปรมปราณีรัชต์



ปริญญาโทปีการศึกษา 253๐

ภาควิชา วิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบติดตามลายเส้นของเครื่องตัดเหล็กอัตโนมัติ

ผู้จัดทำ

1. นาย สุนัย วิจิตรภัทร 27.1226
2. นาย ชัยเลิศ นัตรนำรุ่งมงคล 27.1047
3. นาย สกล กังสุวรรณ 27.1206
4. นาย อานันท์ ตันเดจรัสชีพ 27.1289

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. ไกศล เนื้ชรสุวรรณ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. โยธิน เปรมปราณีรัตน์)



ระบบติดตามลายเส้นของเครื่องตัดเหล็กอัตโนมัติ

1. นาย สุนัย วิจิตรภัทร
2. นาย ชัยเลิศ จัทรพันธุ์มงคล
3. นาย สกล กิ่งสุวรรณ
4. นาย อานันท์ ตันติจรัสสิน

รศ.ดร. โภทศ เน็ชรสุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. โยธิน เปรมปราชญ์วิชต์ อาจารย์ที่ปรึกษา

บทคัดย่อ

ผลงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบหัวอ่านตามลายเส้น ของเครื่องตัดแผ่นเหล็กอัตโนมัติ เพื่อให้สามารถติดตามลายเส้นที่มีลักษณะต่าง ๆ ตามแนวแกน X และ แกน Y ได้ทั้ง 4 ควอดแรนท์ (Quadrant) ในโครงการนี้ได้ทำการออกแบบและทดสอบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ (Step Motor) และดีซีมอเตอร์ (D.C. Motor) แบบต่าง ๆ รวมทั้งตัวควบคุมของระบบเพื่อให้ได้ วงจรและตัวควบคุมที่เหมาะสม ที่ทำให้หัวอ่านสามารถติดตามลายเส้นได้ ด้วยความแม่นยำและเที่ยงตรง

PATTERN TRACKING SYSTEM

1. SUNAI VICHITBHAT
2. CHAILERT CHATPANMONGKOL
3. SAKOL KUNGSUWAN
4. ANAN TANTIJARUSCHEEP

ASSOC. PROF. DR. KOSOL PETCHSUWAN

ASSOC. PROF. DR. YOTHIN PREMPRANEERAT

ABSTRACT

This research is aimed at developing the Pattern Tracking System of Automatic Steel Cutting Machine to the level that it can track various patterns in form of x-y coordinate in all four quadrants. It contains the designing and testing of different types of driving circuits of stepping motors and DC motor, including system controller to acquire proper circuits and system controller that could enable the reader head to track the pattern with high accuracy.

สารบัญ

1. บทนำ	1
2. ทฤษฎีและการสร้าง	2
3. การคำนวณและการสร้างระบบหัวอ่านตามลายเส้น	28
4. การทดลองและผลการทดลอง	40
5. วิจัยรณัและสรุปลการทดลอง	52
หนังสืออ้างอิง	55
กิตติกรรมประกาศ	56



บทที่ 1

บทนำ

เครื่องตัดแผ่นเหล็กด้วยแก๊สแบบอัตโนมัติ เป็นอุปกรณ์เครื่องตัดเหล็กที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งต้องสั่งซื้อด้วยราคาที่แพงมาจากต่างประเทศ

ผลงานวิจัยนี้ เป็นการพัฒนาระบบหัวอ่านตามลายเส้น (PATTERN TRACKING SYSTEM) ซึ่งสามารถติดตามเส้นที่มีรูปลักษณะต่างๆตามแนวแกนราบและแกนตั้งฉากได้ถึง 4 คาอูดแรนท์ เพื่อใช้เป็นหัวอ่านลายเส้นของเครื่องตัดแผ่นเหล็กด้วยแก๊สแบบอัตโนมัติ

ระบบหัวอ่านตามลายเส้นนี้ประกอบด้วยฮอปติคอลเซนเซอร์สองชุด ดีซีมอเตอร์และรีโซลเวอร์ วงจรขับและควบคุมความเร็วของสปีดมอเตอร์ การติดตามลายเส้นใช้เทคนิคการแบ่งลายเส้นออกเป็นส่วนย่อยๆ ในรูปของเส้นตรงซึ่งอยู่บนพื้นฐานของรีโซลเวอร์คือ ลายเส้นตามแกนแนวนอน จะถูกสแกนด้วยความเร็วที่เป็นฟังก์ชันโคไซน์ของมุมเส้นสัมผัสที่ตำแหน่งต่างๆของลายเส้นเทียบกับแกนแนวนอน และ ตามแกนตั้งจะถูกสแกนด้วยความเร็วที่เป็นฟังก์ชันของไซน์ของมุมเดียวกัน

โครงการนี้ได้ทำการพัฒนาระบบควบคุมหัวอ่านให้มีการทำงานในแบบเชิงเส้น (LINEAR CONTROL SYSTEM) ซึ่งให้ผลในการติดตามลายเส้นได้ดีกว่าระบบที่เป็นแบบปิดเปิด (ON-OFF CONTROL SYSTEM) ทั้งยังได้พัฒนาส่วนวงจรถับและควบคุมความเร็วของสปีดมอเตอร์เพื่อเพิ่มความละเอียดและความถูกต้อง (ACCURACY) ในการติดตามลายเส้น

บทที่ 2

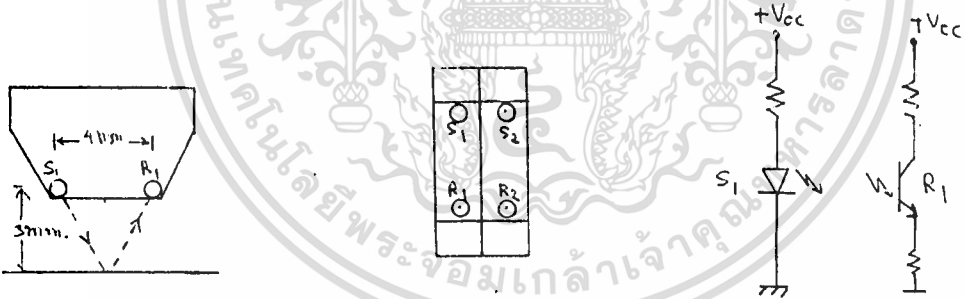
ทฤษฎีและการสร้าง

2.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของระบบหัวอ่านตามลายเส้น

โครงสร้างของระบบหัวอ่านตามลายเส้นแบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ ส่วนหัวอ่านและส่วนขับเคลื่อนหัวอ่าน ซึ่งทั้งสองส่วนจะมีการทำงานที่สัมพันธ์กันดังจะกล่าวต่อไป

2.1.1 โครงสร้างของส่วนหัวอ่าน

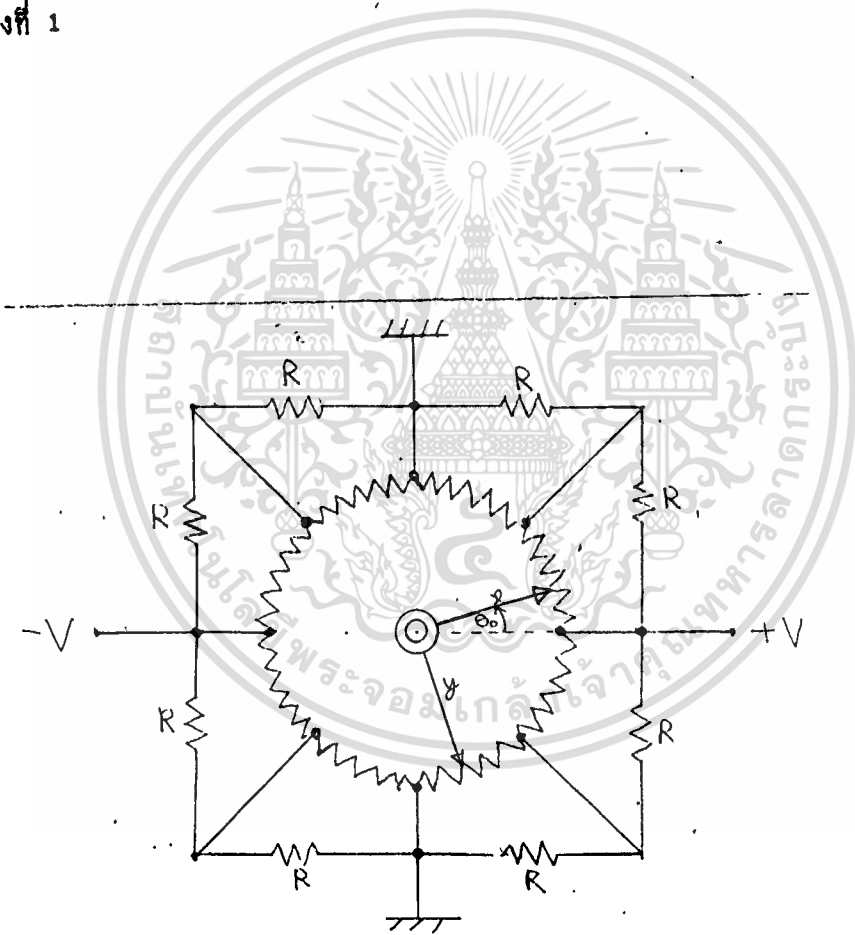
ส่วนหัวอ่านประกอบด้วยออปติคัลเซนเซอร์ (Optical Sensor) 2 ชุด ติดตั้งอยู่บนเพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (D.C. Motor) ออปติคัลเซนเซอร์แต่ละชุดจะประกอบด้วยตัวส่งสัญญาณแสงอินฟราเรด (Infrared Transmitter) และตัวรับสัญญาณ (Receiver) ซึ่งเป็นโฟโตทรานซิสเตอร์ (Photo Transistor) ชนิดหนึ่ง ตัวรับและตัวส่งจะทำมุมกัน 40 องศา โดยออปติคัลเซนเซอร์ทั้งสองชุดนี้จะประกบติดกันดังรูปที่ 2.1 และติดตั้งอยู่บนเพลลาของดีซีมอเตอร์



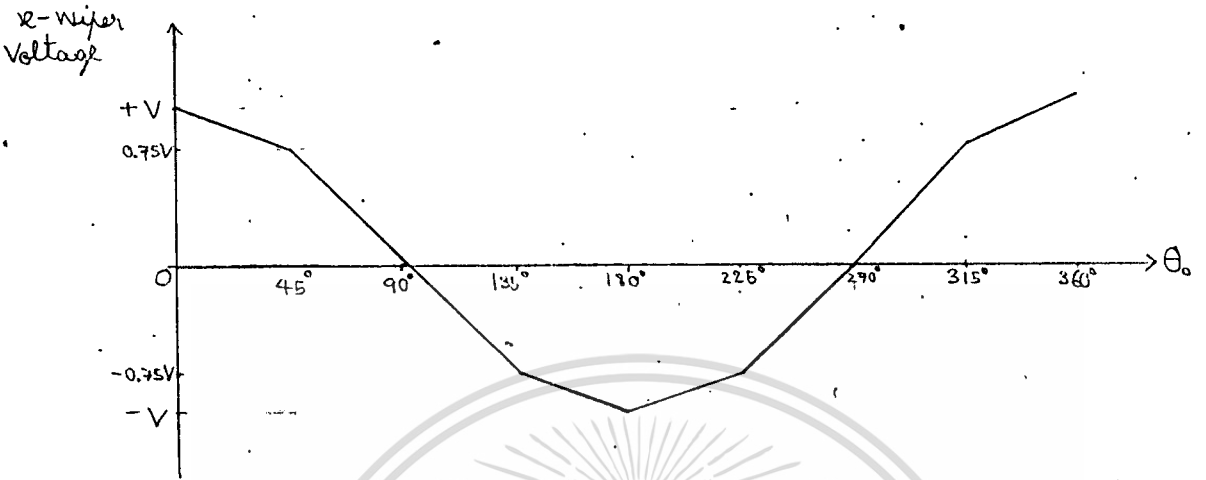
รูปที่ 2.1 ลักษณะการติดตั้งออปติคัลเซนเซอร์

เซนเซอร์ทั้งสองชุดนี้ จะทำหน้าที่เปรียบเทียบความเข้มของแสงระหว่างลายเส้นในช่วงเวลาที่หัวอ่านเคลื่อนที่ตามลายเส้น ถ้าหากออปติคัลเซนเซอร์ชุดใดมีความเข้มลดลงแสดงว่าเซนเซอร์ชุดนั้นเข้าใกล้ลายเส้นมากเกินไป สัญญาณผลต่างระหว่างเซนเซอร์ทั้งสองชุดนี้จะนำไปใช้ควบคุมดีซีมอเตอร์

ที่เพลลาของดิซิมอเตอร์ตัวเดียวกันนี้จะมีรีโซลเวอร์ (Resolver) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดมุม (Angle Detector) ติดตั้งอยู่ด้วยทำหน้าที่วัดแนวการวางตัวของเซนเซอร์ และส่งสัญญาณเป็นค่าโวลต์ที่คงไปยังส่วนรับเคลื่อนหัวอ่านไปตามแนวแกน X และ Y ต่อไป รีโซลเวอร์ที่ใช้เป็นแบบริงรีโซลเวอร์ (Ring Resolver) ซึ่งใช้หลักการการทำงานของโพเทนซีโอมิเตอร์ (Potentiometer) ดังรูปที่ 2.2 เราจะได้ค่าโวลต์คงของตัวสัมผัสของแกน X (X-Position Wiper) เป็นฟังก์ชันของ $V\cos\theta$ และค่าโวลต์คงของตัวสัมผัสแกน Y (Y-Position Wiper) เป็นฟังก์ชันของ $V\sin\theta$ ดังตารางที่ 1



รูปที่ 2.2



กราฟความสัมพันธ์ของค่าโวลต์เตจของตัวลัมผัสของแกน X กับมุม

θ_0	แกน x	แกน y
0°	$+V_{CC}$	0
90°	0	$+V_{CC}$
180°	$-V_{CC}$	0
360°	0	$-V_{CC}$

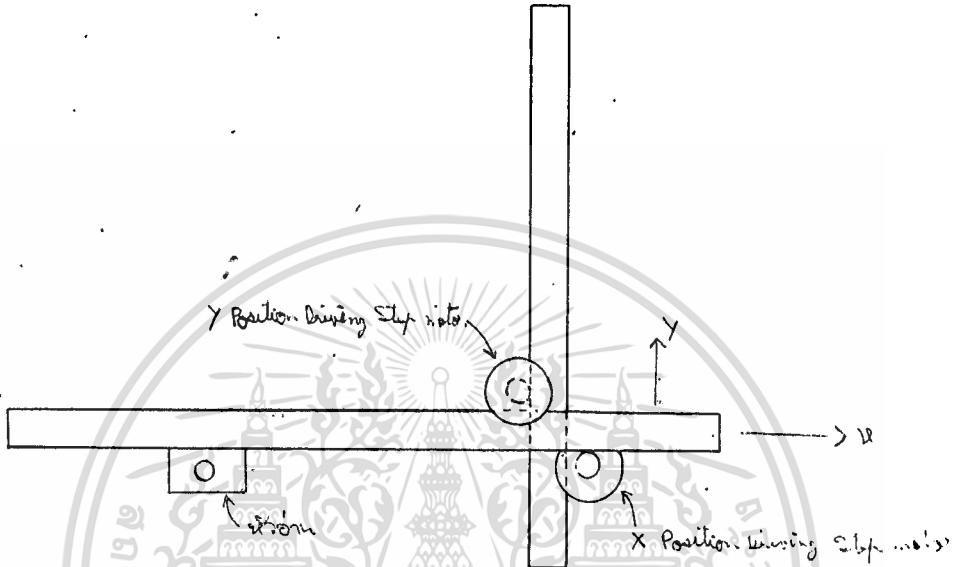
ตารางที่ 2.1

ซึ่งค่าโวลต์เตจที่ได้จากตัวลัมผัสของแกน X ก็จะถูกส่งไปใช้ควบคุมความเร็วของ สเตป มอเตอร์ (Stepping Motor) ที่จะขับเคลื่อนในแนวแกน X และค่าโวลต์เตจที่ได้

จากตัวลัมผัสแกน Y ก็จะถูกส่งไปควบคุมความเร็วของสเตปมอเตอร์ที่จะขับเคลื่อนให้
 เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของ บริษัท ออโตเมติกส์ จำกัด การนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่ในแนวแกน Y

2.1.2 ส่วนขับเคลื่อนหัวอ่าน



รูปที่ 2.3 ส่วนขับเคลื่อนหัวอ่าน

ระบบขับเคลื่อนหัวอ่านประกอบด้วย แขนขับเคลื่อน (Driving Arm) 2 แขนวางตั้งฉากกัน แขนขับเคลื่อนที่วางตัวในแนวแกน Y จะถูกยึดตายตัวติดกับฐาน ส่วน แขนขับเคลื่อนที่วางตัวในแนวแกน X จะสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งในแนวแกน X และแกน Y โดยมีเฟลาของสเตปป์มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน ตัวหัวอ่านก็จะติดตั้งอยู่บนแขนขับเคลื่อนที่วางตัวในแนวแกน X นี้ ความเร็วของสเตปป์มอเตอร์ในแนวแกน X จะเป็นฟังก์ชันของสัญญาณโวลท์เตจ $V \cos \theta$ ที่ได้มาจากตัวสัมผัสของแกน X ของรีโซลเวอร์ (คือแนวการวางตัวของหัวอ่านเทียบกับแกน X)

2.2 หลักการทำงานของระบบหัวอ่านลายเส้น

การทำงานของระบบเริ่มจากการที่หัวอ่านเริ่มติดตามแนวเส้น (Track) คือเซนเซอร์ทั้งสองชุด คร่อมอยู่ระหว่างแนวเส้นที่จะติดตาม แนวการวางตัวของเซนเซอร์จะถูกตรวจจับได้ด้วยรีโซลเวอร์ โดยที่สัญญาณจากรีโซลเวอร์นี้ จะไปกำหนดขนาดของความเร็วในแนวแกน X และแกน Y ของส่วนขับเคลื่อนหัวอ่าน (สเตปป์มอเตอร์)

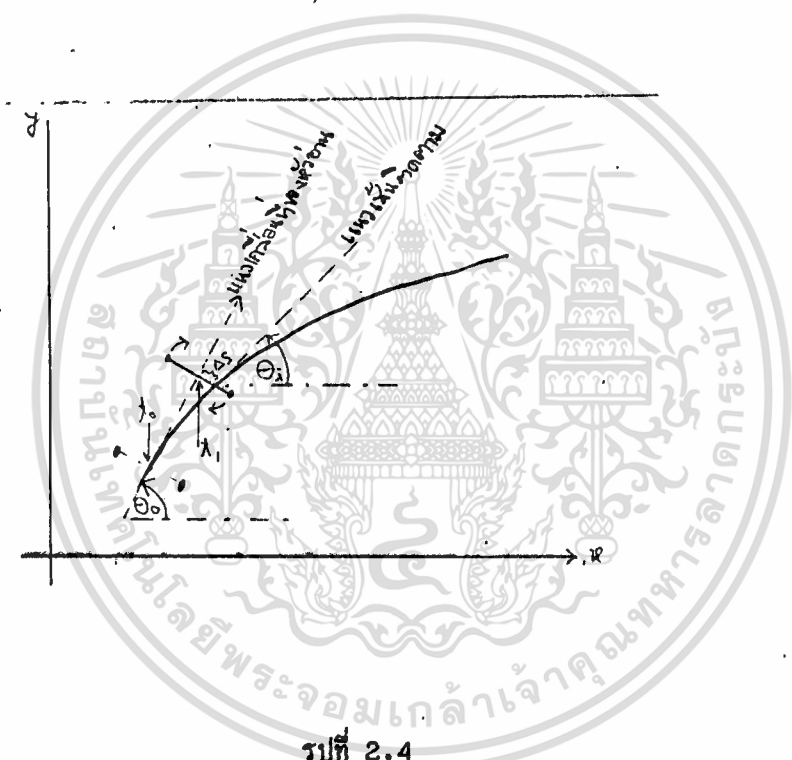
ในแต่ละช่วงเวลาของการสุ่มสัญญาณ (Sampling Time) Δt โดยไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วของสแตปป์มอเตอร์ $X = V \cos \theta_0$

ความเร็วของสแตปป์มอเตอร์ $Y = V \sin \theta_0$

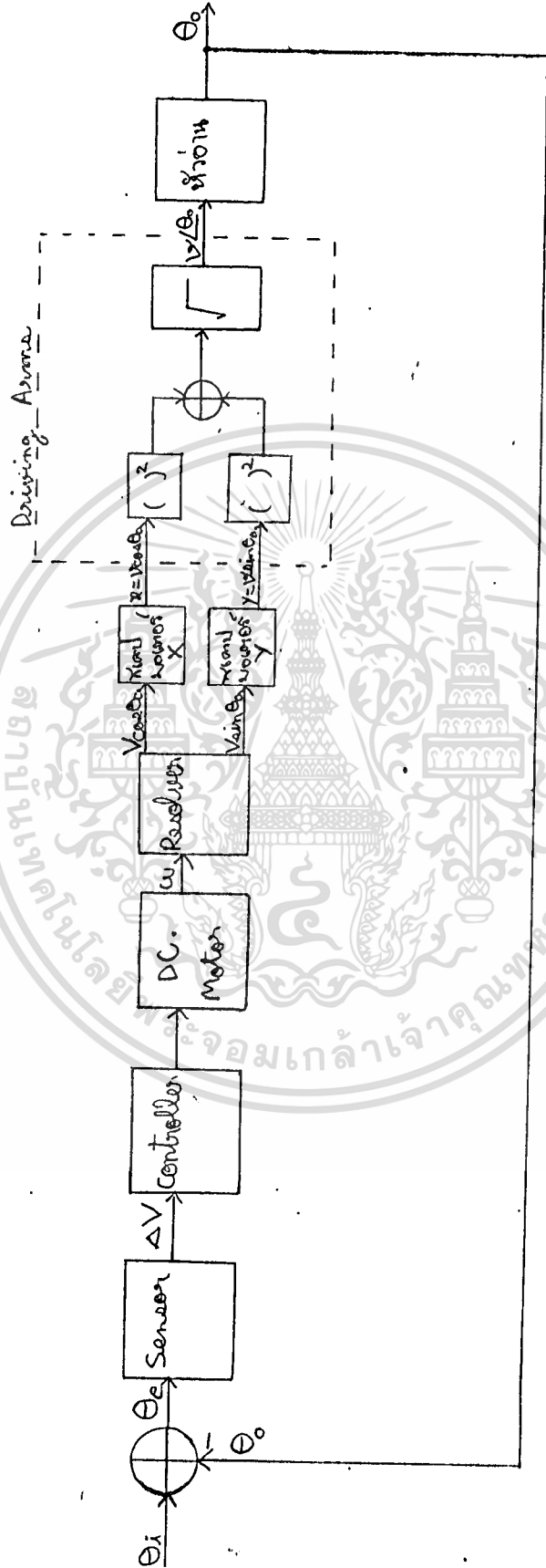
ซึ่งจะทำให้หัวอ่านเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็ว V

ในระหว่างการเคลื่อนที่ในช่วงเวลาการลู่สัญญาณนี้ หากแนวของเส้นที่ติดตามมีการเบี่ยงเบนไปจากแนวการวางตัวของเซนเซอร์ ก็เกิดค่าผลต่างมุม (Error Angle) Θ_e ของการติดตาม ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4

ซึ่งมุมเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นนี้ ทำให้ระยะห่างระหว่างแนวเส้นที่ติดตามกับเซนเซอร์ทั้งสองชุดไม่เท่ากัน มีค่าแตกต่างเท่ากับ Δs ซึ่งทำให้เกิดสัญญาณผลต่างโวลต์เตจระหว่างออปติคอลเซนเซอร์ทั้งสองชุด สัญญาณผลต่างโวลต์เตจนี้จะไปขับเคลื่อนมอเตอร์ของหัวอ่านเพื่อปรับแก้แนวการวางตัวของเซนเซอร์ Θ_e ให้เข้าสู่ค่า Θ_1 บล็อกไดอะแกรมของระบบหัวอ่านตามลายเส้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 บล็อกโตะแตรของระบบหัวอ่านตามสายเส้น

2.3 วิเคราะห์การทำงานของเซนเซอร์

จากบล็อกไดอาแกรมรูปที่ 2.5 ในส่วนของเซนเซอร์ เราสามารถวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่าง โวลต์เตจเอเรอร์ (Error Voltage) ΔV กับ มุมเอเรอร์ (Error Angle) θ_e ได้ โดยพิจารณาการเคลื่อนที่ของหัวอ่านในช่วงเวลาซามปลิง (Sampling Time) Δt ใด ๆ ของวงจรควบคุมสเตปมอเตอร์ ได้ดังรูปที่ 2.6 โดยจะเห็นได้ว่าในช่วงเวลาซามปลิง Δt ใด ๆ หัวอ่านจะเคลื่อนที่ไปได้เป็นระยะทาง $l = v\Delta t$ ซึ่งคงที่เสมอ เนื่องจากความเร็วล้อของหัวอ่านซึ่งมีขนาดคงที่อยู่เสมอ



รูปที่ 2.6

ดังที่ได้กล่าวมาในตอนต้น ว่าถ้าในการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน แนวการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน θ_1 (แนวการวางตัวของเซนเซอร์) มีการเบี่ยงเบนไปจากแนวเดิมของเส้นที่ติดตาม θ_e คือ เกิดมุมคลาดเคลื่อน $\theta_e = \theta_1 - \theta_0$ ซึ่ง θ_e นี้ จะส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่างระยะห่างของเซนเซอร์ทั้งสองตัวจากแนวเส้นติดตาม ΔS ในขณะที่หัวอ่านเคลื่อนที่ไป เราสามารถหาความสัมพันธ์ ของ ΔS กับ θ_e ได้ จากรูปที่ 2.6 โดยใช้การพิจารณาทางเรขาคณิตและตรีโกณมิติ



จากรูปที่ 2.6

- A คือตำแหน่งของเซนเซอร์ตัวที่ 1
- C คือตำแหน่งของเซนเซอร์ตัวที่ 2
- B คือตำแหน่งกึ่งกลางของเซนเซอร์ทั้งสอง
- a คือรัศมีของเซนเซอร์ (ในที่นี้เท่ากับ 2 มม.)
- 1 คือระยะที่หัวอ่านเคลื่อนที่ไปได้ในช่วง Δt
- θ_1 คือมุมในแนวเส้นสัมผัสของเส้นติดตาม
- θ_0 คือแนวการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน
- 11 คือระยะห่างจากเซนเซอร์ตัวที่ 1 ถึงแนวเส้นติดตาม
- 12 คือระยะห่างจากเซนเซอร์ตัวที่ 2 ถึงแนวเส้นติดตาม

หา โคออดิเนต (Coordinate) ของจุด A, B, C โดยเทียบกับแนวเส้นติดตามได้ดังนี้

$$B ; (l \cos \theta_e, l \sin \theta_e)$$

$$A ; (l \cos \theta_e - a \sin \theta_e, l \sin \theta_e + a \cos \theta_e)$$

$$C ; (l \cos \theta_e + a \sin \theta_e, l \sin \theta_e - a \cos \theta_e)$$

$$\begin{aligned} \text{หาขนาด 11 : } 11 &= l \sin \theta_e + a \cos \theta_e \\ &= \sqrt{l^2 \sin^2 \theta_e + a^2 \cos^2 \theta_e + 2la \cdot \sin \theta_e \cdot \cos \theta_e} \\ &= \sqrt{l^2 \sin^2 \theta_e + a^2 \cos^2 \theta_e + la \cdot \sin 2\theta_e} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{หาขนาด 12 : } 12 &= |l \sin \theta_e - a \cos \theta_e| \\ &= \sqrt{l^2 \sin^2 \theta_e + a^2 \cos^2 \theta_e - 2la \cdot \sin \theta_e \cdot \cos \theta_e} \\ &= \sqrt{l^2 \sin^2 \theta_e + a^2 \cos^2 \theta_e - la \cdot \sin 2\theta_e} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta S &= 11 - 12 \\ &= \sqrt{l^2 \sin^2 \theta_e + a^2 \cos^2 \theta_e + la \cdot \sin 2\theta_e} \\ &\quad - \sqrt{l^2 \sin^2 \theta_e + a^2 \cos^2 \theta_e - la \cdot \sin 2\theta_e} \end{aligned}$$

จะเห็นว่า $\theta_e > 0 ; \Delta S > 0$

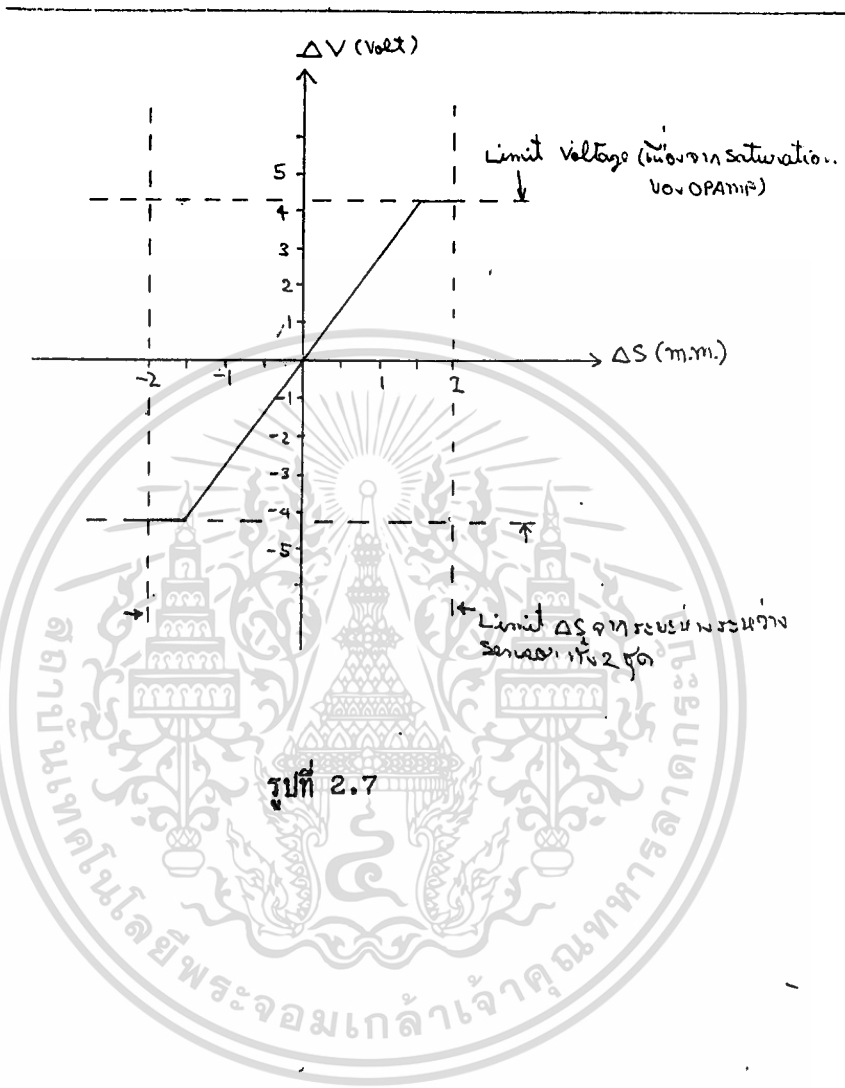
$\theta_e < 0 ; \Delta S < 0$

$\theta_e = 0 ; \Delta S = 0$

ΔS ที่เกิดขึ้นจะทำให้ความเข้มของสัญญาณหรือขนาดของโวลต์เตจที่ได้จากเซนเซอร์ทั้ง 2 จุด ไม่เท่ากัน ซึ่งเมื่อนำมาเข้าวงจรเปรียบเทียบ จะได้สัญญาณโวลต์เตจเอเรอร์ ไปรับตี

ซีมูเตอร์เพื่อปรับแก้ θ ให้เข้าสู่ θ_1

ความสัมพันธ์ระหว่าง ΔS กับ ΔV จากการทดลองเป็นดังกราฟรูปที่ 2.7



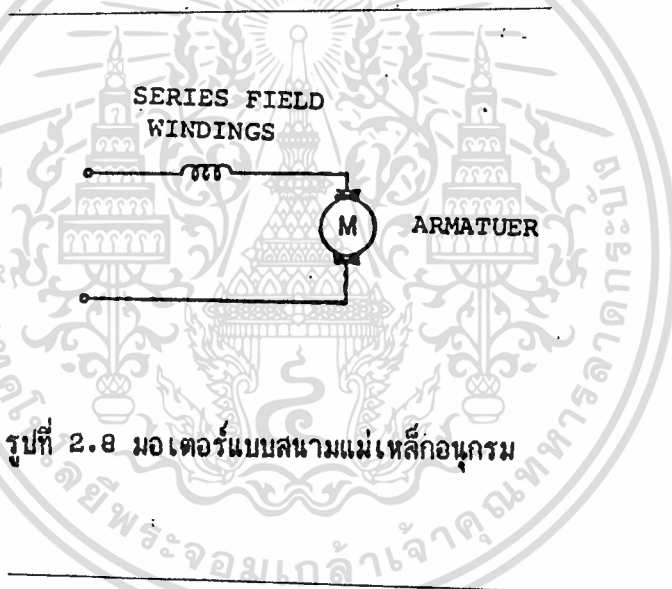
2.3 ทฤษฎีทั่วไปของดีซีมอเตอร์

การแยกประเภทของดีซีมอเตอร์ สามารถแบ่งออกได้ตามลักษณะการสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ได้เป็น

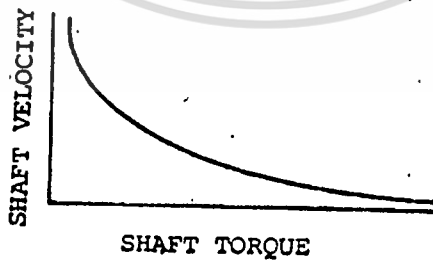
1. แบบปรับเส้นแรงแม่เหล็กได้
2. แบบเส้นแรงแม่เหล็กคงที่

2.3.1 ดีซีมอเตอร์แบบปรับเส้นแรงแม่เหล็กได้แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ

ก. แบบขดลวดสนามแม่เหล็กต่ออนุกรมกับขดลวดอาร์มาเจอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ข้างล่าง เส้นแรงแม่เหล็กเป็นสัดส่วนกับกระแส จึงปรับค่าได้ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงบิดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 มอเตอร์แบบสนามแม่เหล็กอนุกรม



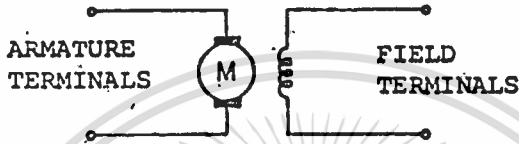
รูปที่ 2.9

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับกระแสของดีซีมอเตอร์แบบอนุกรม

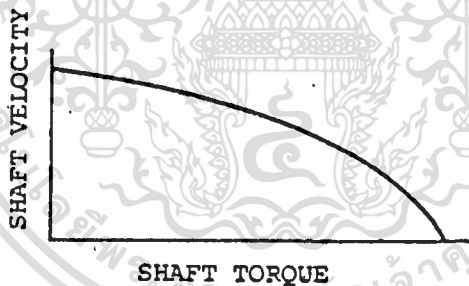
มอเตอร์ชนิดนี้เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการแรงบิดสูงที่ความเร็วต่ำ และแรงบิดต่ำที่

ความเร็วสูง เอกสารนี้เผยแพร่โดยศูนย์วิจัยและพัฒนาเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีควรรนำไปใช้

ข. มอเตอร์แบบสนามแม่เหล็กแยกกระตุ่น มีโครงสร้างแสดงในรูปที่ 2.10 เป็นมอเตอร์ แบบที่สนามแม่เหล็กเป็นอิสระต่อกระแสอาร์มาเจอร์ จึงสามารถควบคุมพารามิเตอร์ของมอเตอร์ได้ ใช้ในช่วงกว้าง เหมาะที่จะใช้ในงานที่ต้องการแรงบิดสูง ความเร็วคงที่ ในรูปที่ 2.11 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิด



รูปที่ 2.10 มอเตอร์แบบสนามแม่เหล็กแยกกระตุ่น



รูปที่ 2.11

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิดของดีซีมอเตอร์แบบแยกกระตุ่น

2.3.2 มอเตอร์แบบสนามแม่เหล็กคงที่

มอเตอร์แบบนี้ปัจจุบันนิยมใช้แม่เหล็กถาวรซึ่งให้เส้นแรงแม่เหล็กมีค่าคงที่ ดังนั้นจึงมีผลทำให้แรงบิดแปรโดยตรงกับกระแส ข้อดีของมอเตอร์ชนิดนี้ก็คือ ไม่มี ความสูญเสียในสนามแม่เหล็ก มีประสิทธิภาพสูงกว่า และมีขนาดเล็กกว่า เหมาะที่จะใช้กับงานที่ต้องการแรงบิดสูง ซึ่งในโครงงานนี้เราใช้มอเตอร์ชนิดนี้ในส่วนหัวอ่าน

2.3.3 วงจรขับดีซีมอเตอร์

ในการขับดีซีมอเตอร์นั้น แอมป์ปลีไฟเออร์ที่นิยมใช้กันมี 2 แบบคือ แบบลิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 เนียพาวเวอร์แอมป์ปลีไฟ (Linear Power Amplifier) กับแบบสวิทชิงแอมป์ปลีไฟ
 ไม่วางกรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

(Switching Amplifier)

2.3.3.1 ลิเนียร์แอมป์ปลิไฟ จะเป็นตัวควบคุมโวลต์เตจหรือกระแสและมอเตอร์โดยการบังคับขนาดของโวลต์เตจที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ดังนั้นมันจะเป็นตัวลดโวลต์เตจเอาไว้ซึ่งเท่ากับผลต่างของแหล่งจ่ายโวลต์เตจและโวลต์เตจที่มอเตอร์ใช้งานจริง ในขณะที่มีกระแสที่เหมาะสมไหลผ่าน กำลังงานสูญเสียในเอาท์พุททรานซิสเตอร์เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะขณะที่มอเตอร์วิ่งที่ความเร็วต่ำ แรงบิดสูง

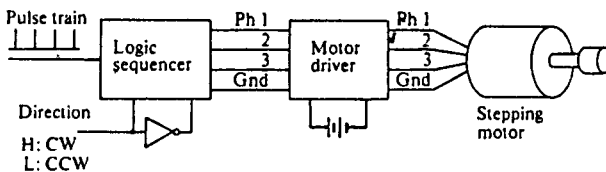
2.3.3.2 สวิทช์แอมป์ปลิไฟ จะควบคุมโวลต์เตจของมอเตอร์โดยปรับ ดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) ของโวลต์เตจที่จ่ายให้กับมอเตอร์และให้ทรานซิสเตอร์ทำงานที่สภาวะอิ่มตัว (Saturated) ที่ช่วงเวลาออน (On) ทำให้สามารถควบคุมความเร็วต่ำ ๆ โดยมีแรงบิดสูงอยู่ โดยไม่สิ้นเปลืองพลังงานเหมือนพวกลิเนียร์แอมป์ปลิไฟ ซึ่งในโครงการนี้ เราจึงเลือกใช้วงจรขับแบบสวิทช์แอมป์ปลิไฟ ซึ่งรายละเอียดในการออกแบบจะได้กล่าวถึงในบทต่อไป



2.4 ทฤษฎีสเตปปีงมอเตอร์

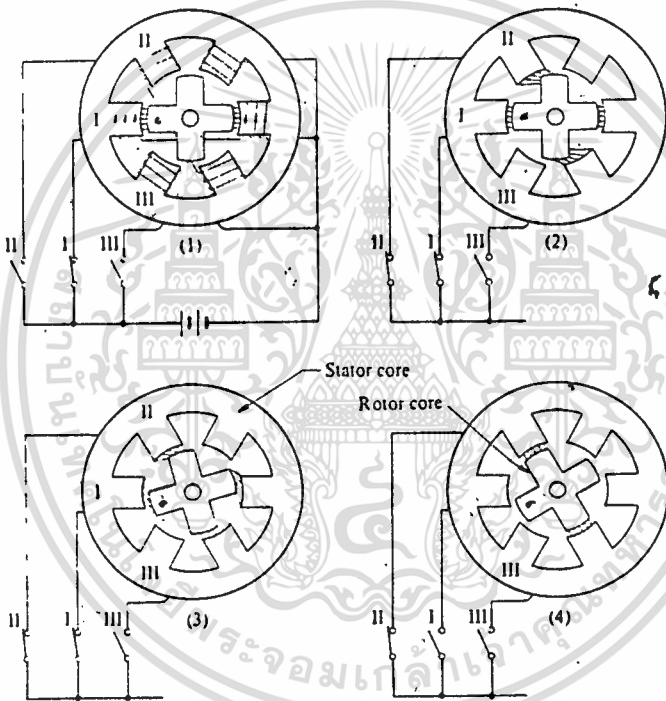
สเตปปีงมอเตอร์และลักษณะทั่วไป

การทำงานของสเตปปีงมอเตอร์ ดูจากรูป 2.4.1 เป็นสเตปปีงมอเตอร์ แบบวาริเอเบิลรีลัคแตนซ์ (Variable Reluctance) แกนเหล็กสเตเตอร์ (Stator Core) มีซี่ฟัน (Teeth) 6 ซี่ ขณะที่โรเตอร์ (Rotor) มีฟัน 4 ซี่ ทั้งโรเตอร์และสเตเตอร์เป็นเหล็กอ่อน ขดลวด (Coil) 3 ชุด ถูกต่ออยู่ดังรูป แต่ละชุดขดลวด มี 2 ขดลวดต่อกันรวมกัน เรียกแต่ละชุดว่า เฟส (Phase) และผลจากการต่อแบบนี้เรียกว่า มอเตอร์ 3 เฟส (3 Phase Motor) กระแสถูกจ่ายไปยัง ขดลวดแต่ละชุดโดยผ่านสวิตช์ I , II และ III ในสภาวะ (1) ขดลวดของเฟส 1 ได้รับ กระแสโดยผ่านสวิตช์ I หรือ เฟส 1 ถูกกระตุ้น เส้นแรงแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นใน ช่องอากาศ (Air Gap) เกิดขึ้นเนื่องมาจากการกระตุ้นซึ่งแสดงด้วยลูกศร ในสภาวะนี้สเตเตอร์ 2 ขั้วของเฟส 1 จะอยู่ในแนวเดียวกับ 2 ซี่ฟันที่อยู่ตรงข้ามกัน ของโรเตอร์ ซึ่งเป็นสภาวะสมดุลย์ ซึ่งอยู่ในเทอมของไดนามิกส์ (Dynamics) เมื่อสวิตช์ II ปิด เพื่อกระตุ้น เฟส 2 พร้อมกับ เฟส 1 เส้นแรงแม่เหล็ก จะถูกสร้างขึ้นที่ขั้วของสเตเตอร์ของเฟส 2 ในลักษณะซึ่งแสดงดังสภาวะ (2) ทอร์ก (Torque) ทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจะถูกสร้างขึ้นเกิดจากความเครียด (Tension) ในฟลักซ์แม่เหล็กเอียงไปยังแกนโรเตอร์ที่อยู่ใกล้ หลังจากนั้นโรเตอร์จะมาอยู่ในสภาวะ (3)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **รูปที่ 2.4.2** ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นโรเตอร์จะหมุนไปด้วยมุมการเปลี่ยนแปลงคงที่ ซึ่งเรียกว่ามุมสเตป (Step angle) ในที่นี้คือ 15 องศา ขณะที่สวิตช์จะมีการเปลี่ยนแปลงอีกคั้งหนึ่ง คือสวิตช์ I จะถูกเปิด เพื่อลดพลังงานในเฟส 1 โดยโรเตอร์จะหมุนไป 15 องศา มาอยู่ในสภาวะ (4) ตำแหน่งมุมของโรเตอร์จะถูกควบคุมด้วยการปิด-เปิดสวิตช์ ถ้าสวิตช์ถูกปิดเปิดเป็นลำดับ โรเตอร์จะหมุนไปในลักษณะที่เป็นสเตป ความเร็วเฉลี่ยจะสามารถควบคุมได้ด้วยการเปิดปิดสวิตช์ ดังแผนภาพในรูปที่ 2.4.2



รูปที่ 2.4.1

จากที่กล่าวมาพอที่จะกล่าวถึงคุณสมบัติของสเตปมอเตอร์ได้ว่า

1. การหมุนของมอเตอร์จะเป็นสเตป (เป็นขั้น ๆ) สเตปละกี่องศาขึ้นอยู่กับชนิดของมอเตอร์
2. ความเร็วในการหมุนขึ้นอยู่กับสัญญาณพัลส์ที่ให้ เข้ามาทางอินพุทของมอเตอร์ (ความถี่)
3. ความผิดพลาดในการหมุน 1 สเตปมีค่าน้อยมาก แต่ต้องจำกัดอยู่ในความเร็วที่พอดีด้วย

4. คุณสมบัติของการตอบสนองสัญญาณในขณะที่มอเตอร์เริ่มทำงานและไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หยุดทำงานดีมาก

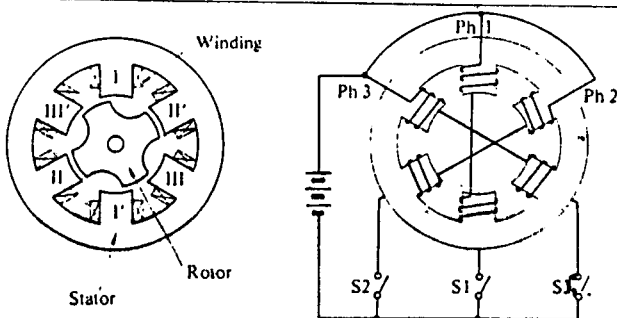
5. เนื่องจากไม่มีแปรงถ่าน (Commutator) เหมือนมอเตอร์ในระบบดีซี ดังนั้นจึงมีความแน่นอนในการทำงานสูง
6. แหล่งจ่ายแรงดันไฟที่ใช้ในการขับมอเตอร์มีค่าไม่มาก
7. ไม่ทำให้เกิดเสียงรบกวนและการสั่นได้ง่าย
8. ทำงานแบบ โอเพนลูป

สเต็ปป์มอเตอร์ที่ใช้กันเป็นส่วนมากมี 3 ชนิด คือ

1. วารีเอเบิลรีลัคแทนซ์สเต็ปป์มอเตอร์ (Variable Stepping Motor)
2. สเต็ปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร (Permanent magnetic Stepping Motor)
3. สเต็ปป์มอเตอร์แบบไฮบริด (Hybrid Stepping Motor)

2.4.1 วารีเอเบิลรีลัคแทนซ์สเต็ปป์มอเตอร์

มอเตอร์แบบนี้โรเตอร์ทำด้วยเหล็กอ่อน ซึ่งค่าซึมซาบแม่เหล็ก (Permeability) สูง และสามารถให้ฟลักซ์แม่เหล็กผ่านได้มาก โดยโรเตอร์จะติดอยู่กับแกนของมอเตอร์ และสเตเตอร์ติดอยู่กับโครงของตัวมอเตอร์ จากรูป 2.4.3 เป็นภาคตัดขวางของสเต็ปป์มอเตอร์แบบนี้ ซึ่งเป็นมอเตอร์ 3 เฟส มีฟัน 6 ซี่ ฟันของสเตเตอร์จะอยู่ตรงข้ามกันซึ่งอยู่ห่างกัน 180 องศา จะมีเฟสเดียวกัน คือ ขดลวดของฟันแต่ละซี่ ที่อยู่ตรงข้ามกันจะต่อกันเป็นแบบอนุกรมหรือขนานก็ได้ (ในที่มีต่อแบบอนุกรม)

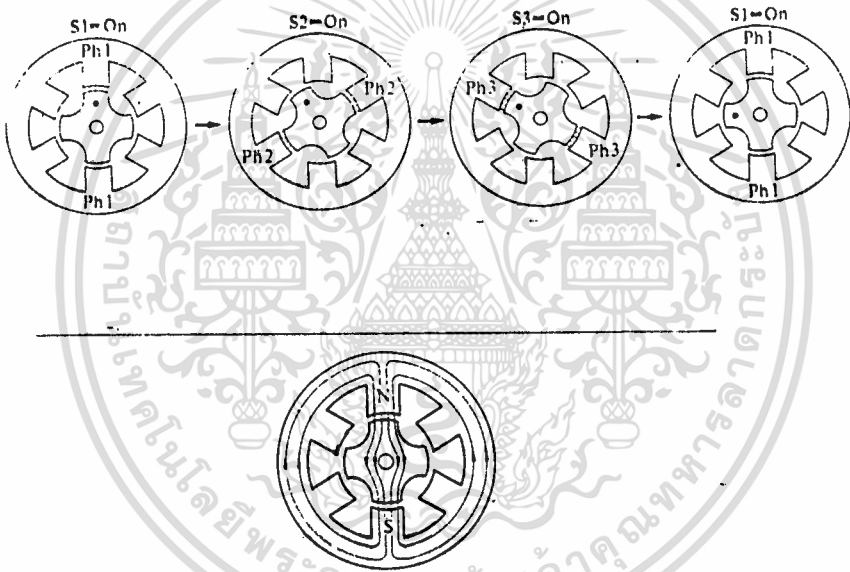


รูปที่ 2.4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะเห็นว่าฟันของสเตเตอร์ 2 ซี่ ที่มีเฟสเดียวกัน จะมีขั้วแม่เหล็กตรงข้ามกันซึ่งกันและกันดังแสดงในรูป สมมติว่าฟัน I, II และ III มีขั้วเป็นขั้วเหนือ ฟัน I', II' และ III' จะเป็นขั้วใต้เมื่อถูกกระตุ้น

กระแสแต่ละเฟสจะถูกควบคุมด้วยสวิตช์ ถ้ามีกระแสไหลในเฟส 1 หรือว่าเฟส 1 ถูกกระตุ้น ฟลักซ์แม่เหล็กก็จะเกิดดังรูป 2.4.4 ฟันของโรเตอร์ก็จะจะมีตำแหน่ง ในแนวเดียวกับฟันของสเตเตอร์ ซึ่งจะมีผลให้ แมกเนติกรีลัคแทนซ์ (Magnetic Reluctance) น้อยที่สุด สภาวะนี้คือตำแหน่งสมดุลย์

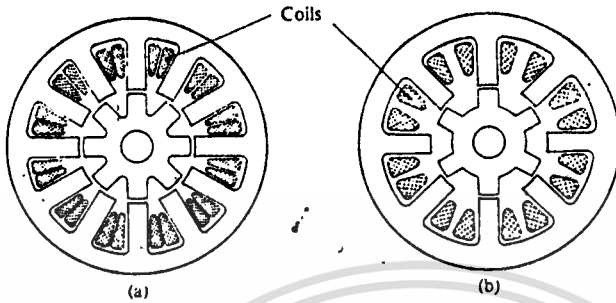


รูปที่ 2.4.4

โครงสร้างเบื้องต้นของมอเตอร์แบบนี้จะมีลักษณะดังนี้

1. ช่องว่างอากาศควรจะเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ช่องว่างอากาศระหว่างฟันของโรเตอร์กับฟันของสเตเตอร์ควรมีความห่างกันน้อยมากเพื่อที่จะได้ทอร์คสูง และตำแหน่งที่แน่นอนขึ้น

2. สำหรับมุมสเตปเล็ก ๆ จากรูป 2.4.5a แสดง 3 เฟสมอเตอร์ที่สเตเตอร์มีฟัน 12 ซี่ และมีฟันโรเตอร์ 8 ซี่ รูป 2.4.5b เป็นรูป 4 เฟสมอเตอร์ที่สเตเตอร์มีฟัน 8 ซี่ และโรเตอร์มีฟัน 6 ซี่ ซึ่งทั้งสองรูปนี้มี

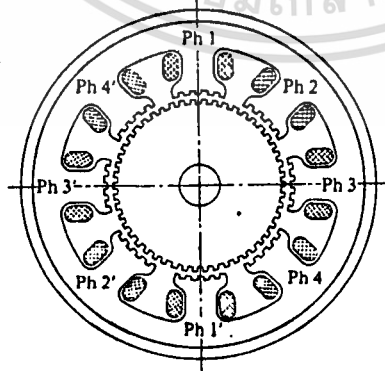


รูปที่ 2.4.5

ความสัมพันธ์ระหว่างมุมสเตป θ_s , จำนวนเฟส m , จำนวนฟันของโรเตอร์ N_r และจำนวนสเตปใน 1 รอบ S จะหาได้โดย

$$S = 360 / \theta_s = m(N_r)$$

นั่นคือเราสามารถลดมุมสเตปลงได้โดยเพิ่มจำนวนฟันบนโรเตอร์ ดังแสดงในรูป 2.4.6

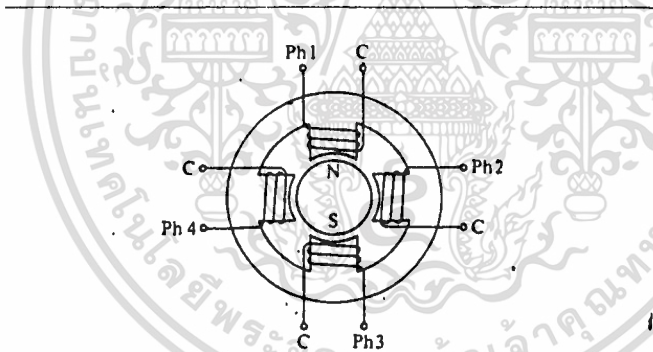


1.8 องศา

2.4.2 สเตปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร

สเตปป์มอเตอร์แบบนี้ใช้โรเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร รูปที่ 2.4.7 เป็นตัว อย่างของสเตปป์มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรแบบ 4 เฟส โรเตอร์เป็นทรงกระบอก สเตเตอร์มีฟัน 4 ซี่ โดยที่แต่ละซี่มีขดลวดพันรอบ ถ้าจำนวนของซี่ฟันบนสเตเตอร์และขั้วแม่เหล็กบนโรเตอร์เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า มุมแต่ละสเตปจะลดลงจากเดิมครึ่งหนึ่ง ดังนั้นเพื่อที่จะลดมุมสเตปลงไปในสเตปมอเตอร์แม่เหล็กถาวร จะต้องเพิ่มจำนวนแม่เหล็กและซี่ฟัน อย่างไรก็ตามขั้วแม่เหล็กที่จะเพิ่มขึ้นได้นั้นมีจำนวนจำกัด

ลักษณะทั่วไปของมอเตอร์แบบนี้ก็คือ โรเตอร์จะถูกยึดอยู่กับที่ แม้ว่าไม่มีการกระตุ้นเฟส ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า ดีเทนท์ แมคคาไนซึ่ม (Detent Mecanism)

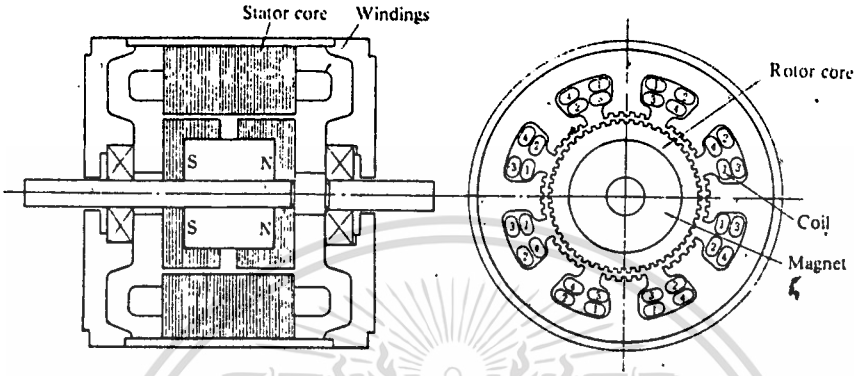


รูปที่ 2.4.7

2.4.3 สเตปป์มอเตอร์แบบไฮบริด

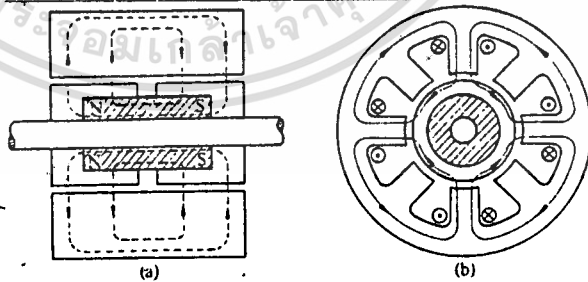
เป็นสเตปป์มอเตอร์แบบหนึ่งที่มีโรเตอร์เป็นแบบแม่เหล็กถาวร การใช้ชื่อไฮบริด ได้มาจากการรวมหลักสำคัญของมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรและแบบวาริเอเบิลรีลัคแทนซ์ โครงสร้างแกนของสเตเตอร์จะคล้ายกับแบบวาริเอเบิลรีลัคแทนซ์มอเตอร์ ซึ่งมีเพียง 1 ขดจาก 2 ขด ของ 1 เฟสที่ถูกพันบนขั้วเดียว ในขณะที่ 4 เฟสไฮบริดมอเตอร์ ชุดขดลวด 2 เฟสที่แตกต่างกันจะถูกพันบนขั้วเดียวกันดังรูปที่ 2.4.8 อย่างไรก็ตามเพราะฉะนั้นขั้วหนึ่งไม่ว่าการมีไดรฟ์อื่น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะไม่มีเพียงเฟลเดี่ยว ขดลวด 2 ขด จะถูกพันเป็นขั้วเดียวกันแบบไบฟิลลา (Bifilar Winding) ซึ่งจะทำให้ขั้วแม่เหล็กต่างกันขณะมีการกระตุ่น



รูปที่ 2.4.8

ลักษณะสำคัญอีกอย่างหนึ่งของไอบริดมอเตอร์ คือ โรเตอร์นั้นจะเป็นแม่เหล็กรูปร่างทรงกระบอกอยู่ในแกนเหล็กของโรเตอร์ มันถูกทำให้เป็นแม่เหล็กตามยาวเพื่อสร้างสนามขั้วเดี่ยวดังรูปที่ 2.4.9 แต่ละขั้วของแม่เหล็กจะถูกล้อมรอบด้วยฟันเหล็กอ่อน ซึ่งฟันของโรเตอร์กับสเตเตอร์ จะอยู่เหลื่อมกันครึ่งช่วงฟัน



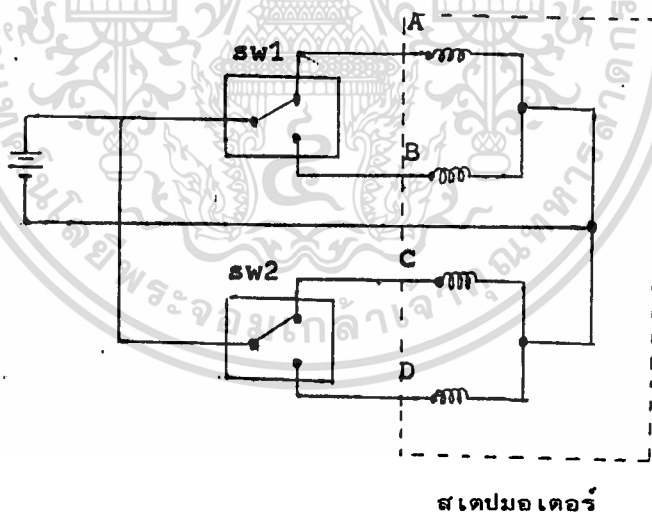
รูปที่ 2.4.9

การทำงานพื้นฐาน

สเตปป์ังมอเตอร์เป็นมอเตอร์ที่ถูกใช้ทำงานโดยสัญญาณอินพุทที่เป็นพัลส์ ทุก ๆ สัญญาณพัลส์ ทุก ๆ สัญญาณพัลส์ที่ให้เข้ามาจะทำให้การเปลี่ยนแปลงสถานะสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และให้การหมุนของมอเตอร์เป็นมุมที่คงที่ซึ่งจะแตกต่างกับการหมุนของมอเตอร์แบบธรรมดา ในระบบควบคุมที่ใช้สัญญาณดิจิตอลนี้

หรือ เช่น ในการส่งข้อมูล ท่านการควบคุมข้อมูลใช้โดยที่นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นปริมาณค่าของสัญญาณดิจิทัลทั้งหมด จึงทำให้ควบคุมการทำงานของสเตปมอเตอร์โดยตรงได้เป็นอย่างดี การทำงานพื้นฐานของสเตปมอเตอร์แสดงในรูปที่ 2.4.10 ซึ่งแสดงบล็อกของวงจรขับสเตปมอเตอร์ ทำให้กระแสไฟดีซี เรียงลำดับเข้าไปตามเฟสต่าง ๆ ของมอเตอร์ ก็จะทำให้มอเตอร์หมุนไปตามองศาที่กำหนดไว้ การที่จะทำให้กระแสไฟดีซี เรียงลำดับเข้าไปที่มอเตอร์ได้ ทำได้ด้วยการใช้งานของสวิตช์ และเพื่อให้มอเตอร์หมุน จำเป็นต้องมี วงจรขับสเตปมอเตอร์ สวิตช์ที่จะควบคุมการไหลของกระแสไฟ คือ สวิตช์ 1 และ สวิตช์ 2 ถ้าให้การทำงานของสวิตช์ตามตารางการทำงาน ที่แสดงไว้ในตาราง ที่ 2.4.1 ถ้าสวิตช์การทำงานโดยใช้รีเลย์ (Relay) หรือมิกโยก สเตปมอเตอร์ก็จะหมุนเหมือนกัน แต่จะหมุนช้า เนื่องจากรีเลย์หรือมิกโยกให้การเปลี่ยนแปลงของสวิตช์ช้า ซึ่งจะทำให้ไม่เร็วเท่ากับความเร็วสูงสุดของสัญญาณพัลส์ที่มอเตอร์สามารถทำงานได้ (เป็นจำนวนพัลส์ต่อวินาที)



รูปที่ 2.4.10

วงจรขับมอเตอร์มีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับชนิดสเตปมอเตอร์มีอยู่

3 ระบบ คือ

1. ระบบการกระตุ้นสนามแม่เหล็กเฟสเดียว (Single Phase Excitation)

2. ระบบการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก 2 เฟส (2-Phase

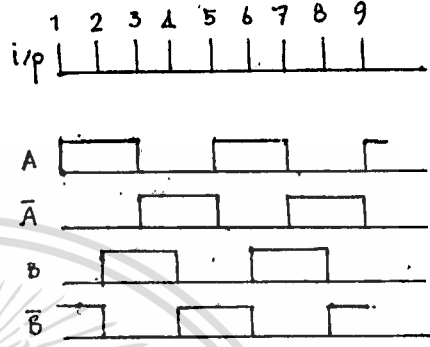
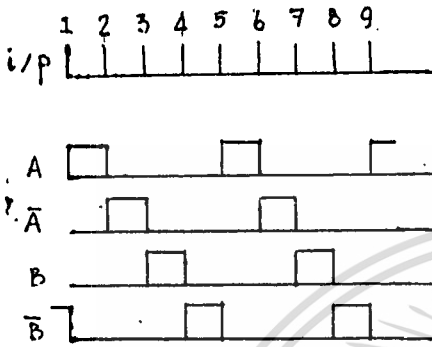
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Excitation)

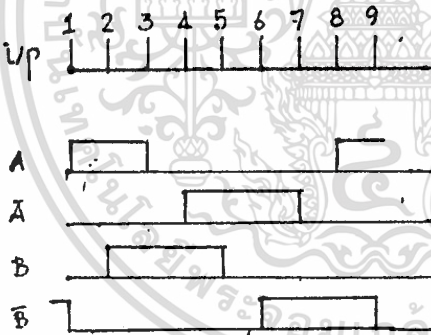
3. ระบบการกระตุ้นสนามแม่เหล็ก 1-2 เฟส (Half-Step

Excitation)



สนามแม่เหล็ก 1 เฟส

สนามแม่เหล็ก 2 เฟส



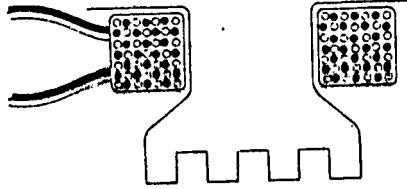
สนามแม่เหล็ก 1-2 เฟส

รูปที่ 2.4.11

การพันขดลวดแบบโมนอฟิลลาและไบฟิลลา (Monofilar and Bifilar Winding)

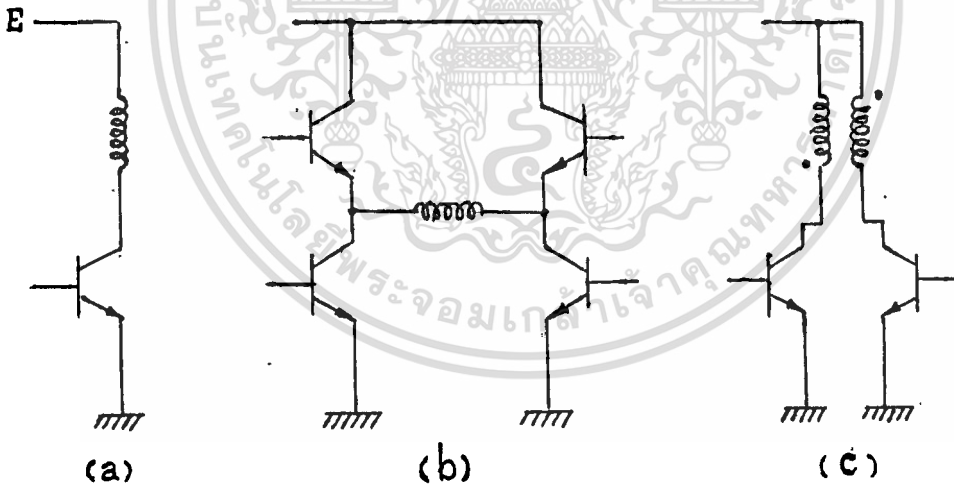
แบบโมนอฟิลลา มีการพันขดลวดโดยใช้ลวดเส้นเดียวพันอยู่บนขั้วเดียว ส่วนแบบไบฟิลลา เส้นลวด 2 เส้นจะถูกพันเหมือนกับเป็นเส้นเดียวกันบนขั้วเดียวดังรูปที่ 2.4.12 และขดลวดทั้งสองเส้นนี้จะแยกกันที่ปลายเป็นลักษณะ 2 เส้น แยกกัน ถ้าขดหนึ่งเป็นของเฟส 1 อีกขดหนึ่งเป็นของเฟส 3 และทำนองเดียวกัน ถ้าขดหนึ่งเป็นของเฟส 2 อีกขดหนึ่งจะเป็นของเฟส

4 (กรณีมอเตอร์ 4 เฟส)



รูปที่ 2.4.12

จุดประสงค์ของการพันแบบไบพอลาร์คือ เพื่อให้จะให้พลังงานกับ
ขั้วแม่เหล็กสเตเตอร์โดยการสลับขั้วแม่เหล็ก การกระตุ้นแต่ละเฟสอาจ
เป็นแบบใดแบบหนึ่งใน 3 แบบในรูป



รูปที่ 2.4.13

ในวงจรรูป a) เป็นโมโนโพล่า ขั้วแม่เหล็กจะถูกกระตุ้นเป็นขั้ว
เหนือหรือใต้เสมอ ซึ่งแสดงว่าจะไม่สามารถกลับขั้วแม่เหล็กได้
การกระตุ้นแบบนี้เป็นการกระตุ้นแบบขั้วเดียว (Unipolar Excited)

ในวงจรรูป b) ทิศทางของกระแสในขดลวดสามารถกลับได้เนื่อง
จากเป็นวงจรบริดจ์ (Bridge Excited) อย่างไรก็ตามจะต้องใช้ทรานซิสเตอร์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิสเตอร์ถึง 4 ตัว ต่อขดลวด 1 ขด แบบนี้เรียกว่าการกระตุ้นแบบ 2 ขั้ว (Bipolar Excited) การกระตุ้นแบบนี้จะให้ทอร์คที่ความเร็วต่ำมากกว่าแบบไบโพลาร์ แต่ก็มีโอกาสที่ทรานซิสเตอร์จะพังได้ เนื่องจากจัดเวลาผิด

ในวงจรรูป c) เกี่ยวกับคู่สายไบโพลาร์และทรานซิสเตอร์ 2 ตัว โดยทำให้สเตเตอร์ถูกกระตุ้นเป็นขั้วแม่เหล็กแบบใดก็ได้ ขณะที่ขดหนึ่งถูกกระตุ้นเป็นขั้วเหนือ อีกขดจะเป็นขั้วใต้ ขดลวด 2 ขดที่พันอยู่เป็นแบบไบโพลาร์ ก็จะเกิดสนามแม่เหล็กคัปปลิง (Coupling) เมื่อขั้วใดขั้วหนึ่งถูกกระตุ้น ถ้าแทนการพันแบบไบโพลาร์ ด้วยเส้นลวด 2 เส้นที่แยกจากกัน ความแตกต่างของอินดักแทนซ์ (Inductance) จะปรากฏระหว่าง ขด 2 ขด ทำให้ตำแหน่งผิดไป

โดยทั่วไปประสิทธิภาพของมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรกับแบบไฮบริด ที่ใช้แบบไบโพลาร์นี้ จะได้ประสิทธิภาพดีกว่าแบบ โมโนโพลาร์

2.4.4 วงจรขับมอเตอร์ (Motor Drive)

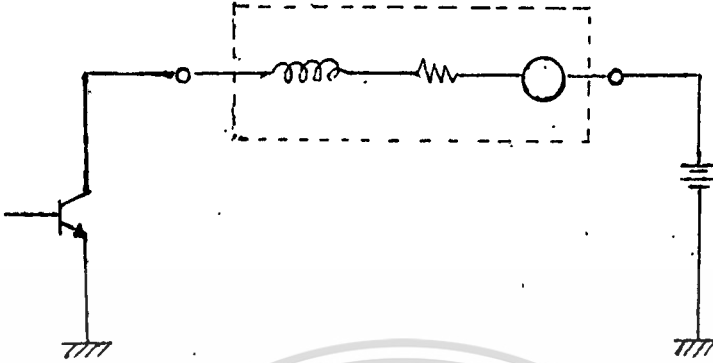
จุดประสงค์ของวงจรขับก็คือ เพื่อให้ได้โวลท์เตจ และกระแสที่ถูกต้องไปยังมอเตอร์ในช่วงเวลาที่สั้น และในลักษณะที่มีประสิทธิภาพ ทิศทางของกระแสในขดลวดของมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรและแบบไฮบริดมีความสำคัญ เพราะจะต้องใช้ในทิศทางที่เหมาะสมในเวลาต่างๆ สำหรับการขับมอเตอร์แบบวาริเอเบิลรีลัคแทนซ์ จะไม่ขึ้นกับทิศทางของกระแสที่ไหลในขดลวด เนื่องจากไม่มีแม่เหล็กอยู่ในตัวมันเลย

วงจรขับมอเตอร์จะรับสัญญาณควบคุมมาจากวงจรจัดลำดับลอจิก ในการสร้างวงจรขับมอเตอร์จะมีปัญหาเกี่ยวกับอินดักแทนซ์และรีซิสแทนซ์

(Resistance) อนุกรมกันในวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ ดังรูปที่

2.4.14 อีกทั้งในการหมุนยังมีปัญหาเพิ่มขึ้นเกี่ยวกับแรงดันไฟดันกลับ (Back Electromotive Force : Back emf.) นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงแหล่งจ่ายไฟดีซี และการใช้กับการป้องกันพาวเวอร์ทรานซิสเตอร์

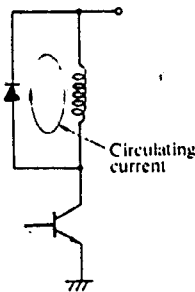
ด้วย



รูปที่ 2.4.14

จากรูป 2.4.14 เมื่อทรานซิสเตอร์หยุดทำงานจะเกิดสไปค์
โวลท์เตจ (Spike Voltage) เนื่องจากขดลวด (ตัวเหนี่ยวนำ)
ซึ่งอาจทำให้ทรานซิสเตอร์พังได้ จึงต้องมีวงจรป้องกันและลดลักษณะแบบนี้
อย่างรวดเร็ว โดยวิธีต่อไปนี้

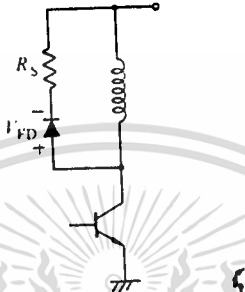
1. ลดโดยใช้ไดโอด (Diode Suppressor) ใช้ไดโอดต่อคร่อม
ขนานกับขดลวดดังในรูปที่ 2.4.15 กระแสจะไหลวนอยู่ในวงจรขดลวดกับ
ไดโอด หลังจากทรานซิสเตอร์หยุดทำงาน ซึ่งกระแสนี้จะลดลงไปตามเวลา
แต่ก็ใช้เวลานานมาก จึงยังเกิดเทอร์คิเคิลมอเตอร์อยู่



รูปที่ 2.4.15

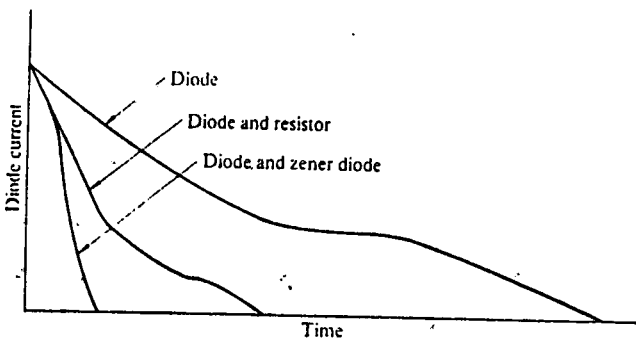
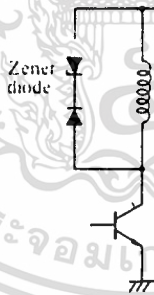
2. โดยใช้ไดโอดและตัวต้านทาน (Diode and Resistor

Suppressor) โดยการต่อความต้านทานอนุกรมกับไดโอดแล้วต่อขานคร่อม
 ขดลวด ดังรูปที่ 2.4.16 วิธีนี้จะช่วยลดเวลาในการที่จะทำให้กระแสหยุด
 ไหลวน ยิ่งใช้ตัวต้านทานค่ามาก กระแสก็จะหยุดไหลเร็วขึ้น
 แต่ทรานซิสเตอร์ต้องทนโวลต์เตจคร่อม คอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ เพิ่ม
 ขึ้นด้วย

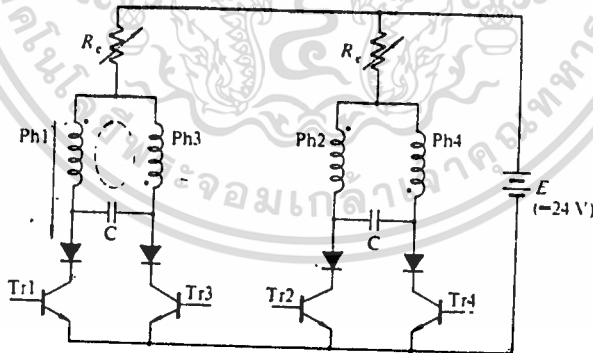


รูปที่ 2.4.16

๑. โดยใช้ซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode Suppressor) โดย
 การต่อซีเนอร์ไดโอดดังรูปที่ 2.4.17 การต่อแบบนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับสอง
 แบบแรกแล้ว จะมีประสิทธิภาพมากกว่า ลดกระแสที่เกิดขึ้นได้เร็วกว่า



4. โดยใช้คอนเดนเซอร์ (Condenser Suppressor) วิธีนี้มักจะใช้กับสแตปมอเตอร์แบบไบเฟลา การต่อวงจรดังรูป 2.4.18 ของมอเตอร์ 4 เฟล ตัวคอนเดนเซอร์ที่ต่ออยู่ระหว่างเฟล 1 กับ เฟล 3 และเฟล 2 กับ เฟล 4 จะทำหน้าที่ดังนี้ ในตอนที่ทรานซิสเตอร์ T1 หยุดทำงาน ในการทำงานแบบกระตุ้นเฟลเดียว T2 หรือ T4 เริ่มทำงาน แต่ T3 ยังไม่ทำงาน เนื่องจากเฟล 1 กับเฟล 3 ต่ออยู่ในลักษณะ ไบเฟลา กระแสที่เกิดขึ้นหลังจากที่ T1 หยุดทำงานจะไหลวนไปตามเส้นไขปลา ดังที่แสดงในรูป ถ้า T3 เริ่มทำงาน ประจุที่ซาร์จ (Charge) เก็บไว้ในคอนเดนเซอร์จะช่วยเพิ่มทอร์คให้ โดยปล่อยกระแสไหลผ่านเฟล 1 ทั้งนี้การต่อคอนเดนเซอร์สามารถใช้กับ การกระตุ้นแบบ 2 เฟลได้ด้วย สำหรับค่า R_c ไล่วัเพื่อปรับค่ากระแสให้เหมาะสม นอกจากนั้น คอนเดนเซอร์ยังช่วยลดการสั่นของมอเตอร์ โดยเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานความร้อนแทน



รูปที่ 2.4.18

บทที่ 3

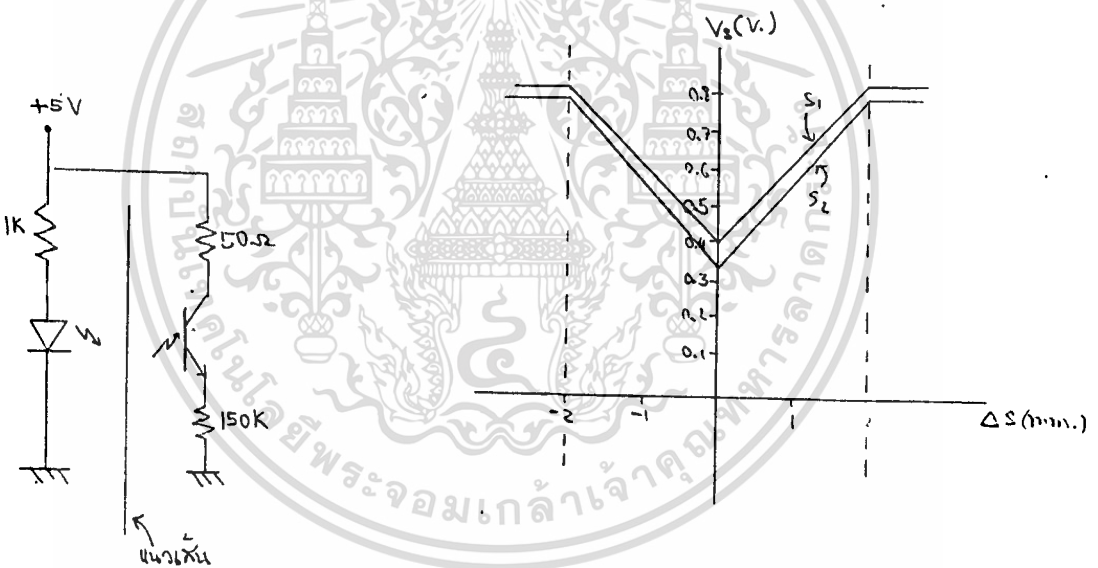
การคำนวณและการสร้างระบบหัวอ่านตามลายเส้น

ในการออกแบบระบบหัวอ่านตามลายเส้นนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ ด้วยกันคือ

- (1) ส่วนรับสัญญาณจากออปติคอลเซนเซอร์
- (2) ส่วนควบคุมดีซีมอเตอร์
- (3) ส่วนขับเคลื่อนหัวอ่าน

3.1 ส่วนรับสัญญาณจากออปติคอลเซนเซอร์

ในการที่จะออกแบบส่วนรับสัญญาณจากออปติคอลเซนเซอร์ได้นั้น จำเป็นต้องทำการทดสอบเพื่อดูผลตอบสนองของเซนเซอร์ทั้งสองชุดกับระยะห่างจากแนวเส้น ในสถานะเดียวกันได้ผลการทดลองดังรูปที่ 3.1



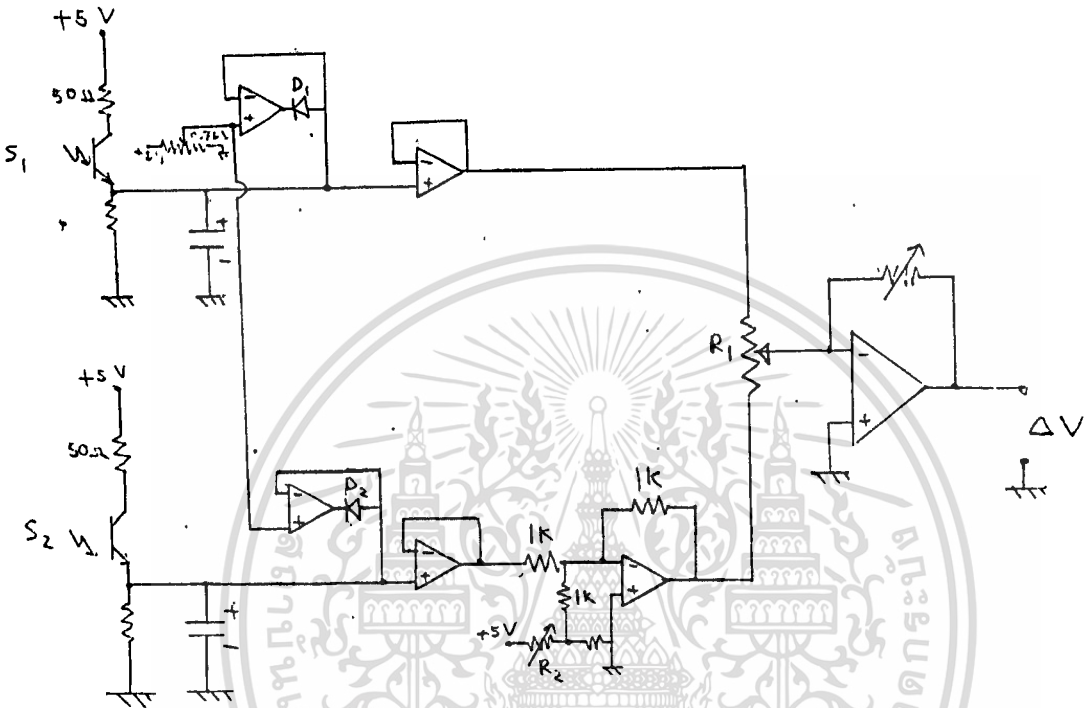
รูปที่ 3.1

จะเห็นว่าการตอบสนองต่อสัญญาณของเซนเซอร์ทั้งสองชุดไม่เป็นเชิงเส้นต่อกันรวมทั้งระดับของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อทดสอบ ณ. ตำแหน่งต่าง ๆ ของกระดาษแผ่นเดียวกันอันเป็นผลมาจากความไม่เรียบของกระดาษ ที่ทำให้ความสูงของเซนเซอร์ที่ห่างจากแผ่นกระดาษไม่เท่ากับ 2 มม. ตามที่ได้ออกแบบติดตั้งไว้จริง ซึ่งจากการทดลองพบว่า ผลของความไม่เรียบของกระดาษนี้ทำให้ระดับของสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงขึ้น ๆ ลง ๆ ในช่วง 0.75 ถึง 0.85 โวลต์ ณ. บริเวณที่ห่างแนวเส้นออกมา ซึ่งผลอันนี้จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้เกิดความผิดพลาด หรือการแกว่งของสัญญาณอย่างมากขณะที่ระบบทำการติดตามลายเส้น เพื่อที่จะแก้ปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นของเซนเซอร์ทั้งสองและการแกว่งของสัญญาณอันเนื่องมาจากความไม่เรียบของกระดาษ จึงได้ออกแบบวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2

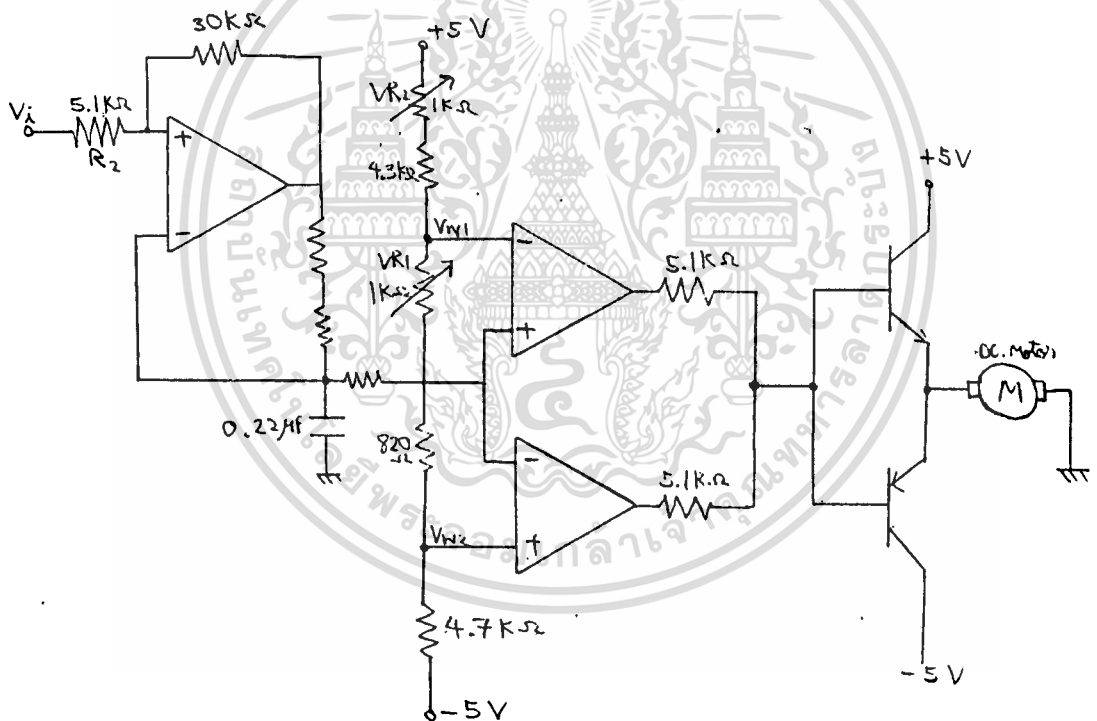
ในรูป R1 จะเป็นตัวปรับความชันของการตอบสนองต่อสัญญาณของเซนเซอร์ทั้งสองชุดให้เท่ากันก่อนที่จะทำการเปรียบเทียบ ส่วน R2 จะเป็นตัวปรับเพื่อให้เกิดการยกระดับการตอบสนองต่อสัญญาณของเซนเซอร์ทั้งสองชุดให้เท่ากันก่อนที่จะทำการเปรียบเทียบ ในการแก้การแกว่งของสัญญาณอันเนื่องมาจากความไม่เรียบของกระดาษนั้นเราทำโดยการใส่วงจรลิมิตค่าสัญญาณที่ออกจากเซนเซอร์ S1 และ S2 ไม่ให้เกิน 0.75 โวลต์ จากรูป 3.2 จะเห็นว่าถ้าสัญญาณจากเซนเซอร์ S1 เกิน 0.75 โวลต์ ไดโอด D1 จะนำกระแส (On) ทำให้ลิมิตค่าโวลต์ที่เตจที่ออกไปให้ไม่เกิน 0.75 โวลต์

3.2 ส่วนควบคุมดีซีมอเตอร์

ในโครงการนี้ได้ทำการทดลองออกแบบวงจรขับทั้งแบบลิเนียร์พาวเวอร์แอมป์ ปลัฟไฟและแบบสวิตชิ่งแอมป์ปลัฟไฟ ซึ่งใช้การสวิตชิ่งแบบพัลส์วิดท์โมดูเลเตอร์ (PWM) ซึ่งจากการทดลองปรากฏว่า ลิเนียร์แอมป์ปลัฟไฟถึงแม้จะออกแบบให้มีการฟีดแบค (Feedback) ของกระแสแล้วก็ตาม ก็ยังให้การตอบสนองได้ไม่ดี โดยเฉพาะช่วงที่โวลต์เตจอินพุทมีค่าต่ำคือเกิด เดดแบน (Dead Band) กว้างมาก ดังนั้นจึงได้เปลี่ยนมาใช้

วงจรขับแบบพัลส์วิดท์โมดูเลเตอร์ ซึ่งจากการทดลองพบว่าสามารถ ลดความกว้างของ เดคแบนลงไปได้อย่างมาก และผลตอบสนองที่ได้ก็มีความเป็นลิเนียร์ ซึ่งรายละเอียด ของการทดลองและผลการทดลองของวงจรขับทั้งสองแบบนี้ จะได้กล่าวในบทต่อไป ใน บทนี้จะขอกล่าวเน้นในเรื่องของการออกแบบวงจรขับลิเนียร์พัลส์วิดท์โมดูเลเตอร์

วงจรขับแบบพัลส์วิดท์โมดูเลเตอร์ ใช้หลักการควบคุมโวลท์ที่ตรงที่ป้อนให้กับมอเตอร์โดย การเปลี่ยนแปลง ตัวดีไซเคิล ของโวลท์ที่ตรงที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ในการออกแบบ เราได้ ออกแบบให้แอมป์ป्लीไฟลริชต์ด้วยความถี่คงที่ และสามารถแปรค่าของการอนและออฟของ พัลส์ได้ตามต้องการ วงจรที่ได้ออกแบบแสดงไว้ในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรพัลส์วิดท์โมดูเลเตอร์

จากรูปที่ 3.3 ออปแอมป์ C1 และ C2 จะทำหน้าที่เป็น ลีเวลคอมพาราเตอร์ (Level Comparator) ออปแอมป์ A1 จะทำหน้าที่เป็น อะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Astable Multivibrator) โดยที่จุด C1 จะให้สัญญาณใกล้เคียงกับลูกคลื่นสามเหลี่ยม (Triangle Wave) โดยที่ความถี่ของการออสซิลเลทเป็นดังสมการ

ไม่ว่าการมีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f = \{1\} / \{2R_1C_1 \log[(1+\beta)/(1-\beta)]\}$$

β = สัดส่วนการป้อนกลับ (Voltage Feedback Ratio)
 = R_1/R_2

R_2 จะต่อกับสัญญาณอินพุตโวลท์ที่เตจ (V_1) ซึ่งจะควบคุมการเลื่อนระดับของสัญญาณลูกคลื่นสามเหลี่ยม ค่าพีค (Peak Voltage) ของสัญญาณในกรณีนี้ก็เป็น

$$V_{t1}, V_{t2} = \{V_1R_1 + V_pR_2\} / \{R_1 + R_2\}$$

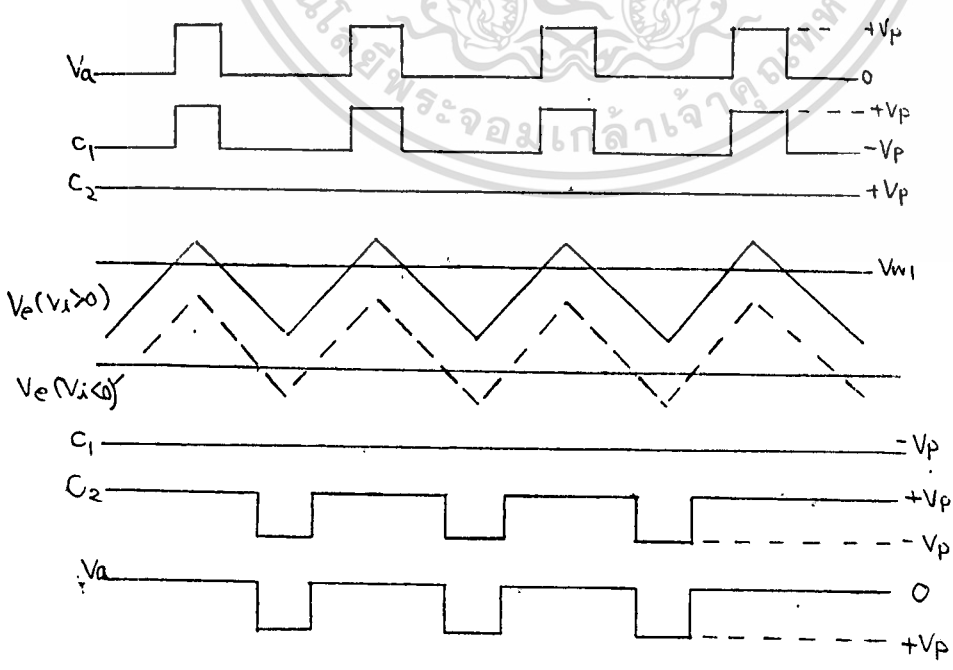
เมื่อ V_p เป็นค่าเอาท์พุทสูงสุดของออปแอมป์

ค่าสัญญาณเอาท์พุทนี้จะถูกส่งไปยัง ลิแวลคอมพาราเตอร์ ซึ่งจะตั้งระดับเปรียบเทียบโดยความต้านทานปรับค่าได้ VR_1 และ VR_2 เพื่อให้ระดับการเปรียบเทียบมีค่าสูงกว่าค่าพีคของลูกคลื่นรูปสามเหลี่ยมพอดี ขณะที่ $V_1 = 0$ เราจะตั้งให้ค่าระดับการเปรียบเทียบ

$$V_{w1}, V_{w2} = \{+V_pR_2\} / \{R_1 + R_2\}$$

จะเห็นว่าขณะที่ $V_1 = 0$ คอมพาราเตอร์ C_1 และ C_2 จะให้ค่าโวลท์ที่เตจ $-V_p$ และ $+V_p$ ตามลำดับ ซึ่งจะทำได้ผลรวมของสัญญาณที่จุด $V_a = 0$

เมื่อ $V_1 > 0$ ด้านบนของลูกคลื่นสามเหลี่ยมจะเกินระดับเปรียบเทียบของ V_{w1} ทำให้เอาท์พุทของออปแอมป์ C_1 มีค่าเป็น $+V_p$ ดังนั้น $V_a = +V_p$ ด้วยหลักการเดียวกันจะได้ว่าเมื่อ $V_1 < 0$ เราจะได้ $V_a = -V_p$ ลักษณะของสัญญาณแสดงไว้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4

ส่วนวงจรทรานซิสเตอร์ในส่วนภาคขับต่อแบบไบโพลาร์ โดยให้ทรานซิสเตอร์ทำงานที่ภาวะอิ่มตัวทุกครั้งที่อยู่ จากรูป 2.3 Q1 จะออนเมื่อ $V_e = V_p$ และ Q2 จะออนเมื่อ $V_e = -V_p$ และเพื่อป้องกันการออนของทรานซิสเตอร์พร้อมกันทั้งสองตัวในช่วงที่ V_e มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด เราจึงตั้งระดับสัญญาณเปรียบเทียบให้สูงกว่าระดับสัญญาณนิคของลูกคลื่นสามเหลี่ยมเล็กน้อยประมาณ 2 มิลลิโวลต์



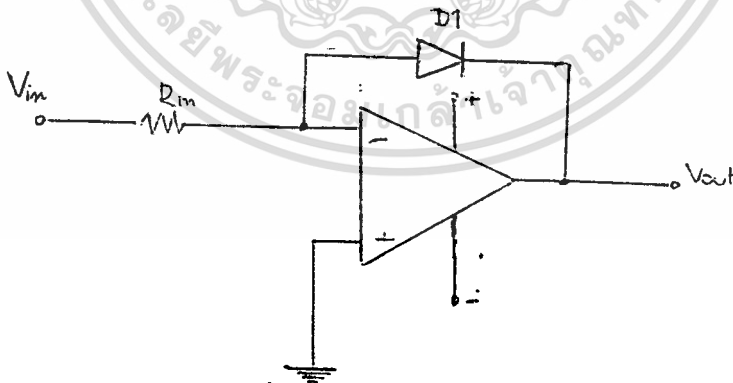
3.3 การสร้างวงจรขับสเตปมอเตอร์

การสร้างวงจรขับสเตปมอเตอร์ ต้องคำนึงถึงตำแหน่งที่ถูกต้องบนชิ้นงานด้วย จึงมีการป้อนกลับโดยใช้ รีโซลเวอร์ (Resolver) สัญญาณที่ได้จากรีโซลเวอร์ จะเป็น โวลต์ เตจที่มาใช้ควบคุมในวงจรควบคุมการขับสเตปมอเตอร์ และเนื่องจากความเร็วของสเตปมอเตอร์ขึ้นอยู่กับความถี่ที่ป้อนเข้าชุดขดลวด(เฟส) และสามารถควบคุมทิศทางการหมุนได้จากสัญญาณควบคุมการหมุน ซึ่งได้แก่สัญญาณพัลส์ความถี่ และสัญญาณบ่งบอกทิศทางการหมุน ดังนั้นสัญญาณโวลต์ เตจที่ได้จากรีโซลเวอร์ จึงนำมาสร้างวงจรควบคุมซึ่งประกอบด้วย

- วงจรตรวจเช็คเครื่องหมาย (Direction Sensor)
- วงจรค่าสมบูรณ์ (Absolute Value)
- วงจรเปลี่ยนโวลต์ เตจเป็นความถี่ (Voltage to Frequency Converter)
- วงจรจัดลำดับลอจิก (Logic Sequential)
- วงจรขับมอเตอร์ (Motor Drive)

วงจรเช็คเครื่องหมาย

เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากรีโซลเวอร์ มีทั้งบวก , ลบ เพื่อที่จะเอาสัญญาณไปควบคุมวงจรจัดลำดับลอจิกให้ควบคุมสัญญาณให้ได้ตามต้องการ จึงใช้วงจрдังรูป 3.3.1



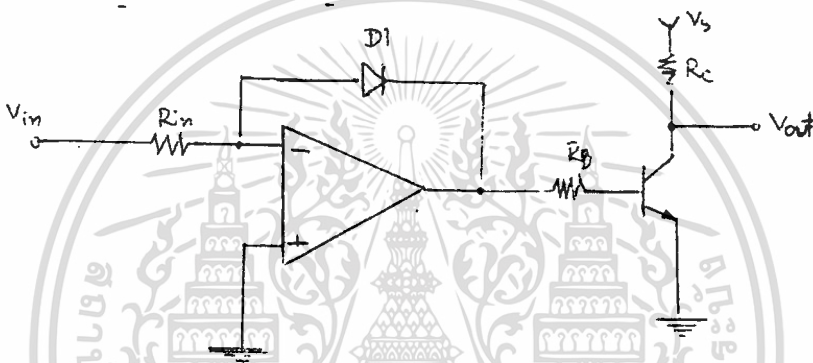
รูป 3.3.1

จากกราฟรูปที่ 3.3.1 พิจารณาเมื่ออินพุตเป็นทั้งบวกและลบ จะเห็นว่าเมื่อสัญญาณโวลต์ เตจจ่ายเป็นบวก เนื่องจากมีการป้อนกลับและมีสัญญาณอินพุตที่ขาอินเวอร์ต

ตั้ง (Inverting) ดังนั้นจะได้เอาท์พุทที่ออกมามีค่าเป็นลบ แต่เนื่องจากในการป้อนกลับ ค่าความต้านทานของตัวป้อนกลับมีค่าเป็นศูนย์ (ไดโอด D1 นำกระแส) ดังนั้น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกหนึ่งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

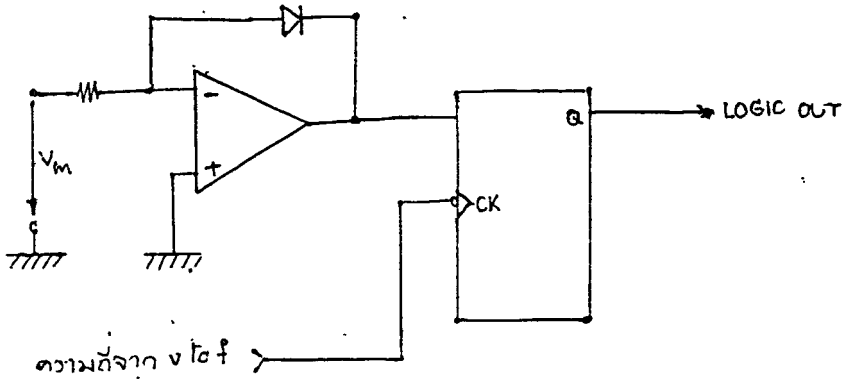
เอาท์พุทที่ได้จะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ถ้าสัญญาณโวลต์เตจอินพุทเป็นลบ จะได้สัญญาณเอาท์พุทมีค่าบวก และเมื่อพิจารณาความต้านทานของตัวป้อนกลับ จะได้ว่ามีค่าเป็นอนันต์ ดังนั้นเอาท์พุทบวกที่ได้จะมีค่าเป็นอนันต์ (ไดโอดต้านการนำกระแส) ดังนั้นเอาท์พุทค่าบวกที่ได้จะมีค่าเป็นอนันต์ (ซึ่งในทางปฏิบัติคือค่าไฟเลี้ยงบวกของออปแอมป์) หรือถ้าต้องการจะเช็คสัญญาณอินพุทเป็นบวก (คือเมื่ออินพุทเป็นบวก จะได้เอาท์พุทเป็นบวกด้วย) ก็อาจสร้างวงจรโดยใช้ ออปแอมป์ คอมพาราเตอร์ (Op - Amp Comparater) หรือนำวงจรจากรูป 3.3.1 มาต่อดังรูป



รูปที่ 3.3.2

ในรูปที่ 3.3.2 เมื่อสัญญาณเอาท์พุทของวงจร 3.3.1 มีค่าเป็นบวก สัญญาณนี้จะไปทำให้ทรานซิสเตอร์เกิดการนำกระแส ซึ่งจะได้เอาท์พุทของทั้งวงจรเป็นศูนย์ ซึ่งก็คือ เป็นศูนย์เมื่ออินพุทเป็นลบ และเมื่ออินพุทเป็นบวก เอาท์พุทของออปแอมป์เป็นศูนย์ ทำให้ทรานซิสเตอร์ไม่เกิดการนำกระแส สัญญาณเอาท์พุทของทั้งวงจรเป็นบวก (ลอจิก 1)

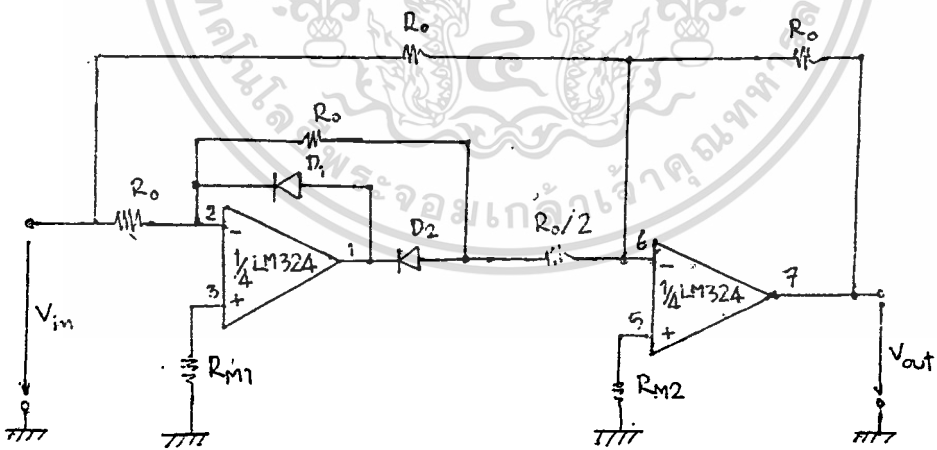
ในการทดลองมีปัญหาตอนปรับค่า ตรงบริเวณที่โวลต์เตจมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อเอาท์พุทจากวงจรเช็คเครื่องหมายเปลี่ยนสภาวะ ถ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงของอินพุทซ้ำจะเห็น (ถ้าเร็วก็เกิดแต่มองไม่เห็น) มีสัญญาณรบกวนมากมาย ดังนั้นจึงต้องแก้ด้วยการนำสัญญาณที่ได้ไปเข้าฟิลิปฟลอปที่มีคล็อก ซึ่งเกิดจากวงจรเปลี่ยนโวลต์เตจเป็นความถี่ จะได้สัญญาณที่ไม่มีรบกวน และได้เอาท์พุท 2 สภาวะ มาใช้ในการควบคุมทิศทางการหมุนดังวงจรรูป 3.3.3



รูป 3.3.3

วงจรรค่าสับบุรณะ

สัญญาณอินพุตจาก รีโซลเวอร์ (สัญญาณที่เข้าวงจรเซ็คเครื่องหมาย)
 เพื่อใช้เป็นค่าโวลต์เตจไปสร้างควมถี่ วงจรที่ออกแบบในการสร้างวงจรรคบบคุม แสดง
 ในรูปที่ 3.3.4



รูปที่ 3.3.4 วงจรรค่าสับบุรณะ

เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตโวลต์เตจที่มีทั้งค่าลบและค่าบวก เมื่อสัญญาณอินพุตเป็น
 บวก พิจารณาออปแอมป์ 1 จะได้เอาต์พุตขา 1 เป็นลบ (ค่าเท่ากันเนื่องจาก $R_f = R_0$)
 เมื่อพิจารณาที่ขา 6 จะมีโวลต์เตจเป็นศูนย์ ทำให้มีกระแสไหลผ่าน $R_0/2$ ค่า = 1,

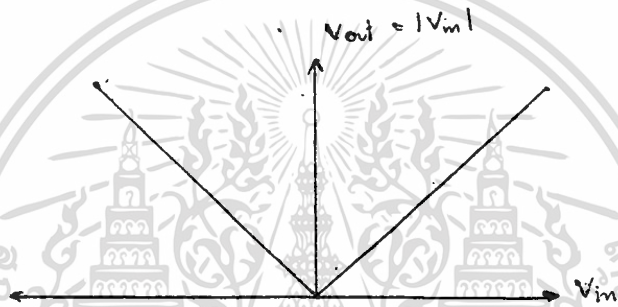
เอกสารนี้... เข้าไปในขา 1 และสัญญาณอินพุตจะมีกระแสไหลผ่าน R_0 มายังขา 6 มีค่า $1/2$ ดัง
 ไม่ว่ากรณีใดๆที่ลื่น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั้นกระแสที่ไหลมาจากเอาต์พุตขา 7 ผ่าน R_f ค่า $1_1/2$ จะได้ $R_f = R_o$ และสัญญาณเอาต์พุตมีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้นตามสัญญาณอินพุต

เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตเป็นลบ พิจารณาออปแอมป์ 1 จะใช้สัญญาณเอาต์พุตเป็นบวกที่ขา 1 ไดโอด D_1 นำกระแส แต่ไม่มีกระแสไหลผ่าน R_o ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตจะมีค่าเป็นศูนย์ D_2 ไม่นำกระแส สัญญาณอินพุตจะผ่าน R_o มายังขา 6 จะได้เอาต์พุตเป็นบวกที่ขา 7

นั่นคือเอาต์พุตของวงจรนี้จะให้วงจรค่าสัมบูรณ์ของสัญญาณอินพุต ดังกราฟรูปที่

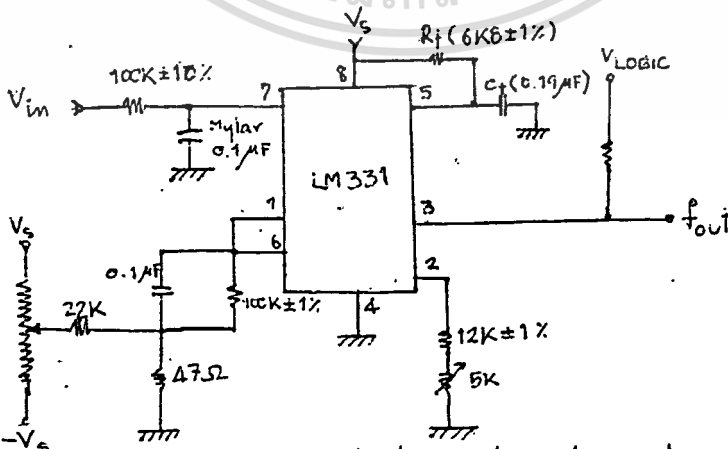
3.3.5



รูปที่ 3.3.5 กราฟแสดงการทำงานของวงจร

วงจรเปลี่ยนโวลต์เตจเป็นความถี่

สัญญาณโวลต์เตจที่ได้จากวงจรค่าสัมบูรณ์ จะถูกนำมาใช้สร้างความถี่เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์ โดยใช่วงจรดังรูป 3.3.6 สัญญาณความถี่ที่ได้มาจากวงจรนี้จะแปรค่าตามโวลต์เตจอินพุต (V_{in}) คือสัญญาณที่ได้ (F_{out}) มีค่า



รูป 3.3.6 วงจรเปลี่ยนโวลต์เตจเป็นความถี่

$$F_{out} = \{V_{in} * R_3 / [R_1 * R_2 * C_1]\} \quad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อปรับค่าความถี่ที่โวลต์เตจได้ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 3.3.6 โวลต์เตจที่ป้อนผ่าน R-10KΩ ตรงขา 3 ช่วยดึง (pull up) โวลต์เตจ ให้มีค่าโวลต์ลอจิก 1 ที่ต้องการ

ในการหาค่าความถี่ในการใช้งาน งานตัดเหล็กด้วยแก๊สใช้ความเร็ว (v) ไม่เกิน 3 เมตรต่อวินาที เส้นผ่านศูนย์กลางของดัลลูปปิ่นที่ใช้ช่วยขับ (d) มีค่าเท่ากับ 22 มิลลิเมตร (ทั้งสองแกน) มุมสเตป (α) มีค่า 0.9 องศา และความถี่ (f) ที่ทำให้มอเตอร์หมุนไปหนึ่งสเตปในเวลา T วินาที (1/f) หาได้จากขั้นตอนดังนี้

ในหนึ่งสเตประยะทางเคลื่อนที่ตามแนวราบและแนวนอนคือ $\epsilon \pi \alpha d / 360$ เมตร ความเร็วสูงสุดที่ต้องการมีค่าเท่ากับ v เมตรต่อวินาที ดังนั้นจะได้

$$\epsilon \pi \alpha d / 360 * T = v / 60$$

$$f = \{6 * v / \epsilon \pi \alpha d\} \quad (2)$$

แทนค่า v = 3 เมตรต่อวินาที, α = 0.9 องศา, d = 22 * 10⁻³ เมตร ลงใน (2)

$$f = 289.4 \text{ Hz} = 300 \text{ Hz}$$

จากสมการ (1) กำหนดให้ R_{inc(max)} = 17 * 10³ Ω, R_i = 100 * 10³ Ω,

$$R_c = 6.8 * 10^3 \text{ Ω}, f_{out} = 300 \text{ Hz}, V_{inc(max)} = 5 \text{ โวลต์}$$

ดังนั้นจะได้ C_c = 0.19 ไมโครฟารัด

วงจรจัดลำดับลอจิก

การออกแบบวงจรจัดลำดับลอจิกต้องคำนึงถึงการใช้งาน เกี่ยวกับทอร์ค, ความละเอียดของงานที่เราต้องการ

วงจรที่ใช้ในการทดลองเป็นวงจรที่ใช้กระตุ้นวงจรขับเคลื่อน 2-เฟส โดยกระตุ้นที่ละ 2 เฟส (ตาราง 3.3.1) และวงจรกระตุ้นวงจรขับเคลื่อน 1-2-เฟสซึ่งกระตุ้นทีละหนึ่งเฟส และสองเฟสสลับกันไป (ตาราง 3.3.2)

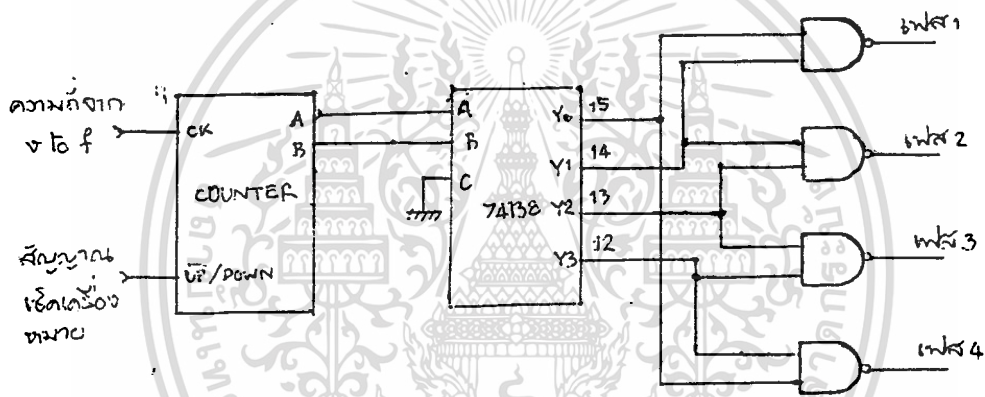
ตามเข็มนาฬิกา	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	ทวนเข็มนาฬิกา	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9
เฟส 1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	เฟส 1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
เฟส 2	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	เฟส 2	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
เฟส 3	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	เฟส 3	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
เฟส 4	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	เฟส 4	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ตาราง 3.3.1 กระตุ้นเฟสแบบ 2-เฟส อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

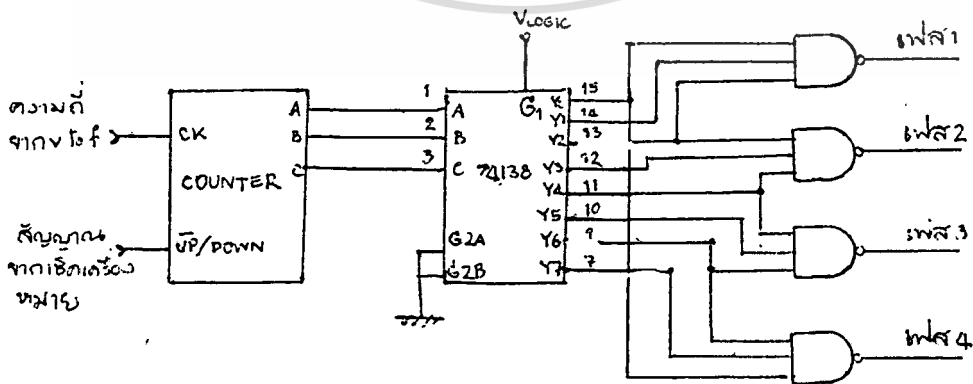
ตามเข็มนาฬิกา	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	ทวนเข็มนาฬิกา	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9
เฟส 1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	เฟส 1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
เฟส 2	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	เฟส 2	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
เฟส 3	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	เฟส 3	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
เฟส 4	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	เฟส 4	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1

ตาราง 3.3.2 กระตุ้นเฟสแบบ 1-2-เฟส

จากตารางสามารถนำมาสร้างวงจรได้ดังรูป 3.3.7 และ 3.3.6



รูป 3.3.7 วงจรกระตุ้นวงจรขั้วแบบ 2-เฟส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูป 3.3.8 ใช้วงจรกระตุ้นวงจรขั้วแบบ 1-2-เฟส นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรหม้อเตอร์

เนื่องจากหม้อเตอร์ที่ใช้ในการทดลองเป็นหม้อเตอร์แบบไฮบริดที่มีการพันชุดลวดแบบไบโพลาร์ จึงใช้วงจรขับแบบใช้คอนเดนเซอร์ป้องกันวงจร



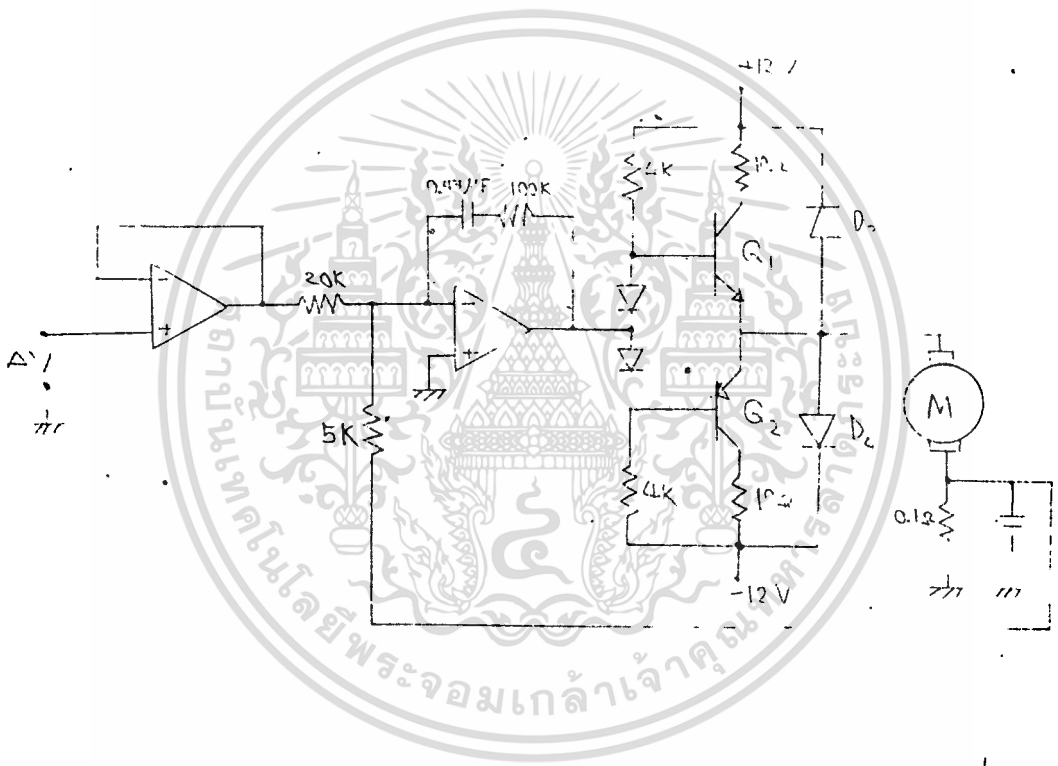
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 ส่วนควบคุม ดีซีมอเตอร์

4.1.1 การทดลองวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ แบบไบโพลาร์ลิเนียแอมพลิไฟเออร์ วงจร

ที่ใช้ทดลอง แสดงดังรูปที่ 4.1



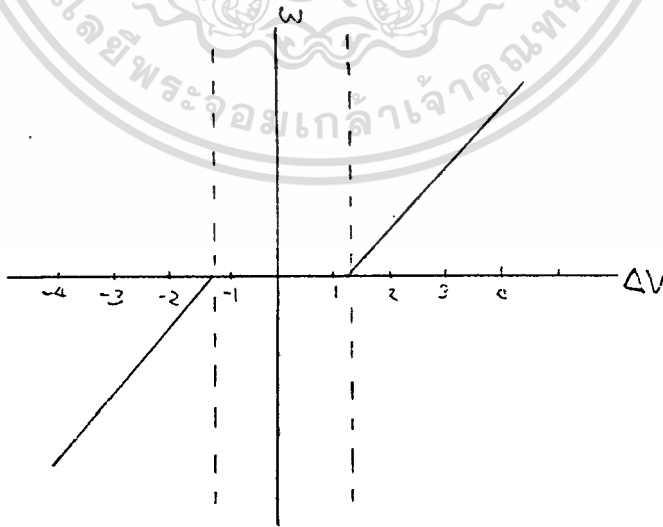
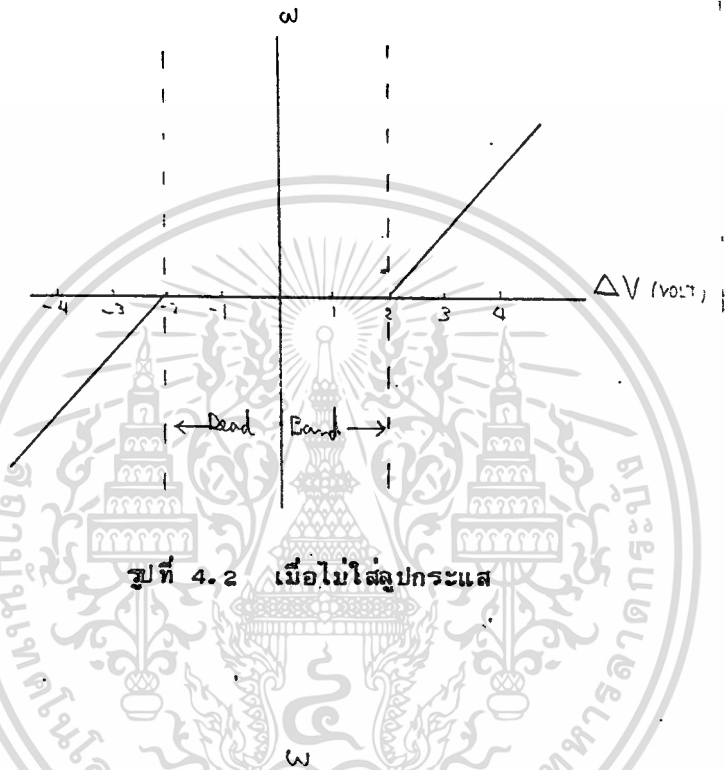
รูปที่ 4.1

จากวงจรในรูปที่ 4.1 ทρανซิสเตอร์ Q1 จะออนเมื่อสัญญาณโวลต์เตจอินพุทเป็นบวก ทรนซิสเตอร์ Q2 จะออนเมื่อสัญญาณอินพุทเป็นลบ ไดโอด D1 และ D2 ทำหน้าที่ชดเชยโวลต์เตจที่ตกคร่อมใน อิมิตเตอร์-เบส จังก์ชัน (Emitter-Base Junction) ของทรานซิสเตอร์ ไดโอด D3 และ D4 เป็นตัวป้องกัน รีเวอร์สโวลต์เตจ (Reverse Voltage) จากมอเตอร์ วงจรมีการป้อนกลับของกระแสในมอเตอร์ โดยใช้ความต้านทานค่าน้อย ๆ ต่ออนุกรมระหว่างมอเตอร์กับกราวด์ ซึ่งจะช่วยเพิ่มอัตราการขยายของ กระแสมอเตอร์ในช่วงตอนสตาร์ท เพื่อเพิ่มแรงบิดในการเอาชนะแรงเสียดทานสถิตย์ (Static Friction) การทำงานจะสามารถลดเดดแบตเตอรี่

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

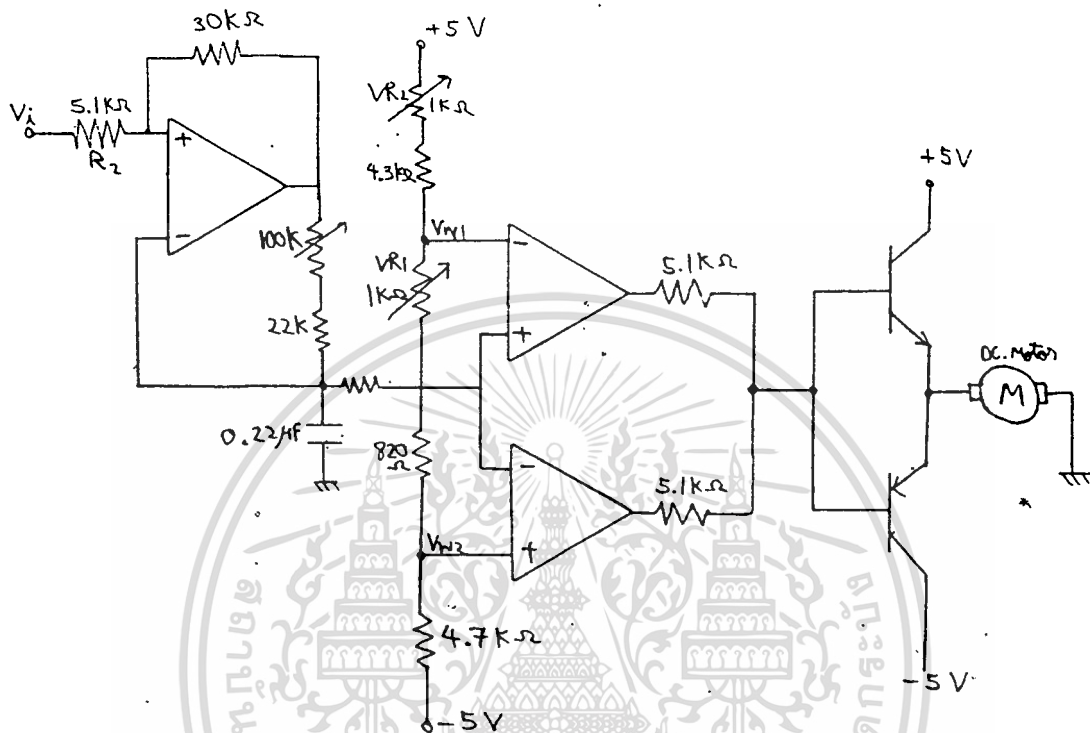
หว่างความเร็วของมอเตอร์กับขนาดโวลต์ที่เตจอินพุทได้

กราฟในรูปที่ 4.2 และ 4.3 เปรียบเทียบผลการตอบสนองของสัญญาณของความ
เร็วมอเตอร์กับ V (โวลต์เตจอินพุท) เมื่อใส่ลูปกระแส และไม่ใส่ลูปกระแส



4.1.2 การทดลองวงจรขับมอเตอร์แบบพัลส์วีดท์โมดูเลเตอร์ วงจรที่ใช้

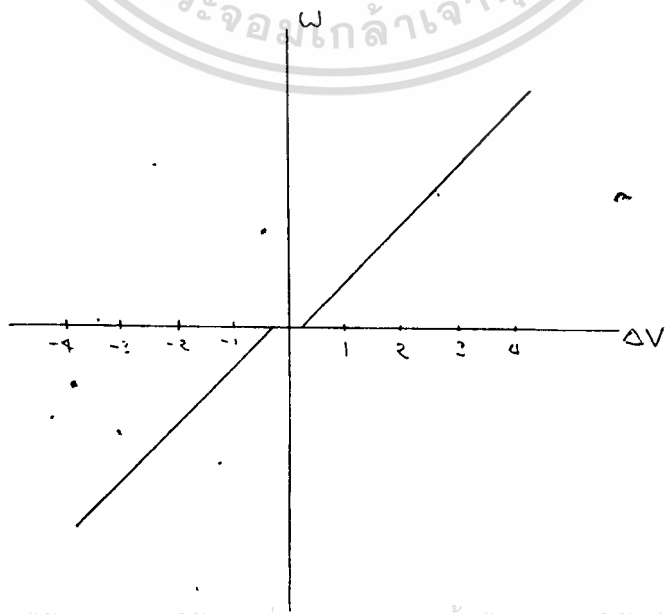
ทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4

ทำการทดลองดูผลตอบสนองของความเร็วมอเตอร์กับสัญญาณ โวลต์ เตจอินพุทได้

กราฟดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5

4.2 การทดลอง

เอาโวลต์เตจที่ได้จากรีโซลเวอร์มาเข้าวงจรซีคเครื่องหมายและวงจรถ้าสัมบูรณ์ เอาที่พุกจากวงจรถ้าสัมบูรณ์มาเข้าวงจรเปลี่ยนโวลต์เตจเป็นความถี่ สัญญาณความถี่ที่ได้ออกมาและสัญญาณที่ได้จากวงจรถ้าเครื่องหมายมาเข้าวงจรเรียงลำดับลอจิก ได้สัญญาณออกมาเข้าวงจรขับแบบที่ใช้ คอนเดนเซอร์ป้องกัน

ผลการทดลอง

1. เมื่อขับสเตปมอเตอร์โดยใช้การกระตุ้นแบบ 2 เฟส พบว่าที่ความเร็วต่ำ จะเกิดการสั่นและเกิดเสียงดัง
2. เมื่อขับสเตปมอเตอร์โดยใช้การกระตุ้นแบบ 1-2 เฟส จะแก้ปัญหการสั่นและเสียงดังได้ แต่ความหนาแน่นของการสเตปจะไม่ค่อยดี

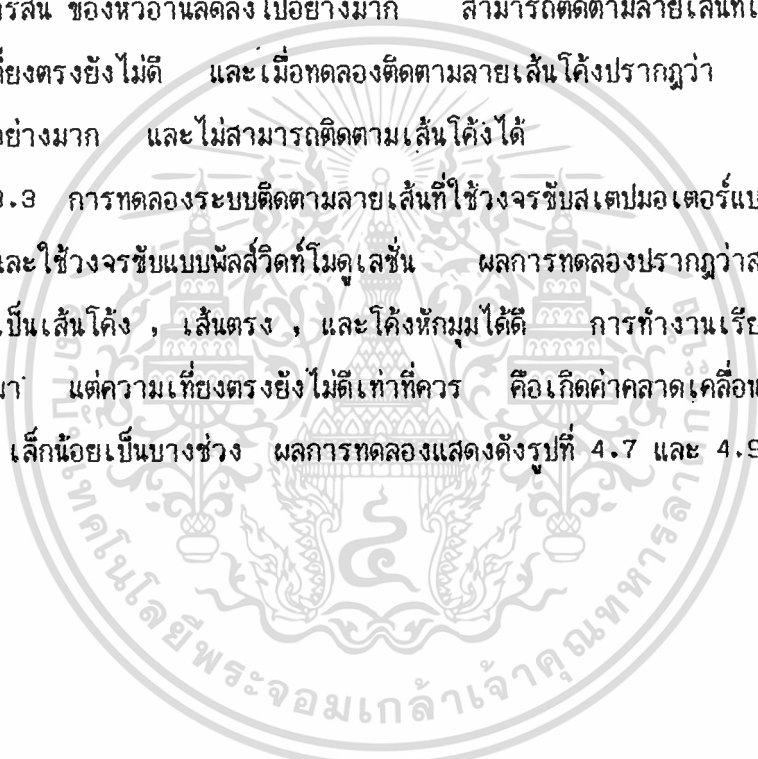


4.3 การทดลองระบบติดตามลายเส้นโดยรวม

4.3.1 การทดลองระบบติดตามลายเส้นที่ใช้วงจรขับสเตปมอเตอร์แบบกระตุ้น 2 เฟส และใช้วงจรดีซีมอเตอร์แบบไปโพลาร์ลิเนียร์แอมพลิไฟเออร์ ผลการทดลองปรากฏว่าไม่สามารถติดตามลายเส้นได้ เนื่องจากหัวอ่านมีการสั่นและแกว่ง (Oscillate) อย่างมาก

4.3.2 การทดลองระบบติดตามลายเส้นที่ใช้วงจรขับสเตปมอเตอร์แบบกระตุ้น 1-2 เฟส และใช้วงจรขับดีซีมอเตอร์แบบไปโพลาร์ลิเนียร์แอมพลิไฟเออร์ ผลการทดลองปรากฏว่าอาการสั่น ของหัวอ่านลดลงไปอย่างมาก สามารถติดตามลายเส้นที่เป็นเส้นตรงได้ แต่ความเที่ยงตรงยังไม่ได้ และเมื่อทดลองติดตามลายเส้นโค้งปรากฏว่า หัวเซนเซอร์มีการแกว่งอย่างมาก และไม่สามารถติดตามเส้นโค้งได้

4.3.3 การทดลองระบบติดตามลายเส้นที่ใช้วงจรขับสเตปมอเตอร์แบบ กระตุ้น 1-2 เฟส และใช้วงจรขับแบบพัลส์วิดท์โมดูเลชัน ผลการทดลองปรากฏว่าสามารถติดตามลายเส้นที่เป็นเส้นโค้ง , เส้นตรง , และโค้งหักมุมได้ดี การทำงานเรียบดีว่าการทดลองที่ผ่านมา แต่ความเที่ยงตรงยังไม่ได้เท่าที่ควร คือเกิดค่าคลาดเคลื่อน (Offset Error) เล็กน้อยเป็นบางช่วง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.9

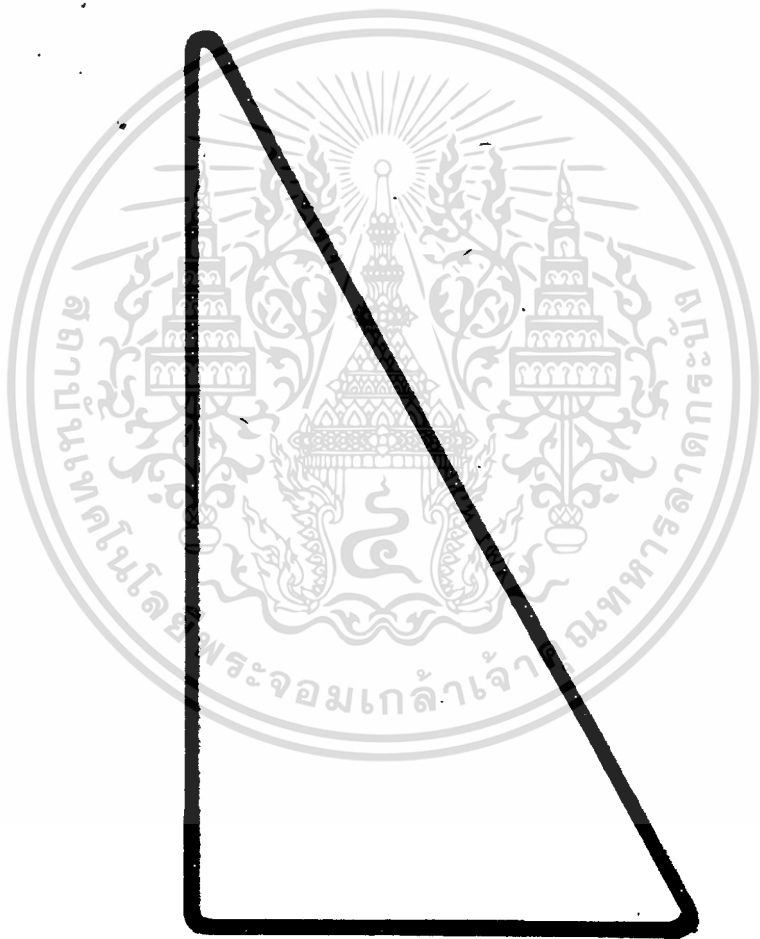




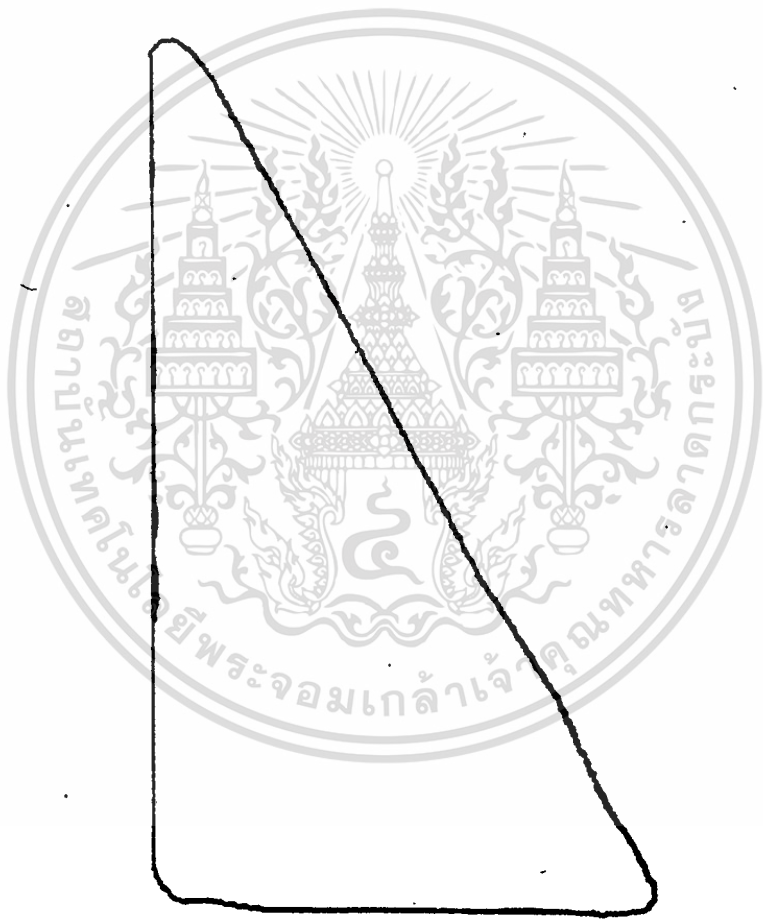
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ ห้ามมิให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.7 ผลการติดตามลายเส้นเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ P
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



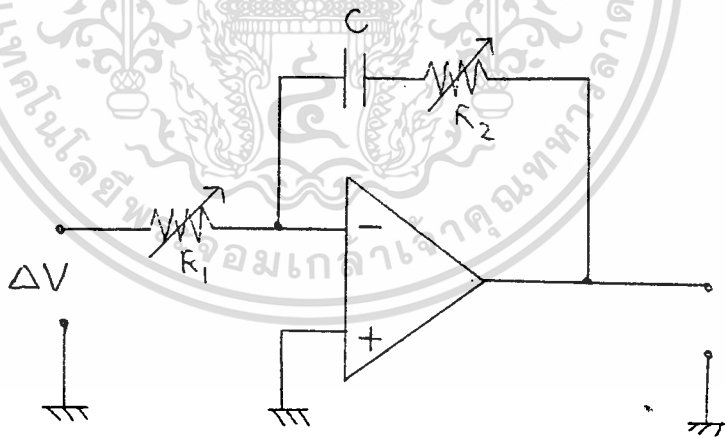
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เฉพาะที่อาคารเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ระบุว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.9 ผลการติดตามลายเส้นเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ P
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 การทดลองระบบติดตามลายเส้นที่ใช้วงจรขับมอเตอร์แบบกระตุ้น 1-2 เฟส และใช้ตัวควบคุมแบบพัลส์วีกต์โมดูเลชัน โดยใช้ตัวควบคุมแบบของลูการติดตามเป็นแบบ PI (Proportional Plus Integral Controller) เนื่องจากในการทดลองที่ผ่านมา เราใช้ลูการควบคุมแบบโดยตรง (Proportional Mode) ดังนั้นในการทดลองนี้ จึงได้ใช้ตัวควบคุมแบบ PI วงจรของตัวควบคุมที่ใช้แสดงดังในรูปที่

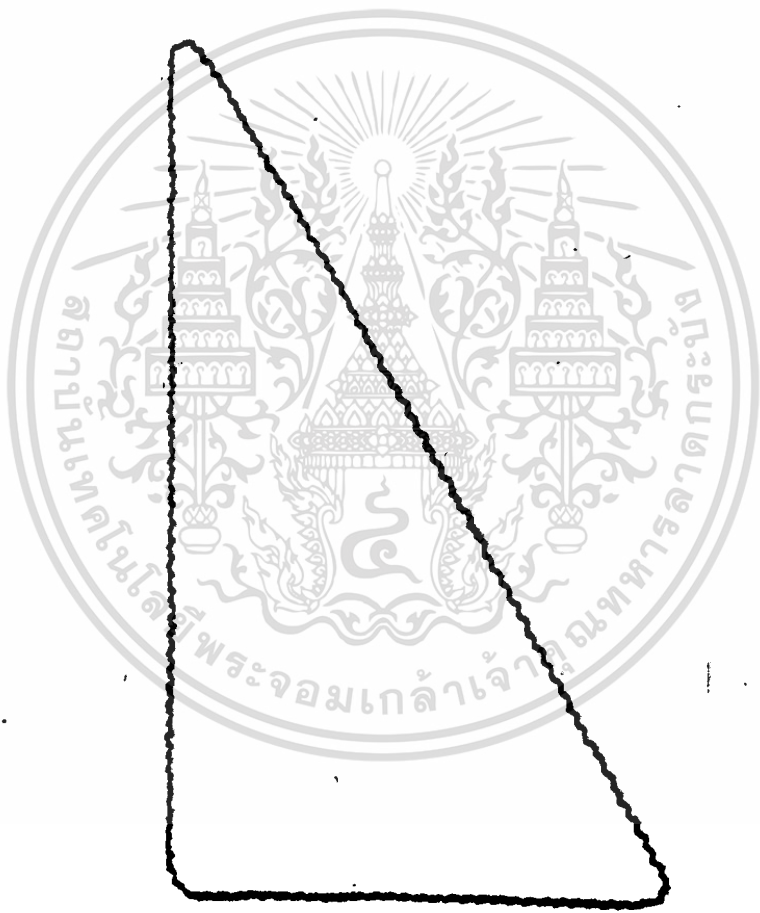
4.10 ผลการทดลองโดยใช้ต้นแบบเดียวกันกับหัวข้อ 4.3.3 จากการทดลองปรากฏว่าการใช้ตัวควบคุมแบบ PI นั้นจะทำให้หัวอ่านมีการแกว่งตลอดเวลาแม้ว่าจะได้มีการพยายามปรับค่าไทม์คอนสแตนท์ (Time Constant) และเกน (Gain) ของระบบแล้ว แต่ถึงแม้จะมีการแกว่งของหัวอ่านระบบก็ยังสามารถติดตามลายเส้นได้ เพื่อที่จะลดการแกว่งของหัวอ่าน เราได้ทำการ ทดลองลดเกนและเพิ่มไทม์คอนสแตนท์ของตัวควบคุม ปรากฏว่า ทำให้ระบบไม่สามารถติดตามลายเส้นได้ ผลการทดลองโดยใช้ต้นแบบเดิมแสดงไว้ในรูปที่ 4.11 และ 4.12



รูปที่ 4.10



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.11 ผลการติดตามลายเส้นเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ PI
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ผลการติดตามลายเส้นเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ PI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และห้ามมิให้เผยแพร่โดยไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุป

5.1 วิเคราะห์ผลการทดลองของส่วนควบคุมตีชิมอเตอร์

จากผลการทดลองวงจรตีชิมอเตอร์แบบไบโพลารีเนียร์แกมมาลิไฟเกอร์ จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการใส่ลูกระเบิด จะช่วยให้ผลการตอบสนองดีขึ้น แต่ค่าเดดไทม์จะยังคงมากอยู่ ทั้งนี้เป็นผลมาจากความเสียดทานสถิตย์

จากผลการทดลองตีชิมอเตอร์แบบแฟลส์วอร์ดโมดูลจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองดีมาก เดดไทม์ถูกลดลงไปอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากการอ่อนของทรานซิสเตอร์เป็นแบบ อิมิตเตอร์ที่อ่อน ดังนั้นจึงให้แรงบิดได้เต็มที่ และควบคุมความเร็วด้วยการเปลี่ยนตัวดีไอเคิล

5.2 ส่วนควบคุมสเตปมอเตอร์

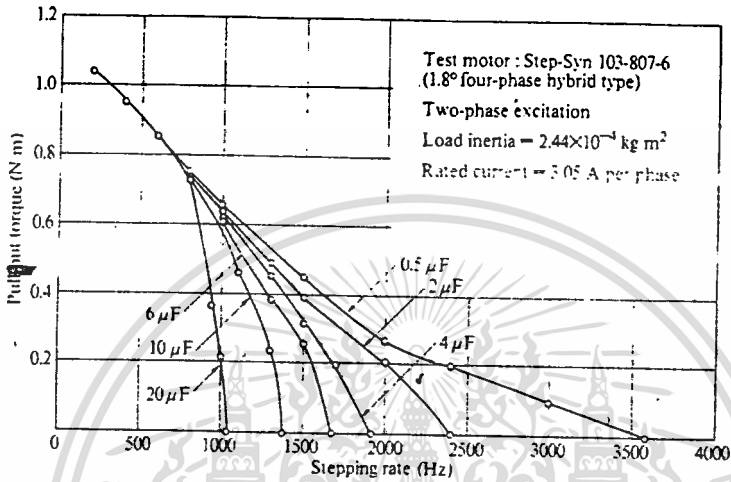
5.2.1 ในการทดลองวงจรซีเคอร์รี่มีสัญญาณออสซิลโลสโคปเกิดขึ้นบริเวณที่ค่าไวท์เตจจากรีโซลเวอ์ ไกล ๆ ศูนย์ แก้วไขโดยการผ่านสัญญาณที่ได้เข้าฟลิปฟลอป ที่ใช้คลิกที่ได้จากวงจรเปลี่ยนไวท์เตจเป็นความถี่ แล้วจึงให้สัญญาณที่ได้จากฟลิปฟลอปมาควบคุม ซึ่งทำให้ผลของการออสซิลเลทลดน้อยลง

5.2.2 จากการทดลองในตอนแรกใช้การกระตุ้นแบบ ทีละ 2 เฟส ซึ่งถึงแม้ว่าจะให้ทอร์คที่มากกว่า แต่ทำให้มีปัญหาเรื่องการสั่นที่ความเร็วต่ำ ซึ่งในการทำงานตัดเหล็กที่ต้องการความแน่นอน ควรจะให้มีการเคลื่อนที่ที่เรียบที่ความเร็วต่ำ จึงใช้วงจรกระตุ้นแบบ 1-2 เฟส ที่ทำให้มุมสเตปลดลงครึ่งหนึ่งจากแบบ 1 เฟส หรือแบบ 2 เฟส ซึ่งทำให้ลดการสั่นในการเคลื่อนที่ที่ความเร็วต่ำลงไปได้มาก แต่ถ้าต้องใช้การกระตุ้นแบบ 2 เฟส เพื่อให้ได้ทอร์คมากขึ้น ควรใช้ชั้มอเตอร์ที่ความเร็วสูงพอประมาณ แล้วให้ลูกลูกยางตรอบลงมา ให้เคลื่อนที่ได้ช้าลง

5.2.3 ปัญหาการสั่นของมอเตอร์เกิดขึ้นเนื่องจาก ตอนเริ่มสตาร์ทแต่ละเฟส, ที่ความเร็วบางค่าเนื่องจากการกำธ (Resonance) และเนื่องจากทางกล (Mechanic)

5.2.4 การใช้วงจรชั้มแบบใช้คอนเดนเซอร์ ทอร์คที่ได้ขึ้นอยู่กับค่าของคอนเดนเซอร์ที่ใช้ เมื่อใช้คอนเดนเซอร์ค่าต่ำ (0.22 μ F) ทอร์คจะมาก แต่ที่ความเร็วต่ำ

จะมีการสั่นและเกิดเสียงดัง เมื่อเปลี่ยนมาใช้คอนเดนเซอร์ที่มีค่าสูง ($470 \mu F$)
 ทอร์กที่ได้จะต่ำ แต่ที่ความเร็วต่ำจะได้การเคลื่อนที่ที่เรียบ ซึ่งเขียนกราฟแสดงการ
 เปรียบเทียบ ค่าคอนเดนเซอร์ค่าต่าง ๆ บนกราฟของความเร็วกับทอร์ก ดังรูปที่ 5.2.1



รูปที่ 5.2.1

สรุปได้ว่า คุณสมบัติของการหมุน จะเปลี่ยนแปลงอย่างมากตามระบบการกระตุ้นสนาม
 แม่เหล็ก , ระบบวงจรขับ และ โครงสร้างของวงจรที่เอาท์พุท ดังเห็นได้จากการ
 ทดลอง เราใช้กับงานที่ต้องการความละเอียด โดยการกระตุ้นแบบ 1-2 เฟส จะทำ
 งานเรียกว่าการกระตุ้นแบบ 2 เฟส

5.3 วิเคราะห์ผลการทดลองของระบบหัวอ่านตามสายเส้น

5.3.1 จากผลการทดลองระบบติดตามสายเส้น ที่ใช้วงจรขับมอเตอร์แบบ กระ
 ตุ้น 2 เฟส และใช้วงจรขับติชิมอเตอร์แบบไบโพลาลิเนียร์แอมพลิไฟเออร์ จะเห็นว่า
 ระบบไม่สามารถติดตามสายเส้นได้ เนื่องจากวงจรขับสเตปมอเตอร์แบบกระตุ้น 2 เฟส
 มีการสั่นอย่างมากโดยเฉพาะที่ความเร็วต่ำ และที่หัวอ่านมีการแกว่งอย่างมากทั้งนี้เนื่อง
 จากผลของเดดแบนด์ของวงจรขับติชิมอเตอร์แบบไบโพลาลิเนียร์แอมพลิไฟเออร์

5.3.2 จากผลการทดลองระบบติดตามสายเส้น ที่ใช้วงจรขับสเตปมอเตอร์
 แบบกระตุ้น 1-2 เฟส และใช้วงจรขับติชิมอเตอร์แบบไบโพลาลิเนียร์แอมพลิไฟเออร์ จะ
 เห็นว่าการสั่นของหัวอ่านลดลงไปอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากมุมของการสแตปจะน้อยกว่าการ
 กระตุ้นแบบ 2 เฟส ครั้งหนึ่ง ทำให้วิ่งได้เรียบขึ้น แต่การแกว่งของหัวอ่านยังคงมีอยู่
 ทั้งนี้เนื่องจากผลของเดดแบนด์ของวงจรขับติชิมอเตอร์ แบบไบโพลาลิเนียร์แอมพลิไฟเออร์

ทำให้ไม่สามารถติดตามลายเส้นที่เป็นเส้นโค้งหรือหักมุมได้

5.3.3 จากผลการทดลองระบบติดตามลายเส้นที่ใช้วงจรถับมอเตอร์แบบ 1-2 เฟส และใช้วงจรถับดีซีมอเตอร์แบบพัลส์วิดท์โมดูเลชัน และใช้ตัวควบคุมแบบ P จะเห็นว่าระบบสามารถติดตามลายเส้นได้เป็นอย่างดี การแกว่งของหัวอ่านลดลงไปอย่างมาก สามารถติดตามลายเส้นตรง , เส้นโค้ง หรือ โค้งหักมุมได้ดี แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างเล็กน้อย

5.3.4 เมื่อเพิ่มตัวควบคุมแบบ PI เข้าไปในลูบการติดตาม จากผลการทดลอง จะเห็นว่าเพื่อที่จะให้ระบบสามารถติดตามลายเส้นได้เราต้องปรับให้ตัวควบคุมมีไทม์คอนสแตนท์น้อย และเกน สูงพอสมควรซึ่งจะทำให้หัวอ่านมีการแกว่งตลอดเวลา ลักษณะการปรับแบบนี้เป็นการปรับเพื่อให้ระบบมีการตอบสนองแบบ อันเดอร์แดมพ์ (Underdamped) แต่เนื่องจากลักษณะของระบบการควบคุมนี้เซตพอยท์ (Set Point) ซึ่งก็คือค่ามุมของเส้นที่ติดตาม มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ถึงแม้เส้นที่ติดตามจะเป็นเส้นตรง ก็มีผลคลาดเคลื่อนจากช่วงการสแต็ปของสเตปมอเตอร์ ซึ่งผลจากเซตพอยท์ที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทำให้หัวอ่านมีการแกว่งตลอดเวลาที่ติดตามลายเส้น เมื่อเราทดลองปรับตัวควบคุมเพื่อให้ระบบตอบสนองในแบบโอเวอร์แดมพ์ (Overdamped) โดยหวังจะแก้การแกว่งของหัวอ่าน แต่ปรากฏว่าระบบไม่สามารถติดตามลายเส้นได้ เนื่องจากผลตอบสนองช้าเกินไป

สรุป จากที่ได้ทำการทดลองมาจะเห็นว่า ระบบหัวอ่านตามลายเส้นนั้น ควรใช้วงจรถับสเตปมอเตอร์แบบ 1-2 เฟส และวงจรถับดีซีมอเตอร์แบบพัลส์วิดท์โมดูเลชัน และควรใช้ตัวควบคุมแบบ P ถึงว่าระบบจะมีความคลาดเคลื่อนบ้างเล็กน้อย แต่ก็ให้การตอบสนองได้เร็วกว่า แบบ PI

หนังสืออ้างอิง

1. มนตรี พรพรัตน์ , " เครื่องตัดแผ่นเหล็กด้วยแก๊สระบบอัตโนมัติ " , ปรินทิงงานิพนธ์ , 42 หน้า , 2529
2. มนัส สังวรศิลป์ , " การทำงานและการใช้งานสเตปมอเตอร์ " , วารสารอิเล็กทรอนิกส์เวิลด์ , ฉบับที่ 76 , 2526 , หน้า 91 - 96
3. รศ.ดร. โยธิน เปรมปราชญ์ , " วิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์ " , บริษัทอิเล็กทรอนิกส์เวิลด์ จำกัด , 2528 , หน้า 111 - 179
4. Takashi Kenjo , " Stepping Motors and Their Microprocessor Controls " , CLARENDON PRESS - OXFORD , 239 P. , 1984
5. Paul Giacomo , " A STEPPING MOTOR PRIMER " , Byte , Vol. 4 No. 2 , 1979 , pp. 90 - 105
6. Paul Giacomo , " A STEPPING MOTOR PRIMER " , Byte , Vol. 4 No. 3 , 1979 , pp. 142 - 149
7. " Precision Voltage-to-Frequency Converters " , NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION - Linear Databook " , 1982 , pp. (8-251) - (8-261)
8. Friedrich Frohr and Fritz Orttenger , " Introduction to Electronic Control Engineering " , 1982 , pp.183 - 187 , pp.222 - 305
9. David F. Stout and Milton Kaufman , " Handbook of Operational Amplifier Circuit Design " , 1976 , pp. (20-1) - (20-7)
10. Shafi Motiwalla , " Continuous Path Control with Stepping Motors " , Part 1 - 2 , 1983 , pp.58 - 80

กิติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. โภทศ เพ็ชรสุวรรณ

รศ.ดร. โยธิน .เปรมปราชญ์รัชต์

อ. วันชัย รุ่งรุจา

อ. วรศักดิ์ จิตรภักดี

อ. เกียรติวรรณ ทรงสิทธิ์

คุณ มนตรี พรหมรัตน์

และเจ้าหน้าที่ภาควิชาระบบควบคุม ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวก
ตลอดจนให้คำปรึกษาอันมีค่า ทำให้ผลงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

