การใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมและตรวจสอบมอเตอร์กระแสสลับ

COMPUTER CONTROL

โดย

นาย อภินันท์ กันทวงศ์

นาย อมร แดงโชติ

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิศวกรรมการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2539

วัน เดือน ปี 29 ก.ย. 2541

เลขทะเบียน 038030

เลขเรียกหนังสือ T 54050 ส454ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

038030

โดย นาย อภินันท์ กันทวงศ์
นาย อมร แคงโชติ
อาจารย์ที่ปรึกษา อ. ไสว เหล่าไม้
ปีการศึกษา 2539

บทคัดย่อ

ปัจจุบันนี้มอเตอร์ได้ถูกใช้งานในงานอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเฉพาะมอเตอร์เหนี่ยวนำ เนื่องจากมีโครงสร้างที่แข็งแรง ขนาดกระทัดรัด ราคาถูก จึงทำให้การควบคุมความเร็วมอเตอร์ได้ถูกพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ เพื่อให้การใช้งานได้ง่ายและมีประสิทธิภาพ การนำคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการควบคุมจึงเป็นการประยุกย์อีกแบบหนึ่ง ที่ถูกพัฒนามาใช้ร่วมกับอุปกรณ์ต่อพ่วงต่าง ๆ เช่น เครื่อง Inverter , Interface gard เนื่องจากเราสามารถ เขียนโปรแกรมให้ไปควบคุมการทำงานในส่วนต่างๆ เพื่อควบคุมและตรวจสอบคุณสมบัติมอเตอร์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COMPUTER CONTROL

By. Mr. Apinone Kantawong
Mr. Amorn Dangchote
Project Report Adivisor Mr. Sawai Lamai
Acedemic 1996

Abstract

Presently, Motor has been used to widly in industrial Particularly induction motor, because of instructure strong, small and low-price. It has been developed for inverter and efficiency. One application is use by Computer connect to inverter, interfacecard, because we can write for program to control is working and check characteristic.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 มอเตอร์	3
- ทฤษฎีพื้นฐานและหลักการควบคุม	3
- แรงบิดอินดักชั่นมอเตอร์	4
- แรงบิดสตาร์ท	5
- แรงบิดทำงาน	7
- ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดสริป	9
- กำลังเอาท์พุทที่โรเตอร์	14
- วิธีสตาร์ทอินดักชั่นมอเตอร์	17
- วิธีการควบคุมความเร็วของอินดักชั่นมอเตอร์	22
บทที่ 3 การอินเตอร์เฟสและการแปลงสัญญาณของข้อมูล	27
- การแปลงสัญญาณจากดิจิตอลเป็นอนาล็อก	27
- การแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิตอล	41
- การจำแนกกลุ่มของพอร์ต 8255	58
- การเชื่อมต่อ 8255 กับสล็อต IBM/PC	61
- การใช้งาน 8255	64
- การใช้งาน 8253	67
บทที่ 4 การควบคุมและส่วนควบคุม	79
- การตรวจจับสัญญาณความเร็วรอบ	79
- การตรวจจับกำลังไฟฟ้าของโหลด	86
- การตรวจจับแรงดันไฟฟ้าของโหลด	87
- การตรวจจับกระแสไฟฟ้าของโหลด	87
- การตรวจจับความถี่ของโลด	88
- การเขียนโปรแกรมด้วยคอมพิวเตอร์	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง 97

บทที่ 6 การพัฒนาและวิจารณ์สรุปผล 107

- ภาคผนวก
- หนังสืออ้างอิง
- กิตติกรรมประกาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปการมอดูเลทสัญญาณตามความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation) จะมีหลักการสร้างการสวิทช์อยู่ 2 หลักการใหญ่ คือ แบบ Sinusoial PWM. แบบ Harmonic Elimination PWM. Technique.

<u>การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ</u>

มอเตอร์เหนี่ยวนำที่นิยมใช้กันมากสำหรับงานขนาดย่อมคือ มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (Squirrel cage induction motor) การควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบนี้ทำได้หลายวิธีเช่น

1. การควบคุมความเร็วโดยปรับระดับแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์โดยคงค่าความถี่เดิม

เนื่องจากแรงบิด (Torque) ของมอเตอร์ แปรผันตามค่ากำลังสองของแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ดังนั้นเมื่อมอเตอร์มีภาระอยู่ แล้วลดแรงดันลงความเร็วมอเตอร์ก็จะลดลงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามการปรับระดับแรงดันมอเตอร์นี้จะสามารถควบคุมความเร็วมอเตอร์ได้ในช่วงแคบๆ เท่านั้น เพราะถ้ามีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันมากหรือน้อยเกินไปอาจทำให้มอเตอร์เสียหาย หรือแรงบิดต่ำมากจนไม่สามารถใช้งานได้

2. การควบคุมความเร็วโดยการเปลี่ยนจำนวนขั้วแม่เหล็ก

ปกติความเร็วมอเตอร์จะแปรผันตาม ค่าความถี่ของแหล่งจ่ายและแปรผกผันกับจำนวนขั้วแม่เหล็ก ด้วยการออกแบบการพันของขดลวดส่วนอยู่นิ่ง (Stator Winding) ให้สามารถเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วแม่เหล็กได้เช่น จาก 2 เป็น 4 ขั้ว หรือ 4 เป็น 8 ขั้วแม่เหล็กได้ เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบดาลเลนเดอร์ (Dahlander motor) ก็สามารถเปลี่ยนความเร็วของมอเตอร์ได้ขั้นละทวีคูณ ซึ่งก็ยังไม่เหมาะสมกับการควบคุมมอเตอร์ที่ต้องการ การเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบต่อเนื่องได้

3. การควบคุมความเร็วโดยการปรับค่าความถี่แหล่งจ่ายของมอเตอร์

การปรับค่าความถี่ที่จ่ายมอเตอร์ให้ต่อเนื่องและละเอียดได้จะทำให้ความเร็วมอเตอร์เปลี่ยนแปลงตามอย่างต่อเนื่องและนิ่มนวลเช่นกัน แต่การปรับความถี่ให้มอเตอร์นี้จะต้องปรับค่าระดับแรงดันตามไปด้วยเช่นกัน ซึ่งจะทำให้อัตราแรงดันต่อความถี่ (V/F) ของมอเตอร์มีค่าคงที่ เพื่อรักษาค่าแรงบิดของมอเตอร์ให้คงที่ และมีประสิทธิที่ดีในการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
มอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับ

ทฤษฎีพื้นฐานและหลักการควบคุม

โครงสร้างมอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับประกอบด้วยส่วนอยู่นิ่งหรือสเตเตอร์ (Stator) และส่วนหมุนหรือโรเตอร์ (Rotor) การทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นเริ่มจากการได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟที่ป้อนให้กับสเตเตอร์ เกิดการเหนี่ยวนำส่งผ่านไปยังโรเตอร์ทำให้เกิดการหมุนขึ้น โดยที่ขดลวดของสเตเตอร์จะทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กที่มีค่าคงที่ขึ้นในช่องอากาศ (air gap) ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ และสนามแม่เหล็กจะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (2.1)

$$N_s = \frac{120\,f}{p} \qquad (2.1)$$

โดยที่ N_s - ความเร็วรอบซิงโครนัส

f - ความถี่ที่ขดลวดสเตเตอร์ได้รับ (Hz)

p - จำนวนขั้ว (pole) ของขดสเตเตอร์

ด้วยผลของการเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไหลในโรเตอร์ซึ่งมีความถี่เดียวกันกับแหล่งจ่ายไฟขณะที่โรเตอร์มีความเร็วรอบ N_r ใดๆ ที่มีค่าความแตกต่างจากความเร็ว N_s จะเกิดการเหนี่ยวนำขึ้นบนโรเตอร์และทำให้เกิดทอร์ค ความแตกต่างสัมพันธ์ของความเร็วทั้งสองนี้เรียกว่า สลิปหรือการไถล (Slip,S)

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_r} \qquad (2.2)$$

$$= \frac{W_s - W_r}{W_s}$$

$$= \frac{W_{sl}}{W_s} \qquad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ Ws - ความถี่เชิงมุมของสเตเตอร์ (Stator angular frequency)

Wr - ความถี่เชิงมุมทางไฟฟ้าของโรเตอร์ (Rotor angular frequency)

Ws1 - ความถี่เชิงมุมสลิป (Slip angular frequency)

จากสมการที่ (2.1) และ (2.2) จะได้สมการความเร็วของมอเตอร์ดังนี้

$$Nr = \frac{(1-s)(120f)}{p} \quad \text{rpm} \qquad (2.4)$$

จากสมการที่ (2.4) การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ทำได้โดยการควบคุมความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ (f) จำนวนขั้วของสเตเตอร์ (p) และสลิปของโรเตอร์ วิธีการควบคุมที่เหมาะสมที่สุดคือ การควบคุมความถี่ของแหล่งจ่ายไฟโดยใช้อินเวอร์เตอร์ เพราะจะทำให้การควบคุมมีการต่อเนื่อง ประสิทธิภาพของมอเตอร์สูงขณะควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ วิธีการควบคุมโดยการเปลี่ยนจำนวนขั้วของสเตเตอร์จะควบคุมการเปลี่ยนแปลงความเร็วได้ในช่วงแคบ และการควบคุมจะไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นวิธีการนี้จะใช้กับมอเตอร์ที่ออกแบบไว้เป็นพิเศษ ส่วนวิธีการควบคุมโดยการเปลี่ยนค่าสลิปนั้นจะทำให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพต่ำลง เพราะว่าประสิทธิภาพของมอ เตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าสลิป

<u>แรงบิดของอินดักชั่นมอเตอร์</u>

แรงบิดที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์คือแรงที่จะต้านหรือเอาชนะต่อโหลดที่กระทำกับมอเตอร์ หรือหมายถึงแรงที่ทำให้มอเตอร์หมุน จากเรื่องมอเตอร์ไฟตรงแรงบิดที่เกิดขึ้นกับมอเตอร์ไฟตรง จะแปรผันโดยตรงกับกระแสอาร์เมเจอร์ และเส้นแรงแม่เหล็กขากขั้วแม่เหล็กสเตเตอร์ ในทำนองเดียวกัน แรงบิดของอินดักชั่นมอเตอร์ จะแปรผันโดยตรงกับกระแสโรเตอร์ เส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวดแม่เหล็กจากขดลวดสเตเตอร์ นอกจากนี้แล้วแรงบิดมอเตอร์ไฟสลับยังขึ้นอยู่กับค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ของโรเตอร์อีกด้วย

ดังนั้น แรงบิด $T \propto \phi I_2 \cos\theta_2$

$= K\phi I_2 \cos\theta_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ I_2 = กระแสโรเตอร์ขณะโรเตอร์อยู่กับที่

ϕ = เส้นแรงแม่เหล็กจากขดลวดสเตเตอร์

$\cos\theta_2$ = เพาเวอร์แฟคเตอร์โรเตอร์

θ_2 = มุมต่างเฟสของกระแสโรเตอร์กับแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำโรเตอร์

K = ค่าคงที่

แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำโรเตอร์ขณะโรเตอร์อยู่กับที่

$$E_2 \propto \phi$$

$$\therefore T \propto E_2 I_2 \cos\theta_2$$

$$= K_1 E_2 I_2 \cos\theta_2 \qquad (2.5)$$

K_1 = ค่าคงที่อีกค่าหนึ่ง

<u>แรงบิดสตาร์ท (Starting torque, T_s)</u>

ถ้าให้ E_2 = แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำโรเตอร์ต่อเฟสขณะโรเตอร์อยู่กับที่

R_2 = ความต้านทานโรเตอร์ต่อเฟส

X_2 = รีแอ็กแตนซ์โรเตอร์ต่อเฟสขณะโรเตอร์อยู่กับที่

$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2}$

= อิมพีแดนซ์โรเตอร์ต่อเฟสขณะโรเตอร์อยู่กับที่

$$\therefore I_2 = \frac{E_2}{Z_2}$$

$$= \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}$$

$$\cos\theta_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}$$

$$\therefore T = T_s = K_1 E_2 I_2 \cos\theta_2$$

$$= K_1 E_2 \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} \cdot \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X^2 2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{K1E_2^2R_2}{R_2^2 + X_2^2} \quad (2.6)$$

ถ้าแรงดัน V ที่ป้อนให้กับมอเตอร์คงที่ เส้นแรงแม่เหล็ก ϕ จากขดลวดสเตเตอร์และแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำโรเตอร์ E2 ขณะโรเตอร์อยู่คงที่ จะมีค่าคงที่

$$\therefore \quad Ts = K_2 \cdot \frac{E_2^2}{R_2^2 + X_2^2} \quad (2.7)$$

$$= K_2 \frac{E_2^2}{Z_2^2} \quad (2.8)$$

เมื่อ K2 = เป็นค่าคงที่และสรุปได้ว่า

1. แรงบิดสตาร์ทของมอเตอร์แบบสไควเรลเกจ ความต้านทานของโรเตอร์แบบสไควเรลเกจ จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับรีแอ็กแตนซ์ ซึ่งมีค่ามาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งขณะสตาร์ท ความถี่โรเตอร์จะเท่ากับความถี่ที่ป้อนให้กับสเตเตอร์ กระแสโรเตอร์ขณะเริ่มหมุน (สตาร์ท) จะมีค่าสูงและล้าหลังแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำโตอร์เป็นมุมโตมาก แรงบิดสตาร์ทจะต่ำมาก คือจะมีค่าประมาณ 1.5 เท่าของแรงบิดที่โหลดเต็มพิกัด แต่กระแสสเตเตอร์ขณะเริ่มหมุนจะมาก ถึง 5 - 7 เท่าของกระแสที่โหลดเต็มพิกัด มอเตอร์ชนิดนี้จึงไม่เหมาะที่นำไปขับโหลดหนักๆ ในตอนเริ่มหมุน

2. แรงบิดสตาร์ทของมอเตอร์แบบวาวด์โรเตอร์ (Wound Rotor) แรงบิดสตาร์ทของมอเตอร์แบบนี้จะดีกว่ามอเตอร์แบบสไควเรลเกจ โดยการทำให้เพาเวอร์แฟคเตอร์โรเตอร์ดีขึ้น โดยการเอาความต้านทานจากภายนอก ต่อเข้ากับความต้านทานของโรเตอร์นั้นจะต้องมีค่าสูงเพียงจุดๆ หนึ่งเท่านั้น ไม่ใช่ว่าจะสูงเท่าใดก็ได้ ถ้าความต้านทานที่นำมาสูงเกินไป แทนที่จะทำให้แรงบิดสตาร์ทดีขึ้น แต่กลับจะทำให้แรงบิดสตาร์ทลดลง

3. แรงบิดสตาร์ทสูงสุด (Tsm) เมื่อใดก็ตาม ถ้าค่าความต้านทานของวงจรขดลวดโรเตอร์ เท่ากับค่ารีแอ็กแตนซ์ของโรเตอร์แล้ว จะทำให้แรงบิดสตาร์ทของมอเตอร์ตัวนั้นสูงสุด (R2 = X2) และถ้าหากว่าแรงดันป้อนเปลี่ยนแปลงจะทำให้แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังนั้นแรงบิดสตาร์ทจากสมการ (2.6) จะกลายเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_s = \frac{K_1 V^2 R_2}{R_2^2 + X_2^2} \qquad (2.9)$$

<u>แรงบิดทำงาน (Running torque, T)</u>

จากสมการ (2.9) เป็นแรงบิดขณะโรเตอร์อยู่กับที่และกำลังที่จะเริ่มหมุน เมื่อมอเตอร์หมุนแล้ว แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนไปได้โดยขึ้นอยู่กับค่าของสลิป ตลอดจนค่ารีแอ็คแตนซ์ก็ขึ้นอยู่กับค่าของสลิป ตลอดจนค่ารีแอ็คแตนซ์ก็ขึ้นอยู่กับค่าสลิปด้วย ดังนั้นสมการแรงบิดทำงานจะสามารถหาได้ดังนี้

$$\therefore \quad T \propto R_r I_r \cos\theta_2$$

หรือ $$T \propto \phi I_r \cos\theta_2$$

R_r = แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำเมื่อมอเตอร์หมุน

$$= SE_2$$

I_r = กระแสโรเตอร์เมื่อมอเตอร์หมุน

$$= \frac{E_r}{Z_r}$$

$$= \frac{SE_2}{\sqrt{R_2^2 + (SX_2)^2}}$$

และ $$\cos\theta_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (SX_2)^2}}$$

$\therefore$ แรงบิดทำงาน

$$T \propto \phi \frac{SE_2}{\sqrt{R_2^2 + (SX_2)^2}} \cdot \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (SX_2)^2}}$$

$$= \frac{K\phi SE_2 R_2}{R_2^2 + (SX_2)^2} \qquad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ $$T \propto \frac{SE_2 \cdot R_2}{\sqrt{R_2^2 + (SX_2)^2} \cdot \sqrt{R_2^2 + (SX_2)^2}}$$

$$= \frac{K_1 S^2 E_2^2 R_2}{R_2^2 + (SX_2)^2} \qquad (2.11)$$

ขณะสตาร์ท $S = 1$

$$\therefore T = \frac{K_1 E_2^2 R_2}{R_2^2 + X_2^2} \qquad (2.12)$$

$= T_s$ ดังสมการ (2.6) และสรุปได้ว่า

1. แรงบิดทำงานเมื่อสลิปมีค่าน้อย การที่สลิปมีค่าน้อยหมายความว่า ความเร็วโรเตอร์สูงมากเกือบเท่ากับความเร็วซิงโครนัส แรงบิดขณะนี้จะมีค่าน้อยมาก

2. แรงบิดทำงานเมื่อสลิปมีค่ามาก การที่สลิปมีค่ามากก็หมายความว่า ความเร็วโรเตอร์ต่ำมาก แตกต่างจากความเร็วซิงโครนัสมาก ขณะนี้แรงบิดจะมีค่าสูงมาก

3. แรงบิดทำงานสูงสุด แรงบิดทำงานสูงสุด จะเกิดขึ้นขณะที่ความต้านทานโรเตอร์เท่ากับค่ารีแอ็คแตนซ์โรเตอร์คูณด้วยสลิป คือ $R_2 = SX_2$ จากสมการ (2.10)

$$T = \frac{K\phi S E_2 R_2}{R_2^2 + (SX_2)^2}$$

จากวิธีการทางคณิตศาสตร์ จะสามารถแสดงให้ว่า เมื่อเกิดแรงบิดทำงานสูงสุดแล้ว ค่า $R_2 = SX_2$ ดังนั้นแรงบิดทำงานสูงสุด

$$T_m = \frac{K\phi S E_2 R_2}{2R_2^2}$$

$$= \frac{K\phi S E_2}{2R_2} \qquad (2.13)$$

หรือ $$Tm = \frac{K\phi S E_2 S X_2}{2 S_2 X_2^2}$$

$$= \frac{K\phi E_2}{2X_2} \qquad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและสลิป

ดังได้กล่าวไว้แล้วว่า แรงบิดทำงาน

$$T = \frac{K_1 S_2 E_2^2 R_2}{R_2^2 + (SE_2)^2} \quad (2.15)$$

หรือ $$T = \frac{K_1 \phi S E_2 R_2}{R_2^2 + (SE_2)^2} \quad (2.16)$$

เมื่อพิจารณาจากสมการข้างบน ถ้า S = 0 แล้ว T = 0 ด้วยและเมื่อหมุนด้วยความเร็วปกติคือความเร็วเกือบเท่าความเร็วซิงโครนัส ค่ารีแอ็คแตนซ์ ($X_r = SX_2$) จะมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่า R_2 สมมุติว่าไม่คิดค่า SX_2

$$\therefore T = \frac{K_1 \phi S E_2 R_2}{R_2^2} \quad (2.17)$$

$$\propto \frac{S}{R_2} \quad (2.18)$$

$$\propto S \quad (R_2 \text{ มีค่าคงที่}) \quad (2.19)$$

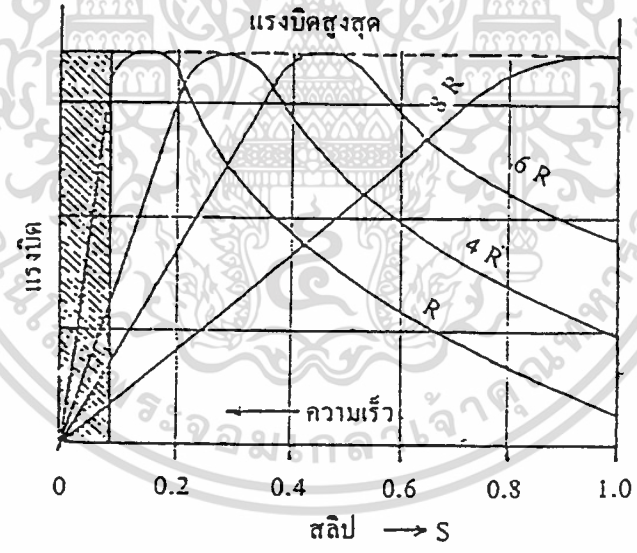
ดังนั้นที่สลิป S ค่าต่ำๆ เส้นกราฟ แรงบิด-สลิป จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง เมื่อสลิปมีค่าเพิ่มขึ้น หมายความว่า โหลดของมอเตอร์เพิ่มขึ้น แรงบิดก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และแรงบิดจะสูงสุดเมื่อ $S = R_2 / X_2$ แรงบิด ณ. จุดนี้เรียกว่า แรงบิดสูงสุด (maximum หรือ pull out หรือ break down) และเมื่อสลิป S มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แต่ความเร็วมอเตอร์จะลดลง คือ โหลดมอเตอร์เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ อีก ความต้านทานโรเตอร์ R_2 จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า $X_r = SX_2$ จึงตัดค่า R_2 ออกได้

$$\therefore T \propto \frac{S}{(SX_2)^2} \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\propto \quad 1/S \quad (X_2 \text{ มีค่าคงที่}) \qquad (2.21)$$

เส้นกราฟ แรงบิด-สลิป จะมีลักษณะเป็นรูปไฮเพอร์โบลาคว่ำ จะสังเกตุเห็นว่าเมื่อเลยจุดที่แรงบิดสูงสุด (โหลดมอเตอร์เพิ่มขึ้นมาก) เป็นผลทำให้แรงบิดลดลง ในที่สุดมอเตอร์ก็จะหมุนด้วยความเร็วต่ำลง และหยุดหมุนได้ เซอร์กิตเบรกเกอร์ควบคุมวงจรก็จะตัดวงจรมอเตอร์ออกจากระบบไฟฟ้า ดังนั้นจากเส้นกราฟเหล่านี้จะสามารถแปลความได้ว่า มอเตอร์จะทำงานได้ในช่วงสลิปมีค่าศูนย์ จนถึงจุดที่แรงบิดมีค่าสูงสุด (Stable condition) ในกรณีที่ R_2 มีค่า R นี้ ช่วงมอเตอร์ทำงานจะอยู่ในบริเวณที่แสเงาไว้ แต่ถ้าหากว่า R_2 มีค่าเป็น 4R หรือ 6R หรือ 8R ก็จะได้เส้นกราฟออกมา 3 เส้น แต่ละเส้นจะมีค่าสูงสุดไม่พร้อมกัน และถ้าพิจารณาต่อไปจะได้ว่าถ้าเพิ่มความต้านทานเข้าไปในวงจรของโรเตอร์มากแล้วตำแหน่งที่จะทำให้แรงบิดสูงสุดนั้นจะเปลี่ยนไปด้วย และจะเป็นเหตุให้สลิปเปลี่ยนแปลงไปด้วย



รูปที่ 2-1 เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและสลิปเมื่อ R_2 มีค่าต่างๆ กัน

เมื่อแรงดันป้อนเปลี่ยนแแปลง จะทำให้แรงบิดเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ไม่เพียงแค่จะทำให้แรงบิดสตาร์ท T_S เปลี่ยนแปลงเท่านั้น แต่จะทำให้แรงบิดขณะทำงานเปลี่ยแปลงไปด้วยเช่นเดียวกัน

$$\therefore \quad T = \frac{K_1 \phi S E_2 R_2}{R_2^2 + (SX_2)^2} \qquad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E \propto \phi$$

$$\propto V$$

$$\therefore T \propto SV^2 \qquad (2.23)$$

เมื่อ V = แรงดันป้อน

ถ้า V เปลี่ยนแปลงไปเป็น V'

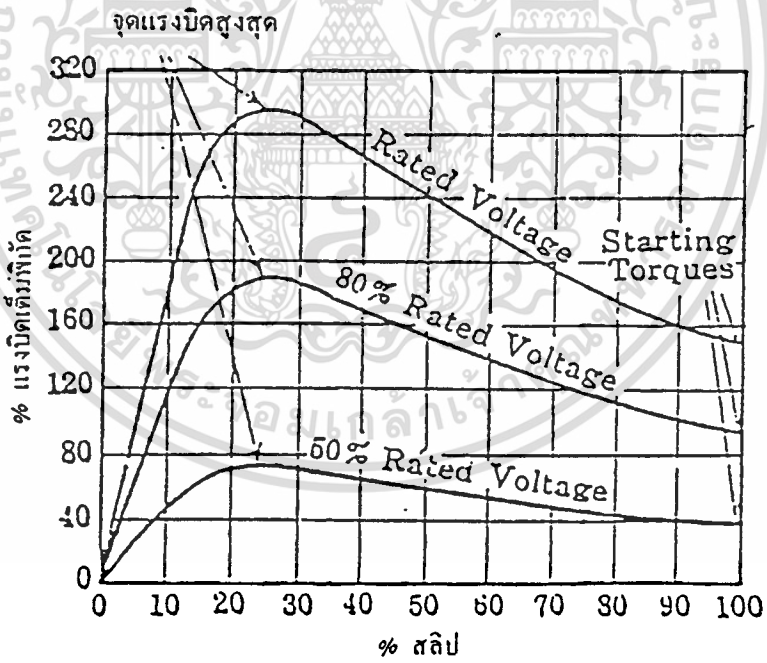
และ S เปลี่ยนแปลงไปเป็น S'

แล้ว T จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น T'

$$\therefore T' \propto S'V'^2 \qquad (2.24)$$

$$\text{และ} \quad \frac{T}{T'} = \frac{SV^2}{S'V'^2} \qquad (2.25)$$

จากรูปที่ 2-2 ข้างล่างแสดงให้เห็นว่าถ้าลดแรงดันป้อนลงจะได้เส้นกราฟ แรงบิด-สลิป คล้ายกัน แต่จุดสูงสุดหรือจุด break down ไม่เท่ากัน



รูปที่ 2-2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด-สลิป เมื่อป้อนแรงดันขนาดต่าง ๆ กัน

แรงบิดเต็มพิกัดและแรงบิดสูงสุด แรงบิดเต็มพิกัดหมายถึงแรงบิดขณะที่มอเตอร์ทำงานมีโหลดเต็มพิกัด จากสมการ (2.10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = \frac{K\phi S E_2 R_2}{R_2^2 + (SX_2)^2}$$

ถ้าให้ S เป็นสลิปเมื่อมอเตอร์ทำงานมีโหลดเต็มพิกัด จะได้แรงบิดเมื่อโหลดเต็มพิกัด (full load torque)

$$T_f \propto \frac{SR_2}{R_2^2 + (SE_2)^2} \qquad (\phi E_2 = \text{ค่าคงที่}) \qquad (2.26)$$

แรงบิดสูงสุดหมายถึง แรงบิดขณะที่มอเตอร์ทำงานเต็มพิกัดมีค่าสูงสุด จะเกิดแรงบิดสูงสุด

เมื่อ $R_2 = SX_2$

หรือ $S = \frac{R_2}{X_2}$

แทนค่า $S = R_2 / X_2$ ในสมการ (2.26) จะได้แรงบิดสูงสุด

$$T_m \propto \frac{1}{2X_2} \qquad (2.27)$$

ดังนั้น $\frac{T_f}{T_m} = \frac{SR_2 \cdot 2X_2}{R_2^2 + (SX_2)^2}$ (2.28)

หรือ $\frac{T_f}{T_m} = \frac{2SR_2 / X_2}{(R_2/X_2)^2 + S^2}$

ให้ $a = R_2 / X_2$

$\therefore \quad \frac{T_f}{T_m} = \frac{2aS}{a_2 + S_2}$ (2.41)

แร่งบิดสตาร์ท และแรงบิดสูงสุด จากสมการ (2.6) ที่กล่าวมาแล้วว่า แรงบิดสตาร์ท

$$T_s = \frac{K_1 E_2^2 R_2}{R_2^2 + X_2^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\propto \frac{R_2}{R_2^2 + X_2^2} \quad (E_2 \text{ คงที่}) \tag{2.30}$$

สำหรับแรงบิดสูงสุดได้กล่าวแล้ว ในสมการ คือ

$$T_m \propto 1/2X_2$$

$$\therefore \frac{T_s}{T_m} = \frac{2R_2X_2}{R_2^2 + X_2^2}$$

$$= \frac{2R_2 / X_2}{(R_2/X_2)^2 + 1}$$

$$= \frac{2a}{a^2 + 1} \tag{2.31}$$

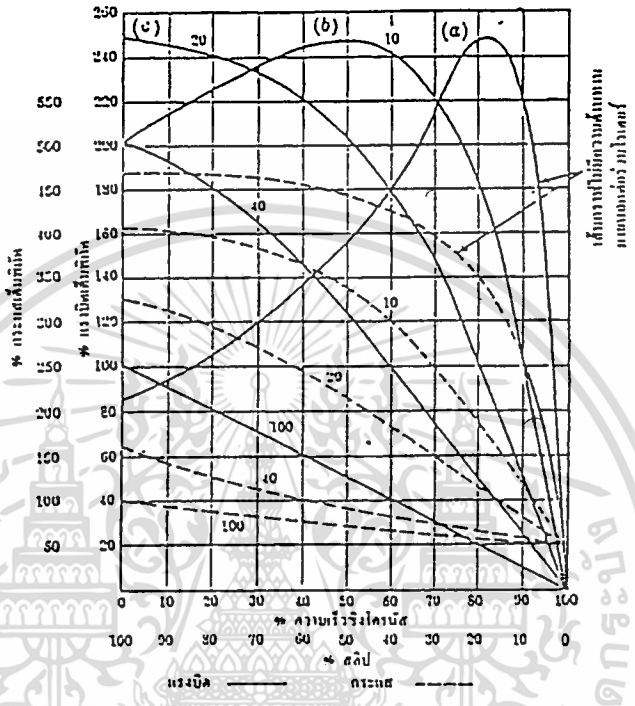
$a = R_2 / X_2$ นี้เรียกว่า อัตราส่วนระหว่างความต้านทานโรเตอร์ต่อรีแอ็กแตนซ์โรเตอร์ตอนสตาร์ทต่อเฟส

แรงบิดของมอเตอร์สลิปริงเมื่อเพิ่มความต้านทานเข้าไปในวงจรขดลวดโรเตอร์ จากรูปที่ 2-3 จะสังเกตุเห็นว่า ตอนที่ยังไม่เพิ่มความต้านทานเข้าไปในวงจรโรเตอร์นั้นจะได้เส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว - แรงบิด ดังเส้นกรา (a) เส้นกราฟ (b) เป็นเส้นกราฟความเร็ว - แรงบิดเมื่อเพิ่มความต้านทานเข้าไปในวงจรโรเตอร์ 10% จะเกิดแรงบิดสูงสุดเมื่อสลิปมีค่า 50% เส้นกราฟ (c) เป็นเส้นกราฟความเร็ว - แรงบิด เมื่อเพิ่มความต้านทานเข้าไปในวงจรโรเตอร์ 20% จะเกิดแรงบิดสูงสุดขณะขณะสตาร์ทพอดี แต่ถ้าเพิ่มความต้านทานเข้าไปในวงจรโรเตอร์มากขึ้นอีก แรงบิดสตาร์ทจะเปลี่ยนไปอีก ถ้าเพิ่มความต้านทานเป็น 40% และ 100% แรงบิดสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อสลิปมีค่ามากกว่า 100% แต่จะมีแรงบิดสตาร์ทประมาณ 200% และ 100% ของแรงบิดเต็มพิกัด ในขณะเดียวกัน เมื่อความต้านทานโรเตอร์เพิ่มขึ้น ตำแหน่งที่เกิดแรงบิดสูงสุดนั้นความเร็วโรเตอร์จะลดลง ดังนั้นวิธีควบคุมความเร็วของอินดั๊กชั่นมอเตอร์อีกแบบหนึ่งก็คือการเพิ่มความต้านทานให้กับโรเตอร์

นอกจากนี้แล้ว ในรูปที่ 2-3 ยังได้แสดง ค่ากระแสของมอเตอร์เมื่อเทียบกับความเร็วสลิปไว้ด้วยถ้าสังเกตดูจะเห็นว่า ตอนที่ยังไม่ต่อความต้านทานภายนอกเข้ากับโรเตอร์ กระแสสตาร์ทจะมีค่าประมาณ 470% ของกระแสเต็มพิกัด และมีแรงบิดสตาร์ทเพียง 86% ของแรงบิดเต็มพิกัด และในกรณีที่เพิ่มความต้านทานให้โรเตอร์ 40% จะเกิดแรงบิดสตาร์ทประมาณ 200%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแรงบิดเต็มพิกัด แต่กระแสสตาร์ทจะมีค่าเพียง 160% ของกระแสเต็มพิกัดเท่านั้น ซึ่งลดลงจากตอนที่ไม่มีความต้านทานภายนอกมาต่อร่วมโรเตอร์อย่างมาก



รูปที่ 2-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว - แรงบิด และกระแส - สลิป ของอินดักชั่นมอเตอร์แบบสลิปริง เมื่อเพิ่มความต้านทานให้กับวงจรโรเตอร์

<u>กำลังเอ้าท์พุทที่โรเตอร์</u>

เมื่อป้อนไฟสลับให้กับขดลวดสเตเตอร์ จะเกิดเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นที่โรเตอร์ การที่ป้อนไฟฟ้าให้กับมอเตอร์นั้นคือ ป้อนกำลังอินพุทให้กับสเตเตอร์ การเหนี่ยวนำให้เกิดไฟฟ้าขึ้นที่โรเตอร์ก็คือ เอ้าท์พุทของสเตเตอร์ แต่เอ้าท์พุทของสเตเตอร์จะน้อยกว่าอินพุท ดังนั้นส่วนที่แตกต่างกันระหว่างอินพุทและเอ้าท์พุทก็คือ ความสูญเสีย (ลอส = loss) จึงเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

อินพุทของสเตเตอร์ - ลอสของสเตเตอร์ = เอ้าท์พุทของสเตเตอร์

โดยที่ลอสของสเตเตอร์จะอยู่ในรูปของค๊อปเปอร์ลอส (Copper loss)

กำลังเอ้าท์พุทของสเตเตอร์นี้จะถ่ายทอดกำลังไปสู่โรเตอร์ ด้วยการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้น เอ้าท์พุทของสเตเตอร์จึงเท่ากับอินพุทของโรเตอร์ มีสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินพุทของโรเตอร์ = เอ้าท์พุทของสเตเตอร์

กำลังโรเตอร์จะให้กำลังเอ้าท์พุทออกมาที่โรเตอร์ในรูปของพลังงานกลคือโรเตอร์หมุน พลังงานกลที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าน้อยกว่าอินพุทของโรเตอร์ ความแตกต่างระหว่างกำลังอินพุทของโรเตอร์กับกำลังเอ้าท์พุทของโรเตอร์ก็คือความสูญเสียหรือลอสของโรเตอร์ซึ่งอยู่ในรูปของค๊อปเปอร์ลอส ดังนั้น

เอ้าท์พุทของโรเตอร์ = อินพุทของโรเตอร์ - ค๊อปเปอร์ลอส

$$Por = Pir - Cu.losses$$

เอ้าท์พุทของโรเตอร์ที่อยู่ในรูปพลังงานไฟฟ้าจะเปลี่ยนเป็นพลังงานกล ทำให้เกิดแรงบิด Tg (gross torque) ขึ้นที่โรเตอร์

นอกจากนี้แล้วขณะที่โรเตอร์หมุน ยังมีความเสียดทานและปะทะลมอีก จึงทำให้เอ้าท์พุทของโรเตอร์ลดลงไปอีก ดังสมการ

$$Por = Pir - Cu.losses - Friction\ and\ Windage\ losses$$

ดังนั้นเอ้าท์พุทของโรเตอร์ขณะนี้จะอยู่ในรูปของพลังงานกล และทำให้เกิดแรงบิด Tsh (shaft torque) ขึ้นมาที่เพลา แรงบิด Tsh ที่เพลาเป็นแรงบิดที่นำไปใช้งาน

ถ้าให้ N = ความเร็วโรเตอร์ในหน่วยรอบ / วินาที

$\therefore$ เอ้าท์พุทโรเตอร์, $Por = Tg\ 2\pi N$

$$Tg = \frac{Por}{2\pi N} \qquad (2.32)$$

ถ้าไม่มีค๊อปเปอร์ลอสในโรเตอร์ เอ้าท์พุทของโรเตอร์จะเท่ากับอินพุทของโรเตอร์ และโรเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วซิงโครนัส

$$\therefore \quad Tg = \frac{Pir\ (watt)}{2\pi N_s} \qquad (2.33)$$

ดังนั้นเอ้าท์พุทของโรเตอร์ $= Tg \times 2\pi N$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินพุทของโรเตอร์ = $Tg \times 2\pi N_S$

ความแตกต่างระหว่างอินพุทและเอ้าท์พุทก็คือ คือปเปอร์ลอส

$$\text{Cu. losses (rotor)} = Tg \times 2\pi N_S - Tg \times 2\pi N$$

$$= Tg \times 2\pi (N_S - N) \quad (2.34)$$

$$\frac{\text{Cu. losses (rotor)}}{\text{Pir}} = \frac{Tg \times 2\pi (N_S - N)}{Tg \times 2\pi N_S}$$

$$= \frac{N_S - N}{N_S}$$

$$= S \text{ (สลิป)}$$

$$\text{Cu. losses (rotor)} = S \cdot \text{Pir} \quad (2.35)$$

$$\text{Por} = \text{Pir} - \text{Cu. losses (rotor)}$$

$$= \text{Pir} - S \cdot \text{Pir}$$

$$= (1 - S)\,\text{Pir} \quad (2.36)$$

$$\text{Por} / \text{Pir} = 1 - S$$

$$= 1 - \frac{(N_S - N)}{N_S}$$

$$= N / N_S \quad (3.37)$$

$\therefore$ Por = ความเร็วโรเตอร์

Pir ความเร็วซิงโครนัส

$\therefore$ ประสิทธิภาพ = $\frac{\text{เอ้าท์พุท}}{\text{อินพุท}}$

$$= \frac{N}{N_S} \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ $$\frac{\text{Cu. losses (rotor)}}{\text{Por}} = \frac{S\ Pir}{(1-S)\ Pir}$$

$$= \frac{S}{(1-S)} \qquad (2.39)$$

จากสมการ (2.32) แรงบิด Tg มีหน่วยนิวตัน - เมตร (Nw-m) เมื่อจะเปลี่ยนหน่วยจาก Nw - m เป็น กิโลกรัม - เมตร (kg - m) ได้ดังนี้

$$Tg = \frac{Por}{9.81 \times 2\pi N_S} \qquad (2.40)$$

และ $$Tsh = \frac{Po\ sh}{2\pi N} \qquad (2.41)$$

<u>วิธีสตาร์ทอินดักชั่นมอเตอร์</u>

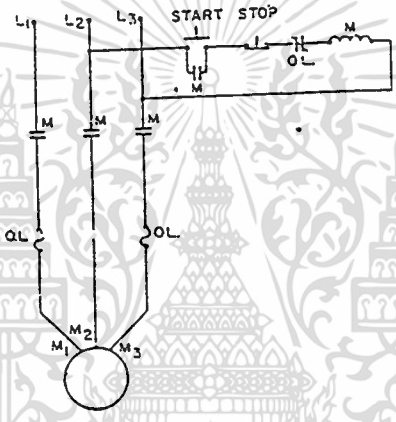
มอเตอร์ไฟฟ้าสลับเรียกว่า อินดักชั่นมอเตอร์ก็เหมือนกับหม้อแปลงไฟฟ้า นั่นก็คือโรเตอร์ทำหน้าที่เป็นขดลวดทุติยภูมิ จะต่างกันเพียงนิดเดียวคือโรเตอร์ของมอเตอร์จะเชื่อมครบวงจรแบบวงจรลัดตลอดเวลา ดังนั้นเมื่อป้อนไฟฟ้าสลับให้กับขดลวดสเตเตอร์แล้ว กระแสอินพุทของขดลวดสเตเตอร์ (ขดลวดปฐมภูมิ) จะสูงมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงสตาร์ท เนื่องจากในช่วงสตาร์ทนี้จะยังไม่มีแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำย้อนกลับเกิดต้านกับแรงดันป้อน กระแสในช่วงสตาร์ทของช่วงสตาร์ทของอินดักชั่นมอเตอร์จะมีค่าประมาณ 5 - 7 เท่าของกระแสเมื่อมอเตอร์ทำงานเต็มพิกัด แต่แรงบิดในช่วงนี้จะมีค่าประมาณ 1.5 - 2.5 เท่าของแรงบิดที่โหลดเต็มพิกัดเท่านั้น กระแสไฟที่มีค่าสูงในชั่วขณะนี้ จะมีผลทำให้เกิดแรงดันไฟลด (drop) ในสายอันจะมีผลต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นที่ต่อร่วมในวงจรเดียวกัน ดังนั้นมอเตอร์ที่มีขนาดตั้งแต่ 30 แรงม้าขึ้นไปจึงไม่ควรที่จะสตาร์ทโดยตรง (Direct start หรือ on line start)

แรงบิดสตาร์ทของอินดักชั่นมอเตอร์สามารถที่จะแก้ไขให้ดีขึ้นได้ โดยการเพิ่มความต้านทานให้กับวงจรโรเตอร์ ซึ่งกรณีนี้สามารถใช้กับมอเตอร์ 3-เฟสแบบสลิปริงได้เป็นอย่างดี แต่ไม่สามารถนำไป โดยการลดแรงดันป้อนของสเตเตอร์ในช่วงสตาร์ท เมื่อมอเตอร์ทำงานแล้วจึงเพิ่มแรงดันให้มีค่าตามพิกัดกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>วิธีสตาร์ทอินดั๊กชั่นมอเตอร์แบบสโลวเรลเกจโรเตอร์</u>

ก. วิธีสตาร์ทโดยตรง (Direct start หรือ on line start) วิธีนี้มักจะใช้กับมอเตอร์ขนาดแรงม้าต่ำๆ คือไม่ควรเกิน 30 แรงม้า ดังได้กล่าวแล้วว่า กระแสสตาร์ทจะมีค่าสูงมาก ประมาณ 5 - 7 เท่าของกระแสฟูลโหลด (กระแสเต็มพิกัด) แต่แรงบิดต่ำมากคือเพียง 1.5 - 2.5 เท่าของแรงบิดที่โหลดเต็มพิกัดเท่านั้น วงจรสตาร์ทโดยตรงดังรูปที่ 3-4



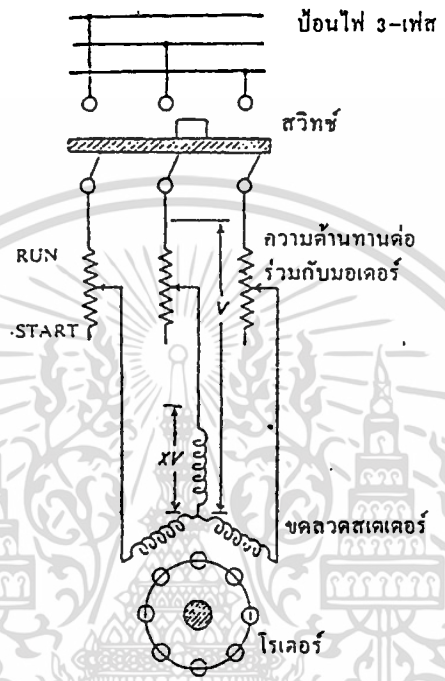
รูปที่ 3-4 วงจรสตาร์ทโดยตรง

ข. วิธีสตาร์ทโดยลดแรงดันป้อน (Reduce voltage start)

วิธีสตาร์ทอินดั๊กชั่นมอเตอร์แบบแรงดันป้อนมีหลายวิธีด้วยกันดังนี้

1. ต่อความต้านทานอันดับกับมอเตอร์ (primary resistor or rheostat) เพื่อที่จะลดแรงดันป้อนในช่วงสตาร์ทให้ต่ำลง กระแสไฟในช่วงสตาร์ทก็จะลดลงด้วย เนื่องจากกระแสจะแปรผันโดยตรงกับแรงดัน และแรงบิดแปรผันกับแรงดันกำลังสอง สมมุติว่าถ้าแรงดันป้อนลดลง 50% กระแสก็จะลดลง 50% ด้วย แต่แรงบิดสตาร์ทจะลดลงเพียง 25% ของแรงบิดเมื่อโหลดเต็มพิกัดเท่านั้น เมื่อมอเตอร์ทำงาน และมีความเร็วสูงขึ้นแล้วจึงค่อยๆ ลดความต้านทานออกจากวงจรขดลวดสเตเตอร์ วงจรสตาร์ทแบบนี้ดังรูปที่ 2-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



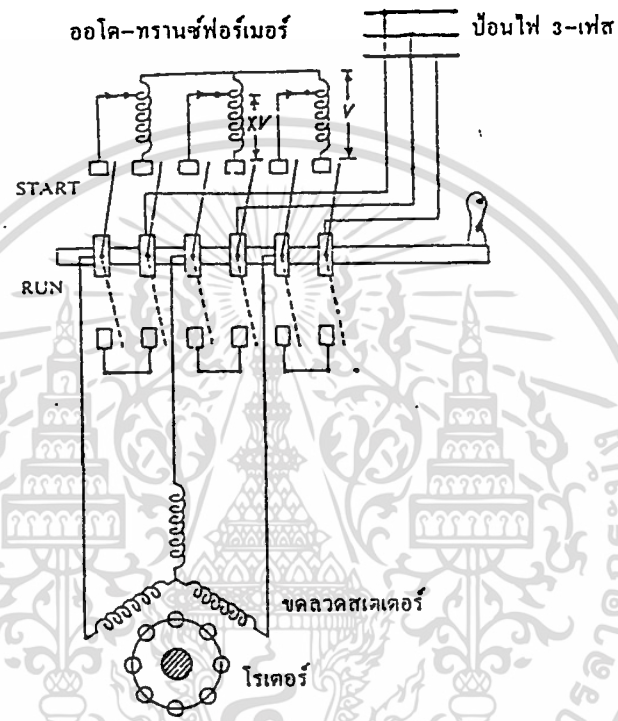
รูปที่ 2-5 วงจรสตาร์ทลดแรงดันป้อนโดยต่อความต้านทานอันดับกับมอเตอร์

2. ต่อออโต-ทรานซ์ฟอร์เมอร์อันดับกับมอเตอร์ (Auto - transformer)

วิธีสตาร์ทมอเตอร์แบบนี้บางที่ก็เรียกว่า ออโต - สตาร์ทเตอร์ (auto - starter) หรือ คอมเพนเซเตอร์ (Compentor) ซึ่งจะประกอบด้วย ออโต - ทรานซ์ฟอร์เมอร์ และสวิทช์อัตโนมัติ ตามรูปใช้ออโต - ทรานซ์ฟอร์เมอร์ หนึ่งเฟส 3 ตัว หรือออโต - ทรานซ์ฟอร์เมอร์สามเฟสหนึ่งตัว เมื่อเริ่มสตาร์ทจะสับสวิทช์ไปยังตำแหน่งสตาร์ท (start) จะสังเกตเห็นว่าแรงดันป้อนมอเตอร์จะมีค่าลดลงเหลือเพียง XV เท่านั้น เมื่อมอเตอร์มีความเร็วสูงขึ้นประมาณ 80% ของความเร็วเต็มพิกัดแล้วจึงสับสวิทช์ไปยังตำแหน่งรัน (run) ขณะนี้แรงดันป้อนมอเตอร์จะมีค่าตามพิกัด คือ V. สวิทช์ที่ใช้ ถ้าใช้กับมอเตอร์ขนาดแรงม้าต่ำจะใช้ชนิด air break แต่ถ้าเป็นมอเตอร์ขนาดแรงม้าสูงจะใช้สวิทช์ชนิด oil-immersed ทั้งนี้เพื่อลดการสปาร์ค (spark) ที่หน้าสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
038030

วิธีสตาร์ทแบบนี้ จะออกแบบให้มีรอยต่อ (tap) ที่หม้อแปลงเป็น 3 ขนาดด้วยกันคือ 80, 65 และ 50 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันป้อนเต็มพิกัด เพื่อให้สามารถเลือกแรงดันสตาร์ทได้อย่างเหมาะสม วงจรสตาร์ทแบบนี้ดังรูปที่ 2-6



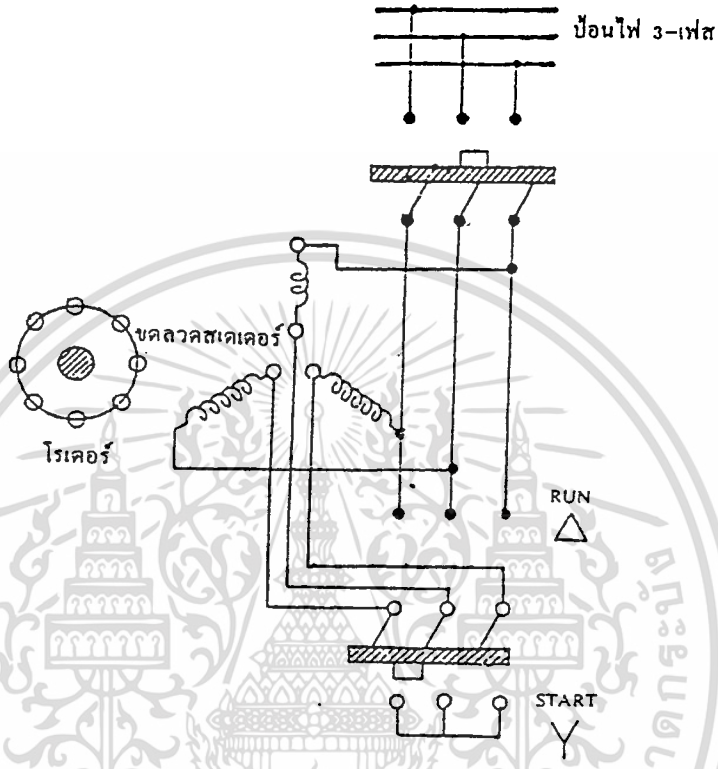
รูปที่ 2-6 วงจรสตาร์ทแบบต่อออโต-ทรานซ์ฟอร์เมอร์อันดับกับมอเตอร์

3. วิธีสตาร์ทแบบ สตาร์ท - เดลต้า (Star - Delta Starter)

วิธีนี้จะใช้กับมอเตอร์สามเฟสที่ขดลวดสเตเตอร์ทำงานแบบเดลต้าเท่านั้น วงจรสตาร์ทจะประกอบด้วยสวิทช์จะประกอบด้วยสวิทช์ชนิด 2 ทาง แบบ TPDT โดยสวิทช์นี้จะต่อขดลวดสเตเตอร์แบบสตาร์ในตอนสตาร์ท และต่อขดลวดแบบเดลต้าเมื่อมอเตอร์ทำงานปกติ

ขณะสตาร์ท ขดลวดต่อแบบสตาร์นั้น แรงดันป้อนขดลวดแต่ละชุดจะมีค่า $1/\sqrt{3}$ ของแรงดันปกติ แต่แรงบิดสตาร์ทจะมีค่าเพียง 1/3 ของแรงบิดเมื่อโหลดเต็มพิกัด คือเมื่อมอเตอร์ต่อแบบเดลต้า และทำงานที่แรงดันเต็มพิกัด และกระแสสตาร์ทจะลดลงในสัดส่วนเดียวกับแรงดันป้อนขณะสตาร์ท คือลดลง $1/\sqrt{3}$ ของกระแสโหลดเต็มพิกัด วิธีสตาร์ทมอเตอร์วิธีนี้มีราคาถูก และการควบคุมทำได้ง่ายและสะดวก วงสตาร์ทดังรูปที่ 2-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



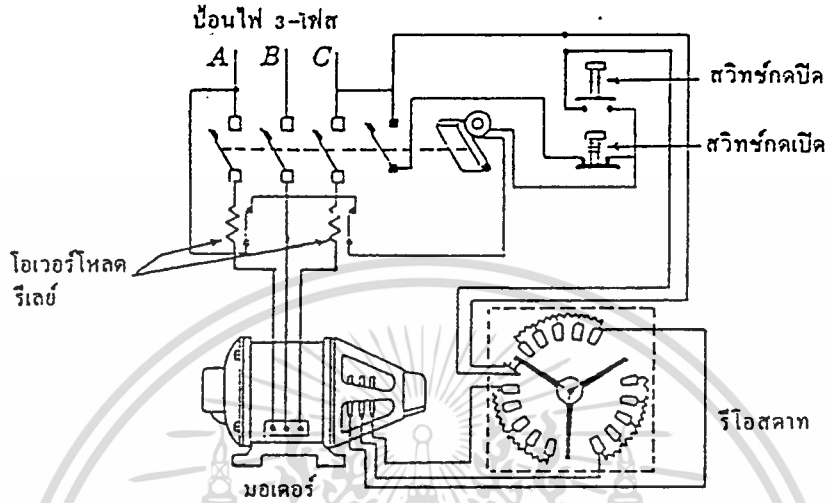
รูปที่ 2-7 วงจรสตาร์ทแบบสตาร์ - เดลต้า

<u>วิธีสตาร์ทอินดักชั่นมอเตอร์แบบวาวด์โรเตอร์</u>

มอเตอร์แบบวาวด์โรเตอร์หรือสลิปริงมอเตอร์นี้ มักจะสตาร์ทด้วยแรงดันเต็มพิกัด คือ แรงดันตามพิกัดให้กับขดลวดสเตเตอร์เลย กระแสไฟตอนสตาร์ทจะถูกปรับให้ลดลงโดยการต่อความต้านทานที่ปรับค่าได้เข้ากับวงจรโรเตอร์ ความต้านทานที่ปรับค่าได้หรือที่เรียกว่า รีโอสตาท จะต่อร่วมกับโรเตอร์ด้วยการต่อแบบสตาร์ (star) ขณะสตาร์ทจะปรับความต้านทานให้มีค่าสูง ๆ ร่วมในวงจรโรเตอร์ แต่พอความเร็วสูงขึ้นแล้ว จึงค่อย ๆ ลดความต้านทานลง จนกระทั่งตัดออกหมด และต่อลัดวงจรโรเตอร์

การเพิ่มความต้านทานเข้าไปในโรเตอร์นั้นไม่เพียงแต่จะให้กระแสสตาร์ทลดลงเท่านั้น ยังทำให้แรงบิดสตาร์ทสูงขึ้นด้วย เนื่องจากเพาเวอร์แฟคเตอร์ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-8 วงจรสตาร์ทสลิปริงมอเตอร์แบบต่อตรง

รีโอสตาทที่ต่อร่วมกับโรเตอร์อาจจะชนิดปรับความต้านทานได้เป็นขั้น ๆ หรือเป็นแบบปรับค่าได้อย่างต่อเนื่องก็ได้ และอาจจะเป็นแบบบังคับด้วยมือหรือแบบทำงานอัตโนมัติก็ได้

<u>วิธีการควบคุมความเร็วรอบของอินดั๊กชั่นมอเตอร์</u>

การควบคุมความเร็วรอบของอินดั๊กชั่นมอเตอร์ ทำได้หลายวิธีซึ่งสามารถแยกการควบคุมได้ดังนี้

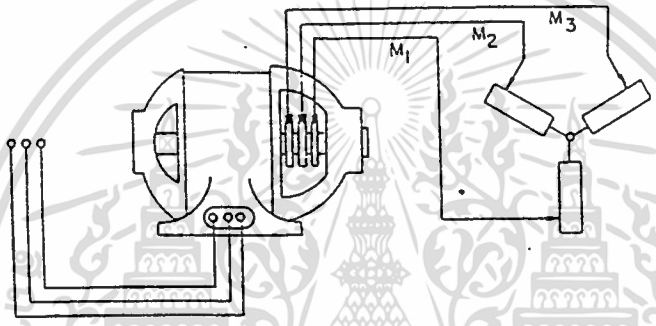
<u>การควบคุมโวลท์เตจของสเตเตอร์ (Stator voltage control)</u>

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์โดยควบคุมโวลท์เตจของสเตเตอร์นี้ ช่วงความเร็วที่ควบคุมได้จะแคบ ไม่เหมาะสมกับงานที่ต้องการทอร์คเริ่มต้นสูง สำหรับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างทอร์ค - ความเร็ว ของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ได้จากวิธีการควบคุมโวลท์เตจของขดสเตเตอร์

จะเห็นว่าทอร์คเปลี่ยนแปลงไปตามโวลท์เตจที่จ่ายให้กับขดสเตเตอร์ของมอเตอร์ และเส้นกราฟทอร์ค-ความเร็ว นั้นจะแปรค่าโดยตรงกับความเร็วกำลังสอง ดังนั้นเราสามารถปรับความเร็วของมอเตอร์ได้ โดยการปรับโวลท์เตจที่ป้อนเข้ามอเตอร์ เพื่อให้จุดตัดระ หว่างเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟ ทอร์ค-ความเร็ว ของมอเตอร์ตัดกับเส้นกราฟ ทอร์ค-ความเร็ว ของโหลดที่ความเร็วหรือสลิปที่ต้องการ การควบคุมของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการควบคุมโวลท์เตจของสเตเตอร์นี้จะใช้วิธีการควบคุมแบบเฟสของไฟไลน์ (Phase control) ดังแสดงในรูปที่ 2-9



รูปที่ 2-9 แสดงวงจรกำลัง 3 เฟสเอซีเพาเวอร์คอนโทรลแบบควบคุมเฟส

วิธีการควบคุมแบบนี้จะทำได้ง่าย และวงจรควบคุมมีราคาถูก แต่จะมีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากเปอร์เซ็นต์ของกำลังการสูญเสียในโรเตอร์ของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามค่าสลิป นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของกระแสในสเตเตอร์เมื่อสลิปเพิ่มขึ้นทำให้กำลังสูญเสียในสเตเตอร์เพิ่มขึ้นด้วย เป็นผลให้ประสิทธิภาพของและทอร์คของมอเตอร์ลดลงมาก โดยเฉพาะที่ความเร็วรอบต่ำ ๆ เนื่องจากมอเตอร์ต้องทำงานที่ค่าสลิปสูง อีกทั้งวะการควบคุมแบบเฟสนี้เป็นผลทำให้เกิดฮาร์โมนิคขึ้นทั้งในเอซีไลน์ และในตัวของมอเตอร์ ทำให้มีการสูญเสียเพิ่มขึ้นอีกและทำให้เพาเวอร์แฟคเตอร์ของระบบลดลงตามความเร็วของมอเตอร์

<u>การควบคุมสลิปเพาเวอร์</u>

วิธีการควบคุมความเร็วโดยควบคุมสลิปของโรเตอร์นี้ สามารถควบคุมได้จากโวล์เตจของแหล่งจ่ายไฟ หรือควบคุมกำลังในโรเตอร์ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเอาท์พุท (Pout)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังสูญเสียในโรเตอร์ (Pc) กับกำลังที่ส่งผ่านจากสเตเตอร์ไปยังโรเตอร์ (Airgap power, Pg) แสดงได้ดังนี้

$$Pout = (1-S)Pg \qquad (2.42)$$

จากสมการเหล่านี้จะเห็นว่าถ้าควบคุมอัตราส่วนระหว่างกำลังสูญเสียใน โรเตอร์กับกำลังเอาท์พุทของมอเตอร์ได้ก็จะควบคุมสลิปของโรเตอร์ได้ ตัวอย่างเช่น ในกรณีของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบขดลวดพัน (wound rotor induction motor) การควบคุมสลิปของโรเตอร์ทำได้โดยการแปรค่าของความต้านทานที่ต่อเข้ากับวงจรของโรเตอร์ การควบคุมวิธีนี้ถึงแม้จะทำได้ง่ายแต่จะมีข้อเสียในแง่ของประสิทธิภาพของระบบโดยเฉพาะที่ความเร็วรอบต่ำ ๆ หรือที่สลิปค่าสูง ๆ ดังจะเห็นได้จากค่าของ Rotor power ratio ดังสมการที่ (2.43)

$$\text{Rotor power ratio} = \frac{Pout}{Pg} = 1-S \qquad (2.43)$$

<u>การควบคุมโดยไซโคลคอนเวอร์เตอร์</u>

ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ (Cyclo converter) เป็นวงจรที่ทำการเปลี่ยนความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่หนึ่งไปเป็นอีกความถี่หนึ่ง ที่ปรับค่าโดยตรงโดยไม่ผ่านคีซีลิงค์โดยทั่วไปความถี่เอาท์พุทของไซโคลคอนเวอร์เตอร์จะต่ำกว่าความถี่อินพุทคือ อยู่ในย่าน 0-1/3 เฮิทซ์ของความถี่อินพุท ส่วนใหญ่ไซโคลคอนเวอร์เตอร์จะใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ต้องการความเร็วรอบต่ำและต้องการกำลังงานสูง การเปลี่ยนแปลงความถี่ของไซโคลคอนเวอร์เตอร์อาจจะใช้เทคนิคแบบควบคุมเฟส ข้อเสียของการควบคุมความเร็วโดยใช้ไซโคลคอนเวอร์เตอร์คือสามารถควบคุมความถี่ได้ในย่านที่จำกัด อินพุทเพาเวอร์แฟคเตอร์มีค่าต่ำ และเอาท์พุทโวล์เตจมีองค์ประกอบของฮาร์โมนิคส์ปะปนอยู่มาก ข้อดีของการควบคุมแบบนี้คือ ประสิทธิภาพการทำงานของระบบดีขึ้นเนื่องจากไม่มีคีซีลค์ สามารถควบคุมองค์ประกอบหลักมูลของเอาท์พุทโวลท์เตจภายในไซโคลคอนเวอร์เตอร์ วงจรใช้วิธีการเปลี่ยนการนำกระแสโดยไลท์คอมมิวเตทซึ่งมีความยุ่งยากในการควบคุมน้อยกว่าการเปลี่ยนการนำกระแสแบบบังคับ (Forced Commutation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>การควบคุมอัตราส่วนระหว่างโวลท์เตจต่อความถี่ (V/F)</u>

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์อีกวิธีหนึ่งคือ การควบคุมโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ป้อนเข้ามอเตอร์ แต่การเปลี่ยนแปลงความถี่จะมีผลทำให้สนามแม่เหล็กหรือฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux, Φ) ในช่วงอากาศมีการเปลี่นแปลงไป และถ้าการเปลี่ยนแปลงไปของฟลักซ์แม่เหล็กเป็นไปแบบไม่คงที่แล้ว จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง การควบคุมการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กให้คงที่ตามการเปลี่ยนแปลงของตามถี่ สามารถควบคุมได้จากอัตราส่วนของโวลท์เตจต่อความถี่ โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างโวลท์เตจที่ป้อนเข้ามอเตอร์ความถี่และฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดจะเป็นไปตามสมการที่ (2.44)

$$V = k\phi f \qquad (2.44)$$

หรือ $$\phi = \frac{V}{kf}$$

โดย V - โวลท์เตจที่ป้อนเข้ามอเตอร์

ϕ - ฟลักซ์แม่เหล็กในช่องอากาศ

k - ค่าคงที่

โดยปกติมอเตอร์จะถูกแบบให้ฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าอยู่ตรงส่วนเข้าโค้ง (knee point) ของเส้นโค้งลักษณะสมบัติของการทำให้เป็นแม่เหล็ก (Magnetization curve) ซึ่งถ้ามีการลดความถี่ลงโดยที่ไม่ลดระดับโวล์เตจลงด้วยแล้ว จะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าสูงขึ้นตามความสัมพันธ์ในสมการที่ และจะมีค่าเข้าไปในย่านอิ่มตัว (Satuation tegion) ทำให้ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเหล็กเพิ่มขึ้นเกิดการสูญเสียในแกนเหล็ก (iron loss) เพิ่มมากขึ้น เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลง ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงต้องทำการลดอัตราการเพิ่มในมอเตอร์ลงโดยลดระดับโวลท์ให้เป็นอัตราส่วนโดยตรงกับอัตราการลดลงของความถี่ เพื่อจะรักษาฟลักซ์แม่เหล็กให้มีค่าอยู่ตรงส่วนเข้าโค้งของเส้นโค้งการทำให้เป็นแม่เหล็กของแกนเหล็ก ในทางตรงกันข้ามถ้ามีการเพิ่มความถี่ที่ป้อนเข้ามอเตอร์ให้สูงขึ้นโดยไม่เพิ่มระดับโวลท์เตจแล้วก็ทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กลดลง ซึ่งมีผลทำให้แรงบิดของมอเตอร์ลดลงดังความสัมพันธ์ในสมการที่ ทำให้มอเตอร์ไม่สามารถทำงานที่ประสิทธิภาพสูงสุดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = k\phi I_r \cos\theta$$

โดยที่ T = เอาท์พุททอร์คของมอเตอร์

ϕ = ฟลักซ์แม่เหล็กในช่องอากาศ

I_r = กระแสในโรเตอร์

θ = มุมเดกต่างระหว่างเฟสของโวลท์เตจและกระแสในโรเตอร์

ในทำนองเดียวกันจึงต้องทำการเพิ่มระดับโวลท์เตจให้สูงขึ้น เพื่อจะรักษาฟลักซ์แม่เหล็กและแรงบิดของมอเตอร์ให้มีค่าคงที่ การรักษาฟลักซ์แม่เหล็กสามารถพิจารณาได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์โดยพิจารณาจากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law)

$$e = \frac{-d\phi}{dt} \qquad (2.45)$$

$$\phi = \int e\, dt \qquad (2.46)$$

จากสมการที่ (2.46) จะได้ว่าค่าฟลักซ์คือ พื้นที่ใต้เส้นโค้งรูปคลื่นโวลท์เตจ ดังนั้น ถ้ารักษาพื้นที่ใต้เส้นโค้งรูปคลื่นโวลท์เตจให้มีค่าคงที่แล้วมอเตอร์ก็จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีแรงบิดเหมาะสมสูงสุดซึ่งวิธีการนี้เรียกว่า วิธีการรักษาโวลท์เตจต่อความถี่คงที่ (V/f)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การอินเตอร์เฟสและการแปลงสัญญาณของข้อมูล

คอมพิวเตอร์นั้นปกติจะมี พอร์ท (Port) อยู่กับตัวมันเสมอ เพื่อเป็นการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกเพื่อประโยชน์ในการควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ แต่ในหลาย ๆ กรณีอุปกรณ์จำนวนมากต้องถูกควบคุมด้วยสัญญาณอนาล็อก (Analog) ซึ่งเป็นสัญญาณที่ต่อเนื่อง ตัวอย่างจากอุปกรณ์ เช่น ดีซีมอเตอร์ (ความเร็วในการหมุน) จะถูกควบคุมด้วยคอมพวเตอร์จึงเป็นเหตุให้สัญญาณทางดิจิตอลที่เอาท์พุทต้องเปลี่ยน สัญญาณอนาลอกให้เป็นอินพุทกับคอมพิวเตอร์นั้นกระทำไม่ได้จึงต้องทำการแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิตอลเสียก่อน ดังนั้นวงจรการแปลงสัญญาณจากดิจิตอลเป็นอนาลอก (D/A) และจากอนาลอกเป็นดิจิตอล (A/D) จึงมีบทบาทเข้ามาเกี่ยว

<u>การแปลงสัญญาณจากดิจิตอลเป็นอนาลอก</u>

หน้าที่หลักของตัวแปลงสัญญาณ D/A ก็คือ โดยการนำเอากลุ่มของบิตข้อมูลจากคอมพิวเตอร์หรือวงตอลดิจิตอลอื่น ๆ และแปลงรูปแบบของบิตนั้นให้เป็นสัญญาณเสมือนระดับโวลท์เตจที่ต่อเนื่อง ปกติแล้วรูปแบบของบิตที่ส่งผ่านตัวแปลงสัญญาณ D/A มักจะแสดงในรูปเลขฐานสองระบบมีระบบมีระดับสัญญาณเอาท์พุทของ D/A ควรจะเป็นระดับที่แตกต่างกันสำหรับแต่ละอินพุท

หลักเบื้องต้นของการแปลงสัญญาณจาก ดิจิตอลเป็นอนาลอก

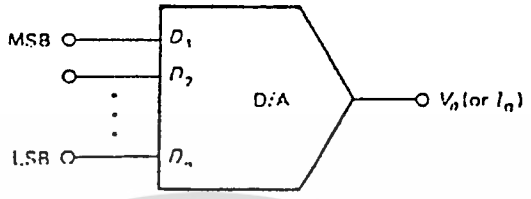
โดยปกติแล้วจะใช้บล็อกไดอะแกรมเป็นตัวแสดงแทน DAC (D/A CONVERTER) ในรูปที่ 3.1 สัญญาณเอาท์พุทออกจาก DAC อาจจะเป็นระดับศักดาหรือกระแสไฟฟ้าก็ได้ อย่างไรก็ดีชนิดของสัญญาณเอาท์พุทขึ้นอยู่กับโครงสร้างวงจรภายในตัว DAC ว่าจะให้เอาท์พุทเป็นอย่างไร จำนวนของระดับศักดาหรือกระแสไฟฟ้าที่ซึ่งสร้างมาจากเอาท์พุทของ DAC นั้นมาจาก สูตรในการหาคือ

$$N = 2^{n} \qquad (3\text{-}1)$$

โดย N - จำนวนระดับของสัญญาณเอาท์พุทที่แตกต่างกัน

n - จำนวนบิตอินพุทของ DAC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-1 บล็อกไดอะแกรมของตัวแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก

จำนวนของระดับที่แตกต่างกันของเอาท์พุท DAC นั้นอาจใช้นิยามความหมายของ เรสโซรูชั่น (RESOLUTION) ของอุปกรณ์ ค่าเรสโซรูชั่นนี้เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้บอกคุณภาพของ DAC ซึ่งหาได้จากอัตราส่วน 1 ใน N ส่วน โดยมากแล้วมักบอกอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ ดังสมการ

$$\% \text{ ของเรสโซรูชั่น} = (1/2^{n}) \times 100\% \qquad (3.2)$$

เราจะเห็นว่าถ้ามีการเพิ่มอินพุทมากๆ จะทำให้ค่าเรสโซรูชั่นดีขึ้น (นั้นก็คือเปอร์เซ็นต์ของเรสโซรูชั่นจะน้อยลง) ในปัจจุบันถ้าเราดูจากคู่มือไอซีจะนิยมบอกค่าเรสโซรูชั่นตามค่าบิต เช่น คอนเวอร์เตอร์ ชนิด 8 บิต ก็จะเขียนว่า 8 bit resolution เป็นต้น

* % ของเรสโซรูชั่นนั้นในบางตำราอาจใช้เป็น $(1/2^{n-1}) \times 100\%$ *

ตัวอย่าง จงหาว่า DAC มีไบนารี 10 อินพุท เรสโซรูชั่นกี่เปอร์เซ็นต์ ?

วิธีทำ เปอร์เซ็นต์ของเรสโซรูชั่น $= (1/2^{10}) \times 100\%$

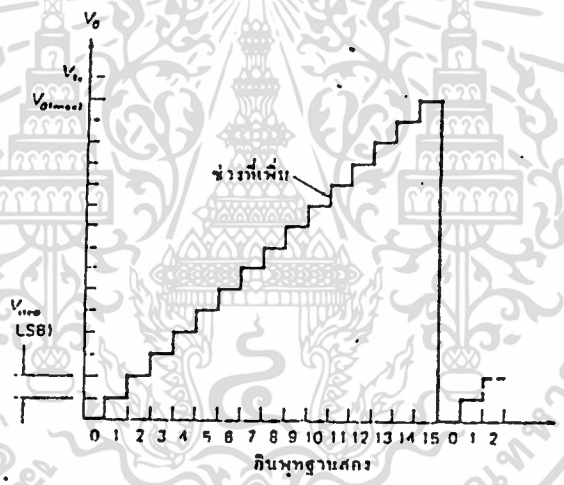
$= (1/1024) \times 100\%$

$= 0.098\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าของเรสโซรูชั่นในอีกความหมายหนึ่งก็คือ เปอร์เซ็นต์ของความเที่ยงตรงของเอาท์พุทที่จำกัดอินพุท (FINITE INPUT) เพื่อเทียบกับเอาท์พุทสมบูรณ์แบบ (FULL SCALE OUTPUT) เอาท์พุทสมบูรณ์แบบก็คือ เอาท์พุทที่เกิดจาก DAC ซึ่งมีอินพุทไม่จำกัด (INFINITE INPUT) เราจะเห็นได้ว่ายิ่งเปอร์เซ็นต์เรสโซรูชั่นยิ่งน้อยเท่าไรจะได้เอาท์พุทที่ใกล้เคียงอุดมคติเท่านั้น ในทางปฏิบัติ DAC ไม่สามารถให้เอาท์พุทที่สมบูรณ์แบบได้เพราะมีอินพุทจำกัด

พิจารณารูปที่ 3-1 สมมติว่ามี 4 อินพุท กราฟแสดง Vo ต่อไบนารี่อินพุทจะได้ดังรูปที่ สังเกตุว่าจะมีอินพุทที่แบ่งแยกกันอยู่ 16 ระดับศักดาโดยเริ่มต้นที่ 0V และมีช่วงขึ้น (RISER) อยู่ 15 ช่วง



รูปที่ 3-2 กราฟแสดงคุณลักษณะของ DAC 4 บิตอินพุท

ถ้าเราต้องการให้ได้เอาท์พุทสมบูรณ์แบบ เราจะต้องเพิ่มอินพุทและจะทำให้เกิดขั้นที่ 16 ไปเรื่อย ๆ โดยขึ้นแบบ step (ขั้นบันได) เอาท์พุทที่เพิ่มขึ้นในแต่ละขั้นเรามักเรียกว่า LSB (LEAST SIGNIFICANT BIT)คือการเปลี่ยนแปลงหน่วยย่อยที่สุดเพื่อมีการเปลี่ยนสภาวะอินพุท

การเพิ่มของเอาท์พุท (ศักดาหรือกระแส) สำหรับแต่ละขั้นนั้น มีความสัมพันธ์ดังสมการ

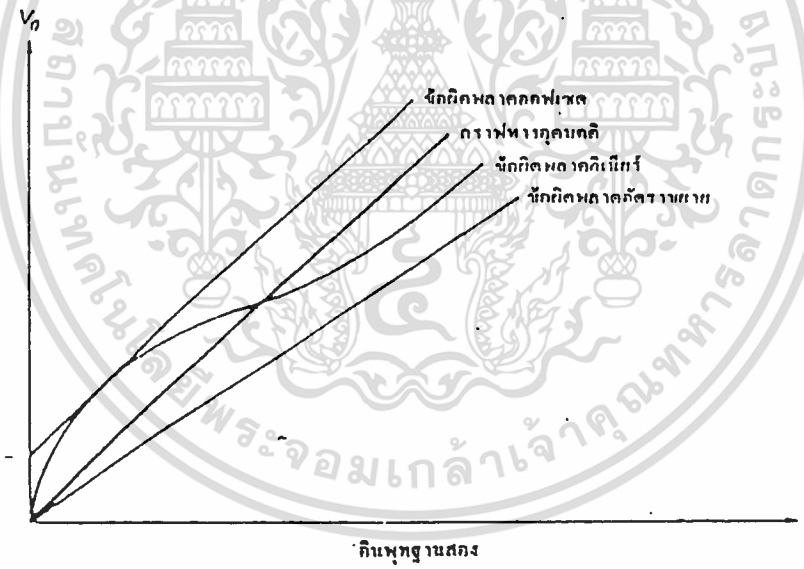
$$\text{ขนาดของขั้น} = V_{ss}/2^{n} \qquad (3.3)$$

โดยที่ n = จำนวนไบนารี่อินพุท

V_{ss} = ศักดาเอาท์พุทสมบูรณ์แบบ (full scale output)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรสโซรูชั่นของ DAC ใช้เป็นตัวเบ่งชี้ถึงความถูกต้อง ของอุปกรณ์เพราะ เรสโซรูชั่นเป็นตัวจำกัดความเที่ยงตรงของอุปกรณ์ -- แต่เรสโซรูชั่นกับความเที่ยงตรง (ACCURACY) มิใช่สิ่งเดียวกัน แต่ก็ไม่จำเป็นว่าค่าเอาท์พุทที่ออกมาจะเกิดมาจากอินพุทบิตในเงื่อนไขอุดมคติ เอาท์พุทของ DAC สามารถถูกต้องได้ภายใน ±1/2 ของ Vstop (หรืออาจหมายถึง ±1/2 LSB เพราะ 1 step = 1LSB) อย่างไรก็ดีข้อผิดพลาดใน DAC นั้นมันเกิดจากหลายสาเหตุ โดยทั่ว ๆ ไปแล้วเกิดจากเครื่องมือและโครงสร้างของวงจร DAC ในรูปที่ 3-3 แสดงผลของความผิดพลาดชนิดต่าง ๆ บนกราฟ DAC ในอุดมคติ กราฟของ DAC ในอุดมคติจะเป็นเส้นตรงและต่อเนื่อง (ไม่มีข้อผิดพลาดเลย) และเป็นที่แน่นนอนในทางปฏิบัติเราไม่สามารถจะสร้างเหตุการณ์เช่นนี้ได้เลย



รูปที่ 3-3 กราฟแสดงคุณลักษณะและผลของความผิดพลาดชนิดต่างๆ ของ DAC

ข้อผิดพลาดออฟเซต (OFFSET ERROR) เป็นผลมาจากเอาท์พุทของ DAC ไม่เป็น 0 เมื่ออินพุทเป็น 0 ผลอันนี้จะเลื่อน V_o (หรือ I_o) ให้สูงไปกว่าเดิม ถ้ามีแต่ข้อผิดพลาดอย่างนี้เพียงอย่างเดียวเอาท์พุทจะผิดพลาดในปริมาณที่คงที่

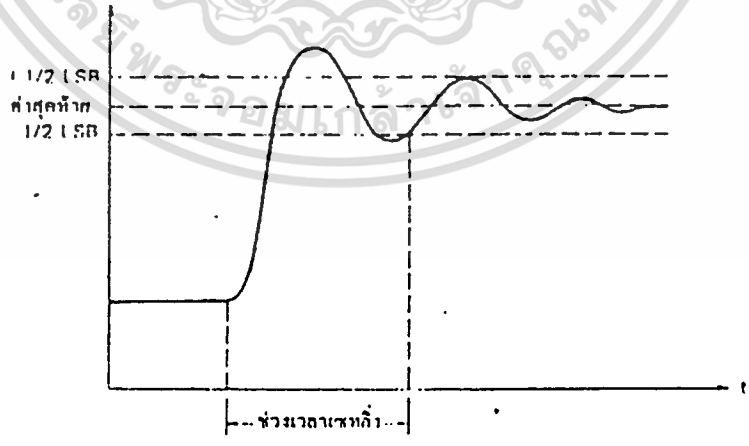
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อผิดพลาดอัตราขยาย (GAIN ERROR) บางครั้งเรียกว่าข้อผิดพลาดสเกลลิ่ง (SCALING ERROR) ข้อผิดพลาดชนิดนี้จะสร้างขนาดของขั้น (STEP SIZE) ใหญ่เกินไปหรือเล็กเกินไปกว่าปกติ (LSB ไม่ปกติ) เอาท์พุทเพิ่มผิดปกติอาจมากขึ้นหรือน้อยลงกว่าปกติ

ข้อผิดพลาดลิเนียร์ (LINEARITY ERROR) ข้อผิดพลาดชนิดนี้เกิดขึ้นมาจากวงจรภายในของ DAC ซึ่งไม่ลิเนียร์ (NONLINEARITY) เช่น ถ้าอัตราขยายของ DAC ไม่คงที่แล้วขนาดของเอาท์พุทก็จะแปรเปลี่ยนไปได้ ผลของข้อผิดพลาดชนิดนี้ก็คือจะทำให้เอาท์พุทเบี่ยงเบนไม่เป็นเส้นตรง ข้อผิดพลาดมักเกิดจากอุณหภูมิที่แปรเปลี่ยนแปลงรวดเร็วและข้อผิดพลาดชนิดนี้ยากมากที่จะแก้ไข

ในการระบุเกี่ยวกับ DAC นั้นเป็นการระบุความสัมพันธ์กับเวลาซึ่งวงจรไฟฟ้าได้ใช้ไปในการแปลงสัญญาณคุณสมบัติอันนี้เรียกว่า เซทลิ่งไทม์ (SETTLINGTIME) เวลาเซทลิ่งหมายถึง เวลาที่ใช้ไปสำหรับให้เอาท์พุทตอนแรกเคลื่อนที่เข้าหาจุดเอาท์พุทสุดท้ายตามเปอร์เซนต์ของเอาท์พุทระบุไว้ โดยปกติจะใช้ว่า ±1/2 LSB (1LSB ก็คือ ขนาดของขั้น (STEPSIZE)

รูปภาพ 3-4 เป็นการแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงระดับของเอาท์พุทและแสดงถึงวิธีการสังเกตุช่วง "เวลาเซทลิ่ง"



รูปที่ 3-4 กราฟของ DAC ที่ตอบสนองกับเวลาซึ่งแสดงถึงเวลาเซทลิ่ง (SETTING TIME)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตัวอย่างนี้เอาท์พุทของมันได้แสดงถึงการกระเพื่อมเกิน (OVERSHOOT) ช่วงเอาท์พุทที่ต้องการ การกระเพื่อมเกินเป็นสิ่งปกติในวงจร DAC เมื่อไรก็ตามที่เอาท์พุทถึงช่วงที่เราต้องการและไม่กระเพื่อมสูงกว่าที่เราต้องการ เราเรียกช่วงนั้นว่า สภาวะสุดท้าย กรณีที่จะผิดแปลกออกไปของช่วงเวลาเซทลิ่ง (SETTLING TIME) ก็คือ ต้องการเปลี่ยนเอาท์พุทของ DAC จากเอาท์พุทสูงสุดเป็นเอาท์พุทต่ำสุด หรือจากเอาท์พุทต่ำสุดไปเป็นเอาท์พุทสูงสุดเพื่อความเข้าใจ พิจารณา DAC ซึ่งมีเวลาเซทลิ่งเท่ากับ 10 ms เพื่อที่เราจะได้รับเอาท์พุทที่ถูกต้องภายใต้เงื่อนไขของอินพุทไบนารี่อินพุทจะต้องไม่เปลี่ยนค่าเร็วกว่า 10ms/ครั้ง

วงจรการแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อก

DAC โดยปกติแล้วมักจะใช้ออปแอมป์ในการออกแบบวงจรโดยเฉพาะอุปกรณ์ D/A ในบทนี้จะกล่าวถึงวงจร DAC 4 แบบ ซึ่งแต่และแบบได้ถูกประยุกต์ใช้งานกันทั่วไป

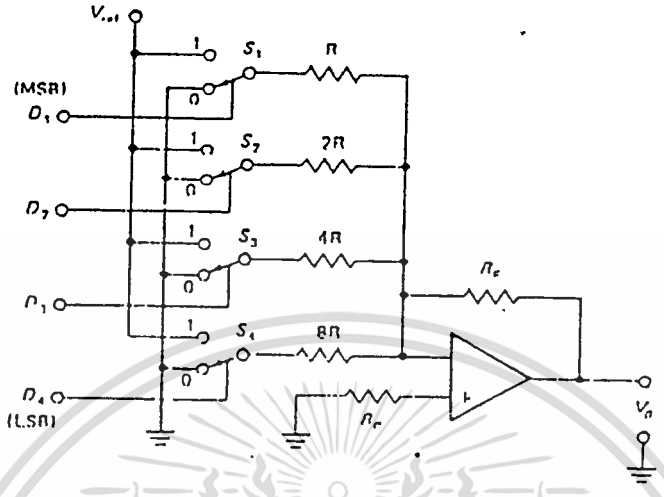
Weight Resistor Summing Amplifier

เป็นแบบที่ง่ายที่สุดแบบหนึ่งของ DAC ก็คือ การใช้โดยการให้น้ำหนัก เพื่อที่จะให้วงจรไม่ยุ่งยากก็เลยแสดงเพียง 4 อินพุท สวิสท์จะถูกควบคุมด้วยสัญญาณอินพุทจาก D1-D4 เพื่อจะไปต่อเข้ากับ Vref (แรงดันอ้างอิง) โดยใช้มาตรฐานของวงจรออปแอมป์เราจะสามารถหาเอาท์พุทโวท์เตจของวงจรนี้จากสูตร

$$Vo = -V_{ref}(D_1R_F/R + D_2R_F/2R + D_3R_F/4R + D_4R_F/8R) \qquad (3.4)$$

เครื่องหมายลบในสมการ 3.4 นั้นเป็นตัวแสดงว่าเป็นการต่อออปแอมป์ในลักษณะอินเวอร์ติ้งถ้า Vref เป็นศักคาบวก Vo จะเป็นศักคาลบและถ้า Vref เป็นศักคาลบ Vo ก็จะเป็นศักคาบวก ค่าของ RF ใช้ในการคำนวณหาอัตราขยายของ DAC RF ยิ่งมากศักคาเอาท์พุทก็จะมากขึ้นไปด้วย S1-S4 ตามปกติแล้วจะไม่ใช่สวิทส์ทางกลส่วนมากจะใช้เป็นพวก CMOS อนาล็อกสวิทส์ เช่น ไอซีเบอร์ LF11331 ซึ่งสวิทส์เหล่านี้จะถูกควบคุมให้เปิดหรือปิดโดยระดับสัญญาณ ตัวอย่างข้างล่างจะช่วยให้เข้าใจการทำงานของวงจรนี้ยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-5 Weighted resistor D/A converter

เวลาที่ใช้ในการแปลงสัญญาณส่วนสำคัญในการพิจารณาความเร็วของการแปลงสัญญาณมันขึ้นอยู่กับวงจรที่หน่วงเวลาไปทั้งหมด , เวลาเซทลิ้ง (setting time) ที่ไม่เป็น 0 ขณะของตัวออปแอมป์ อัตราสลู (slew rate) คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงที่มากที่สุดที่เป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้นที่เอาท์พุทของออปแอมป์ (เป็น Large signal) แบนดวิท (Bandwidth) เป็นช่วงของความถี่ที่ทำงานได้และสัมพันธ์กับอัตราสลู (เป็น SMALL SIGNAL) ในการพิจารณาตอนนี้อัตราสลูมีความสำคัญกว่าแบนด์วิส เนื่องจากเราต้องการที่จะได้สัญญาณเอาท์พุทที่ใหญ่ และมีช่วงขึ้นที่เร็ว ถ้าเราต้องการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเร็ว เราต้องใช้ออปแอมป์ที่มีความเร็วสูง (เป็น high slew rate) ถ้าเราควรระมัดระวังในการใช้ในวงจรดิจิตอลสามารถที่จะเปลี่ยนสภาวะของเอาท์พุทได้ที่ความเร็วสูง ถ้า DAC ไม่สามารถเปลี่ยนเอาท์พุทของมันให้เร็วกว่าผลตอบสนองการเปลี่ยนอินพุทแล้ววงจรนั้นก็ไม่สามารถนำมาใช้งานได้

เวลาเซทลิ่ง (Setting time) ประมาณ 150 ms หรือต่ำกว่านั้นเหมาะสำหรับใช้อ่านโดยทั่วไป ถ้าเป็นออปแอมป์เบอร์ 741 ซึ่งใช้เป็นตัว converter ของรูป จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดประมาณ นั่นหมายถึงว่า ถ้าอินพุทไบนารี่เริ่มต้นที่ 0 และเป็น 111 เอาท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พุทใช้ 50 s ในการแปลงซึ่งจากการคำนวณดูเหมือนว่าวงจรนี้ให้เอาท์พุทได้เร็ว แต่ถ้าเปรียบเทียบกับวงจรอื่น ๆ ยังจัดว่าช้าพอสมควร

วงจรดังรูปที่ 3-5 จะมีประโยชน์แต่มีข้อเสียหลายอย่างเช่น ในกรณีที่บิตของข้อมูลเพิ่มมากขึ้นค่าของตัวต้านทานจะมากมายหลายค่าตามไปด้วยเช่น กรณี 8 บิต เราต้องใช้ตัวต้านทาน R, 2R, 4R,....128R ค่ามากสุดจะเท่ากับค่าน้อยสุดหรือในกรณี 12 บิต ค่าที่มากที่สุดจะต้องใช้ 2048 ของค่าที่น้อยที่สุดจึงสร้างยากในทางปฏิบัติและยังมีปัญหาที่เกิดจากอุณหภูมิเพราะว่าตัวต้านทานมักมีการเปลี่ยนแปรตามอุณหภูมิ

R-2R แลดเดอร์ DAC (R-2R LADDER D/A CONVERTER)

ทางเลือกของวงจร DAC แบบให้น้ำหนักไบนารี่ก็คือ วงจร R - 2R แลดเดอร์ รูปวงจรโดยแสดงดังรูป จากออปแอมป์ถูกต่อในลักษณะ "นอนอินเวอร์ติ้ง (non inverting)" และจะสามารถเห็นลักษณะของวงจรเป็นรูปบันได (ladder) ตัว ladder ของวงจรนี้จะทำตัวเป็นเสมือนตัวปรับระดับศักดา ศักดาอินพุทของออปแอมป์มีความสัมพันธ์กับแลดเดอร์ (ladder) ดังสมการ

$$Vin = D1\ V_{ref}/2 + D2\ V_{ref}/4 + D3\ V_{ref}/8 + D4\ V_{ref}/16 \qquad (3.5)$$

จากสมการ 3.5 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Vin = V_{ref}\ (D1/2 + D2/4 + D3/8 + D4/16) \qquad (3.5\ a)$$

Dn = 1 เมื่อ ต่อ Vref

= 0 เมื่อ ต่อ GND

อัตราขยายศักดา (voltage gain) ของ นอนอินเวอร์ติ้งออปแอมป์จะใช้สมการ

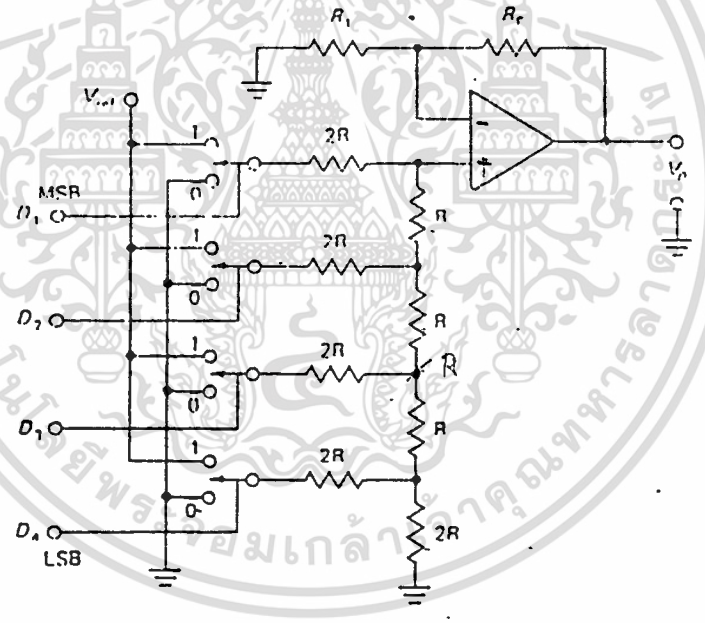
$$Av = 1 + R_F/R_1 = \frac{Vo}{Vin} \qquad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามสมการ 3.5(a) และ 3.6 จะได้ว่า

$$Vo = Av\, V_{ref} (D1/2 + D2/4 + D3/8 + ...) \qquad (3.7)$$

ข้อได้เปรียบของวงจร R -2R แลดเดอร์ก็คือ มีแค่ค่าความต้านทานที่แตกต่างกันเพียง 2 ค่าซึ่งใช้ในอินพุทของออปแอมป์ซึ่งแก้ปัญหาเรื่องความต้านทานหลาย ๆ ค่าและในการสร้างจะสร้างตัวต้านทานทั้งหมดลงบนชิฟเดียวกันจึงทำให้มีคุณสมบัติเหมือนกัน ตลอดจนกรณีที่เพิ่มบิตมากขึ้น วงจรแลดเดอร์สามารถแบ่งกระแสแยกไหลได้แน่นอนกว่าแบบตัวต้านทานให้น้ำหนัก



รูปที่ 3-6 R - 2R แลดเดอร์ DAC

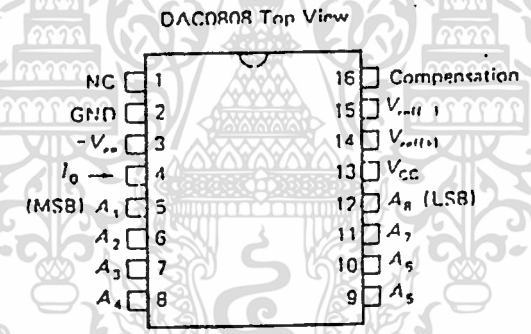
อุปกรณ์ D/A คอนเวอร์เตอร์

วงจรแปลงสัญญาณที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นเป็นวงจรที่มักใช้ในการออกแบบง่าย ๆ แต่ถ้าเราต้องการให้ได้ค่าเรสโซรูชั่น (RESOLUTION) ที่ดีแล้วเราจะต้องพยายามใช้ตัวต้านทาน (R) ให้มีจำนวนน้อย คอนเวอร์เตอร์ แบบ R - 2R 7 บิต เราจำเป็นต้องใช้ตัวต้านทานซึ่งสอดคล้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กันในวงจรแลดเดอร์ถึง 16 ตัว ตัวต้านทานเหล่านี้จะมีราคาแพงและมีขนาดของวงจรใหญ่เราจึงมีวิธีการแก้ปัญหาเหล่านี้ โดยการใช้เทคโนโลยี IC ช่วยในการ match ค่าในเชิงความสัมพันธ์ของค่าตัวต้านทานกับอุณหภูมิและ IC D/A เป็นสามารถใช้แทนวงจรคอนเวอร์เตอร์ได้และมีขนาดเล็กสำหรับที่ว่าบนแผ่นสายวงจรทำให้สะดวกสบายในการออกแบบส่วนอื่นด้วย

ปัจจุบันมีชิพของ D/A อยู่หลายชนิด ในรูปที่ 3-7 เป็นอุปกรณ์ D/A ของบริษัท NS [NATIONAL SEMICONDUCTOR] ชื่อ DAC 0808 ซึ่งชิพตัวนี้เป็นการแบบรับข้อมูลเข้า 7 บิต และมีกระแสเป็นเอาท์พุท กระแสเอาท์พุทก็ขึ้นอยู่กับอินพุทไบนารี่ DAC 0808 เป็นรุ่น 16 - Pin Dip และมีช่วงเวลาเซทลิ่ง (SETTLING) เท่า 150 ms รูปร่างลักษณะของอุปกรณ์แสดงในรูปที่ 3-7



รูปที่ 3.7 แสดงตำแหน่งของขาอุปกรณ์ DAC 0808

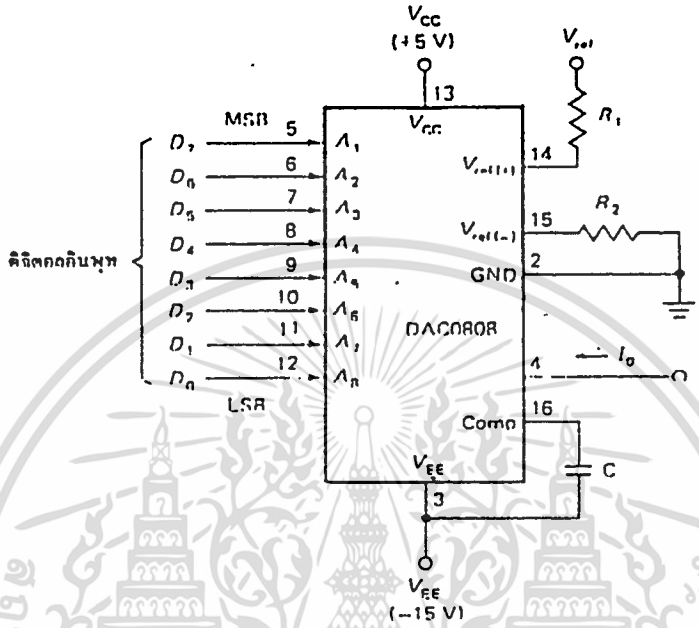
* Dip มาจากคำว่า DUAL INLINE PACKAGE

วงจรที่ใช้งานของไอซีเบอร์ DAC 0808 จะเป็นดังรูปที่ กระแสเอาท์พุทของวงจรนี้สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$-Io = -V_{ref}/R_1 \, (D7/2 + D6/4 + D5/8 + ...D0/256) \qquad (3.8)$$

ซึ่ง Dn = 1 หรือ 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 เป็นวงจรที่ใช้งานทั่วไป ของ DAC

ลองย้อนมาพิจารณาที่ตัว D ปกติแล้วอินพุทของวงจรนี้มาจาก DATA BUS ของ ซีพียู และแรงดันอ้างอิงลบ (Vref (-)) จะต่อกับตัวต้านทานลงกราวน์ด ตัวต้านทานนี้ก็คือ R2 ซึ่งจะเท่ากับ R1 ตัวต้านทานนี้มักใช้ในการแก้ไข ออฟเซต (off error) ที่ขา 16 เป็นขา compensation มักต่อเชื่อมกับ VEE ผ่านค่าตัวเก็บประจุ (capacitor) ค่าต่ำประมาณ 0.001 F ค่าตัวเก็บประจุจะช่วยในการป้องกันการ Overshoot และสัญญาณย้อยที่เอาท์พุทของคอนเวอร์เตอร์จะสังเกตุได้ว่าค่าระดับกระแสลบ รูปวงจรด้านบนนั้นไม่ค่อยมีปัญหาในการใช้งานและบ่อยครั้งที่ใช้งานได้สะดวก

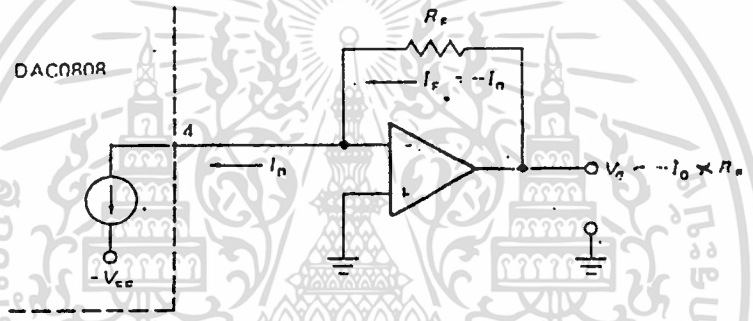
ตามปกติแล้วเรามักนิยมให้เอาท์พุทของคอนเวอร์เตอร์อยู่ในลักษณะของศักดามากกว่าอยู่ในลักษณะของกระแสเป็นเรื่องที่ง่ายมากโดยเราทำการต่อออปแอมป์ เพิ่มที่ขา Io ดังรูปที่เราสามารถจะได้ศักดาเอาท์พุทออกมา ดังสมการ

$$Vo = -Io\ R_f \qquad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องมาจากว่า Io เป็นกระแสลบ Vo ที่เราต้องการเป็นศักดาบวกและเนื่องจาก Io เป็นอัตราส่วนกับอินพุทเพราะฉนั้น -Vo ซึ่งเป็นอัตราส่วนกับอินพุทเช่นเดียวกัน วงจรแบบสมบูรณ์โดยใช้ DAC 0808 และ I/V คอนเวอร์เตอร์ได้แสดงดังรูปที่ 5-10 เราจะได้สมการหา Vo โดยการเชื่อมสมการที่ 5.8 และสมการที่ 5.9 เข้าด้วยกันจะได้

$$-Vo = V_{ref} R_f / R_1 (D7/2 + D6/4 + D5/8 + ...D0/256) \qquad (5.10)$$



รูปที่ 3-9 การใช้ออปแอมป์เป็นตัวแปลงจากกระแสเป็นศักดาที่เอาท์พุทของ 0808

วงจรดังรูปที่ 5-10 มีค่าต่างๆ ดังนี้ : Vref = 5V, R1 = 5KΩ ออกแบบตัวแปลงกระแสเป็นศักดาซึ่งให้ Vo = 5V สำหรับไบนารี่อินพุท 1000 0000 (12810)

ค่าของ RF เป็นค่าเดียวที่ต้องพิจารณาเพราะทุกค่าจะทราบหมดโดยเราคำนวณหา Io จาก DAC 0808 โดยใช้สมการ 5.10

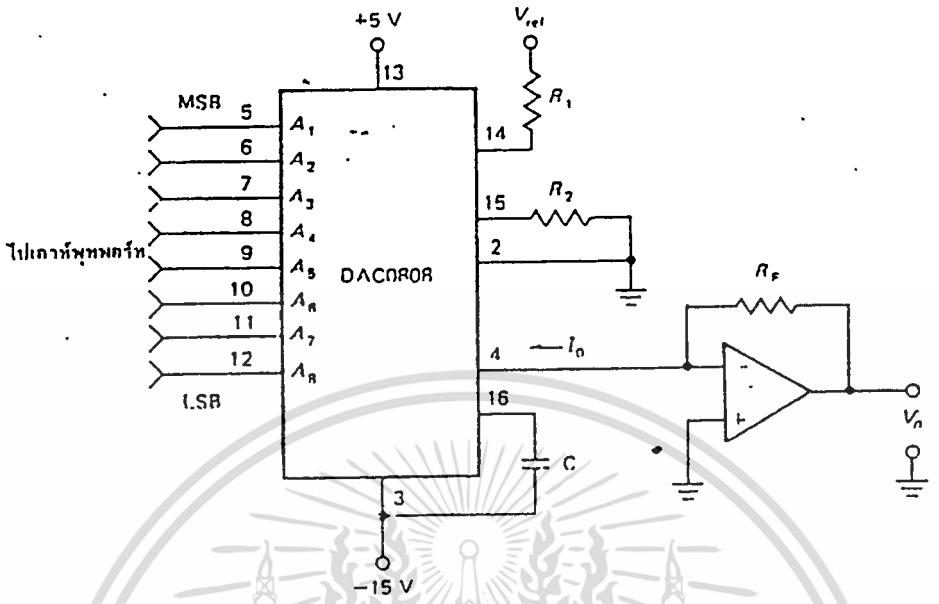
$$Io = -V_{ref} / R_1 (D7/2)$$

$$= -0.5 \text{ mA}$$

เนื่องจาก $Vo = -R_f/Io$

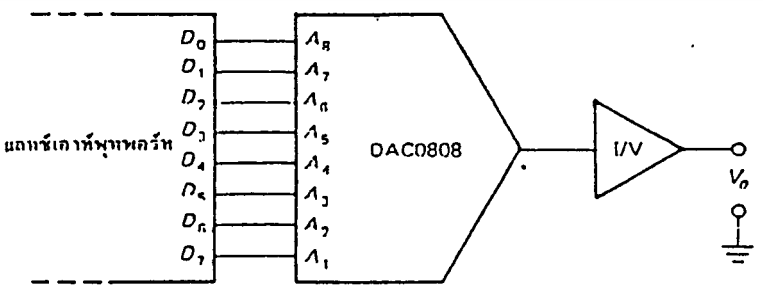
จะได้ $Rf = Vo/Io = 10 K\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-10 วงจรสมบูณ์ D/A ซึ่งจะให้เอาท์พุทเป็นศักคาไฟฟ้า

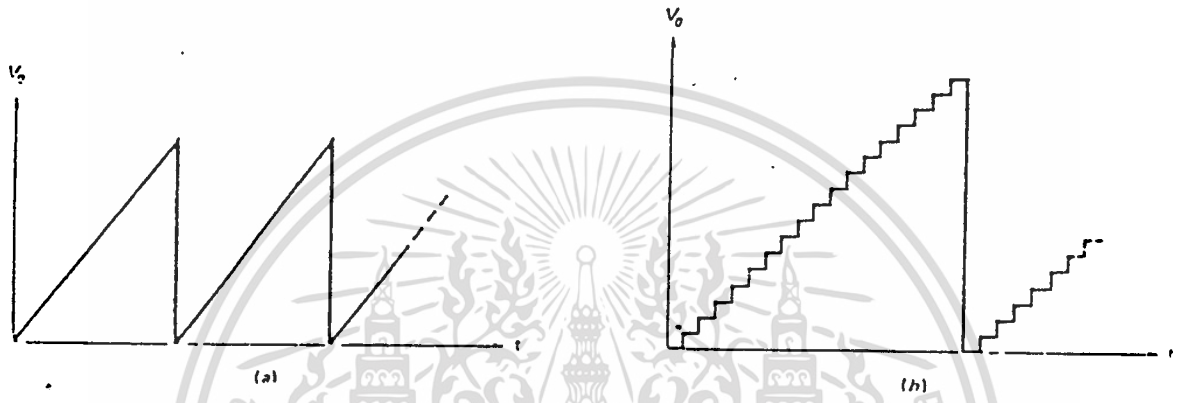
การประยุกต์ใช้งานของ DAC 0808 มักใช้ในการควบคุมการสร้างรูปคลื่น (waveform) ด้วยคอมพิวเตอร์ ในรูปที่ 3-11 แสดงถึงบล็อกไดอะแกรมซึ่งแทนด้วนส่วนที่จะใช้ในการสร้างรูปคลื่น D/A คอนเวอร์เตอร์จะถูกขับจากแลทช์เอาท์พุทพอร์ท (latch output port) เราก็จะโปรแกรมภาษาแอสแซมบลี้ให้ส่งค่าไปที่เอาท์พุทในรูปของบิตเพื่อสร้างรูปคลื่น ถ้าต้องการได้รูปคลื่นเป็นฟันเลื่อยเราจะโปรแกรมโดยการเพิ่มค่าตัวแอคคิวมูเลเตอร์ (AL ใน 0808) และส่งแถวของเอาท์พุทไปที่พอร์ทเพื่อเป็นอินพุทให้กับ DAC เอาท์พุทควรจะได้ออกมาดังรูปที่ 5-12 (a) เนื่องจากมีถึง 255 step ในการกระเพื่อมแต่ละครั้งรูปคลื่นที่ได้จึงคล้ายกับสัญญาณอนาลอกมาก ความถี่ของสัญญาณที่ได้ออกมาจะขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่ ซีพียู ใชในการทำคำสั่งเพิ่มและเอาท์ (OUT) ซึ่งจะมีการวนลูป 255 ครั้งต่อหนึ่งลูกคลื่น



รูปที่ 3-11 การต่อ DAC กับ OUTPUT

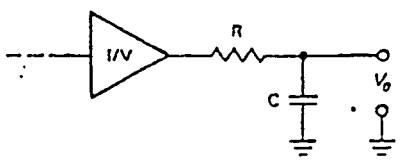
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าต้องการที่จะเพิ่มความถี่ของ wave form แล้วสามารถทำได้ เช่น ให้การเพิ่มค่าของแอกคิวมูเลเตอร์เป็นครั้งละ 15 จะทำงานเพียง 17 ลูปต่อหนึ่งลูกคลื่นจะได้เอาท์พุทในรูปที่ 5-12 (b) ลองเปรียบเทียบกับรูปที่ 5-12 (a) ซึ่งทำงาน 255 ลูปแล้วปนะมาณว่าเป็นเส้นตรง



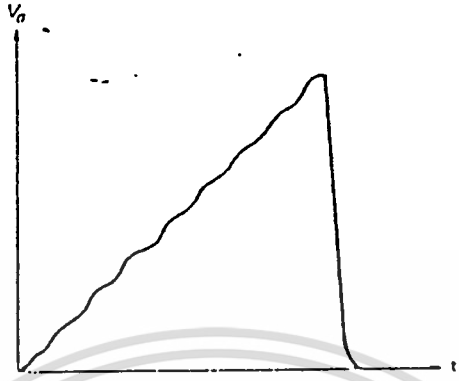
รูปที่ 3-12 a) รูปคลื่นฟันเลื่อย (SAWTOOTH) ในอุดมคติ
b) รูปการประมาณค่าโดย D/A คอนเวอร์เตอร์

เนื่องจากการสร้าง waveform สัญญาณดิจิตอลนี้จะทำให้สัญญาณเอาท์พุทจะมีหลายฮาร์โมนิคซึ่งเป็นตัวที่เราไม่ต้องการและเนื่องจากฮาร์โมนิคพวกนี้เกิดมาจากความถี่สูงเราสามารถกำจัดฮาร์โมนิคโดยการผ่าน LOW - PASS ฟิลเตอร์ ดังรูป 3-13 ความถี่สูงๆ จะถูกผ่านลงกราวน์โดยตัวเก็บประจุจะเหลือแค่สัญญาณความถี่ต่ำที่ Vo ถ้านำเอา waveform รูป 5-12 (b) จะได้ผลของสัญญาณ Vo ดังรูปที่ 3-14



รูปที่ 3-13 วงจรของความถี่ต่ำให้ผ่านได้ของ D/A คอนเวอร์เตอร์

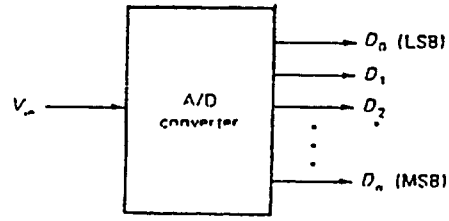
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-14 ผลลัพธ์หลังจากผ่านฟิลเตอร์แล้ว

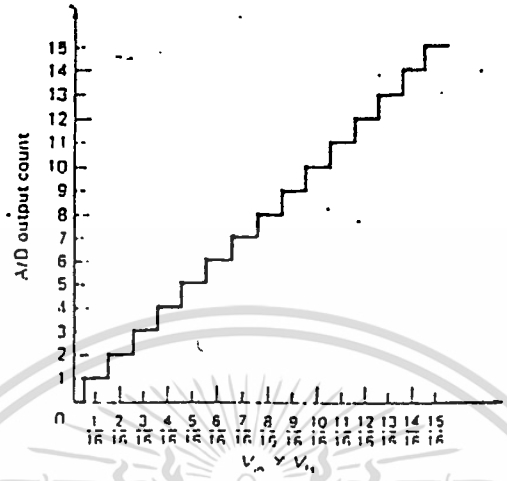
การแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิตอล

ปกติแล้วคอมพิวเตอร์ก็จะมีการติดต่อกับอุปกรณ์ทางอนาลอกจึงจำเป็นที่จะต้องการรับสัญญาณหรือข้อมูลเข้ามาเพื่อที่จะประมวลผลต่อไป เช่น ในระบบนำวิถีจรวด ตัวคอมพิวเตอร์จะรับสัญญาณจากตัวทรานดิวเซอร์แบบอินฟาเรดและตัวทรานดิวเซอร์จะแสดงผลของความเร็วและตำแหน่งอื่น ๆ เพื่อให้คอมพิวเตอร์ไปประมวลผลกลับมาควบคุมการยิงและตำแหน่งการบินของจรวดพูดง่าย ๆ ว่าสัญญาณของทรานดิวเซอร์ (transducer) เป็นสัญญาณอนาลอกตัว A/D คอนเวอร์เตอร์นั้นก็คือ ตัวเปลี่ยนสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล รูปที่ 3-15 แสดงบล็อกไดอะแกรมของ A/D คอนเวอร์เตอร์ วงจรนี้จะผลิตเอาท์พุทแบบไบนารี่ N บิต ซึ่งจะเป็นอัตราส่วนกับแรงดันอินพุท จากกราฟรูปที่ 3-16 ซึ่งแสดงถึงคุณสมบัติของ A/D คอนเวอร์เตอร์แบบ 4 บิต จะเห็นว่าคล้ายคลึงกันมากกับรูปที่ 3-2 หลังจากนี้ไปเราจะมาพิจารณาถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติของ A/D คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3-15 สัญลักษณ์ของ A/D คอนเวอร์เตอร์

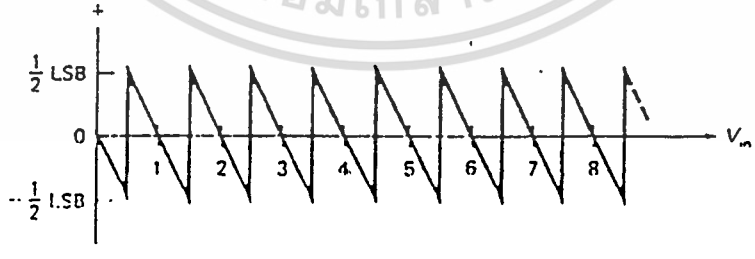
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-16 คุณสมบัติของ A/D คอนเวอร์เตอร์แบบ 4 บิต

หลักการของ A/D คอนเวอร์เตอร์

กุญแจสำคัญที่เราใช้ในการพิจารณาคุณสมบัติของการเปลี่ยนแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิตอลนั้นสามารถสังเกตุได้จากรูปที่ 3-16 ในกรณีของการแปลงสัญญาณจากดิจิตอลเป็นอนาลอกนั้นตัวที่กำหนดความถูกต้องก็คือ จำนวนบิตในกรณีของการแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิตอลก็เช่นเดียวกันจากรูปที่ 3-16 จะเห็นว่า จำนวนขั้นบันได (stair - step) ทั้งหมดมี 16 ขั้น เอาท์พุทของ A/D คอนเวอร์เตอร์นั้นจะถูกประมาณว่าเป็นสัญญาณอินพุทแบบดิจิตอล กราฟแสดงข้อผิดพลาดในเอาท์พุทที่จุดต่าง ๆ ดูได้จากรูปที่ 3-17



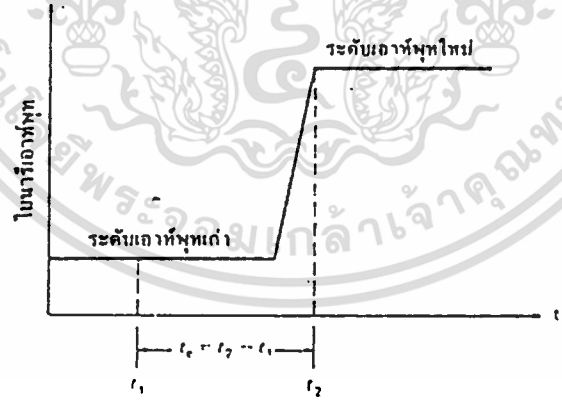
รูปที่ 3-17 ข้อผิดพลาดของ A/D คอนเวอร์เตอร์

ในกรณีของตัวแปลงที่มีเรสโซลูชั่นสูง ๆ (อินพุทบิตมาก) ความกว้างสูงสุดของข้อผิดพลาดจะลดลงตามบทฤษฎีแล้ว ถ้าเป็น A/D คอนเวอร์เตอร์ในอุดมคติจะต้องมีเอาท์พุท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากจนนับไม่ได้ (ถึง ∞) ดังนั้นจะมีค่าเรสโซลูชั่นถึง ∞ จะทำให้กราฟรูปที่ 3-17 แกน ตั้งเป็น 0 แต่ไม่มีทางเกิดขึ้นได้ในทางปฏิบัติข้อผิดพลาดที่เกิดจากมีเรสโซลูชั่นที่จำกัดเรียกว่า ข้อผิดพลาด ควอนไตร์ (quantizing error) ข้อผิดพลาดชนิดนี้ไม่สามารถจำกัดได้

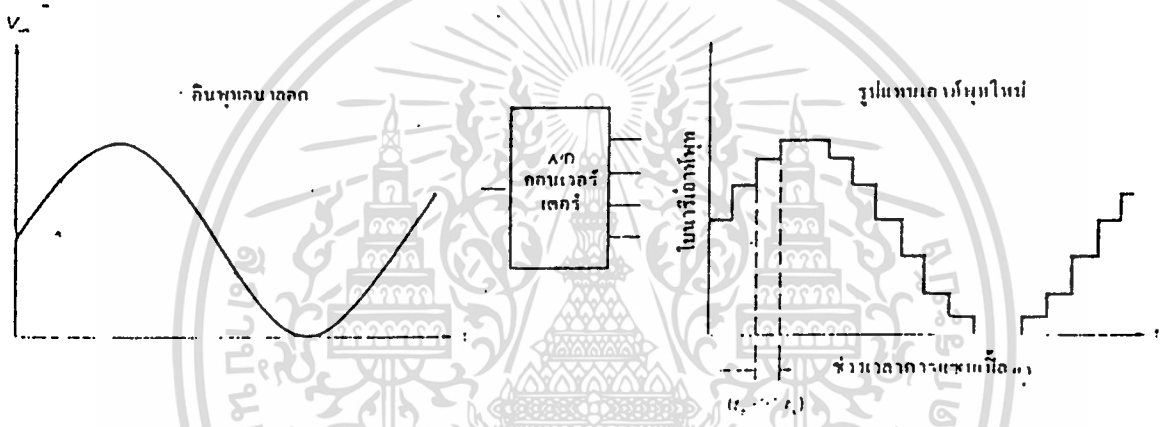
เอาท์พุทของ A/D คอนเวอร์เวอร์ ก็คือ ระดับอินพุทซึ่งจะคงที่ในเวลาหนึ่ง สิ่งนี้ชี้ให้เห็นว่า A/D คอนเวอร์เตอร์ ทำงานโดยการแซมเปิ้ลปริมาณของสัญญาณอนาลอกและต้องแน่ใจว่าสัญญาณจะคงที่ ณ ช่วงเวลานั้น เราจึงต้องมีวงจรสำหรับค้างค่า (hold) ของสัญญาณ จึงทำให้เรานิยมใช้วงจรแซมเปิ้ล และโฮลด์ (sample and hold) เพื่อแน่ใจว่าปริมาณของอินพุทจะไปเปลี่ยนขณะที่กำลังทำการแปลงสัญญาณ เวลาในการแปลงสัญญาณและอัตราการแซมเปิ้ล (sample) เป็นปัจจัยในการพิจารณาอย่างมาก เวลาในการแปลงสัญญาณ (conversion time) t_c คือเวลาที่ช้าไประหว่างที่อินพุทเข้ามาจนถึงการแสดงค่าของไบนารีเอาท์พุท ในกรณีที่เอาท์พุทจะเริ่มต้นเปลี่ยนจาก 0 ไปถึงค่าที่มากสุด ในรูปที่ 3-18 เป็นตัวอย่างของเวลาหน่วย (time delay)



รูปที่ 3-18 แสดงการตอบสนองของเวลาแปลงสัญญาณ (conversion time) ของ A/D คอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินพุทที่เข้าในคอนเวอร์เตอร์จะอยู่ ณ.เวลา t_1 และสัญญาณตอบสนอง ณ. t_2 ผลต่างของบวกทั้งสองก็คือ เวลาแปลงสัญญาณ t_c เวลาแปลงเป็นอัตราที่มากที่สุดซึ่งสัญญาณถูกแซมเปิ้ลช่วงเวลาของการแซมเปิ้ล เรียกว่า เวลาแซมเปิ้ล (Sample time) อัตราแซมเปิ้ลใช้ช่วงในการบอกเวลาแซมเปิ้ล เพื่อให้ทราบถึงผลของการแซมเปิ้ลบนสัญญาณอินพุทอนาลอกไปเป็นปริมาณดิจิตอล พิจารณาจากรูปกราฟไซน์ดังรูป 3-19

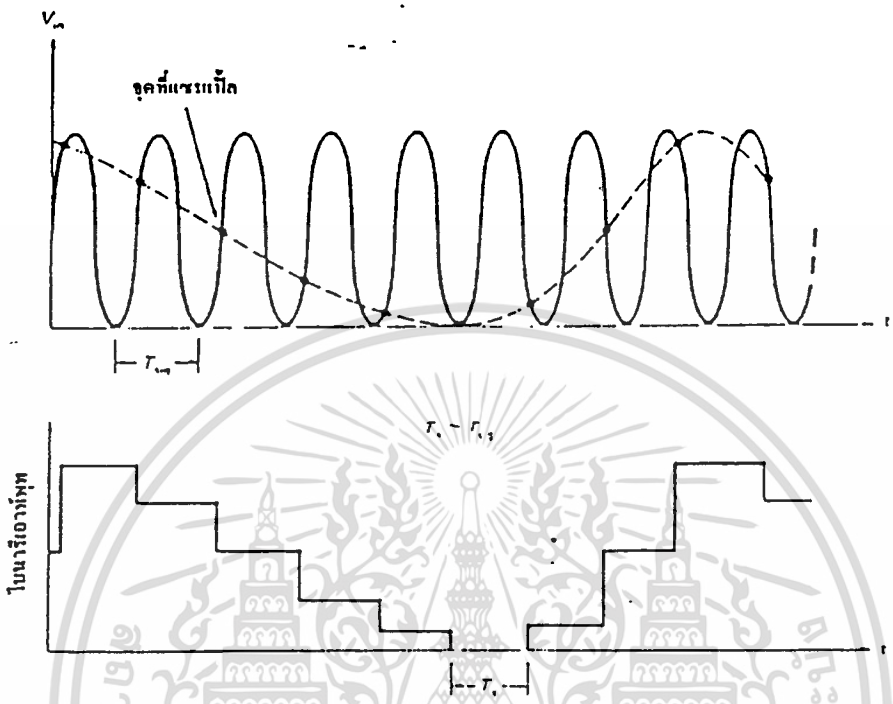


รูปที่ 3-19 ขบวนการแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอลด้วยการ A/D คอนเวอร์เตอร์

ถ้าเราให้เวลาแปลงสัญญาณ (t_c) น้อยมาก ๆ จนตัดทิ้งได้เวลาในการแซมเปิ้ล 1/10 ของสัญญาณอินพุทจะได้กราฟเป็นรูปลักษณะแบบรูป 3-19 ถ้าเราเพิ่มอัตราแซมเปิ้ลและเพิ่มเรสโซลูชั่น (จำนวนเอาท์พุทบิต) ให้มากขึ้นก็จะได้ว่าเอาท์พุทที่ใกล้เคียงกับสัญญาณอนาลอกจากอินพุทมากขึ้น

ถ้าอินพุทเปลี่ยนแปลงระดับอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับอัตราแซมเปิ้ล A/D คอนเวอร์เตอร์ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงสัญญาณได้ถูกต้องและจะเกิดการเพี้ยนของสัญญาณ ปัญหาเช่นนี้สามารถแสดงให้เห็นจากระบบเวลาแซมเปิ้ล (time sample system) เช่น A/D คอนเวอร์เตอร์อัตราความถี่ของการแซมเปิ้ลต้องอย่างน้อย 2 ครั้ง ต่อหนึ่งลูกคลื่นของสัญญาณอินพุท การกำหนดความถี่ในการแซมเปิ้ลแบบนี้ก็คือ ทฤษฎีไนควิสต์แซมเปิ้ล (nygist sampling treorem) รูป 3-20 แสดงผลของการไม่ทำตามกฎของไนควิสต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-20 การเพี้ยนเกิดขึ้นเมื่ออัตราแซมเปิ้ลต่ำเกินไปเมื่อเทียบกับคาบเวลาของสัญญาณอินพุท

เราจะได้เอาท์พุทของ A/D คอนเวอร์เตอร์เป็นรูปเพี้ยน (alias) ในการใช้งานที่มีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอินพุทเร็งๆ เราควรที่จะใช้ในการแซมเปิ้ลแบบความเร็วสูง เพื่อจะให้ความถูกต้องมากในปัจจุบันการควบคุมระบบ (เช่น การนำวิถี) จะใช้การแซมเปิ้ลที่มีอัตราสูง อัตราการแซมเปิ้ลที่มากสุดถูกจำกัดโดยความเร็วในการแปลงสัญญาณของ A/D คอนเวอร์เตอร์ เช่น ถ้าแซมเปิ้ลทุก ๆ 10 ns ก็จะไม่ดีเมื่อความเร็วในการแปลงสัญญาณเป็น 500 ns จะทำให้เอาท์พุทออกมาแบบนำไปใช้งานไม่ได้

อีกจุดหนึ่งที่สำคัญก็คือ ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นของ A/D คอนเวอร์ฌตอร์จะเกิดเป็นข้อผิดพลาดทางออฟเซต (offset) , เกน (gain) และความไม่เป็นเส้นตรง (nonliniarity) ซึ่งมีผลต่อความเที่ยงตรงของการแปลงสัญญาณข้อผิดพลาดพวกนี้จากวงจรที่นำมาสร้างเป็นตัว A/D คอนเวอร์เตอร์ซึ่งกล่าวในเรื่องต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

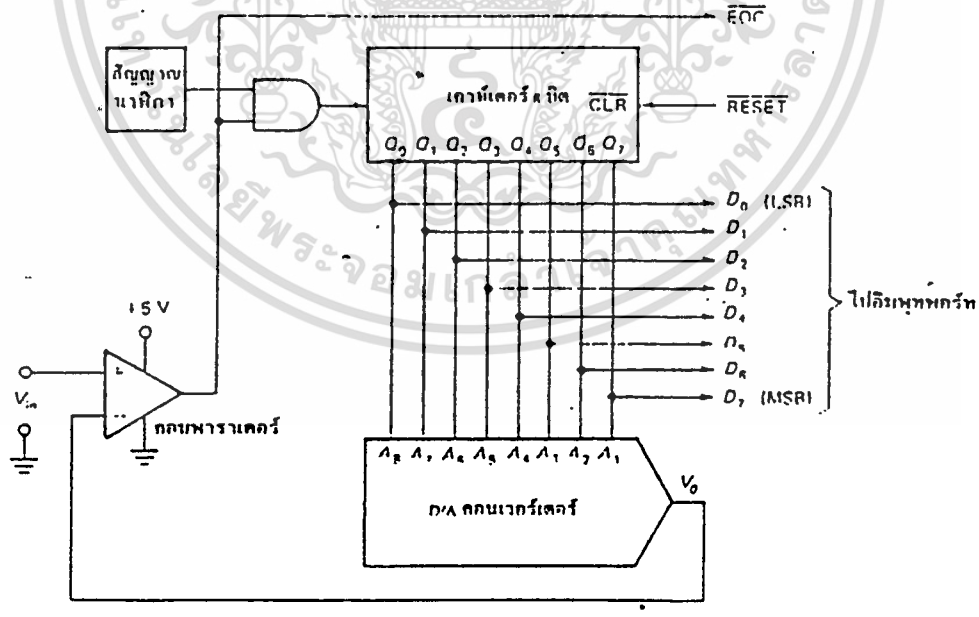
วงจรของ A/D คอนเวอร์เตอร์

ในปัจจุบันมีวิธีการและเทคนิคมากมายเกี่ยวกับการแปลงสัญญาณแต่วิธีการหลัก ๆ ก็จะเป็นพวกที่จะกล่าวถึงต่อไป เช่น แรมท์ A/D คอนเวอร์เตอร์ (RAMP A/D CONVERTER), ซัสเซสทีฟแอปพล็อก ชิเมชั่น A/D คอนเวอร์เตอร์ (SUCCESSIVE APRROXIMATION A/D CONVERTER) และดูออลสโลป A/D คอนเวอร์เตอร์ (DUAL SLOPE A/D CONVERTER) แต่ละชนิดก็มีข้อดีและข้อเสีย

RAMP A/D CONVERTER เป็นวิธีการที่เข้าใจได้ง่ายที่สุด แสดงรูป 3-21 หลักการของวงจรนี้ก็คือ ตัว D/A คอนเวอร์เตอร์

ตัวคอมพาราเตอร์ (COMPARATOR) และ D/A คอนเวอร์เตอร์

นี้คือรูปร่างของ A/D คอนเวอร์เตอร์ การทำงานของวงจรซึ่งมีการควบคุมโดยคอมพิวเตอร์จะอธิบายต่อไป สมมติให้แรงดันบวกไฟตรงเข้าที่อินพุทของคอมพาราเตอร์



รูปที่ 3-21 A/D คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งใช้ตัวไบนารี่เคาท์เตอร์ (BINARY COUNTER)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

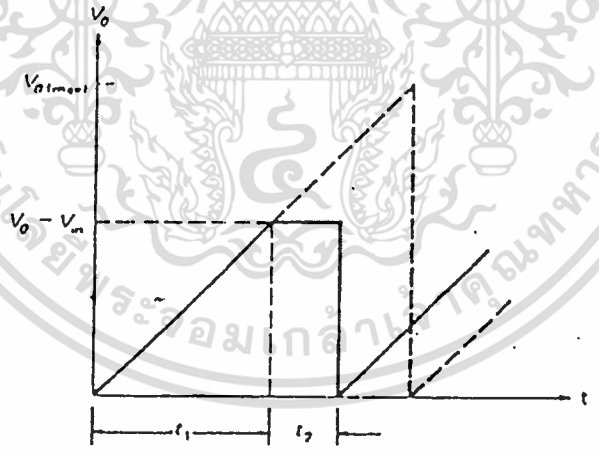
1. คอมพิวเตอร์ส่งสัญญาณรีเซตไปให้เคาท์เตอร์ (COUNTER) ป้อนสัญญาณอินพุท

2. ขณะที่สัญญาณนาฬิกาส่งไปที่เคาท์เตอร์เอาท์พุทของ D/A คอนเวอร์เตอร์ (Vo) จะแสดงระดับแรงดันที่สูงขึ้น ดังรูปที่ 3-2

3. ณ. จุดเดียวกันนั้นตัวเคาท์เตอร์จะนับเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเอาท์พุทของ D/A คอนเวอร์เตอร์เกินค่าของ Vin เมื่อถึงจุดนี้เอาท์พุทของคอมพาราเตอร์จะแสดงค่าไปจนกระทั่งเป็น 0 โวลท์

เมื่อถึง 0 โวลท์ก็จะหยุดนาฬิกา (CLOCK) หยุดการนับที่จุดซึ่ง Vo เพิ่งจะมากกว่า Vin ขา EOC จะลดระดับเป็นระดับต่ำและส่งไปให้คอมพิวเตอร์รู้ว่าขณะนี้ข้อมูลพร้อมที่จะอ่านได้แล้ว ขา EOC ยังสมารถใช้ในการเริ่มต้นอินเตอร์รัพท์ หรือใช้ในการส่งค่าควบคุมไปที่อินพุทพอร์ทแลชท์

4. หลังจากคอมพิวเตอร์อ่านข้อมูลเสร็จคอมพิวเตอร์ก็จะส่งสัญญาณรีเซตมาที่ A/D คอนเวอร์เตอร์หลังจากนั้นก็เริ่มทำกระบวนการแบบเดิมอีกครั้ง



รูปที่ 3-22 กราฟเอาท์พุทของส่วน D/A ของ A/D คอนเวอร์เตอร์

กราฟรูปนี้แสดงการทำงานของแรมป์ A/D คอนเวอร์เตอร์ โดย t_1 แทนเวลาที่ตัวนับใช้เพื่อจะแรมป์ (RAMP) เอาท์พุทของ D/A คอนเวอร์เตอร์ที่เพิ่มจะเลย Vin t_2 แทนเวลาระหว่างที่คอมพิวเตอร์อ่านข้อมูลและส่งสัญญาณรีเซต t_2 ขึ้นอยู่กับซอฟท์แวร์ที่จะควบคุมรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซต เวลาที่ใช้ในการแปลงสัญญาณก็คือ t_1 ถูกกำหนดโดยค่าของ Vin และความถี่ของสัญญาณนาฬิกา ตัวอย่างข้างล่างจะแสดงถึงความสัมพันธ์เหล่านี้

A/D คอนเวอร์เตอร์ ดังรูปที่ 3-21 มี f clock = 50 K HZ D/A คอนเวอร์เตอร์ Vfs = 10 V ถ้า Vin = 6.00 V เวลานานเท่าไรที่วงจรนี้ใช้ในการแปลงสัญญาณ

เนื่องจากเป็น 8 บิต คอนเวอร์เตอร์ และมี V_{fs} = 10 V เราสามารถทำขนาดของขั้นได้โดยใช้สมการ 3.3

$$V_{step} = 10/2^{8}$$

$$= 0.03906 \text{ V}$$

จำนวนของขั้น (N) เกิดจากนำเอาท์พุทของ D/A คอนเวอร์เตอร์ V_{step}

$$N = 6.00/0.03906$$

$$= 153.6$$

เนื่องจากจำนวนขั้นเป็นเศษจึงให้ทำการปัดเศษขึ้นไปเพราะฉนั้นค่า N จึงเท่ากับ 154 เอาท์พุทของ D/A คอนเวอร์เตอร์เพิ่มขึ้น 1 Step (LSB) ต่อสัญญาณนาฬิกาแต่ละลูก คาบเวลาของสัญญาณนาฬิกาหาได้จากความถี่ของสัญญาณนาฬิกา

$$TCLK = 1/_{fclk}$$

$$= 1/50 \text{ K } H_z$$

$$= 20 \ \mu s$$

ขณะนี้เราจะหาเวลาที่ใช้ในการแปลงสัญญาณได้จากการคูณคาบเวลาของสัญญาณนาฬิกากับจำนวนของขั้น

$$b = Tclk \times Step$$

$$= 20\mu s \times 154$$

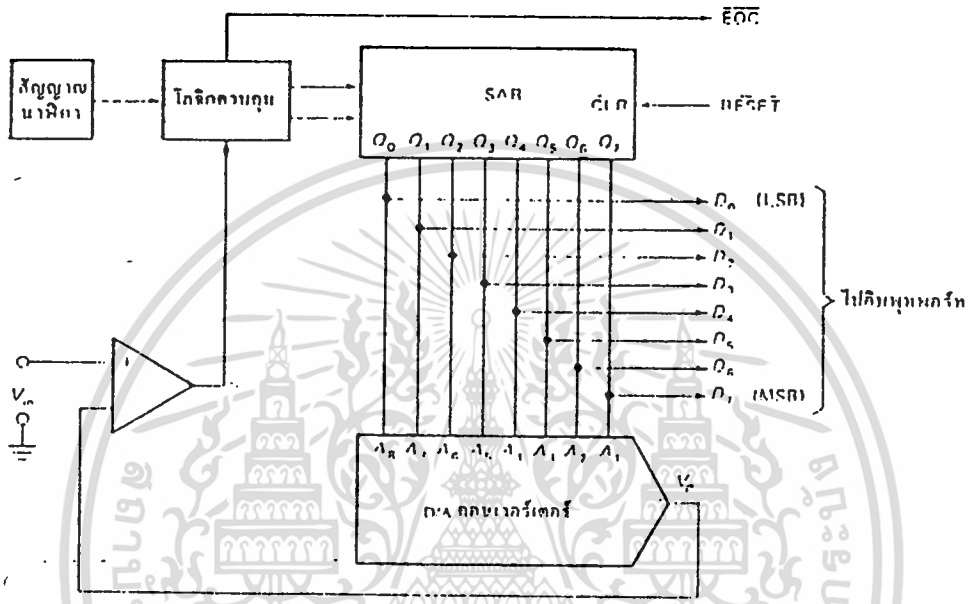
$$= 3.08 \text{ ms}$$

จากตัวอย่างเราจะเห็นว่าถ้าค่า Vin มากขึ้นเวลาในการแปลงสัญญาณก็เพิ่มขึ้น เพราะจะมีคาบเวลาของสัญญาณนาฬิกาเพิ่มขึ้นเวลาที่มากสุดสำหรับการแปลงสัญญาณจะได้ดังสมการ

$$tc\ (max) = TCLK\ (2^{n} - 1) \qquad (3.11)$$

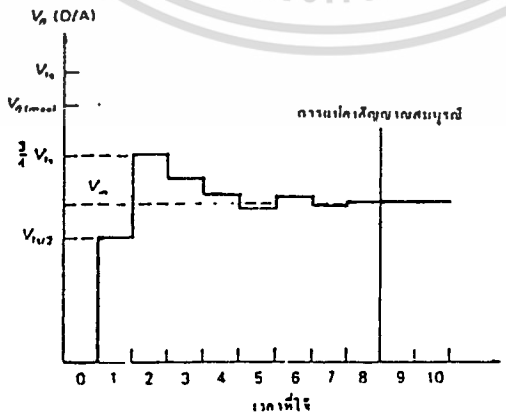
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SUCCESSIVE APPROXIMATION A/D CONVERTER ซักเซสซีฟแอปบล็อกชิเมชั่นรีซิสเตอร์ (SAR) เป็นตัวหลักของ A/D คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งก็ใกล้เคียงกับแบบแรมป์ (RAMP) รูปที่ 3-23 แสดงบล็อกไดอะแกรมสำหรับแบบ SAR A/D คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 3-23 คอนเวอร์เตอร์ซึ่งใช้เทคนิค SAR

ทั้งวิธีการของแรมป์และ SAR แรมป์และ SAR คอนเวอร์เตอร์ต่างก็ใช้ D/A คอนเวอร์เตอร์ และคอมพาราเตอร์ในการทำงานเหมือนกันส่วนที่แตกต่างกันเห็นจะได้แก่ ส่วนเคาท์เตอร์ วิธีการแรมป์ทำงานโดยอาศัยการนับขึ้นในการลำดับไบนารี่จนกระทั่งเกิน Vin การทำงานของ SAR คอนเวอร์เตอร์จะอธิบายต่อไปและจะใช้รูป 3-23 และ 3-24 ในการบรรยาย



รูปที่ 3-24 กราฟของส่วน D/A ระหว่างการแปลงสัญญาณซึ่งใช้ SAR A/D คอนเวอร์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ณ.จุดเริ่มต้นของสัญญาณนาฬิกาส่วนควบคุมโลจิก (CONTROL LOGIC) จะส่งพัลส์หนึ่งลูกให้กับ SAR เพื่อเซตว่าของ MSB และลบล้างค่าเอาท์ที่ยังเหลืออยู่ ซึ่งจะทำให้ค่าของ V0 เท่ากับค่า $V_{ft/2}$ ในรูปที่ 3-24 ซึ่งน้อยกว่าค่า Vin และเอาท์พุทของคอมพาราเตอร์จะยังคงอยู่ในระดับ high ส่วนควบคุมโลจิกจะตรวจสอบว่าตัวคอมพาราเตอร์ยังคงเป็น high อยู่ก็จะส่งสัญญาณไปที่ SAR ซึ่งจะค้างค่าของ MSB เป็นโลจิก 1

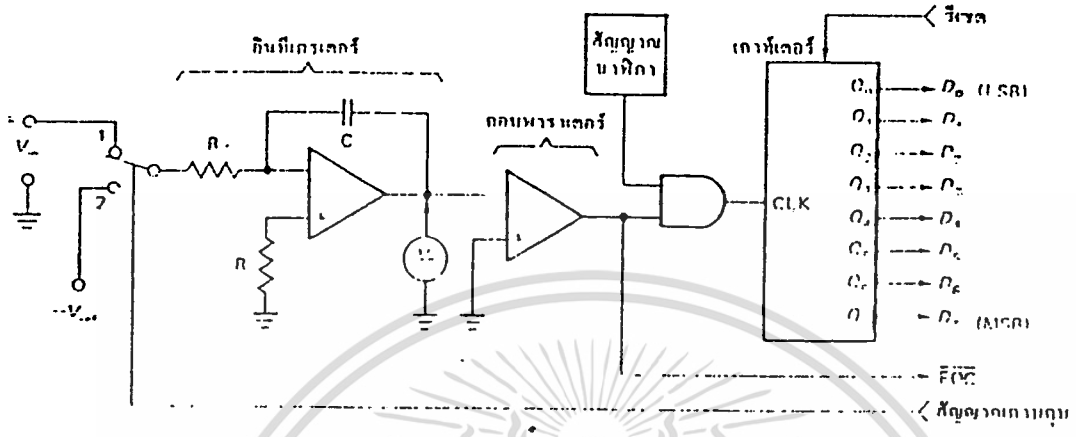
2. เพื่อมีสัญญาณนาฬิกาลูกถัดไป MSB ตัวใหม่จะอยู่ที่ Q6 ของ SAR จะถูกเซตค่าเป็น 1 ดังรูปที่ 3-24 เอาท์พุทของ D/A จะเกินค่าของ Vin จะทำให้ค่าเอาท์พุทของคอมพาราเตอร์เป็นระดับ 10w ส่วนควบคุมโลจิกตรวจสอบทราบก็ไม่ทำการค้างค่า Q6

3. ในสัญญาณนาฬิการของลูกถัดมา Q6 จะถูกเคลียร์และ Q5 จะถูกเซตและอีกครั้งที่เอาท์พุทของคอมพาราเตอร์เป็นระดับ high ส่วนควบคุมโลจิกก็ไม่ทำการค้างค่า Q5 ไว้เพราะค่ายังสูงเกินค่าของ Vin

โดยปกติแล้ววงจรทดสอบเอาท์พุทโดยเริ่มต้นที่ MSB ของ SAR และถ้าเอาท์พุทของ D/A คอนเวอร์เตอร์เกินค่า Vin บิตนั้นก็จะไม่ค้างค่า แต่ถ้าไม่เกินค่า Vin แล้วบิตนั้นจะค้างค่า high ไว้หลังจากตรวจสอบหมดแล้วไบนารี่เอาท์พุทจะเป็นอัตราส่วนกับ Vin จะเห็นข้อได้เปรียบของแบบ SAR กว่าแบบ RAMP คือว่า เวลาในการแปลงสัญญาณเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนบิตของเคาท์เตอร์ แบบ SAR นี้จึงนิยมใช้มากกว่าแบบ RAMP ก็ด้วยเหตุนี้ SAR A/D คอนเวอร์เตอร์ก็มีข้อผิดพลาดแบบเดียวกันกับแบบ RAMP ก็คือ มีข้อพลาดทาง gain , ออฟเซต , และ nonlinearity ซึ่งเกิดขึ้นในส่วน D/A

DUAL SLOPE A/D CONVERTER ทั้งสองวิธีจะใช้ D/A คอนเวอร์เตอร์ช่วยในการออกแบบแต่ยังมีทางเลือกซึ่งใช้กันบ่อยที่เดียวก็คือวิธี DUALSLOPE A/D คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งแสดงดังรูป ส่วนอินอินทีเกรเตอร์ก็คือ หัวใจของวงจรนี้ สมมติว่าตัวเคาท์เตอร์เริ่มต้นในสภาวะรีเซตและตัวอินทีเกรเตอร์ V0 เป็น 0

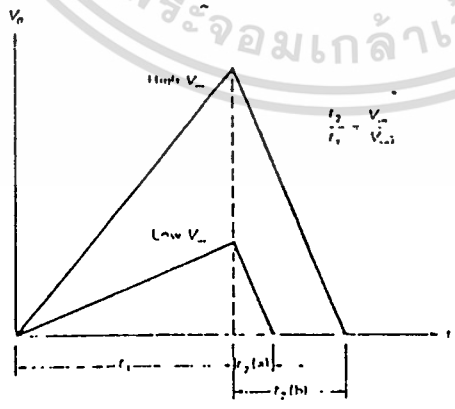
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-25 วงจรอินทีเกรติ้ง A/D คอนเวอร์เตอร์ (DUAL SLOPE)

1. สวิทส์จะตั้งอยู่ในตำแหน่ง 1 เพื่อให้ Vin เข้าไปในอินทีเกรเตอร์ (rin ต้องเป็นบวก) ตัวเก็บประจุเริ่มชาร์จประจุขณะที่ Vo จะปล่อยแรงดันเป็นลบด้วยอัตราคงที่ แรงดันที่เป็นลบของเอาท์พุทอินทีเกรเตอร์จะทำให้เอาท์พุทของคอมพาราเตอร์เป็นระดับ higt ซึ่งจะไป on เกทให้ CLOCK เข้าไปนับเคาน์เตอร์

2. ในทันทีที่เคาน์เตอร์มาถึงก่อนค่าที่กำหนด (ปกติเมื่อเคาน์เตอร์ทำการรีไซเคิล (recycle) ไปที่ 0) สวิทช์จะถูกตั้งไว้ตำแหน่ง 2 เนื่องจากความถี่ของ CLOCK และเวลาแซมเปิ้ลคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 3-26 เป็นการแสดงค่า Vin ที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3-26 เอาท์พุทของอินทีเกรเตอร์ระหว่างการชาร์จและดิสชาร์จ (discharge) ของการแปลง A/D สำหรับแรงดันสูงและแรงดันต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สวิทช์จะค้างอยู่ที่ตำแหน่ง 2 ชั่วขณะหนึ่ง แรงดันอ้างอิงลบจะถูกใช้ในตัวอินทีเกรเตอร์ ทำให้ Vo ไหลกลับไปที่ 0 ระหว่างนั้นตัวเคาน์เตอร์จะถูกเอนเนเบิ้ล (enable) และทำการนับ ซึ่งแสดงได้ดังรูป 3-26

4. เมื่อแรงดันอ้างอิงทำการขับให้เอาท์พุทของอินทีเกรเตอร์กลับไปที่ 0 เอาท์พุทของคอมพาราเตอร์ก็จะกลับไปที่ระดับต่ำและจะดิสเอเบิ้ล (disable) เคาน์เตอร์ เอาท์พุทของคอมพาราเตอร์จะให้เป็นสัญญาณของการแปลง (EOC)

5. ช่วงเวลาที่นับจนถึงค่าที่กำหนดก็คือ t2 ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ Vin

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ Vin, Vref , t1 และ t2 เป็นไปดังสมการ

$$t_2/t_1 = Vin/Vref \qquad (3.12)$$

เนื่องจาก t_1 และ t_2 จะเป็นตัวกำหนดความถี่ของสัญญาณนาฬิกา อัตราส่วนของเวลา t_1 และ t_2 จะแสดงดังสมการ 3.12 และสมการในการแก้ปัญหาของ Vin จะเป็นไปดังสมการ

$$Vin = (Vref \times COUNT\ 2\ ) / COUNT\ 1 \qquad (3.13)$$

A/D คอนเวอร์เตอร์แบบ DuAL SLOPE สามารถให้ความถูกต้องได้มากจึงนิยมใช้ในพวกดิจิตอลโวลท์มิเตอร์แต่ข้อเสียหลักของคอนเวอร์เตอร์แบบนี้ คือ ความช้าในการแปลงสัญญาณถึงแม้ว่าวิธีการนี้จะทำให้เกิดค่าออฟเซต (offset) ที่ต่ำและตัวเก็บประจุมีการรั่วไหลต่ำและมีผลต่ออุณหภูมิน้อยก็ตามวิธีการนี้จะไม่นิยมใช้ในการใช้งานเกี่ยวกับคอมพิวเตอร์เท่ากับวิธีการซักเซสซีฟแอปบล็อกชิเมชั่นคอนเวอร์เตอร์ (SUCCESSIVE APPROXIMATION - CONVERTER)

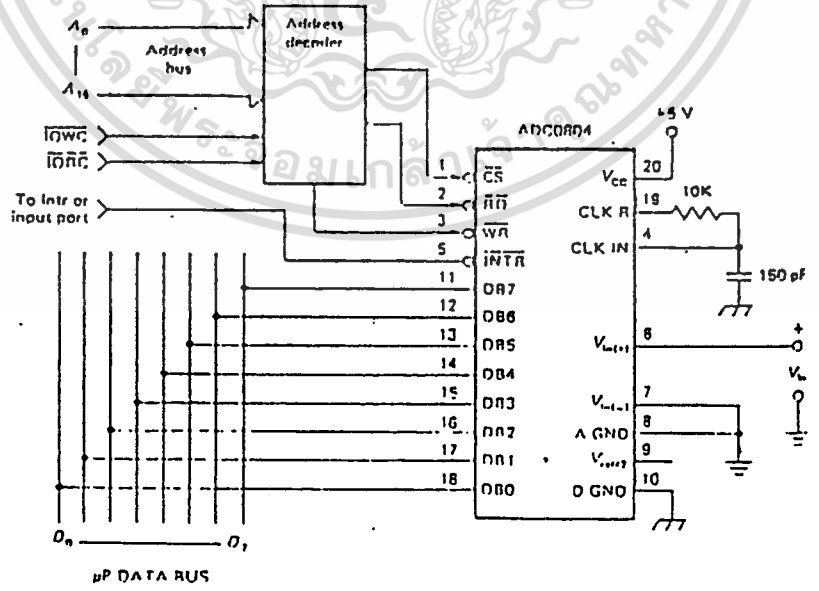
A/D. คอนเวอร์เตอร์แบบมีความเวอร์เตอร์แบบมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงช่วงค่าน้อยของความถี่สัญญาณนาฬิกาพอ ๆ กับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอ้างอิงและค่าของอุปกรณ์ในอินทีเกรเตอร์ เช่น ถ้าความถี่ของ CLOCK แปรเปลี่ยนในช่วงเวลา t_2 เอาท์พุทที่ได้จะผิดพลาดเพราะว่า แรมป์ไทม์ (ramptime) ของอินทีเกรเตอร์ยังคงที่อยู่ขณะอัตราส่วนของเคาท์เตอร์เปลี่ยนแปลงเราต้องการค่าคงที่ของความถี่ CLOCK เพื่อใช้ในสมการที่ ถ้าเป็นการเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปลงช่วงค่าของความถี่สัญญาณนาฬิกาจะไม่มีผลต่อความถูกต้องของคอนเวอร์เตอร์แบบนี้ เช่น ถ้า f(CLK) = 50.00 KH_z คือ ความถี่ปกติแต่ถ้ามีการเปลี่ยนแปลง f(CLK) = 50.10 KH_z (ซึ่งอาจจะมาจากอุณหภูมิ) เราถือว่าไม่มีผลต่อเอาท์พุท เพราะว่าการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่ออัตราส่วนของ ไซเคิล แซมเปิ้ล/คอนเวอร์ชั่น จะน้อยมาก ๆ

A/D คอนเวอร์เตอร์แบบ Dual - slope โดยมากแล้วจะสร้างโดยการใช้ ไฮบริด ไอซี เทคโนโลยี วิธีการ ไฮบริดไอซี (hybrid IC) จะรวมไปถึงอุปกรณ์ชิ้นเดียว เช่น พวกตัวเคาท์เตอร์และพวกออปแอมป์กับอุปกรณ์ประกอบแบบแผ่นหนาและแผ่นบาง เช่น ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ ส่วนประกอบทั้งหมดจะรวมอยู่ใกล้ชิดกันบนซับเสตรท (Substrate) เดียวกัน จึงจะลดปัญหาของอุณหภูมิ ซึ่งค่าของตัวต้านทานจะมีวิธีการหาความถูกต้องโดยใช้เทคนิคการแมท์ชิ่ง (matching) เช่น วิธีการเลเซอร์ ทริมมิ่ง (laser trimming) ข้อเสียของวิธีการไฮบริดไอซีนั้นก็คือ ราคาสูง และ A/D แบบนี้จะใช้ในด้านความเร็วไม่สูงนัก

ไอซี A/D คอนเวอร์เตอร์โดยปกติแล้วเราจะใช้ ไอซี A/D มากกว่าการต่อเป็นวงจร ตัวอย่างของอุปกรณ์ A/D ก็คือ ADC 0804 ของบริษัทเนชั่นเนลเซมิคอนดักเตอร์ ดังรูปที่



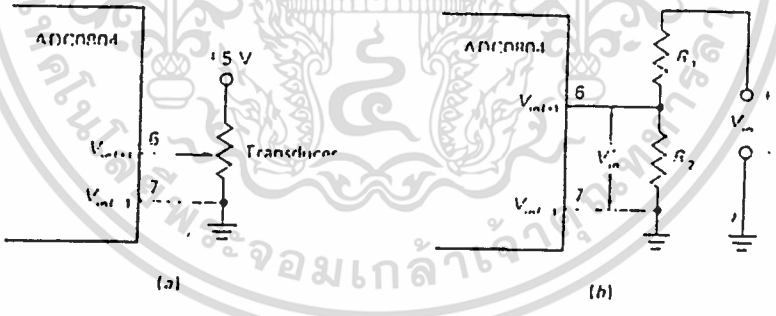
รูปที่ 3-27 การต่อ ADC 0804 กับไมโครคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูป 3-27 จะแสดงถึงการใช้งานของ ไอซี ADC 0804 ซึ่งออกแบบให้ใช้งานในระบบคอมพิวเตอร์ และไมโครโปรเซสเซอร์โดยเฉพาะเนื่องจากมีขา CS (Chip select), RD (Read), WR (Write) และขา INTR (interrupt request) ADC 0804 ใช้ 8 บิต SAR (SUCESSIVE APPROXIMATION REGISTER)

เมื่อทำการแปลงสัญญาณ สัญญาณนาฬิกาจะสามารถตั้งได้จากวงจร RC ภายนอก สังเกตุว่าสายเอาท์พุทจะต่อเข้ากับบัสข้อมูล (data bus) เพราะว่าภายใน ADC มีตัวค้างค่า (latch) แบบสามสภาวะเอาท์พุทของตัว latch จะสามารถสั่งได้เมื่อมีสัญญาณระดับต่ำมาที่ขา CS และขา RD ขา INTR จะเป็นระดับต่ำเมื่อจบการแปลงสัญญาณ

ทรานดิวเซอร์แบบโพเทนทิโอเมตริกซ์ใช้เป็นอินพุทให้ ADC 0804 ดังรูป 3-28 (a) อินพุทที่มากที่สุดก็คือ 5V โพเทนทิโอมิเตอร์ใช้ในการวัดตำแหน่งในระบบเซอร์โว (Servomechanism) ถ้าแรงดันสูงกว่านี้เราจะต่อ R เพิ่มดังรูปที่ (b) สังเกตุว่า ADC 0804 จะมีขากราวน์ 2 ขา A GND ก็คือกราวน์นัดสำหรับสัญญาณอินพุทอนาลอกและ DGND ก็คือ กราวน์ของสัญญาณเอาท์พุทดิจิตอล ซึ่งเป็นการแยกส่วนของอนาลอกและดิจิตอล



รูปที่ 3-28 วิธีการทั้งสองวิธีสำหรับสัญญาณอินพุทของ A/D คอนเวอร์เตอร์

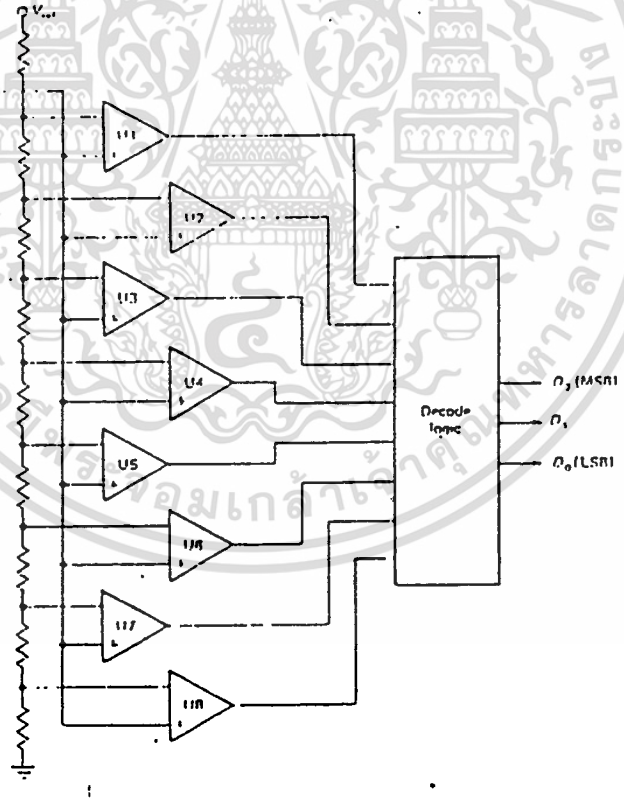
A/D คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน ถ้าเราคำนึงด้านความเร็วในการแปลงสัญญาณเป็นอันดับแรกเราควรจะใช้วิธีการ A/D คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน (บางทีอาจเรียกว่า Flash คอนเวอร์เตอร์) คอนเวอร์เตอร์แบบนี้ไม่ใช่การเรียงลำดับของเอาท์พุทหรือการนับแรมท์ใหม่ของอินทีเกรเตอร์ของอินทีเกรเตอร์ของอินพุทแต่วิธีนี้จะเป็นการป้อนอินพุทพร้อม ๆ กันเข้าไปในกลุ่มของคอมพาราเตอร์ที่ต่อแบบขนานซึ่งแต่ละตัวก็จะทำหน้าที่ของมันในรูปที่ เป็น A/D คอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวอร์เตอร์แบบขนาน 3 บิต แรงดันอ้างอิงจะถูกต่อกับตัวต้านทานแบบอนุกรมซึ่งจะเกิดแรงดันแบ่ง

เรามาพิจารณาตั้งแต่เริ่มต้น สมมติว่า Vin เริ่มต้นที่ 0V เอาท์พุทของคอมพาราเตอร์ทุกตัวจะเป็นโลจิก 0 และ ตัวถอดรหัส (Decoder) จะให้เอาท์พุทเป็น 000_2 ขณะที่ Vin เพิ่มขึ้นคอมพาราเตอร์ตัวแรกที่เริ่มเปลี่ยนสภาวะก็คือ V7 เนื่องจาก V7 มีค่าแรงดันอ้างอิงที่ต่ำสุด การเปลี่ยนสภาวะ

จะถูกถอดรหัสและแสดงเอาท์พุทออกมาเป็นค่า 001_2 ขณะที่ Vin เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ คอมพาราเตอร์ตัวต่าง ๆ ก็จะเริ่มทำงานจนกระทั่ง V1 ทำงาน สังเกตุว่าเมื่อไรก็ตามที่เอาท์พุทของคอมพาราเตอร์ในระดับสูง (high) เอาท์พุทของคอมพิวเตอร์ที่อยู่ต่ำกว่าก็จะเป็นระดับสูงค่าเอาท์พุทโลจิกที่ตอบสนองต่อการเพิ่มของอินพุทจะดูได้จากรูป 3-30



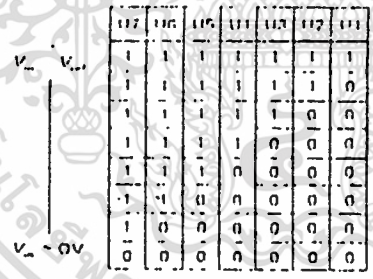
รูปที่ 3-29 วงจร A/D แบบ flash หรือ แบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรนี้ถูกเรียกว่า flash คอนเวอร์เตอร์ เพราะมีความเร็วสูงในการแปลงสัญญาณ ถ้าเราใช้คอมพาราเตอร์และตัวถอดรหัส (decoder) อย่างเร็วอีก เอาท์พุทจะได้ทันทีที่อินพุทเปลี่ยนไปแน่นอนเราต้องมีการเก็บค่าไว้ใช้ เราควรจะใช้ระบบการเก็บที่มีความเร็วมาก ๆ เพื่อเก็บค่าข้อมูลที่ออกมาอย่างรวดเร็ว สังเกตุว่าในวงจรรูป ไม่มี ตัวควบคุมคล็อก (clock control) ซึ่งตัวควบคุมคล็อกใช้ในการติดต่อควบคุมระหว่างเอาท์พุทของ A/D คอนเวอร์เตอร์และวงจรเก็บค่า ข้อเสียเปรียบเทียบของวงจรแบบนี้ก็คือ ต้องใช้จำนวนของคอมพาราเตอร์มาก มายถ้าเราต้องการเรสโซรูชั่นสูง ๆ ซึ่งจำนวนของคอมพาราเตอร์หาได้จากสมการ 3.14 ซึ่ง N คือ จำนวนของคอมพาราเตอร์ n คือ จำนวนบิตเอาท์พุท

$$N = 2^{n} - 1$$

จากสมการ สมมติว่าเราต้องการ 7 บิต เราจะต้องใช้คอมพาราเตอร์ถึง 127 และถ้าเราต้องการ 8 บิต เอาท์พุทเราจะต้องใช้ถึง 255 ตัว



รูปที่ 3-30 ตารางความจริง (Truth - table) ซึ่งอธิบายถึงเอาท์พุทของคอมพาราเตอร์ A/D คอนเวอร์เตอร์แบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

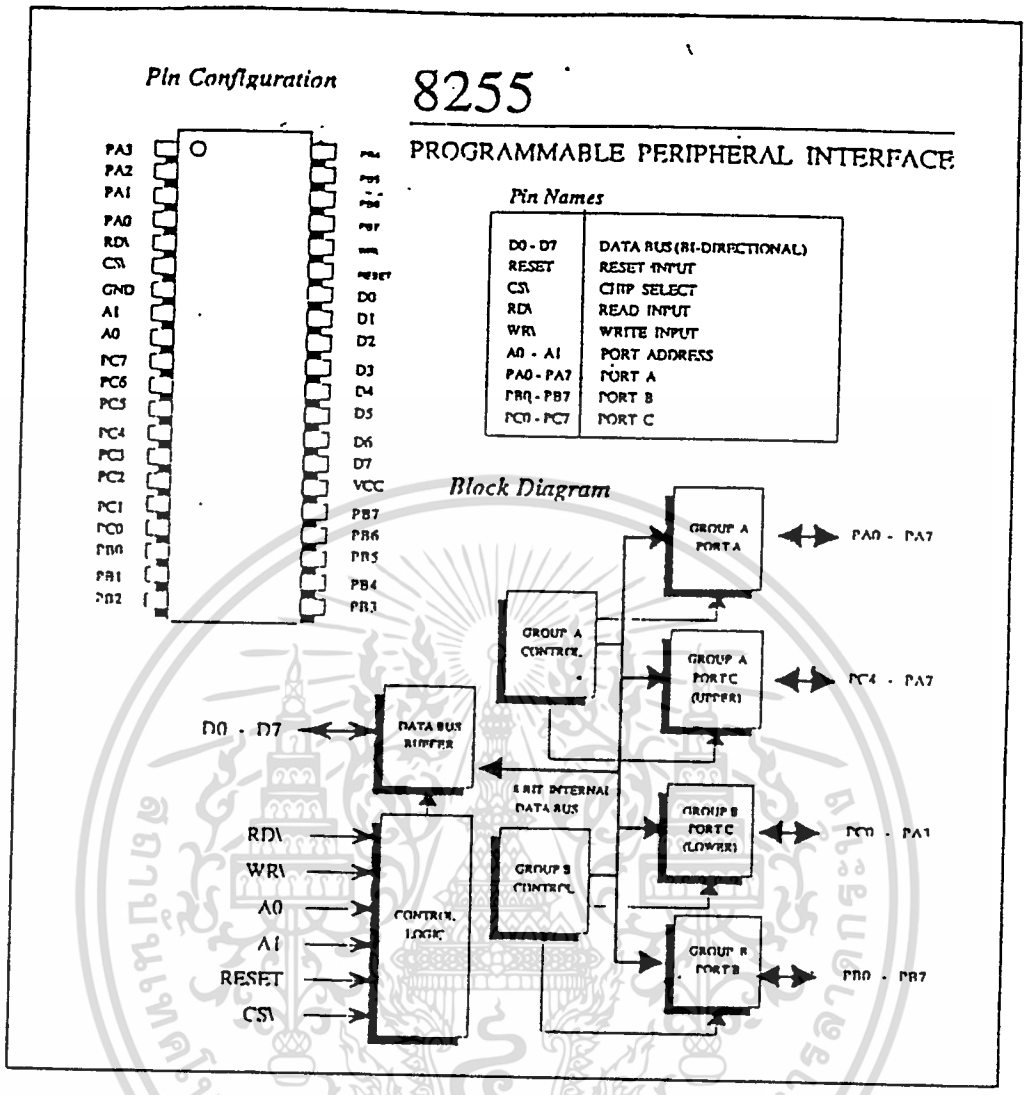
ใช้เชื่อมต่อกับเครื่อง PC เพื่อขยายระบบอินพุทและเอ้าท์พุท ให้ใช้งานได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งสามารถที่จะรับสัญญาณอินพุทและให้สัญญาณเอ้าท์พุทออกมาได้ทั้งในรูปของ Analog และ Digital ทำให้มีความอ่อนตัวในการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งจะมีอุปกรณ์ร่วมและมีจุดเด่น ๆ ดังนี้คือ

ไอซี 8255 (Programmable Pheripheral Interface) จำนวน 1 ตัว ซึ่งสามารถที่จะใช้โปรแกรมให้เป็นได้ทั้งอินพุทและเอ้าท์พุทตามความต้องการของผู้ใช้เองได้ทั้งหมด 3 พอร์ต หรือ 24 บิต I/P ในรูปของสัญญาณ Digital นั้นเอง

- ไอซีเบอร์ 8255 ได้รับการออกแบบมาเพื่อทำหน้าที่เป็นพอร์ต สำหรับการรับ/ส่งข้อมูลแบบขนานระหว่างอุปกรณ์ภายนอกกับไมโครคอมพิวเตอร์ ความอ่อนตัวในการใช้งานของ 8255ได้แก่ การที่สามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะการทำงานของพอร์ต ให้เป็นการเอาท์พุทหรืออินพุทได้สะดวก เพียงการส่งข้อมูลควบคุมจากไมโครคอมพิวเตอร์ก่อนที่จะเริ่มต้นใช้งานเท่านั้น ความสามารถเช่นนี้ เรียกว่า Programmable คือ สามารถโปรแกรมการทำงานได้ ทำให้ได้รับความนิยมนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลาย

จากแผนภาพในรูปที่ 3-31 จะเห็นว่า 8255 ประกอบด้วยบล็อกของหน่วยการทำงานหลายส่วนอยู่ภายในบล็อกทางด้านขวามือจำนวน 4 บล็อก เป็นส่วนที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกโดยตรงผ่านทางเส้นสัญญาณที่ระบุชื่อว่า PA0 - PA7, PB0 - PB7 และ PC0 - PC7 กลุ่มของสัญญาณเหล่านี้จำแนกออกเป็น 3 กลุ่ม คือพอร์ต A (PA) พอร์ต B (PB) และพอร์ต C (PC) สำหรับบล็อกถัดเข้ามาบริเวณส่วนกลางที่มีชื่อเรียกว่า GROUP A CONTROL และ GROUP B CONTROL ทำหน้าที่กำหนดการทำงานของพอร์ตทั้งสาม บล็อกทั้งสองนี้เชื่อมต่อกับบล็อกอื่นๆ ผ่านทางบัสข้อมูลภายใน 8255 เอง สำหรับบล็อกการทำงานทางด้านซ้ายที่มีชื่อว่า Data bus buffer และ read/write control logic ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างระบบบัสของไมโครคอมพิวเตอร์กับ 8255 เพื่อรับหรือส่งข้อมูลระหว่างกันตามระดับลอจิกของขาสัญญาณ RD\ และ WR\ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-31 แผนภาพแบบบล็อกภายในและขาสัญญาณของไอซีเบอร์ 8255

<u>การจำแนกกลุ่มของพอร์ต 8255</u>

ในบรรดาพอร์ตทั้งสามของ 8255 คือ พอร์ต A พอร์ต B และพอร์ต C โดยพื้นฐานนั้น ล้วนเป็นพอร์ตแบบขนานที่ประกอบด้วยสัญญาณ 8 เส้น ซึ่งแต่ละเส้นจะแทนบิตของข้อมูลพอร์ต ซึ่งอาจจะกล่าวในอีกลักษณะว่าเป็นพอร์ตแบบ 8 บิต นอกจากนั้นยังสามารถอ้างถึงแต่ละบิตของเส้นสัญญาณพอร์ตนี้ได้โดยอิสระ อย่างไรก็ตาม 8255 ได้จัดกลุ่มของพอร์ตเหล่านี้ออกเป็นสองกลุ่ม (Group) คือ Group A และ Group B เพื่อประโยชน์ในการกำหนดรูปแบบการทำงานของพอร์ต ดังตารางต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

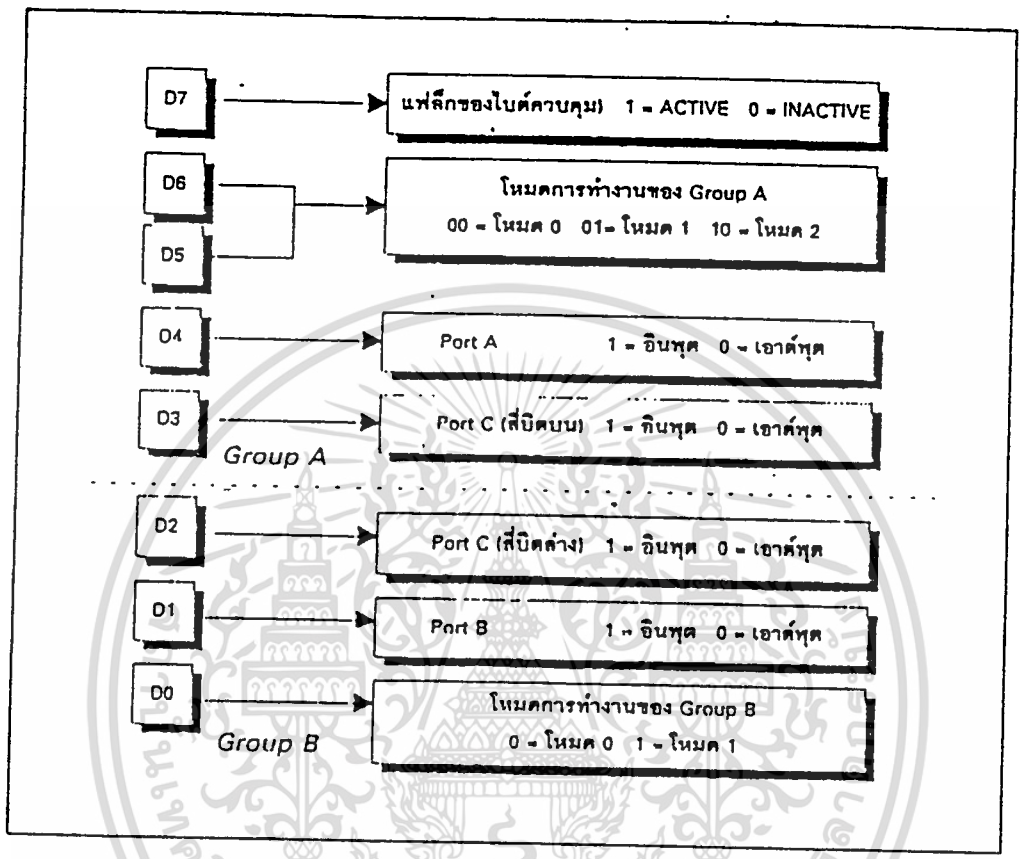
ชื่อกลุ่ม	ลักษณะ
GROUP A	พอร์ต A จำนวน 8 บิต (ทุกบิตของพอร์ต)
	พอร์ต C จำนวน 4 บิต (เฉพาะ 4 บิตบนของพอร์ต)
GROUP B	พอร์ต B จำนวน 8 บิต (ทุกบิตของพอร์ต)
	พอร์ต C จำนวน 4 บิต (เฉพาะ 4 บิตล่างของพอร์ต)

จากตารางการทำงานข้างต้นจะเห็นว่า จำนวนเส้นสัญญาณทั้งหมดของพอร์ต C (PC0 - PC7) ได้ถูกแยกออกเป็นกลุ่ม คือ กลุ่มของ 4 บิตล่าง (Lower nibble) จาก PC0 - PC3 และกลุ่มของ 4 บิตบน (Upper nible) จาก PC4-PC7 ดังนั้น Group A และ Group B ของ 8255 จึงมีจำนวนบิตในแต่ละกลุ่มเป็นจำนวนถึง 12 บิต

สัญญาณ	ความหมาย
D0 - D7	กลุ่มของเส้นสัญญาณข้อมูลของ 8255 เมื่อมีการเขียน หรืออ่าน
CS\	สัญญาณเลือกอุปกรณ์ เมื่อขาสัญญาณนี้เป็นระดับลอจิกต่ำ ซีพียูก็สามารถ เขียนหรืออ่านข้อมูลจาก 8255 ได้
RD\	สัญญาณบอกสถานะต้องการอ่านข้อมูลจากรีจิสเตอร์ของ 8255
WR\	สัญญาณบอกสถานะต้องการเขียนข้อมูลให้กับรีจิสเตอร์ของ 8255
A0 - A1	สัญญาณระบุตำแหน่งรีจิสเตอร์ภายใน 8255 ที่ต้องการ
RESET	สัญญาณการรีเซตวงจรทำงานภายใน 8255 เพื่อเริ่มต้นใหม่
PA0 - PA7	กลุ่มของสัญญาณ 8 เส้น เมื่อทำการติดต่อกับพอร์ต A ของ 8255
PB0 - PB7	กลุ่มของสัญญาณ 8 เส้น เมื่อทำการติดต่อกับพอร์ต B ของ 8255
PC0 - PC7	กลุ่มของสัญญาณ 8 เส้น เมื่อทำการติดต่อกับพอร์ต C ของ 8255

รูปที่ 3-32 หน้าที่การทำงานของขาสัญญาณไอซี 8255

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-33 ความหมายของบิตภายในไบต์ข้อมูลควบคุมสำหรับ 8255

<u>รูปแบบคำสั่งเพื่อกำหนดการทำงานของ 8255</u>

การกำหนดให้พอร์ตทั้งสามของ 8255 ทำงานในลักษณะต่างๆ กันหรือที่เรียกว่าโหมดการทำงาน (Mode) จะเริ่มต้นด้วยการส่งค่าข้อมูลไบต์หนึ่งให้กับรีสจิสเตอร์ควบคุมการทำงานภายใน 8255 ข้อมูลนี้จะเรียกว่าไบต์ข้อมูลควบคุม (control Word) โดยแต่ละบิตของข้อมูลนี้จะมีความหมายที่ระบุถึงความต้องการต่างๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3-33 การส่งข้อมูลไบต์นี้จะต้องเริ่มต้นเป็นลำดับแรกก่อนจะได้มีกำรดำเนินการใดกับ 8255 ทั้งสิ้น

ตามความหมายของบิตภายในตารางของรูปที่ 3-33 จะเห็นว่าการเลือกให้พอร์ตใดทำหน้าที่เป็นพอร์ตอินพุทเพียงแค่กำหนดค่าข้อมูล 1 ให้กับบิตที่เกี่ยวข้องกับบิตนั้น หรือกรณีตรงข้ามสำหรับการเอ้าท์พุทก็เพียงการกำหนดค่าข้อมูล 0 เท่านั้น อย่างไรก็ตามการกำหนดให้ไบต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลควบคุมนี้มีผลอย่างถูกต้อง ก็จะต้องทำงานกำหนดให้บิต D7 มีค่าเป็น 1 เสมอ สำหรับบิตที่บอกถึงโหมดการทำงาน (บิท D6 - D5 และ D2) นั้นจะได้กล่าวรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

การเชื่อมต่อ 8255 กับ สล็อท IBM/PC

เมื่อพิจารณาแผนภาพของ 8255 จะเห็นว่ามีขาสัญญาณแอดเดรสจำนวน 2 เส้น คือ A0 และ A1 ทำให้ตำแหน่งของแอดเดรสที่จะอ้างถึงได้มีค่าเป็น 2^2 หรือเท่ากับ 4 ตำแหน่ง ซึ่งแต่ละตำแหน่งจะมีความหมายถึงการระบุรีจิสเตอร์หรือพอร์ตภายใน 8255 ดังตารางต่อไปนี้

A1	A2	ชื่อของรีจิสเตอร์
0	0	พอร์ต A
0	1	พอร์ต B
1	0	พอร์ต C
1	1	รีจิสเตอร์ควบคุม

เมื่อพิจารณาค่าของแอดเดรสเหล่านี้ร่วมกับระดับลอจิกของขาสัญญาณ RD\ และ WR\ จะเป็นการอ่านหรือเขียนข้อมูลทางขาสัญญาณ D0 - D7 ให้กับรีจิสเตอร์นั้นตามลำดับดังตารางต่อไปนี้

RD\	WR\	A1	A0	ความหมาย
0	1	0	0	ส่ง (หรือเขียน) ข้อมูลให้กับพอร์ต A
1	0	0	0	รับ (หรืออ่าน) ข้อมูลจากพอร์ต A
0	1	0	1	ส่ง (หรือเขียน) ข้อมูลให้กับพอร์ต B
1	0	0	1	รับ (หรืออ่าน) ข้อมูลจากพอร์ต B
0	1	1	0	ส่ง (หรือเขียน) ข้อมูลให้กับพอร์ต C
1	0	1	0	รับ (หรืออ่าน) ข้อมูลจากพอร์ต C
0	1	1	1	ส่ง (หรือเขียน) ข้อมูลให้กับรีจิสเตอร์ควบคุม
1	0	1	1	เป็นสภาวะที่ไม่ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

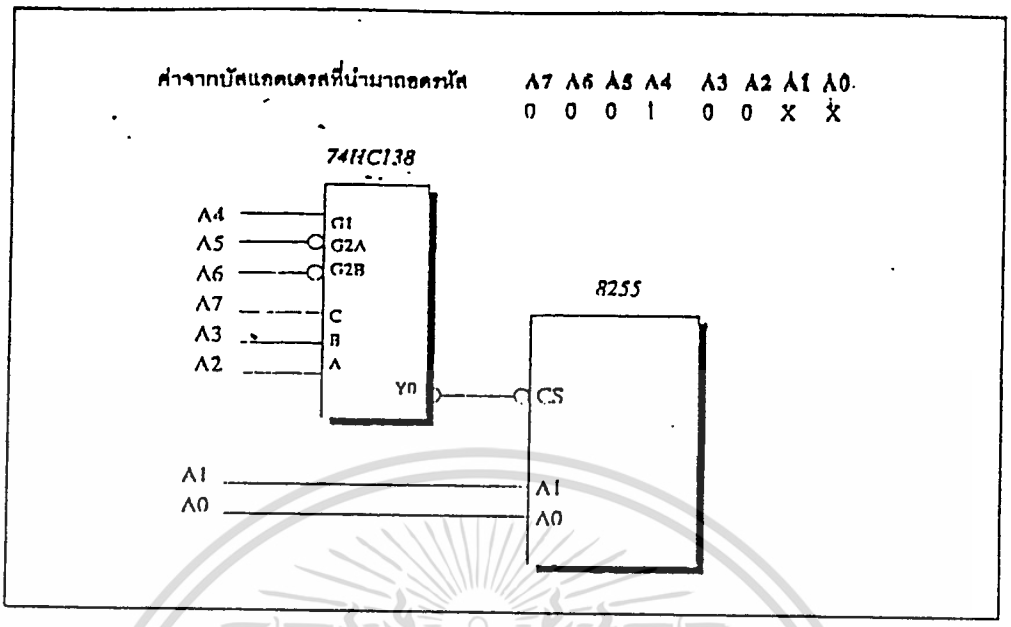
ดังนั้นโดยทั่วไปจึงมักจะกำหนดแอดเดรสของ 8255 ทั้งสี่ตำแหน่งนี้ อยู่ในแอดเดรสช่วงใดช่วงหนึ่งของระบบ เช่น 10h,--11h, 12h, และ 13h โดยขาสัญญาณแอดเดรสที่นอกเหนือไปจาก A0 - A1 นำมาเข้ายังตัวถอดรหัสแอดเดรส เพื่อสร้างสัญญาณเลือกอุปกรณ์ (CS\) ในช่วงแอดเดรสที่ต้องการ ขอให้ดูตัวอย่างวงจรในรูปที่ 3.34 สัญญาณ CS\ นี้จะเป็นสภาวะลอจิกต่ำก็ต่อเมื่อค่าในบัสแอดเดรส A2 - A7 มีค่าเท่ากับ 0000100xx (ตัวอักษร xx ใช้เพื่อระบุถึงรีจิสเตอร์ภายใน 8255 เพื่อทำการอ่านหรือเขียนข้อมูล) ดังนั้นจากวงจรนี้แอดเดรสของรีจิสเตอร์ภายใน 8255 จะมีค่าตามตารางต่อไปนี้

ตำแหน่งแอดเดรส	ความหมาย
10h	พอร์ต A
11h	พอร์ต B
12h	พอร์ต C
13h	รีจิสเตอร์ควบคุม

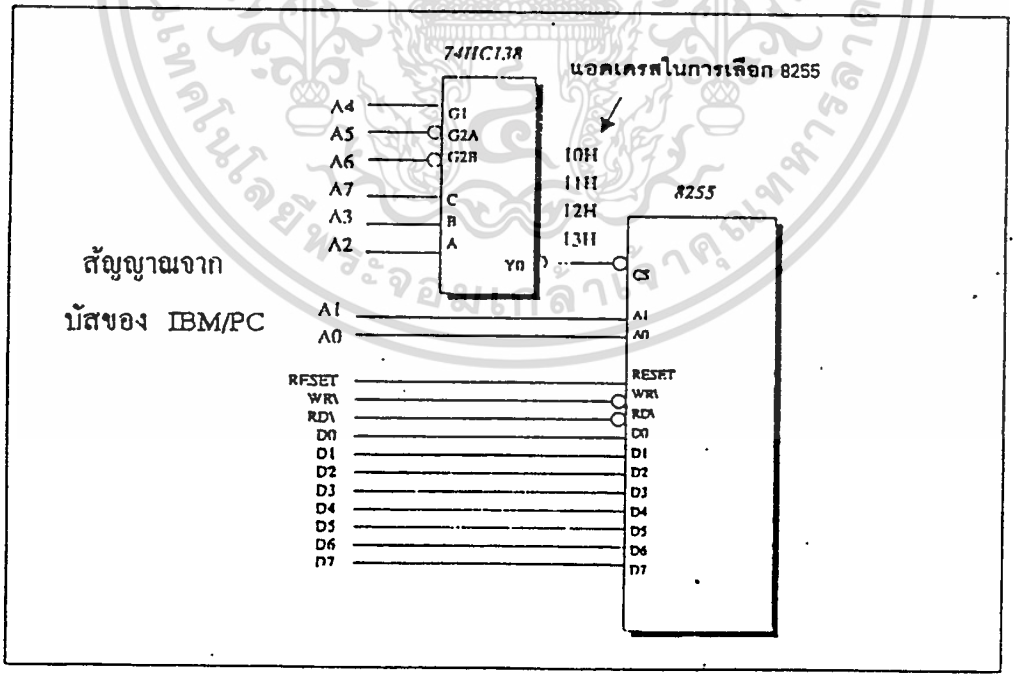
ขาสัญญาณควบคุมอื่นๆ คือ RD\ และ WR\ มักจะเชื่อมต่อเข้ากับสัญญาณชื่อเดียวกันของ สลอท IBM/PC ได้โดยตรง ทำให้แอดเดรสพอร์ตของ 8255 อยู่ในพื้นที่ของหน่วยความจำข้อมูลของ IBM/PC สำหรับขาสัญญาณ RESET ของ 8255 ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการรีเซตหรือเมสภาวะการทำงานใหม่เมื่อระดับของขาสัญญาณเป็นลอจิกสูง ดังนั้นหากว่าจะใช้สัญญาณการรีเซตเดียวกับของ IBM/PC เพื่อที่จะรีเซต 8255 ด้วยก็สามารถต่อได้โดยตรง

ส่วนขาสัญญาณ D0 - D7 ก็สามารถนำไปเชื่อมต่อโดยตรงเข้ากับบัสของ IBM/PC ได้เช่นกันขอให้ดูวงจรทำงานแสดงการเชื่อมต่อระหว่าง 8255 และ IBM/PC ในรูปที่ 3-35 ซึ่งในที่นี้สมมติว่าไม่จำเป็นต้องมีการใช้วงจร หรือไอซีบัฟเฟอร์ขับสัญญาณบัสข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-34 แสดงการสร้างสัญญาณเลือกอุปกรณ์ (CS\) ให้กับ 8255 โดยการถอดรหัสจากบัสแอดเดรส A2 - A7



รูปที่ 3-35 แสดงการเชื่อมต่อระหว่าง 8255 กับ สลอท IBM/PC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งาน 8255 (Programmable Pheripheral Interface)

ไอซี 8255 (Programmable Pheripheral Interface) เป็นไอซี ประกอบด้วยพอร์ตใช้งานถึง 3 พอร์ตและ พอร์ตควบคุม (CONTROL PORT) อีก 1 พอร์ตรวมเป็น 4 พอร์ต ซึ่งไอซี 8255 สามารถที่จะโปรแกรมให้เป็นได้ทั้งอินพุทและเอ้าท์พุทได้ทั้ง 3 พอร์ต หรือ 24 บิต I/O โดยการกำหนดที่พอร์ตควบคุม (CONTROL PORT) ซึ่งการโปรแกรมเพียงแต่ส่งค่า Control Word Code ไปให้พอร์ตควบคุมเพื่อกำหนดการทำงาน 8255 ซึ่งมีรายละเอียดและตัวอย่างการโปรแกรมดังนี้คือ

D0 ใช้สำหรับกำหนดการทำงานของพอร์ต C ล่าง (PC0 - PC3) คือ
ถ้าเป็น 1 หมายถึงให้เป็น Input
ถ้าเป็น 0 หมายถึงให้เป็น Output

D1 ใช้สำหรับกำหนดการทำงานของพอร์ต B (PC0 - PC7) คือ
ถ้าเป็น 1 หมายถึงให้เป็น Input
ถ้าเป็น 0 หมายถึงให้เป็น Output

D2 ใช้สำหรับกำหนดโหมดการทำงานของพอร์ต C ล่างและพอร์ต B คือ
ถ้าเป็น 0 หมายถึงให้พอร์ต C ล่างและพอร์ต B ทำงานในโหมด 0
ถ้าเป็น 1 หมายถึงให้พอร์ต C ล่างและพอร์ต B ทำงานในโหมด 1

D3 ใช้สำหรับกำหนดการทำงานของพอร์ต C บน (PC0 - PC7) คือ
ถ้าเป็น 1 หมายถึงให้เป็น Input
ถ้าเบ็น 0 หมายถึงให้เป็น Output

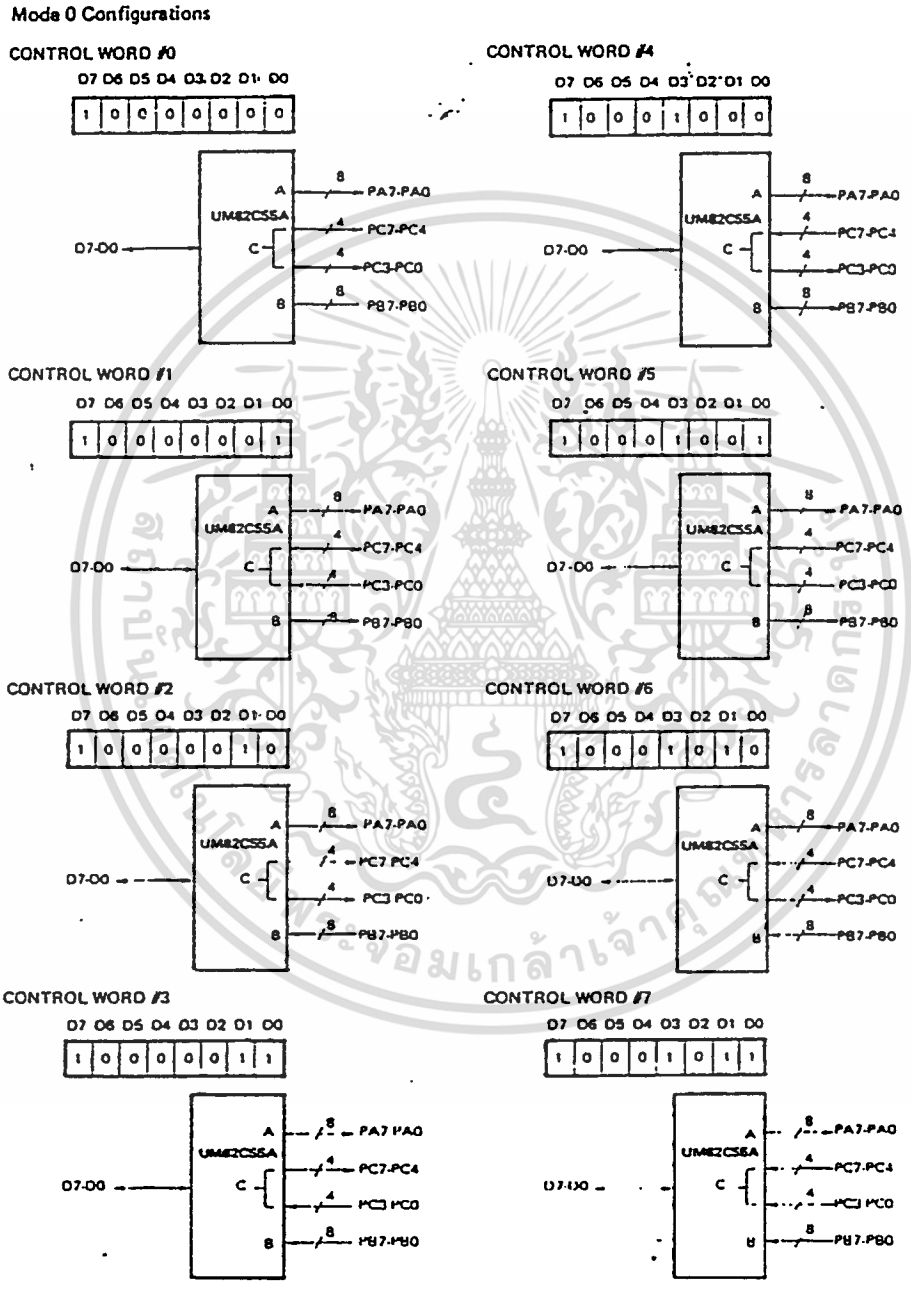
D4 ใช้สำหรับกำหนดการทำงานของพอร์ต A (PC0 - Pc7) คือ
ถ้าเป็น 1 หมายถึงให้เป็น Input
ถ้าเป็น 0 หมายถึงให้เป็น Output

D6,D5 ใช้สำหรับกำหนดโหมดการทำงานของพอร์ต C บนและพอร์ต A คือ
ถ้าเป็น 00 หมายถึงให้พอร์ต C บนและพอร์ต A ทำงานในโหมด 0
ถ้าเป็น 01 หมายถึงให้พอร์ต C บนและพอร์ต A ทำงานในโหมด 1
ถ้าเป็น 1X หมายถึงให้พอร์ต C บนและพอร์ต A ทำงานในโหมด 2

D7 ใช้สำหรับกำหนด MODE SET FLAG คือ

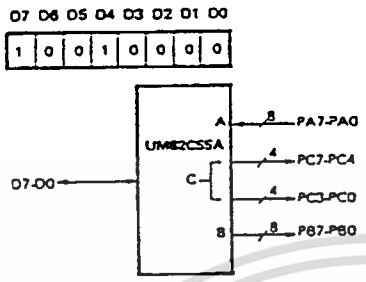
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเป็น 1 หมายถึง ACTIVE ซึ่งต้องกำหนดให้บิทนี้เป็น 1 เสมอ
ถ้าเป็น 0 หมายถึง NON - ACTIVE

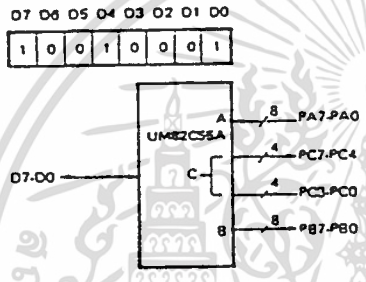


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

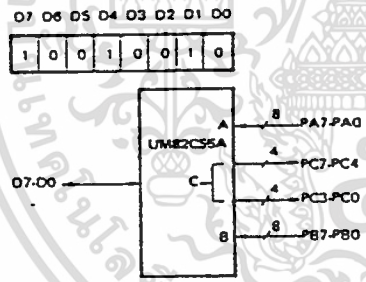
CONTROL WORD #8



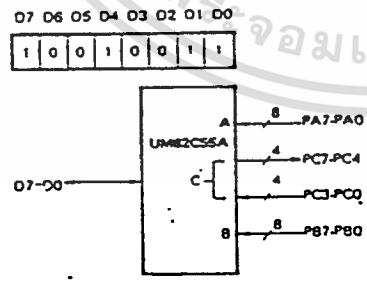
CONTROL WORD #9



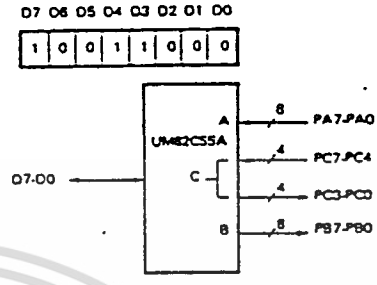
CONTROL WORD #10



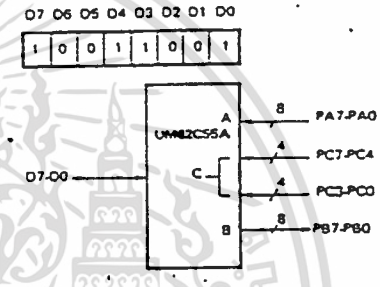
CONTROL WORD #11



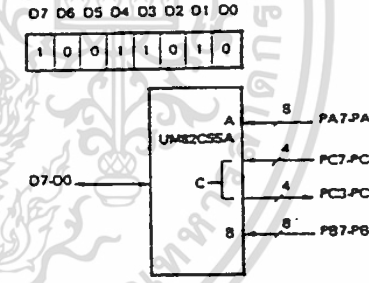
CONTROL WORD #12



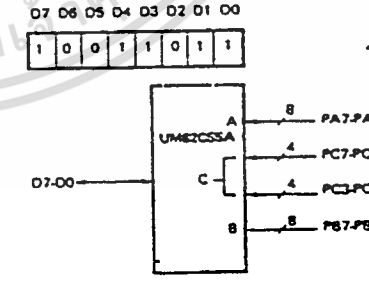
CONTROL WORD #13



CONTROL WORD #14



CONTROL WORD #15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีไอซี 8253 (Programmable Interval Timer) จำนวน 1 ตัว ทำให้สามารถที่จะประยุกต์การใช้งานเกี่ยวกับระบบฐานเวลาต่าง ๆ ได้มากมาย เช่น

1. โปรแกรมให้ทำงานเป็นวงจรสร้างฐานเวลาต่าง ๆ
2. โปรแกรมให้เป็นวงจรนับแบบต่าง ๆ
3. โปรแกรมให้เป็นวงจรสร้างสัญญาณ Interrupt ให้เครื่อง PC
4. โปรแกรมให้เป็นวงจรสร้างสัญญาณ Square Wave
5. โปรแกรมให้เป็นวงจรสร้างความถี่

ซึ่ง ไอซี 8253 นี้ มีโครงสร้างภายในให้ใช้งานถึง 3 แชนแนล และแต่ละแชนแนล ทำงานแยกจากกันอย่างอิสระ

การใช้งาน 8253 (Programmable Interval Timer)

ไอซี 8253 (Programmable Interval Timer) เป็น ไอซีซึ่งประกอบด้วย พอร์ตใช้งาน 3 พอร์ต และพอร์ตควบคุมการทำงาน (Control Port) อีก 1 พอร์ต รวมเป็น 4 พอร์ต ซึ่ง 8253 เหมาะสมสำหรับการใช้งานในด้านฐานเวลาต่าง ๆ ซึ่งมีอินพุท 2 อินพุท (CLK และ GATE) และเอาท์พุท 1 เอาท์พุท (OUT) ต่อ 1 แชนแนล ซึ่งใน 8253 แต่ละแชนแนลยังแยกการทำงานกันอย่างอิสระ 8253 แต่ละแชนแนลสามารถเลือกการทำงานได้ 6 โหมดการโปรแกรมให้ 8253 ทำงานในโหมดใดนั้นทำได้โดยการส่งค่า Control Word ให้กับ Register Mode Control (Port Control 8253) ซึ่งมีรายละเอียดการโปรแกรมดังนี้คือ

บิท	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
หน้าที่	SC1	SC0	RL1	RL0	M2	M1	M0	BCD

บิท D7, D6 (SC1, SC0) :

Select Counter ใช้สำหรับเลือกแชนแนลที่ต้องการ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SC1	SC2	แชนแนลที่ถูกเลือก
0	0	แชนแนล 0
0	1	แชนแนล 1
1	0	แชนแนล 2
1	1	

บิท D5, D4 (RL1, RL0) :

Read/Load ใช้สำหรับกำหนดไบท์ในการอ่าน / เขียนข้อมูล

RL1	RL0	หน้าที่
0	0	ทำการแลท์ค่าในรีจิสเตอร์ - เค้าเตอร์
0	1	อ่าน / เขียน เฉพาะข้อมูลใน 8 บิท ล่าง (LSB)
1	0	อ่าน / เขียน เฉพาะข้อมูลใน 8 บิท บน (MSB)
1	1	อ่าน / เขียน เฉพาะข้อมูลใน 16 บิท โดยเริ่มจาก 8 บิท ล่างก่อน จากนั้นจึงอ่าน / เขียน ข้อมูลใน 8 บิท บน

บิท D3, D2, D1 (M2, M1, M0) :

Mode ใช้สำหรับเลือกโหมดการทำงานของ 8253 คือ

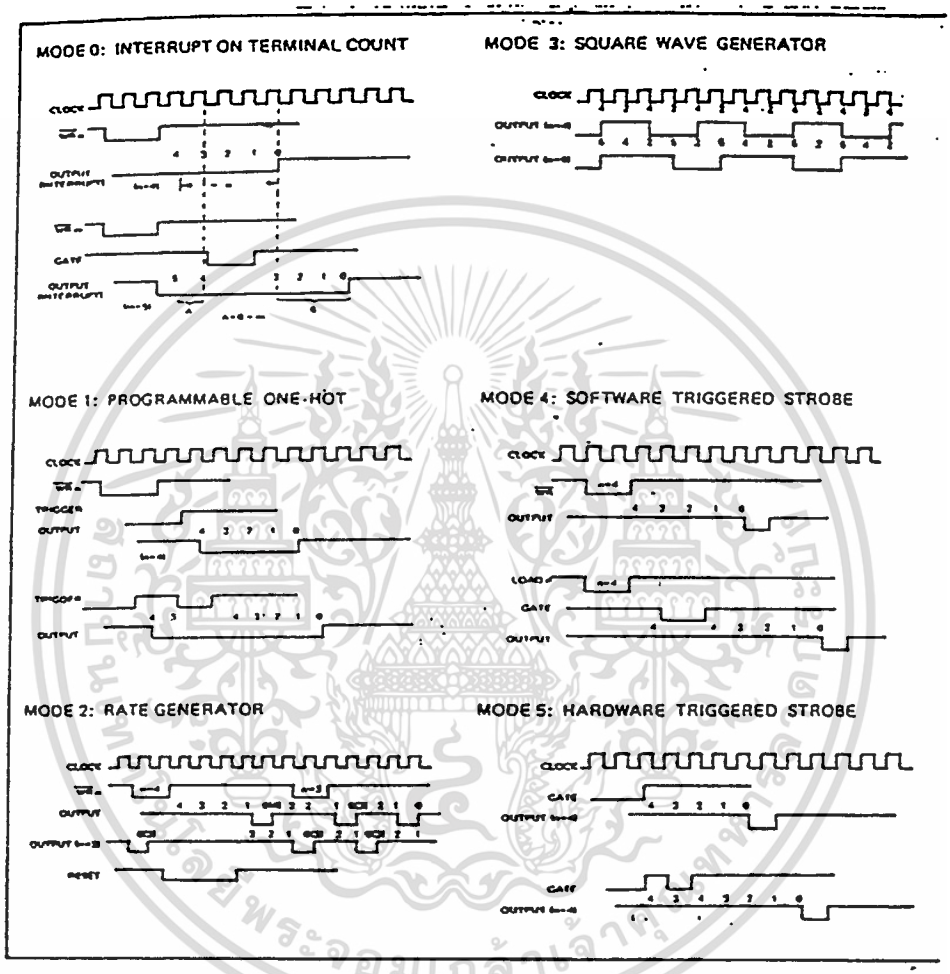
M2	M1	M0	โหมดการทำงาน
0	0	0	โหมด 0 : Interrupt On Terminal
0	0	1	โหมด 1 : Programmable One - Shot
X	1	0	โหมด 2 : Rate Generator
X	1	1	โหมด 3 : Square Wave Generator
1	0	0	โหมด 4 : Sofware Trigger Stobp
1	0	1	โหมด 5 : Hardware Trigger Stobp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BCD : ใช้กำหนดการลดค่าข้อมูลในรีจิสเตอร์เค้าท์เตอร์ กล่าวคือ

ถ้าเป็น 1 ค่าของข้อมูลในรีจิสเตอร์เค้าท์เตอร์จะถูกลดลงแบบ BCD

ถ้าเป็น 0 ค่าของข้อมูลในรีจิสเตอร์เค้าท์เตอร์จะถูกลดลงแบบ Binary



UM8253 Timing Diagrams

ตัวอย่างเช่น เราต้องการให้แชนแนล 0 ทำงานในโหมด 0 (Interrupt) จะได้ Control Word ดังนี้คือ

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
0	0	0	1	0	0	0	0

ดังนั้นจะได้ Control Word = 10 H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ไอซี ADC (Analog to Digital Converter) จำนวน 1 ตัว ซึ่งสามารถที่จะเลือกใช้ได้ถึง 2 เบอร์ คือ ADC0804 (8 บิต) หรือ ADC1001 (10 บิต) ซึ่งทำให้สามารถที่จะประยุกต์ใช้งานในการตรวจจับ หรือการวัดสัญญาณหรือรับสัญญาณอินพุทในรูปของสัญญาณ Analog ได้ 1 channal ซึ่งขนาดของสัญญาณ Analog ที่รับเข้ามาสามารถที่จะรับได้โดยตรงสูงถึง 5 VDC หรือมากกว่าโดยเพิ่มวงจรขยายย่านวัดเข้าไปอีกเล็กน้อย ทำให้สามารถประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือวัดสัญญาณต่าง ๆ ได้มากมายเช่น

1. เครื่องวัดแรงดัน
2. เครื่องวัดกระแส
3. เครื่องวัดอุณหภูมิ
4. เครื่องวัดความต้านทาน
5. เครื่องวัดความจุ

ซึ่งผลของการวัดแบบต่าง ๆๆ สามารถที่จะนำมาเก็บเป็นแฟ้มข้อมูลหรือแสดงผลในรูปแบบอื่น ๆ ได้ตามต้องการโดยผู้ใช้เขียนโปรแกรมควบคุมเอง

<u>การใช้งาน ADC (Analog To Digital Converter)</u>

ไอซี ADC0804 เป็นไอซี ทำหน้าที่รับสัญญาณอินพุทในรูปของ Analog แล้วเปลี่ยนเป็น Digital เพื่อส่งให้ CPU ประมวลผล ซึ่งสามารถที่จะประยุกต์ใช้งานในการเชื่อมต่อ (Interface) กับอุปกรณ์ภายนอกที่ให้สัญญาณเป็น Analog ได้โดยตรงถึงค่า 5 VDC หรือมากกว่าโดยผู้ใช้เพียงเพิ่มเติมวงจรขยายย่ายวัด เช่นเดียวกับเครื่องวัดทั่ว ๆ ไป ซึ่งขนาดของสัญญาณ Analog ที่รับเข้ามานั้น สามารถกำหนดแถบความกว้าง (RangE) ของสัญญาณได้โดยการควบคุมขนาดของ VI- และ Vref/2 ซึ่ง VI- จะเป็นตัวกำหนดจุดเริ่มต้นหรือค่าต่ำสุดของสัญญาณที่รับเข้ามา โดยปรกติแล้วต้องมีค่ามากกว่า 0V แต่ต่ำกว่า Vref/2 เสมอ ส่วนสัญญาณ Vref/2 จะเป็นตัวกำหนดขนาดสูงสุดของสัญญาณที่รับเข้ามา (Maximum) นั่นคือ

ถ้าสัญญาณ Analog ที่รับเข้ามามีค่าเป็น 2 เท่าของ Vref/2 จะได้ DATA = FFH
ถ้าสัญญาณ Analog ที่รับเข้ามามีค่าเป็น 1 เท่าของ Vref/2 จะได้ DATA = 7FH
ถ้าสัญญาณ Analog ที่รับเข้ามามีค่าเท่ากับ VI- จะได้ DATA = 00H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของ DATA ที่มีต่อขนาดของสัญญาณจะเป็นเชิงเส้นตลอด (Linear) ซึ่งขนาดของสัญญาณ Vref/2 สามารถเลือกได้โดย JP5 กล่าวคือถ้าผู้ใช้ Short ที่ตำแหน่ง 1 - 2 จะได้ Vref/2 = 2.50V ถ้า Short ที่ตำแหน่ง 2 - 3 ขนาดสัญญาณ Vref/2 จะขึ้นอยู่กับขนาดที่กำหนดเองจากภายนอกที่ต่อจาก Connector CN2 ซึ่งขนาดของ Vref/2 ที่ป้อนใช้เข้ามาต้องมีค่ามากกว่า 0V และไม่ควรเกิน 2.50V ด้วยเช่นกัน

ตัวอย่างเช่น เลือก VI- เท่ากับ 0V และเลือก Vref/2 เท่ากับ 2.50V จะได้ว่าสัญญาณ Analog Input จะต้องอยู่ระหว่าง 0V - 5.0V เท่านั้นซึ่งความละเอียดของแต่ละช่วงสัญญาณที่รับเข้ามามีความละเอียดถึง 256 ระดับ นั่นคือ

ถ้าสัญญาณ Analog Input มีค่าเท่ากับ 0V จะได้ DATA เท่ากับ 00H
ถ้าสัญญาณ Analog Input มีค่าเท่ากับ 2.50V จะได้ DATA เท่ากับ 7FH
ถ้าสัญญาณ Analog Input มีค่าเท่ากับ 5.00V จะได้ DATA เท่ากับ FFH

ดังนั้นจะได้ความละเอียดของสัญญาณ = (5V - 0V) / 256
= 0.0195 V

หรืออาจกล่าวได้ว่า สามารถรับสัญญาณได้ตั้งแต่ 0V - 5.0V โดยมีความแตกต่างของแต่ละช่วง (Step) เป็น 0.0195V

หรืออีกกรณีหนึ่งคือ หากเลือก VI- เท่ากับ 0.50V จากภายนอกซึ่งต่อเข้ามาทาง Connector CN2 และเลือก Vref/2 เท่ากับ 1.50V จะได้ว่าช่วงของสัญญาณ Analog Input จะต้องอยู่ระหว่าง 0.50V - 3.50V นั่นเอง

- มีไอซี DAC (Digital to Analog Converter) จำนวน 1 ตัว ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ถึง 2 เบอร์ คือ DAC0832 (8 บิต) หรือ DAC1232 (12 บิต) ซึ่งเลือกได้โดยการ Set Jumper (JP1) ซึ่งจะให้สามารถที่จะประยุกต์ใช้ในงานควบคุมต่าง ๆ โดยส่งสัญญาณในรูปของ Analog ออกไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอก ซึ่งขนาดของสัญญาณ Analog มีวงจร OP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งาน DAC (Digital To Analog Converter)

ไอซี DAC มีลักษณะการทำงานที่ตรงกันข้ามกับไอซี ADC กล่าวคือมันจะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณ Digital ให้เป็นสัญญาณ Analog ซึ่งนิยมใช้งานในด้านการควบคุมต่าง ๆ โดยสามารถที่จะเลือกใช้ได้ 2 เบอร์ คือ DAC0832 (8 บิท) หรือ DAC1232 (12 บิท)

ซึ่งการควบคุมขนาดของสัญญาณ Analog Output นั้นทำได้โดยการส่งค่า DATA ออกไปยังพอร์ทควบคุมของไอซี DAC (Port Control DAC) ซึ่งอัตราส่วนของขนาดสัญญาณ Analog Output ที่ได้นั้นจะเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้น (Linear) นั้นคือ

ถ้าสัญญาณ DATA ค่า FFH จะได้ขนาดสัญญาณ Output สูงสุด
ถ้าสัญญาณ DATA ค่า 7FH จะได้ขนาดสัญญาณ Output ครึ่งหนึ่ง
ถ้าสัญญาณ DATA ค่า 00H จะได้ขนาดสัญญาณ Output ต่ำสุด

ซึ่งขนาดของสัญญาณ Analog Output นั้นมีความละเอียดถึง 256 ค่าจากย่านความกว้างของสัญญาณทั้งหมด (Range) หรือคำนวณได้จากสูตร

ความละเอียดของช่วงสัญญาณ = (Vmax - Vmin) / 256

ตัวอย่างเช่น ต้องการขนาดสูงสุดของสัญญาณ 10 V โดยให้ขนาดต่ำสุดของสัญญาณเป็น 0 V จะได้ความละเอียดของสัญญาณเป็น 0.039 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณต่าง ๆ บนสล็อตของ IBM/PC

ภายใน IBM/PC ได้มีการออกแบบให้สามารถที่จะเพิ่มเติมวงจรอินเทอร์เฟสเข้าไปในภายหลังได้ โดยผ่านทางสล็อตที่อยู่บนเมนบอร์ด (Main Board) สำหรับสล็อตบนเมนบอร์ดนี้จะมีจำนวน 5 สล็อต (สำหรับ IBM PC/XT จะมีอยู่ 8 สล็อต) ซึ่งแต่ละสล็อตจะมีจำนวนขาทั้งสิ้น 62 ขา แบ่งออกเป็น 2 ข้าง ๆ ละ 31 ขา ส่วนการเรียกตำแหน่งขาของสล็อตเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับว่าขานั้นอยู่ข้างใด (ซ้ายขวา) ของสล็อต โดยขาที่อยู่ทางด้านซ้ายของสล็อตจะเรียกโดยใช้อักษร "B" นำหน้าเลขตำแหน่งของขา เช่น B16 ก็คือขาทางด้านซ้ายของสล็อต ขาที่ 16 (นับจากทางด้านท้านของเครื่อง) ส่วนขาที่อยู่ทางด้านขวาสล็อตจะเรียกโดยใช้อักษร "A" นำหน้าเลขตำแหน่งของขา เช่น ขา A24 ก็คือขาทางด้านขวาของสล็อตขาที่ 24 (นับจากทางด้านท้ายของเครื่อง)

แต่ละขาของสล็อตเหล่านี้จะเชื่อมต่อกับเส้นสัญญาณต่าง ๆ บนเมนบอร์ด ทำให้การสร้างวงจรอินเตอร์เฟสกับ IBM/PC สามารถทำได้โดยสะดวก ซึ่งเส้นสัญญาณที่เชื่อมต่อกับขาของสล็อตเหล่านี้จะประกอบไปด้วย เส้นสัญญาณของบัสแอดเดรส (Address Bus), บัสข้อมูล (Data Bus), บัสควบคุมสำหรับการเขียน/อ่านข้อมูลจากหน่วยความจำ หรือพอร์ท I/O ., เส้นสัญญาณสำหรับการอินเทอร์รัพท์ของวงจรอินเตอร์เฟส, เส้นสัญญาณของสำหรับการขอ DMA , สัญญาณฐานเวลา (Timing Signal) ต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบ, เส้นสัญญาณแสดงการรีเฟรชหน่วยความจำ และสัญญาณสำหรับการตรวจสอบความผิดพลาด (I/O CHECK)

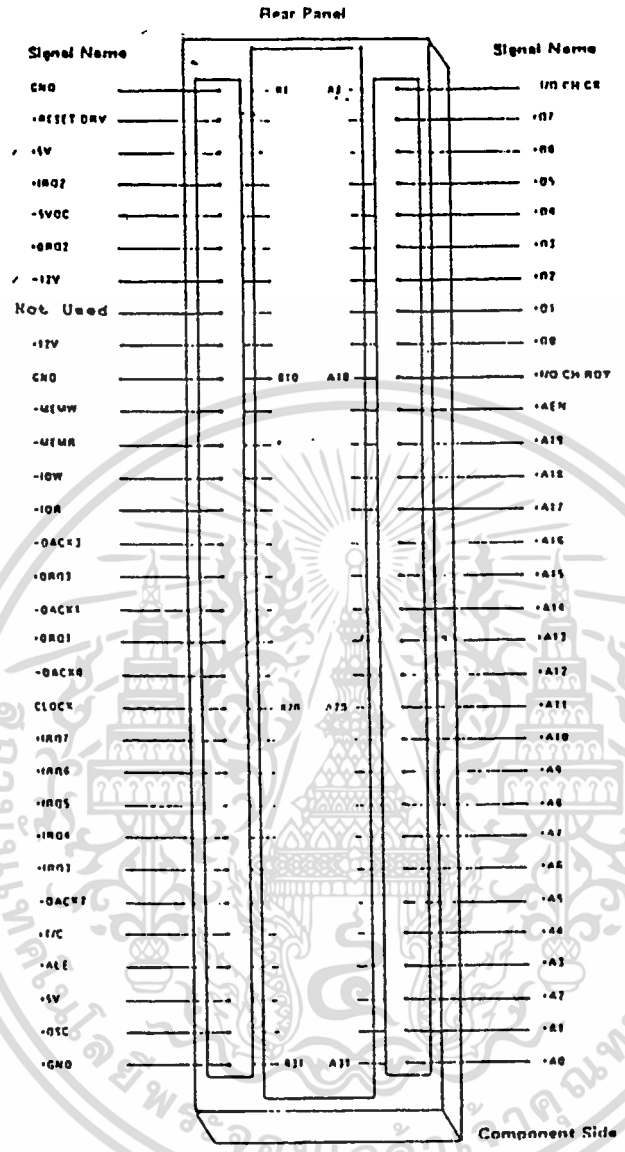
นอกจากเส้นสัญญาณเหล่านี้แล้ว สล็อตบนเมนบอร์ดยังเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟต่าง ๆ ที่ใช้ในระบบอีกด้วย คือ +5 Vdc, -5 Vdc, +12 Vdc และ -12 Vdc

รายละเอียดเกี่ยวกับสัญญาณต่าง ๆ

OSC (Oscillator ; ขา B30)

ขานี้เป็นเอาท์พุทที่เชื่อมต่อกับสัญญาณคล็อกที่มีค่าความถี่สูงสุดบนเมนบอร์ด คือ 14.31818 Mkhz ซึ่งมีคาบเวลาประมาณ 70 nanosec. และมี Duty Cycle (ช่วงเวลาใน 1 คาบที่สัญญาณคล็อกมีลอจิกเป็น " 1 " หารด้วยคาบเวลาทั้งหมด) ประมาณ 50 % สัญญาณคล็อกอื่น ๆ ของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



CLK (Clock ; ขา B20)

ขาสัญญาณนี้เป็นเอาท์พุท ซึ่งต่อกับสัญญาณคล็อกที่ถูกสร้างขึ้นโดยการหารสัญญาณ OSC ด้วย 3 ทำให้ได้ความถี่ประมาณ 4.77 MHz (14.31818 Mhz1/3) หรือ มีช่วงเวลาใน 1 คาบ (ช่วงเวลาของคล็อก 1 ลูก) เท่ากับ 210 nanosec. (1/4.77 Mkhz) สำหรับค่า Duty Cycle ของสัญญาณนี้จะมีค่าประมาณ 1/3 คือ ใน 1 คาบจะมีช่วงเวลาที่เป็นลอจิก " 1 " เท่ากับ 1/3 ของคาบเวลาทั้งหมด หรือประมาณ 70 nanosec. และช่วงเวลาที่เป็นลอจิก " 0 " เท่ากับ 2/3 ของคาบเวลาทั้งหมด หรือประมาณ 140 nanosec.

สัญญาณนี้เป็นสัญญาณที่ถูกใช้เป็นคล็อกของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RESET DRV (ขา B2)

ขาสัญญาณนี้เป็นเอาท์พุท ซึ่งจะแอคทีฟ (ลอจิก "1") ในช่วงที่เราเริ่มจ่ายไฟให้กับระบบ และจะยังคงแอคทีฟไปจนกว่าระบบต่าง ๆ ภายใน IBM/PC จะพร้อมที่จะทำงานได้ จากนั้นสัญญาณนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นลอจิก "0" นอกจากนี้ในระหว่างการทำงานของ IBM/PC ถ้าระดับแรงดันของแหล่งจ่ายไฟตกลง สัญญาณนี้ก็จะถูกทำให้แอคทีฟเช่นกัน โดยทั่วไปแล้วสัญญาณนี้จะถูกนำไปใช้ในการรีเซ็ทวงจรอินเทอร์เฟสหรืออุปกรณ์ I/O ต่าง ๆ ในช่วงที่เริ่มจ่ายไฟให้กับระบบ ซึ่งจะเป็นการทำให้วงจรหรืออุปกรณ์เหล่านั้นถูกปรับให้อยู่ในสภาวะที่แน่นอน ก่อนที่จะเริ่มต้นการทำงานในระบบ (สภาวะนี้เป็นสภาวะที่เราทราบ และต้องการให้วงจรทำงานในขณะที่ระบบถูกรีเซ็ท)

A0 - A19 (Address Bus ; A12 - A31)

ขาสัญญาณทั้ง 20 ขานี้เป็นเอาท์พุท ซึ่งใช้สำหรับกำหนดแอดเดรสของหน่วยความจำหรืออุปกรณ์ I/O ที่ต้องการติดต่อด้วย โดยสัญญาณ A0 จะมีนัยสำคัญต่ำสุด (Least Siignificant Bit) และ A19 จะมีนัยสำคัญสูงสุด (Most Significant Bit) สำหรับค่าแอดเดรสบนบัสแอดเดรส A0 - A19 นี้ ในระหว่างขบวนการอ่าน/เขียนข้อมูลลงในหน่วยความจำหรืออุปกรณ์ I/O แต่ในช่วงของขบวนการ DMA นั้น DMA - Controller จะเป็นผู้กำหนดค่าแอดเดรสบนบัสแอดเดรสเอง

D0 - D7 (Data Bus ; ขา A9 - A2)

ขาสัญญาณนี้จะเป็นแบบ Bi - Directional ซึ่งต่อกับข้อมูลของระบบ เพื่อทำหน้าที่ในการส่งผ่านข้อมูลระหว่างพอร์ท I/O กับ IBM/PC โดยบิท D0 จะมีนัยสำคัญต่ำสุด และบิท D7 จะมีนัยสำคัญสูงสุด

ALE (Address Latch Enable ; ขา B28)

ขาสัญญาณนี้เป็นสัญญาณเอาท์พุทที่ Bus Controller สร้างขึ้นเพื่อใช้สำหรับแสดงการเริ่มต้นของบัสไซเคิล และแสดงให้อุปกรณ์ภายนอกทราบว่าแอดเดรสที่ต้องการจะติดต่อด้วยนั้นถูกส่งออกมาบนบัสแอดเดรสแล้ว โดยสัญญาณ ALE นี้จะเปลี่ยนจากลอจิก " 1 " เป็น " 0 " เมื่อค่าแอดเดรสที่ถูกต้องถูกส่งออกมาบนบัสข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ดังนั้นขอบขาลงของสัญญาณ ALE นี้จะถูกใช้ในการแลทช์ค่าแอดเดรสจากบัสแอดเดรส/ข้อมูล (Address/Data Bus ; AD0 - AD7) ทำให้สามารถแยกค่าแอดเดรส (A0 - A19) และข้อมูล (A0 - A7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกจากกันได้ อย่างไรก็ตามสัญญาณ ALE จะแอคทีฟเฉพาะในบัสไซเคิลที่สร้างขึ้น โดยจะไม่แอคทีฟในระหว่างขบวนการ DMA-

I/O CHCK (I/O Channel Check ; ขา A1)

ขาสัญญาณนี้เป็นอินพุทที่ใช้ในการแสดงความผิดพลาดเกี่ยวกับพาริตี้ ที่เกิดขึ้นในการทำงานของวงจรอินเทอร์เฟสหรืออุปกรณ์ I/O เมื่อขาสัญญาณนี้ได้รับลอจิก "0" จะให้ทำถูกอินเทอร์รัพท์แบบ Non - Maskable (NMI) อย่างไรก็ตามเราสามารถที่จะกำหนดให้วงจรภายในของ IBM/PC ทำการขออินเทอร์รัพท์หรือไม่ก็ได้ โดยการกำหนดลอจิกของบิทข้อมูลของพอร์ทที่ควบคุมการขออินเทอร์รัพท์แบบ NMI คือบิท D7 ของพอร์ท 00A0H ในกรณีที่บิท D7 ของพอร์ท 00A0H ถูกเซ็ทเป็น "1" ก็จะทำให้วงจรภายนอกของอินเทอร์รัพท์แบบ NMI ได้ (Enable) แต่ถ้าบิท D7 ของพอร์ท 00A0H ถูกเซ็ทเป็น "0" ก็จะเป็นการดิสเอเบิล(Disable)

I/O CHRDY (I/O Channel Ready ; ขา A10)

ขาสัญญาณนี้เป็นอินพุทที่ใช้เพิ่มช่วงเวลาในบัสไซเคิลในกรณีที่อุปกรณ์ I/O หรือหน่วยความจำที่เกี่ยวข้องกับขบวนการในบัสไซเคลที่เกิดขึ้นนั้น ไม่สามารถทำงานทันตามช่วงเวลาปกติของบัสไซเคิลนั้น ๆ ได้ (ช่วงเวลาบัสไซเคิลที่เกี่ยวข้องกับหน่วยความจำใช้ช่วงเวลาของคล็อก 4 ลูก หรือ 840 nanosec. ในขณะที่บัสไซเคิลที่เกี่ยวกับ I/O จะใช้ช่วงเวลาเท่ากับช่วงเวลาของคล็อก 5 ลูกหรือ 1.05 microsec.)

IRQ2 - IRQ7 (Interrupt Request 2 - 7 ; ขา B4 และ B21 - B25)

ขาสัญญาณทั้ง 6 นี้เป็นขาอินพุทที่ใช้สำหรับการขออินเทอร์รัพท์ โดยสัญญาณเหล่านี้จะต่อเข้ากับเมนบอร์ดโดยตรง โปรแกรมในส่วน BIOS ของ IBM/PC จะทำการโปรแกรมให้ IRQ2 มีลำดับความสำคัญสูงสุด (Hight Priority) และ IRQ7 มี ลำดับความสำคัญที่ต่ำสุด ในกรณีที่มีการขออินเทอร์รัพท์เกิดขึ้น คือระดับลอจิกที่ขา IRQ ขาใดขาหนึ่งถูกเปลี่ยนจากลอจิก "0" เป็นลอจิก "1" ก็จะทำการส่งสัญญาณ INT เพื่อทำการขออินเทอร์รัพท์

IOR (I/O Read ; ขา B14)

ขาสัญญาณนี้เป็นเอาท์พุทแอคทีฟที่ลอจิก "0" ที่สร้างขึ้นโดย Bus Controller เพื่อใช้ในการแสดงว่าไบเคิลที่เกิดขึ้นนี้ เป็นบัสไซเคิลของการอ่านข้อมูลจากพอร์ท I/O เพื่อให้พอร์ท I/O ที่มีแอดเดรสตรงกับแอดเดรสบนบัสแอดเดรสนั้นส่งข้อมูลออกมาบนบัสข้อมูล โดยข้อมูลจะต้องส่งออกมาบนบัสข้อมูลก่อนขอบขาขึ้นของสัญญาณ IOR ประมาณ 30 nanosec.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อให้มั่นใจได้ว่าสามารถรับข้อมูลได้ถูกต้อง สำหรับในขบวนการ DMA 8237A - 5 DMA Controller จะทำการสร้างสัญญาณ IOR เอง โดยที่ค่าแอดเดรสที่อยู่บนบัสแอดเดรสจะเป็นค่าแอดเดรสของหน่วยความจำ (แทนที่จะเป็นแอดเดรสของพอร์ท I/O) ที่พอร์ท I/O ที่ขอ DMA DACK จาก DMA Controller เป็นตัวกำหนด เช่นกรณีที่สัญญาณ DACK 1 แอคทีฟก็จะแสดงว่าพอร์ท I/O ที่จะต้องส่งข้อมูลออกมาบนบัสข้อมูลก็คือ พอร์ท I/O ที่ขอ DMA ผ่านทางแชนแนลที่ 1 (DRQ1)

IOW (I/O Write ; ขา B12)

ขาสัญญาณนี้เป็นเอาท์พุทแอคทีฟที่ลอจิก "0" ซึ่งถูกสร้างขึ้นโดย Bus Controller เมื่อใช้แสดงว่าบัสไซเคิลที่เกิดขึ้นเป็นบัสไซเคิลของการเขียนข้อมูลลงบนพอร์ท I/O

MEMW (Memory Write ; ขา B11)

ขานี้เป็นเอาท์พุทแอคทีฟที่ลอจิก "0" ซึ่ง Bus Controller สร้างขึ้นในระหว่างบัสไซเคิลในการเขียนข้อมูลลงในหน่วยความจำ สัญญาณ MEMW นี้จะถูกส่งออกมาเพื่อให้หน่วยความจำที่แอดเดรสตรงกับค่าแอดเดรสบนบัสแอดเดรสนั้น ทำการรับข้อมูลที่อยู่บนบัสข้อมูลที่อยู่บนบัสข้อมูลไปเก็บไว้

MEMR (Memory Read ; ขา B12)

ขานี้เป็นเอาท์พุทซึ่งสัญญาณนี้จะแอคทีฟ "0" ในระหว่างบัสไซเคิลของการอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำ เพื่อให้หน่วยความจำที่มีแอดเดรสตรงกับค่าแอดเดรสบนบัสแอดเดรสนั้นทำการส่งข้อมูลออกมาบนบัสข้อมูล โดยหน่วยความจำนั้นจะต้องส่งข้อมูลออกมาในช่วงเวลา 30 nanosec. ก่อนที่สัญญาณ MEMW จะกลับเป็นลอจิก "1"

DRQ1 - DRQ3 (DMA Requst 1 - 3 ; ขา B18, ขา B6 และ ขา B16)

ขาสัญญาณทั้งสามนี้เป็นสัญญาณอินพุทแอคทีฟที่ลอจิก "1" ซึ่งอุปกรณ์ภายนอกสามารถใช้ในการขอ DMA จากระบบ โดยการป้อนระดับสัญญาณลอจิก "1" ให้กับขา DRQ ขาใดขาหนึ่ง

DACK0 - DACK3 (DMA Acknowledge 0 - 3 ; ขา B19, B17, B26 และ B15)

สัญญาณทั้ง 4 นี้เป็นเอาท์พุทแอคทีฟที่ลอจิก "0" สร้างขึ้นเพื่อแสดงให้วงจรภายนอกที่ขอ DMA ทราบว่าการขอ DMA นั้นได้รับการตอบสนองแล้ว จะเข้าสู่ขบวนการ DMA เพื่อให้การส่งผ่านข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ I/O ที่ขอ DMA กับหน่วยความจำเกิดขึ้นได้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรง โดยสัญญาณ DACK นี้จะแอคทีฟในแชนแนลใดก็ขึ้นอยู่กับว่าขบวนการ DMA ที่จะเกิดขึ้นนั้น เป็นการตอบสนองต่อการขอ DMA ในแชนแนลใด

AEN (Address Enable ; ขา A11)

สัญญาณนี้เป็นเอาท์พุทที่ใช้ในการแสดงว่าบัสไซเคิลที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สัญญาณ AEN แอคทีฟ "1" นั้น เป็นบัสไซเคิลของขบวนการ DMA

T/C (Terminal Count ; ขา B27)

สัญญาณนี้ถูกสร้างขึ้นจากการนำเอาสัญญาณเอาท์พุทที่ขา EOP มากลับลอจิก (โดยใช้เกท Inverter) ทำให้สัญญาณ T/C นี้แอคทีฟที่ลอจิก "1"

บัสของแหล่งจ่ายไฟของระบบ

+5 Vdc (ขา B3 และ B29)

ขาทั้งสองนี้จะต่อกับแหล่งจ่ายไฟ DC +5V ของระบบ โดยจะมีค่าความเที่ยงตรง (Regulated) ± 5% คืออยู่ในช่วง +4.75 ถึง +5.25 Vdc

+12 Vdc (ขา B9)

ขานี้จะต่อกับแหล่งจ่ายไฟ DC +12V ของระบบ โดยจะมีค่าความเที่ยงตรง(Regulated) ± 5% คืออยู่ในช่วง +11.4 ถึง +12.6 Vdc

-5 Vdc (ขา B5)

ขานี้จะต่อกับแหล่งจ่ายไฟ DC -5V ของระบบ โดยจะมีค่าความเที่ยงตรง (Regulated) ± 10% คืออยู่ในช่วง -5.5 และ -4.5 Vdc

-12 Vdc (ขา B7)

ขานี้จะต่อกับแหล่งจ่ายไฟ DC -12V ของระบบ โดยจะมีค่าความเที่ยงตรง (Regulated) ± 10% คือในอยู่ในช่วง -13.2 ถึง -10.8 Vdc

GND (ขา B1, B10 และ B31)

ขาทั้งสามนี้จะต่อเข้ากับกราวด์ (Ground) ของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การควบคุมและส่วนควบคุม

ในการควบคุมมอเตอร์ให้มีความเร็วรอบคงที่อยู่ได้นั้นจำเป็นต้องมี ตัวควบคุมที่ดีในการควบคุม ดังนั้นส่วนควบคุมจึงเป็นส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งที่จะทำให้ความเร็วของมอเตอร์คงที่

ในการควบคุมได้แบ่งส่วนควบคุมออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนในการตรวจจับ และอีกส่วนหนึ่งคือ ส่วนในการควบคุม

<u>ส่วนในการตรวจจับสัญญาณ</u>

ส่วนในการตรวจจับสัญญาณนี้มีด้วยกับหลายส่วน

- การตรวจจับความเร็วรอบ
- การตรวจจับกำลังไฟฟ้าของโหลด
- การตรวจจับแรงดันไฟฟ้าของโหลด
- การตรวจจับกระแสไฟฟ้าของโหลด
- การตรวจจับความถี่ของโหลด

<u>ส่วนในการควบคุม</u>

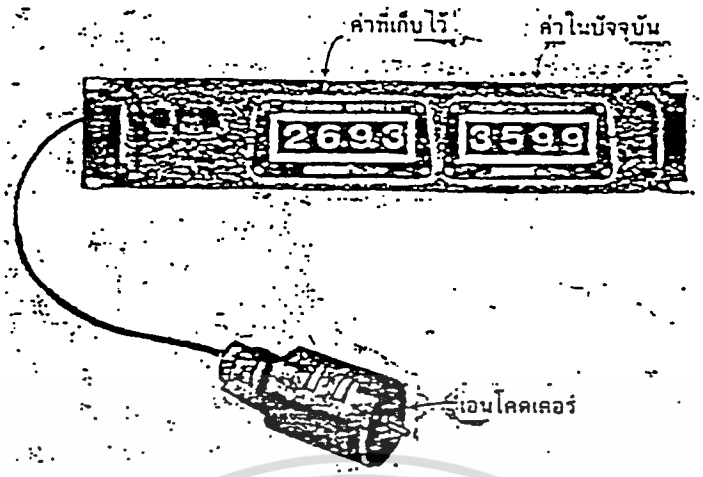
การส่งสัญญาณออกควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ โดยการส่งสัญญาณไปปรับอินเวอร์เตอร์

การตรวจจับสัญญาณความเร็วรอบ

<u>อินคริเม้นท์เอนโคดเดอร์</u>

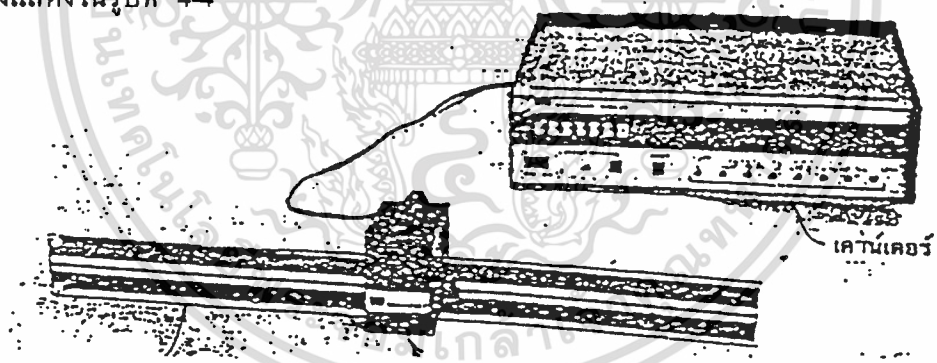
ในระบบการบังคับตำแหน่ง หรือความเร็วของมอเตอร์ต้องใช้อินคริเม้นท์เอนโคดเดอร์ หรือเอนโคดเดอร์สำหรับรักษาตำแหน่ง และสำหรับสร้างสัญญาณป้อนกลับ โดยที่ตัวเอนโคดเดอร์จะสร้างสัญญาณพัลส์แปรผันตรงกับหารหมุนของเพลา ซึ่งสามารถนำไปใช้การรับรู้ความเร็วของเพลามอเตอร์ในรูปของอัตราจำนวนพัลส์ได้ ในรูปที่ 4-1 และ 4-2 แสดงรูปลักษณะของอิคริเม้นเอนโคดเดอร์แบบโรตารี่ และแบบลิเนียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

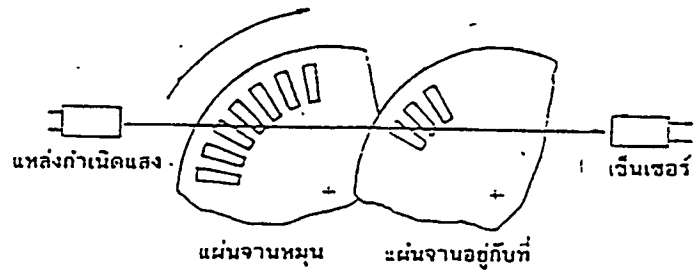


รูปที่ 4-1 ระบบเอนโคดเดอร์แบบโรตารี่

อินคริเม้นเอนโคดเดอร์ ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญคือ ตัวกำเนิดแสงจานหมุน (rotary disk) จานอยู่กับที่ และตัวเซ็นต์เซอร์บนแผ่นจานหมุนทำเป็นช่องโโยรอบดังแสดงในรูปที่ 4-3 และแผ่นอยู่กับที่จะมีช่องสำหรับให้แสดงผ่านตรงข้ามไปยังยังตัวเซ็นเซอร์ถ้าเป็นเอนโคดเดอร์ที่ใช้ความเร็วต่ำไม่จำเป็นต้องมีแผ่นอยู่กับที่ก็ได้ส่วนตัวกำเนิดแสงอาจจะเป็นหลอดไฟ หรือ LED ก็ได้ดังแสดงในรูปที่ 4-4

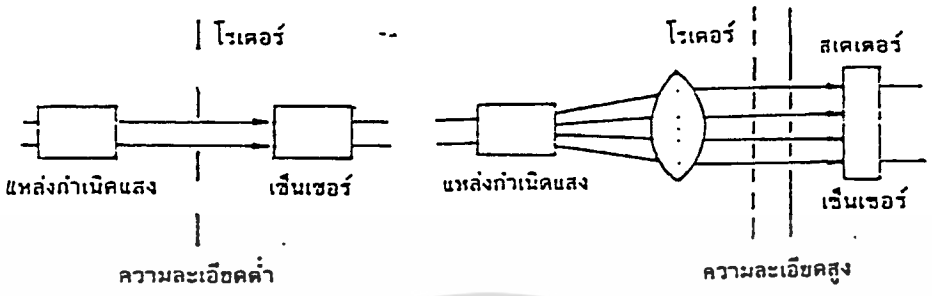


รูปที่ 4-2 อิวคริเม้นต์เอนโคดเดอร์แบบลิเนียร์



รูปที่ 4-3 ตัวอย่างกลไกของออฟโตอิวคริเม้นท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-4 แสดงถึงตัวเซ็นเซอร์แบบมีช่องปิดเปิดให้แสงผ่านได้ช่องเดียวและแบบมีหลายช่อง

<u>ความละเอียดของอินคริเม้นท์เอนโคดเดอร์</u>

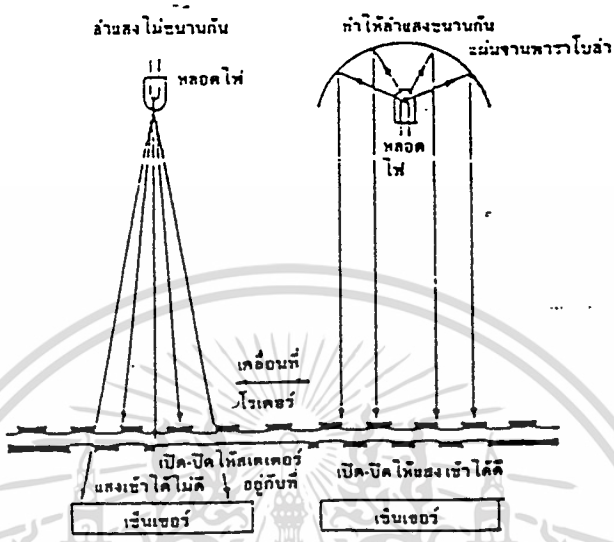
ความละเอียดของเอนโคดเดอร์ คือจำนวนคาบเวลาของสัญญาณทางเอาท์พุทต่อการหมุนของเพลาใน 1 รอบ ซึ่งบวกเป็นจำนวนฟัลซ์ต่อรอบ หรือจำนวนไซเคิลต่อ 360° มุมทางเชิงกล หรือไซเกิลต่อองศา เอนโคดเดอร์ที่ใช้กันทั่วๆไป มีค่าความละเอียดตั้งแต่ 15 ถึง 10,000 ฟัลซ์ต่อรอบ

ในทางปฏิบัติเนื่องจากแสงที่ออกจากแหล่งกำเนิดเป็นลำแสงเดียวถ้าเราต้องการที่ผ่านช่องไปยังเซ็นเซอร์เป็นเส้นตรงพร้อมๆ กัน (colimation) ก็สามารถทำได้โดยใช้เลนซ์ หรือพาราโบลิครีแฟลคเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4-5

จำนวนพัลซ์ต่อ 1 รอบสัญญาณที่เอนโคดเดอร์สร้างออกมาจะเท่ากับจำนวนช่องว่างบนแผ่นจานหมุน และความกว้างของช่องว่างกับความกว้างของแถบทึบระหว่างช่องว่างจะเท่ากัน เพราะฉะนั้นเราสามารถคำนวนหาความกว้างของช่องว่าง (W) ได้จาก

$$W = \frac{\pi D}{2N}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-5 แสดงถึงผลของแสงที่เดินในแนวเดียวกันและแสงที่แตกกระจาย

เมื่อ D = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของผ่านจาน

N = จำนวนของความละเอียดเป็นพัลซ์ต่อรอบ

W = ความกว้างของช่องว่าง

ค่าตัวแปรของสมการนี้หาได้จากรูปที่ 4-6 ถ้าให้ D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นจานหมุนของเอนโคดเดอร์ ค่าประมาณที่ใกล้เคียงมากของค่าความกว้างของช่องว่าง แสดงได้ดังนี้

$$W = \frac{0.75\pi D}{2N}$$

ตัวอย่าง ถ้าแผ่นหมุนของเอนโคดเดอร์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ต้องการค่าความละเอียด 200 พัลซ์ต่อรอบ ซึ่งจะได้ความกว้างชองช่องว่างมีค่าเท่ากับ 0.002356 นิ้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนความถี่ที่เกิดขึ้นในการวัดจะขึ้นอยู่กับจำนวนช่องว่างบนผ่านจาน และจำนวนความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ทำการวัด เราสามารถเขียนความสัมพันธ์เหล่านี้ออกมาเป็นสมการของจำนวนพัลซ์ที่เกิดขึ้นได้

$$f = \frac{N \times rpm}{60} \quad Hz$$

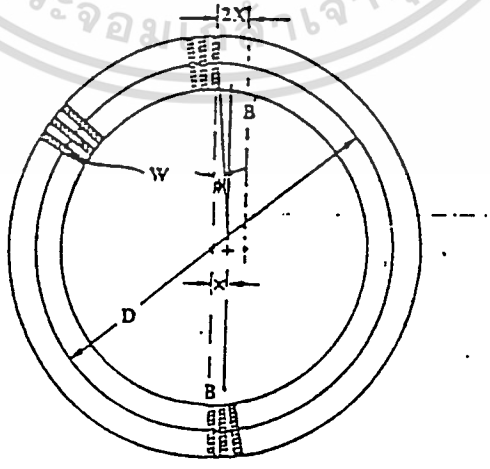
เมื่อ f = จำนวนความถี่ที่เกิดขึ้น

N = จำนวนของความละเอียดเป็นพัลซ์ต่อรอบ

rpm = ความเร็วรอบของมอเตอร์ต่อนาที

<u>เอาท์พุทของเอนโคดเดอร์</u>

โดยทั่วๆไปแล้ว สัญญาณเอาท์พุทที่ออกจากเอนโคดเดอร์โดยตรงจะมีระดับที่ไม่เพียงพอในการควบคุม หรือสำหรับประมวลสัญญาณ ดังนั้นจึงต้องมีวงจรขยาย และแปลงรูปร่างลูกคลื่นสัญญาณต่อไว้ในตัวเอนโคดเดอร์ด้วยเสมอสัญญาณลูกคลื่นที่ได้จากตัวเซ็นเซอร์ปกติแล้วจะเป็นรูปสัญญาณสามเหลี่ยม หรือรูปสัญญาณซายน์ซึ่นอยู่กับความละเอียดที่ต้องการรูปสัญญาณเหล่านี้สามารถให้เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมได้ โดยการต่อคอมพาราเตอร์เข้าลิเนียร์แอมปลิไฟล์ของเอนโคดเดอร์ก็จะได้เอาท์พุทเป็นลูกคลื่นสี่เหลี่ยมตามต้องการ



เออร์เรอร์จะเป็นลิเนียร์ = 2X/W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

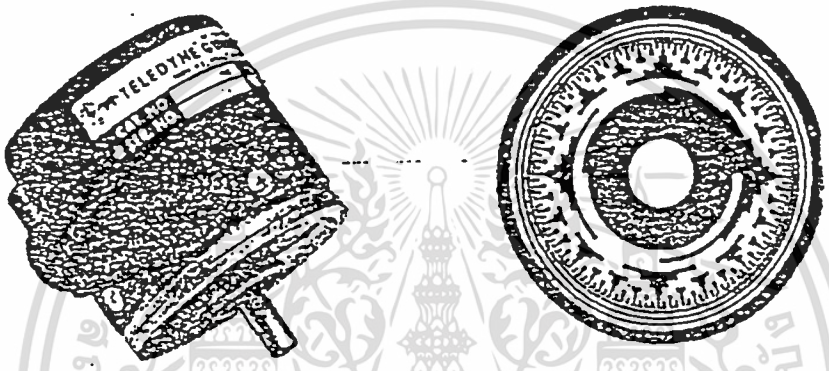
เมื่อ W ≐ πD/ความละเอียด = ความกว้างของพัลซ์

X = ความแตกต่างไปจากศูนย์กลาง (ดูจากรูป)

2X = ผลรวมคาบเวลาของเออร์เรอร์ในช่วงการหมุน 180°

D = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแผ่นจาน

รูปที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นลิเนียร์กับความไม่ได้ศูนย์กลาง



รูปที่ 4-7 โรตารี่เอนโคดเดอร์ที่มีเอาท์พุทเป็นไบนารี่

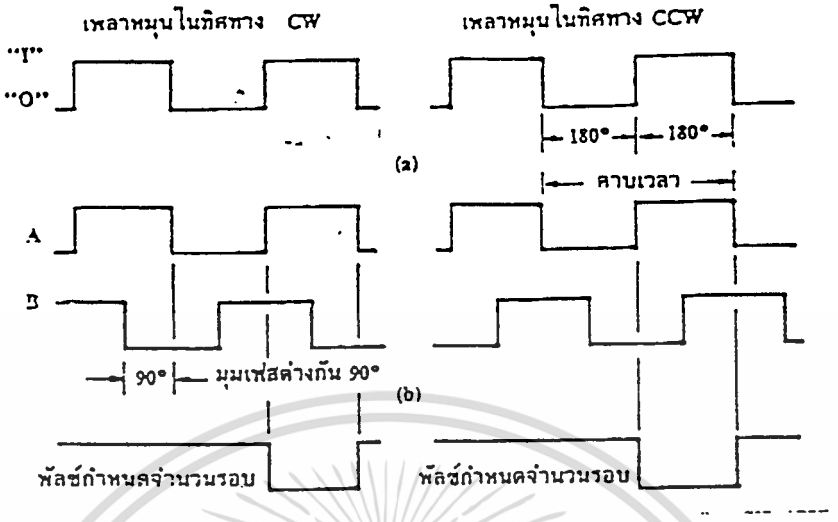
a) ลักษณะตัวอย่างแบบหนึ่ง

b) แผ่นจานภายใน

ตัวอย่างในรูปที่ 4-7 แผ่นจานภายในที่ประกอบด้วยข้อมูลไบนารี่แสดงสัญญาณ 2 ชุด ที่ได้จากเอนโคดเดอร์ชนิด 2 ช่องนี้ จะต่างกัน 90° ทางไฟฟ้า เราเรียกสัญญาณ 2 ช่องนี้ว่า "ควอตราเจอร์" (quadrature) ซึ่งเหมาะที่จะใช้ในการรับรู้ทิศทางการหมุนของเพลา และยังใช้ควบคุมระบบที่ซับซ้อนอื่นๆ จากสัญญาณในรูป 4-8 (a) จะเห็นได้ว่าสัญญาณทั้ง 2 ช่องจะเริ่มจาก 0 ถึง 1 และ 1 ถึง 0 โดยขึ้นอยู่กับทิศทางการหมุนของแผ่นหมุนของเอนโคดเดอร์

รูปที่ 4-8 (a) แสดงถึงคลื่นเอาท์พุทสี่เหลี่ยมของเอนโคดเดอร์ชนิด 1 ช่องไม่ว่าเพลาจะหมุนไปในทางทิศใดก็ได้สัญญาณออกมาเหมือนกัน จึงเหมาะที่จะใช้กับงานที่ไม่กำหนดทิศทางเท่านั้น ส่วนในรูปที่ 4-8 (b) การหมุนกลับทิศทางกันจะได้สัญญาณที่ไม่เหมือนกันจึงสามารถกำหนดทิศทางได้

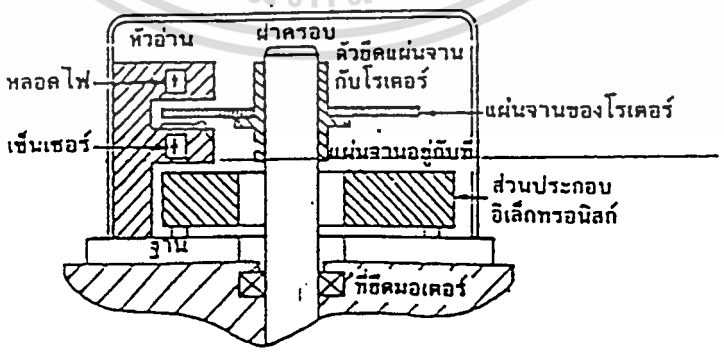
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-8 (a) ตัวอย่างลูกคลื่นเอาท์พุทรูปสี่เหลี่ยมของอุปกรณ์เอนโคดเดอร์ช่องเดียว (ไบไดเร็คชั่น)

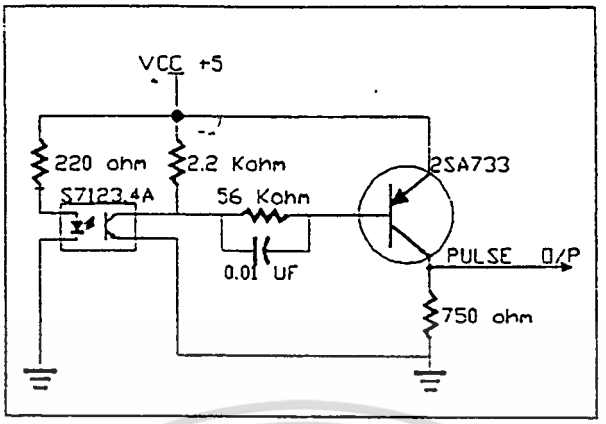
(b) ตัวอย่างสัญญาณเอนโคดเดอร์ 2 ช่อง มีมุมเฟสต่างกัน 90° (สองทิศทาง)

ในอิวคริเม้นท์เอนโคดเดอร์บางชนิด จะมีพัลซ์ที่แสดงถึงจำนวนรอบของการหมุนใช้เป็นศูนย์ในการอ้างอิงพัลซ์ที่ใช้แสดงจำนวนรอบนี้ จะเกิดขึ้น 1 พัลส์ต่อ 1 รอบ โดยทั่วไปใช้บอกถึงตำแหน่งเชิงกล หรือใช้เป็นสัญญาณเคลียร์จำนวนที่นับไว้ในหน่วยเก็บข้อมูล

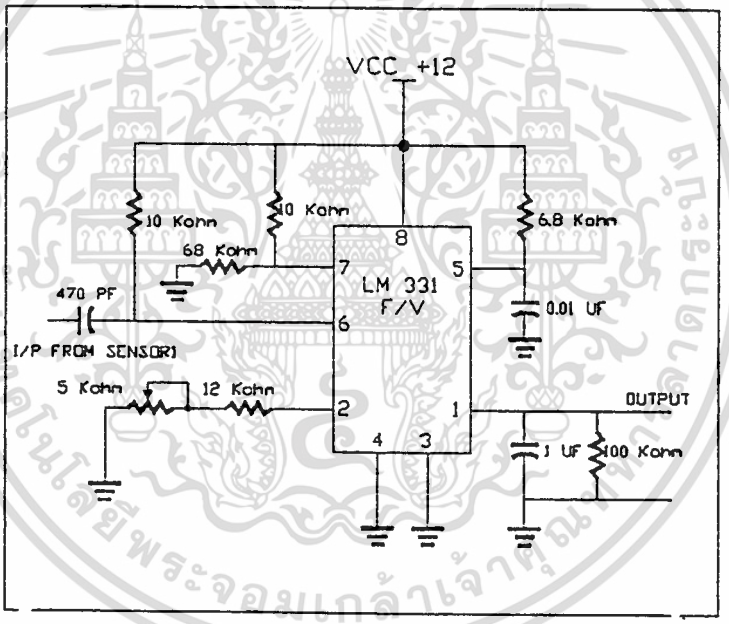


รูปที่ 4-9 ตัวอย่างส่วนประกอบของเอนโคดเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-10 วงจรการแปลงความเร็วรอบมอเตอร์เป็นความถี่



รูปที่ 4-11 วงจรการแปลงความถี่เป็นแรงดัน

การตรวจจับกำลังไฟฟ้าของโหลด

โดยปกติการหาค่ากำลังทางไฟฟ้า เรียกทับศัพท์ว่า วัตต์ นั้นตามทฤษฎี จะได้เท่ากับแรงดันคูณกับกระแส แต่เพราะโหลดทั่วไปนั้นอาจมีการเปลี่ยนแปลงเกี่ยวกับการเลื่อนเฟสกันระหว่าง แรงดัน และกระแส ซึ่งมาจากค่าอินดั๊กติฟ หรือค่าคาปาซิติฟในโหลดนั้น ๆ เพราะฉะนั้นถ้าวัดแรงดันและกระแสขณะนั้น มาหาค่าวัตต์จะไม่ได้ค่าวัตต์จริงของโหลดนั้น ที่รวมถึงรูปแบบของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าในโหลด จะต้องเป็นรูปซายน์บริสุทธิ์เท่านั้น และเป็นวิธีหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ง่ายในการคำนวณค่าวัตต์จริง สามารถทำได้โดยใช้ไอซีเบอร์ MC 1495L เป็นไอซีคูณแรงดันไฟฟ้าสองค่ากับ ค่าคงที่ค่าหนึ่งโดยจะนำแรงดันที่ตกคร่อมโหลด และ กระแสที่ไหลผ่านโหลดแล้วเปลี่ยนเป็นแรงดันแล้วมาคูณกัน และคูณกับค่าที่คงที่ค่าหนึ่ง ผลที่ได้จากการคูณค่าทั้ง 3 เข้าด้วยกัน จะออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้าค่าหนึ่ง ที่สามารถนำไปแสดงผลในภาคแสดงผลต่อไปได้

แต่มีอีกหลายวิธีโดยการใช้หลังการคล้าย ๆ กันคือเป็นการที่แปลงแรงดันที่จะนำมาวัดให้มีแรงดันที่ต่ำลง และเปลี่ยนแปลงค่ากระแสให้อยู่ในรูปของแรงดันต่ำ และนำค่าแรงดันของทั้งสองค่ามาคูณกัน หรือนำมาเปรียบเทียบกัน โดยจะให้แรงดันที่เปลี่ยนแปลงแปลงมาเป็นแรงดันต่ำนั้นเป็นค่าคงที่ เพราะเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าของกำลังทางไฟฟ้านั้นจะเกิดการเปลี่ยนแรงของกระแสของโหลด และค่าของเพาเวอร์แฟคเตอร์ หรือการเลื่อนเฟสกันระหว่าแรงดัน กับกระแสของโหลด และนำค่ามีที่คูณกันทั้งสองค่านั้น มาคูณกับ ค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบการเลื่อนเฟสของแรงดันที่โหลด กับกระแสที่ไหลเข้าในโหลดดังรูปที่ 4-12

การตรวจจับแรงดันไฟฟ้าของโหลด

โดยทั่วไปแรงดันที่ทำการวัดจากโหลดนั้น เป็นแรงดันระหว่างสายลายน์ กับลายน์ (Line-Line) ไม่ใช่เป็นค่าของแรงดันที่เฟส กับเฟส (Phase-Phase) ที่มีค่าแรงดันสูงจึงต้องทำการแปลงแรงดันให้มีค่าของแรงดันต่ำ และทำการผ่านเรกติฟายต์ เพื่อทำให้เป็นแรงดันไฟฟ้าจะได้ค่าของการแปลงแรงดันทางด้านแรงดันโหลดของโหลด แรงดันไฟฟ้าตรงก็มีการเปลี่ยนแปลงเป็นค่าไฟฟ้าค่าหนึ่ง ที่สามารถนำไปแสดงผลในภาคแสดงผลต่อไปได้ดังรูปที่ 4-13

การตรวจจับกระแสไฟฟ้าของโหลด

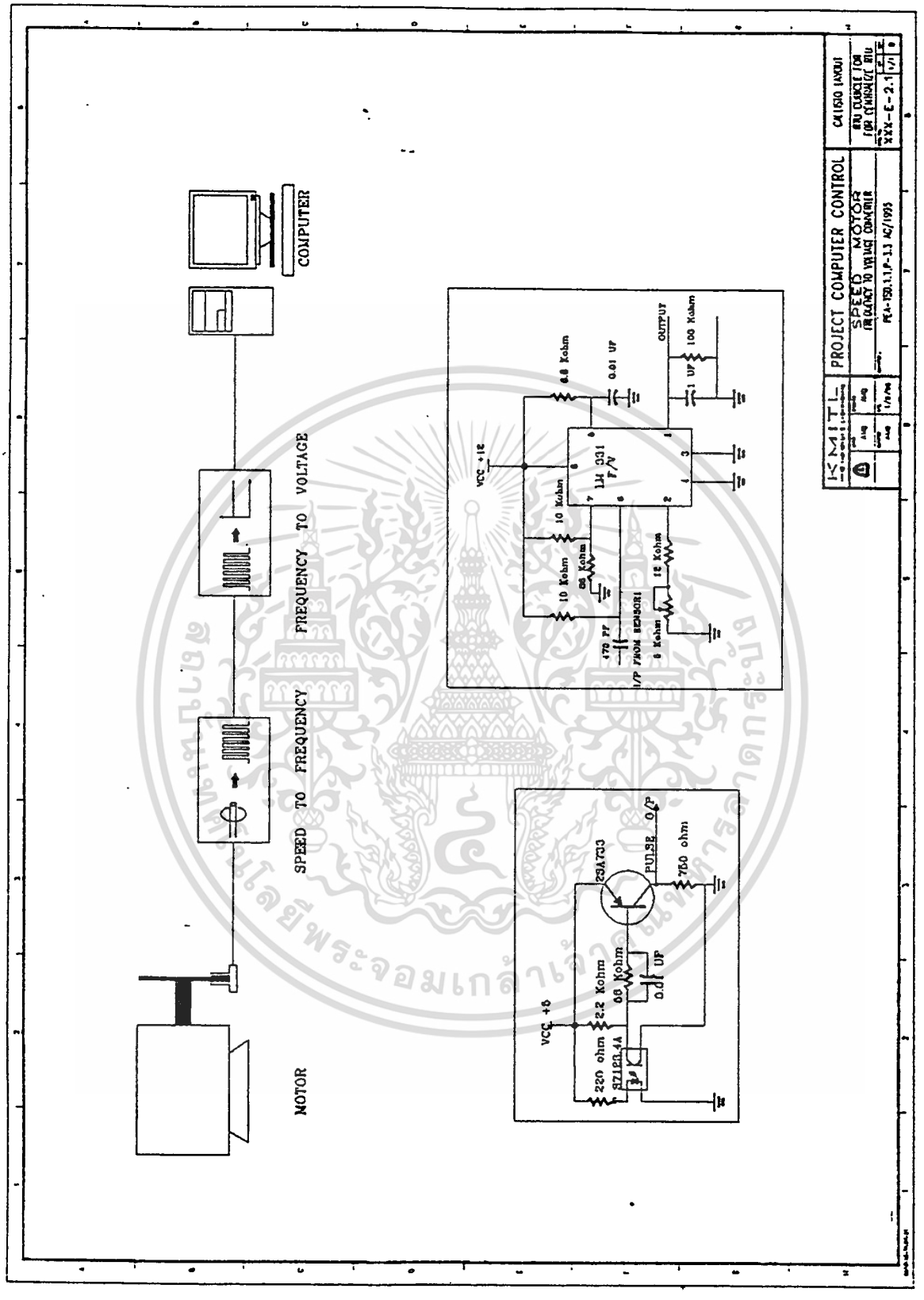
โดยทั่วไปการวัดกระแสไฟฟ้าของโหลด หรือในระบบไฟฟ้าแรงสูงจะไม่นำกระแสไฟฟ้าของโหลดผ่านตัววงจรเครื่องวัดโดยตรง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสของโหลดนำมีการเปลี่ยนแปลงที่สูงในสภาวะไม่ปกติ ดังนั้นจึงนิยมใช่หม้อแปลงกระแสมาทำการเปลี่ยนแปลงค่าของกระแสโหลด เพื่อจะนำมาทำการวัด โดยการเปลี่ยนแปลงเป็นกระแสไฟฟ้าตรง และจะออมาเป็นแรงดันไฟฟ้าค่าหนึ่ง ที่สามารถนำไปแสดงผลในภาคแสดงผลต่อไปได้ดังรูปที่ 4-14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตรวจจับความถี่ของโหลด

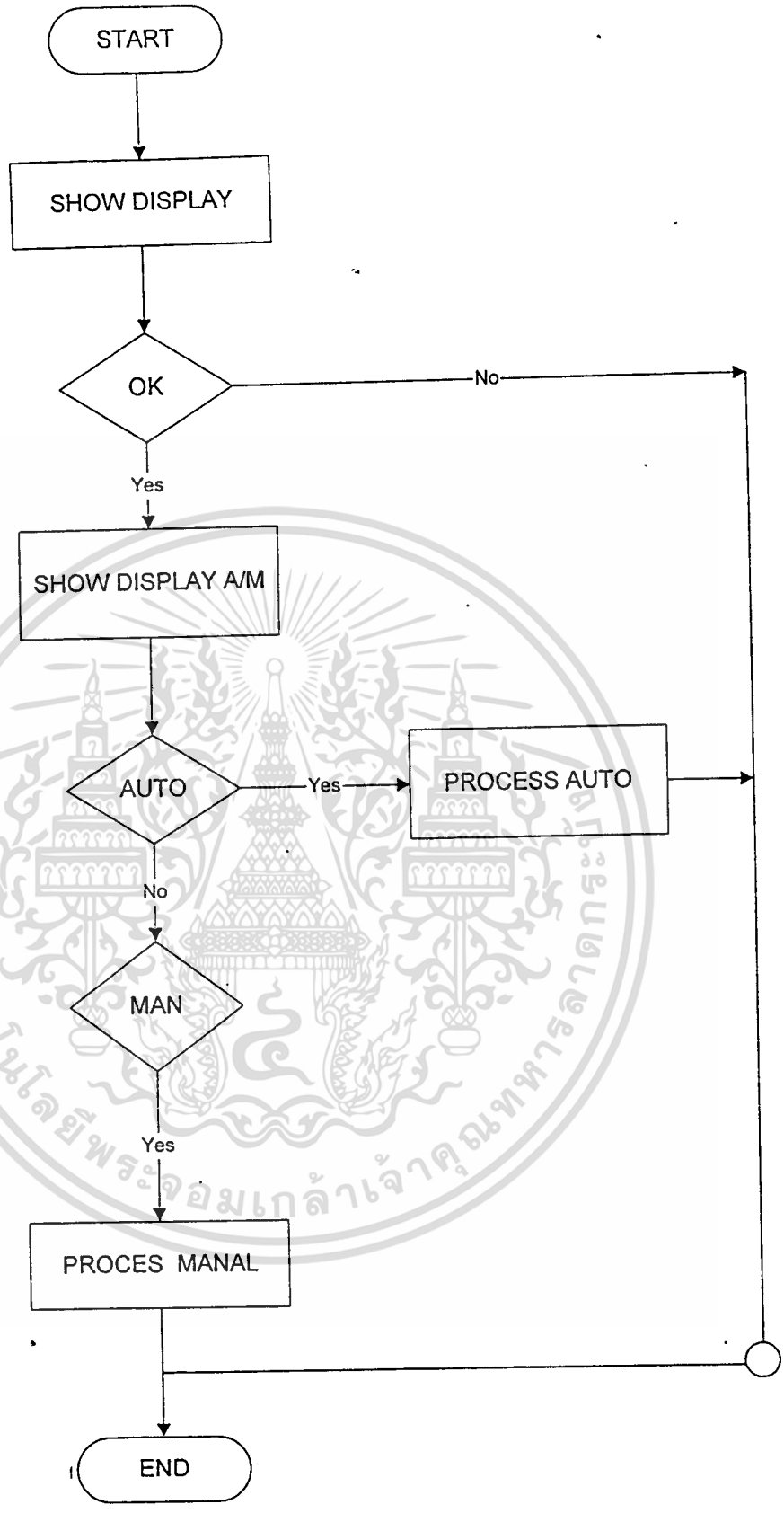
โดยปกติการหาค่าของความถี่ของโหลดนั้น ความถี่ของโหลดอยู่ในรูปของซายน์ (Sine Wave) ดังนั้นจึงต้องทำการเปลี่ยนซายน์ ในอยู่ในรูปของสัญญาณสี่เหลี่ยม และใช้ไอซีทำการเปลี่ยนค่าของความถี่มาเป็นค่าของแรงดัน จึงออกมาเป็นค่าของแรงดันดังรูปที่ 4-15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



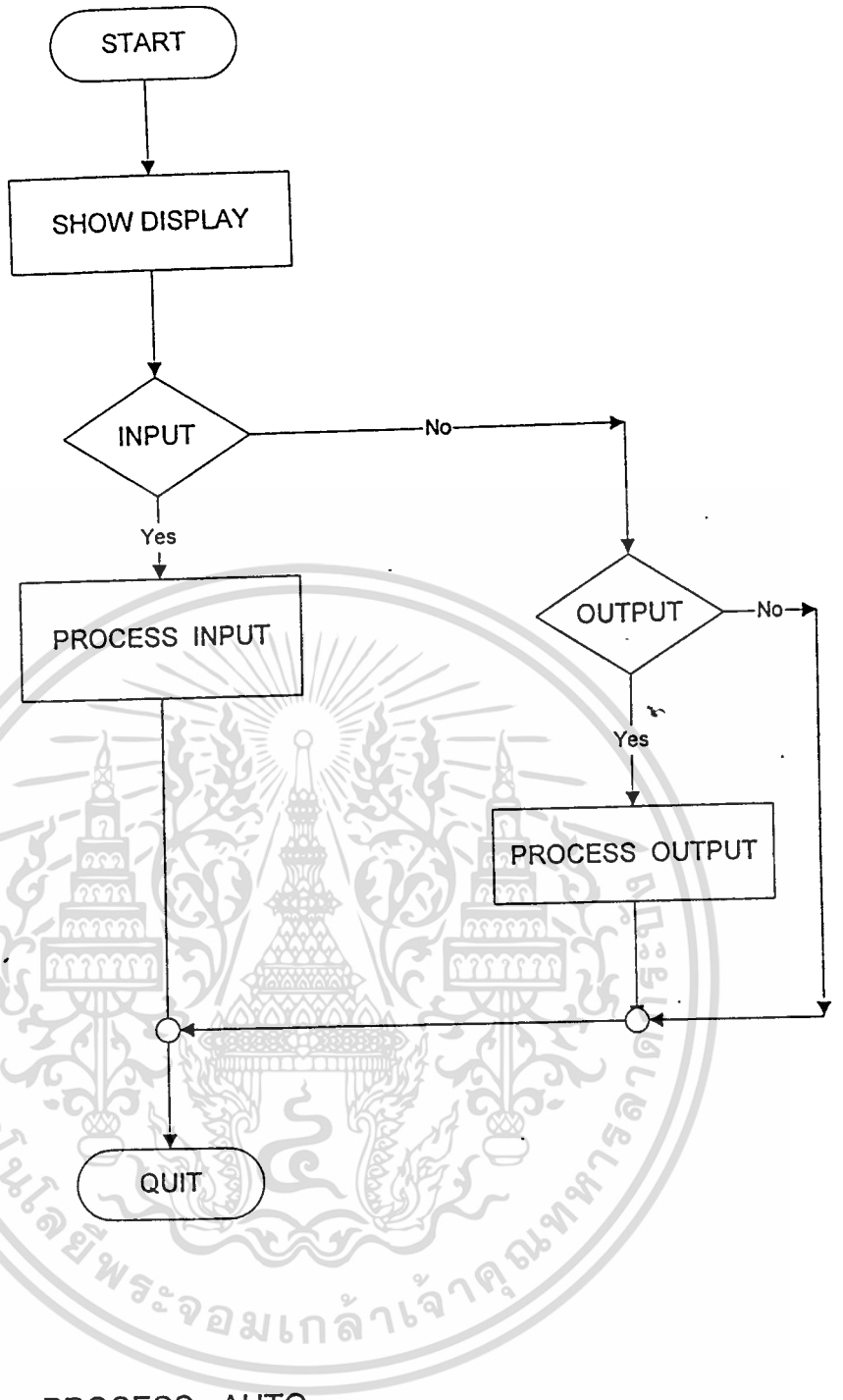
รูปที่ 4-16 ลักษณะการใช้คอมพิวเตอร์มีตรวจจับความเร็วของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



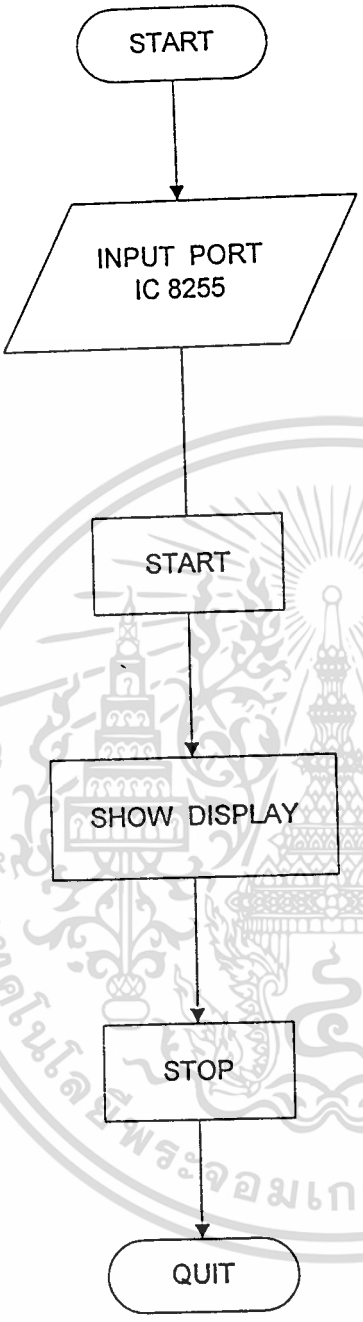
MAIN PROGRAM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



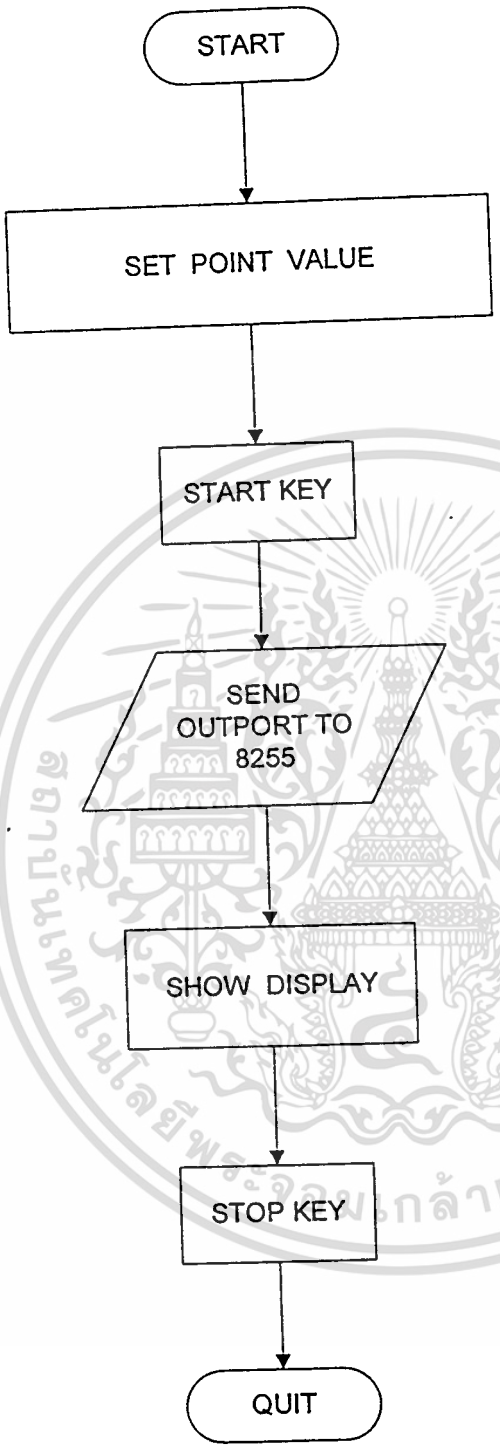
PROCESS AUTO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



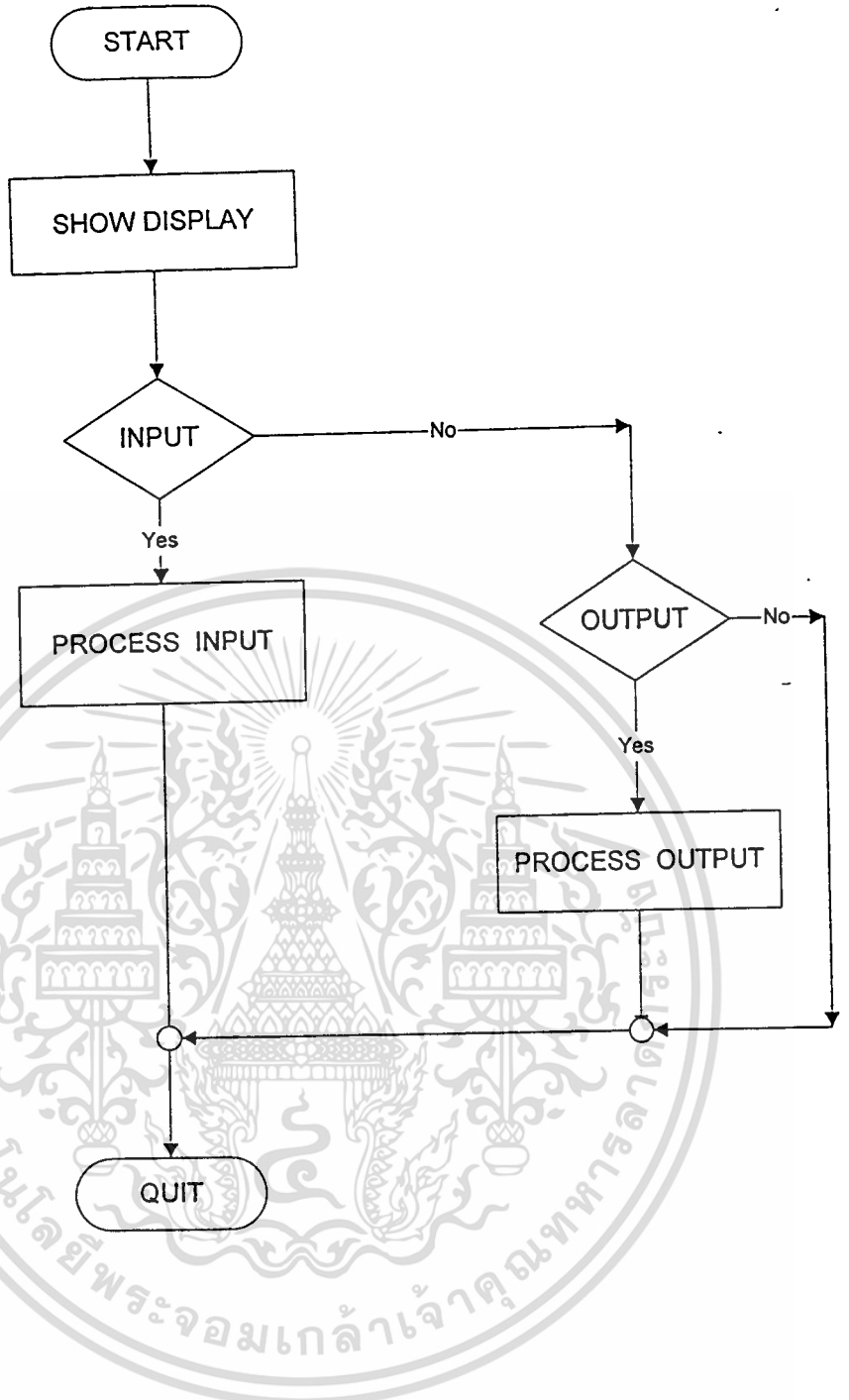
PROCESS INPUT AUTO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



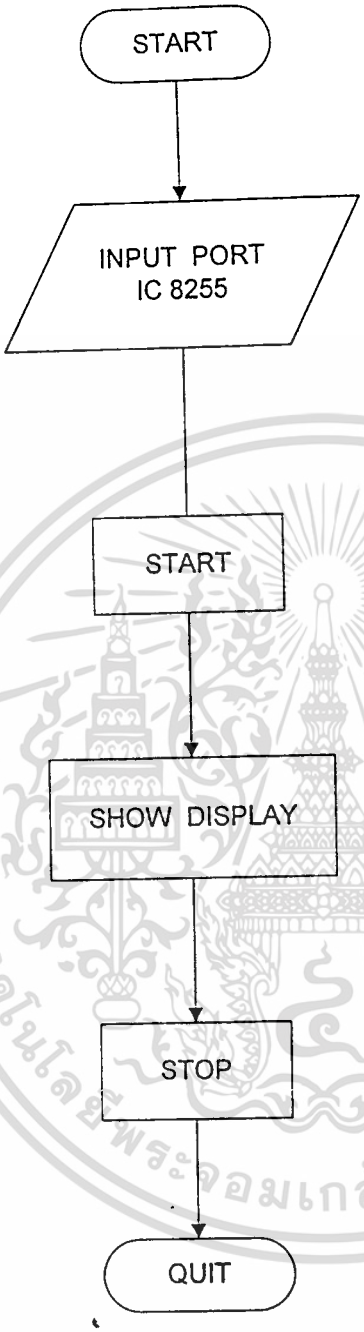
PROCESS OUTPUT AUTO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



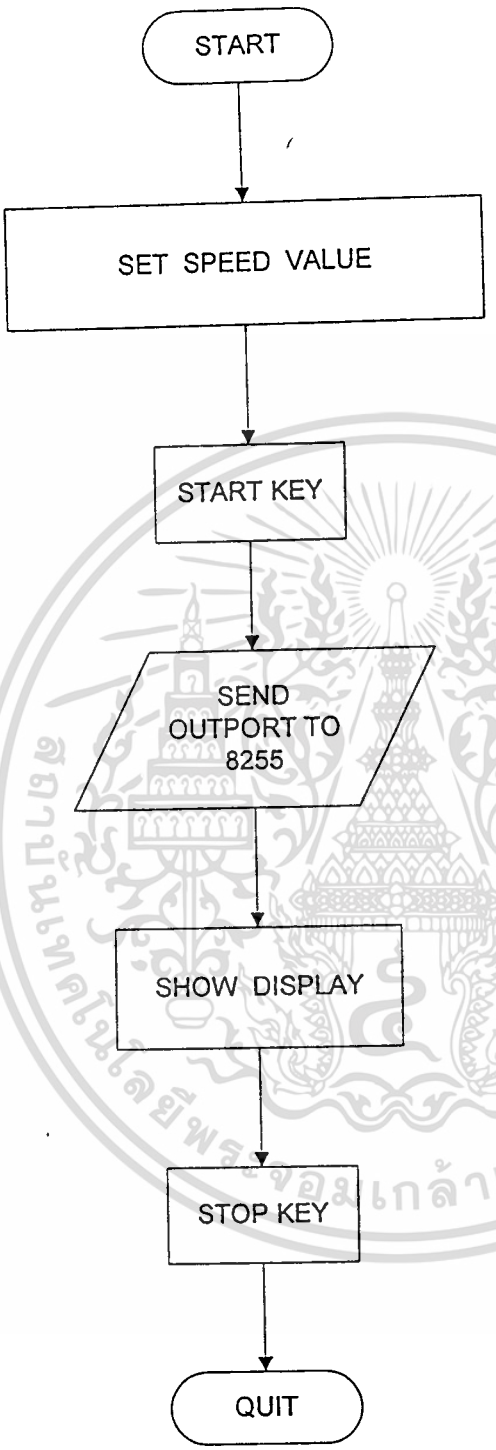
PROCESS MANUAL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PROCESS INPUT MANUAL

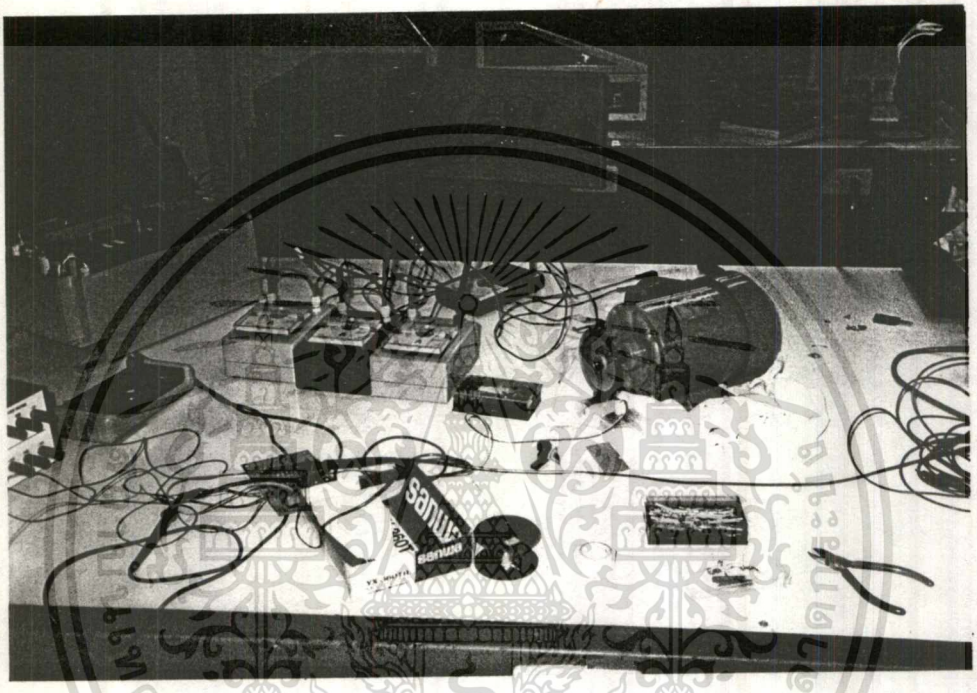
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

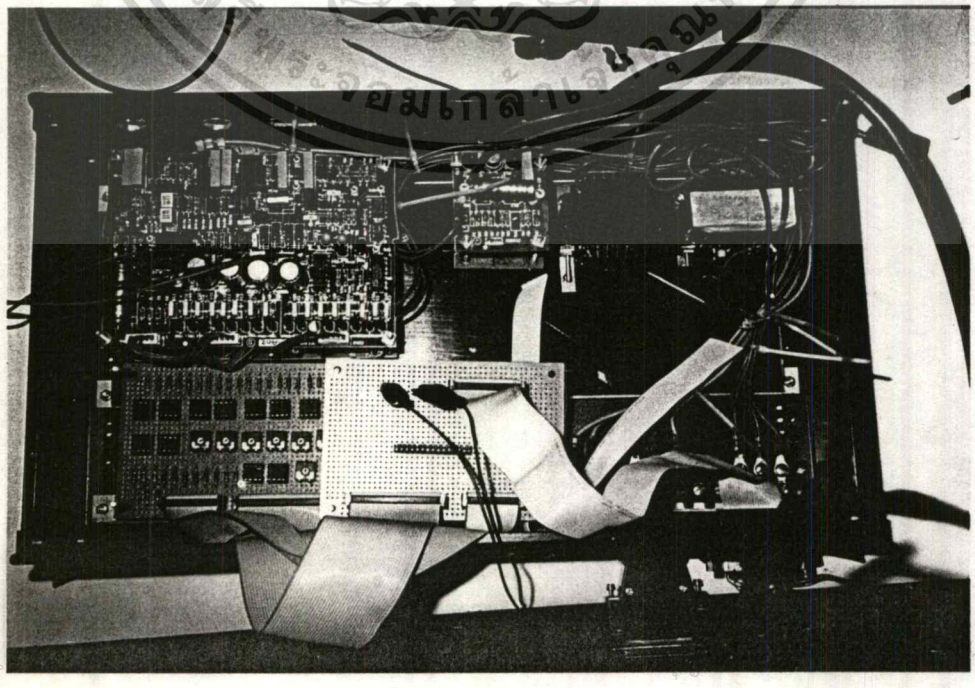


PROCESS OUTPUT MANUAL

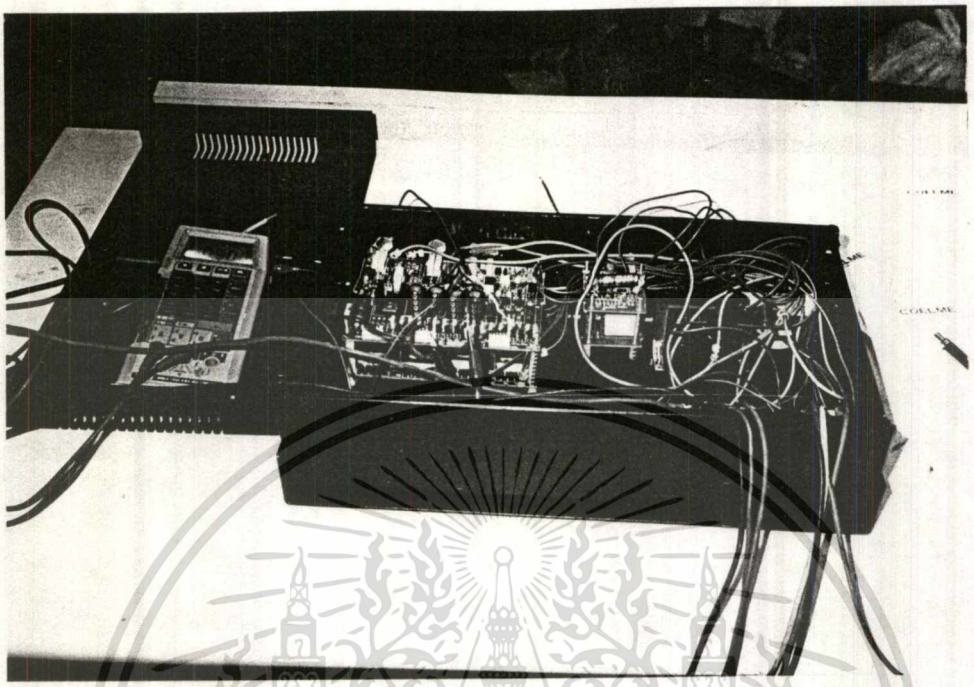
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

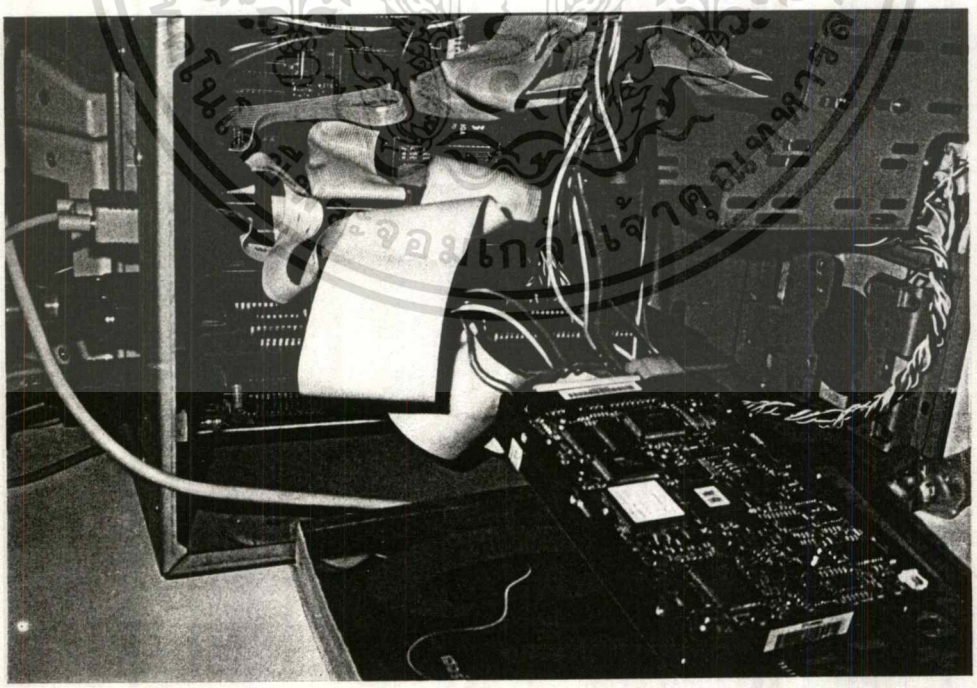
บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง



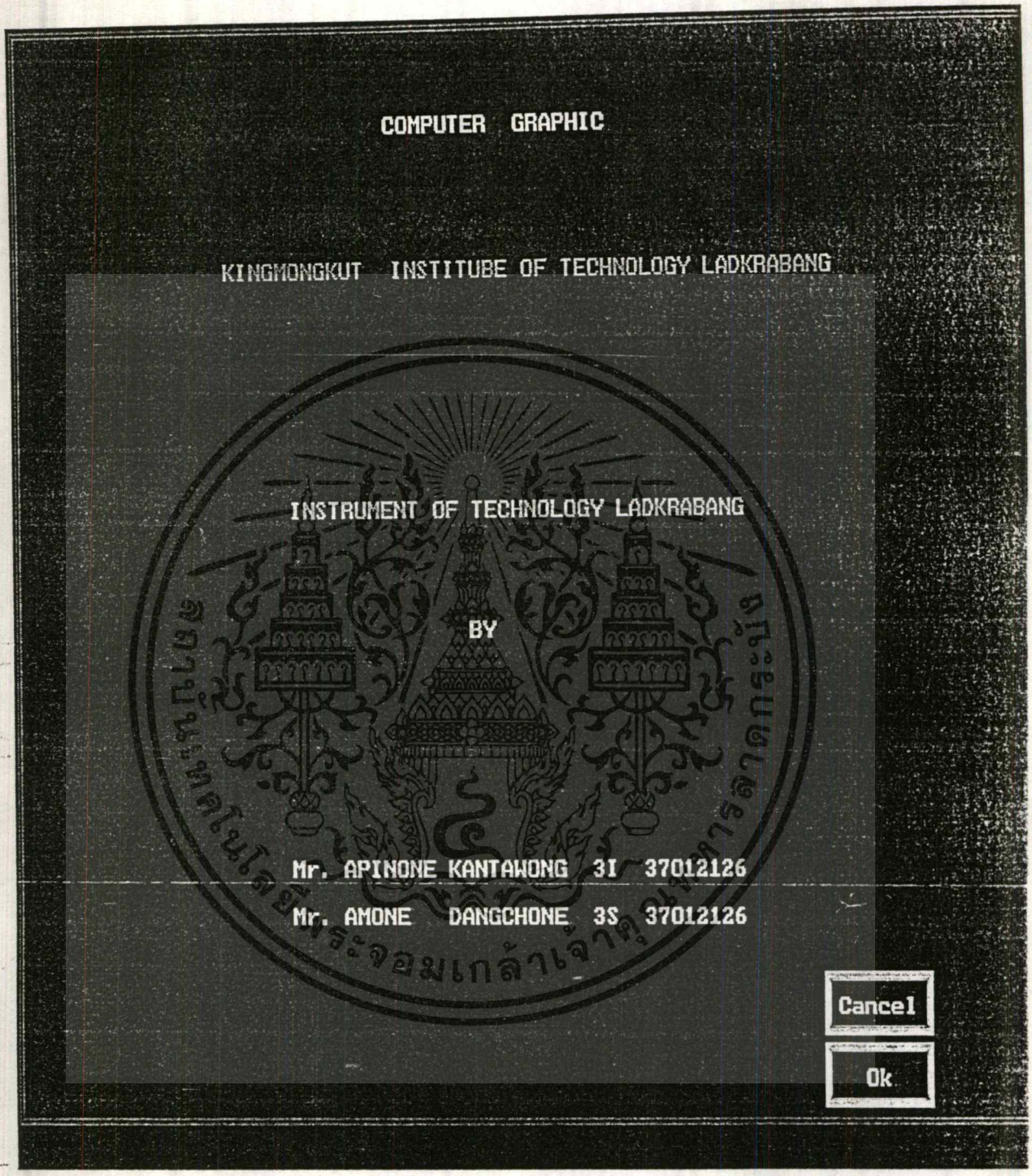


เอกสารนี้เป็นเ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
านการค้า

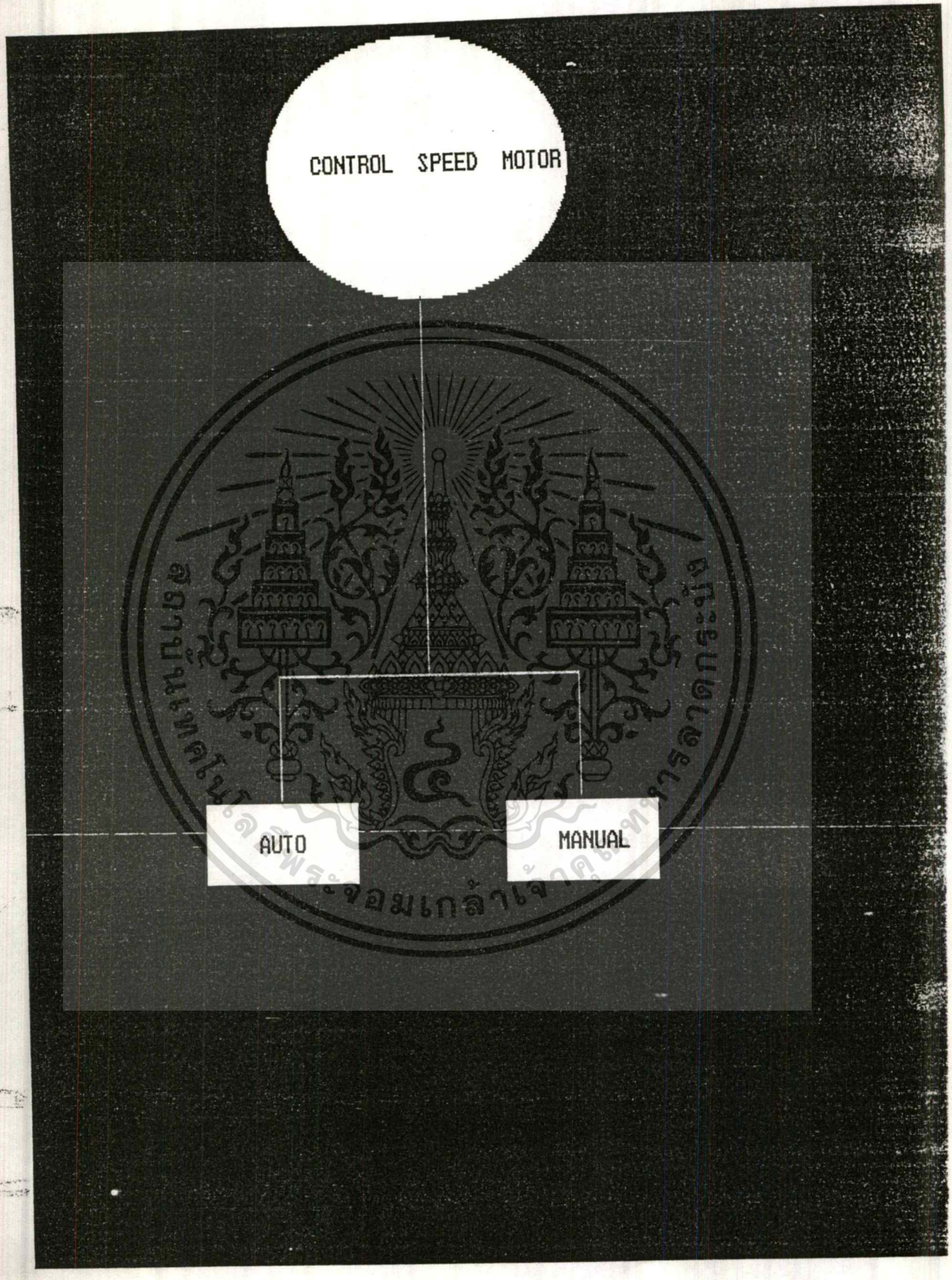




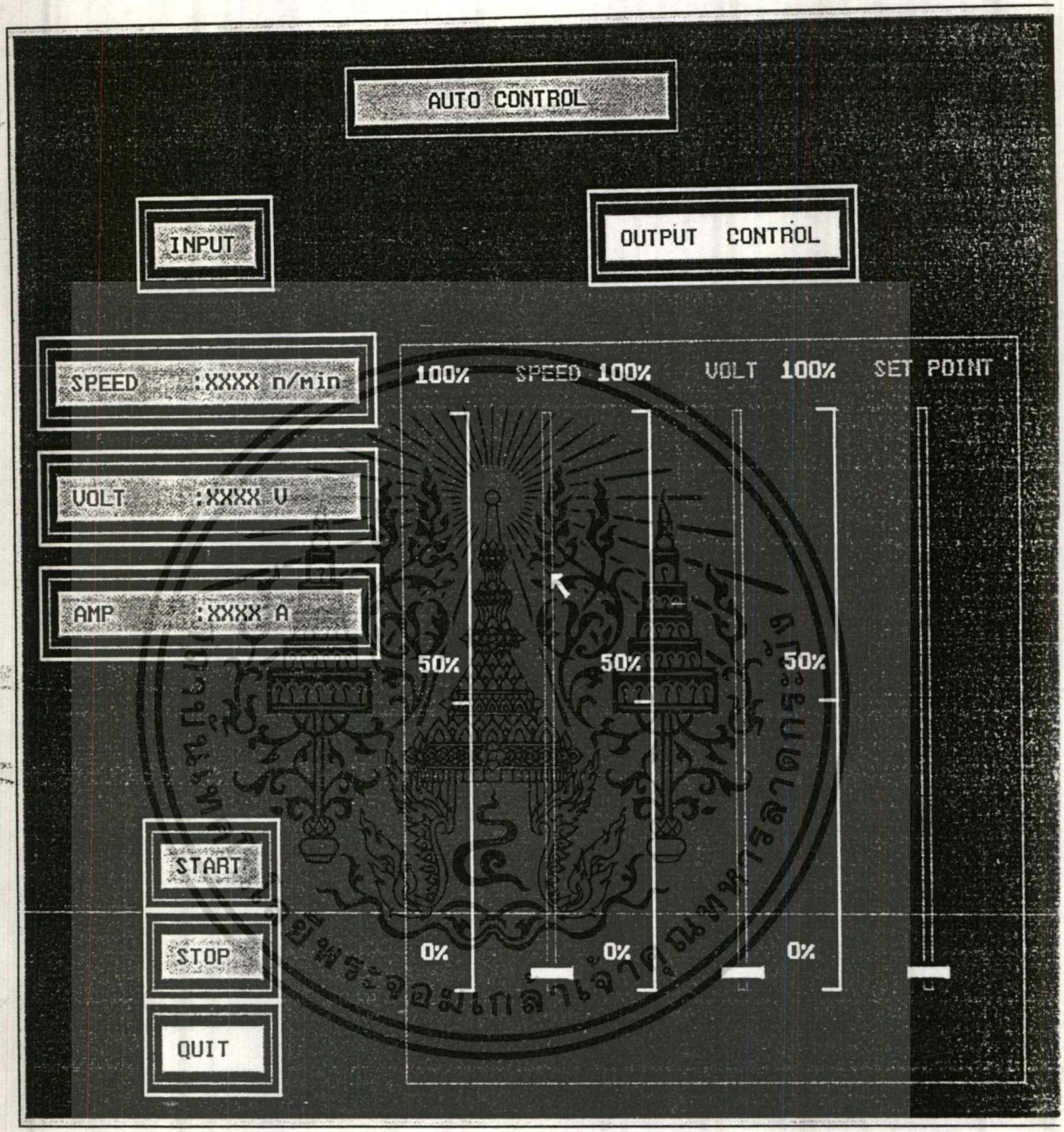
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



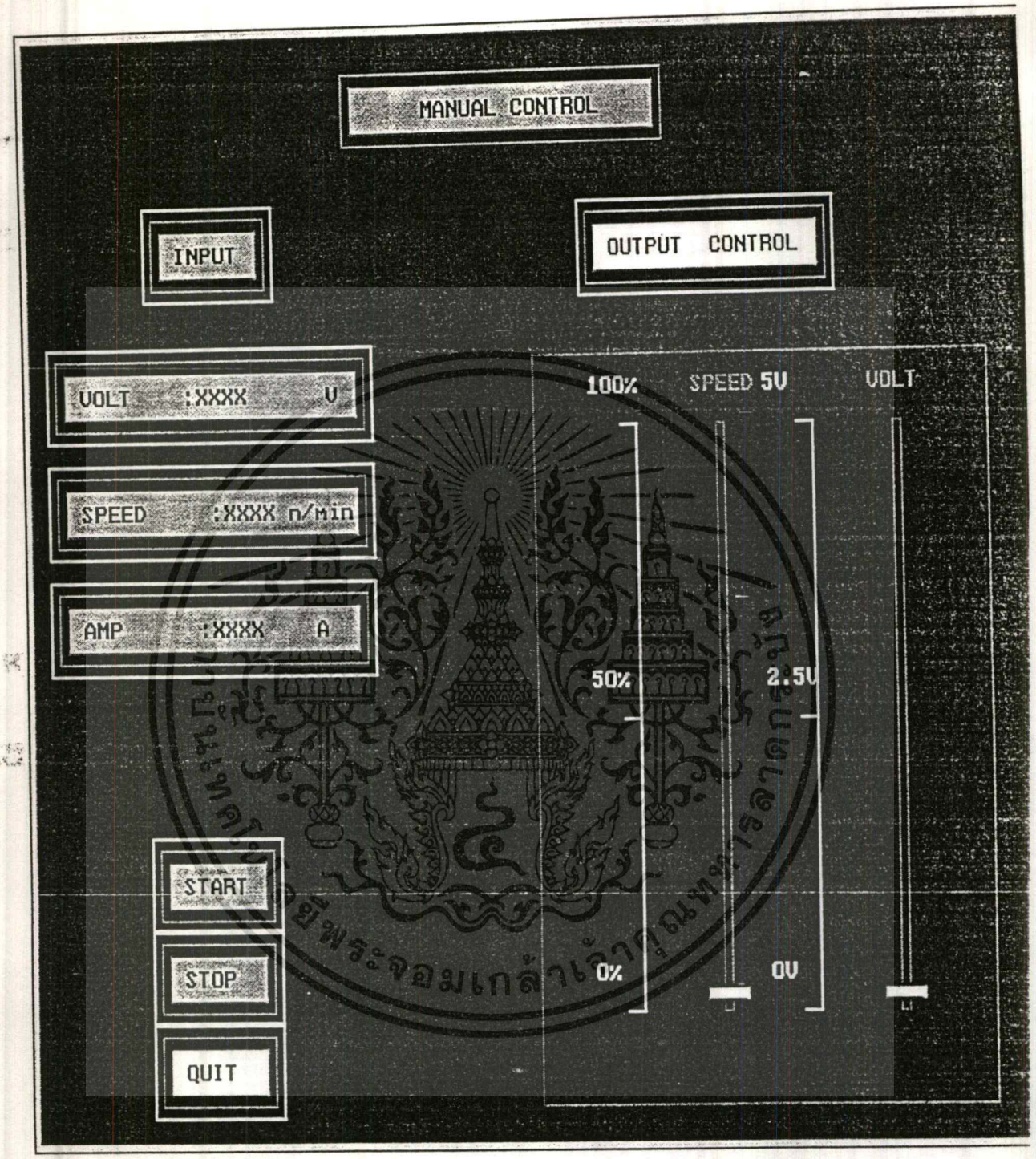
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



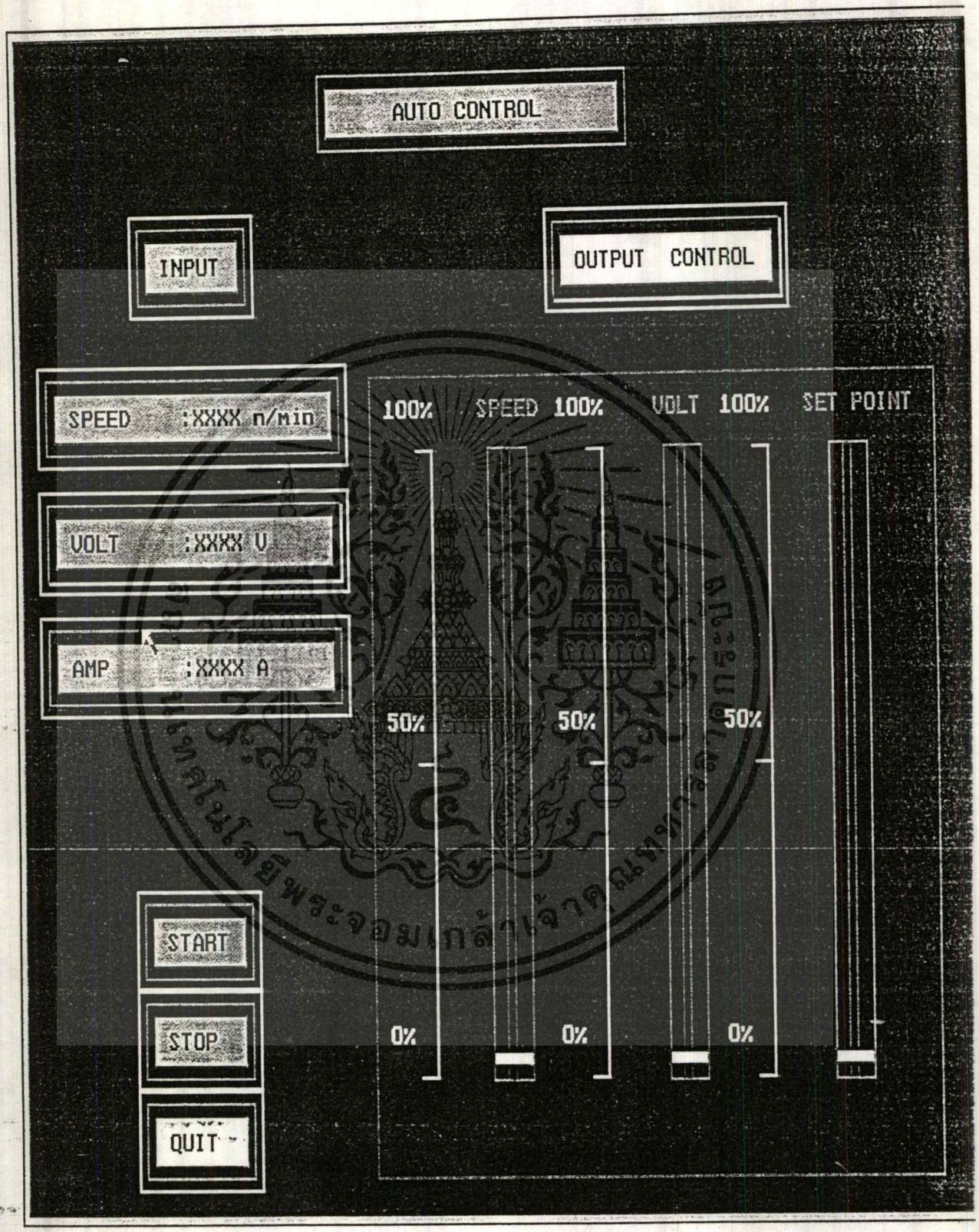
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



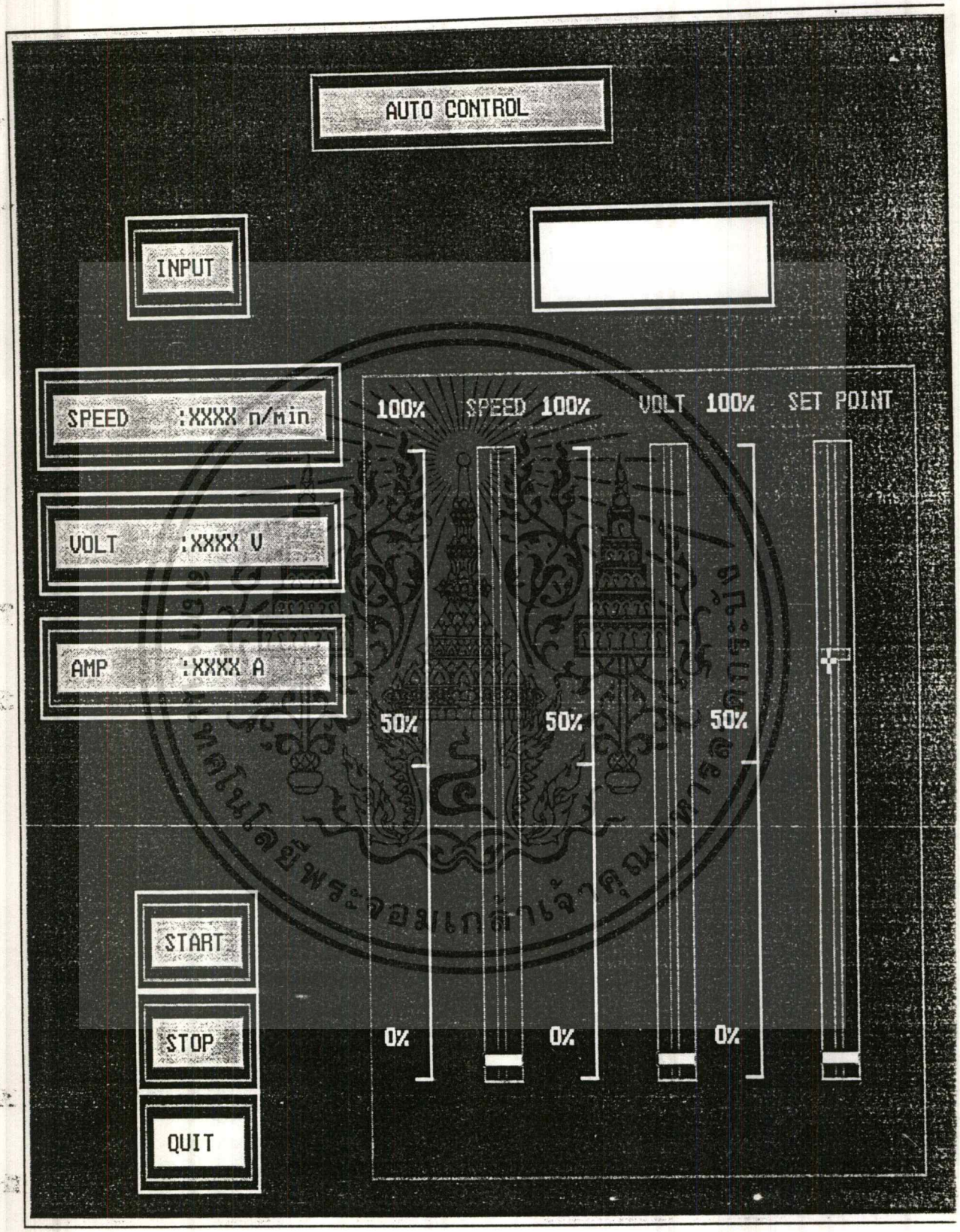
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



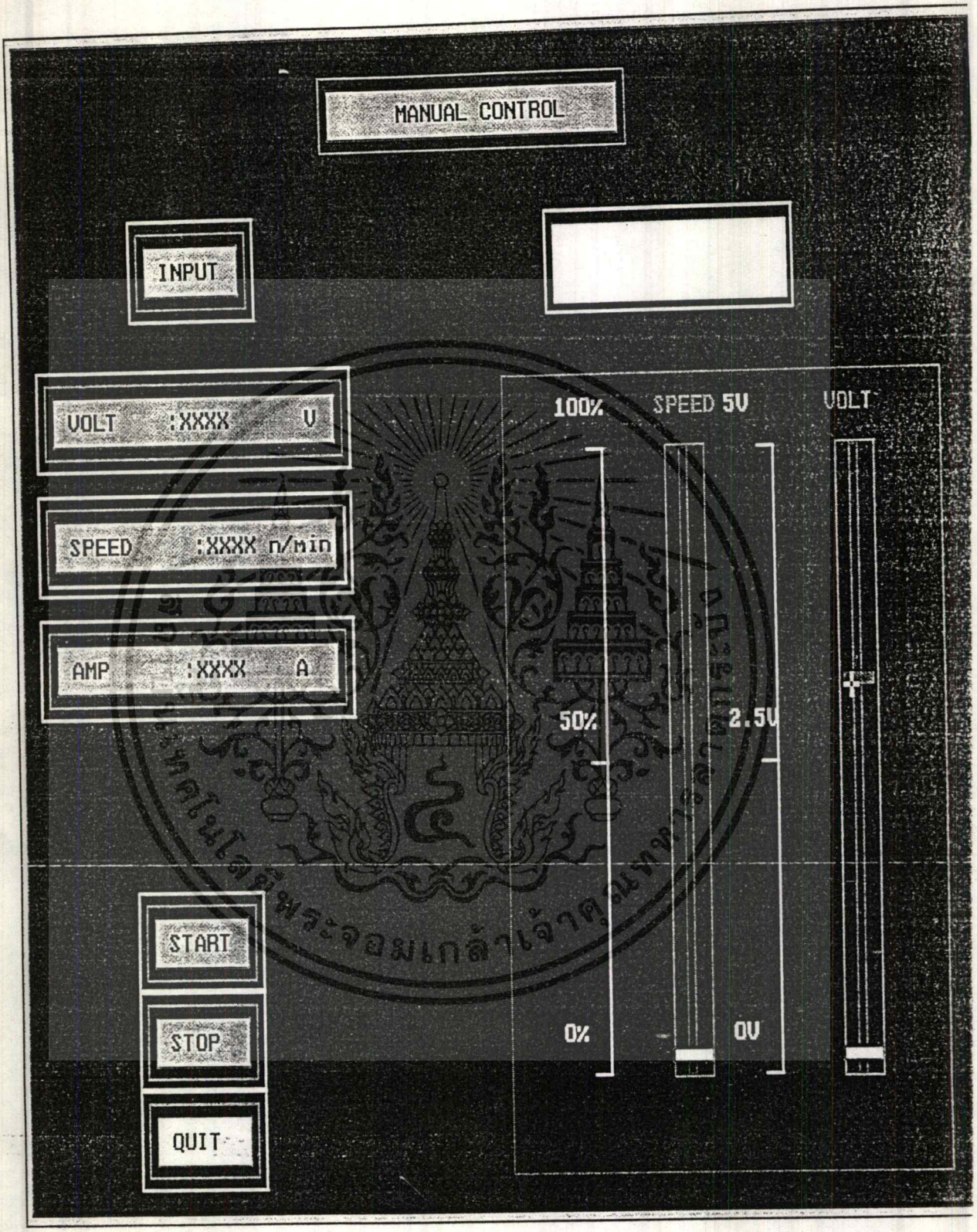
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



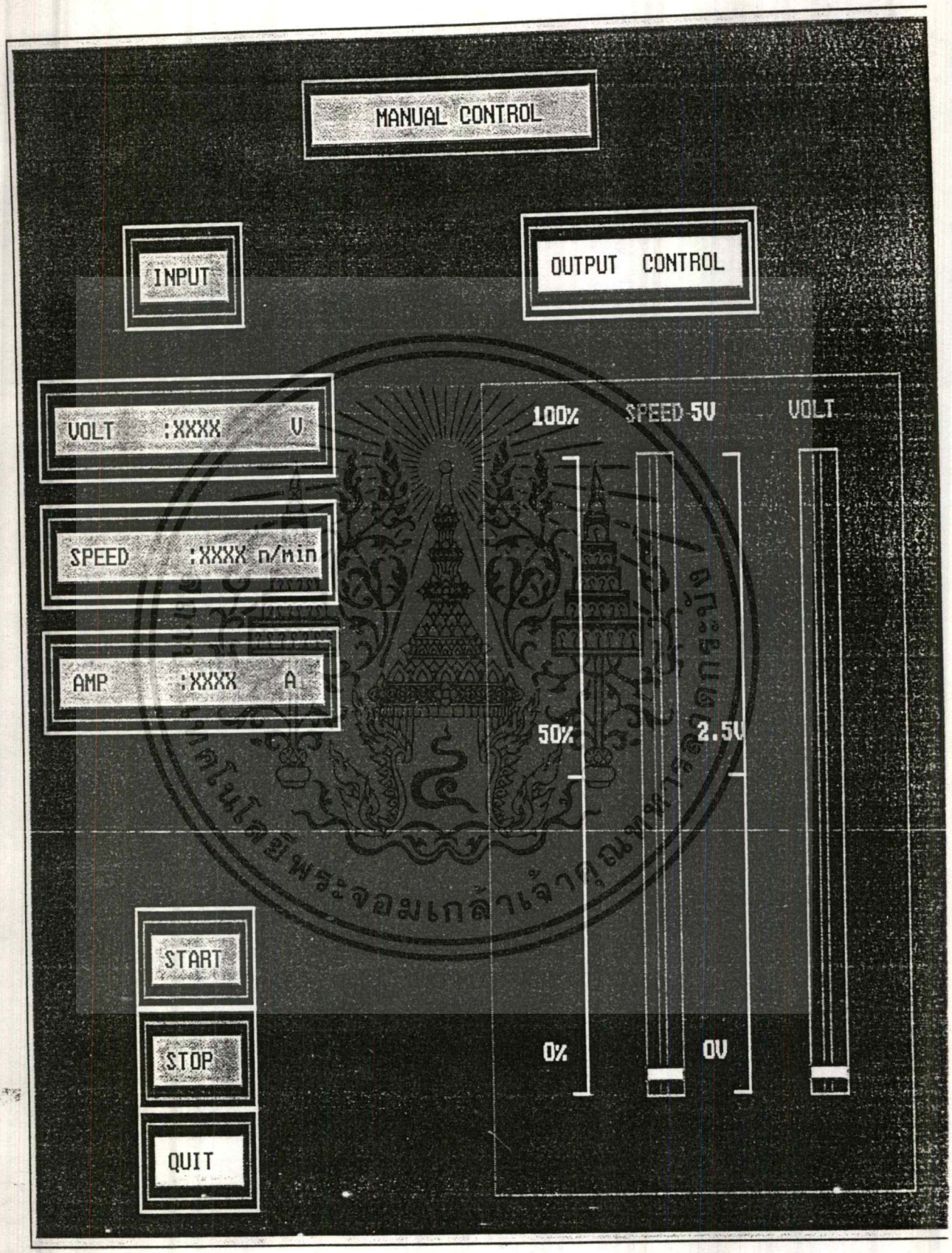
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การพัฒนาและวิจารณ์สรุปผล

เนื่องจากโครงงานที่ได้จัดทำขึ้นนี้เป็นโครงงานที่มุ่งเน้นแนวปฏิบัติการทางอุตสาหกรรมโดยใช้เทคโนโลยีที่มีความสามารถสูงในปัจจุบันเข้ามาเป็นตัวทดลองและประมวลผล นั้นก็คือ คอมพิวเตอร์ (Computer) โดยใช้โหมดกราฟฟิกเป็นตัวแสดงผลการทดลองซึ่งมีความง่ายต่อการดูผลการทำงาน

แนวทางการพัฒนา

จากโครงงานเราสามารถทำการรับ-ส่งข้อมูลติดต่อกับ Computer ผ่านทาง Card Interface ระหว่างอุปกรณ์ภายนอกและตัวคอมพิวเตอร์เองได้จริง แต่เป็นการควบคุมการทำงานและแสดงผลได้ ใน Loop เดียวเท่านั้น เราสามารถนำหลักการนี้มาปรับปรุงและพัฒนาเพื่อให้มีการรับ-ส่งข้อมูลและแสดงผลได้มากกว่า 1 Loop ขึ้นไปเพื่อเป็นการทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น

วิจารณ์และสรุปผล

จากการทดลองจะเห็นว่าส่วนที่สำคัญที่สุดในการทำงาน คือ ส่วนของการติดต่อระหว่าง อุปกรณ์ภายนอกกับคอมพิวเตอร์นั้นเองที่ เรียกการอินเตอร์เฟสโดยผ่าน Card I/O Port ซึ่งจากโครงงานที่จัดทำขึ้นเองก็มีปัญหาทางการติดต่อนี้เหมือนกัน ทางที่จะแนะนำก็คือ ควรจัดซื้อ CardInterface มาใช้ไม่ควรทำขึ้นมาใช้เองเพราะจะมีปัญหาทางการรับ-ส่งข้อมูลที่ไม่แน่นอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

<u>วิธีการใช้งาน Program</u>

1. ใช้กับ Computer ที่มี Program Turbo C
2. เมื่อเข้าใน Program Turbo C ให้ทำการเปิด file KRAN 23.C
3. เมื่อเข้าใน file KRAN23 .C แล้วหน้าจอคอมพิวเตอร์จะ Show หน้าจอการทำงาน และเมื่อต้องการเข้าใน Program ก็กดปุ่ม OK แต่เมื่อต้องการยกเลิกก็ทำการกดปุ่ม Cancel
4. เมื่อกดปุ่ม OK จะ Show Menu ให้เลือกระหว่าง Auto Control หรือ Manual Control
5. เมื่อเลือกกดปุ่ม Auto Control จะเข้าใน Mode ของการควบคุมแบบ Auto เมื่อจะเลือกใน Mode การรับค่า Input เข้ามาแสดงผลข้อมูล ก็เลือกที่ Menu Input แต่ถ้าต้องการที่จะส่งค่าออกไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอก ก็เลือกที่ Menu Output

   <u>Menu Input</u>

   - สามารถรับค่าที่มาแสดงผลได้ 3 ค่า คือ Speed , Volt ,Amp

   <u>Menu Output</u>

   - เลือกที่ปุ่ม Output , Program จะกระโดดไปทำงานที่แถบ Menu Setpoint และสามารถเลื่อนแถบขึ้นลงเพื่อส่งค่าออกไปควบคุมได้ด้วย Key Board ลูกศรและกดปุ่ม Enter เพื่อส่งค่า
6. เมื่อเลือกกดปุ่ม Manual Control จะเข้าใน Mode ของการควบคุมแบบ Manual เมื่อจะเลือกรับหรือส่งข้อมูล ก็ทำการเลือกที่ Menu Input หรือ Menu Output

   <u>Menu Input</u>

   - สามารถรับค่าเพื่อมาแสดงผลได้ 3 ค่า คือ Speed , Volt , Amp

   <u>Menu Output</u>

   - เลือกที่ปุ่ม Output , Program จะกระโดดไปทำงานที่แถบ Menu Volt และสามารถเลื่อนแถบขึ้นลงเพื่อส่งค่าออกไปควบคุมได้ด้วย Key Board ลูกศรและกดปุ่ม Enter เพื่อส่งค่า
7. Program สามารถควบคุมได้โดยใช้ Key Board ลูกศร หรือ ใช้ Mouse ช่วยในการควบคุมก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

ณรงค์ ชอนตะวัน. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ, สำนักผู้ตรวจราชการกรมอาชีวศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ กรุงเทพ 2530

รศ.สัมพันธ์ หาญชเล เครื่องกลไฟฟ้า2, ภาควิชาวิศกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี กรุงเทพ 2519

ธานินทร์ ถาวรศาสนวงศ์, ทินกร คุ๊ก การอินเทอร์เฟส, หจก.สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์ กรุงเทพ 2536

กลุ่ม CNS ออปแอมป์, หจกสำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์ กรุงเทพ

วิสันต์ อาชาเดโชพล คอมพิวเตอร์ขนาดเล็กและการประยุกต์ใช้งาน, หจก.สำนักพิมพ์ฟิสิกเซ็นเตอร์ กรุงเทพ

สุนทร วิทูสุรพจน์ การใช้งานไมโครคอมโทรเลอร์ ตระกูล 8051, บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่นจำกัด (มหาชน)

พ.อ. เจนวิทย์ เหลืองอร่าม การเขียนโปรแกรมแบบ OOP ด้วย Borland C++, บริษัท พีพริ้นติ้ง จำกัด

เฮอร์เบิร์ต ชิลด์, ขจร โรจนเมรินทร์ เทคนิคการเขียนโปรแกรม Turbo C++ สำหรับ Windows, บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน)

MARCO CANTU' AND STEVE TENDON Borland C++ 3.1 Object - Oriented Programming., Produced by The Coriolis Group

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ก็ด้วยความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่านโดยเฉพาะ

อาจารย์ ไสว เหล้าไม้ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำแนะนำโดยตลอด

บริษัท PRICISE ELECTRIC MENUFACGERRING ให้บริการเกี่ยวกับห้อง LAB การทดลอง

บริษัท THANAVIT INTER Co,Ltd ให้บริการเกี่ยวกับ LAB ทดลอง

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำโครงงานจึงขอขอบคุณแก่หน่วยงานและผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งมีส่วนทำให้โครงงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณ ณ โอกาสนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้