



ชุดขับเคลื่อน STEPPING MOTOR สำหรับควบคุมการทำงานในตำแหน่ง X-Y
STEPPING MOTOR DRIVE FOR X-Y POSITIONED CONTROL



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2534

ปริญญาโทนศปีการศึกษา 2534

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ชักซ์เคลื่อน STEPPING MOTOR สำหรับควบคุมการทำงานในตำแหน่ง X-Y

ผู้จัดทำ

- | | | |
|---------------|-----------------|---------|
| 1. นาย นกต | อรชร | 31-1122 |
| 2. นาย นลิน | พิพิธวราภ | 31-1128 |
| 3. นาย สามารถ | เล่าเจริญสมบัติ | 31-1327 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดขับเคลื่อน STEPPING MOTOR สำหรับควบคุมการทำงานในตำแหน่ง X-Y

นายมงคล อรชร
นายณลิน พิพิธารม
นายสามารถ เล้าเจริญสมบัติ

รศ.ดร. วริยะ พิเชฐจำเริญ
(อาจารย์ที่ปรึกษา)
ปีการศึกษา 2534

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ทำการศึกษาและทำส่วนวงจรซีเคอร์เนชอร์ วงจรเลือกขับ X-Y และวงจรขับ Stepping Motor 2 ตัว ตลอดจนได้นำไปทดลองใช้งานเป็นเครื่องควบคุมการขับเคลื่อนในแนวแกน X-Y โดยทำการสร้างวงจรขับ Stepping Motor และได้ทำส่วนส่งกำลังทางกล (mechanic) ทั้ง 2 แกน ซึ่งประกอบด้วย Stepping Motor และ Power Screw ขับในแนวแกน X และ Y และได้ใช้ภาษา C เป็นโปรแกรมควบคุมการทำงาน โดยพบว่าจะสามารถควบคุมให้เคลื่อนที่ได้ในแนวแกน X-Y ในบริเวณเนื้อที่ $30 \times 30 \text{ cm}^2$ วัสดุอุปกรณ์ดังกล่าวสามารถนำไปใช้งานขับเคลื่อนต่างๆ เช่น เครื่องเจาะปริ้นท์ และเครื่องวางอุปกรณ์และชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์บนผิวหน้าของแผ่น PCB เป็นต้น

STEPPING MOTOR DRIVE FOR X-Y POSITIONED CONTROL

NOPPADOL ORACHORN

NALIN PIPITAWAN

SAMART LAOCHAROENSOMBAT

ASSOCIATE PROFESSOR

VIRIYA PICHETJAMROEN

(ADVISOR)

1991

ABSTRACT

In this project we have studied and developed Sequencer circuit and X-Y driver selector and two stepping motor drivers. Then the proto-type was accuracy applied as a stepping motor drive controller both in X and Y axes. This can be obtained by using stepping motor drives circuits and the two-axes mechanical power transfer structure which is composed of two stepping motors and two sets of power screws for driving in X and Y axes. The program used to control the sequence of operation has been designed in C language. It is founded that this machine can be position-controlled in X-Y axes in the area of 30x30 square-centimetres. This Equipment can be applied in various driving systems. For example, a hole-drilling machine in PCB and the surface-mounted (SMT) etc.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	4
ABSTRACT	5
สารบัญ	
บทที่ 1 บทนำ	8
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการทำงานของ Stepping Motor	10
2.1) นิยามของ Stepping Motor	10
2.2) หลักการทำงานของ Stepping Motor	10
บทที่ 3 การแบ่งชนิดของ Stepping Motor	12
3.1) Variable Reluctance Stepping Motor	12
- VR Stepping Motor แบบมีสเต็ปเดียว	12
- VR Stepping Motor แบบหลายสเต็ป	16
- การทำงานของ VR Stepping Motor ที่มี 3 สเต็ป	17
3.2) Permanent Magnet Stepping Motor	21
3.3) Hybrid Stepping Motor	23
- ลักษณะโครงสร้างของไฮบริดสเต็ปมอเตอร์	24
- การทำงานของไฮบริดสเต็ปมอเตอร์	24
บทที่ 4 การกระตุ้น (Stepping Motor Excitation)	28
1) กระตุ้นเฟสเดียว (one phase excitation)	29
2) กระตุ้น 2 เฟส (two phase excitation)	29
3) กระตุ้นครึ่งสเต็ป (half step excitation)	30
บทที่ 5 การทดสอบคุณสมบัติ (Performance Testing)	31
5.1) ความต้านทาน (Resistance)	31
5.2) อินдукแตนซ์ (Inductance)	32
5.2.1) Self Inductance	32
5.2.2) Mutual Inductance	32
5.3) Back emf	36
5.4) Step Angle Error and Hysteresis	39

	5.5) Stress Test	42
	5.6) Pull In/Pull Out Torque	43
	5.6.1) Pull In Torque	43
	5.6.2) Pull Out Torque	43
	5.7) Detent Torque (Residual Torque)	47
	5.8) Holding Torque	47
	5.9) Friction Torque	48
	5.10) Snow Plaw Testing	48
	5.11) Single Step	49
บทที่ 6	ทฤษฎีเกี่ยวกับ 8253	51
บทที่ 7	ส่วนประกอบสำคัญในการควบคุมมอเตอร์	53
	7.1) Program Control	53
	7.2) Interface	53
	7.3) Control Circuit	54
	7.4) Sequencer	56
	7.5) Driver Circuit	56
บทที่ 8	สรุปและวิจารณ์	59
กิจกรรมประกาศ		60
หนังสืออ้างอิง		61

บทที่ 1

บทนำ

Stepping Motor เป็นมอเตอร์ชนิดที่หมุนทีละ step โดยแต่ละ step มอเตอร์จะหมุนด้วยมุมคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งในการควบคุมการหมุนของ stepping Motor นั้น จะอาศัยวงจรควบคุมทางดิจิทัล โดยที่วงจรทางดิจิทัลนี้จะทำหน้าที่ในการจัดลำดับ การกระตุ้นในแต่ละเฟสของ Stepping Motor ซึ่งจะทำให้สามารถกำหนดทิศทางการ หมุน, ความเร็วในการหมุนและตำแหน่งที่ต้องการจะเลื่อนไปของ Stepping Motor ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

เนื่องจากวงจรทางดิจิทัลที่ใช้ในการควบคุมการหมุนของ Stepping Motor สามารถกำหนดความเร็วในการหมุนและตำแหน่งที่ต้องการจะเลื่อนไปของ STEPPING MOTOR ได้อย่างถูกต้องแม่นยำดังนั้นก็จึงไม่จำเป็นต้องมีการ FEEDBACK เพื่อ ควบคุมความเร็วและตำแหน่งในการหมุน เพราะฉะนั้นเราอาจจะกล่าวได้ว่าระบบควบคุม การหมุนของ STEPPING MOTOR เป็นแบบ open-loop control system แต่ในการ หมุนของ stepping motor นี้ก็มีข้อเสียคือในบางช่วงของความเร็วในการหมุนของ stepping motor อาจจะทำให้เกิดการออสซิลเลชันที่แกนเพลลาของมอเตอร์ได้และอาจจะ ทำให้ออสซิลเลชันเกิดการ unstable ได้

สำหรับการประยุกต์การใช้งานของ Stepping Motor มีดังนี้คือ

- 1) อุปกรณ์ประกอบการทำงานของคอมพิวเตอร์
 - Serial printer
 - X-Y plotter
 - Floppy Disk Drives
- 2) ระบบ numerical control
 - X-Y table and index table
 - Driller Machine
 - Automatic drafting Machine
- 3) การประยุกต์ใช้งานอื่น
 - Facsimiles
 - Semiautomatic wiring unit
 - Application in spec science



สำหรับ Project นี้ เราสามารถใช้งาน Stepping Motor เพื่อใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกน X และแกน Y โดยได้นำเอา Stepping Motor มาใช้ในการขับ Power Screw ให้ทำงาน ซึ่งจะทำให้เราสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกน X และแกน Y ได้



บทที่ 2

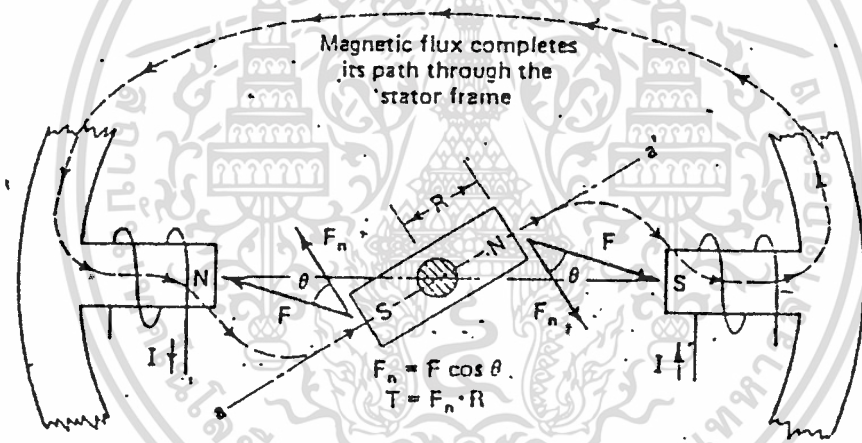
ทฤษฎีและหลักการทำงานของ Stepping Motor

2.1) นิยามของ Stepping Motor

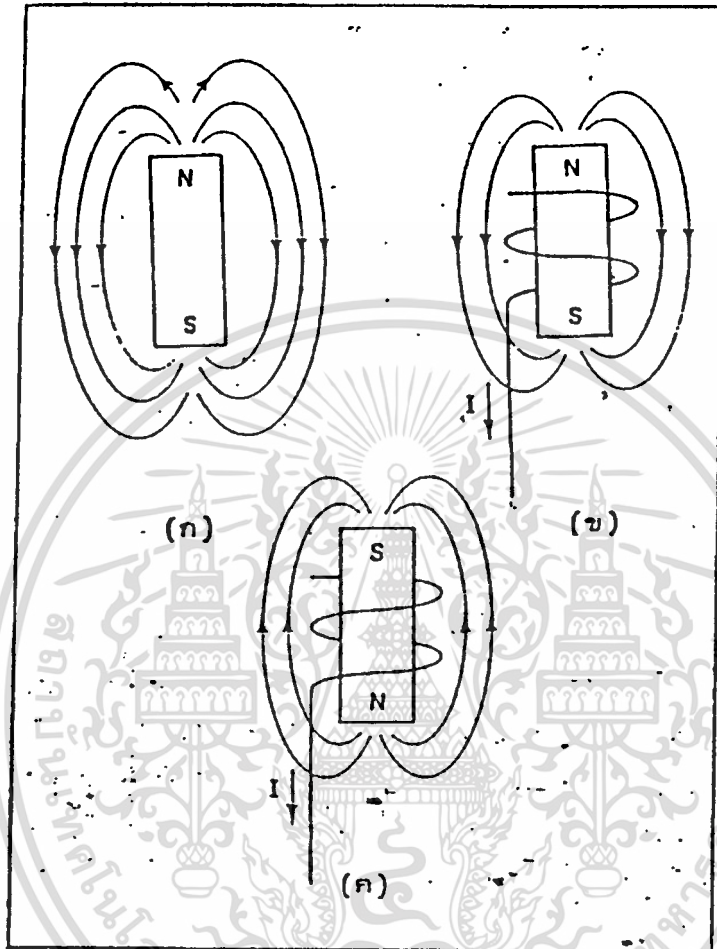
- จะมีเพลาหมุนเป็นสลับ
- ป้อนอิเล็คตริกด้วยพัลส์ที่มีความถี่ค่าหนึ่ง
- จะสลับไปทีละสเตปตามแต่ละพัลส์
- ขนาดของสเตปขึ้นอยู่กับการออกแบบ Stepping Motor
- จะสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยความถี่และความกว้างของพัลส์

2.2) หลักการทำงานของ Stepping Motor

- แรงแม่เหล็กที่เกิดจากการดึงดูดของขั้วแม่เหล็กที่ต่างกันทำให้เกิดส่วนของแรง $F_n = F \cos \theta$ (แรงตั้งฉากกับแกน a-a')
- แรงบิดรวม $T = F_n \cdot R$



รูปที่ 1 แสดงแรงดึงดูดทำให้เกิดแรงบิดที่หมุนแอมเจอร์ให้ไปอยู่ในตำแหน่งสมดุล ถ้าหากมีขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าหลายขั้วรอบสเตเตอร์ และถ้าขั้วเหล่านี้ถูกกระตุ้นด้วยกระแสพัลส์สลับแบบที่เรียงลำดับกันไป แอมเจอร์ก็จะหมุนเป็นรูปลักษณะของสเตปที่เป็นไปตามการหมุนของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการสลับที่เรียงลำดับของขดลวดขั้วแม่เหล็กไฟฟ้าบนสเตเตอร์



รูปที่ 2 แสดงถึงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในลักษณะต่างๆ

- ก) สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากแม่เหล็กถาวร
- ข) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากกระแส I
- ค) ขั้วแม่เหล็กกลับทิศทาง เมื่อขดลวดถูกพันกลับทิศ การไหลของกระแสไม่เปลี่ยนแปลง

บทที่ 3

การแบ่งชนิดของ Stepping Motor

แบ่งชนิดตามลักษณะโครงสร้างได้ 3 ชนิด คือ

- 1) Variable Reluctance
- 2) Permanent Magnet
- 3) Hybrid

3.1) Variable Reluctance Stepping Motor

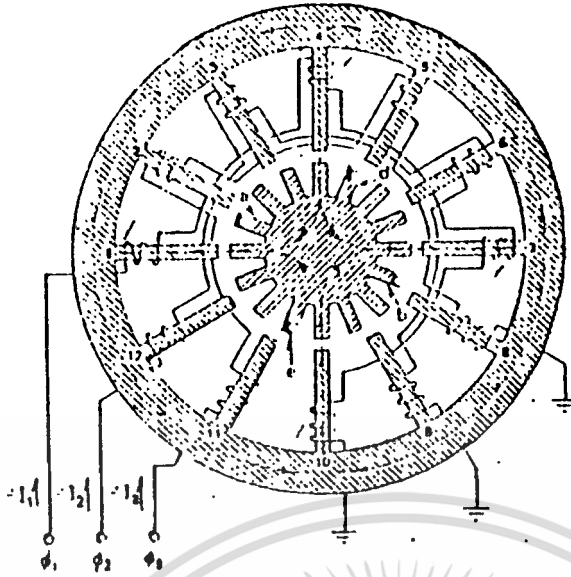
มอเตอร์ชนิดนี้ไม่มีโรเตอร์เป็นซี่ฟัน และเป็น soft iron ตัวสเตเตอร์ถูกพันด้วยขดลวดตามปกติ การหมุนเกิดขึ้นได้โดยเราให้กระแสไฟฟ้าต่อขดลวดที่พันบนสเตเตอร์ทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กไปดึงดูดทำให้โรเตอร์หมุนได้ตามตำแหน่งของ Stator Pole ที่ต้องการ Rotor Inertia ของมอเตอร์ชนิดนี้ค่าต่ำและมี response ที่เร็ว ถ้าขดลวดไม่ได้ถูก energize แล้ว static torque ของมอเตอร์ชนิดนี้จะมีความเป็นศูนย์

- VR Stepping Motor แบบมีสเต็คเดียว

โครงสร้างของ VR Stepping Motor จะแสดงไว้ดังรูปที่ 3 VR Stepping Motor ที่มีสเต็คเดียวจะมีโรเตอร์เดี่ยว และ VR Stepping Motor แบบหลายสเต็คจะหมายถึงมีหลายโรเตอร์ ซึ่งทำจากสารแม่เหล็ก ส่วน Stepping Motor ในรูปที่ 4 มี 3 เฟส แต่ละเฟสใช้ขดลวดที่แทน 4 ขั้วหรือซี่ฟันของสเตเตอร์

ตัวอย่าง เฟสที่ 1 พัดอยู่ที่ 1, 4, 7, 10 ของสเตเตอร์ ดังนั้นสเตเตอร์จะมี 12 ซี่ฟัน และในขั้นนี้กำหนดให้โรเตอร์มี 16 ซี่ฟัน ขั้วของสเตเตอร์ที่อยู่ตรงกันข้ามจะพันด้วยขดลวดในลักษณะที่ต่างกัน เพื่อให้มีความสมดุลระหว่างเส้นแรงแม่เหล็ก เข้าและออกจากโรเตอร์

โดยที่	เฟส (1) = 1, 4, 7, 10
	เฟส (2) = 12, 3, 6, 9
	เฟส (3) = 2, 5, 8, 11
	(ดังรูปที่ 3)



รูปที่ 3 VR Stepping Motor แบบสเต็ปเดี่ยว

ซึ่งมีรายละเอียดโครงสร้างดังนี้ $N_r = 16$, $N_s = 12$, $X = 4$ โพล/เฟส ,
 $\theta_s = 7.5$ องศา , $R_s = 48$ สเต็ป/รอบ

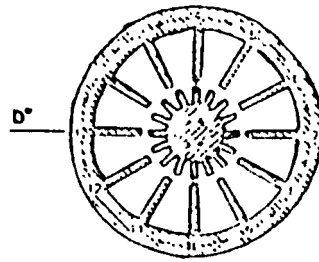
สมมติว่ากระแส I_1 บ่อนำให้กับเฟสที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3 และโรเตอร์ทั้ง 4 ขั้วจะอยู่ในแนวขั้วที่ 1, 4, 7, 10 ของสเตเตอร์ เส้นแรงแม่เหล็กจะเข้าสู่โรเตอร์จากขั้วที่ 4 และ 10 และออกจากโรเตอร์ไปยังขั้วของสเตเตอร์ที่ 1 และ 7 ซึ่งเป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กที่ครบวงจรโดยผ่านโครงสร้างของสเตเตอร์ เราจะสังเกตได้ว่าปลายของขั้วโรเตอร์ซึ่งอยู่ในแนวเดียวกับขั้วที่ 4 ของสเตเตอร์จะเป็นเส้นทางผ่านเข้าไปยังโรเตอร์ของเส้นแรงแม่เหล็กอย่างคอค เนื่องจากช่องว่าง (GAP) ระหว่างขั้วทั้งสองที่อยู่แนวเดียวกัน ส่วนที่เหลือของสเตเตอร์และโรเตอร์ที่เหลืออีก 3 คู่ก็เกิดลักษณะของแม่เหล็กในตัวเองเดียวกัน

ในสภาวะต่อไปเราจะให้โรเตอร์หมุนไป 1 สเต็ปในทิศทาง CW เราจะต้องจ่ายพลังงานให้กับเฟส 3 ที่มีขั้วคอคพ้อยู่บนขั้วที่ 2, 5, 8, 11 ของสเตเตอร์ด้วยกระแส I_3 หลังจากหยุดกระแส I_1 แล้วในตอนนี้เส้นแรงแม่เหล็กจะหาทางเดินที่ต่างไปจากเดิมเพื่อทำให้งจรแม่เหล็กครบวงจร (เหมือนกับกระแสไฟฟ้าจะหาเส้นทางไหลในส่วนที่

ความต้านทานต่ำสุด) ในทำนองเดียวกันเส้นแรงแม่เหล็กในวงจรมแม่เหล็กก็จะหาทางเดินที่มีรีลักแตนซ์ต่ำสุด ช่องว่างอากาศระหว่างขั้วนี้จะทำให้เกิดค่ารีลักแตนซ์ต่อ เส้นแรงแม่เหล็ก ช่องว่างกว้างมากค่ารีลักแตนซ์ก็จะมีค่ามาก ด้วยเหตุผลดังกล่าว เส้นแรงแม่เหล็กจะออกจากขั้วที่ 2 และ 8 ของสเตเตอร์ซึ่งถูกทำให้เป็นขั้วเหนือและ เส้นแรงแม่เหล็กนี้จะกระโดดผ่านช่องว่างไปยังขั้วของโรเตอร์ที่ใกล้ที่สุด ขั้วที่ a และ b ของโรเตอร์เป็นโรเตอร์ที่อยู่ใกล้ที่สุดและจะถูกเหนี่ยวนำให้เป็นขั้วใต้ เส้นแรงแม่เหล็กจะออกจากขั้วที่ d และ e ของโรเตอร์ผ่านช่องว่างอากาศเข้าสู่ขั้วที่ 5 และ 11 ของสเตเตอร์ ดังนั้น ส่วนที่เหลือของวงจรมแม่เหล็กจะสมบูรณ์โดยผ่านโครงร่างของสเตเตอร์ ในช่วงเวลานั้นแรงแม่เหล็กหรือแรงดึงดูดจะเกิดขึ้นระหว่างขั้วที่ 2 ของสเตเตอร์(ถูกเหนี่ยวนำเป็นขั้วเหนือ) และขั้วที่ a ของโรเตอร์(ถูกเหนี่ยวนำเป็นขั้วใต้) แรงดึงดูด จะเกิดขึ้นระหว่างคู่ขั้ว (11,e) , (8,6) , (5,d) ดังได้อธิบายในรูปที่ 2 ผลที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้เกิดทอร์คกระทำต่อโรเตอร์หมุนไปจนกระทั่งขั้วที่ a, d, b, e ของโรเตอร์อยู่ใ้แนวเดียวกับขั้วที่ 2, 5, 8 และ 11 ของสเตเตอร์ตามลำดับ ขณะเวลาดังกล่าวที่ช่องว่างระหว่างขั้วที่ตามลำดับจะมีค่าน้อยที่สุด ผลลัพธ์ของค่ารีลักแตนซ์จะมีค่าต่ำที่สุดและ เส้นแรงแม่เหล็กจะมีค่าสูงสุดผ่านวงจรมแม่เหล็กที่ตัวแท่งนี้ เป็นตำแหน่งที่สมมูลของการขั้วเฟส 3 ในกระบวนการที่กล่าวมาแล้วว่าโรเตอร์จะ เคลื่อนเข้าทิศทาง CW ที่มุมสเตปเป็น 7.5° ลำดับการทำงานที่สมมูลแสดงได้ดังรูปที่ 4 เมื่อตำแหน่งเริ่มต้นของขั้วที่ของโรเตอร์จะ เป็นสี่ค่า เพื่อให้เราทำความเข้าใจได้ชัดเจนถึงการหมุนของโรเตอร์ในทิศทาง CW เมื่อเฟสถูกขั้วในลักษณะ เรียงลำดับ 1-3-2-1 ขั้วที่ของโรเตอร์ที่เป็นสี่ค่าจะเคลื่อนที่ไป 3 สเตปเป็นมุมได้เท่ากับ 22.5° เราจะขั้วเฟสในลักษณะ เรียงลำดับ เดิมซ้ำใหม่อีก เมื่อต้องการให้โรเตอร์หมุนต่อในทิศทาง CW แต่ถ้าเราต้องการให้โรเตอร์หมุนในทิศทาง CCW เราต้องกลับการเรียงลำดับเฟสเป็น 1-2-3-1

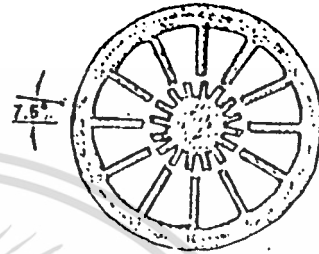
ตำแหน่งโรเตอร์ เริ่มต้น :

- เฟส θ_1 ได้รับพลังงาน
- ชี้นของโรเตอร์จะอยู่ในแนวที่ฟันที่ 1, 4, 7, 10 ของสเตเตอร์



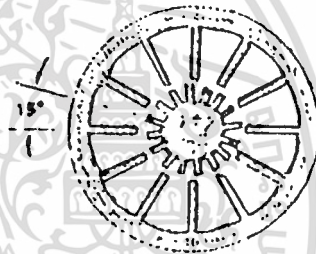
สเตปที่ 1 : เฟส θ_2 ได้รับพลังงาน

- ชี้นของโรเตอร์จะอยู่ในแนวที่ฟันที่ 2, 5, 8, 11 ของสเตเตอร์
- โรเตอร์จะเคลื่อนที่ไปในทิศทาง CW เป็นมุม 7.5° (1/3 ช่องห่างระหว่าง ชี้นของโรเตอร์)



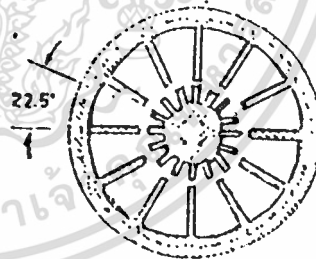
สเตปที่ 2: เฟส θ_3 ได้รับพลังงาน

- ชี้นของโรเตอร์จะอยู่ในแนวที่ฟันที่ 3, 6, 9, 12 ของสเตเตอร์
- โรเตอร์จะเคลื่อนที่ไปในทิศทาง CW รวมเป็นมุม 7.5°



สเตปที่ 3: เฟส θ_4 ได้รับพลังงาน

- ชี้นของโรเตอร์จะอยู่ในแนวที่ฟันที่ 1, 4, 7, 10 ของสเตเตอร์
- โรเตอร์จะเคลื่อนที่ไปในทิศทาง CW รวมเป็นมุม 22.5° (เคลื่อนที่ไปได้ 1 ช่องห่างระหว่าง ชี้นของโรเตอร์)



รูปที่ 4 แสดงลำดับการสวิตช์ 3 สเตปของ VR Stepping Motor แบบสแต็คเคียวและแสดงถึงตำแหน่งของโรเตอร์และทางของเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อโรเตอร์เคลื่อนที่ไปในแต่ละสเตป

ตัวอย่าง

การหาพารามิเตอร์ของสเตปมอเตอร์

ขั้นแรกเรากำหนดความต้องการของมอเตอร์สเตป = 9 องศา

มอเตอร์จะเป็นตัวจำกัดอัตราการสเตป = $360/9 = 40$ สเตป/รอบ

ในแง่ไทยเหล่านี้เราอาจต้องใช้สเตปที่ 4 หรือ 5 เฟส ที่มีสเตเตอร์ 2 โพล/เฟส

ถ้า $N_p = 4$

$$R_s = R_s / N_p = 40 / 4 = 10$$

$$N_s = N_p * S = 4 * 2 = 8$$

ถ้า $N_p = 5$

$$N_r = 40 / 5 = 8$$

$$N_s = 5 * 2 = 10$$

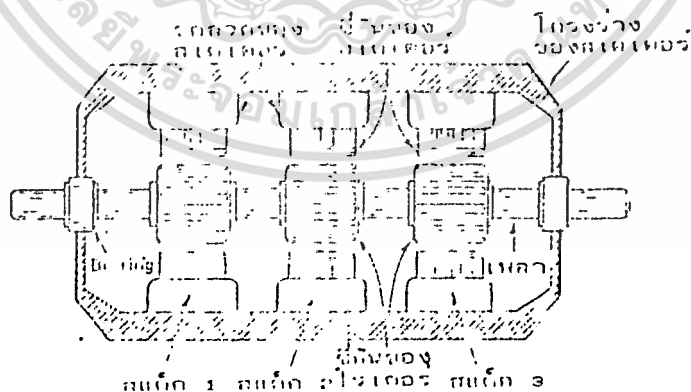
- VR Stepping Motor แบบหลายสเต็ป

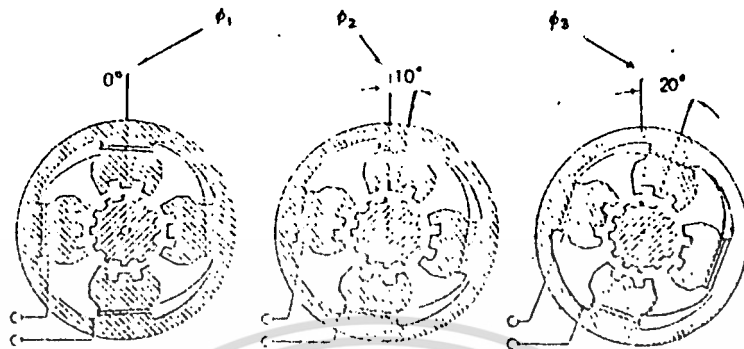
สเต็ปในหนึ่งรอบรวมไปถึงโรเตอร์ที่เป็นซี่ฟันและโครงร่างของสเตเตอร์อยู่

รอบนอก

VR Stepping Motor แบบ 3 สเต็ป (3 เฟส) มีโครงสร้างดังรูปที่ 5

ซึ่งถูกออกแบบให้สเตเตอร์ของแต่ละสเต็ปประกอบด้วย 4 โพลและแต่ละโพลจะมีซี่ฟัน 3 ซี่ ซึ่งต่างจาก VR แบบสเต็ปเดียว(แต่ละโพลจะมีซี่ฟันเดียว) ข้อสังเกตในแต่ละสเต็ปจำนวนซี่ฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์จะมีจำนวนเท่ากัน ซึ่งต่างกับ VR แบบสเต็ปเดียวคือจำนวนซี่ฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์จะเท่ากันไม่ได้ ถ้าหากมีจำนวนซี่ฟันเท่ากันมันจะไม่ทำงาน





รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างของ VR Stepping Motor ที่มี 3 เฟส โรเตอร์และสเตเตอร์ของแต่ละเฟส (สเตต) จะมี 12 ซี่ฟันแฉะมุมสเต (θ_s) = 10° แต่ละเฟสของสเตเตอร์ที่เรียงลำดับต่อ เนื่องกันจะถักจัดตำแหน่งให้ห่างกัน = 1/3 ของช่องห่างระหว่างซี่ฟันของโรเตอร์ (10°)

- การทำงานของ VR Stepping Motor ที่มี 3 สเตต

โคจรแฉะส่วนล่างของรูปที่ 5 แสดงถึงโครงสร้างของโรเตอร์และสเตเตอร์ของ VR Stepping Motor ที่มี 3 สเตต โดยแต่ละสเตตจะมี N_r = N_s แต่ละสเตตจะมีตำแหน่งของสเตเตอร์แตกต่างจากตำแหน่งถัดไป = 10° ส่วนซี่ฟันของโรเตอร์ทั้ง 3 อันจะประกอบขยับบนแกนเดียวกันและได้รับการปรับแต่งให้ขยับแนวเดียวกันอย่างสมบูรณ์

ตามปกติเราจะหาค่ามุมสเต (INDEX ANGLE) ได้จากสมการ

$$\theta_s = P_r / N_p = 360 / N_r N_p$$

ในที่นี่เราจะหา θ_i (INDEX ANGLE) ได้จากสมการเดียวกันคือ

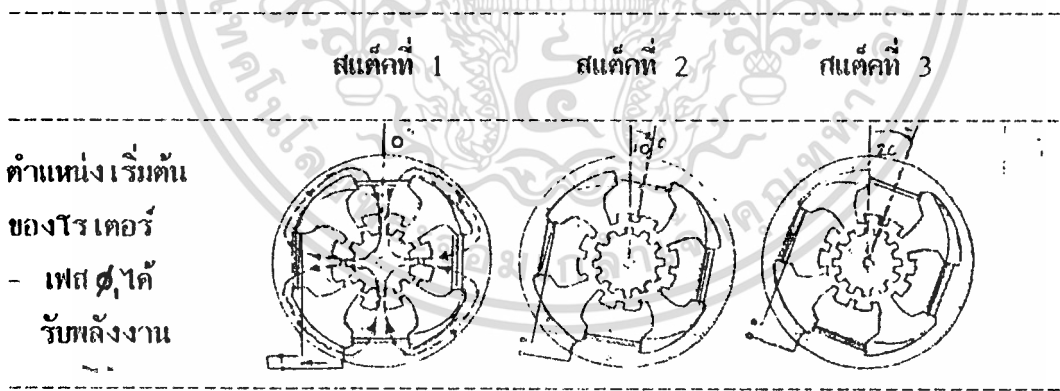
$$\theta_i = P_r / N_p = \theta_s$$

ในกรณี $N_r = N_s = 12$ ดังนั้นเรารู้ว่า $F_r = 360/12 = 30$ องศา และค่า
 $\theta_1 = 30/3 = 10$ องศา

สเทปมอเตอร์แบบ 3 สแต็ค ถึงแม้ว่าโรเตอร์ทั้ง 3 ก็จะมีคิกอยู่บนเพลลาอันเดียวกัน สแต็คทั้งสามจะมีวงจรมแม่เหล็กที่แยกกัน

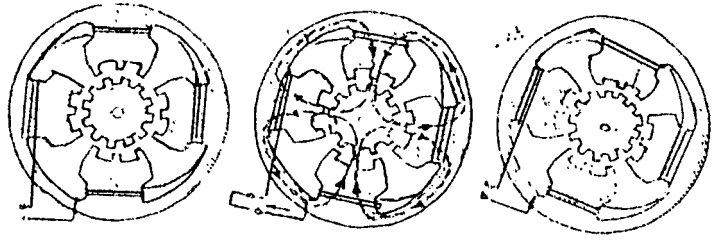
ถ้าเฟสที่ 1 ถูกขับด้วยกระแสเป็นเฟสเริ่มต้นในขั้วของโรเตอร์-สเตเตอร์ อยู่ในแนวเดียวกัน ส่วนขั้วของโรเตอร์และสเตเตอร์ในสแต็คที่ 2 ในขณะที่จะมีตำแหน่งต่างกัน 10 องศา และขั้วของโรเตอร์และสเตเตอร์ในสแต็คที่ 3 จะมีตำแหน่งต่างกัน 20 องศา ต่อจากนั้นเราหุ้จจ่ายกระแส (กระแสขดลวดสเตเตอร์) ในสแต็คที่ 1 และป้อนกระแสให้กับสแต็คที่ 2 โรเตอร์จะหมุนไปอีก 10 องศา ซึ่งจะทำให้อั้วของสเตเตอร์และโรเตอร์ในสแต็คที่ 2 อยู่ในแนวเดียวกัน ในขณะที่ขั้วของโรเตอร์และสเตเตอร์ในสแต็คที่ 3 จะมีตำแหน่งต่างกัน 10 องศา ต่อจากนั้นเราหุ้จจ่ายกระแสในสแต็คที่ 2 และป้อนกระแสในสแต็คที่ 3 โรเตอร์จะหมุนไปอีก 12 องศา ซึ่งจะทำให้อั้วของโรเตอร์และสเตเตอร์ในสแต็คที่ 3 อยู่ในแนวเดียวกัน ส่วนขั้วของโรเตอร์ในสแต็คที่ 1 จะมีตำแหน่งต่างกัน 10 องศา

ลำดับการสวิตซ์กระแสในแต่ละสแต็คแสดงได้ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเพลลาของสเทปมอเตอร์จะเคลื่อนที่ไปเท่ากับ 1 ช่องของระยะห่างระหว่างขั้วของโรเตอร์ (30 องศา) ภายใน 3 สเตป



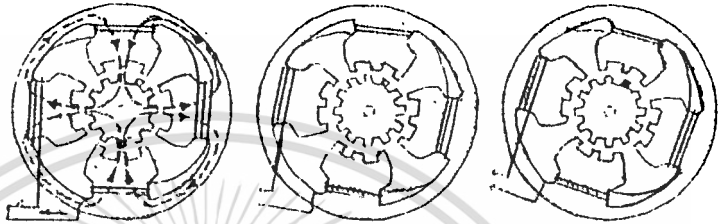
สเตปที่ 1 :

- เฟส ϕ_4 ด้รับพลังงาน
- ทรเตอร์จะเคลื่อนที่ไป 10 องศา



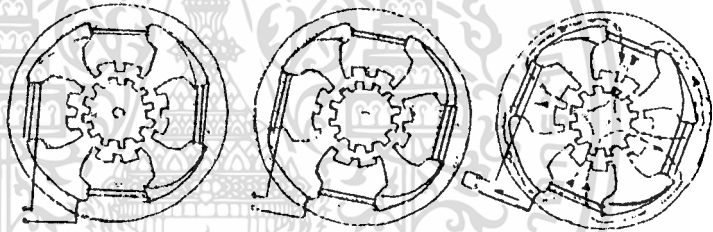
สเตปที่ 2 :

- เฟส ϕ_3 ด้รับพลังงาน
- ทรเตอร์จะเคลื่อนที่ไป 20 องศา



สเตปที่ 3 :

- เฟส ϕ_2 ด้รับพลังงาน
- ทรเตอร์จะเคลื่อนที่ไป 30 องศาหรือเท่ากับ 1 ช่องของระยะห่างระหว่างซี่ฟันของทรเตอร์



รูปที่ 6 แสดงลำดับการสเตปของ VRSM แบบ 3 เฟส, $N_r = N_s = 12$, $P_r = 30^\circ$ และ $\theta_s = 10^\circ$ ซี่ฟันของทรเตอร์ที่ด้จะเคลื่อนที่ไปในทิศทาง CW 10° ในแต่ละสเตปรวมทั้งหมด 30° เมื่อสเตปครบ 3 สเตปสำหรับการหมุนในทิศทาง CW ลำดับการรับเฟส 1-2 3-1 และ เมื่อต้องการในทิศทาง CCW ลำดับการรับเฟสด้ต้องกลับ เป็น 1-3-2-1

ความสัมพันธ์ของมุมเคลื่อนที่ไป 1 ช่องของระยะห่างระหว่างซี่ฟันของโรเตอร์ (ROTOR TOOTH PITCH) ด้วยการสลับไป N_p คือจำนวนสแต็คที่ใช้ (หรือเท่ากับจำนวนเฟส)

ลำดับการสวิตช์ที่แสดงในรูปที่ 6 เราสามารถนำเข้ามาเขียนเป็นตารางได้ดังรูปที่ 7 วงจรการสวิตช์ประกอบด้วย VRSM แบบ 3 เฟส (สัญลักษณ์ของสแต็คมอเตอร์) การขับเฟสแสดงได้ด้วยสวิตช์แหล่งกำเนิดคีย์

สแต็ค	S_1	S_2	S_3
1	X		
2		X	
3			X
1	X		

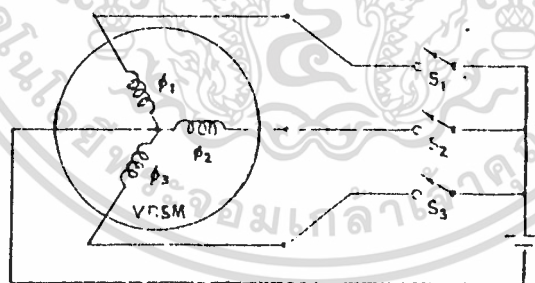
(ก)

สแต็ค	S_1	S_2	S_3
1	X	X	
2		X	X
3	X		X
1	X	X	

(ข)

สแต็ค	S_1	S_2	S_3
1	X	X	
2		X	
3		X	X
4			X
5	X		X
6	X		
1	X	X	

(ค)



(ง)

รูปที่ 7 แสดงถึง VRSM แบบ 3 เฟส

- (ก) ตารางแสดงลำดับการขับเฟส เดียวในทิศทาง CW
- (ข) ตารางแสดงลำดับการขับแบบ 2 เฟสในทิศทาง CW
- (ค) การขับแบบครึ่งสเตปในทิศทาง CW
- (ง) วงจรการสวิตช์เมื่อต้องการให้หมุนในทิศทาง CCW จะต้องกลับลำดับการขับในตาราง (ก), (ข) และ (ค)

จากตาราง (ก) ถ้าเราขับเฟสที่ 1 และ 2 เรียงตามลำดับมอเตอร์จะหมุนไป 1 สเตป

ตาราง (ข) ถ้าเราขับเฟสที่ 1 และ 2 พร้อมกันเพลลาของมอเตอร์จะหมุนไป $3/2$ สเตป ต่อจากนั้นเราขับเฟสที่ 2 และ 3 พร้อมกันอีกก็จะทำให้มอเตอร์หมุนไปครบเต็ม 1 สเตป ดังนั้นการขับแบบ 2 เฟส เราเรียงลำดับการขับได้ดังนี้ 1-2, 2-3, 3-1, 1-2 กระทำซ้ำเดิมไปเรื่อยๆ

อย่างไรก็ตามการขับแบบ 2 เฟสถือว่า 1 เฟสจะให้การหมุนเป็นสเตป เท่ากัน ที่ต่างกันก็คือการขับแบบ 2 เฟสจะให้การหมุนของโรเตอร์นำหน้าการขับแบบเฟสเดียวด้วยขนาด $1/2$ สเตป นอกจากนี้การขับแบบ 2 เฟสจะต้องการกระแสเป็น 2 เท่าของแบบเฟสเดียว

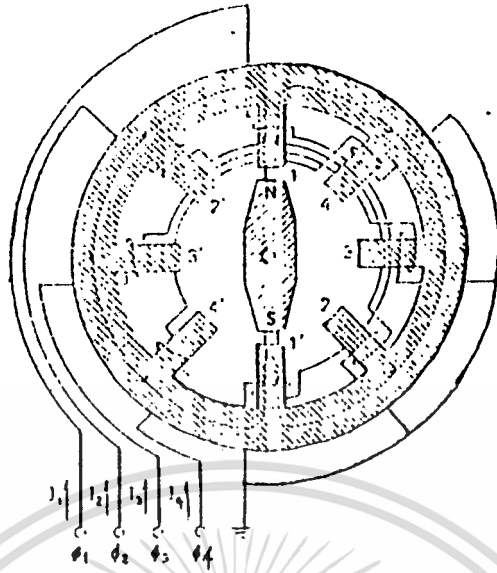
ตาราง (ค) แสดงการขับแบบ 2 เฟสสลับกับแบบเฟสเดียว ซึ่งจะทำให้โรเตอร์หมุนไปครึ่งสเตป เท่านั้น การขับแบบนี้จะทำให้จำนวนสเตปต่อรอบเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าจากเดิม

3.2) Permanent Magnet Stepping Motor

มอเตอร์ชนิดนี้มีโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร ซึ่งมีอำนาจแม่เหล็กตามแนวรัศมีดึงดูดกับ Stator Pole มอเตอร์ชนิดนี้จะมี holding torque เกิดขึ้นแม้ไม่ได้รับ energize ที่ขดลวดบนสเตเตอร์

ในรูปที่ 3 เป็นสเตปมอเตอร์แบบ 4 เฟส แต่ละเฟสเป็นขดลวดอยู่บน 2 ขั้วของสเตเตอร์ ดังนั้นในการออกแบบสเตเตอร์จะต้องมี 8 ขั้ว

โครงสร้างของมอเตอร์ชนิดนี้แสดงไว้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 โครงสร้างของสเตปโมเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรมี 4 เฟส และแต่ละ เฟสมี
ด้วยขดลวดบน 2 ขั้วของสเตเตอร์มีสเตป = 45°

โรเตอร์ทำจากแม่เหล็กถาวรและอยู่ในแนวของขั้วสเตเตอร์ 1 และ 1'
มีหมุดค้ำที่ตำแหน่งนี้ได้ด้วยกระแส I_1 ที่ไหลอยู่ในเฟส 1

ขดลวดของเฟส ϕ_1 , ϕ_4 , ϕ_3 และ ϕ_2 (1-4-3-2 ตามลำดับ) จะได้รับพลัง
งานด้วยกระแสพัลส์ที่สอดคล้องกัน I_1 , I_4 , I_3 และ I_2 (กระแสแต่ละเฟสในทิศทางที่
แสดงงานในไดอะแกรม) แต่ละสเตป โรเตอร์จะเบคหมุนไปตามทิศทางตาม เข็มนาฬิกา 45
องศา (360/8)

เมื่อขั้วเหนือของโรเตอร์(แม่เหล็กถาวร) หมุนไปถึงขั้วของสเตเตอร์หมายเลข
2 ลำดับการขั้วขดลวดเฟสของสเตปโมเตอร์คือ 1-4-3-2 จะต้องกระทำเหมือนเดิม
(เพื่อให้มอเตอร์หมุนไปตาม เข็มนาฬิกาอีก 180 องศา) ยกเว้นเราต้องการให้หมุนกลับ
ทิศทางใน 180 องศาที่เหลือด้วยการป้อนกระแสกลับทิศทาง เพื่อให้เกิดการหมุนนำเป็น
ขั้วที่ขั้วสเตเตอร์ 1, 4, 3, 2 ตามลำดับ (ทิศทางของกระแสแสดงงานรูปที่ 8)

- ลักษณะโครงสร้างของโอบริคส เตปมอ เคอร์

- จำนวนซี่ฟันของโรเตอร์และสเตเตอร์ไม่เท่ากัน
- ตอน A และตอน B มีโครงสร้างเหมือนกัน
- ซี่ฟันของสเตเตอร์ทั้ง 2 ตอนจะอยู่ในแนวเดียวกันอย่างถูกต้อง
- ส่วนซี่ฟันของโรเตอร์ทั้ง 2 ตอนจะมีตำแหน่งที่แตกต่างกัน $(1/2)Pr$ (ในรูปที่ 9 กำหนดค่า $Pr = 360/30 = 12^\circ$ ดังนั้นตำแหน่งซี่ฟันของโรเตอร์ทั้ง 2 ตอนจะแตกต่างกัน 6°)

- สเตเตอร์ของแต่ละตอนมี 8 โพลแบ่งออกเป็น 2 สเตเตอร์เฟส

- เฟสที่ 1 จะพันขดลวดบนสเตเตอร์โพลหมายเลข 1, 3, 5, 7 ของทั้งใน ตอน A และตอน B

- เฟสที่ 2 จะพันขดลวดบนสเตเตอร์โพลหมายเลข 2, 4, 6, 8 ของทั้งใน

ตอน A และตอน B

- แกนแม่เหล็กถาวรจะแท่งยาวนำโรเตอร์ใน ตอน A ให้เป็นแม่เหล็กขั้วเหนือ และโรเตอร์ใน ตอน B ให้เป็นแม่เหล็กขั้วใต้ ความซับซ้อนจะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการแบ่ง ส่วนของขดลวดเฟสใน 2 ตอนทำให้ได้วงจรแม่เหล็กที่ซับซ้อนและได้ทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็กที่แตกต่างกันเป็นวงกลม ทิศทางเดินของแกนแม่เหล็กของสเตเตอร์โพลจะขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกระแสเฟสดังแสดงด้วยลูกศรในรูปที่ 9

- การทำงานของโอบริคส เตปมอ เคอร์

ขณะที่เฟสที่ 1 (ϕ_1) ได้รับพลังงานโดยการป้อนกระแส I_1 ในทิศทางดัง แสดงด้วยลูกศร

ซี่ฟันของโรเตอร์ใน ตอน A จะอยู่ในแนวเดียวกับซี่ฟันของสเตเตอร์ของโพลที่ 1 และโพลที่ 5 ส่วนของตอน B จะอยู่ในแนวเดียวกับซี่ฟันของโพลที่ 3 และโพลที่ 7 ดัง แสดงในรูปที่ 10

เพื่อให้เฟลาของมอเตอร์หมุนไป 1 สเตปในทิศทาง CW เราจะต้องหยุดป้อน กระแส I_1 และป้อนกระแส I_2 ให้กับเฟสที่ 2 (ϕ_2)

ในรูปที่ 9 ซี่ฟันของโรเตอร์ที่เป็นสัปดาห์ใช้สำหรับอ้างอิง ซี่ฟันสัปดาห์จะอยู่ใกล้ แนวซี่ฟันของสเตเตอร์ของโพลที่ 4 และโพลที่ 8 ในตอน A และโพลที่ 6 ในตอน B มาก ที่สุด (ซี่ฟันของโรเตอร์ที่เป็นสัปดาห์ห่างจากซี่ฟันของสเตเตอร์ = 1 สเตปพอดี)

สเตป	σ_1 I_1	σ_2 I_2	เกสรแรง ออกจาก ตอน A	เกสรแรง เข้าสู่ ตอน B	ตอน A	ตอน B
1	+		1, 5	3, 7		
2		-	4, 8	2, 6		
3		-	3, 7	1, 5		
4		+	2, 6	4, 8		
1		+	1, 5	3, 7		

รูปที่ 11 ลำดับ 4 สเตปของ HSM แบบ 2 เฟส งามแต่ละสเตปแสดงถึงตำแหน่งของโรเตอร์และทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก $N_r = 30$, $N_s = 24$, $\theta_s = 30^\circ$ ที่หันของโรเตอร์ที่เป็นสี่ค่าจะหมุนในทิศทาง CW ไป 30° งามแต่ละสเตปได้เป็น 120° เมื่อครบตามจำนวนลำดับ (หนึ่งช่องระหว่างซี่ฟันของโรเตอร์) สำหรับการหมุนในทิศทาง CW จะต้องจัดลำดับการขับ เป็น 1^+ , 2^- , 1^- , 2^+ , 1^+

เพลลาของมอเตอร์ที่นำมาได้ .1 ช่องระหว่างซี่ฟันภายใน 4 สเตป ดังนั้น
 มอเตอร์จะต้อง = $(1/4)P_R$ หรือมีค่า = $P_S - P_R$ ดังนั้น

$$C_S = P_R/4 = 360/4N_R = 90/N_R$$

$$C_S = P_S - P_R$$

 ในรูปที่ 2.12 $N_R = 30$ และ $N_S = 24$
 ดังนั้น $C_S = 90/30 = 3$ องศา

$$= 360/24 - 360/30 = 3$$
 องศา

ไฮบริดสเตปมอเตอร์(HSM) จะทำงานด้วยกระแสเฟสที่มีการไหลได้ 2 ทิศทาง ดังนั้นเราจำเป็นต้องใช้ Power Supply 2 ตัว (Bipolar Drive)

การแก้ไขปัญหานี้ด้วยการขับไฮบริดสเตปมอเตอร์ให้ทำงานด้วย Power Supply เพียงตัวเดียว (Unipolar Drive) ได้โดยดัดแปลงโครงสร้างการพันขดลวดเฟสของสเตเตอร์

การพันขดลวดเฟสของสเตเตอร์แบบ Bifilar (การพันแบบ 2 แกวสลับกัน) สามารถขับได้ด้วย Unipolar Drive

ขดลวดแบบ Unifilar เราต้องกลับทิศทางของกระแสเพื่อกลับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก B

ขดลวดแบบ Bifilar ถ้าเราต้องกลับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กเป็น -B เราสามารถทำได้โดยป้อนกระแสขนาดเดิมจาก Power Supply ตัวเดิมเข้าที่ขดลวดที่เป็นเส้นประ ก็จะทำให้ทางการเหนี่ยวนำแม่เหล็กและทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก (-B) กลับทิศทางได้

ถ้าหาก HSM ในรูปที่ 9 มีขดลวดเฟสของสเตเตอร์เป็นแบบ BIFILAR ขดลวดเฟส ϕ_1 เดิมจะถูกแบ่งตัวออกเป็น 2 ขดลวดเฟส ϕ_1^+ และเฟส ϕ_1^-

ในตอนนี้จะทำให้เราได้ขดลวดเฟสถึง 4 เฟสและแต่ละเฟสสามารถขับได้ด้วยกระแสที่ไหลในทิศทางเดียว ส่วนเครื่องหมาย + และ - ใช้สำหรับแสดงถึงทิศทาง การเกิดสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์โพล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระตุ้น (Stepping Motor Excitation)

แบบที่นิยมใช้มีอยู่ 3 แบบ คือ

- 1) กระตุ้นเฟสเดียว (one phase excitation)
- 2) กระตุ้น 2 เฟส (two phase excitation)
- 3) กระตุ้นครึ่งสเตป (half step excitation)

(1) Three-phase motor

(ก)

	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Phase 1	█			█			█		
Phase 2		█			█			█	
Phase 3			█			█			█

(ข)

Clock state	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Phase 1	█	█		█	█		█	█	
Phase 2			█	█		█	█		█
Phase 3	█			█	█			█	█

(ค)

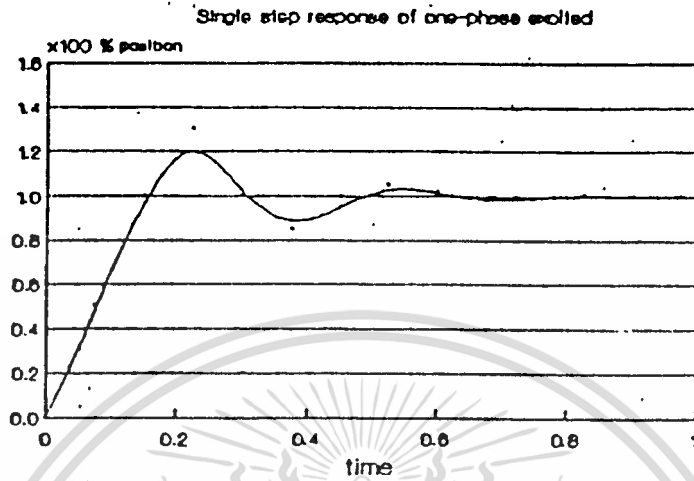
Clock state (A)	R	1	2	3	4	5					
Clock state (B)	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Phase 1	█	█				█	█	█			
Phase 2			█	█					█	█	
Phase 3				█	█					█	█

รูปที่ 12 แสดงแผนภูมิเวลาของการกระตุ้นแบบต่างๆ

- ก) one phase excitation
- ข) two phase excitation
- ค) half-step excitation

4.1) one phase excitation

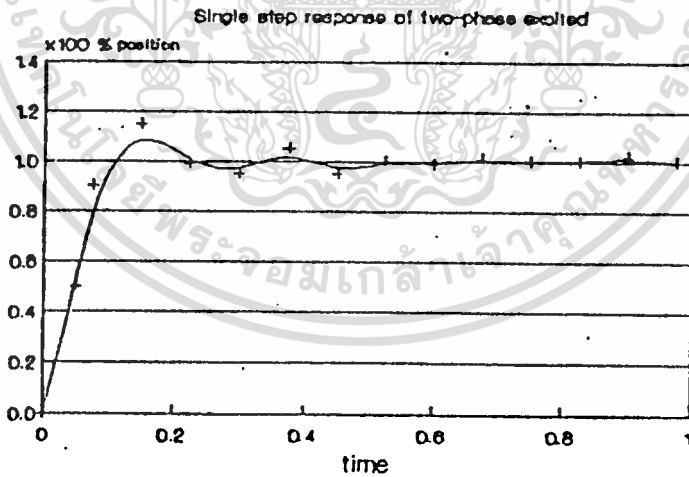
แบบนี้จะมีแรงบิดน้อยที่สุดทั้งในขณะเริ่มเคลื่อนที่และเคลื่อนที่อยู่ มี overshoot สูง เข้าสู่ตำแหน่งแต่ละสเทปช้าแต่เมื่อเข้าสู่สภาวะ steady state แล้วจะไม่มี การ oscillate



รูปที่ 13 กราฟแสดงผลตอบสนองของ stepping motor ต่อการกระตุ้นเฟสเดียว

4.2) two phase excitation

การกระตุ้นแบบนี้มีแรงบิดขณะเริ่มเคลื่อนที่มี overshoot ต่ำ และมี oscillate เล็กน้อยในสภาวะ steady state



รูปที่ 14 กราฟแสดงผลตอบสนองของ stepping motor ต่อการกระตุ้น 2 เฟส

3) half step excitation

สำหรับ Stepping Motor ที่ให้การกระตุ้นแบบ half step excitation จะทำให้มองเสาในแต่ละ Step. จะมีค่าลดลงจากค่าที่กำหนดไว้ครึ่งหนึ่ง จากค่ามองเสาที่กำหนดไว้ที่ Data ของ Stepping Motor ตัวนั้น การกระตุ้นแบบนี้จะรวมข้อดีของทั้ง 2 แบบข้างต้นไว้ โดยขณะเริ่มต้นจะกระตุ้นแบบ 2 เฟส ทำให้ได้แรงบิด สูงที่สุดและเมื่อเข้าสู่สภาวะ steady state จะกระตุ้นเพียงเฟสเดียว ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดการ oscillate แต่ข้อเสียของการกระตุ้นแบบนี้จะมีลักษณะ เช่นเดียวกับ one phase excitation กล่าวคือในขณะที่ Steady State ค่าแรงบิดจะมีค่าน้อย



IN PROCESS

5.1) RESISTANCE ความต้านทานของ WINDING วัดระหว่าง LINE และ COMMON ที่
อุณหภูมิห้องปกติ

ความสัมพันธ์

ความสัมพันธ์ของ STEPPER MOTOR

สมการ

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

R = ความต้านทานของขดลวด

L = ความยาวของลวด (M)

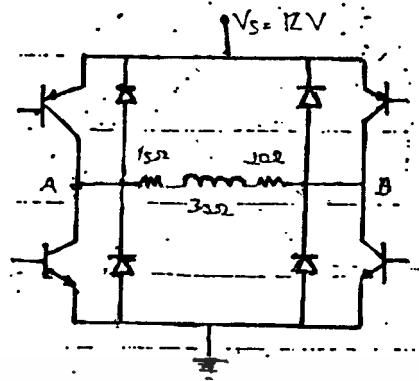
A = ขนาดหน้าตัดของขดลวด (M²)

ρ = ค่า CONSTANT ตามชนิดของลวด (Ω - M)

ดังนั้น เราสามารถหาความสัมพันธ์ของค่า RESISTANCE และค่าอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ STEPPER MOTOR ได้ตามสมการข้างต้น

การทำงาน

ความต้านทานที่ไม่ได้ SPEC มักจะมีตัวแปรตัวเดียวคือค่าความยาวลวดที่พัน เนื่องจากค่า ρ = CONSTANT , A มักไม่เปลี่ยนแปลงจึงเป็นไปได้ที่เกี่ยวกับเครื่องพันลวดไม่ได้รับตามที่ต้องการ



รูปที่ 15 Drive Configuration

จาก DRIVE CONFIGURATION จะเห็นว่าที่ $V_{AB} = 10.8 \text{ V}$. เมื่อ R รวม $= 15 + 30 + 15 = 60 \Omega$, $E = IR$, I เล็ง MOTOR $= \frac{10.8}{60} = 180 \text{ mA}$ ตาม

SPEC ถ้า R ที่ MOTOR เองไม่ได้ค่า 30Ω ตามกำหนดค่ากระแสที่มาเลี้ยงก็จะแปรไปด้วย ส่วน R 15 Ω ตัวที่มาต่ออนุกรมเพื่อช่วยทำให้ CURRENT BUILD UP คีขึ้น ค่า $\tau = \frac{L}{R}$ น้อยลง

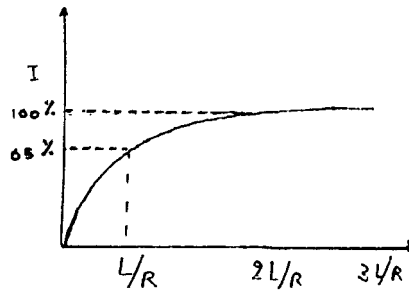
เครื่องมือวัด MULTIMETER

5.2) INDUCTANCE คุณสมบัติความถี่ธรรมชาติของ WINDING ที่ด้านขานการเปลี่ยนแปลงใดๆ ของกระแส มันแปรผันตามกระแสในขดลวด และ ROTOR POSITION ที่ LINED UP กับ STATOR TEETH มี 2 ประเภท คือ

5.2.1 SELF INDUCTANCE เป็นภาระเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเองของ PHASE WINDING

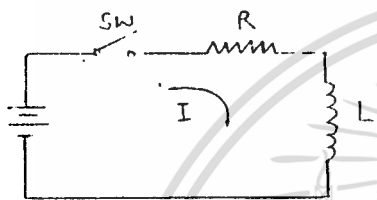
5.2.2 MUTUAL INDUCTANCE เป็นคุณสมบัติที่เกิดขึ้นระหว่าง COIL 2 COIL ที่อยู่ใกล้กันเมื่อเส้นแรงแม่เหล็กจาก COIL หนึ่งต่อถึงกับกับเส้นแรงอีกด้านหนึ่ง

PERFORMANCE



รูปที่ 16 V-t curve ของวงจร L-R

L จะมีคุณสมบัติเป็น SELF INDUCED EMF
ซึ่งจะต้านทานการเปลี่ยนแปลงของ I ใน
วงจรคือ SELF INDUCED EMF = $-L \frac{di}{dt}$



ทิศทาง (-) แสดงว่าทิศทางของ V ตรงข้าม
กับการเปลี่ยนแปลงในกระแส (Δi) ดังนั้น
เมื่อเริ่มเปิดวงจรจะไม่มีทางที่ $I = \frac{V}{R}$

รูปที่ 17 วงจรวิเคราะห์ L-R

ทันที กระแสจะค่อย ๆ BUILD UP ขึ้น

จาก CIRCUIT นำมาเขียนสมการได้คือ

$$V - L \frac{di}{dt} = IR$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{V - IR}{L}$$

เมื่อเริ่มปิดสวิตซ์ I ยังคง = 0

$$\frac{di}{dt} = \frac{V}{L}$$

ชั่วขณะที่ I หยุดการ BUILD UP.

$$\frac{dI}{dt} = 0$$

dt

$$0 = \frac{V - IR}{L}$$

$$V = IR, I = \frac{V}{R}$$

ที่จุด FINAL (I หยุด BUILD UP) I จะขึ้นกับค่า V , R เท่านั้น ดังนั้น ผลของ L คือ DELAY การเกิดขึ้นของ FINAL I จากสมการที่ I แก้สมการ DIFFERENTIAL จะได้

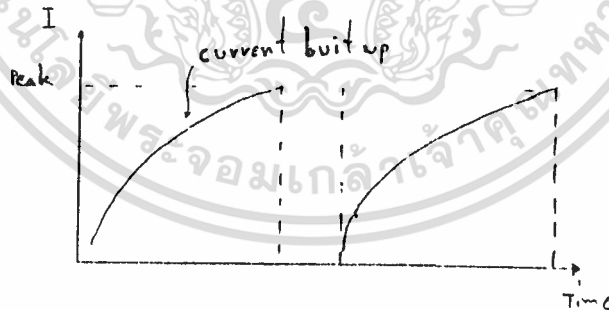
$$I = I_0 (1 - e^{-t/\tau})$$

$$I = I \text{ ที่ STEADY STATE คือ } = V/R \text{ ที่เวลา } = L/R$$

เมื่อ $t = L/R$ ดังนั้น $t/\tau = 1$

$$I = I_0 (1 - e^{-1}) = I_0 (1 - 0.37) = 0.63 I_0$$

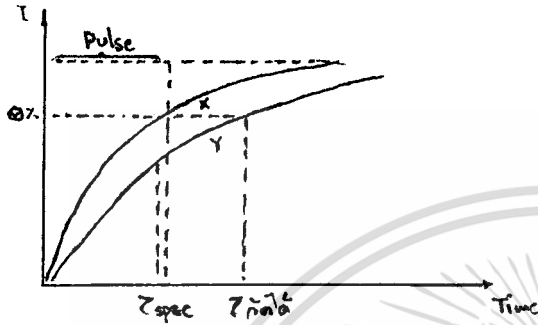
หลังจากเวลา $t = L/R$, I จะขึ้นมาถึง 63 % ของ I FINAL (ตามกราฟ)



รูปที่ 18 I-t curve

ผลกระทบ จากการทำงานจริงค่า $\tau = L/R$ จะถูกกำหนดโดยค่าของ L ขดลวดและ R

ดังนั้น เมื่อมีการ ENERGIZED PEAK VOLTAGE มา (เส้นประ --) ค่า τ ที่ทำให้กระแส BUILD UP ถึงจุดสูงสุด เพื่อที่จะให้ได้ TORQUE สูงสุดก็ได้ถูกกำหนดไว้ดังกล่าวก่อน ดังนั้น กรณีที่ค่า L ที่ตัวมีการเปลี่ยนแปลงไปตาม SPEC จะทำให้ค่า τ เปลี่ยนแปลงด้วย เช่น วิศวกรได้ค่า L ได้มากไป τ จะสูงขึ้น RISE TIME ที่ CURRENT BUILD UP จะนานขึ้น



จากรูปจะเห็นว่าถ้าได้ τ ตาม SPEC กระแสจะ BUILD UP ได้สูงสุดถึงจุด X ใน 1 PULSE และจะตกลงตาม PULSE ที่ให้ τ สูงเกินไปค่า I จะ BUILD UP ได้สูงถึงแค่จุด Y ใน 1 PULSE เดียวกันนั้น

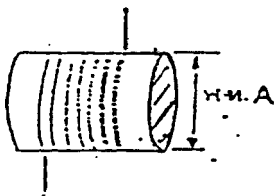
รูปที่ 19 I-t curve เมื่อ L/R แปรค่า

จากค่านี้เมื่อ I ที่ BUILD UP ได้สูงก็จะทำให้ค่า TORQUE ได้สูงตามไปด้วย ($T = KI$) ทำให้ PERFORMANCE ของ STEPPER ตัวนั้นดี

กรณีที่ค่าของ L ต่ำกว่ากำหนด จะทำให้ τ ต่ำลง RESE TIME น่าจะดีขึ้น แต่กลับกลายเป็นเสมือนไม่มี L ในวงจร เพราะคล้ายกับ $I = V/R$ ได้ทันทีเมื่อไม่มี L ก็ไม่มี FLUX (ϕ) เกิดขึ้นมาทำให้ TORQUE ไม่ได้ด้วย ดังนั้น วิศวกรจะเพิ่ม RISE TIME โดยไม่ให้ L ต่ำมากไปโดยเพิ่ม R 2 ตัว ต่อ SERIES กับ L (ในวงจร DRIVE) จะทำให้ RISE TIME ต่ำลง โดยยังคงได้ TORQUE สูงสุด

การทำงาน

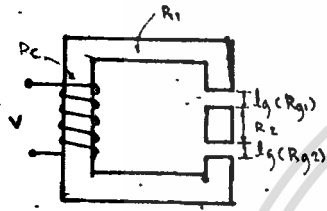
สมการ
$$L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot A}{l} = \frac{N\phi}{I}$$



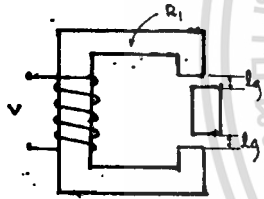
รูปที่ 20 แสดง coil

- μ = MAGNETIC PERMEABILITY = CONSTANT
- N = จำนวนรอบของการพัน
- A = CROSS SECTION
- l = ความยาวของขดลวดที่พัน

จะเห็นได้ว่าการทำงานจริงค่า L แปรผันได้ตาม N และ l เพราะ μ กับ A ไม่เปลี่ยน ค่า l ขึ้นกับความยาวของ STACK ที่พัน จึงเหลือตัวแปรที่มีผลมากคือ จำนวนรอบในการพัน (N) แต่ค่า INDUCTANCE อาจเปลี่ยนแปลงได้จากตำแหน่งของ ROTOR-STATOR ด้วย ตัวอย่าง



(Fig A)



(Fig B)

ให้ $V = F \text{ (mmf)}$ $I \rightarrow \phi$

R_1 — R_1 (RELUCTANCE)

R_g — R_g (RELUCTANCE GAP)

$V = IR$ $F = \phi [2R_1 + R_{g1} + R_{g2} + R_2 + R_c]$

$$\phi = \frac{F}{2R_1 + R_{g1} + R_{g2} + R_2 + R_c}$$

ความต้านทาน RELUCTANCE = $\frac{l}{\mu A}$

A ในที่นี้คือพื้นที่ของเหล็กที่กระทำต่อกัน จะมีค่าน้อยกว่ารูปข้างบน จึงทำให้ค่า R ลดลง ดังนั้น

$$\phi = \frac{F}{2R_1 + R_{g1} + R_{g2} + R_2 + R_c} \text{ จึงมีค่าน้อยลง}$$

รูปที่ 21 แสดง magnetic circuit

จากรูป A & B จะเห็นว่าค่า ϕ ของรูป A สูงกว่ารูป B จากสมการ $\lambda = N\phi = LI$ เมื่อ สูง N , I = CONSTANT ก็จะทำให้ค่า L สูงไปด้วยเนื่องจากค่า L เปลี่ยนตามตำแหน่งของการ LINE UP STATOR-ROTOR การที่ LINE UP กันพอดีจะได้ค่า L สูงกว่าพื้นที่เยื้องกันด้วยเหตุผลดังกล่าว

5.3) BACK EMF เป็น VOLTAGE ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติเมื่อมีตัวนำที่เคลื่อนแม่เหล็กก็จะเกิดเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มีผลในการต้านทาน TORQUE ที่จะเกิดจาก MOTOR เมื่อเราหมุน MOTOR ทุกครั้งจะต้อง เกิดค่านี้และจะยังมีค่ามาก เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความถี่สูง ๆ

จากกฎ FARADAY แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวดคือ

$$E = \frac{-d\lambda}{dt} = \frac{-Nd\phi}{dt}$$

N = จำนวนรอบขดลวด

ϕ = ฟลักซ์แม่เหล็ก

λ = $N\phi$ = ฟลักซ์คัลลิ่งขดลวด

ถ้าตัวหมุน ๆ ด้วยความเร็ว ω rads⁻¹ จะมีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์คัลลิ่งขดลวด ดังนี้

$$\lambda = N\phi \cos \omega t$$

$$E = \frac{-d(N\phi \cos \omega t)}{dt} = N\phi \sin \omega t - N \cos \omega t \frac{d\phi}{dt}$$

เทอม 1 คือ แรงดันไฟฟ้าความเร็วต่ำ (SPEED VOLTAGE)

เทอม 2 คือ แรงดันไฟฟ้า TRANSFORMER

กรณี คงที่ เพราะ ได้ POLE 1 POLE จะคงที่

จัด TERM ใหม่จะได้

$$E = N\phi \sin \omega t \text{ ----- } I$$

$$E = \frac{N (4 \text{ Break } l r)}{P} \sin \omega t$$

$$= \frac{(\text{Break } \sin \omega t) (2 \text{ IN}) (r^2 \omega)}{P} \text{ --- } \left(\frac{r \omega}{p/2} = \frac{v}{p/2} \right)$$

$$E = B_{\text{coil}} \cdot l t \cdot v$$

B COIL = ความหนาแน่นฟลักซ์ที่ลวดตัวนำ

l t = ความยาวของขดลวดทั้งหมดที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก

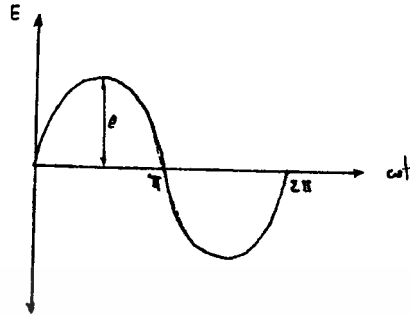
v = ความเร็วโดยรอบของตัวหมุน

จากสมการ 1 เมื่อคิดค่า MAX ๑ ได้ที่ $\sin \frac{\pi}{2} = 1$

$$E_{MAX} = \omega N \phi = 2\pi f N \phi$$

N = จำนวนรอบของขดลวด

f = ความถี่ Hz



รูปที่ 22 Back Emf ที่เกิดขึ้น

การทำงาน จากสมการข้างต้นจะเห็นว่า BACK E.M.F. จะแปรตามความถี่หรือความเร็วรอบของการหมุนตัดสนามแม่เหล็กของตัวนำ และจำนวนรอบของขดลวดที่พันด้วย

ผลกระทบ สมการ RELUCTANCE = $\frac{L}{\mu A}$
 $L = l_{เหล็ก} + l_g$; $l_g = \text{const}$
 $\text{const} = \frac{l_g}{\mu_0} = \frac{l_g}{4\pi \times 10^{-7}}$ พื้นที่หน้าตัดของเหล็ก (AIRGAP เล็กมาก)
 [ไม่คิด fringing Flux]

กรณีที่ l_g มีค่าเล็ก ๆ เมื่อแทนในสมการจะได้ค่า R ที่ต่ำ

กรณีที่ l_g มีค่ามาก ๆ เมื่อแทนในสมการจะได้ค่า R ที่สูง

ความสัมพันธ์ $F = R \phi$; $\phi = \frac{F}{R}$

$F = NI$; $\phi = \frac{NI}{R}$

$$NI = \text{CONSTANT} \quad I = \text{กระแสที่เลี้ยงขดลวด}$$

จากสมการ $\phi = \frac{NI}{R}$ จะเห็นว่า

ถ้า R ค่าน้อย จะมีค่าสูง ถ้า R มีค่ามาก จะมีค่าต่ำ

จากสมการ $E_{\text{max}} = \omega N \phi$ ทำให้ทราบว่า

ถ้า มีค่าสูง BACK EMF จะมีค่าสูงตาม

ถ้า มีค่าต่ำ BACK EMF จะมีค่าต่ำตาม

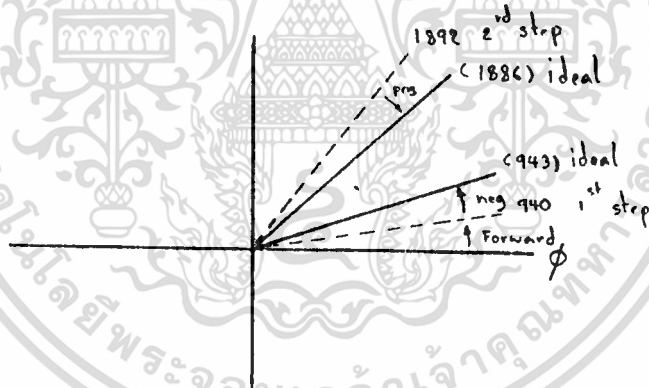
สรุปคือ ถ้า AIR GAP ยิ่งเล็ก RELUCTANCE มีค่าต่ำ BACK EMF มีค่าสูง
ถ้า AIR GAP ใหญ่ RELUCTANCE มีค่าสูง BACK EMF มีค่าต่ำ

5.4) STEP ANGLE ERROR AND HYSTERRESIS ERROR

ANGLE ERROR : (STEP TO STEP ACCURACY)

การ DEVIATE ของ STEP ANGLE ACTUAL จาก THEORETICAL ANGLE

EX : FORWARD



รูปที่ 23 ปริมาณเส้นใยลัดที่เทียบกับองศาที่สเตรปไป

ENCODER มี 500,000 LINES/360 องศา (1 รอบ)

$$1 \text{ องศา} = \frac{500000}{360} = 1388 \text{ LINES}$$

360

$$1 \text{ STEP (251)} = .0.679 \text{ องศา} = 0.679 \times 1388 \\ = 943 \text{ LINES/STEP}$$

สมมติหมุม STEP แรกเราได้ที่ 940 (943 เป็น IDEL CASE ของ 0.679 องศา)

1. STEP ANGLE ERROR CALCUTION

$$\text{STEP 1.} = \frac{(\text{ตำแหน่งปัจจุบัน} - \text{ตำแหน่งก่อนหน้า} - \text{LINES/STEP} \times 100)}{\text{LINE/STEP}} \\ = \frac{(940 - 0) - 943 \times 100}{943} \\ = -0.32 \% \text{ ANGLE ERROR}$$

เครื่องหมาย ลบ คือ FORWARD NEGATIVE
(ยังไม่ถึง IDEL STEP)

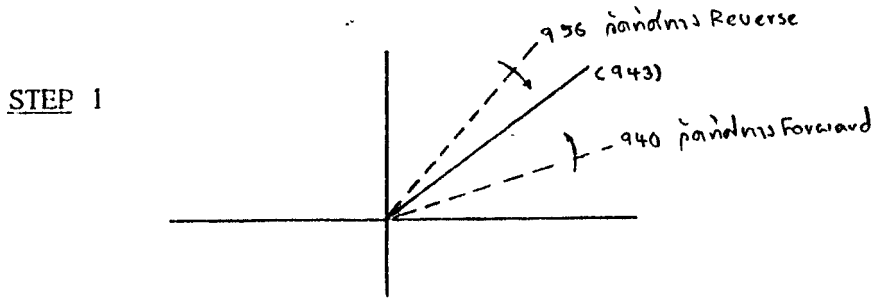
$$\text{STEP 2.} = \frac{(1892 - 940) - 943 \times 100}{943} \\ = +0.95 \%$$

เครื่องหมาย บวก คือ FORWARD POSITIVE
(ล้าหน้าจาก IDEL STEP)

REVERSE เหมือนกับ FORWARD ต่างกันที่ทิศทางหมุนกลับเท่านั้น

HYSTERESESE ERROR เมื่อเราทำการวัด ANGLE ในทิศทาง FORWARD นั้นตำแหน่งของ มุมที่วัดได้ตอน FORWARD จะถูก KEEP ไว้ ต่อมาเราทำการวัด ANGLE ในทิศทางย้อนกลับ (REVERSE) % ความแตกต่างของ ANGLE STEP (ในแต่ละ STEP) เมื่อวัดตอน FORWARD เทียบ กับตอน REVERSE คือ HYSTERESIS ERROR

EX



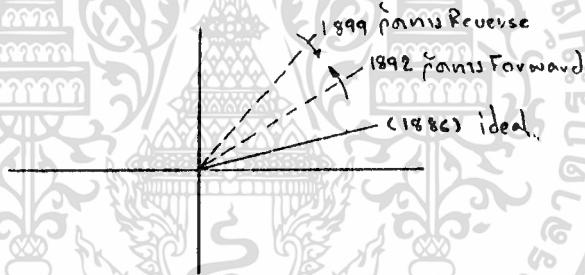
รูปที่ 24 แสดงการหา Hyteresis Error

$$\text{HYST} = \frac{\text{FORWARD ANGLE} - \text{REVERSE ANGLE}}{\text{NORMINAL STEP ANGLE}} \times 100$$

$$= \frac{940 - 956}{943} \times 100$$

$$\text{HYST (1)} = 1.69 \%$$

STEP 2



รูปที่ 25 (ต่อจากรูปที่ 24)

$$\text{HYST (2)} = \frac{1892 - 1899}{943} \times 100 = 0.74 \%$$

ค่า HYST MAX ได้จากการ COMPARE ตั้งแต่ HYST (1)...HYST (2) ถึง HYST (N)
ตัวใหญ่มากสุดจะมาเป็น HYST MAX

ค่า HYST AVG ได้จากการหาค่าเฉลี่ยของ .HYST ทั้งหมดที่หาได้

$$\begin{aligned} & \frac{\sum_{x=1}^N \text{HYST } x}{N} \\ N = 2 & = \frac{\text{HYST } (1) + \text{HYST } (2)}{2} \\ & = \frac{1.69 + 0.74}{2} \\ \text{HYST (AVG)} & = 1.21 \% \text{ ERROR} \end{aligned}$$

STEP ANGLE/HYST TESTING

1. HP COMPUTER จะเป็นตัวป้อนคำสั่งว่าต้องการหมุนกี่ DEGREE และ ว่าจะไปยัง POWER DRIVE MUT (MUT = MOTOR UNDER TEST)
2. POWER DRIVE เมื่อได้รับคำสั่งก็จะไป DRIVE MUT ให้หมุนตาม PRGM.
3. ตัว ENCODER จะ DETECT การหมุนและตำแหน่งในแต่ละ STEP ของ MUT ส่งไปที่ COUNTER
4. COUNTER จะทำการแปลงสัญญาณ จาก ENCODER ให้เป็น LINEAR ที่เข้า กับ COMPUTER
5. แล้วส่งข้อมูลให้ COMPUTER ทำการประมวลผลตาม PRGM.
6. COMPUTER จะแสดงผลการวัดบน CRT หรือ PRINTER

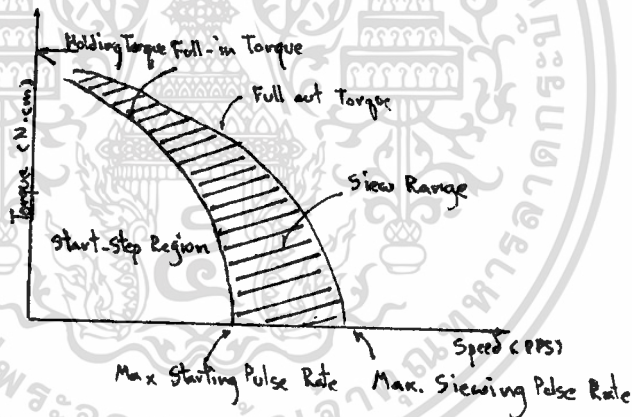
5.5) -STRESS TEST การทดลอง STRESS TEST เป็นการจำลองลักษณะการที่ MOTOR ต้องขับเคลื่อน เพื่อหา TRACK ใน DRIVE จริง ๆ การ TEST นี้จะทำการ ให้หมุนไปกลับตาม ALGORITHM ที่กำหนดอาจเป็น 0 100 200 100 0 หรือ อย่งไรก็ตามแต่ค่าที่กำหนดที่ E-PRGM จากการนำแผง STRESS TEST เข้าวัดใน พบว่า ใน RACK STRESS TEST จะจำลองลักษณะ เหมือนใน DRIVE คือ เริ่ม ENERGIZED MOTOR

STEP จะเริ่มต้นที่ความถี่ 0 1.5 KHz ก่อนช่วงกลางความถี่สูงสุด , ช่วงปลายความถี่ต่ำลงจนหยุดที่ STEP 100 ก่อนที่จะหยุดมันจะเปลี่ยนทิศทาง HI-LO เพื่อลดการเมื่อหยุดทันที , เหล่านี้จำลองมาจาก DRIVE ทั้งสิ้น

FAILED STRESS TEST อาการ FAILED STRESS TEST เกิดขึ้นจาก เมื่อเราเริ่มที่ความถี่จาก มอเตอร์บางตัวอาจไม่สามารถขึ้นตามได้ทันมันเกิดจากการ MIS STEP แต่เริ่มแรกแล้วพอเพิ่มความถี่ถึง 5.4 KHz มอเตอร์อาจ DOWN ก่อนถึงความถี่คือ ขึ้นไม่ถึงก็ทำให้ MIS STEP ไปอีก ค่า FRICTION ที่สูง ๆ ก็ทำลายการขึ้นของ MOTOR ด้วยการทำ STRESS TEST จะทำตาม ALGORITHM มีการหมุนไป-กลับ ดังนั้น การ MIS STEP จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ที่ต้องมีการทำซ้ำ ๆ เพราะต้องการ การ MIS STEP และจำลองให้เหมือนใน DRIVE จริง ๆ เมื่อให้ MOTOR หยุดในแต่ละขั้นอาจ BRAKE ไม่ทันทำให้ MIS STEP ไปอีก พอเราหยุดมอเตอร์มาดูตำแหน่งเริ่มต้นที่ขีด MARK ไว้กับตำแหน่งสุดท้ายที่แสดงอาจไม่ตรงกันมาจากเหตุผลข้างต้นดังกล่าว (อ่านเรื่อง PULL OUT TORQUE เพิ่มเติมจะเข้าใจขึ้น)

5.6) FULL IN TORQUE/FULL OUT TORQUE

5.6.1) FULL IN



รูปที่ 26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Speed กับ Torque

CURVE ได้มาจากการ APPLY FRICTION LOAD ไปยังมอเตอร์และเริ่ม START TEST ที่ความถี่ที่ถูกกำหนดอัตรา STEP RATE ที่สูงสุดโดยไม่มีภาระโหลด STEP จะถูกบันทึกไว้, MOTOR ถูก RUN TEST โดยค่อย ๆ เพิ่ม FRICTION LOAD จนกระทั่งมอเตอร์เริ่มเคลื่อน

ที่ในอัตรา STEP ปกติ ตาม REGION ระหว่าง PULL OUT TORQUE เรียกว่า SLEW RANGE , MOTOR จะไม่สามารถเริ่ม , หยุด หรือ กลับทิศทางได้ภายใน REGION นี้ มันจะต้องถูกเร่งหรือลดความเร็วลงไปใน STARTING RANGE ก่อนจึงจะเริ่ม , หยุด หรือกลับทิศทางได้

นิยาม

- TORQUE สูงสุดซึ่งมอเตอร์ที่ถูก ENERGIZED จะ START และ RUN ไปในทันที ทันใดที่ถูก APPLY โดย PULSE SIGNAL ได้โดยไม่มีอาการหลุด STEP (LOOSE STEP) ที่ความถี่ที่คงที่หนึ่ง ๆ
- FRICTION LOAD สูงสุดที่มอเตอร์จะขับจากความถี่ความเร็วด้วย PULSE RATE ที่คงที่ LOAD INERTIA มีผลใน TORQUE ชนิดนี้

ประโยชน์ ให้นำค่า FRICTION TORQUE LOAD สูงสุดที่ STEPPER MOTOR สามารถขับได้โดยไม่มีอาการหลุด STEP ที่ PULSE RATE ที่ถูกกำหนดไว้

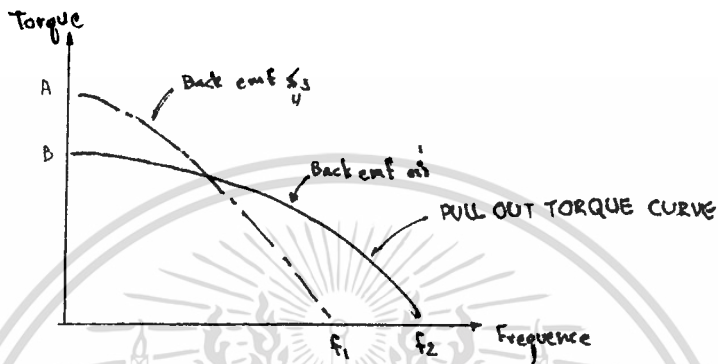
5.6.2) PULL OUT TORQUE

- TORQUE สูงสุดซึ่งสามารถถูก APPLY ไปยัง SHAFT ของ STEP MOTOR (กำลัง RUN ที่ความถี่ที่คงที่) และไม่ทำให้เกิดการสูญเสีย SYNCHRONISM
- CURVE นี้ได้มาโดยที่เราจะ ACCELERATING มอเตอร์จนถึงความเร็วที่กำหนดและ LOADING มีแรงกระทำทั้งหมดนี้ บนที่ค่า TORQUE นั้นไว้และทำการ TEST ที่ช่วงความถี่อื่น ๆ ต่อไป
- CURVE นี้ได้มาโดยการวัด MAX FRICTION TORQUE LOAD ที่ STEP MOTOR สามารถขับได้ระหว่างการ RUNNING ที่ PULSE RATE คงที่ TORQUE LOAD นี้สูงกว่าความเร็วต่าง ๆ กันที่ความเร็วเมื่อ PULL - IN RATE มอเตอร์ถูกเร่งขึ้นถึงความเร็วนี้ , FRICTION LOAD ถูกทำให้เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนกระทั่งมอเตอร์หยุดนิ่งและค่าที่อ่านได้สูงสุดจะถูก RECORD ลง จะต้องระมัดระวังในการ APPLY LOAD อย่างช้า ๆ เพื่อไม่ให้ผลจาก INERTIA ทำให้ค่าที่อ่านได้สูงเกินไป

ประโยชน์ 1. ที่เลือก MOTOR ที่มี DYNAMIC TORQUE ที่เพียงพอต่อการใช้งานให้เลือก MOTOR ที่มีช่วง SPEED ที่เหมาะสม ใช้ค่าแอมแปร์ ความเร่งและความหน่วง ของ PULSE TRAIN

ความสัมพันธ์ของ PULL OUT TORQUE กับค่า B.EMF

ค่าของ PULL OUT TORQUE มีความสัมพันธ์กับค่า BACK EMF.



รูปที่ 27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Torque กับ Frequency

ผลกระทบ จะเห็นได้จากกราฟการทดลองว่า ที่ค่า BACK EMF สูงตอนเริ่ม START ที่ความถี่ต่ำ ๆ จะได้ค่า TORQUE ที่สูง แต่ที่ความถี่สูง ๆ MOTOR จะ FAILED ก่อน ในขณะที่ค่า BACK EMF ต่ำตอนเริ่ม START จะได้ค่า TORQUE ที่ต่ำแต่สามารถ ENERGIZED MOTOR ได้ถึงความถี่สูง ๆ

- เหตุผล
- ที่ความถี่ต่ำ ๆ ขณะเริ่มวัด PULL OUT TORQUE ค่า BACK EMF ยังไม่มีผลในการเกิด TORQUE ด้านทานการหมุน จากเหตุผลตาม BACK EMF คือ AIR GAP เล็ก ๆ ค่า RELUCTANCE จะต่ำ ค่า จะมีค่าสูง (การวัด PULL OUT TORQUE เราจะเร่ง MOTOR ถึงความถี่ที่กำหนดแล้ว BRAKE ให้หยุดนิ่ง TORQUE สูงสุดที่ทำให้ BRAKE หยุด PULL OUT TORQUE) ดังนั้น เมื่อมีค่าสูงก็ทำให้ค่า TORQUE ที่เกิดขึ้นมีค่าสูงตาม รูปกราฟจึงได้ที่จุด A ในทางกลับกันเมื่อค่า RELUCTANCE สูงค่า จะต่ำทำให้ค่า TORQUE ที่เกิดขึ้นต่ำด้วยจึงได้กราฟที่จุด B ดังรูปข้างต้น
 - ที่ความถี่สูง ๆ ค่า BACK EMF จะมีผลอย่างมากในการวัด PULL OUT

TORQUE จากกราฟจะเห็นว่าที่ค่า BACK EMF สูง ๆ เมื่อขณะที่หมุนมอเตอร์ ที่ความถี่สูง ๆ จะได้ค่า VOLTAGE ที่เกิดขึ้นสูงเมื่อ V สูง I ก็สูง ตามทำให้อาจเกิด TORQUE ที่สูงมาต้านทานการเร่งของการวัด PULL OUT TORQUE ($T = KI$) จึงทำให้ MOTOR FAILED ก่อนถึงค่าความถี่สูง ๆ ที่ จะทำการวัด จากกราฟเห็นได้ว่าที่ค่า BACK EMF สูง ความถี่ไปได้แค่ f_1 ที่ค่า BACK EMF ต่ำ ๆ เมื่อขณะที่หมุนมอเตอร์ที่ความถี่สูง ๆ แต่ค่า VOLTAGE ที่เกิดขึ้นก็ไม่สูงมาก ทำให้อาจเกิด TORQUE ต้านทานการเร่งที่ น้อยมากจึงสามารถปรับความเร็วทำการวัด PULL OUT TORQUE ได้ถึง f ค่าสูง ๆ ก่อนที่จะ MISS STEP จากกราฟจะเห็นว่าได้ค่า f_2 ซึ่ง $f_2 > f_1$

ข้อสังเกต จะเห็นว่าที่การวัด PULL OUT TORQUE เราจะทำการวัดความถี่เริ่มต้นที่ 200 Hz เพื่อต้องการหา TORQUE สูงสุดที่จุดนั้นและเพิ่มความถี่ขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุดสูงสุดประมาณ 6 KHz (ST-225) มอเตอร์จะ DOWN ที่ต้องวัดที่ 6 KHz เพราะจากหัวข้อ STRESS TEST เห็นได้ว่า MOTOR ที่ทำงาน ใน DRIVE จริง ๆ จะต้องการ F สูงสุดแค่ 5.4 KHz มอเตอร์ที่ ผ่านความถี่ได้โดยไม่ LOOSE STEP (ในการวัด PULL OUT TORQUE) ก็ ใช้งานได้แต่ที่ DESIGN ให้ LOOSE ที่ 6 KHz นั้นเพราะได้เพื่อเอาไว้ แล้ว (อ้างอิงถึง PULL OUT TORQUE จึงจะเข้าใจ)

PULL OUT TORQUE TESTING

1. FUNCTION GENERATOR จะเป็นตัวกำเนิดความถี่ต่าง ๆ กันตามที่ต้องการ แล้วส่งสัญญาณความถี่เป็น PULSE ไปที่ POWER DRIVE
2. POWER DRIVE จะรับสัญญาณแล้วไปขับตัว MOTOR ให้หมุนด้วยความเร็วตาม ความถี่ $= 2f$
3. จากนั้นเราจะทำการวัด TORQUE และควบคุมที่ VIBRAC เมื่อต้องการให้ ทำการวัด TORQUE ที่ความถี่ใด ๆ ก็สิ่งที่ VIBRAC มันจะส่งไปยัง BRAKE ที่ SPINLESET ให้ทำการ BRAKE MOTOR
4. TORQUE SENSOR ก็จะทำการ DETECT ขนาดของ TORQUE ออกเป็น รูปของ LINEAR CURRENT OUTPUT

(SPINDLE R.P.M. มีไว้ใช้กับ MUT ใน FUNCTION "DRIVE" เพื่อใช้วัด TORQUE ที่ MUT APPLY ออกมา (DETENT TORQUE) เมื่อใช้ FUNCTION DRIVE , CLUTCH จะจับที่ GEAR เพื่อช่วยให้ SPINDLE หมุนกับ MUT

5.7) DETENT TORQUE (RESIDUAL TORQUE)

การ TEST จะไม่ ENERGIZED ROTOR เรา APPLY ให้ ROTOR หมุนและวัด TORQUE ที่ตำแหน่งการหมุนซึ่งเกิดจากสนามแม่เหล็กของ PERMANENT MAGNET , MOTOR ชนิดที่ V.R. DETENT TORQUE จะ = 0

ประโยชน์ - เป็น GENERAL INDICATER ของ P.M. STRENGTH , มอเตอร์ที่มี HIGH DETNET TORQUE จะเคลื่อนที่แบบ MICRO STEP ได้ไม่ดีเลย

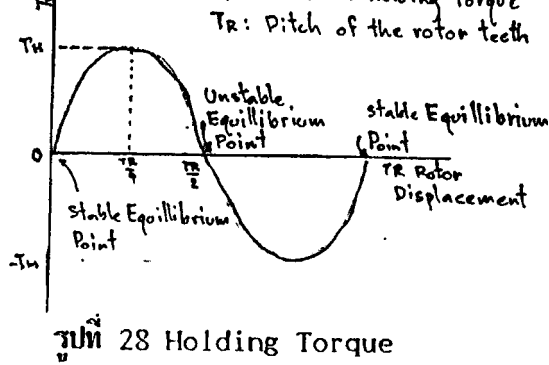
DETENT TORQUE TESTING

1. เราป้อนคำสั่งที่ POWER DRIVE ว่าต้องการให้ MUT หมุนกี่รอบ POWER DRIVE จะส่งคำสั่งไปยัง STEPPER MOTOR ให้จับ MUT หมุนตามต้องการ
2. ขณะที่ MUT หมุน X-DUCER จะ DETECT TORQUE ที่เกิดขึ้นออกมา และส่งไปแปลงรูปที่ VIBRAC
3. VIBRAC จะส่งขนาด TORQUE ลงไป SHOW บน CRT ของ OSC
4. ตัว POWER DRIVE จะส่งจำนวนรอบการหมุนที่สัมพันธ์กับ TORQUE ไป SHOW บน CRT ของ OSC คนละแกนกับ TORQUE

(NOTE : HOLDING TORQUE เหมือน DETENT แต่มีการ ENERGIZED เท่านั้น)

5.8) HOLDING TORQUE

จะ ENERGIZED PHASE MOTOR ให้มันอยู่นิ่งแล้ว APPLY แรงพยายาม ให้มันหมุนมันก็จะเกิด TORQUE ต้านกลับจากสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น เมื่อเราบิดไปที่ละ STEP TORQUE จะสูงขึ้นจนถึงจุดสูงสุด ซึ่งเป็นปกติที่จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งที่เท่ากับ STEP ANGLE เมื่อหลุดจากสนามแม่เหล็กที่เกิดโดยตรงดังรูป แรงต้านก็จะค่อย ๆ ลดลง เนื่องจากความเข้มสนามแม่เหล็กลดลงจนถึงจุด UNSTABLE ดังรูป สนามแม่เหล็กถูกแบ่งทำ ให้เกิดสภาพ UNSTABLE



รูปที่ 28 Holding Torque

ประโยชน์ ใช้หาค่าต่าง ๆ แล่นนี้

- POSITIONAL ERROR เนื่องจาก FRICTION LOADS
- พลังงานสูงสุดที่มอเตอร์ DELIVER ออกมาได้มี RATED CURRENT ภายใต้อินนาม IDEAL
- TORQUE LOAD สูงสุดที่มอเตอร์จะมี RELIABLY DRIVE
- NATURAL OSCILLATION FREQUENCY เมื่อทราบค่าของ ROTOR INERTIA

5.9) FRICTION TORQUE

การ TEST FRICTION เป็นการหา FRICTION TORQUE ที่เกิดจากตัวมอเตอร์เองโดยไม่นำเอา TORQUE จาก DETENT มาเกี่ยวข้องจากการวัด FRICTION พบว่ามันจะมีผลถึง

- RINGING : FRICTION TORQUE จะเป็นตัวต้านทานต่อการ RINGING ถ้า FRICTION มีค่าต่ำก็จะเกิด RINGING มากเพราะไม่มี TORQUE อยะไรต้านทาน แต่ถ้ามี FRICTION มากเกินไปค่า HYSTERESIS ก็จะมี ERROR มาก

- HYSTERESIS : เป็นการวัด STEP ANGLE ช่วง REVERSE ดังนั้นถ้า FRICTION สูงมันจะไปต้านทานไม่ทำให้การหมุนกลับมาที่จุดเดิมทำให้อะไร HYSTERESIS ERROR สูงได้

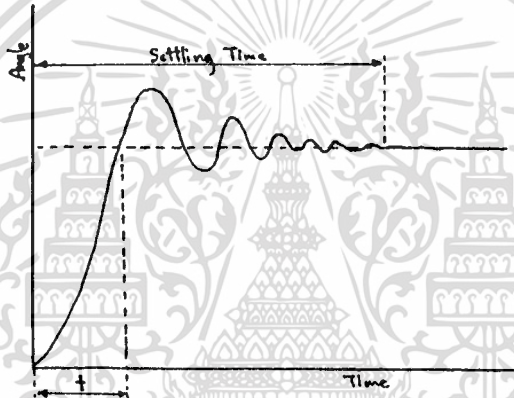
- HOLDING TORQUE : ปกติของ HOLDING TORQUE เมื่อเราหมุนมันออกจากจุด STABLE PT. แล้ว ปลดของมันก็จะกลับไปจุดเดิมแต่เมื่อมี FRICTION เมื่อเราปลดของมันจะไม่กลับไปจุด STABLE พอดีเนื่องจากมี TORQUE จาก FRICTION เมื่อเราปลดของมันจะไม่กลับไปจุด STABLE พอดีเนื่องจากมี TORQUE จาก FRICTION ด้านหน้าอยู่ FRICTION ที่ CW จะต้านทานการหมุนกลับของ HOLDING TORQUE ด้าน CCW

5.10) SNOW-PLAW TESTING

เป็นการวัด FRICTION ของ MOTOR แบบหนึ่ง แต่เราจะใช้วัดต่อเมื่อ MOTOR ที่ทำการ STRESS TEST มาแล้วโดยมอเตอร์ขณะที่ทำ STRESS TEST จะหมุนกลับไปมา ทำให้ GREASE ภายในเปิดค้างอยู่ที่ข้างใดข้างหนึ่ง ทำให้เกิด FRICTION ซ้ำมากกว่า MOTOR ที่ไม่ได้ผ่านการทำ STRESS TEST เริ่มแรกจะทำการวัดตอนที่ NO SHAFT MOVEMENT เพราะถ้า GREASE ที่เปิดค้างอยู่มากจะทำให้เกิด FRICTION สูงสุดตอนเริ่มแรกนั้นหลังจากนั้นจะทำการวัดตอน SHAFT MOVE แล้วเพื่อทำการเปรียบเทียบกัน และ PLOT กราฟออกมาดูความแตกต่าง

5.11) SINGLE STEP RESPONSE

ขณะที่ APPLY 1 PULSE SIGNAL ไปยัง STEPPING MOTOR ROTOR จะมีรูปข้างล่าง



รูปที่ 29 แสดง response time ในโรเตอร์ของสเตปมอเตอร์

นิยามโดยทั่วไป

SINGLE STEP TIME (RISE TIME, t)

เป็นคาบเวลาที่ คาบเกี่ยวอยู่ระหว่างขณะที่ PULSE แรกถูก APPLY คาบขณะที่ SHAFT หมุนไป 1 STEP แรก

OVERSHOOT เนื่องจาก INERTIA ของ ROTOR

SETTING TIME เมื่อหยุด APPLY PULSE SIGNAL, STEPPING MOTOR จะหยุดหมุนแต่ไม่หยุดสนิท การหยุดสนิทจะเกิดขึ้นต่อเมื่อการ OSCILLATION ได้

จบสิ้นลงแล้ว คั้งนี้นิยามของ SETTING TIME คือ เวลาที่เกิดขึ้นจากการ APPLY PULSE สุดท้ายจนกระทั่งถึงจุดที่ MOTOR หยุดนิ่ง หลังจาก DAMPING OSCILLATION คือ เวลาที่เกิดจาก FIRST CROSS OVER POINT ของ ROTOR ที่ ตำแหน่งสุดท้ายถึงจุดที่ ROTOR หยุดการลั่นลงประมาณ 10% ของ FINAL STEP POSITION

นิยามเสริมที่สัมพันธ์กับ DRIVE LEVEL

TRACK TO TRACKTIME คือ เวลาที่ใช้ในการเลื่อนหัวอ่าน-เขียนไป TRACK

SEEKING TIME คือ เวลาที่ใช้ในการเลื่อนหัว อ่าน-เขียนไป จาก แทรคใด แทรคหนึ่งไปยัง TRACK ที่ต้องการโดยค่าเวลานี้มีค่าเท่ากับจำนวนแทรคที่เลื่อน คูณกับช่วง เวลาจากแทรคค่าปแทรค

SETTLING TIME คือ ช่วงเวลาที่ต้องรอให้ หัวอ่าน-เขียน หยุดนิ่งหลังจากการที่ SEEK เพื่อทำการอ่านเขียนได้



บทที่ 6
ทฤษฎีเกี่ยวกับ 8253

การใช้งานโดยทั่วไปแบ่งเป็น 6 โหมด คือ

1) Mode 0 (Interrupt on terminal count.)

ลักษณะการทำงานในโหมด 0 counter จะนับแบบนับลง เมื่อค่าที่ counter นับมีค่าเป็น 0 ขา out ของ counter จะมี logic เป็น 1 ละถัดเป็นโหมด 0 นี้ counter จะต้องถูกโปรแกรมค่าเริ่มแรกที่จะนับก่อน เราสามารถหยุดการนับของ counter ได้ โดยการให้ logic 0 ที่ขา input gate ของ counter

2) Mode 1 (Programmable one-shot)

ในโหมดนี้ 8253 จะสามารถให้ output ในรูปของ pulse และความกว้างของ pulse นี้ มีค่าเป็นจำนวนเท่าที่เป็นเลขจำนวนเต็มของสัญญาณนาฬิกาที่ป้อนเข้ามาที่ขา clock โดยความกว้างของ pulse จะถูกกำหนดไว้ในตอนแรกแล้ว ซึ่งการทำงานของ one-shot จะเกิดขึ้นเมื่อมีสัญญาณขอบขาขึ้นเข้ามา กระตุ้นที่ขา input gate ทำให้เกิด pulse ที่ output

2) Mode 2 (Rate generator)

ในโหมดนี้ 8253 ถูกใช้เป็น counter ที่ทำหน้าที่หารด้วย N ทำให้ได้สัญญาณที่ขา output เป็น logic 0 และ 1 สลับกันไปด้วยความถี่เท่ากับสัญญาณ input clock หารด้วย N ทำให้ช่วงกว้างของ logic 0 มีค่าเท่ากับ 1 คาบของ clock ส่วนช่วงกว้างของ logic 1 มีค่าเท่ากับสัญญาณ input clock หารด้วยค่า N

3) Mode 3 (Square wave generator)

ในโหมดนี้ลักษณะคล้ายกับ mode 2 ที่กล่าวมาแล้วแต่ output เป็น square wave ช่วงกว้างของ logic 1 และ 0 สมมาตรกัน แต่ถ้าค่า N เป็นเลขคี่ output ที่ได้จะมีช่วงกว้างของ logic 1 เท่ากับ $(N+1)$ หารด้วย $2 \times (\text{คาบเวลาของสัญญาณ clock})$ และช่วงกว้างของ logic 0 จะเท่ากับ $(N-1)$ หารด้วย $2 \times (\text{คาบเวลาของสัญญาณ clock})$

4) Mode 4 (Software triggered strobe)

ผู้เขียนโปรแกรมสามารถเซ็ตค่า counter ใหม่นี้ output หนึ่งเวลาออกไปหลังจากที่ counter เริ่มทำงาน (โดยเริ่มนับค่าที่โหนดให้) เมื่อนับค่าดังกล่าวจนมีค่าเป็น 0 แล้ว output ที่ได้จะมีลักษณะเป็น logic 0 มีคาบเวลาเท่ากับคาบเวลาของ clock 1 ลูก และจะกลับไปเป็น logic 1 อีกครั้ง

5) Mode 5 (Hardware triggered strobe)

การทำงานในโหมดนี้ counter จะให้ output หนึ่งเวลาออกไปหลังจากที่ counter เริ่มนับเหมือนกับใน mode 4 แต่ counter จะเริ่มทำการนับก็ต่อเมื่อมีขอบขาขึ้น (rising edge) ของสัญญาณกระตุ้น (trigger) เข้ามาให้กับ counter สำหรับโครงการนี้ เราได้ใช้ 8253 ใน mode 1 และ mode 3 ซึ่งได้กล่าวถึงการนำไปใช้ไว้ในหัวข้อ Control Circuit แล้ว



บทที่ 7

ส่วนประกอบที่สำคัญในการควบคุม Stepping Motor

ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 ส่วนใหญ่ๆ คือ

7.1) Program Control (C language)

ในโครงการนี้เราจะควบคุม Stepping Motor โดยการโปรแกรมภาษา C ให้กับ Personal Computer ผ่านทาง keyboard โดยสัญญาณควบคุมที่ได้จาก PC จะส่งผ่านทาง PC slot ต่อไปยังส่วน Interface Circuit

7.2) Interface Circuit

เป็นวงจรเชื่อมต่อกันระหว่างไมโครคอมพิวเตอร์ สำหรับการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกกับไมโครคอมพิวเตอร์ใช้ address 10 บิต โดย A9 จะต้องเป็น 1 เมื่อต้องการให้เป็น output port (input port จะไม่ขึ้นกับ A9) ดังนั้นจึงต้องเลือก port เบอร์ 300H-307H เพื่อความสะดวกในการออกแบบวงจรและเขียนโปรแกรมวงจรนี้ประกอบด้วย U4,U5A และ U5B โดย U4(74LS68)ทำหน้าที่เป็นตัวกำหนด port ใน 2 หลักแรก คือ 30(0110 0000) และ U5A,U3 เป็นตัวแปลงรหัสเพื่อเลือกเบอร์ port ในหลักสุดท้ายคือ 0 ถึง 7 (0000 0111)

การทำงานของ 74LS68 คือเมื่อ A9-A3 (Q7-Q0) = P7-P0 จะให้ logic "0" ซึ่งในวงจรนี้ถ้าต้องการให้ output เป็น logic "0" จะต้องมี logic ค้าง

AEN	A9	A8	A7	A6	A5	A4	A3
0	1	1	0	0	0	0	0

ตารางที่ 1 แสดงการอ้าง port

ซึ่งก็คือการอ้าง port 1 ใน 2 หลักการแรกเป็น 30 ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว สำหรับ U5A (74LS139) เป็นวงจรถอดรหัส โดยขา A และ B จะต่อกับ A2 ซึ่งหมายความว่าถ้า A2 เป็น 0 (A=0,B=0) Y0 จะมี logic ต่ำ เมื่อ A2 เป็น 1 Y3 จะถูกเลือกแทนคือมี logic ต่ำ และไป enable U5B 1 หนัถอดรหัส A1 และ A0 ออกเป็น 4 port อื่นๆ โดย port ต่างๆจะถูกใช้งานดังต่อไปนี้

PORT No.	FUNCTION
300H	วงจรรับ 0 (Speed Control)
301H	วงจรรับ 1 (Step Control)
303H	8253-5 Mode Control
304H	Motor Selected , Direction

ตารางที่ 2 แสดงหน้าที่ของ port ต่างๆ

ส่วน PORT No. 302,305-307 not used

ส่วนข้อมูลที่โปรแกรมจากไมโครคอมพิวเตอร์จะถูกส่งมายัง U5B(74LS645) ซึ่งเป็นบัฟเฟอร์ที่สามารถกำหนดทิศทางของข้อมูลได้ โดยถ้าขา 1 เป็น 0 ข้อมูลส่งจาก B ไปยัง A ถ้าเป็น 1 จะส่งจาก A ไปยัง B ในกรณีนี้ขา IOR เป็น 1 ขา G เป็นขา gate ที่มี logic เป็น 0

7.3) Control Circuit

วงจรรส่วนนี้ประกอบด้วย U4,U5,U6,U7 และ U8 โดยจะเริ่มกล่าวถึง U6 ซึ่งเป็น latch แบบ Positive-edge triggered ก่อน โดยมีเพนภูมิเวลาดังรูป เมื่อมีการ out มาที่ port 304H ขา Y0 ของ U5B เป็น 0 และจะทำให้ขา 12 ของ U7F หรือขา CLK ของ U9 เป็น 1 ซึ่งทำให้เกิดสัญญาณขอบขาขึ้นไป latch ข้อมูลใน U9 ไว้ ซึ่งแต่ละบิตจะนำไปควบคุมส่วนต่างๆดังนี้

สัญญาณ	หน้าที่
Q1	จะต่อไปยัง C0 ซึ่งจะควบคุมวงจรรัน 0 ของ 8253
Q2	จะต่อไปยัง G1 ซึ่งจะควบคุมวงจรรัน 1 ของ 8253
Q3	Unused
Q4	เป็นสัญญาณเลือกมอเตอร์ ถ้าเป็น 0 จะเลือกมอเตอร์ X ถ้าเป็น 1 จะเลือกมอเตอร์ Y
Q5	Direction ใช้กำหนดทิศทางของมอเตอร์ ถ้าเป็น 0 จะหมุนตามเข็มนาฬิกา เป็น 1 จะหมุนทวนเข็มนาฬิกา
Q6	Unused
Q7	Unused
Q8	Unused

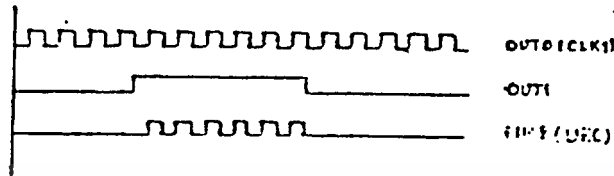
ตารางที่ 3 แสดงหน้าที่ของสัญญาณต่างๆ

ส่วนสำคัญของวงจรถอบคุมนี้เกี่ยวข้องกับวงจรรันซึ่งใช้ 8253-5 PROGRAMMABLE INTERVAL TIMER ซึ่งมีวงจรรัน 16 บิต 3 ตัว สามารถโปรแกรมได้อิสระถึง 6 mode รายละเอียดของไอซีเบอร์นี้เจออยู่ในภาคผนวก ความถี่ที่ใช้งานสูงสุดประมาณ 2.6 MHz แต่สัญญาณ CLK สูงสุดของสลอตเท่ากับ 10 MHz จะใช้ D-FLIP FLOP 2 ตัวต่อเป็น TOGGLE 2 ภาค ซึ่งใช้หารความถี่จาก pc slot แล้วไปเข้าที่ขา CLK0 ของ 8253 เพื่อเป็นความถี่มูลฐานของวงจรรันต่อไป

วงจรรันเบอร์ 0 ของ 8253 จะถูกโปรแกรมโดย D7-D0 ให้เป็น square wave generator (mode 3) ให้ความถี่ที่ขา OUT0 ออกมา และจะต่อไปยัง CLK1 เพื่อเป็น clock ให้กับวงจรรัน 1 ซึ่งถูกโปรแกรมเป็น monostable (mode 1) โดยความยาวของ mode 1 จะสามารถโปรแกรมได้เช่นกัน ดังนั้นจะเสมือนกับการรัน pulse ที่ส่งมาจากวงจรรัน 0 โดยเริ่มนับที่ขอบขาขึ้นของ Q1 ซึ่ง OUT1 จะไป AND กับ OUT0 จะได้ pulse train ที่มีความถี่และจำนวนพัลส์ที่ต้องการ

สัญญาณจาก U9 จะต่อไปยังวงจรถเลือก โดยเมื่อสัญญาณเลือกมอเตอร์เป็น "0" จะผ่านสัญญาณจาก U9 นี้ไปยังวงจรถเลือกของมอเตอร์ X สัญญาณเลือกมอเตอร์

เตอร์เป็น "1" จะผ่านสัญญาณไปยังวงจรรีเคเวนเซอร์ของแกน Y สำหรับสัญญาณจากวงจรรีเคเวน 0 จะเป็นความเร็วของมอเตอร์ และสัญญาณจากวงจรรีเคเวน 1 จะเป็นค่าความคุมสเตป ส่วนวงจรรีเคเวน 2 จะถูกโปรแกรมให้อยู่ใน mode 2 (Rate Generator) ซึ่งรับสัญญาณ clock จากสัญญาณทริกของวงจรรีเคเวนเซอร์ ซึ่งแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 30 แผนภูมิเวลาของสัญญาณควบคุมมอเตอร์

7.4) Sequencer Control Circuit

วงจรรีเคเวนทำหน้าที่ในการจัดลำดับการกระตุ้น Stepping Motor ให้หมุนไปในทิศทางที่ต้องการด้วยโหมคการกระตุ้นที่กำหนด ในโครงงานนี้ใช้การกระตุ้นแบบ 2 เฟส สำหรับ pulse input ได้จาก U8 และสัญญาณการหมุนได้จากขา 12 ของ ไอซีเบอร์ 74LS273 output ของวงจรรีเคเวนจะเป็น logic ครึ่งลข 2 เฟสเรียงกันไป จาก Ph1 และ Ph2, Ph2 และ Ph3, Ph3 และ Ph4, Ph4 และ Ph1 ไปเรื่อยๆหรือกลับทิศทางขึ้นอยู่กับการกำหนดทิศทาง ความเร็วในการเปลี่ยนเฟสขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณป้อน แต่ต้องไม่เกินความถี่ที่มอเตอร์จะตอบสนองได้ output ทั้ง 4 ที่ได้จะนำไปต่อกับวงจรรีเคเวนมอเตอร์ต่อไป

7.5) Driver Circuit of Stepping Motor

Stepping Motor ที่ใช้ต้องการไฟเลี้ยง 3.4 V ความต้านทานของขดลวด 1 Ohm/phase กระแสที่พิกัด 2.9 A มุมต่อสเตปเท่ากับ 1.8 องศา โดยทำการกระตุ้นแบบ 2 เฟส เพื่อลดการสั่นและเพิ่มแรงบิดเพื่อความแม่นยำของตำแหน่ง ดังรูปที่ 8 จากวงจรรีเคเวน FIG 8 กำหนดให้

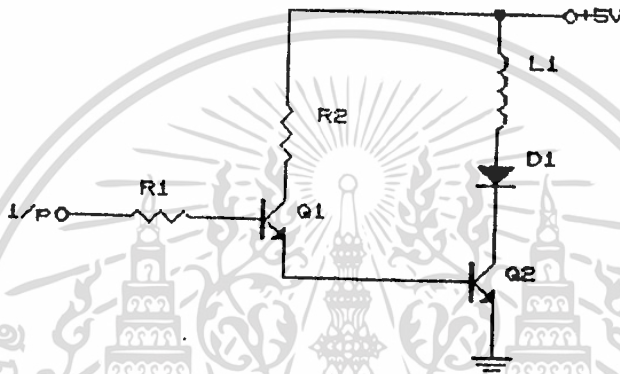
$$E = 5 \text{ V}$$

$$R_e = 0.5 \text{ Ohm}$$

$$C = 0.22 \text{ uF}$$

Diode ใช้เบอร์ 1N4001

สำหรับตัวเก็บประจุที่ต่อกับ ph1 และ ph3 จะเป็นตัวป้องกันทรานซิสเตอร์ในช่วงที่มันไม่ทำงาน (off) โดยจะเป็นตัวดูดกลืนกระแสจากขดลวด และยังทำหน้าที่เป็น Electrical Damper ในกระแสไหลวน loop และเกิด Jule heat ในขดลวด ค่าของตัวเก็บประจุน้อยแรงบิดยิ่งมาก ซึ่งจะเห็นได้ชัดในช่วงความถี่สูงในโครงการนี้จะใช้ค่าประมาณ 0.22 uF 100 V



รูปที่ 31 แสดงวงจรขับกระแส

กระแสที่ต้องการคือ 2.9 A

Q1 2N2222 มีค่า $h_{fe} = 100$

Q2 TIP 41C มีค่า $h_{fe} = 15$

I_{c2} คือค่ากระแสที่เราต้องการ

$$I_{b2} = 2.9/15 = 193 \text{ mA}$$

$$I_{b2} = I_{c1}$$

$$I_{b1} = 193/100 = 1.93 \text{ mA}$$

I_{b1} เป็นกระแสสูงสุดที่ได้จากวงจรควบคุมมอเตอร์

ถ้าค่าสัญญาณที่ได้จากวงจรควบคุมประมาณ 2 V จะคำนวณค่า R1 ได้จาก

$$2.0 = 1.93 \times 10^{-3} R1 + 0.6 + 0.6$$

$$R1 = 41.4 \text{ Ohm} \quad \text{ดังนั้นจะใช้ } R1 \text{ 43 Ohm}$$

คำนวณหาค่า R2 จากวงจรจะได้

$$R2 = (5 - 0.6 - 0.6)/193 \times 10^{-3}$$
$$= 19.68 \text{ Ohm}$$

ดังนั้นจะใช้ $R2 = 20 \text{ Ohm}$



บทที่ 8
สรุปและวิจารณ์

สำหรับ Project นี้ได้ประยุกต์ใช้งาน Stepping Motor เป็นตัวต้นกำลังเพื่อใช้ขับ Power Screw ซึ่งเป็นส่วนส่งกำลังของชุดขับเคลื่อน Stepping Motor สำหรับควบคุมการทำงานในตำแหน่ง X-Y ซึ่งจากการทดสอบการทำงานของชุดขับเคลื่อน Stepping Motor สำหรับควบคุมการทำงานในตำแหน่ง X-Y พบว่าสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการในระนาบ X-Y ได้ดีพอสมควร สำหรับปัญหาที่พบในการทำ Project นี้ มีสาเหตุที่สำคัญหลักๆคือ ชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่นำมาใช้สร้างชุดขับเคลื่อน Stepping Motor สำหรับควบคุมการทำงานในตำแหน่ง X-Y นี้ไม่ได้ตาม spec ที่ต้องการ ทำให้ยากต่อการนำมาแก้ไขดัดแปลงเมื่อนำมาประกอบ



กิจกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบคุณ รศ.ดร. วิริยะ พิเชษฐจำเรญ ที่ได้ให้คำแนะนำแนวทาง
ในการทำงานจนสำเร็จล่วงไปด้วยดีมาโดยตลอด

ท้ายที่สุดนี้ ขอมอบให้เพื่อนๆ ร่วมรุ่น 27 ทุกคนที่ได้มีโอกาสร่วมเรียนด้วยกัน
มาตลอดระยะเวลา 4 ปี



หนังสืออ้างอิง

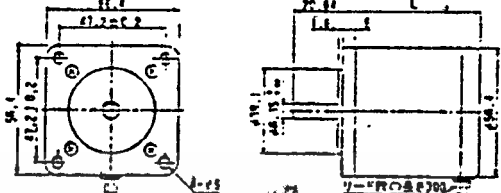
1. Takashi Kenjo, Stepping Motors and their Microprocessor Controls, The University Press(Belfast), 1986
2. C.K. Taft, R.G. Gauthier, Stepping Motor System Design and Analysis, University of New Hampshire, 1988
3. S.B. Dewan, A.Straughen, Power Semiconductor Circuits, John Willey & sons, 1975
4. สิทธีชัย โกไคยอุดม, พีรศักดิ์ วรสุเทพโรสด, ไชยมิโอะ อิชะสะกิ, ทฤษฎีและการคำนวณวงจรอิเล็กทรอนิกส์, 1990
5. กตยา แก้วพิชัย, ธนัท ชัยบุตร, คู่มือการใช้ PRODESIGN II, 1978



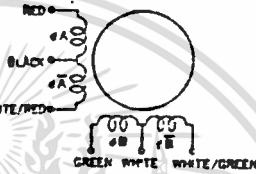
STEPPING MOTORS HB(HYBRID)type

● ステッピングモータ HB(ハイブリッド)型

● 外形寸法 DIMENSIONS(mm.)
Fig. 9 KP56KM, KP56KM2, KP56LM, KP56LM2



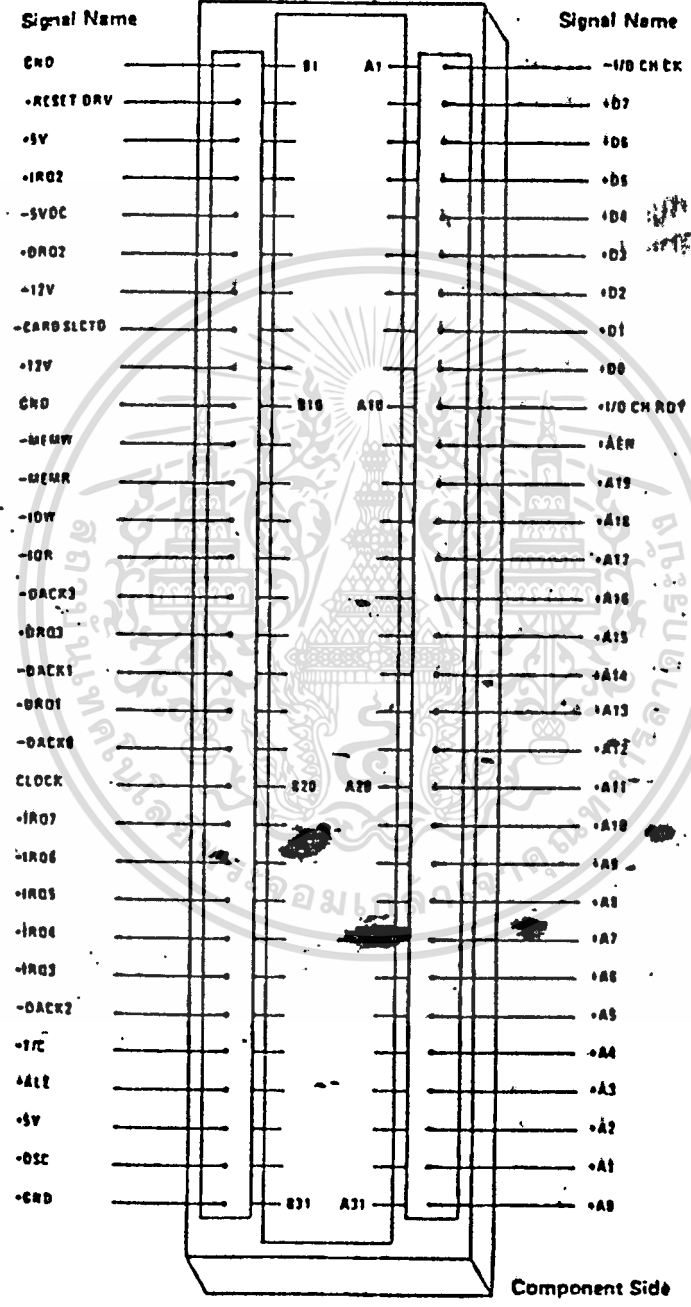
● 結線方法 CONNECTION DIAGRAM
Fig. 10



● 標準仕様 STANDARD SPECIFICATIONS

規 格 名 MODEL	KP56KM1					KP56KM2				
	-S01	-S01	-S02	-S03	-S04	-S01	-S01	-S02	-S02	-S04
相 数 PHASE	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
ステップ角 STEP ANGLE deg./STEP	0.9	1.8	1.8	1.8	1.8	0.9	1.8	1.8	1.8	1.8
電 圧 VOLTAGE V	12	2.25	12	12	24	5	1.4	5	12	24
電 流 CURRENT A PHASE	0.4	1.6	0.75	0.4	0.2	1.0	3.6	1.0	0.43	0.21
巻線抵抗 RESISTANCE Ω PHASE	30	1.4	8	30	120	5	0.37	5	28	115
インダクタンス INDUCTANCE mH PHASE	40	1.45	7	30	95	8.5	0.63	9	44	167
最大静止トルク HOLDING TORQUE kgf·cm	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
ディテントトルク DETENT TORQUE gf·cm	300	300	300	300	300	300	450	450	450	450
ロータイナーシャ ROTOR INERTIA g·cm ²	60	60	60	60	60	110	110	110	110	110
重 量 WEIGHT gf	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
外 形 寸 法 DIMENSIONS	Fig. 9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
軸 径 軸 長 L径法 L LENGTH mm	36	36	36	36	36	50.8	50.8	50.8	50.8	50.8
結 線 方 法 CONNECTION DIAGRAM	Fig. 10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
絶 縁 耐 圧 INSULATION CLASS	B					B				
絶 縁 性 抗 INSULATION RESISTANCE	500V DC 100MΩ min					500V DC 100MΩ min				
絶 縁 耐 力 DIELECTRIC STRENGTH	500V 50Hz 1min.					500V 50Hz 1min.				
使 用 環 境 温 度 AMBIENT TEMPERATURE °C	-10-50					-10-50				
温 度 上 昇 TEMPERATURE RISE deg.	80					80				
リ ー ド 線 仕 様 LEADS SPECIFICATION	AWG #22 UL-3256					AWG #22 UL-3256				

Rear Panel



I/O Channel Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



8253/8253-5 PROGRAMMABLE INTERVAL TIMER

- MCS-85™ Compatible 8253-5
- 3 Independent 16-Bit Counters
- DC to 2.6 MHz
- Programmable Counter Modes
- Count Binary or BCD
- Single +5V Supply
- Available in EXPRESS.
 - Standard Temperature Range
 - Extended Temperature Range

The Intel® 8253 is a programmable counter/timer device designed for use as an Intel microcomputer peripheral. It uses nMOS technology with a single +5V supply and is packaged in a 24-pin plastic DIP. It is organized as 3 independent 16-bit counters, each with a count rate of up to 2.6 MHz. All modes of operation are software programmable.

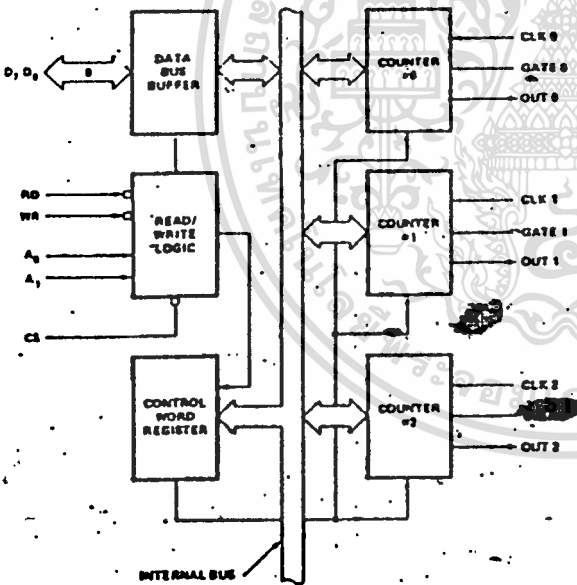


Figure 1. Block Diagram

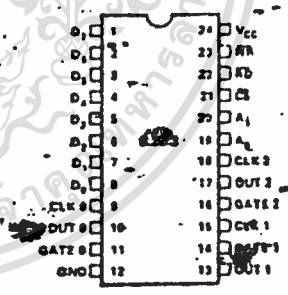
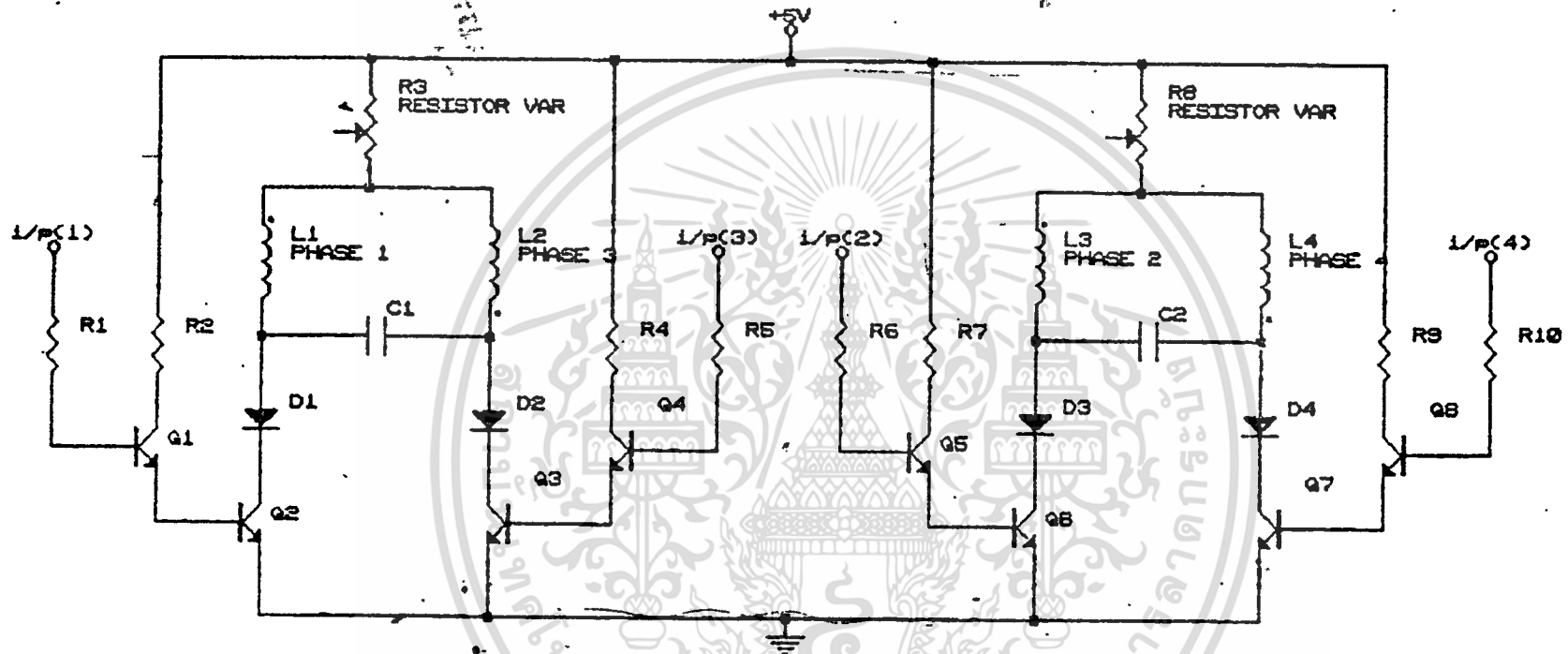
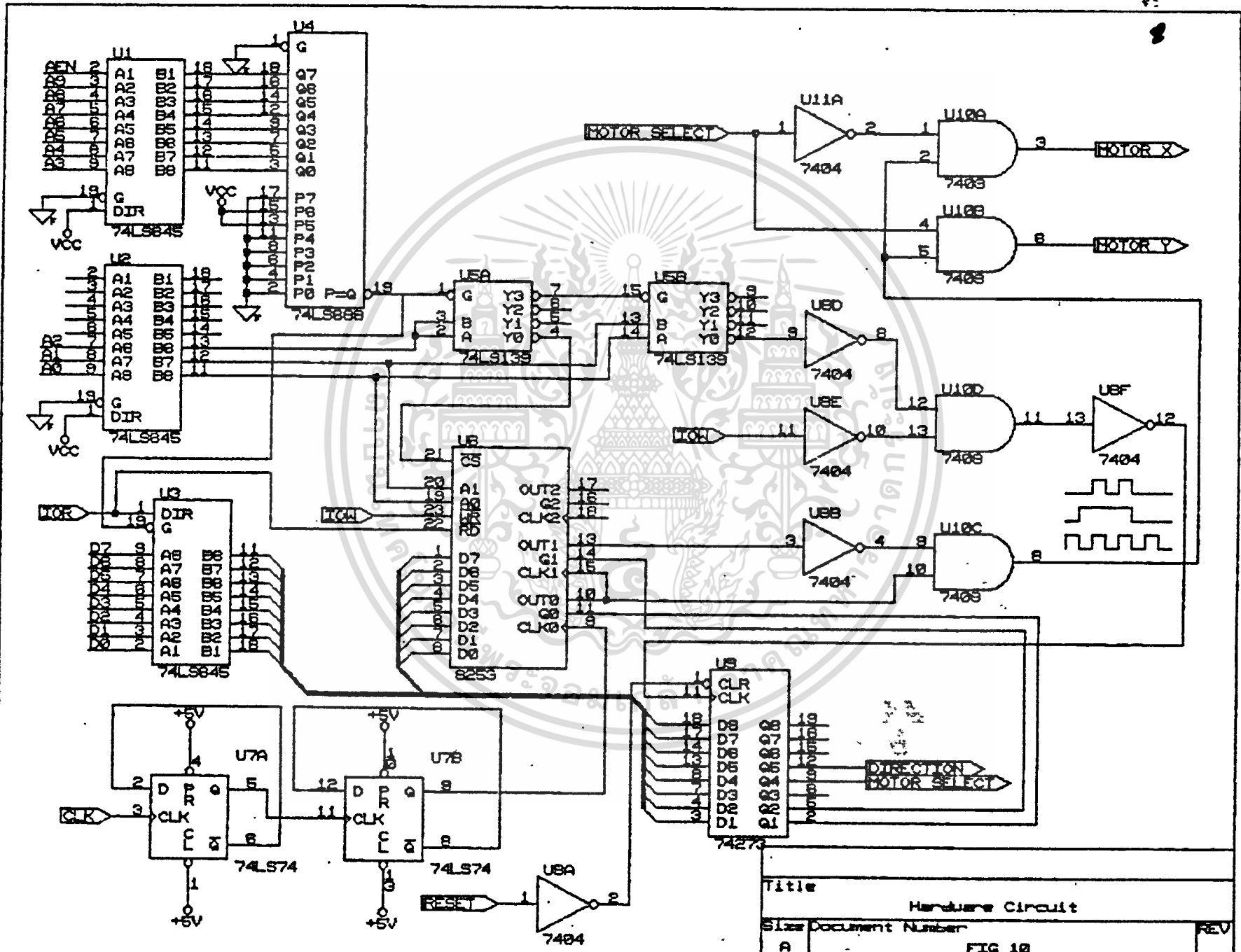


Figure 2. Pin Configuration

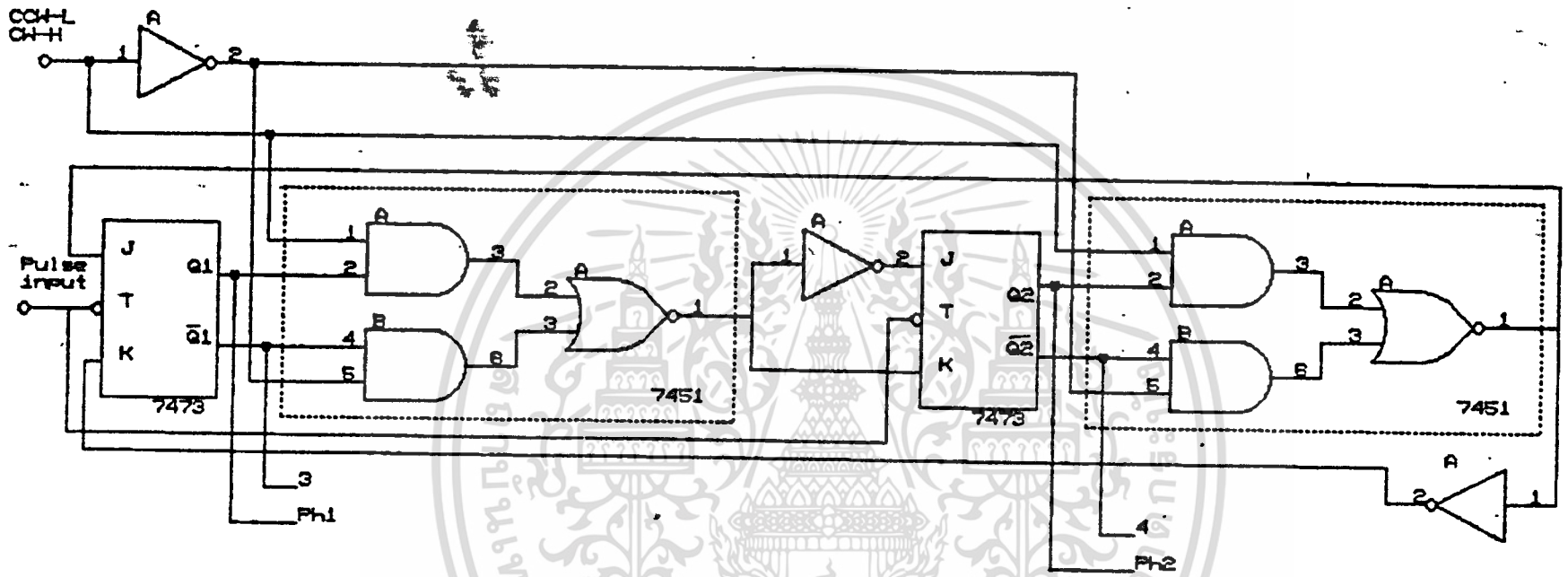
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Title		
Driver System and Circuitry		
Size	Document Number	REV
A	FIG 8	
Date:	January 1, 1998	Sheet of



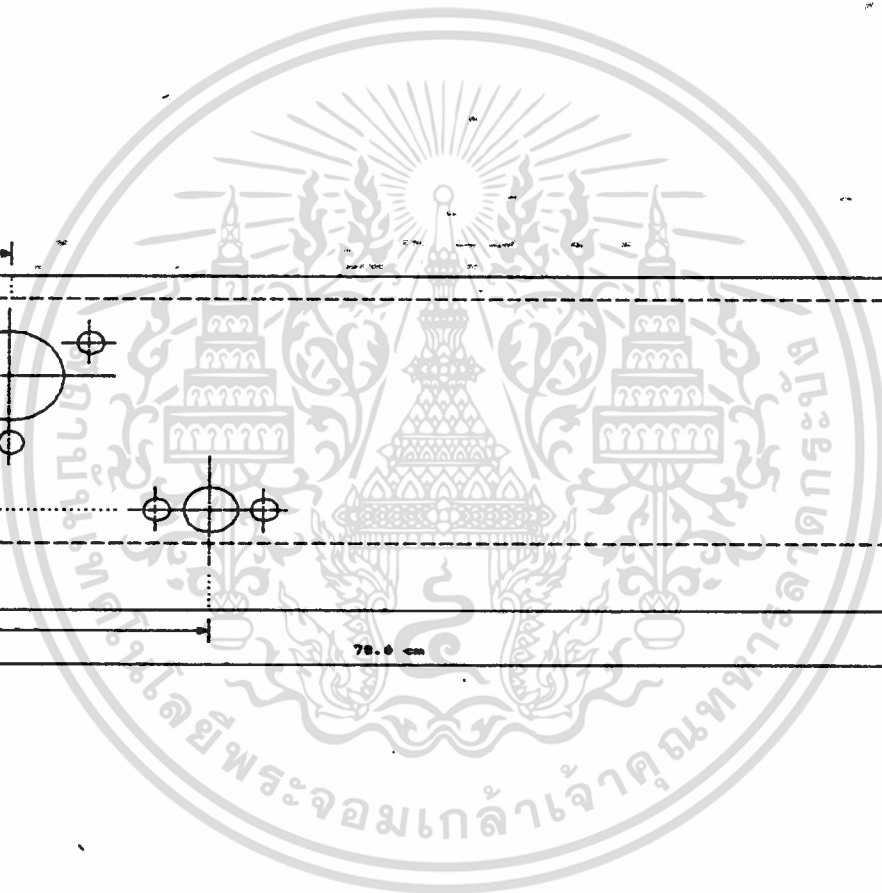
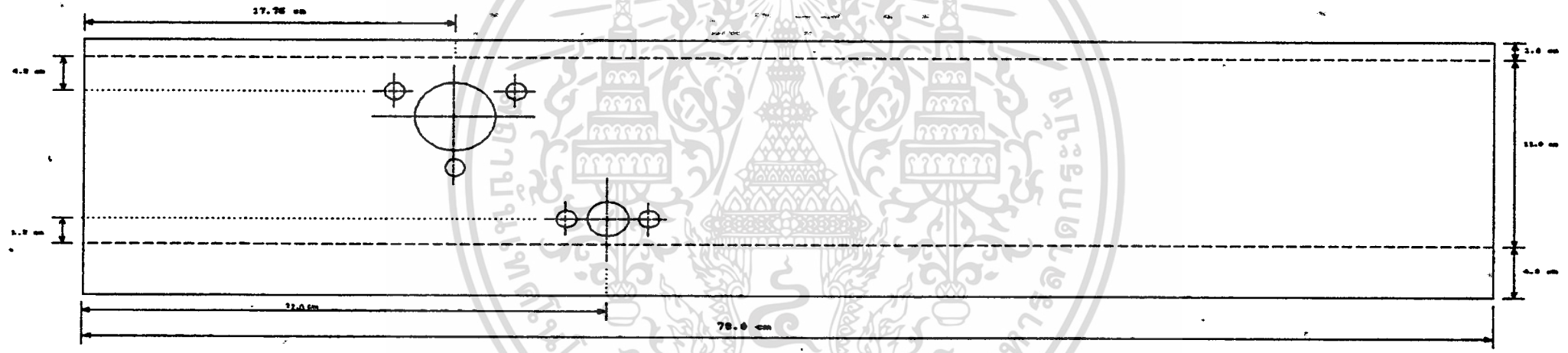
Title		Hardware Circuit
Size Document Number		REV
A	FIG 10	

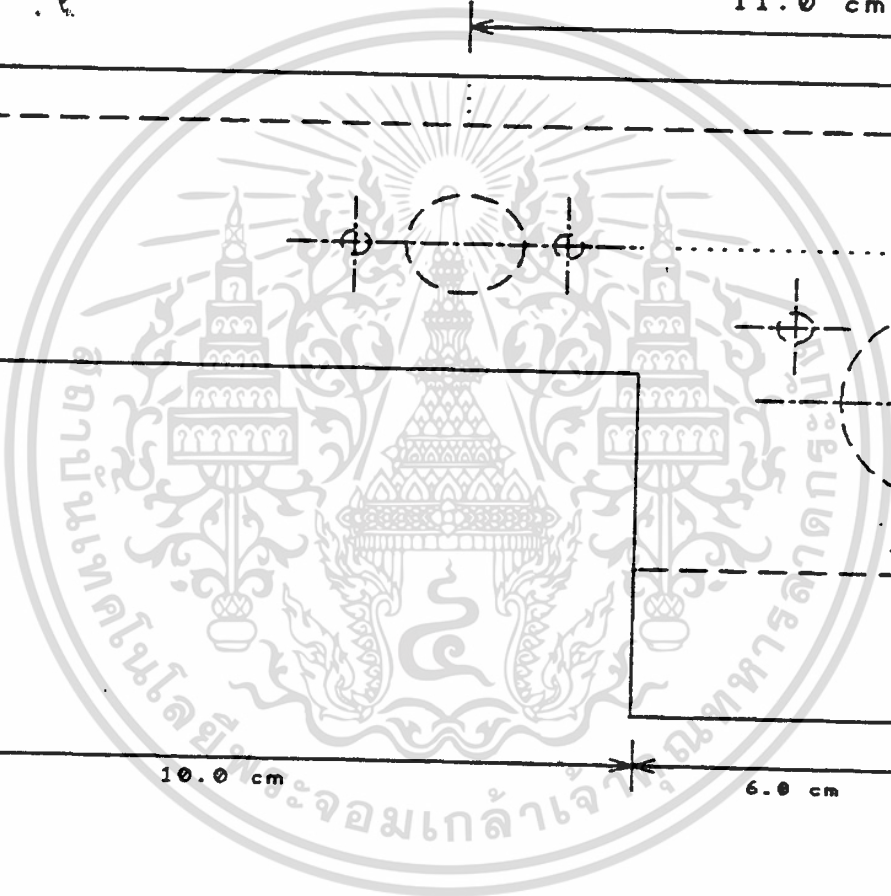
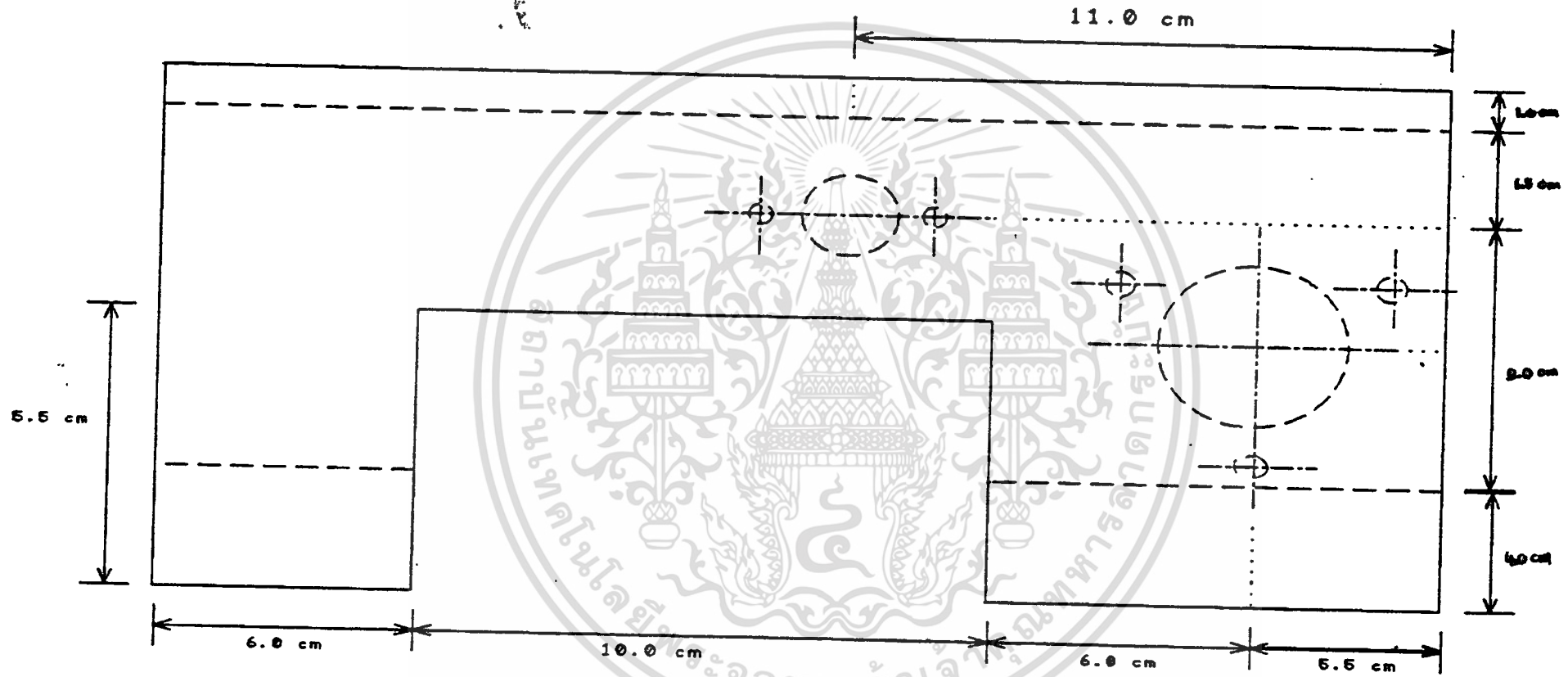


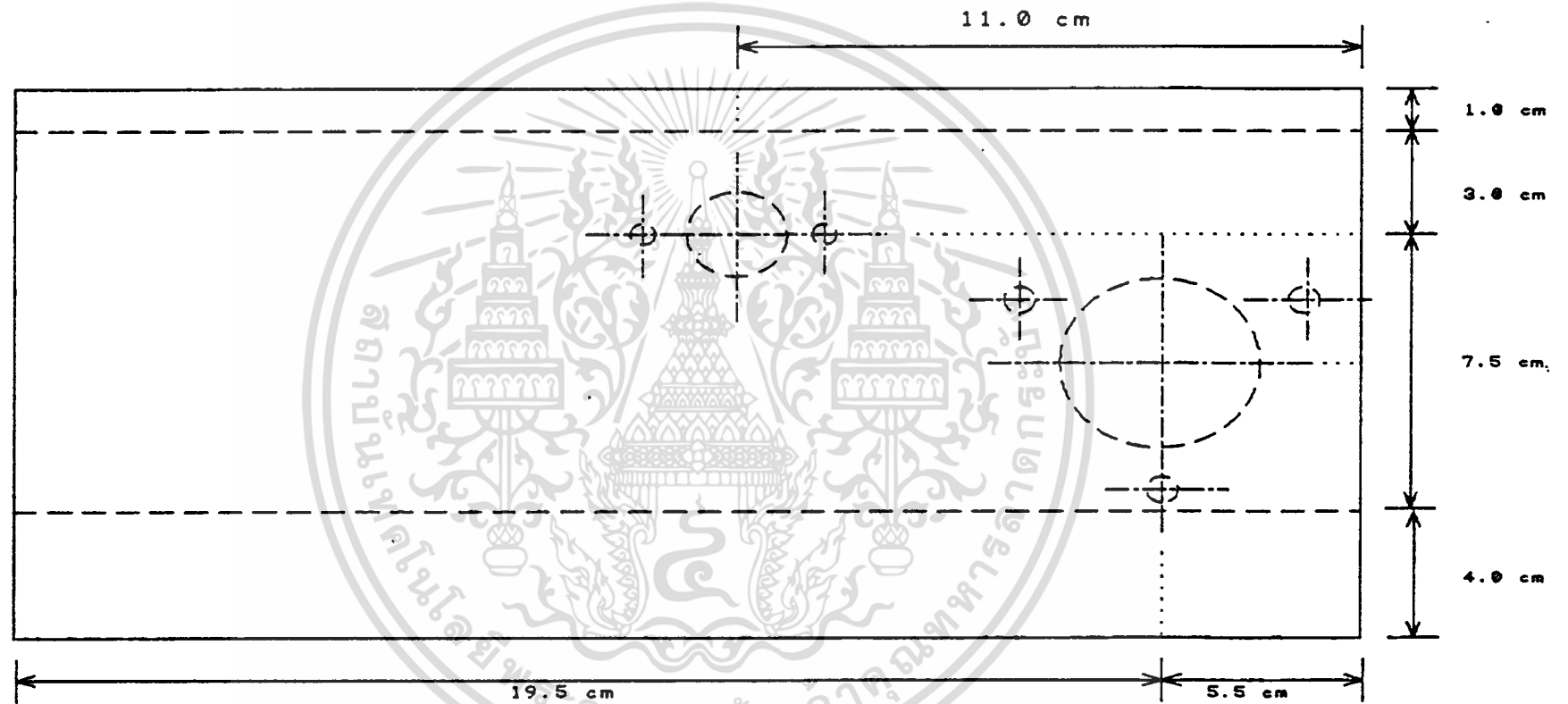
Title		A bidirectional 2-phase-on logic sequencer	
Size		Document Number	
A	FIG 7	REV	
Date: January 1, 1960		Sheet of	

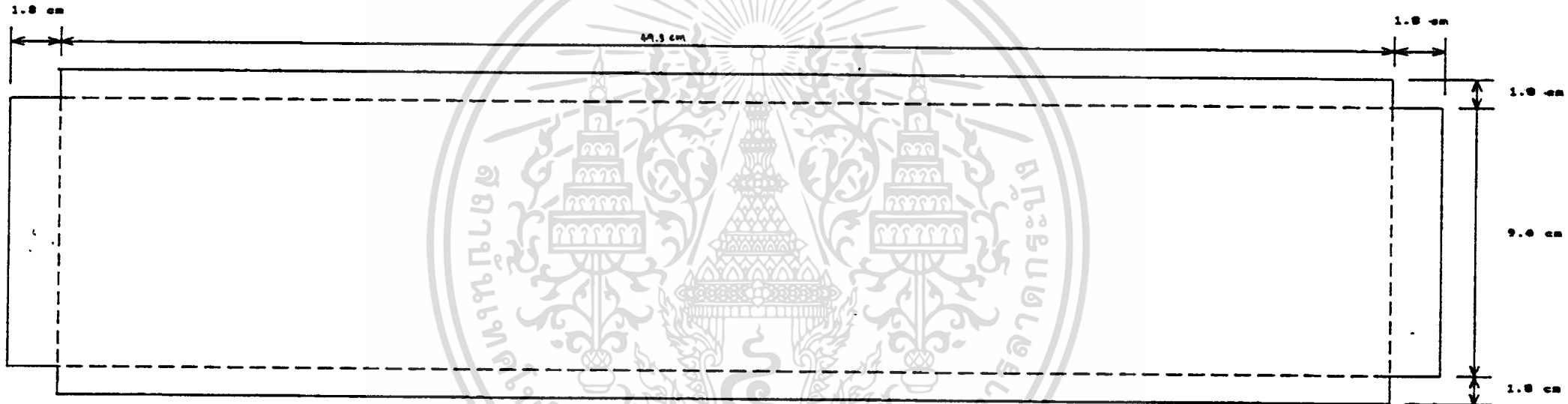


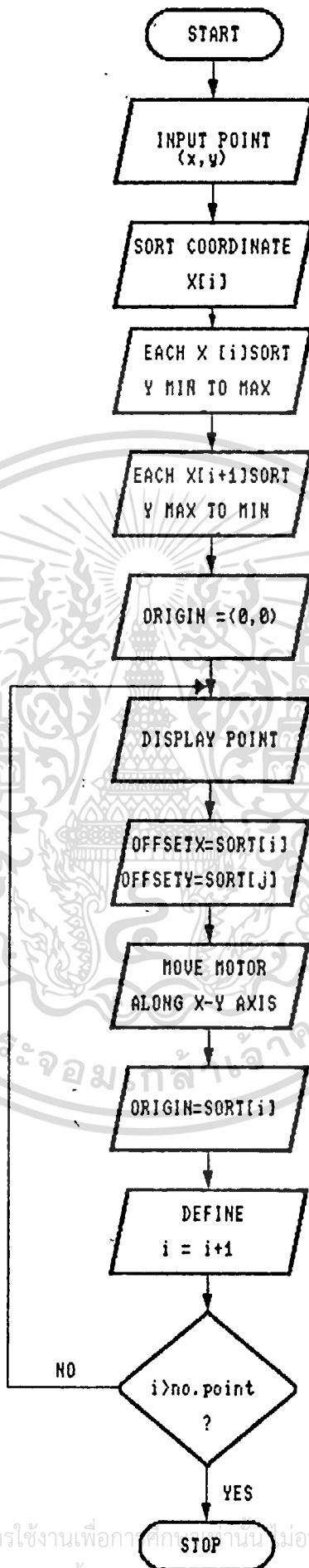
10/10/2











เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
/*PROGRAM SQUARE.C*/
```

```
#include <stdio.h>
#include <dos.h>
#include <conio.h>
#include <bios.h>
```

```
main()
```

```
{
```

```
char ch;
```

```
int n;
```

```
outportb(0x303,0x36);
```

```
outportb(0x300,0xff);
```

```
outportb(0x300,0xff);
```

```
outportb(0x303,0x72);
```

```
outportb(0x301,0x01);
```

```
outportb(0x301,0x00);
```

```
for( n=0; n<2000; n++ )
```

```
{
```

```
outportb(0x304,0x00); delay(50);
```

```
outportb(0x304,0x03);
```

```
delay(100);
```

```
}
```

```
for( n=0; n<2000; n++)
```

```
{
```

```
outportb(0x304,0x00);
```

```
outportb(0x304,0x1b); delay(50);
```

```
delay(100);
```

```
}
```

```
for( n=0; n<2000; n++)
```

```
{
```

```
outportb(0x304,0x00);  
outportb(0x304,0x13); delay(50);  
delay(100);  
}  
for( n=0; n< 2000; n++)  
{  
outportb(0x304,0x00); delay(50);  
outportb(0x304,0x0b);  
delay(100);  
}  
getch();  
sound(500);delay(200);nosound();  
}
```



/*PROGRAM ARROW*/

```
#include <stdio.h>
#include <dos.h>
#include <conio.h>
#include <bios.h>

main()
{
char ch;
int flag = 1, run = 1;

outportb(0x303,0x36);
outportb(0x300,0xff);
outportb(0x300,0xff);
outportb(0x303,0x72);
outportb(0x301,0x01);
outportb(0x301,0x00);
while( run == 1)
{
ch = getch();
if( ch == 'x' )
{
printf("select x\n");
while( flag == 1 )
{
ch = getch();
printf("\t\tselect %c\n",ch);
switch( ch )
{
case '6': outportb(0x304,0x00);
outportb(0x304,0x03);
delay(50);
```

```

    break;
case '4': outportb(0x304,0x00);
    outportb(0x304,0x13);
    delay(50);
    break;
case 'q': flag = 0;
    break;
case 'e': run = 0;
    break;
default: break;
}
}
}
ch = getch();
flag = 1;
if( ch == 'y' )
{
printf("select y\n");
while( flag == 1 )
{
ch = getch();
printf("\t\tselect %c\n",ch);
switch( ch )
{
case '2': outportb(0x304,0x01);
    outportb(0x304,0x1b);
    delay(75);
--break;
case '8': outportb(0x304,0x01);
    outportb(0x304,0x0b);
    delay(75);
    break;
case 'q': flag = 0;

```

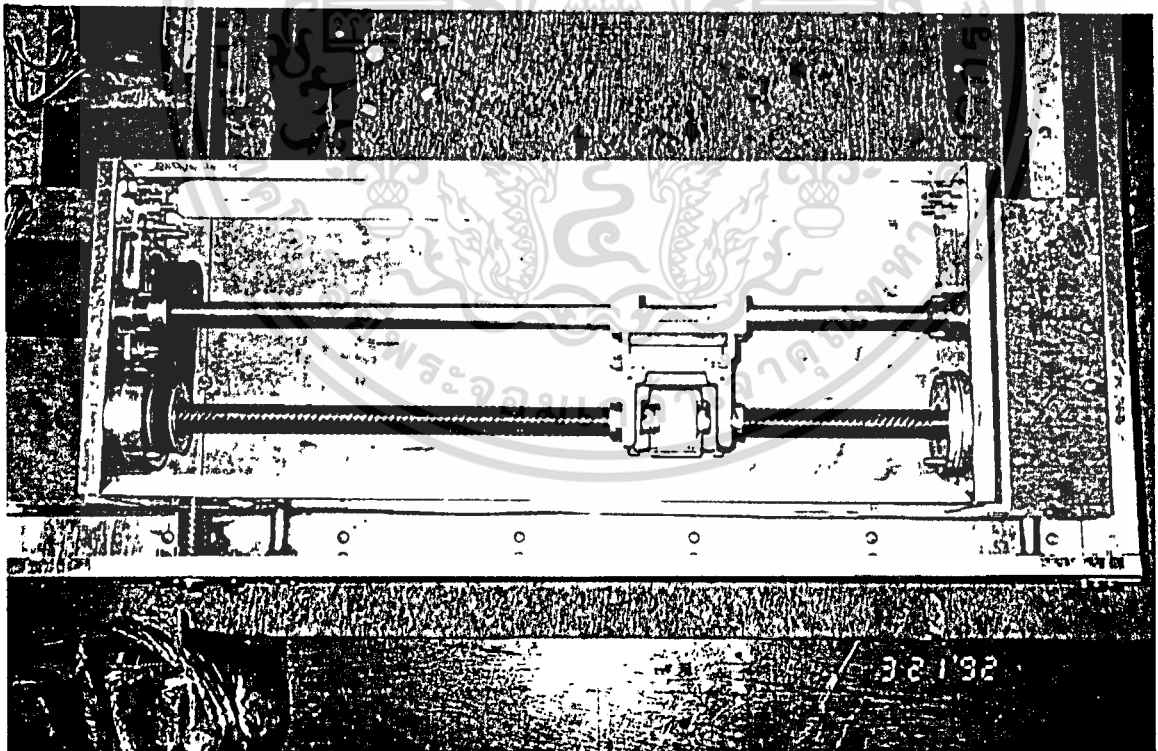
```
break;
case 'e': run = 0;
break;
default: break;
}
}
}
}
getch();
sound(500);delay(200);nosound();
}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

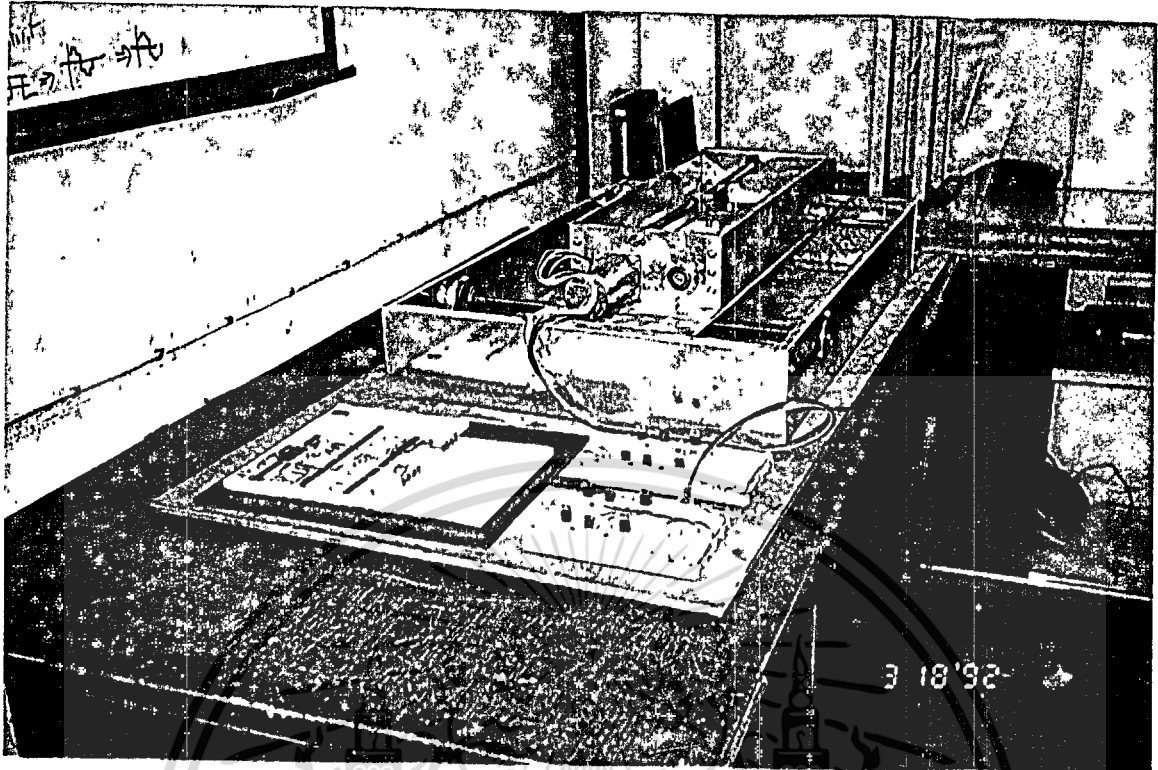


รูป A แสดงตัวสเตปมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว

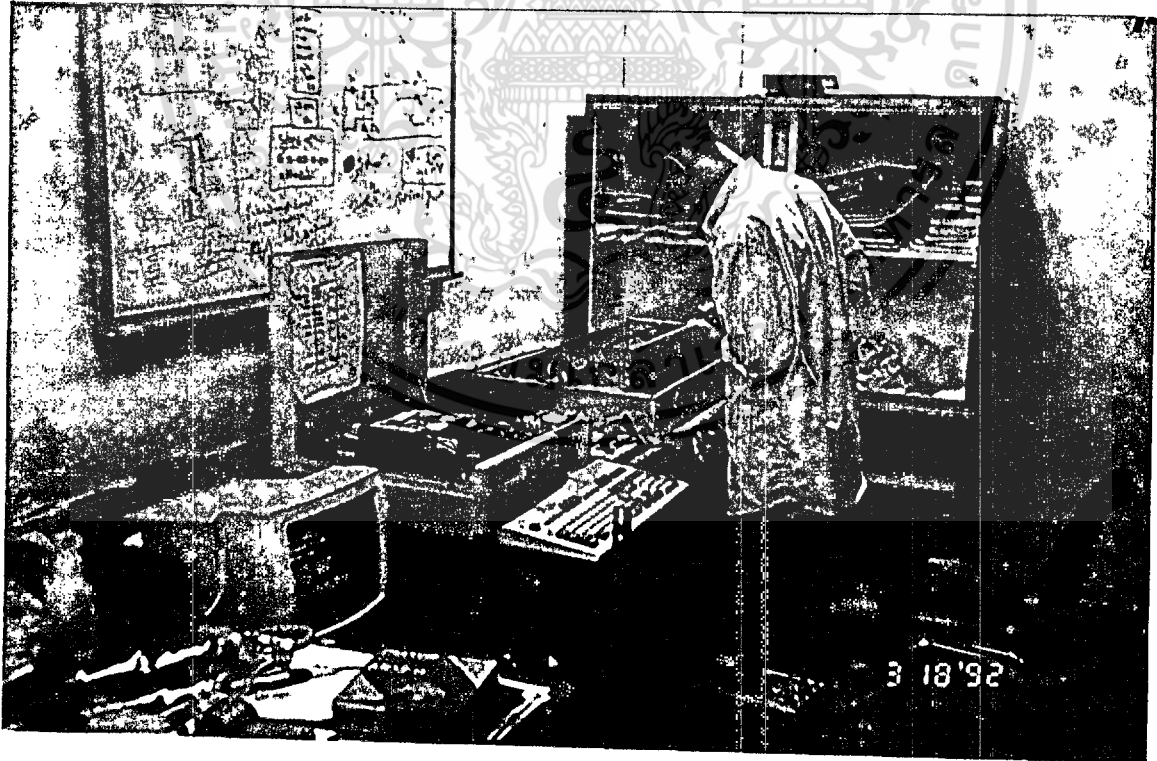


รูป B แสดงพาวเวอร์สกรูส่งกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป C แสดงวงจรและชิ้นงานในโครงการงาน



รูป D แสดงอุปกรณ์ทั้งหมดในโครงการงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้