



พ.ศ. ๒๕๖๑

การรักษาสภาวะซิงโครไนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
โดยใช้เครื่องฟลักซ์เวกเตอร์ซิงโครฟ

SYNCHRONIZATION CONTROL OF THREE-PHASE INDUCTION
MOTOR USING FLUX VECTOR AC DRIVE



โดย
นายคณิต ทัดสุวรรณ
นายจำเนียร ภูธร
นายทวีชัย มุทธสวัสดิ์

วัน เดือน ปี..... 30. ก.ย. ๒๕๖1
เลขทะเบียน..... 038272
เลขเรียกหนังสือ..... T.๑๔.๒๖1.๑๖๖๑

อาจารย์ที่ปรึกษา
อาจารย์สุวงษ์ โสมพงษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

038272

ปริญญาโทปีการศึกษา 2539

ภาควิชาไฟฟ้ากำลัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง


เรื่อง การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส โดยใช้ฟลักซ์เวกเตอร์คอนโทรล

ผู้จัดทำ

นายคมศิร พัดสุวรรณ

นายจ่านีสร กุญชร

นายทวิชัย มุทสวัสดิ์

 อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ. สุวงษ์ ไสมพงษ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การรักษาสภาวะซิงโครไนซ์มอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส โดยใช้เครื่องควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์เอซีไดรฟ์

นายคณิศร พัดสุวรรณ รหัส 36014053

นายจำเนียร กุญชร รหัส 36014074

นายทวีชัย มูลสวัสดิ์ รหัส 36014158

อาจารย์สุวงษ์ โสมพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ประจำปีการศึกษา 2539

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสชนิดเวกเตอร์คอนโทรล โดยการทดสอบเพื่อตรวจสอบสนองความเร็วเมื่อป้อนสัญญาณควบคุมเป็นแรงดันดิซี คลื่นรูปสี่เหลี่ยม และการใช้เครื่องควบคุมในการรักษาสภาวะซิงโครไนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 ตัว รวมถึงการออกแบบและสร้างวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้ร่วมกับฟลักซ์เวกเตอร์ในการควบคุมมอเตอร์

SYNCHRONIZATION CONTROL OF THREE PHASE INDUCTION MOTOR
USING FLUX VECTOR AC DRIVE

Knisorn	Fudsuwan	
Jumnian	Kunchorn	
Taweechai	Moonsawasde	
Suwong	Sompong	Advisor

ABSTRACT

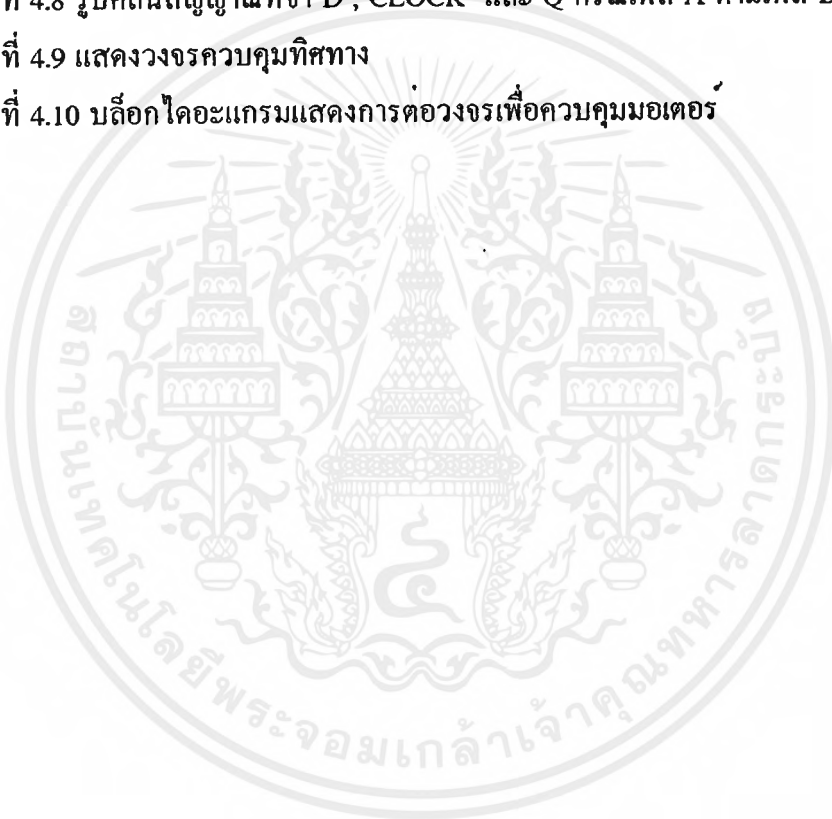
The purpose of this thesis is to present the flux vector AC drive as a control mechanism for a three-phase induction motor. The means of testing the flux vector AC drive is to feed either a DC voltage signal or a square wave signal to the flux vector AC drive and then to analyze the subsequent operation of a connected three-phase induction motor. In addition, the flux vector AC drive is used to synchronize the operation of two three-phase induction motors. Besides this, an electronic circuit is coupled with the flux vector AC drive in order to synchronize the operation of two three-phase induction motors.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูปภาพ	III
สารบัญตาราง	V
บทนำ	1
บทที่ 1 สมบัติและทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ	3
1.1 บทนำ	3
1.2 หลักการเบื้องต้นและวงจรสมมูล	3
1.3 การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ	8
บทที่ 2 ทฤษฎีการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์	14
2.1 บทนำ	14
2.2 ลักษณะทางจลน์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	15
บทที่ 3 ฟลักซ์เวกเตอร์เอซีไครฟ์	27
3.1 แนะนำเครื่องขับมอเตอร์กระแสสลับ ฟลักซ์เวกเตอร์ 1100	27
3.2 การใช้งาน ฟลักซ์เวกเตอร์เอซีไครฟ์	28
3.3 โหมดการทำงานของ ฟลักซ์เวกเตอร์เอซีไครฟ์	33
3.4 การตั้งค่าพารามิเตอร์	37
บทที่ 4 การออกแบบและการทดลอง	43
4.1 การทดสอบผลตอบสนองทางด้านความเร็วเพื่อเปรียบเทียบกับอินเวอร์เตอร์ทั่วไป	43
4.2 การทดสอบผลตอบสนองเมื่อป้อนสัญญาณควบคุมความเร็วด้วยระดับแรงดันและด้านความถี่	43
4.3 การทดลองใช้ฟลักซ์เวกเตอร์ 2 เครื่องในการรักษาสถานะซิงโครไนซ์	44
4.5 การใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ร่วมกับฟลักซ์เวกเตอร์ในการขับมอเตอร์	58
บทที่ 5 สรุปผลและวิจารณ์	71
ภาคผนวก	72

	หน้า
บทที่ 1	
รูปที่ 1.1 วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์	5
รูปที่ 1.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ	6
รูปที่ 1.3 a,b วงจรสมมูลอย่างง่ายและการไหลของกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำ	6
รูปที่ 1.4 การเปลี่ยนแปลงแรงดัน แรงบิดและกระแสเตเตอร์กับความถี่	9
รูปที่ 1.5 กราฟของความถี่-แรงบิด ที่ใช้ควบคุมแรงดันและความถี่	10
รูปที่ 1.6 การควบคุมความเร็วโดยการเปลี่ยนค่าสลิป	11
รูปที่ 1.7 ระบบวงจรเครเมอร์	13
รูปที่ 1.8 วงจรเซอร์เบียส	13
บทที่ 2	
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบทรงกระบอก	16
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมต่างๆ ของเวกเตอร์กระแส	20
รูปที่ 2.3 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองโรเตอร์ฟลักซ์	21
รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ป้อนด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน	23
รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมหลังจากชดเชยแรงดันเหนี่ยวนำในส่วนเชื่อมโยง	24
รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ป้อนแหล่งจ่ายแรงดัน โดยแยกการควบคุมเป็นอิสระต่อกัน	25
บทที่ 3	
รูปที่ 3.1 แสดงการต่อกราวด์	29
รูปที่ 3.2 แสดงตำแหน่งของการต่อส่วนควบคุมแต่ละประเภท	30
รูปที่ 3.3 แสดงส่วนเทอร์มินอลของ TB1	31
รูปที่ 3.4 แสดงส่วนการต่อภายใน TB2	31
รูปที่ 3.5 แสดงการต่อภายในส่วนของ CON2	32
รูปที่ 3.6 แสดงการควบคุมความเร็วของมอเตอร์โหมด	34
รูปที่ 3.7 แสดงการควบคุมความเร็วของสเลฟโหมด	35
รูปที่ 3.8 แสดงการควบคุมโดยทอร์คโหมด	36
บทที่ 4	
รูปที่ 4.1 แสดงการต่อระหว่างมอเตอร์กับเครื่องควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์ทั้ง 2	45
รูปที่ 4.2 แสดงการต่อสวิตช์ควบคุม การสตาร์ท การหยุดและกลับทิศ	46

	หน้า
รูปที่ 4.3 แสดงการต่อเชื่อมมาสเตอร์กับสเลฟโดยใช้สายสัญญาณโทรศัพท์	48
รูปที่ 4.4 วงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นความถี่	60
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความเร็วของมอเตอร์และระดับ แรงดันโดยใช้สัญญาณความเร็วจากมอเตอร์	62
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความถี่ ระดับแรงดัน กรณีป้อนสัญญาณความเร็วจากเครื่องฟังกัซันเจนเนอเรเตอร์	64
รูปที่ 4.7 รูปคลื่นสัญญาณที่ขา D , CLOCK และ Q กรณีเฟส A นำเฟส B	65
รูปที่ 4.8 รูปคลื่นสัญญาณที่ขา D , CLOCK และ Q กรณีเฟส A ตามเฟส B	66
รูปที่ 4.9 แสดงวงจรควบคุมทิศทาง	67
รูปที่ 4.10 บล็อกไดอะแกรมแสดงการต่อวงจรเพื่อควบคุมมอเตอร์	68



บทที่ 4

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองเปรียบเทียบการใช้งานระหว่างอินเวอร์เตอร์ และฟลักซ์เวกเตอร์	43
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วโดยป้อนระดับแรงดันตรง ให้กับฟลักซ์เวกเตอร์	44
ตารางที่ 4.3 แสดงความเร็วรอบเมื่อควบคุมจากจอยอนิเตอร์	47
ตารางที่ 4.4 แสดงความเร็วรอบเมื่อควบคุมด้วยสัญญาณกระแสไฟตรง	48
ตารางที่ 4.5 แสดงความเร็วมอเตอร์ตัวที่ 1 ที่ตั้งความเร็วจากฟลักซ์เวกเตอร์	50
ตารางที่ 4.6 แสดงผลของสัญญาณพัลส์ต่อความเร็ว ที่ความเร็วสูงสุด100rpm	50
ตารางที่ 4.7 แสดงผลของสัญญาณพัลส์ต่อความเร็ว ที่ความเร็วสูงสุด50 rpm	51
ตารางที่ 4.8 แสดงความเร็วของมอเตอร์ตัวที่ 2 เมื่อตั้งค่าจากฟลักซ์เวกเตอร์	51
ตารางที่ 4.9 แสดงผลของสัญญาณพัลส์ต่อความเร็วมอเตอร์ตัวที่ 2 ที่ความ เร็วรอบสูงสุด 150 rpm	52
ตารางที่ 4.10 แสดงผลของสัญญาณพัลส์ต่อความเร็วมอเตอร์ตัวที่ 2 ที่ความ เร็วรอบสูงสุด 100 rpm	52
ตารางที่ 4.11 แสดงความเร็วมอเตอร์เมื่อให้มอเตอร์ขนาด 4 กิโลวัตต์เป็น มาตรฐาน ขนาด 11 กิโลวัตต์เป็นสเลฟ	54
ตารางที่ 4.12 แสดงความเร็วของมอเตอร์เมื่อมอเตอร์ขนาด 11 กิโลวัตต์ เป็นมาตรฐาน ขนาด 4 กิโลวัตต์เป็นสเลฟ	54
ตารางที่ 4.13 แสดงความเร็วมอเตอร์ขนาดเท่ากันเมื่อแยกกันควบคุม	55
ตารางที่ 4.14 แสดงความเร็วมอเตอร์ทั้งสองเมื่อให้มอเตอร์ A เป็นมาตรฐาน มอเตอร์ B เป็นสเลฟ	56
ตารางที่ 4.15 แสดงความเร็วมอเตอร์ทั้งสองเมื่อให้มอเตอร์ B เป็นมาตรฐาน มอเตอร์ A เป็นสเลฟ	57
ตารางที่ 4.16 ผลการทดลองหาความถี่ของสัญญาณความเร็ว	59
ตารางที่ 4.17 แสดงระดับแรงดันเมื่อป้อนสัญญาณความเร็วจากมอเตอร์	61
ตารางที่ 4.18 แสดงระดับแรงดันเมื่อป้อนสัญญาณความเร็วจากเครื่อง ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์	63
ตารางที่ 4.19 เปรียบเทียบ ความเร็ว กระแส แรงดัน ความถี่ของมอเตอร์	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
ตารางที่ 4.20 แสดงการซิงโครไนซ์ระหว่างมอเตอร์ 2 ตัว กรณีหมุนตาม เข็มนาฬิกา	70
ตารางที่ 4.21 แสดงการซิงโครไนซ์ระหว่างมอเตอร์ 2 ตัว กรณีหมุนทวน เข็มนาฬิกา	70



บทนำ

ปัจจุบันมีการใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นระบบขับเคลื่อนในงานอุตสาหกรรมมากขึ้นเพราะว่าปัญหาที่การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำทำได้ยากและซับซ้อนได้มีการแก้ไขและพัฒนาาระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำให้มีขีดความสามารถใกล้เคียงกับดีซีมอเตอร์ (DC motor) มากขึ้น ซึ่งในอดีตส่วนใหญ่จะใช้ดีซีมอเตอร์เป็นระบบขับเคลื่อนเพราะว่าสามารถควบคุมฟลักซ์ (Flux, ϕ) และแรงบิดได้ง่ายโดยการควบคุมกระแสสนามและกระแสอาร์เมเจอร์ ซึ่งทำให้ระบบควบคุมไม่ซับซ้อนมากนักแต่ดีซีมอเตอร์มีข้อเสียหลายประการเช่น ต้องมีการบำรุงรักษาอยู่เป็นประจำโดยเฉพาะแปรงถ่าน มีขนาดใหญ่และราคาแพงกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำเมื่อเทียบกับที่ติดตั้งเดียวกันและใช้งานในบางสภาวะไม่ได้ จึงมีการนำมอเตอร์เหนี่ยวนำมาใช้แทนดังกล่าวข้างต้น โดยปัจจุบันการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำมีการควบคุม 2 ลักษณะ

1. การควบคุมแบบปรับแรงดันและความถี่ ซึ่งง่ายต่อการออกแบบ ไม่ต้องการพารามิเตอร์มากนัก แต่มีปัญหาบางประการคือมีขีดจำกัดในด้านการตอบสนองของความเร็ว สมบัติการควบคุมแรงบิดทำได้ไม่ดีพอ ปัจจุบันได้มีการพัฒนาการควบคุมแบบเวกเตอร์ขึ้นมา

2. การควบคุมแบบเวกเตอร์ เป็นการควบคุมที่ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีขีดความสามารถใกล้เคียงกับดีซีมอเตอร์ จะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการใช้งานของฟลักซ์เวกเตอร์เอซีไดรฟ์ (Flux Vector AC Drive) และนำไปใช้งานได้มีประสิทธิภาพโดยการนำไปควบคุมสถานะการซิงโครไนซ์ (Synchronize) ระหว่างมอเตอร์เหนี่ยวนำ 2 ตัว และการปรับปรุงเพิ่มเติมโดยการสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้ร่วมกับฟลักซ์เวกเตอร์เพื่อรักษาสถานะซิงโครไนซ์

ขอบเขตการวิจัย

ทดสอบการทำงานของฟลักซ์เวกเตอร์เอซีไดรฟ์แล้วเปรียบเทียบกับอินเวอร์เตอร์ และดูผลตอบสนองความเร็วเมื่อป้อนสัญญาณควบคุมแบบแรงดันดีซี (DC voltage) , คลื่นรูปสี่เหลี่ยม (Square wave) และคลื่นรูปสามเหลี่ยม (Triangle wave) ที่ความถี่ต่างๆ และใช้ฟลักซ์เวกเตอร์เอซีไดรฟ์ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ 2 ตัว รวมถึงการออกแบบวงจรเพื่อใช้ร่วมกับฟลักซ์เวกเตอร์ในการรักษาสถานะซิงโครไนซ์

ขั้นตอนการทำงาน

1. ศึกษา ค้นคว้าเกี่ยวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำ

2. ศึกษาถึงทฤษฎีของการควบคุมแบบเวกเตอร์คอนโทรล

3. ศึกษาการใช้งานฟลักซ์เวกเตอร์เอซีไดรฟ์จากคู่มือและทำการทดลองใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ใช้ฟลักซ์เวกเตอร์เอซีไคร์ฟับมอเตอร์โดยป้อนสัญญาณควบคุมแบบต่างๆ ที่ความถี่ต่างๆ กัน แล้วดูผลตอบสนองความเร็ว
5. เมื่อศึกษาการใช้งานและทดสอบการทำงานของฟลักซ์เวกเตอร์แล้ว ก็ใช้ฟลักซ์เวกเตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์ 2 ตัวให้สามารถรักษาสถานะซิงโครไนซ์ระหว่างมอเตอร์ 2 ตัวได้
6. สร้างวงจรทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ขึ้นมาเพื่อใช้ร่วมกับฟลักซ์เวกเตอร์ในการรักษาสถานะซิงโครไนซ์
7. เขียนและพิมพ์ปริญญานิพนธ์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถใช้งานฟลักซ์เวกเตอร์เพื่อรักษาสถานะซิงโครไนซ์ของมอเตอร์ ซึ่งจะเป็ประโยชน์ในการใช้งานในอุตสาหกรรม และจากการสร้างวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์จะช่วยประหยัดได้มากเพราะว่าในการขับเคลื่อนตัวแรกที่ใช้ร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เราไม่ต้องใช้ฟลักซ์เวกเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนก็ได้ โดยใช้อินเวอร์เตอร์ทั่วไป ซึ่งมีราคาถูกกว่าฟลักซ์เวกเตอร์มาก

บทที่ 1

สมบัติและทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

1.1 บทนำ

ในปัจจุบันนี้มอเตอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เป็นมอเตอร์ชนิดเหนี่ยวนำ (Induction motor) เพราะมีข้อดีหลายๆอย่างที่เหนือกว่าดีซีมอเตอร์ (DC motor) คือ แข็งแรง ทนทาน ดูแลรักษาง่ายเพราะไม่มีปัญหาเกี่ยวกับแรงดันราคาถูกและมีขนาดเล็กกว่าดีซีมอเตอร์เมื่อเทียบกับอัตราเร็วและกำลังเท่ากัน แต่ที่ด้อยกว่าดีซีมอเตอร์คือระบบควบคุมมีความซับซ้อนและราคาแพง แต่ในปัจจุบันได้มีความพยายามที่จะพัฒนาทางด้านอิเล็กทรอนิกส์เพื่อที่จะสร้างอินเวอร์เตอร์เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำให้มีประสิทธิภาพและมีราคาถูกลงกว่าเดิมเช่น สเตตติคอินเวอร์เตอร์ (Static inverter) นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาวิธีการควบคุมใหม่ๆ เช่น เวกเตอร์คอนโทรล (Field oriented control) ซึ่งทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีขีดความสามารถใกล้เคียงกับดีซีมอเตอร์ แต่ยังมีราคาแพงและมีความซับซ้อนในการควบคุมที่ต้องมีการตั้งค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ต่างๆ ในบทนี้จะกล่าวถึงสมบัติและทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ

1.2 หลักการเบื้องต้นและวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

1.2.1 หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำจะประกอบด้วยส่วนของสเตเตอร์ (Stator) และส่วนโรเตอร์ (Rotor) โดยส่วนโรเตอร์จะรับพลังงานจากแหล่งจ่ายที่ส่งผ่านช่องอากาศ (Air gap) ซึ่งอยู่ระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำคือจะเกิดสนามแม่เหล็กอยู่ในช่องอากาศหมุนด้วยความเร็วคงตัวค่าหนึ่ง (Fixed speed) ซึ่งเรียกว่าความเร็วซิงโครนัส (Synchronous) ตามสมการ

$$N_s = 120f/p \quad \text{rpm} \quad [1.1]$$

โดยที่ N_s คือ ความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็ก (rpm)

f คือ ความถี่ไฟที่จ่ายให้กับขดสเตเตอร์ (Hz)

p คือ จำนวนขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์

ในขณะที่โรเตอร์อยู่กับที่ จะมีการเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไหลในโรเตอร์ซึ่งมีความถี่เดียวกันกับแหล่งจ่ายไฟ แรงบิด (Torque) เริ่มต้นที่เกิดขึ้นจะเป็นผลจากการกระทำระหว่างฟลักซ์ (Flux) ในแอร์แก๊ปและแรงแม่เหล็กเหนี่ยวนำของโรเตอร์ (Rotor magnetomotive force, mmf) แต่ใน

ขณะที่โรเตอร์มีความเร็วเท่ากับความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็กจะไม่มีกระแสเหนี่ยวนำขึ้นที่ขั้วเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โรเตอร์ ดังนั้นจะไม่มีแรงบิดเกิดขึ้น และในขณะที่โรเตอร์มีความเร็ว N_r จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นบนโรเตอร์และจะทำให้เกิดแรงบิด ความแตกต่างสัมพัทธ์ของความเร็วทั้งสองนี้เรียกว่า สลิป หรือ การไถล (slip)

$$S = (N_s - N_r)/N_s \quad [1.2]$$

โดยที่ S คือ สลิป

N_r คือ ความเร็วของ โรเตอร์ (rpm)

สลิปอาจบอกเป็นเปอร์เซ็นต์

$$\text{เปอร์เซ็นต์สลิป} = S \cdot 100 \quad [1.3]$$

1.2.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

1.2.2.1 พิจารณาทางด้านโรเตอร์

จากสมการของความเร็วของสนามแม่เหล็ก

$$N_s = 120f/p \quad \text{rpm}$$

จะได้ว่า $f_r = p(N_s - N_r)/120 \quad [1.4]$

โดยที่ f_r คือ ความถี่ไฟของกระแสทางด้านโรเตอร์ (Hz)

และจากสมการ [1.2] $N_s - N_r = SN_s \quad \text{rpm}$

$$= S \{120f/p\} \quad [1.5]$$

แทนสมการ [1.5] ลงใน [1.4]

จะได้ $f_r = Sf \quad [1.6]$

โดยที่ f คือ ความถี่ไฟของกระแสของแหล่งจ่าย (Hz)

f_r คือ ความถี่ไฟทางด้าน โรเตอร์ซึ่งเป็นความถี่สลิป (Hz)

เรากำหนดให้ค่ารีแอคแตนซ์ทางด้านโรเตอร์ต่อเฟส(The per phase rotor reactance) คือ x_2 ที่ค่าสลิป s ในรูปของรีแอคแตนซ์ขณะไม่มีค่าสลิป(The standstill per phase reactance : X_2)

$$x_2 = sX_2 \quad [1.7]$$

จากการพิจารณาหม้อแปลงเราทราบว่า

$$E_2 = 4.44fN\phi_m \quad [1.8a]$$

โดยที่ E_2 คือ แรงดันเหนี่ยวนำ (volt)

N คือ จำนวนรอบของขดลวด

f คือ ความถี่ของแหล่งจ่าย (Hz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ϕ_m คือ ฟลักซ์สูงสุด

แต่มอเตอร์เหนี่ยวนำ ณ ที่ค่าสลิปค่าหนึ่งๆ ความถี่จะเป็น sf แทนค่าในสมการ [1.8] จะได้

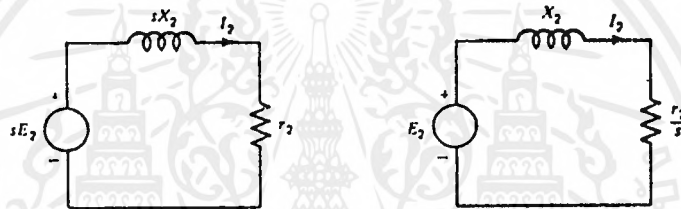
$$c_2 = 4.44sfN\phi_m \quad [1.8b]$$

โดยที่ e_2 คือ แรงดันที่สลิปใดๆ (volt)

เราสรุปได้ว่า

$$e_2 = sE_2 \quad [1.8c]$$

จากสมการ [1.7] และ [1.8c] จะได้วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์คือ



รูปที่ 1.1 วงจรสมมูลทางด้านโรเตอร์

จะได้กระแสทางด้าน โรเตอร์คือ

$$I_2 = (sE_2) / \sqrt{r_2^2 + (sX_2)^2} \quad [1.9]$$

หรือเขียนในรูป

$$I_2 = (E_2) / \sqrt{(r_2/s)^2 + X_2^2} \quad [1.10]$$

1.2.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

ในมอเตอร์เหนี่ยวนำมีเพียงทางด้านสเตเตอร์เท่านั้นที่ต่อกับแหล่งจ่ายไฟจากภายนอก ส่วนทางด้านโรเตอร์แรงดันและกระแสเกิดจากการเหนี่ยวนำและจากการพิจารณาทางด้านโรเตอร์ ให้

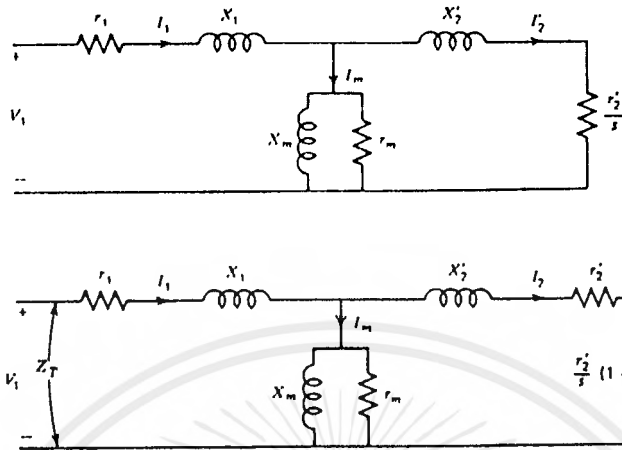
X_m คือ ความเหนี่ยวนำร่วม

r_1, r_2 คือ ความต้านทานทางด้านสเตเตอร์และ โรเตอร์ตามลำดับ

r_2/s คือ ความต้านทานโหลด

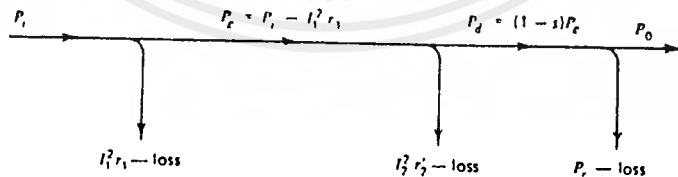
จะได้วงจรสมมูลของอินดักชันมอเตอร์ดังรูปที่ 1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

การวิเคราะห์วงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะพิจารณาจากวงจรสมมูลอย่างง่าย (Approximately Equivalent Circuit) และในการคำนวณค่าต่างๆ จะเป็นการคำนวณต่อเฟส



รูปที่ 1.3 a) วงจรสมมูลอย่างง่าย

b) การไหลของกำลังในมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 1.2 ค่าความสูญเสียในแกนเหล็กทางด้านสเตเตอร์ไม่นำมาคิด เราจะนำค่าสูญเสียในแกนเหล็กมาคิดกรณีคิดค่าประสิทธิภาพเท่านั้น ดังนั้นกำลังที่ผ่านช่องอากาศคือผลต่างของกำลังทางด้านอินพุตการสูญเสียในขดลวดสเตเตอร์

กำหนด P_i คือ กำลังทางด้านอินพุต (Watt)
 P_1 คือ กำลังสูญเสียที่ขดสเตเตอร์
 P_g คือ กำลังที่ผ่านช่องอากาศ
 P_2 คือ กำลังสูญเสียที่ขด โรเตอร์
 P_d คือ กำลังสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic power)
 P_r คือ Rotation power
 P_o คือ กำลังขาออก
 P_{mh} คือ กำลังที่เพลลา
 P_{fw} คือ กำลังที่สูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน และกำลังด้าน
 จะได้

$$P_i = V_1 I_1 \cos \phi_1 \quad \text{W/phasw} \quad [1.11]$$

$$P_g = P_i - I_1^2 r_1 \quad \text{W/phase} \quad [1.12]$$

กำลังนี้จะส่งผ่านโดยการเหนี่ยวนำไปยังความต้านทาน r_2' / s ดังนั้น

$$P_g = (I_2')^2 r_2' / s \quad \text{W/phase} \quad [1.13]$$

$$P_d = P_g - (I_2')^2 r_2' \quad \text{W/phase} \quad [1.14]$$

$$P_g = P_d - P_r \quad \text{W/phase} \quad [1.15]$$

$$= [I_2'^2 r_2' (1-s)]$$

$$P_{mh} = P_o - P_{fw} \quad \text{W/phase} \quad [1.16]$$

ประสิทธิภาพ (η) ของมอเตอร์คือ

$$(\eta) = P_o / P_i \quad [1.17]$$

แรงบิดของมอเตอร์ (developed torquc, T_d) หาได้จาก

$$T_d = 3P_o / W_m = [3I_2'^2 r_2' (1-s)] / s W_m \quad \text{N/m} \quad [1.18]$$

โดยที่ $W_m = (2/p)W_r$ คือความเร็วเชิงกลของโรเตอร์นั่นเอง (rad/sec)

1.3 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ [1.2]จะได้

$$N_r = (1-S)N_s \quad [1.19]$$

การปรับความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามารถปรับได้โดย (1) ปรับค่าความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็ก (2) ปรับค่าสลิป จากประสิทธิภาพของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ (1-S) ดังนั้นในการปรับความเร็วโดยปรับค่าสลิปจะมีผลต่อประสิทธิภาพด้วย ถ้าปรับความเร็วซิงโครนัสในกรณีที่ความถี่คงที่จะปรับความเร็วได้เป็นช่วงๆ เท่านั้น

1.3.1 การปรับความเร็วโดยการเปลี่ยนความเร็วซิงโครนัส

จากสมการ [1.1] $N_s = 120f/p$ rpm

จะเห็นว่าสามารถปรับค่า N_s ได้โดย (1) เปลี่ยนจำนวนขั้วของสเตเตอร์หรือ (2) เปลี่ยนความถี่

1.3.1.1 การเปลี่ยนจำนวนขั้ว [The Pole - Changing Method]

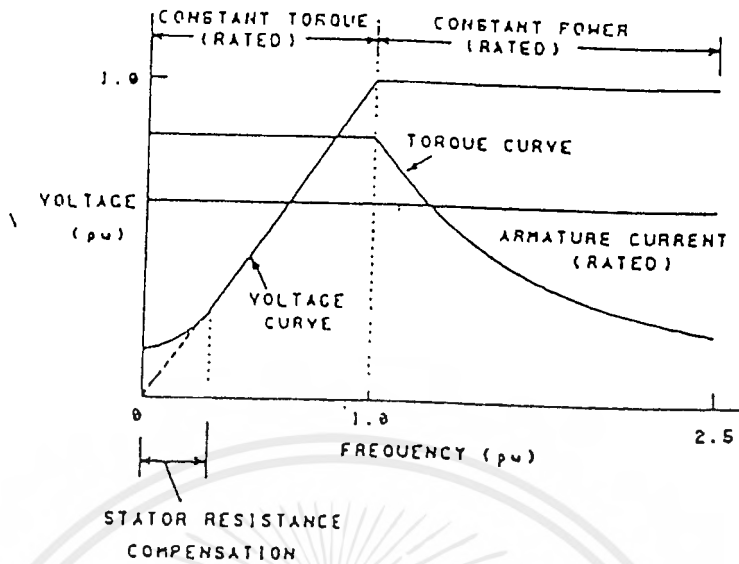
การปรับความเร็วโดยวิธีนี้จะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของมอเตอร์ และมอเตอร์ที่ใช้วิธีนี้เรียกว่ามอเตอร์ชนิดเปลี่ยนขั้วได้ อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนความเร็วจะสามารถทำได้สูงสุดประมาณ 4 ค่าเท่านั้นในมอเตอร์ตัวเดียวกัน

1.3.1.2 การปรับความถี่ [The Variable-Frequency Method]

เราทราบว่าความเร็วซิงโครนัสเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ ถ้าเราเปลี่ยนความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ ความเร็วซิงโครนัสก็จะปรับตามด้วย ในการปรับค่าความเร็วอาจจะต่อเนื่องหรือเป็นช่วงๆขึ้นอยู่กับว่าเราปรับค่าความถี่อย่างไร จากสมการ 1.8a ได้

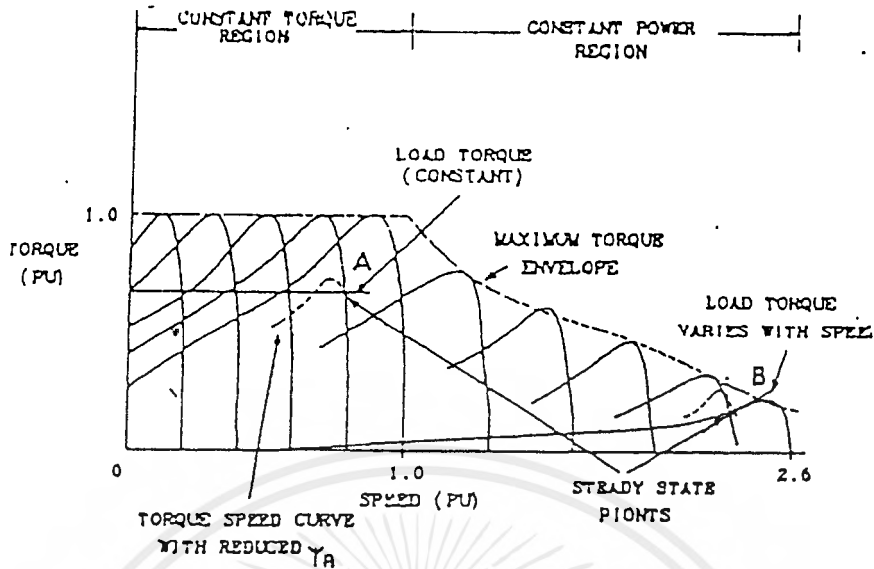
$$E/f = 4.44N\phi_m \quad [1.10]$$

จะเห็นว่าในการปรับความถี่อย่างเดียเพื่อปรับค่าความเร็วซิงโครนัสจะทำให้แรงบิดของสูงสุดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเปลี่ยนตามด้วย ถ้าเราต้องการใช้งานที่แรงบิดสูงสุดคงที่ต้องรักษาอัตราส่วนระหว่างแรงดันกับความถี่ให้คงที่ นั่นคือฟลักซ์สูงสุดคงที่ เมื่อฟลักซ์สูงสุดคงที่แรงบิดสูงสุดจะคงที่ หลักการควบคุมความเร็วแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดัน แรงบิด กระแสเตเตอร์กับความถี่

ชนิดมอเตอร์ที่จะใช้จะต้องมีสมบัติสลิปต่ำซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนความเร็วเชิงกล รัศมีของสนามแม่เหล็กในช่องอากาศระหว่างสเตเตอร์และโรเตอร์ เมื่อต้องการเพิ่มความเร็วของมอเตอร์ทำได้โดยการเพิ่มความถี่ของแรงดันออก แต่จากที่ได้อธิบายข้างต้นจะเพิ่มแต่ความถี่ไม่ได้ เพราะจะทำให้แอร์แกปฟลักซ์ (Air gap flux) ลดลงเนื่องจากการลดลงของ magnetizing current อันเป็นผลเนื่องมาจากการเพิ่มของ magnetizing reactance $[X_m = 2\pi fL]$ ซึ่งเมื่อฟลักซ์ลดลงจะทำให้แรงบิดสูงสุดลดลงด้วย เพื่อที่จะรักษาฟลักซ์ในช่องอากาศ ซึ่งจะทำให้แรงบิดสูงสุดคงที่จำเป็นต้องเพิ่มแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ตามความถี่ คือ รักษาอัตราส่วนระหว่างแรงดันออกและความถี่ให้คงที่ ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำมีลักษณะเป็นการขับเคลื่อนที่ให้แรงบิดสูงสุดคงที่ซึ่งจะทำได้ในย่านความเร็วฐาน (Base speed) หรือความถี่ต่ำกว่าความถี่ฐาน (Base frequency, p.u.) ดังแสดงในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.4 แสดงกราฟของความเร็ว-แรงบิด ที่ใช้วิธีควบคุมแรงดันและความถี่

ในย่านความถี่ต่ำๆ การรักษาให้อัตราส่วนระหว่างแรงดันออกกับความถี่ให้คงที่จะไม่เป็นการเพียงพอที่จะทำให้แรงบิดสูงสุดคงที่ ทั้งนี้เพราะที่ความถี่ต่ำๆกระแสที่สร้างสนามแม่เหล็ก (magnetizing current) ไม่ได้ขึ้นอยู่กับแมกเนไตซ์ซิ่งแอกแตนซ์ (magnetizing reactance) เพียงอย่างเดียวเนื่องจากความต้านทานของสเตเตอร์จะมีค่าใกล้เคียงกับแมกเนไตซ์ซิ่งแอกแตนซ์ เพราะความถี่ต่ำค่าแมกเนไตซ์ซิ่งแอกแตนซ์จะต่ำ $[X_L = 2\pi fL]$ ดังนั้นจะต้องเพิ่มแรงดันที่จ่ายให้กับสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อชดเชยแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานของสเตเตอร์ ทำให้การเปลี่ยนแปลงแรงดันกับความถี่ที่ย่านความถี่ต่ำไม่เป็นแบบเชิงเส้นดังรูปที่ 1.4

ส่วนในย่านที่ความเร็วสูงกว่าความเร็วฐาน ไม่สามารถรักษาแรงบิดให้คงที่เนื่องจากจะทำให้มอเตอร์ทำงานเกินพิกัด (Overload) ซึ่งจะทำให้มอเตอร์เสียหายได้ ในการเพิ่มความเร็วทำได้โดยการรักษากำลังออกสูงสุดของมอเตอร์ให้คงที่ (Constant power) และลดความเข้มของสนามแม่เหล็กซึ่งจะทำให้แรงบิดลดลงอธิบายได้ตามสมการ

$$P = T\omega \quad (\text{Watt})$$

โดยที่ P คือ กำลังออกของมอเตอร์ (Watt)

T คือ แรงบิด (N/m)

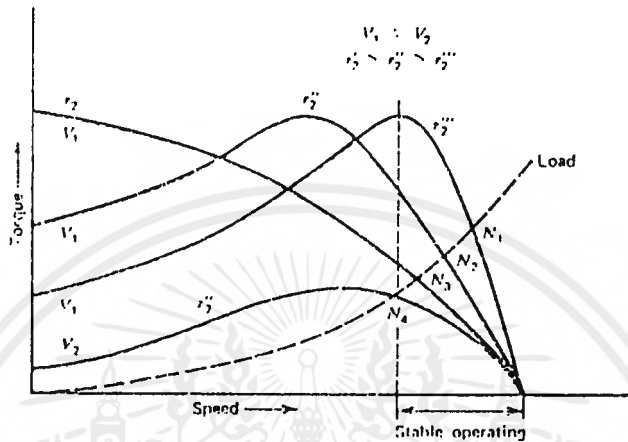
ω คือ อัตราเร็วเชิงมุม (radian/sec)

เรารักษากำลังออกให้คงที่ ถ้าต้องการเพิ่มความเร็วก็ทำโดยการลดแรงบิดของมอเตอร์นั้น

เอง

1.3.2 การควบคุมความเร็วโดยการปรับค่าสลิป

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้วิธีการเปลี่ยนค่าสลิปทำให้เข้าใจง่ายโดยใช้กราฟในรูปที่ 1.6 อธิบาย



รูปที่ 1.5 การควบคุมความเร็วโดยการเปลี่ยนค่าสลิป

เส้นประแสดงถึงลักษณะของความเร็วและแรงบิดของโหลด (Load) ส่วนเส้นทึบแสดงถึงลักษณะของความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำภายใต้สภาวะต่างๆ เช่นต่างกันที่ความต้านทานของโรเตอร์--- $r_2^I, r_2^{II}, r_2^{III}$ หรือต่างกันที่แรงดันของสเตเตอร์--- V_1, V_2 เรามีเส้นกราฟที่แตกต่างกันอยู่ 4 เส้น ดังนั้นสามารถทำงานที่ความเร็วใดความเร็วหนึ่ง-- N_1, N_2, N_3, N_4 สำหรับโหลดที่ให้มีมา ในทางปฏิบัติเราสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการปรับค่าสลิปด้วยวิธีต่างๆ ดังต่อไปนี้

1.3.2.1 ปรับค่าแรงดันสเตเตอร์ [Variable Stator Voltage Method]

เนื่องจากแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก(Electromagnetic torque) ที่เกิดจากมอเตอร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันของแหล่งจ่ายขยกกำลังสอง เราจึงได้เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดกับความเร็วที่ค่าแรงดันต่างๆกัน เช่นที่ความต้านทานของสเตเตอร์เป็น r_2^{II} เราป้อนแรงดันของสเตเตอร์ 2 ค่าคือ V_1, V_2 ก็จะได้เส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วของมอเตอร์ 2 เส้น ดังนั้นมอเตอร์ก็สามารถทำงานที่ความเร็ว 2 ค่าคือ N_2 หรือ N_4 ถ้าแรงดันสามารถปรับได้อย่างต่อเนื่องจาก V_1 ถึง V_2 ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำก็สามารถปรับค่าได้อย่างต่อเนื่องระหว่าง N_2 กับ N_4 สำหรับโหลดที่ให้มีมา วิธีการนี้นำไปใช้ในการปรับความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดพันขดลวด (Wound-rotor-type)

1.3.2.2 ปรับความต้านทานของโรเตอร์ [Variable Rotor-Resistance Method]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

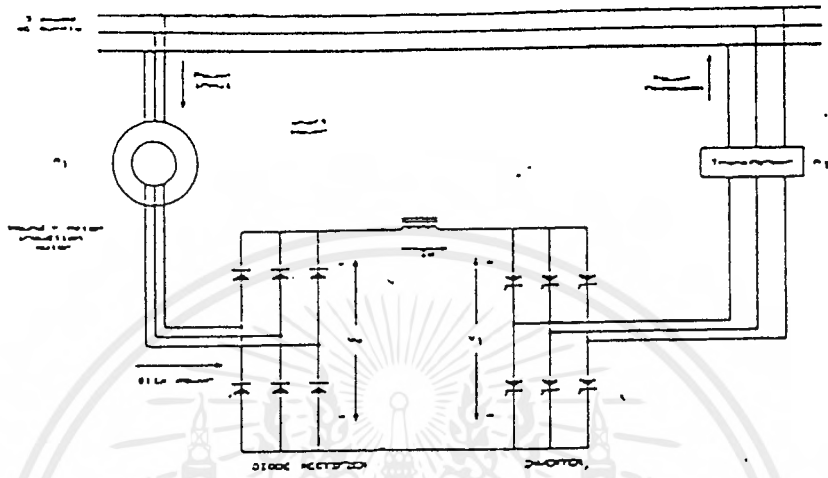
การปรับความเร็วโดยวิธีนี้จะใช้ได้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดพหุขดลวดเท่านั้น ผลของการปรับความต้านทานที่ต่อจากภายนอกทางด้านโรเตอร์ต่อความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วเป็นไปตามกราฟในรูปที่ 1.6 ถ้าเราสามารถปรับค่าความต้านทานได้อย่างต่อเนื่องก็จะสามารถปรับความเร็วได้อย่างต่อเนื่อง

1.3.2.3 การควบคุมการใช้สวิทช์โซลิตสเตท [Control by Solid-State Switch]

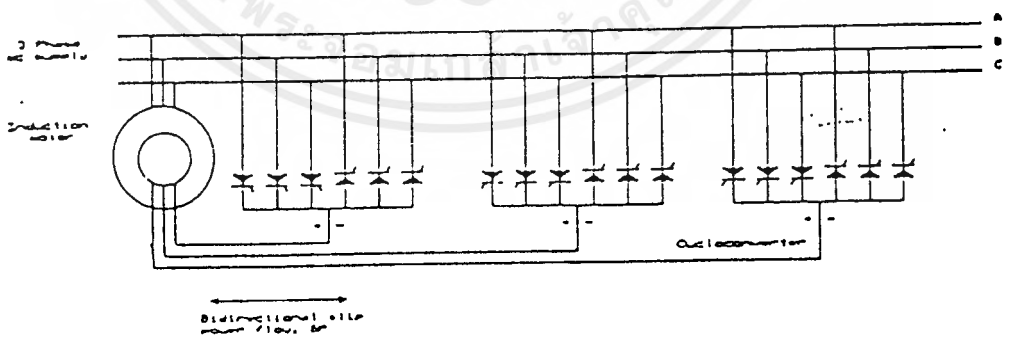
นอกเหนือจากการจับมอเตอร์โดยใช้อินเวอร์เตอร์แล้ว ความเร็วของมอเตอร์ชนิดพหุขดลวดอาจควบคุมได้โดยการใช้ต่ออินเวอร์เตอร์จากภายนอกเข้าที่วงจรถางด้านโรเตอร์ หรือโดยการควบคุมแรงดันทางด้านสเตเตอร์ โดยใช้อุปกรณ์สวิทช์ซิงโซลิตสเตท (Solid-State Switching Device) เช่น silicon-controlled rectifiers (SCRs or thyristor) เอาท์พุทที่ได้จากเอสซีอาร์ (SCR) จะจ่ายให้แก่มอเตอร์ซึ่งควบคุมโดยการปรับมุมการทำงาน (firing angle) ซึ่งวิธีนี้จะทำเหมือนกับวิธีที่ผ่านมาแต่ว่าการควบคุมโดยใช้เอสซีอาร์ จะมีช่วงการปรับที่กว้างกว่าและมีประสิทธิภาพดีกว่าการปรับค่าสลิปโดยวิธีอื่น

1.3.2.4 ควบคุมความเร็วโดยใช้แมชชีนอื่นช่วย [Speed Control by Auxiliary Machine]

ยังมีวิธีการอื่นอีกมากในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยการแปลงไฟสลับในโรเตอร์ที่มีความถี่เท่ากับความถี่ของสายส่งเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไประบบดังกล่าวคือ ระบบเครเมอร์ (Kramer control) ตามรูปที่ 1.7 หรืออาจจะควบคุมสลิปโดยการใช้ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ (Cyclo converter) ซึ่งสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ทั้งในย่านความถี่ต่ำกว่าหรือสูงกว่าความเร็วซิงโครนัสก็ได้ ระบบนี้คือระบบเซอร์เบียส (The Seherbius control) ตามรูปที่ 1.8



รูปที่ 1.7 แสดงระบบวงจรเครื่อง



รูปที่ 1.8 แสดงวงจรเซอร์เบียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเวกเตอร์

2. บทนำ

การควบคุมแรงบิดในมอเตอร์เหนี่ยวนำนั้นทำได้โดยการควบคุมกระแสของมอเตอร์โดยอาศัยหลักการควบคุมแบบเวกเตอร์หรือการควบคุมอ้างอิงสนามแม่เหล็ก (Vector Control or Field-Oriented control) ซึ่งจะทำให้คุณลักษณะการควบคุมของมอเตอร์เหนี่ยวนำในกรณีนี้คล้ายคลึงกับการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบกระตุ้นแยก อย่างไรก็ตามยังมีข้อแตกต่าง คือในมอเตอร์กระแสตรงตำแหน่งเชิงมุมของกระแสสนามและกระแสอาร์เมเจอร์จะอยู่กับที่ด้วยการทำงานของคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่าน ในขณะที่ในมอเตอร์กระแสสลับตำแหน่งเชิงมุมของฟลักซ์และกระแสสเตเตอร์ต้องการควบคุมจากภายนอก ซึ่งการควบคุมแบบเวกเตอร์จะทำให้แรงบิดและฟลักซ์ในโรเตอร์ถูกควบคุมอย่างมีอิสระต่อกัน โดยจะควบคุมขนาดและมุมเฟสของกระแสทั้ง 3 เฟส หรืออีกนัยหนึ่งเวกเตอร์รวมของกระแสจะถูกควบคุม ซึ่งเป็นที่มาของการควบคุมแบบเวกเตอร์

การควบคุมแบบเวกเตอร์แบ่งตามลักษณะการควบคุมได้ 2 แบบคือ

2.1.1 แบบควบคุมกระแส (Current Control)

2.1.2 แบบควบคุมแรงดันหรือการแยกการควบคุมให้มีอิสระต่อกัน (Voltage Control or Decoupling)

การควบคุมแบบเวกเตอร์โดยการควบคุมกระแส ไม่จำเป็นต้องใช้พารามิเตอร์ทางด้านสเตเตอร์ทำให้การควบคุมนั้นลดความยุ่งยากลง การควบคุมแบบนี้โดยทั่วไปจะเป็นการควบคุมแหล่งจ่ายแรงดัน โดยมีการป้อนกลับของกระแสเพื่อควบคุมให้ได้กระแสตามที่ต้องการ ถ้าความเร็วในการตอบสนองของวงรอบควบคุมกระแสไม่สูงพอจะทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างกระแสที่สร้างฟลักซ์และกระแสที่ทำให้เกิดแรงบิด อีกทั้งยังอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานของโรเตอร์เนื่องจากความร้อน ซึ่งจะทำให้โรเตอร์ฟลักซ์ ไม่คงที่แนวทางแก้ไขทำได้ 2 วิธีคือการเพิ่มอัตราขยายของวงรอบป้อนกลับของกระแสให้มีค่ามากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้ตัวแปลงผันพลังงาน (Power converter) จ่ายกระแสให้แบบอุดมคติ ดังนั้นตัวแปลงผันพลังงานจะต้องมีความถี่สวิตช์ที่สูงมากซึ่งเป็นขีดจำกัดในการใช้งานในระบบขนาดใหญ่ อีกวิธีหนึ่งคือใช้การควบคุมแบบแรงดัน (การควบคุมแบบแยกการควบคุมให้มีอิสระต่อกัน) แทน โดยการควบคุมแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ ด้วยหลักการแยกการควบคุมให้มีอิสระต่อกันของกระแสที่สร้างฟลักซ์ และกระแสที่ทำให้เกิดแรงบิด

ทำให้ได้ขนาดของกระแสทั้งสองที่ตั้งฉากกันตามที่ต้องการซึ่งจะได้อธิบายต่อไป เพราะก่อนที่จะอธิบายถึงทฤษฎีการควบคุมมอเตอร์แบบเวกเตอร์ จะกล่าวถึงลักษณะทางจลน์ของมอเตอร์

2.2 ลักษณะทางจลน์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 2.1 จะได้สมการแรงดันที่สเตเตอร์ ดังสมการที่ [2.1]

$$\begin{aligned} u_{sa}(t) &= R_s i_{sa} + \frac{d\Psi_{sn}}{dt} \\ u_{sb}(t) &= R_s i_{sb} + \frac{d\Psi_{sb}}{dt} \\ u_{sc}(t) &= R_s i_{sc} + \frac{d\Psi_{sc}}{dt} \end{aligned} \quad [2.1]$$

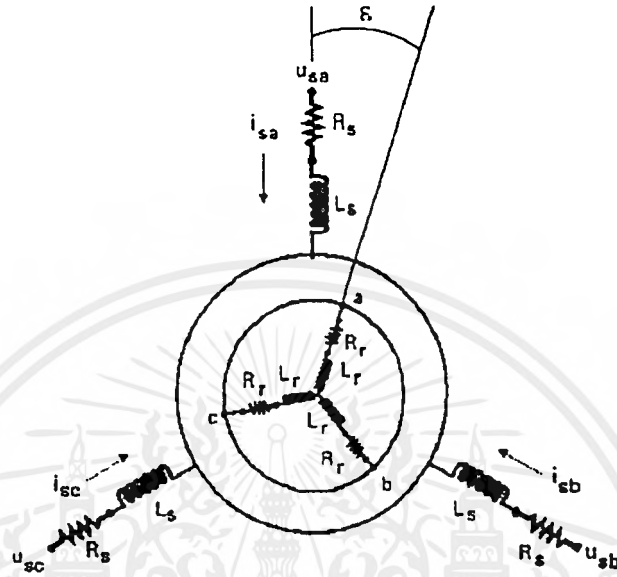
และสมการแรงดันที่โรเตอร์ ดังสมการที่ [2.2]

$$\begin{aligned} 0 &= R_r i_{ra} + \frac{d\Psi_{ra}}{dt} \\ 0 &= R_r i_{rb} + \frac{d\Psi_{rb}}{dt} \\ 0 &= R_r i_{rc} + \frac{d\Psi_{rc}}{dt} \end{aligned} \quad [2.2]$$

โดยที่ u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} คือแรงดันที่ป้อนที่สเตเตอร์เฟส a, b และ c ตามลำดับ
 i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} คือกระแสสเตเตอร์เฟส a, b และ c ตามลำดับ
 i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} คือกระแสโรเตอร์เฟส a, b และ c ตามลำดับ
 $\Psi_{sa}, \Psi_{sb}, \Psi_{sc}$ คือฟลักซ์ค้ำของขดลวดสเตเตอร์เฟส a, b และ c ตามลำดับ
 $\Psi_{ra}, \Psi_{rb}, \Psi_{rc}$ คือฟลักซ์ค้ำของขดลวดโรเตอร์เฟส a, b และ c ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_s คือค่าความต้านทานของขดลวดสเตเตอร์
 R_r คือค่าความต้านทานทางด้านโรเตอร์



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบบทรงกระบอก

และ

$$\Psi_{sa} = L_s \left[i_{sa} - \frac{1}{2} i_{sb} - \frac{1}{2} i_{sc} \right] + M \{ i_{ra} \cos(-\varepsilon) + i_{rb} \cos(2\gamma - \varepsilon) + i_{rc} \cos(\gamma - \varepsilon) \}$$

$$\Psi_{sb} = L_s \left[-\frac{1}{2} i_{sa} + i_{sb} - \frac{1}{2} i_{sc} \right] + M \{ i_{ra} \cos(\gamma - \varepsilon) + i_{rb} \cos(-\varepsilon) + i_{rc} \cos(2\gamma - \varepsilon) \}$$

$$\Psi_{sc} = L_s \left[-\frac{1}{2} i_{sa} - \frac{1}{2} i_{sb} + i_{sc} \right] + M \{ i_{ra} \cos(2\gamma - \varepsilon) + i_{rb} \cos(\gamma - \varepsilon) + i_{rc} \cos(-\varepsilon) \}$$

$$\Psi_{ra} = L_r \left(i_{ra} - \frac{1}{2} i_{rb} - \frac{1}{2} i_{rc} \right) + M \{ i_{sa} \cos(\varepsilon) + i_{sb} \cos(2\gamma + \varepsilon) + i_{sc} \cos(\gamma + \varepsilon) \}$$

$$\Psi_{rb} = L_r \left(-\frac{1}{2} i_{ra} + i_{rb} - \frac{1}{2} i_{rc} \right) + M \{ i_{sa} \cos(\gamma + \varepsilon) + i_{sb} \cos(\varepsilon) + i_{sc} \cos(2\gamma + \varepsilon) \}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Psi_{rc} = L_r \left(-\frac{1}{2}ira - \frac{1}{2}irb + irc \right) + M \{ isa \cos(2\gamma + \varepsilon) + isa \cos(\gamma + \varepsilon) + isa \cos(\varepsilon) \}$$

$$\gamma = 2\pi/3$$

โดยที่

L_s คือค่าความเหนี่ยวนำของขอสเตเตอร์

L_r คือค่าความเหนี่ยวนำของโรเตอร์

M คือค่าความเหนี่ยวนำร่วมระหว่างขดลวดค้ำานสเตเตอร์และโรเตอร์

$\varepsilon(t)$ คือตำแหน่งเชิงมุมของโรเตอร์ซึ่งเป็นมุมระหว่างแกนอ้างอิงสเตเตอร์และแกนอ้างอิงโรเตอร์

สมการที่ [2.1] และ [2.2] สามารถเขียนใหม่ได้ในรูปของสเปซเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\underline{u}_s = R_s \underline{i}_s + \frac{d\Psi_s}{dt} \quad [2.3]$$

$$0 = R_r \underline{i}_r + \frac{d\Psi_r}{dt} \quad [2.4]$$

ซึ่งนิยามของสเปซเวกเตอร์ของแต่ละตัวแปรเป็นดังนี้

$$\underline{u}_s(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} [u_{sa}(t) + u_{sb}(t) e^{j\gamma} + u_{sc}(t) e^{j2\gamma}] \quad [2.5]$$

$$\underline{i}_s(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} [i_{sa}(t) + i_{sb}(t) e^{j\gamma} + i_{sc}(t) e^{j2\gamma}] \quad [2.6]$$

$$\underline{i}_r(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} [i_{ra}(t) + i_{rb}(t) e^{j\gamma} + i_{rc}(t) e^{j2\gamma}] \quad [2.7]$$

$$\underline{\Psi}_s(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} [\Psi_{sa}(t) + \Psi_{sb}(t) e^{j\gamma} + \Psi_{sc}(t) e^{j2\gamma}] = L_s \underline{i}_s + M \underline{i}_r e^{j\varepsilon} \quad [2.8]$$

$$\underline{\Psi}_r(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} [\Psi_{ra}(t) + \Psi_{rb}(t) e^{j\gamma} + \Psi_{rc}(t) e^{j2\gamma}] = L_r \underline{i}_r + M \underline{i}_s e^{j\varepsilon} \quad [2.9]$$

นอกจากนั้นแรงบิดที่เกิดขึ้นจากปฏิกริยาระหว่างกระแสสเตเตอร์และกระแสโรเตอร์สามารถคำนวณได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m_d = M \operatorname{Im}(i_s \underline{i}_r e^{-j\varepsilon}) \quad [2.10]$$

โดยที่ m_d คือแรงบิดขับเคลื่อน

Z คือค่าสังยุคเชิงซ้อนของ Z

2.2.1 แบบจำลองของโรเตอร์ฟลักซ์

เพื่อความง่ายในที่นี้เราจะพิจารณากรณีที่เราสามารถควบคุมกระแสเดเตอร์ i_d

ได้ตามต้องการก่อน แล้วจึงพิจารณาการควบคุมกระแสผ่านแรงดันอีกทีหนึ่ง

ดังนั้นเราพิจารณาเฉพาะแต่สมการทางด้านโรเตอร์ [2.4] ก็เพียงพอ โดยอาศัยสมการที่ [2.9] เราสามารถเขียนสมการที่ [2.4] ได้ใหม่เป็น

$$R_r \underline{i}_r + L_r \frac{d}{dt} \underline{i}_r + M \frac{d}{dt} (\underline{i}_s e^{-j\varepsilon}) = 0 \quad [2.11]$$

เนื่องจากการควบคุมเวกเตอร์จะทำการควบคุมโรเตอร์ฟลักซ์ผ่านทางกระแสเดเตอร์ จึงจัดรูปสมการที่ [2.11] ใหม่ให้อยู่ในรูปของกระแสที่สร้างฟลักซ์ได้ดังนี้

$$R_r \underline{i}_r + M \frac{d}{dt} \left[e^{-j\varepsilon} \left(\underline{i}_s + \frac{L_r}{M} \underline{i}_r e^{j\varepsilon} \right) \right] = 0 \quad [2.12]$$

$$R_r \frac{M}{L_r} (\underline{i}_{mr} - i_s) e^{-j\varepsilon} + M \frac{d}{dt} (e^{-j\varepsilon} \underline{i}_{mr}) = 0 \quad [2.13]$$

$$\underline{i}_{mr} = i_s + \frac{L_r}{M} \underline{i}_r e^{j\varepsilon} = i_{mr} e^{j\varepsilon} \quad [2.14]$$

โดยที่ \underline{i}_{mr} คือสเปซเวกเตอร์ของกระแสทำแม่เหล็ก (Magnetizing current space vector)

p คือมุมระหว่างแกนสเดเตอร์กับแกนของ โรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์

สมการที่ [2.13] เป็นสมการแรงดันของโรเตอร์โดยแกนอ้างอิงเป็นแกนโรเตอร์ ซึ่งสามารถทำการย้ายสมการมายังแกนอ้างอิงสเดเตอร์ โดยคูณสมการ [2.13] ด้วย $e^{j\varepsilon}$ ได้ดังนี้

$$\frac{d \underline{i}_{mr}}{dt} = \left(-\frac{R_r}{L_r} + j\omega_m \right) \underline{i}_{mr} + \frac{R_r}{L_r} i_s \quad [2.15]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โดยที่ $\omega_m = \frac{d\varepsilon}{dt}$ คือความถี่เชิงมุมของโรเตอร์ดังนั้นถ้าเราทราบค่าของกระแสเดเตอร์จากการวัด เราก็สามารถที่จะคำนวณขนาดและมุมของกระแสกระตุ้น และจากสมการที่ [2.10] และ [2.14] จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 m_d &= M \operatorname{Im} \left[i_s \cdot (i_{mr} - i_s) \cdot \frac{M}{L_r} \right] \\
 &= \frac{M^2}{L_r} \operatorname{Im} [i_s \cdot i_{mr}^*] \\
 &= \frac{M^2}{L_r} i_{mr} \operatorname{Im} [i_s e^{-j\theta}] \quad [2.16]
 \end{aligned}$$

เนื่องจากในการควบคุมแบบเวกเตอร์ปริมาณที่เราสนใจเฉพาะแรงบิด และขนาดของโรเตอร์ฟลักซ์ การแสดงความสัมพันธ์ต่างๆ บนแนวอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์จะทำให้สะดวกในการพิจารณา เราจึงทำการย้ายแกนอ้างอิงมาอยู่บนโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์แทน ดังนั้นสมการที่ [2.15] จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} (i_{mr} e^{j\theta}) &= \left(-\frac{R_r}{L_r} + j\omega_m \right) i_{mr} e^{j\theta} + \frac{R_r}{L_r} (i_s e^{-j\theta}) e^{j\theta} \\
 j\omega_o e^{j\theta} i_{mr} + e^{j\theta} \frac{d i_{mr}}{dt} &= \left(-\frac{R_r}{L_r} + j\omega_m \right) i_{mr} e^{j\theta} + \frac{R_r}{L_r} (i_s e^{-j\theta}) e^{j\theta} \quad [2.17]
 \end{aligned}$$

โดยที่ $\omega_o = dp/dt$ คือความถี่เชิงมุมของโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์

และคูณสมการที่ [2.17] ตลอดด้วย $e^{-j\theta}$ พร้อมทั้งแยกสมการออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนจริง(Re)และส่วนจินตภาพ (Im) ได้ดังนี้คือ

$$\operatorname{Re}: \frac{d i_{mr}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} i_{mr} + \frac{R_r}{L_r} i_s \alpha \quad [2.18]$$

$$\operatorname{Im}: \omega_o i_{mr} = \omega_m i_{mr} + \frac{R_r}{L_r} i_s \beta \quad [2.19]$$

$$\omega_o = \omega_m + \frac{R_r i_{s\beta}}{L_r i_{mr}}$$

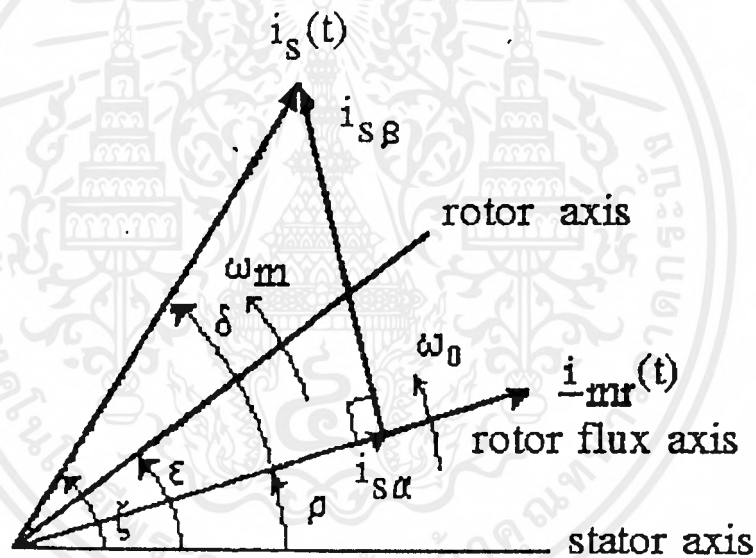
โดยที่ $\omega_{st} = \frac{R_r i_{s\beta}}{L_r i_{mr}}$ คือ ความถี่สลิปและ

$$i_s e^{-j\theta} = i_{s\alpha} + j i_{s\beta}$$

สมการแรงบิด [2.16] ก็สามารเขียนได้ใหม่เช่นเดียวกันเป็นดังนี้คือ

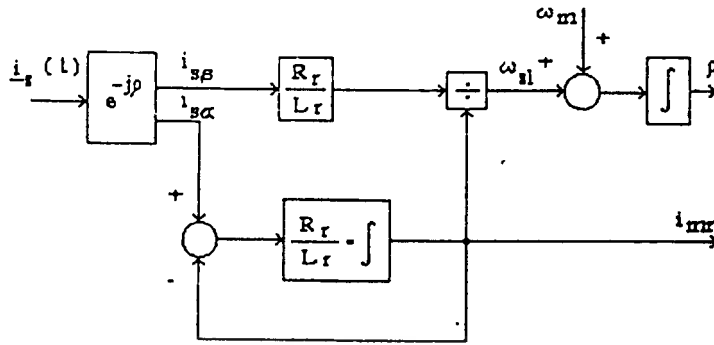
$$m_d = \frac{M^2}{L_r} i_{mr} i_{s\beta} \quad [2.20]$$

ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของเวกเตอร์ของกระแสและแกนอ้างอิงแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมต่างๆ ของเวกเตอร์กระแส

สมการ [2.18] และ [2.19] แสดงถึงแบบจำลองของโรเตอร์ฟลักซ์ของโรเตอร์ฟลักซ์ที่เราต้องการ บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองโรเตอร์ฟลักซ์แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงวิธีการหาขนาดและมุมของโรเตอร์ฟลักซ์จากกระแสทางด้านสเตเตอร์ที่สามารถวัดได้



รูปที่ 2.3 บล็อกโคจรของแบบจำลองโรเตอร์ฟลักซ์

สมการที่ [2.1] และ [2.19] หรือรูปที่ 2.3 เป็นสมการพื้นฐานสำหรับระบบควบคุมแบบเวกเตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส ซึ่งสามารถควบคุมแรงบิดและขนาดของฟลักซ์แม่เหล็กได้อย่างอิสระ เช่นเดียวกับมอเตอร์กระแสตรง โดยที่

- $i_{s\alpha}$ ทำหน้าที่ควบคุมขนาดของฟลักซ์ (เสมือนแรงดันสนามของมอเตอร์กระแสตรง)
- $i_{s\beta}$ ทำหน้าที่ควบคุมแรงบิด (เปรียบเสมือนกระแสอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์กระแสตรง)

2.2.2 แบบจำลองทางด้านสเตเตอร์และการควบคุมแบบแยกอิสระต่อกัน

ในกรณีที่แหล่งจ่ายของระบบเป็นแบบแหล่งจ่ายแรงดัน และไม่สามารถทำการป้อนกลับและควบคุมกระแสได้เร็วเพียงพอ ซึ่งจะเกิดขึ้นกับระบบขนาดใหญ่ที่ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สวิตช์ได้ช้าเช่น GTO เราจำเป็นต้องพิจารณาสมการแรงดันทางด้านสเตเตอร์ด้วย เพื่อหาวิธีการควบคุมแรงดันให้ได้ตามที่ต้องการ จากสมการที่ [2.1] และ [2.8] จะได้ว่า

$$\underline{u}_s = R_s \underline{i}_s + \frac{d}{dt} (L_s \underline{i}_s + M \underline{i}_r e^{j\epsilon}) \tag{2.21}$$

เพื่อจัดให้ สมการอยู่ในรูปของ \underline{i}_s และ \underline{i}_{mr} อาศัยความสัมพันธ์จาก [2.14] เราจะได้ [2.21]

$$\underline{u}_s = R_s \underline{i}_s + \frac{d}{dt} \left(L_s \underline{i}_s + \frac{M^2}{L_r} (\underline{i}_{mr} - \underline{i}_s) \right)$$

$$\underline{u}_s = R_s \underline{i}_s + \frac{L_s L_r - M^2}{L_r} \frac{d \underline{i}_s}{dt} + \frac{M^2}{L_r} \frac{d \underline{i}_{mr}}{dt} \tag{2.22}$$

จากสมการที่ [2.15] และ [2.22] จะได้สมการแรงดันบนแกนอ้างอิงสเตเตอร์ดังต่อไปนี้

$$\underline{u}_s = R_s \underline{i}_s + \sigma L_s \frac{d \underline{i}_s}{dt} + \frac{M^2}{L_r} \left[\left(-\frac{R_r}{L_r} + j \omega_m \right) \underline{i}_{mr} + \frac{R_r}{L_r} \underline{i}_s \right] \quad [2.23]$$

ในที่นี้ $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$ คือสัมประสิทธิ์การรั่วไหลรวม (total leakage coefficient)

ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกันกับในกรณีการหาแบบจำลองของโรเตอร์ฟลักซ์ เราแสดงความสัมพันธ์ต่างๆ บนแกนอ้างอิงที่อยู่บนโรเตอร์ฟลักซ์เวกเตอร์ซึ่งจะสะดวกในการควบคุมดังนั้นเราจึงทำการย้ายแกนอ้างอิงโรเตอร์ฟลักซ์โดยคุณสมบัติ [2.23] ด้วย e^{-jP} และแยกสมการเป็นส่วนจริงกับส่วนจินตภาพโดยกำหนดให้

$$\underline{i}_s e^{-jP} = i_{s\alpha} + j i_{s\beta}$$

$$\underline{u}_s e^{-jP} = u_{s\alpha} + j u_{s\beta}$$

และ $\underline{i}_{mr} e^{-jP} = i_{mr}$

ซึ่งจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{Re: } & u_{s\alpha} i_{s\alpha} + \sigma L_s \frac{d i_{s\alpha}}{dt} - \omega_o \sigma L_s i_{s\beta} - R_r \frac{M^2}{L_r^2} i_{mr} + R_r \frac{M^2}{L_r^2} i_{s\alpha} \\ \text{Im: } & u_{s\beta} i_{s\beta} + \sigma L_s \frac{d i_{s\beta}}{dt} + \omega_o \sigma L_s i_{s\alpha} + \omega_m \frac{M^2}{L_r^2} i_{mr} + R_r \frac{M^2}{L_r^2} i_{s\beta} \end{aligned} \quad [2.24]$$

ในที่นี้เราอาศัยความสัมพันธ์ที่ว่า

$$e^{-jP} \frac{d \underline{i}_s}{dt} = \frac{d}{dt} (\underline{i}_s e^{-jP}) + j \omega_m \underline{i}_s e^{-jP} \quad \text{และ} \quad \omega_o = \frac{dp}{dt}$$

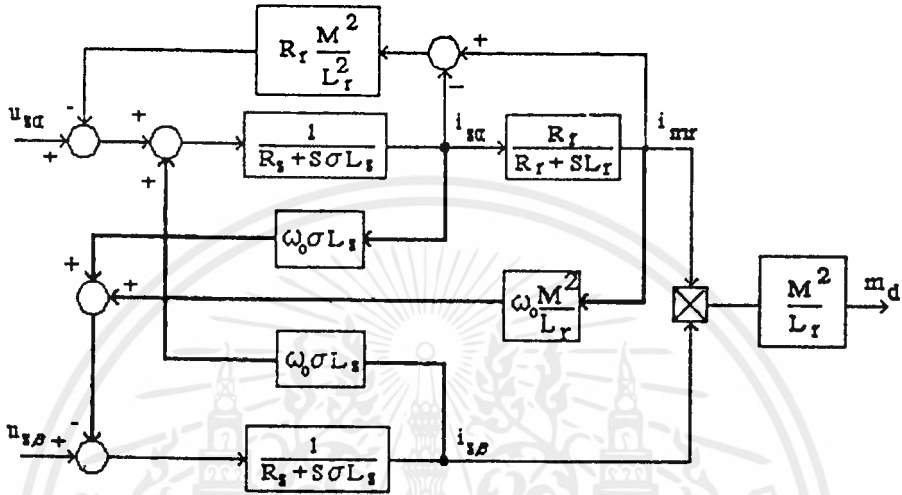
และในส่วนจินตภาพของสมการที่ [2.24] เขียนใหม่โดยอาศัยความสัมพันธ์

$$\omega_{sl} = \frac{R_r i_{s\beta}}{L_r i_{mr}} \quad \text{เป็น}$$

$$\begin{aligned} \text{Im: } & = R_s i_{s\beta} + \sigma L_s \frac{d i_{s\beta}}{dt} + \omega_o \sigma L_s i_{s\alpha} + \omega_m \frac{M^2}{L_r} i_{mr} + R_r \frac{M^2}{L_r^2} \omega_{sl} \frac{L_r}{R_r} i_{mr} \\ & = R_s i_{s\beta} + \sigma L_s \frac{d i_{s\beta}}{dt} + \omega_o \left[\sigma L_s i_{s\alpha} + \frac{M^2}{L_r} i_{mr} \right] \end{aligned} \quad [2.25]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการข้างต้นสามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ [2.4] จะเห็นได้ว่ายังมีแรงดันเหนี่ยวนำเชื่อมโยงกันระหว่างแกน α และ β ซึ่งทำให้การควบคุมกระแสมีความซับซ้อน แก้ไขโดยหลักการแยกการควบคุมให้มีอิสระต่อกัน



รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ป้อนด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน

จากสมการที่ [2.24-2.25] และรูปที่ 2.4 จะเห็นได้ว่า แรงดันเหนี่ยวนำที่ปรากฏบนแกน α ซึ่งมีผลมาจากแกน β คือ

$$u_{\alpha} = -\omega_o \sigma L_s i_{s\beta}$$

และแรงดันเหนี่ยวนำที่ปรากฏบนแกน β ซึ่งมีผลมาจากแกน α คือ

$$u_{\beta} = \omega_o \left[\sigma L_s i_{s\alpha} + \frac{M^2}{L_r} i_{m r} \right]$$

ดังนั้นถ้าควบคุมให้ u_{α} และ u_{β} เป็นไปตามสมการ

$$u_{s\alpha} = e_{s\alpha} - \omega_o \sigma L_s i_{s\beta} \tag{2.26}$$

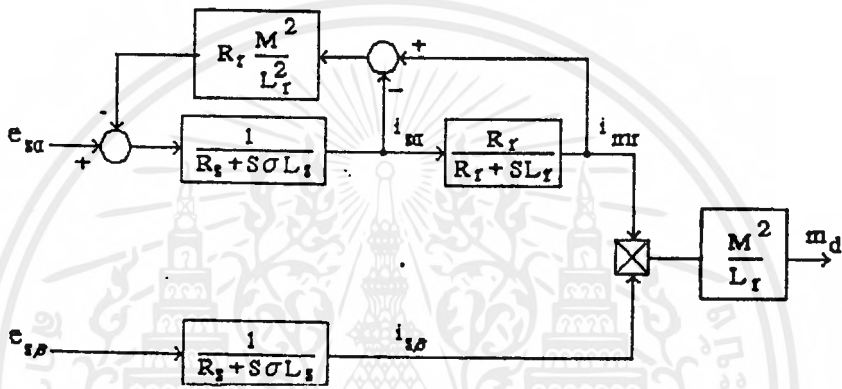
$$u_{s\beta} = e_{s\beta} + \omega_o \left[\sigma L_s i_{s\alpha} + \frac{M^2}{L_r} i_{m r} \right] \tag{2.27}$$

และแทนสมการที่ [2.26] และ [2.27] ลงในสมการที่ [2.24] และ [2.25] ตามลำดับจะได้

$$e_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \sigma L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} - R_r \frac{M^2}{L_r} i_{mr} + R_r \frac{M^2}{L_r} i_{s\alpha}$$

$$e_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \sigma L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} \tag{2.28}$$

จะเห็นได้ว่าผลของส่วนที่เป็นแรงดันเหนี่ยวนำซึ่งกันและกันจะถูกชดเชยไป บล็อกไดอะแกรมหลังการชดเชยแสดงได้ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมหลังจากชดเชยแรงดันเหนี่ยวนำในส่วนที่เชื่อมโยง

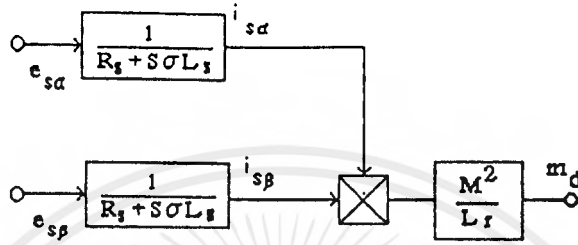
โดยในกรณีทั่วไปเราสามารถละเลยการถ่วงน้ำหนักของกระแสกระตุ้นได้เราจะได้ว่า $i_{mr} = i_{s\alpha}$ ดังนั้นรูปที่ 2.5 สามารถเขียนได้ง่ายขึ้นดังรูปที่ 2.6 ซึ่งจะได้ว่าการควบคุมกระแส $i_{s\alpha}$ และ $i_{s\beta}$ สามารถแยกอิสระต่อกันได้โดยผ่าน $c_{s\alpha}$ และ $c_{s\beta}$

และในกรณีนี้จากสมการที่ [2.26] และ [2.27] แรงดันที่เราควรจ่ายให้มอเตอร์จะเป็นไปตามสมการดังนี้

$$u_{s\alpha} = e_{s\alpha} - \omega_o \sigma L_s i_{s\beta} \tag{2.29}$$

$$u_{s\beta} = e_{s\beta} - \omega_o L_s i_{s\alpha} \tag{2.30}$$

และถ้าเรากำหนดให้



รูปที่ 2.6 ปลีกไฉยะแกรมของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ป้อนด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน โดยการแยกการควบคุมให้มีอิสระต่อกัน ในกรณีทีละเลยการล้าหลังของกระแสกระตุ้น

$$e_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha}^{ref} \quad [2.31]$$

$$e_{s\beta} = R_s i_{s\beta}^{ref} \quad [2.32]$$

จากสมการที่ [2.28] จะได้ว่า

$$i_{s\alpha} = \frac{1}{\tau_s s + 1} i_{s\alpha}^{ref} \quad [2.33]$$

$$i_{s\beta} = \frac{1}{\tau_s s + 1} i_{s\beta}^{ref} \quad [2.34]$$

โดยที่ $\tau_s = \frac{\sigma L_s}{R_s}$ คือค่าคงที่ทางเวลาทางด้านสเตเตอร์

ในทางปฏิบัติเนื่องจากค่าคงที่ทางด้านเวลามีค่าน้อยมากอาจจะละเลยได้ เราจึงกำหนดให้แรงดันสเตเตอร์มีค่าดังนี้แทนคือ

$$u_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha}^{ref} - \omega_o \sigma L_s i_{s\beta}^{ref} \quad [2.35]$$

$$u_{s\beta} = R_s i_{s\beta}^{ref} + \omega_o L_s i_{s\alpha}^{ref} \quad [2.36]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทำงานเดียวกันถ้ากระแสกระตุ้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงเวลา สมการทางด้านโรเตอร์ [2.18] และ [2.19] สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$i_{mr} = i_s^{r'cf} \quad [2.37]$$

$$\omega_o = \omega_m + \frac{R_r}{L_r i_{mr}} i_s \beta \quad [2.38]$$

กล่าวโดยสรุปก็คือ เราจะใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ [2.37] และ [2.38] ในการคำนวณหาตำแหน่งโรเตอร์ฟลักซ์ เพื่อใช้ในการแปลงแกน และจะใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ [2.35] และ [2.36] ในการควบคุมกระแสผ่านแรงดันให้ได้กระแสตามต้องการ



บทที่ 3

1100 FLUX VECTOR AC DRIVE

3.1 แนะนำ เครื่องขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับ ฟลักซ์ เวกเตอร์ 1100

เครื่องรุ่น 1100 เป็นเครื่องขับฟลักซ์เวกเตอร์ระบบดิจิทัลโดยใช้ไฟกระแสสลับเครื่องขับ จะควบคุมมาตรฐานหรือทำหน้าที่เป็นอินเวอร์เตอร์ (inverter) ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยมีหรือไม่มีเอนโคเดอร์ (encoder) วัดความสามารถของเครื่องสามารถประยุกต์ใช้ทั้งที่แรงบิดคงที่และแรงบิดที่สามารถปรับค่าได้ โดยมันจะจ่ายเอาต์พุตเป็นไซน์ที่มาจากกรมอดูเลทสัญญาณพัลส์ Pluse Width Modulated PWM) รูปแบบเอาต์พุตที่ได้จะนำไปควบคุมความเร็วและแรงบิดต่อไป เครื่องสร้างสัญญาณดิจิทัลและเครื่องจัดการสัญญาณดิจิทัล โดยทั่วไปจะทำให้การปฏิบัติการต่างๆรวดเร็ว มีการตอบสนองในการเคลื่อนที่และมีแรงบิดที่สูง ส่วน Insulated gate bipolar transistors (IGBTs) จะใช้เลือกค่าความถี่เพื่อปฏิบัติงานที่นุ่มนวลและเงียบ ในการปฏิบัติงานควบคุมความเร็วและแรงบิดขั้นสูงๆ เครื่องขับจะใช้กับสัญญาณที่เหมาะสมจากเครื่องเลือกสัญญาณพัลส์ หรือจากอินเทอร์เฟซโมดูล (Interface Module)

การควบคุมเครื่อง 1100 สามารถใช้ได้ทั้งกับเครื่องโดยตรงหรือการควบคุมระยะไกล การตั้งโปรแกรมเพื่อกำหนดลักษณะสำคัญต่างๆ ก็สามารถทำได้โดยค่าพารามิเตอร์และผลที่ต้องการจะถูกตั้งโดยผ่านทางหน้าปัดควบคุม

3.2 การใช้งาน FLUX VECTOR AC. DRIVE 1100

ก่อนที่จะนำ 1100 ไปใช้งาน จะต้องศึกษาก่อนที่จะนำไปต่อกับแหล่งจ่าย หรือมอเตอร์ ว่า ต้องต่อกันอย่างไร และต้องใช้อุปกรณ์เชื่อมต่อนั้นมีขนาดเท่าไรเพื่อให้เหมาะสมและปลอดภัย ซึ่ง จุดที่เชื่อมต่อนั้น แบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

3.2.1 การต่อกราวด์

3.2.2 การต่อกับแหล่งกำลัง

3.2.3 การต่อกับแหล่งควบคุม

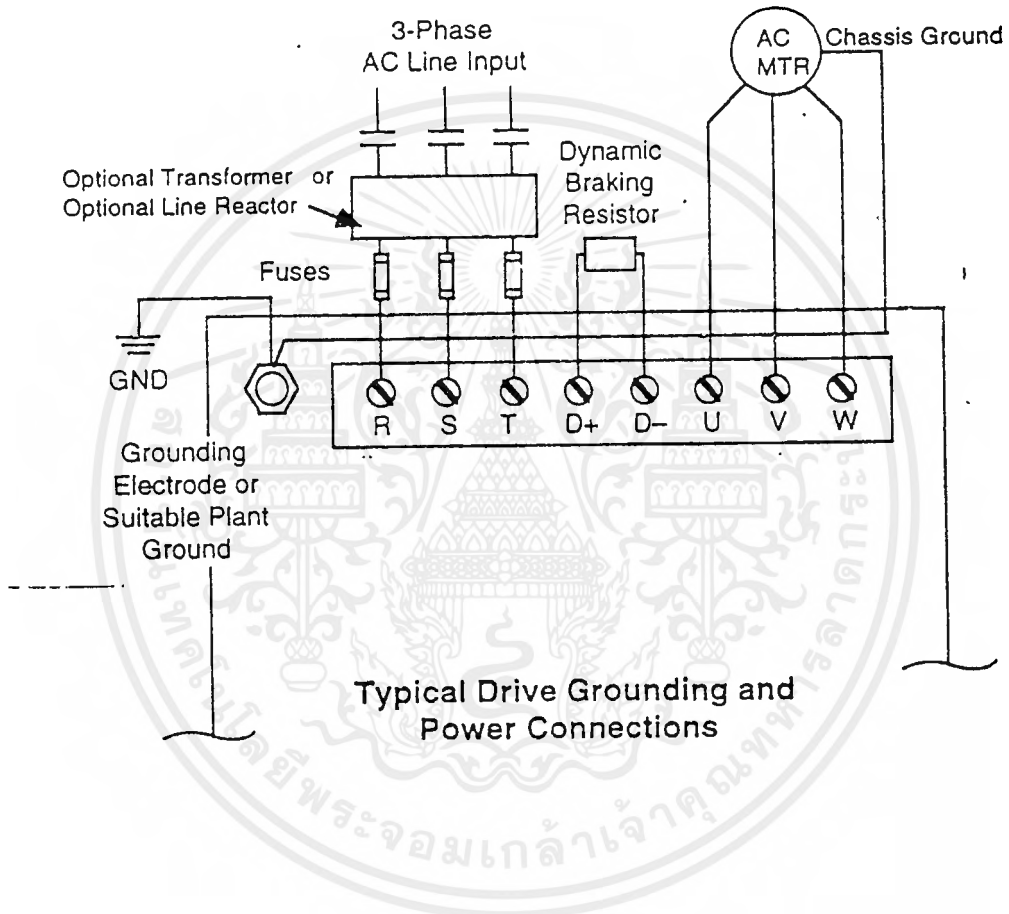
แต่ก่อนอื่นจำเป็นต้องทราบขนาดของสายส่งที่จะนำมาต่อ ณ จุดต่างๆ ซึ่งจะให้ตีควรรหัส ขั้วทองแดงและทนความร้อนได้อย่างน้อย 75 C° ส่วนขนาดและพิกัดอื่นๆเป็นดังนี้

จุดที่ต่อ	กำลัง	ขนาดสาย(AWG)	แรงบิด(In-lb)
ต่อกราวด์			
GND	230V:11/2-25CT/2-30VT	6	25
	460V:11/2-50CT/2-60VT	6	25
	60-100CT/75-125VT	4	150
ต่อแหล่งจ่ายไฟ			
R, S, T,	230V:11/2-15CT/2-30VT	6	15
U, V, W	20-25CT/25-30VT	2	25
	460V:11/2-30CT2-40VT	6	15
	40-50CT/50-60VT	2	25
	60-100CT/75-125VT	3	80
D+,D-	230V:11/2-25CT/2-30VT	6	15
	460V:11/2-50CT/2-60VT	6	15
	60-100CT/75-125VT	2	25
ต่อระบบควบคุม			
TB1	ทุกกรณี	14	3
TB2	ทุกกรณี	14	3
ต่อกับเครื่องสร้างสัญญาณพัลส์			
CON2	ทุกกรณี	14	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การต่อกราวด์

1. กราวด์ของมอเตอร์
2. กราวด์ของส่วนควบคุม
3. กราวด์ของแหล่งจ่ายไฟ



รูป 3.1 แสดงการต่อกราวด์

3.2.2 การต่อกับสายส่ง

1. ต่อกับแหล่งจ่ายไฟ จะต้องต่อกับแหล่งจ่ายไฟเฟสโดยมาจากสาย R, S และ T ซึ่งจำเป็นต้องเลือกฟิวส์และขนาดของสายให้เหมาะสมด้วย
2. ต่อกับมอเตอร์ ต่อกับเอาต์พุต U, V, และ W
3. ต่อกับไดนามิกเบรกกิ้งรีซิสเตอร์ (Dynamic Braking Resistor) โดยต่อกับ D+, D- และเลือกขนาดความต้านทานที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

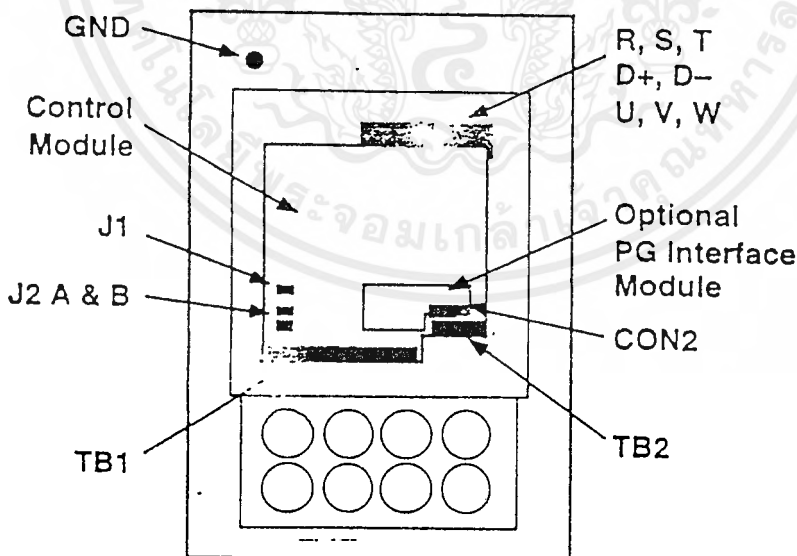
4. ต่อกับแหล่งกำลังอื่นๆ ซึ่งในบางครั้งในการใช้งาน จำเป็นจะต้องต่อเข้ากับแหล่งอื่นๆ นอกจากที่จำเป็นสำหรับเครื่องขับ อันได้แก่

- Isolation transformers
- Circuit breakers
- Line reactors
- Input/output contactors
- Motor overloads

3.2.3 การต่อกับระบบควบคุม

ส่วนควบคุมนี้แบ่งได้เป็นส่วนหลัก ได้ดังนี้คือ

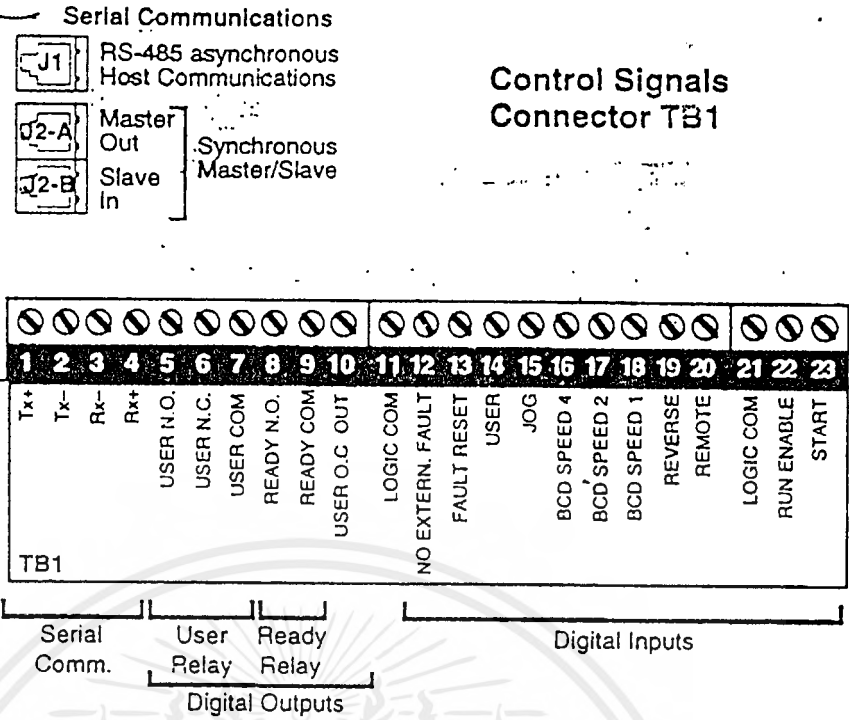
- ส่วนเชื่อม TB1 ใช้เป็น อินพุทและเอาต์พุท สำหรับสัญญาณที่เป็นดิจิตอล
- ส่วนเชื่อม TB2 ใช้เป็น อินพุทและเอาต์พุท สำหรับสัญญาณที่เป็นอนาล็อก และใช้เป็นเอาต์พุทของแหล่งจ่ายไฟ
- ส่วนเชื่อม CON2 ใช้ต่อกับเครื่องสร้างสัญญาณพัลส์
- จุดต่อ J1 เรียกว่า telephone-type jack ใช้ในช่วงสัญญาณที่ไม่เป็นซิงโครนัส
- จุดต่อ J2 เช่นเดียวกับ J1 แต่ใช้ในช่วงสัญญาณที่เป็นซิงโครนัส



รูป 3.2 แสดงตำแหน่งของการต่อส่วนควบคุมแต่ละประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

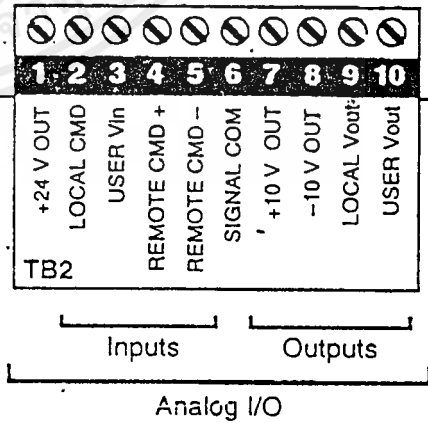
TB1 Connection Descriptions



รูป 3.3 แสดงส่วนเทอร์มินอล ของ TB1

TB2 Connection Descriptions

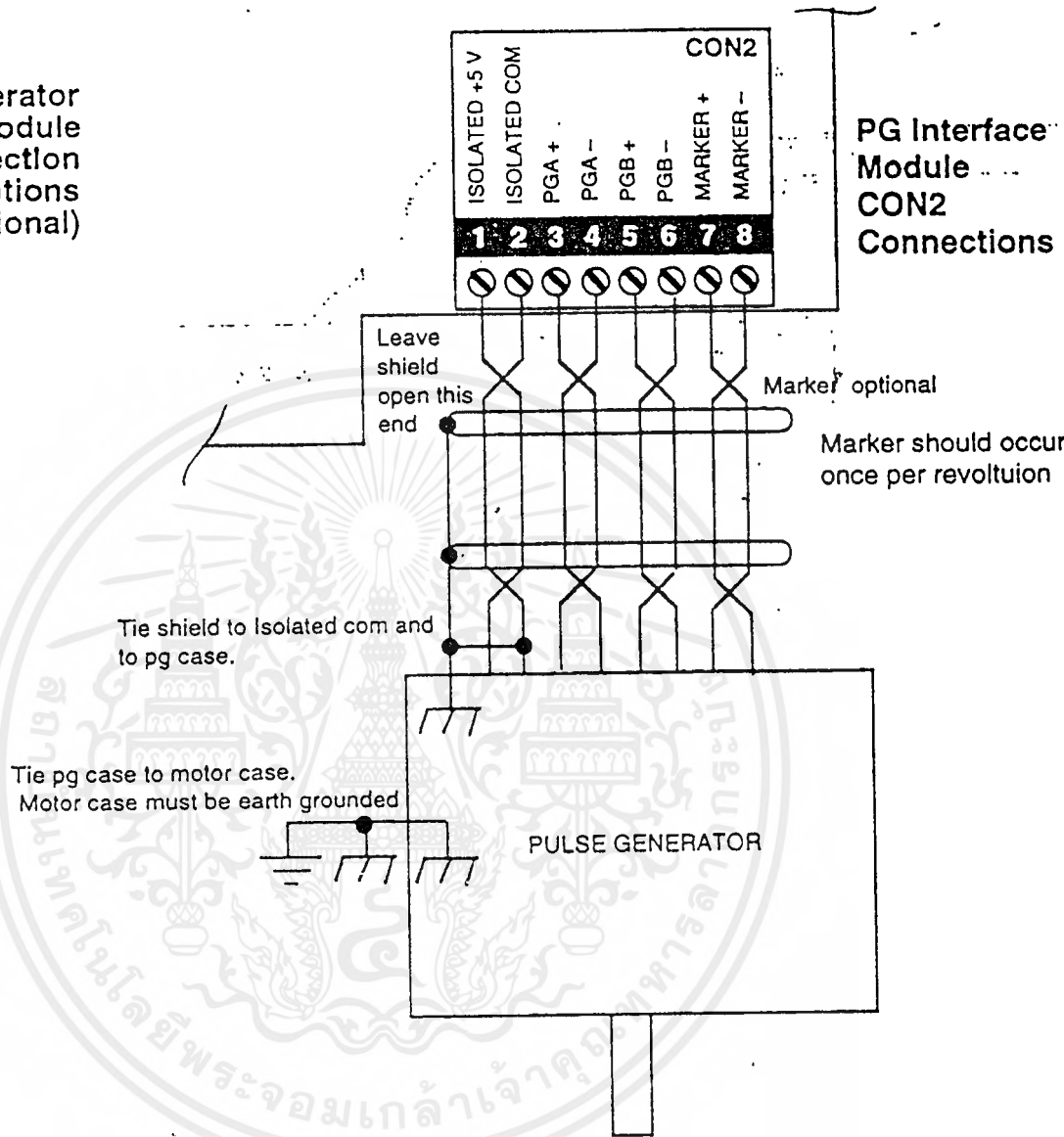
Control Signals Connector TB2



รูป 3.4 แสดงส่วนการต่อภายใน TB2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

pulse Generator
Interface Module
Connection
Descriptions
(optional)



รูป 3.5 แสดงการต่อภายในส่วนของ CON2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 โหมดการทำงานของ 1100 FLUX VECTOR A.C. DRIVE

ในการควบคุมการทำงานของไดรฟ์ 1100 นอกจากจะควบคุมโดยเลือกรายการต่างๆที่ต้องการซึ่งจะกำหนดเป็นพารามิเตอร์ต่างๆ จากหน้าปัดควบคุมแล้ว ยังสามารถควบคุมโดยเลือกเป็นแบบโหมดการทำงาน ซึ่งในโหมดการทำงานแบบพื้นฐานนั้น มีอยู่ 3 โหมดการทำงาน ได้แก่ มาสเตอร์โหมด(Master mode) สเลฟโหมด(Slave mode) และทอร์คโหมด(Torque mode) ทั้งมาสเตอร์โหมดและสเลฟโหมด เป็นการควบคุมความเร็ว ส่วนทอร์คโหมดเป็นการควบคุมแรงบิด

และในโครงการชิ้นนี้เป็นการนำมาสเตอร์โหมดมาช่วยในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์

3.3.1 มาสเตอร์โหมด

ในมาสเตอร์โหมดความเร็วที่ต้องการมาจาก “Remote Cmd” , “LocalCmd” , “SETPT” , “PS1” , “PS2” , “PS3” , “PS4” , “PS5” , “PS6” , “PS7” หรือ “JOG” โดยในทุกกรณีความเร็วที่ต้องการจะส่งผ่านไปยังส่วนขั้นตอนการทำงาน (DRIVE ROUTINE) ว่าเร่งความเร็วและการกระตุกถูกกำหนดอย่างไรก่อนที่จะจบการทำงานของรอบความเร็ว

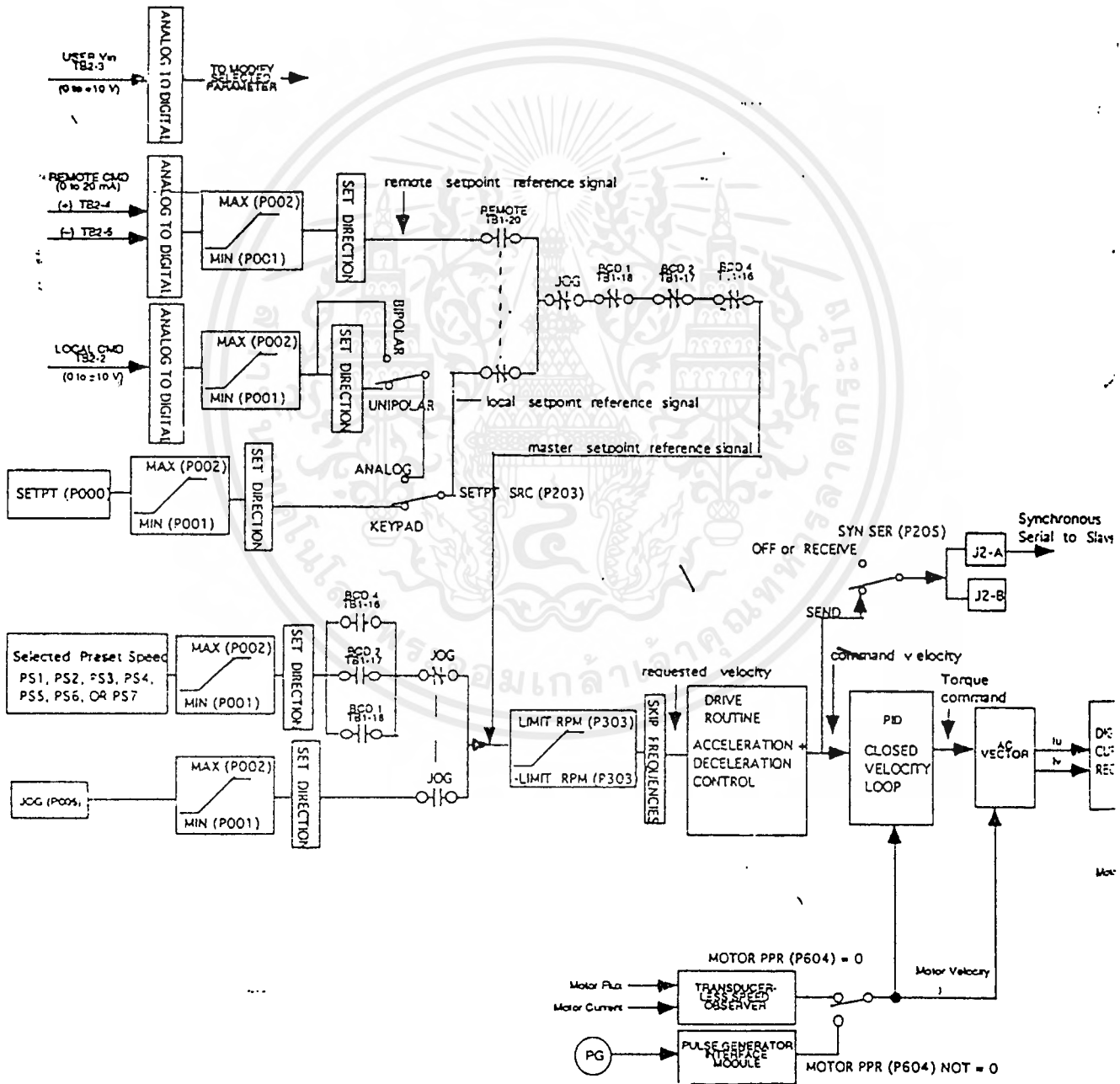
ข้อควรจำความเร็วที่ต้องการที่ส่งผ่านไปยังขั้นตอนการทำงานของเครื่องขั้วนั้นไม่ควรเปลี่ยนแปลงค่าอย่างทันทีทันใด

ความเร็วที่ต้องการ (Request Speed)	การตั้งค่าการเพิ่มความเร็ว (Acceleration Setting)	การตั้งค่าการลดความเร็ว (DecelerationSetting)
Remote Cmd (TB2-4+5)	ACCEL(P003)	DECEL(P004)
Local Cmd (TB2-2)	ACCEL(P003)	DECEL(P004)
SETPT(P000)	ACCEL(P003)	DECEL(P004)
PS1(P100)	PS1_ACCEL(P101)	PS1_DECEL(P102)
PS2(P103)	PS1_ACCEL(P104)	PS1_DECEL(P105)
PS3(P106)	PS1_ACCEL(P107)	PS1_DECEL(P108)
PS4(P109)	PS1_ACCEL(P110)	PS1_DECEL(P111)
PS5(P112)	PS1_ACCEL(P113)	PS1_DECEL(P114)
PS6(P115)	PS1_ACCEL(P116)	PS1_DECEL(P117)
PS7(P118)	PS1_ACCEL(P119)	PS1_DECEL(P120)
JOG(P005)	JOG_ACCEL(P006)	JOG_DECEL(P007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเลือกมอเตอร์โหมด สามารถเลือกได้ 3 วิธี ได้แก่

1. ตั้ง "RUN MODE"(P201) เป็น M_SPEED.
2. ตั้ง "UIN"(P426) เป็น SLAVE CTL.USER (TB1-14) อินพุตเปิดเพื่อเลือกมอเตอร์โหมด ถ้าปิดเป็นการเลือกสเลฟโหมด
3. ตั้ง "RUN MODE"(P201) เป็น M_SPEED. ตั้ง "UIN"(P426) เป็น SPEED TORQ.USER(TB1-14) เปิดอินพุตเพื่อเลือก มอเตอร์โหมด ปิดเพื่อเลือกสเลฟโหมด

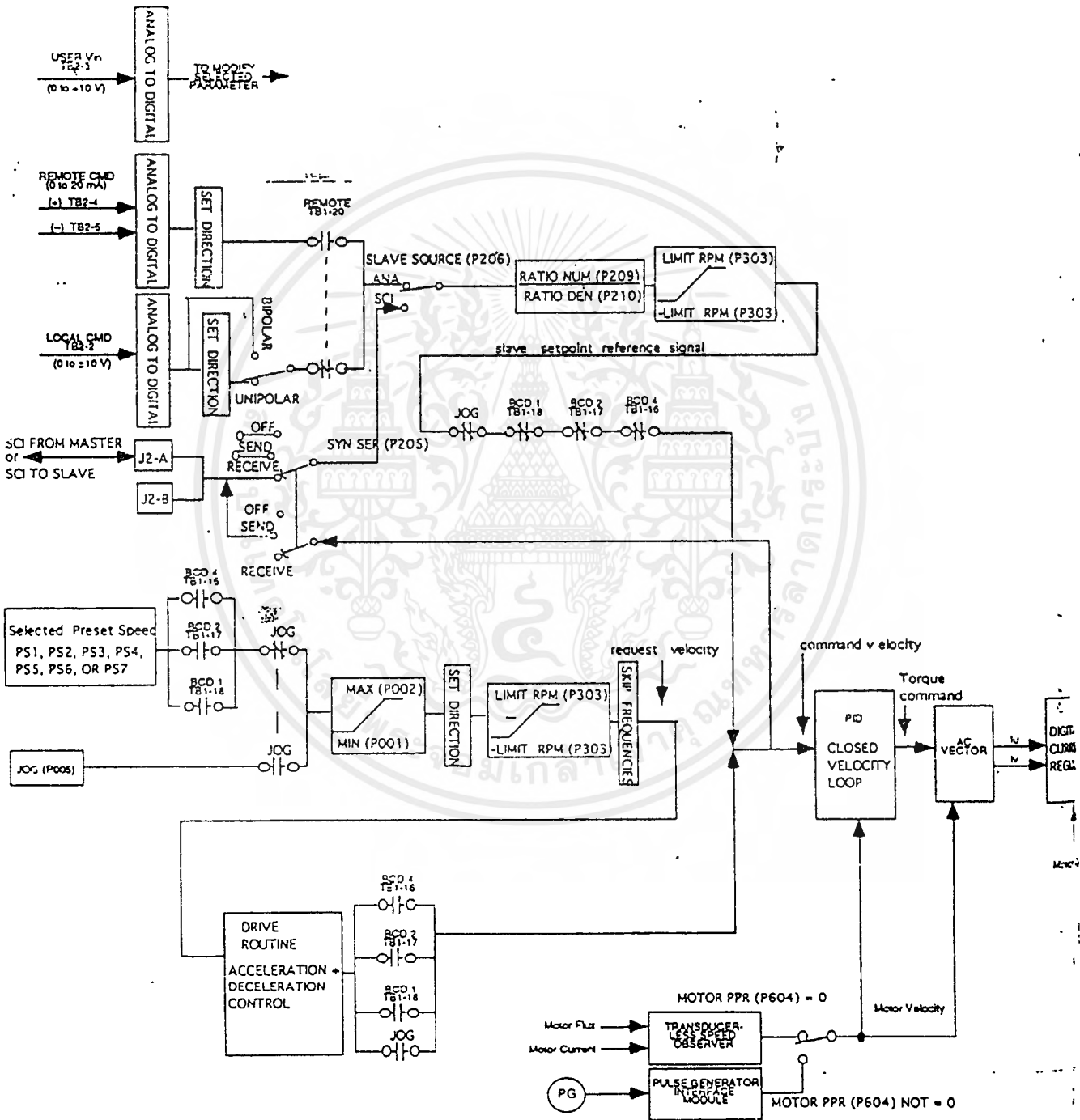


3.6 รูปแสดงการควบคุมความเร็ว ของมอเตอร์โหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 เซลล์โหมด

SLAVE MODE

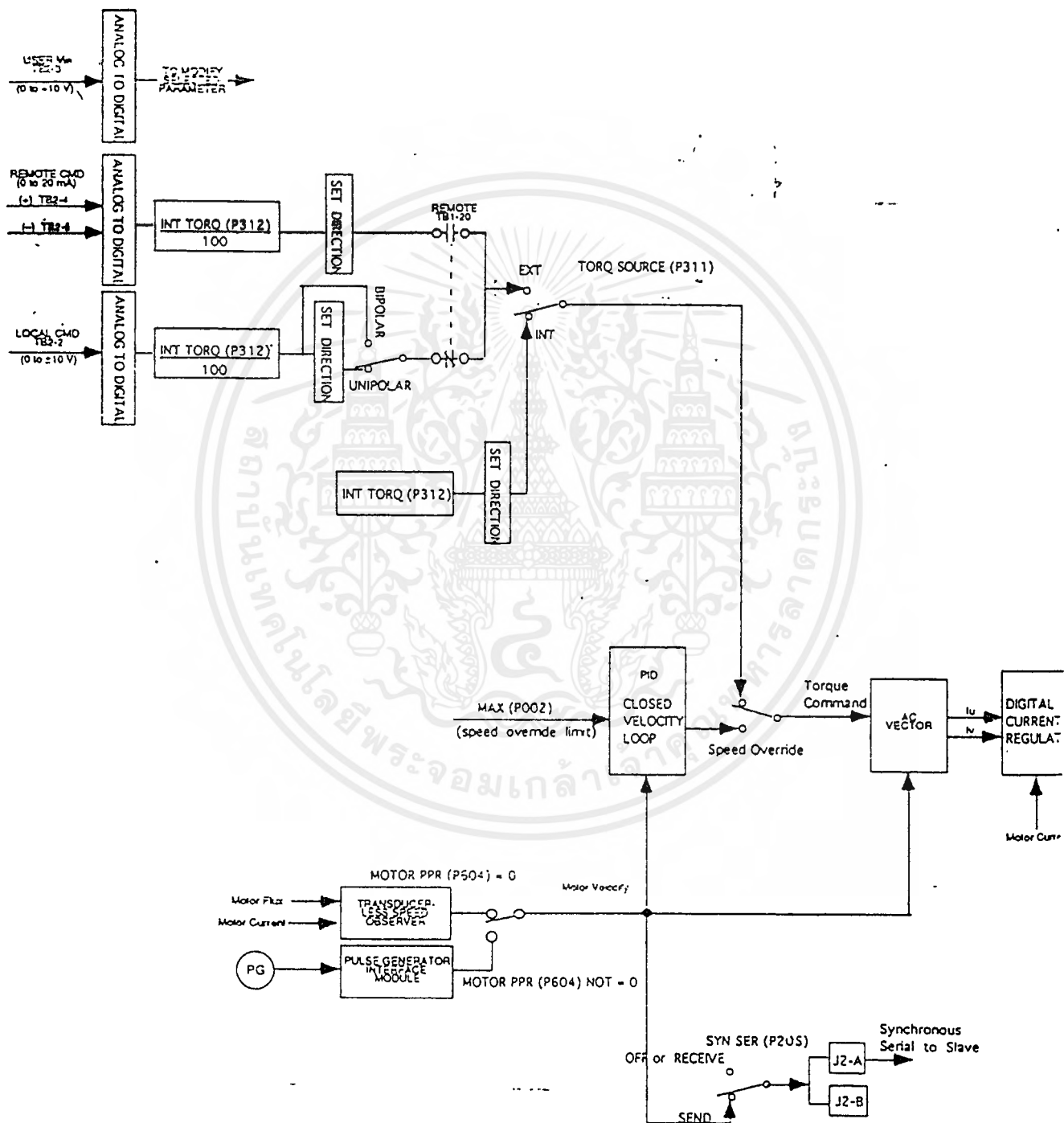


รูป 3.7 แสดงวิธีการควบคุมความเร็ว ของเซลล์โหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ทอร์คโหมด

TORQUE MODE



รูป 3.8 แสดงการควบคุมโดยทอร์คโหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การตั้งค่าพารามิเตอร์

ก่อนที่จะนำเครื่อง 1100 พลัส เวกเตอร์ เอซี ไรฟ์ ไปใช้งาน จำเป็นต้องมีการตั้งค่าพารามิเตอร์ให้สอดคล้องกับมอเตอร์ที่จะนำมาใช้งาน โดยมีขั้นตอนก่อนการใช้งานดังนี้

1. การเตรียมการก่อนการทดสอบ (Preparation)
2. การทดสอบ (AC Tune Test)
3. การออกจาก การทดสอบ (Check Out)
4. การนำไปประยุกต์ใช้งาน (Application)

3.4.1 การเตรียมการก่อนการทดสอบ

1. ต่อสายระหว่าง TB1-11 (LOGIC COM) กับ TB1-12 (NO EXTERN FAULT) เพื่อให้เครื่องควบคุมสามารถทำงานได้ ถ้าขา TB1-12 เปิดวงจร จะทำให้เกิดการทริป (Trip) และ EXT FAULT TRIP (EXT) จะรายงานออกมา
2. ต่อสายระหว่าง (TB1-21 (LOGIC COM) กับ TB1-22 (RUN ENABLE) ถ้าไม่ต่อ เครื่องควบคุมจะไม่สามารถทำงานได้ โดยถ้า RUN ENABLE (P220) ถูกตั้งเป็น STOP เครื่องควบคุมจะหยุดโดย สถานะที่ตั้งค่าไว้ใน STOP MODE (P202) แต่ถ้า P220 ตั้งเป็น CAUST เครื่องควบคุมจะตั้งให้หมุนไปเรื่อยๆ จนกว่าจะมีการสั่งให้หยุด
3. ตรวจสอบให้แน่ใจว่าค่า KPAD ENABLE (P204) มีค่าเป็น ENA
4. ถ้ามีการต่อ พัดลมเจนเนอเรเตอร์ จะต้องมีการตรวจสอบการต่อสายอีกครั้ง

3.4.2 การทดสอบ

เอซีจูนเทสต์ เป็นาการทดสอบค่าพารามิเตอร์ของเครื่องควบคุมให้เหมาะสมกับมอเตอร์ โดยการตรวจสอบ แบ่งได้เป็นดังนี้คือ

1. ข้อมูลพื้นฐาน
 - 1.1 พิกัดกระแสของมอเตอร์
 - 1.2 พิกัดแรงดันของมอเตอร์
 - 1.3 พิกัดความถี่ (เป็น 50 หรือ 60 เฮิร์ตส)
 - 1.4 พิกัดความเร็วรอบสูงสุด
 - 1.5 ค่าพิกัดความเร็วที่จะทดสอบ
 - 1.6 ค่าอัตราเร่งสู่ความเร็วสูงสุดในการทดสอบ
 - 1.7 ค่าพิกัดแรงบิดที่จะทดสอบ
2. ข้อมูลของ พัดลมเจนเนอเรเตอร์ (PG) จะมีการตรวจสอบค่าพีจี แต่ถ้าไม่มีค่าพีจี ให้ทำการตั้งค่า MOTOR PPR = 0

3. การทดสอบข้อมูลภายในมอเตอร์

3.4 ทดสอบค่าความต้านทานสเตเตอร์ (Stator Resistance)

3.5 ทดสอบค่ากระแสฟิลด์ (Field Current)

3.6 ทดสอบค่าความถี่สลลิป (Slip Frequency)

3.7 ทดสอบค่าอัตราขยายของระบบ (System Gain)

โดยการทดสอบนี้จะทำการเปลี่ยนค่า AC TUNE จาก D เป็น E จากนั้นเครื่องจะทำงานในภาคผนวก

หลังจากทำการ เอชี่ทูนเทสต์ ถ้าไม่มีส่วนป้อนกลับ (Pulse Generator) ให้ทำการตั้งค่า INVERT (P613) จาก 0 เป็น 3 หรือ 3 เป็น 0 , 1 เป็น 2 หรือ 2 เป็น 1

3.4.3 การออกจาก การทดสอบ

ทำได้โดยการกด PROG

3.4.4 การนำไปประยุกต์การใช้งาน

หลังจากทำการเอชี่ทูนเทสต์แล้ว ยังต้องป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อนำไปใช้งาน

พิกัดทั่วไปของ MTR AMPS (P300)

มอเตอร์ MOTOR VOLTS (P301)

BASE FREQ (P302)

LIMIT RPM (P303)

NUM POLES (P310)

MOTOR PPR (P604)

การทดสอบและ AC TUNE (P600)

การตั้งค่าระบบ SYS WN (P601)

SYS GAIN (P602)

CAR FREQ (P603)

STATOR R (P605)

I FIELD (P606)

SLIP FREQ (p607)

LEAKAGE (P608)

KA CMD (P609)

KV CMD (P610)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	KP FBK (P611)
	KD FBK (P612)
	INVERT (P613)
พิกัดแรงบิด	I LIMIT (P008)
และกระแส	MAX F TORQ (P306)
	MAX R TORQ (P307)
	MAX F BREAK (P308)
	MAX R BREAK (P309)
	UIN (P426)
กระแส และ การ ป้องกัน	I ² IXT AMPS (P304)
	IXT FAULT (P305)
การตั้งค่าหน่วย และทศนิยม	ENG CHAR 1 (P009)
	ENG CHAR 2 (P010)
	ENG CHAR 3 (P011)
	ENG DEC POINT (P012)
	ENG SCALE (P013)
การควบคุม	START MODE (P200)
การเดินเครื่อง	SPINNING MOTOR (P211)
	TRIP RESTARTS (P217)
	RESTART TIME (P218)
	RUN ENABLE (P220)
	START INIT (P221)
การควบคุม	F R MODE (P214)
ทิศทาง	INVERT (P613)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุม STOP MODE (P202)
 การหยุด INJBRAKE TIME (P215)
 INBREAK I (P216)
 SET T (P614)
 UIN (P426)

การเชื่อมต่อ SERIAL BAUD (P313)
 โดยไซส์สาย SERIAL ADDR (P314)
 สัญญาณ BITS PAR (P315)
 CHECK SUM (P316)
 MDROP MODE (P317)

การควบคุมพิกัด BUS REG (P219)
 แรงดันเข้า

การควบคุมค่า LANGUAGE (P222)
 พารามิเตอร์ SET USER DEFLT (P223)
 DEFLT ALL FACT (P225)
 DEFLT ALL USER (P226)
 SECURITY (P014)

การควบคุมรูป S RAMP (P212)
 แบบของการเร่ง SRAMP M (P213)

แสดงผลหน้าจอ KPAD ENABLE (P204)

การเลือกใช้ USER VIN (P413)
 อินพุตเป็น UVIN HI (P414)
 อนาล็อก UVIN LO (P415)
 UVIN MODE (P416)
 UVIN OS (P417)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกใช้แบบ DIR CONTROL (P401)
 ระยะเวลา MIN (P001)
 MAX (P002)
 R HI (P408)
 R LO (P409)
 R OFFSET (P410)

เลือกอินพุตเป็น DIR CONTROL (P401)
 ระดับแรงดัน MIN (P001)
 MAX (P002)
 L HI (P402)
 L LO (P403)
 L OFFSET (P404)

เลือกใช้สัญญาณ LOCAL VOUT (P420)
 โลคอล LVOUT HI (P421)
 LVOUT LO (P422)

เลือกใช้แรงดัน USER OUT (P423)
 เอาท์พุท UVOUT HI (P424)
 UVOUT LO (P425)

โปรแกรมค่า USER RELAY (P427)
 รีเลย์ UR SET (P428)
 UR CLR (P429)

ตั้งให้แสดงผล LAST FAULT (P516)
 การผิดพลาด FAULT 2 (P517)
 FAULT 3 (P518)
 FLT VOLTS (P519)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FLT FREQ (P520)

F MODE (P521)

FLT CUR (P522)

FLT TIME (P523)

แสดงผลทั่วไป SPEED (P5000)

SET SP (P501)

SPEED ERR (P502)

MOTORTORQ (P503)

MOTOR I (P504)

MOTOR HZ (P505)

MOTOR V (P506)

RMOTOR (P507)

IN WATTS (P508)

INPUT PF (P509)

BUS VOLTS (P510)

IXT ACCUM (P511)

DB ACCUM (P512)

TOTAL KWH (P513)

HOURS. RUN (P514)

INS (P515)

SW (P524)

DRIVE SIZE (P525)

บทที่ 4

ในบทนี้จะเป็นส่วนของการทดลองการใช้งานฟลักซ์เวกเตอร์เพื่อศึกษาคุณสมบัติต่างรวมถึงการประยุกต์ใช้งานเพื่อใช้ฟลักซ์เวกเตอร์ในการรักษาสถานะเชิงโคโนซระหว่างมอเตอร์เหนี่ยวนำสองตัว และการสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อใช้ร่วมกับฟลักซ์เวกเตอร์ในการใช้ควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยมีการทดลองทั้งหมด 5 การทดลองคือ

4.1 การทดลองที่ 1 ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบการใช้งานระหว่างอินเวอร์เตอร์กับฟลักซ์เวกเตอร์ เงื่อนไขการทดลอง

ใช้เครื่องฟลักซ์เวกเตอร์และอินเวอร์เตอร์ขับมอเตอร์ขนาด 4 กิโลวัตต์ 2480 รอบต่อนาที 50 เฮิร์ตซ์ เดลต้า-สตาร์ 220/380 โวลท์ 14.4/8.30 แอมแปร์
ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการขับมอเตอร์โดยใช้อินเวอร์เตอร์
2. ทำการขับมอเตอร์โดยใช้ฟลักซ์เวกเตอร์
3. บันทึกความเร็วในการสตาร์ท การกลับทิศ ที่การตั้งค่าเวลาต่างๆ กัน

ผลการทดลอง

การทดลอง	อินเวอร์เตอร์	ฟลักซ์เวกเตอร์
เวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วจากเริ่มสตาร์ทจนถึงความเร็วที่พิกัด	ขึ้นอยู่กับที่ตั้งเวลาในการเร่งสู่ความเร็วสูงสุดซึ่งมีเงื่อนไขต่างๆมากกว่าฟลักซ์เวกเตอร์	ขึ้นอยู่กับที่ตั้งค่าพารามิเตอร์ในการเร่งสู่ความเร็วสูงสุดซึ่งมีอัตราเร่งสูงสุดมากกว่าอินเวอร์เตอร์
การกลับทิศ	ใช้เวลาในการกลับทิศนานกว่า เพราะใช้เวลาในการหยุดมอเตอร์นานก่อนจะเร่งสู่ความเร็วเดิมอีกครั้งหนึ่ง	กลับทิศได้เร็วกว่าเพราะใช้เวลาหยุดแล้วเร่งสู่ความเร็วเดิมสั้นมากเหมือนกลับทิศได้ทันที

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองเปรียบเทียบการใช้งานระหว่างอินเวอร์เตอร์กับฟลักซ์เวกเตอร์

ฟลักซ์เวกเตอร์มีการตอบสนองทางด้านความเร็วดีกว่าอินเวอร์เตอร์ทั่วไปแต่ฟลักซ์เวกเตอร์มีการใช้งานที่ซับซ้อนมากกว่าอินเวอร์เตอร์

4.2 การทดลองที่ 4.2 ทดสอบป้อนแรงดันไฟกระแสตรงเพื่อนำไปควบคุมความเร็วโดยทำการป้อนจากแหล่งจ่ายจากภายนอก ต่อเข้าที่ TB2-2 และต่อสายกราวด์ที่ TB2-6 ซึ่งคือ SIGNAL COM เงื่อนไขการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้มอเตอร์ขนาด 4 กิโลวัตต์ 2840 รอบต่อนาที 3 เฟส 50 เฮิรซ์ ไม่ต่อโหลด
ขั้นตอนการทดลอง

1. ใช้ฟลักซ์เวกเตอร์ขับเคลื่อนมอเตอร์โดยการตั้งพารามิเตอร์เพื่อให้ฟลักซ์เวกเตอร์ควบคุมความเร็ว
ของมอเตอร์โดยการรับแรงดันไฟตรงจากภายนอก

2. ตั้งค่าให้แรงดันไฟตรง 10 โวลท์หมุนด้วยความเร็วสูงสุด

3. ทำการป้อนแรงดันตั้งแต่ 1 ถึง 10 โวลท์ ทำการบันทึกความเร็ว

ผลการทดลอง

ระดับแรงดัน(volt)	ความเร็ว(รอบต่อนาที)
1	298-309
2	597-602
3	895-899
4	1296-1297
5	1499-1500
6	1800-1802
7	2100-2101
8	2398-2399
9	2699-2700
10	2999-3000

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการควบคุมความเร็วโดยการป้อนระดับแรงดันไฟกระแสตรงให้กับ
ฟลักซ์เวกเตอร์

จากการทดลองเป็นการทดสอบว่าฟลักซ์เวกเตอร์สามารถรับแรงดันไฟตรงเพื่อใช้ในการขับ
มอเตอร์ได้

4.3 การทดลองที่ 4.3 ใช้ฟลักซ์เวกเตอร์ 2 เครื่องมาประยุกต์ใช้ในการรักษาสถานะซิงโครไนซ์
ระหว่างมอเตอร์ 2 ตัว ทั้งด้านความเร็ว การหยุด การสตาร์ท การกลับทิศ
เนื่องไปการทดลอง

มอเตอร์ตัวที่ 1 ขนาด 4 กิโลวัตต์ 2840 รอบต่อนาที (แต่ตั้งค่าให้ใช้ความเร็วสูงสุด
1500 รอบต่อนาที) เดลต้า-สตาร์ 220/380 โวลท์ 14.4/8.32 แอมแปร์ 50 เฮิรซ์ 3 เฟส

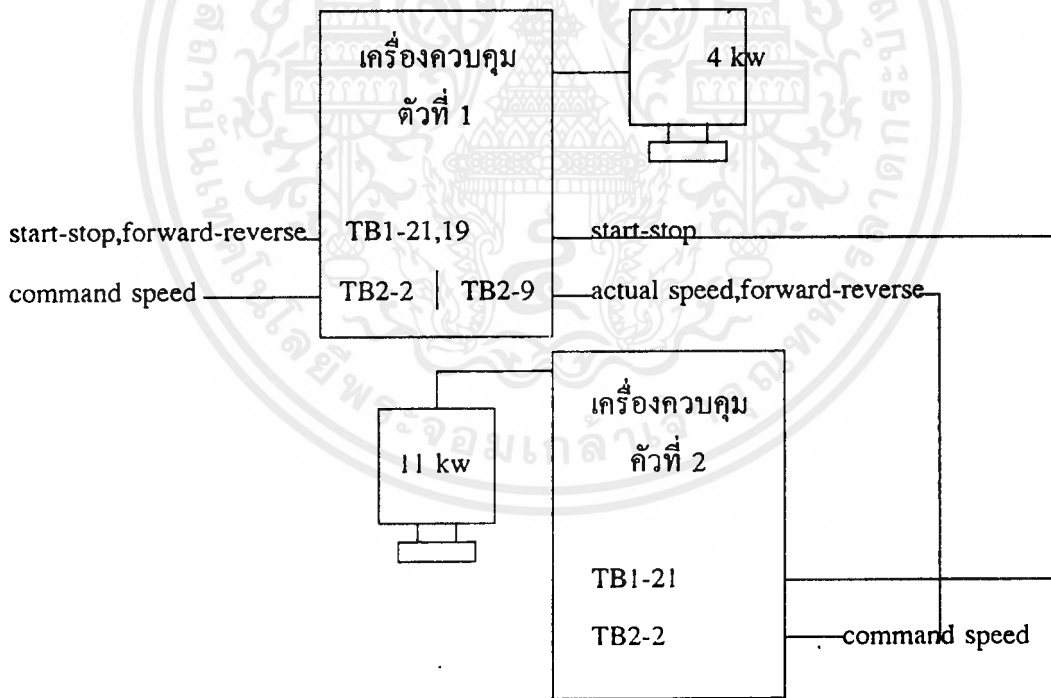
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 2 พิกัด 11 กิโลวัตต์ 1455 รอบต่อนาที เกลตต้า-สตาร์ 380/660 โวลต์ 23.2/13.2 แอมแปร์ 50 เฮิรซ์ 3 เฟส

โดยทั้งสองไม่มีส่วนป้อนกลับ ไม่มีส่วนเปรียบเทียบความเร็วและไม่มีการต่อโหลด

การทดลอง 4.3

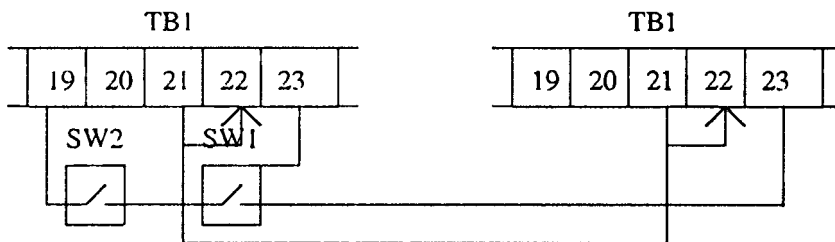
การรักษาสถานะซึ่งโครไนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้เครื่องควบคุมมอเตอร์ชนิดฟลักซ์เวกเตอร์เอซีไดรฟ์ (Flux Vector Ac Drive) โดยจะใช้เครื่องที่ 1 ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำตัวเล็ก 4 กิโลวัตต์โดยควบคุมให้มอเตอร์ทำงาน หยุด การหมุนกลับทิศ โดยใช้สวิทช์ควบคุม คำสั่งในการควบคุมความเร็ว (ระดับแรงดันดีซี) และใช้เครื่องที่ 2 ทำการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ตัวใหญ่โดยนำ ACTUAL SPEED ของเครื่องที่ 1 มาเป็นคำสั่งความเร็ว(Command Speed) ของเครื่องที่ 2 ซึ่งจะสามารถกลับทิศการหมุนได้โดยใช้คำสั่งความเร็วนี้ ส่วนการสตาร์ทและหยุดจะใช้สวิทช์เชื่อมกับเครื่องที่ 1 แต่เนื่องจากสัญญาณต้องมีการล่าช้า ดังนั้นจึงต้องตั้งค่าเวลาในการเริ่มจากความเร็วที่ 0 รอบต่อนาทีจนถึงความเร็วที่กำหนดสูงสุด ทั้งในการหมุนซ้ายและหมุนขวาของเครื่องที่ 1 ให้มากกว่าเครื่องที่ 2 เล็กน้อย



รูปที่ 4.1 แสดงการต่อระหว่างมอเตอร์กับเครื่องควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์ ทั้ง 2 ชุด

การทำงานของส่วนการควบคุม แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

1. ส่วนควบคุมการสตาร์ท,การหยุด และส่วนควบคุมการหมุนตามเข็มและหมุนทวนเข็มนาฬิกา



รูป 4.2 แสดงการต่อสวิทช์ควบคุม การสตาร์ทและการหยุด , การหมุนกลับทิศ

การควบคุมการสตาร์ทและการหยุด

SW1 เป็นตัวควบคุมการสตาร์ทและการหยุด โดยเมื่อ SW1 ON จะเป็นการสตาร์ท และเมื่อ SW1 OFF จะทำให้หยุด โดยต่อระหว่าง TB1-23 และ TB1-23 จากนั้นทำการเชื่อม TB1-21 ของตัวที่ 1 และตัวที่ 2 จากนั้นต่อไปยัง TB1-23 ของตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ซึ่งต่อกันอยู่ จากการต่อดังกล่าว จะทำให้สามารถควบคุมการ ON-OFF ได้ โดยใช้สวิทช์เช่นเดียวกับตัวเครื่อง

การควบคุมทิศทางการหมุน

จากรูปจะเห็นได้ว่า มี SW2 เชื่อมต่อระหว่าง TB1-19 และ TB1-21 เพื่อการสั่งหมุนเดินหน้าและถอยหลังของเครื่องควบคุมตัวที่ 1 โดยเมื่อเป็นการหมุนเดินหน้า แอคชวลคอมมานด์ (Actual Command) ซึ่งกำหนดอยู่ใน Local Vout TB2-9 นั้นจะมีค่าแรงดันไฟกระแสตรงเป็นบวกและเมื่อทำการหมุนถอยหลัง จะให้ค่าแรงดันไฟดังกล่าวมีค่าเป็นลบ ดังนั้นจึงต้องทำการตั้งค่าต่างๆ ดังนี้ เพื่อให้เครื่องควบคุมที่ 2 รู้ว่ามีการสั่งงานเป็นการหมุนถอยหลัง

1. ตั้งค่า MIN (P001) ให้เป็น -1,500 หรือ -3,000 ขึ้นอยู่กับความเร็วต้องการความเร็วสูงสุดในการหมุนถอยหลังเป็นเท่าใด

2. ตั้งค่า DIR CONTROL (P401) เป็น AUTO

3. ตั้งค่า Loffset (P404) เป็น NOMINAL

จากนั้นทำการตั้งค่า Actual command บนเครื่องที่ 1 ให้เป็นดังนี้

1. LOCAL Vout (P420) เป็น SPEED

2. LVOUT HI (P421) เป็น 100

3. LVOUT LO (P422) เป็น 0

ดังนั้นเมื่อทำการหมุนถอยหลัง ค่าLocal Vout จะมีค่าเป็นลบ ซึ่งเครื่องที่ 2 จะทราบว่าการสั่งเดินเครื่องถอยหลังเครื่องก็จะทำการปฏิบัติตาม

2. ส่วนควบคุมความเร็ว

ทำการเชื่อมต่อระหว่าง TB9-2 ของเครื่องที่ 1 กับ TB2-2 ของเครื่องที่ 2 และ TB2-6 ของเครื่องที่ 1 และเครื่องที่ 2

ตารางการวัดความเร็วรอบเมื่อเครื่องควบคุมที่ 1 ควบคุมความเร็วโดยผ่านทางหน้าจอโมเตอร์ ส่วนเครื่องควบคุมที่ 2 ควบคุมด้วยสัญญาณระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

ความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวที่ 1 (rpm)	ความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวที่ 2 (rpm)
1500 - 1499	1499-1500
1400 - 1399	1412-1413
1300 - 1299	1309-1310
1210 - 1200	1207-1209
1100 - 1099	1106-1107
1000 - 999	1000-1002
901 - 899	899-900
700 - 699	701-702
600 - 598	600-598
502 - 497	497-499
401 - 399	393-397
301 - 298	299-300
201 - 199	199-200

ตาราง 4.3 แสดงความเร็วรอบเมื่อควบคุมจากจอโมเตอร์

ตารางการวัดความเร็วรอบเมื่อเครื่องที่ 1 ควบคุมความเร็วด้วยสัญญาณระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยการต่อค่าความต้านทานชนิดปรับค่าได้ 50 กิโลโอมห์ ระหว่างขา TB2-2 , TB2-6 , TB2-7

ความเร็วของมอเตอร์ ตัวที่ 1 (rpm)	ความเร็วของมอเตอร์ ตัวที่ 2 (rpm)
1499-1500	1498-1499

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

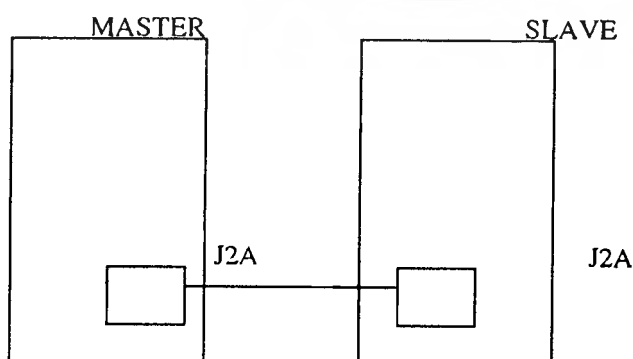
1408-1410	1410-1412
1303-1304	1305-1306
1199-1201	1202-1203
1123-1124	1127-1128
998-1001	1001-1007
909-900	912-914
818-819	823-821
701-705	707-709
599-601	604-607
302-305	304-306
98-113	109-111

ตารางที่ 4.4 เมื่อควบคุมด้วยสัญญาณกระแสไฟตรง

การทดลอง การสตาร์ทและหยุด , การหมุนกลับทิศ

1. ในการทดลองเริ่มสตาร์ทมอเตอร์ มอเตอร์ทั้ง 2 ตัวสามารถออกจากสภาวะหยุดนิ่งไปที่ระดับความเร็วที่ต้องการได้พร้อมกัน
2. ในการทดลองการหยุด มอเตอร์ทั้ง 2 ตัวไม่สามารถหยุดพร้อมกันได้
3. ในการทดลองการกลับทิศ สามารถกลับทิศได้ทั้ง 2 ตัว แต่มอเตอร์ตัวที่ 2 จะใช้เวลาในการหมุนกลับทิศมากกว่าตัวที่ 1

4.3 การเชื่อมต่อมอเตอร์กับสเลฟ (Master- Slave Network) เพื่อเป็นการรักษาสถานะเชิงโครโนซ์เมื่อใช้มอเตอร์ขนาดไม่เท่ากัน โดยการต่อมอเตอร์กับสเลฟ ใช้สายโทรศัพท์ชนิด 6 ขาดต่อระหว่าง J2A ของเครื่องควบคุมตัวที่ 1 และ J2A ของเครื่องควบคุมตัวที่ 2 ดังรูป



รูปที่ 4.3 แสดงการต่อมอเตอร์กับสเลฟ โดยใช้สายสัญญาณโทรศัพท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีการตั้งพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมดังนี้

1. ตั้งค่า SYN SER (P205) ของมาสเตอร์เป็น SEND และของสเลฟเป็น RECEIVE
2. ตั้งค่า SLAVE SOURCE (P206) เป็น SCI
3. ตั้งค่า RUN MODE (P201) ของสเลฟเป็น S_SPEED
4. ตั้งค่า RUN MODE (P201) ของสเลฟเป็น S_SPEED หรือ M_SPEED
5. ค่า ON DEL P(207) ของสเลฟ ว่าทำไหรเพื่อนำไปหาค่า AD DEL (P208) ของมาสเตอร์โดย

$$AD DEL (MASTER) = ON DEL (SLAVE) - ON DEL (MASTER)$$

ถ้าค่าที่ได้น้อยกว่า 0 ให้ตั้งค่าเป็น 0

เงื่อนไขการทดลอง

1. ใช้เครื่องควบคุมที่ 1 ในการควบคุมมอเตอร์ขนาด 4 กิโลวัตต์
2. ใช้เครื่องควบคุมที่ 2 ในการควบคุมมอเตอร์ขนาด 11 กิโลวัตต์

การทดลอง

4.3.1 ทำการควบคุมความเร็วของมอเตอร์แต่ละตัวแยกจากกัน โดยตั้งค่าความเร็วจากหน้าจอที่ความเร็วต่างกันและกำหนดการหมุนโดยป้อนสัญญาณรูปพัลส์โดยกำหนดความกว้างของพัลส์ศูนย์ (TL) ต่างๆกันแต่ความกว้างของพัลส์บวก (TH) คงที่โดยป้อนสัญญาณเข้าที่ TB2-2 และสายกราวด์ที่ TB2-6 เพื่อตรวจสอบสนองความเร็วของมอเตอร์แต่ละตัวว่ามีสมบัติเป็นอย่างไรบ้าง ตารางผลการทดลองเมื่อใช้เครื่องควบคุมตัวที่ 1 ควบคุมมอเตอร์ตัวที่ 1 โดยตั้งค่าความเร็วจากพังก์ชันเวกเตอร์

ค่าที่ตั้ง(rpm)	ความเร็วของมอเตอร์(rpm)
30000	2999-3000
2900	2899-2900
2800	2799-2800
2700	2699-2701
2600	2599-2600
2500	2499-2501
2400	2399-2401
2300	2299-2301
2200	2199-2201

ค่าที่ตั้ง(rpm)	ความเร็วของมอเตอร์(rpm)
1400	1397-1401
1300	1298-1300
1200	1197-1201
1100	1098-1100
1000	992-1000
900	898-902
800	795-801
700	699-702
600	599-600

2100	2099-2101
2000	1998-2001
1900	1899-1900
1800	1799-1801
1700	1699-1701
1600	1599-1600
1500	1499-1500

500	498-502
400	399-400
300	299-300
200	199-200
100	99-101
50	48-51
0	0

ตารางที่ 4.5 แสดงความเร็วยรอบของมอเตอร์ตัวที่ 1 ที่ตั้งความเร็วจากฟลักซ์เวกเตอร์ เมื่อป้อนสัญญาณรูปพัลส์ ให้แก่เครื่องควบคุมเพื่อใช้ควบคุมมอเตอร์ตัวที่ 1 โดยตั้งค่าความเร็วรอบสูงสุดของมอเตอร์เท่ากับ 100 รอบต่อนาที ได้ผลการทดลองดังนี้

TL(วินาที)	TH(วินาที)	ความเร็ว(rpm)	ลักษณะการหมุน
0.9	0.9	39	ใช้การหมุนประมาณ 2 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.8	39	ใช้การหมุนประมาณ 2.5 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.7	39	ใช้การหมุนประมาณ 2.75 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.6	39	ใช้การหมุนประมาณ 3 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.5	35	ใช้การหมุนประมาณ 3.5 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.4	35	ใช้การหมุนประมาณ 4 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.3	30	ใช้การหมุนประมาณ 6 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.2	23	ใช้การหมุนประมาณ 10 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.1	แฉ่ว	มอเตอร์พยายามหมุนแต่ไม่เคลื่อนที่

ตารางที่ 4.6 แสดงผลของสัญญาณพัลส์ต่อความเร็วของมอเตอร์ที่ความเร็วรอบสูงสุด 100 รอบต่อนาที

ตั้งค่าความเร็วสูงสุดเท่ากับ 50 รอบต่อนาทีได้ผลการทดลองดังนี้

TL(วินาที)	TH(วินาที)	ความเร็ว(rpm)	ลักษณะการหมุน
0.9	0.9	19	ใช้การหมุนประมาณ 3.5 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.8	19	ใช้การหมุนประมาณ 4 ครั้งต่อ 1 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.9	0.7	19	ใช้การหมุนประมาณ 4.5 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.6	19	ใช้การหมุนประมาณ 5 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.5	19	ใช้การหมุนประมาณ 6 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.4	17	ใช้การหมุนประมาณ 7.5 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.3	15	ใช้การหมุนประมาณ 10 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.2	11	ใช้การหมุนประมาณ 15.5 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.1	5	ใช้การหมุนประมาณ 36 ครั้งต่อ 1 รอบ

ตารางที่ 4.7 แสดงผลของสัญญาณพัลส์ต่อความเร็วของมอเตอร์ที่ความเร็วสูงสุด 50 รอบต่อนาที 4.3.2 ทำการทดลองเหมือนในหัวข้อ 4.3.1 แต่ใช้เครื่องควบคุมตัวที่ 2 ควบคุมมอเตอร์ตัวที่ 2 (ขนาด 11 กิโลวัตต์)

ใช้เครื่องควบคุมตัวที่ 2 ควบคุมมอเตอร์ตัวที่ 2 ได้ผลการทดลองดังนี้

ค่าที่ตั้ง(rpm)	ความเร็วที่มอเตอร์ หมุน(rpm)	ค่าที่ตั้ง(rpm)	ความเร็วที่มอเตอร์ หมุน(rpm)
1500	1499-1500	700	699-700
1400	1399-1400	600	599-600
1300	1299-1300	500	499-500
1200	1199-1200	400	399-400
1100	1099-1100	300	299-300
1000	999-1000	200	199-200
900	899-900	100	99-100
800	799-800	50	49-50

ตารางที่ 4.8 แสดงความเร็วของมอเตอร์ตัวที่ 2 เมื่อตั้งค่าความเร็วจากฟลักซ์เวกเตอร์ตัวที่ 2 ป้อนสัญญาณรูปพัลส์ให้ฟลักซ์เวกเตอร์เพื่อใช้ควบคุมการหมุนของมอเตอร์ตัวที่ 2 กำหนดให้ความกว้างของพัลส์ศูนย์ให้คงที่ และเปลี่ยนความกว้างของพัลส์บวก โดยป้อนสัญญาณที่ TB2-2 และ กราวด์ที่ TB2-6

ตั้งความเร็วสูงสุดของมอเตอร์ตัวที่ 2 ที่ 150 รอบต่อนาทีได้ผลการทดลองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL(วินาที)	TH(วินาที)	ความเร็ว(rpm)	ลักษณะการหมุน
0.9	0.9	20	หมุนประมาณ 4 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.8	20	หมุนประมาณ 4.5 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.7	19	หมุนประมาณ 7 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.6	19	หมุนประมาณ 7.5 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.5	19	หมุนประมาณ 8 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.4	17	หมุนประมาณ 11 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.3	14	หมุนประมาณ 30 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.2	วัดไม่ได้เนื่องจาก ความเร็วแกว่งมาก	พยายามหมุนแต่ไม่หมุน
0.9	0.1		พยายามหมุนแต่ไม่หมุน

ตารางที่ 4.9 แสดงผลของสัญญาณพัลส์ต่อความเร็วของมอเตอร์ตัวที่ 2

ที่ความเร็วสูงสุด 150 รอบต่อนาที

เมื่อป้อนสัญญาณพัลส์ให้เครื่องควบคุมตัวที่ 2 ที่ความเร็วรอบสูงสุด 100 รอบต่อนาทีได้ผลการทดลองดังนี้

TL(วินาที)	TH(วินาที)	ความเร็ว(rpm)	ลักษณะการหมุน
0.9	0.9	19	หมุนประมาณ 3.5 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.8	19	หมุนประมาณ 4 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.7	19	หมุนประมาณ 4.5 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.6	19	หมุนประมาณ 5 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.5	18	หมุนประมาณ 6 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.4	18	หมุนประมาณ 7.5 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.3	15	หมุนประมาณ 10 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.2	11	หมุนประมาณ 15 ครั้งต่อ 1 รอบ
0.9	0.1	5	หมุนประมาณ 36 ครั้งต่อ 1 รอบ

ตารางที่ 4.10 แสดงผลของสัญญาณพัลส์ต่อความเร็วของมอเตอร์ตัวที่ 2

ที่ความเร็วสูงสุด 100 รอบ ต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 และ 4.3 สรุปได้ว่าในการป้อนสัญญาณพัลส์ให้กับ ฟลักซ์เวกเตอร์เพื่อควบคุมการหมุนของมอเตอร์ต้องพิจารณาความเร็วของมอเตอร์ด้วยคือถ้าความเร็วของมอเตอร์ต่ำจะสามารถป้อนสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่สูงได้มากกว่าที่ความเร็วสูง และจากการป้อนสัญญาณพัลส์ให้กับฟลักซ์เวกเตอร์นี้ เราสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมมอเตอร์โดยการป้อนสัญญาณในลักษณะอื่นได้เช่นต้องการให้มอเตอร์เพิ่มความเร็วจากศูนย์แล้วรักษาความเร็วคงที่ไว้ที่ค่าหนึ่งแล้วลดความเร็วลงจนหยุดนิ่งแล้วเพิ่มความเร็วในลักษณะเดิมอีก เราก็สร้างสัญญาณพัลส์เพื่อให้มอเตอร์หมุนตามที่เรต้องการได้ และนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมต่อไป

4.3.3 ใช้ฟลักซ์เวกเตอร์ในการรักษาสภาวะซิงโครไนซ์ระหว่างมอเตอร์สองตัวที่มีขนาดไม่เท่ากันโดยการเชื่อมกันในโหมด มาตรฐาน - เสลฟ

ทำการเชื่อมกันในโหมดมาตรฐาน-เสลฟ โดยให้มอเตอร์ตัวเล็กเป็นมาตรฐานและตัวที่ 2 เป็นเสลฟได้ผลการทดลองดังนี้

ความเร็วที่ตั้งไว้(rpm)	ความเร็วของมาตรฐาน(rpm)	ความเร็วของเสลฟ(rpm)
1500	1499-1500	1499-1500
1400	1399-1400	1399-1400
1300	1300	1299-1300
1200	1199-1200	1199-1200
1100	1099-1100	1099-1100
1000	1000	999-1000
900	899-900	899-900
800	799-800	799-800
700	699-700	700
600	599-600	599-600
500	499-500	499-500
400	399-401	399-400
300	299-301	299-300
200	199-200	199-200
100	99-100	100
90	89-90	89-90
80	79-81	79-80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

70	69-71	69-70
60	58-61	59-60
50	49-52	49-50

ตารางที่ 4.11 แสดงความเร็วของมอเตอร์เมื่อให้มอเตอร์ขนาด 4 กิโลวัตต์เป็นมาตรฐานและขนาด 11 กิโลวัตต์เป็นสเกล

ทำการทดลองโดยให้มอเตอร์ขนาด 11 กิโลวัตต์ และมอเตอร์ขนาด 4 กิโลวัตต์เป็นสเกลได้ผลการทดลองดังนี้

ความเร็วที่ตั้งไว้(rpm)	ความเร็วของมาตรฐาน(rpm)	ความเร็วของสเกล(rpm)
1500	1499-1500	1499-1500
1400	1399-1400	1398-1400
1300	1299-1300	1299-1300
1200	1199-1200	1199-1200
1100	1099-1100	1099-1100
1000	999-1000	999-1001
900	899-900	899-901
800	799-800	799-801
700	699-700	699-700
600	599-600	598-601
500	499-500	496-501
400	399-400	399-400
300	299-300	299-300
200	199-200	199-201
100	99-100	99-100
90	89-90	87-91
80	79-80	79-80
70	69-70	68-70
60	59-60	58-61
50	49-50	49-51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 แสดงความเร็วของมอเตอร์เมื่อมอเตอร์ขนาด 11 กิโลวัตต์เป็นมาสเตอร์และขนาด 4 กิโลวัตต์เป็นสเลฟ

4.3.4 การต่อมาสเตอร์-สเลฟ เพื่อทำการควบคุมสถานะซึ่งโครไนซ์เมื่อใช้มอเตอร์ขนาดเดียวกัน ทำการทดลองเหมือนในหัวข้อที่ 4.3.3 แต่ใช้มอเตอร์ขนาดเท่ากัน โดยทำการขับมอเตอร์ด้วย ฟลักซ์เวกเตอร์แบบแยกกันก่อนได้ผลการทดลองดังนี้

ค่าที่ตั้งไว้(rpm)	ความเร็วของมอเตอร์ (rpm)	
	มอเตอร์ A	มอเตอร์ B
1500	1498-1501	1498-1502
1400	1398-1400	1398-1400
1300	1299-1301	1299-1301
1200	1199-1200	1199-1201
1100	1099-1100	1099-1101
1000	999-1000	999-1000
900	899-900	899-900
800	799-800	799-800
700	698-701	698-701
600	599-600	598-601
500	499-500	498-501
400	399-400	398-401
300	299-300	298-301
200	198-201	198-201
100	98-101	98-102
90	89-90	89-90
80	78-81	79-82

ตารางที่ 4.13 แสดงความเร็วของมอเตอร์ขนาดเท่ากันเมื่อแยกกันควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการต่อเพื่อชิงโครโนซ์ โดยให้มอเตอร์ A เป็นมาตรฐาน และให้มอเตอร์ B เป็นสเลฟได้ผลการทดลองดังนี้

ค่าที่ตั้งไว้ (rpm)	มอเตอร์ A (rpm)	มอเตอร์ B (rpm)
1500	1400-1500	1498-1501
1400	1398-1402	1398-1401
1300	1298-1302	1298-1300
1200	1199-1200	1198-1200
1100	1099-1100	1099-1100
1000	999-1001	998-1001
900	899-900	898-900
800	799-800	799-800
700	699-700	698-701
600	598-600	598-601
500	499-500	497-501
400	399-400	398-401
300	298-301	298-301
200	198-201	198-201
100	98-101	97-103
80	78-81	78-81

ตารางที่ 4.14 แสดงความเร็วของมอเตอร์ทั้งสองเมื่อให้มอเตอร์ A เป็นมาตรฐาน มอเตอร์ B เป็นสเลฟ

ทำการต่อเพื่อชิงโครโนซ์ โดยให้มอเตอร์ B เป็นมาตรฐาน มอเตอร์ A เป็นสเลฟ ได้ผลการทดลองดังนี้

ค่าที่ตั้งไว้ (rpm)	มอเตอร์ A (rpm)	มอเตอร์ B (rpm)
1500	1499-1500	1499-1500
1400	1399-1401	1399-1400
1300	1299-1300	1298-1300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1200	1199-1200	1199-1200
1100	1099-1100	1099-1100
1000	999-1000	999-1000
900	899-900	899-901
800	799-800	800
700	699-700	699-700
600	598-601	599-601
500	499-500	498-501
400	399-400	399-401
300	299-300	298-301
200	198-201	198-201
100	98-101	98-100
80	78-81	78-81

ตารางที่ 4.15 แสดงความเร็วของมอเตอร์ทั้งสองเมื่อต่อมอเตอร์ B เป็นมอเตอร์
มอเตอร์ A เป็น เสลฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การใช้วงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ร่วมกับฟลักซ์เวกเตอร์ในการขับเคลื่อนมอเตอร์

ในหัวข้อนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างวงจรทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ขึ้นมาเพื่อใช้ร่วมกับฟลักซ์เวกเตอร์ในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยจากการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 เราทำการทดสอบว่าฟลักซ์เวกเตอร์สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้โดยการป้อนแรงดันไฟตรงจากแหล่งจ่ายเข้าที่ TB2-2 และต่อสายกราวด์เข้าที่ TB2-6 ซึ่งเป็น SIGNAL COM และจากการทดลองในหัวข้อที่ 4.3 เราสามารถกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์ได้โดยการควบคุมสวิทช์เปิดปิดระหว่าง TB1-19 และ TB1-21 ดังนั้น ดังนั้นมอเตอร์ที่จะใช้ในการทดลองนี้ต้องมีตัวตรวจจับความเร็วที่เอาท์พุทเป็นสัญญาณความถี่

4.5.1 ตัวตรวจจับความเร็ว

ตัวตรวจจับความเร็วของมอเตอร์คือรีซีฟเวอร์ (RECEIVER) ซึ่งได้สัญญาณความเร็วของมอเตอร์เป็นคลื่นรูปไซน์ โดยมีสายจากตัวตรวจจับความเร็วทั้งหมด 5 เส้นคืออินพุท +15 โวลต์ และ -15 โวลต์ สายกราวด์ มีเอาท์พุท 2 เส้น คือสัญญาณความเร็วของเฟส A และ เฟส B ซึ่งจะมีลักษณะที่นำหรือตาม 90 องศา ขึ้นอยู่กับขณะนั้นมีการหมุนในทิศทางใด จากสัญญาณความเร็วของมอเตอร์ที่ได้นี้เราต้องนำไปประมวลผล 2 ส่วนคือส่วนควบคุมความเร็ว และส่วนควบคุมทิศทาง

4.5.2 ส่วนควบคุมความเร็ว วงจรของส่วนควบคุมความเร็วนี้คือวงจรที่จะต้องเปลี่ยนสัญญาณความเร็วซึ่งคือสัญญาณความถี่ของมอเตอร์ตัวที่ 1 เพื่อป้อนให้กับฟลักซ์เวกเตอร์ตัวที่ 2 ในการนำไปควบคุมความเร็วของมอเตอร์ตัวที่ 2 ก่อนที่จะสร้างวงจรนี้ขึ้นมาต้องทราบว่าจะนำไปใช้ในย่านความถี่ที่เท่าไร ทดลองหาความถี่ของสัญญาณความเร็วของมอเตอร์ที่ความเร็วต่างๆ ผลการทดลองวัดความถี่ของสัญญาณความเร็วของมอเตอร์ที่ความเร็วต่างๆ

ความเร็วรอบของ มอเตอร์(RPM)	ความถี่ (กิโลเฮิรซ์)
1500	9.09
1400	8.69
1300	8.33
1200	8.00
1100	7.69
1000	7.14
900	6.89
800	6.76
700	4.54
600	4.17
500	3.13
400	2.50
300	1.82
200	1.54
100	0.70

ตารางที่ 4.16 ผลการทดลองหาความถี่ของสัญญาณความเร็ว

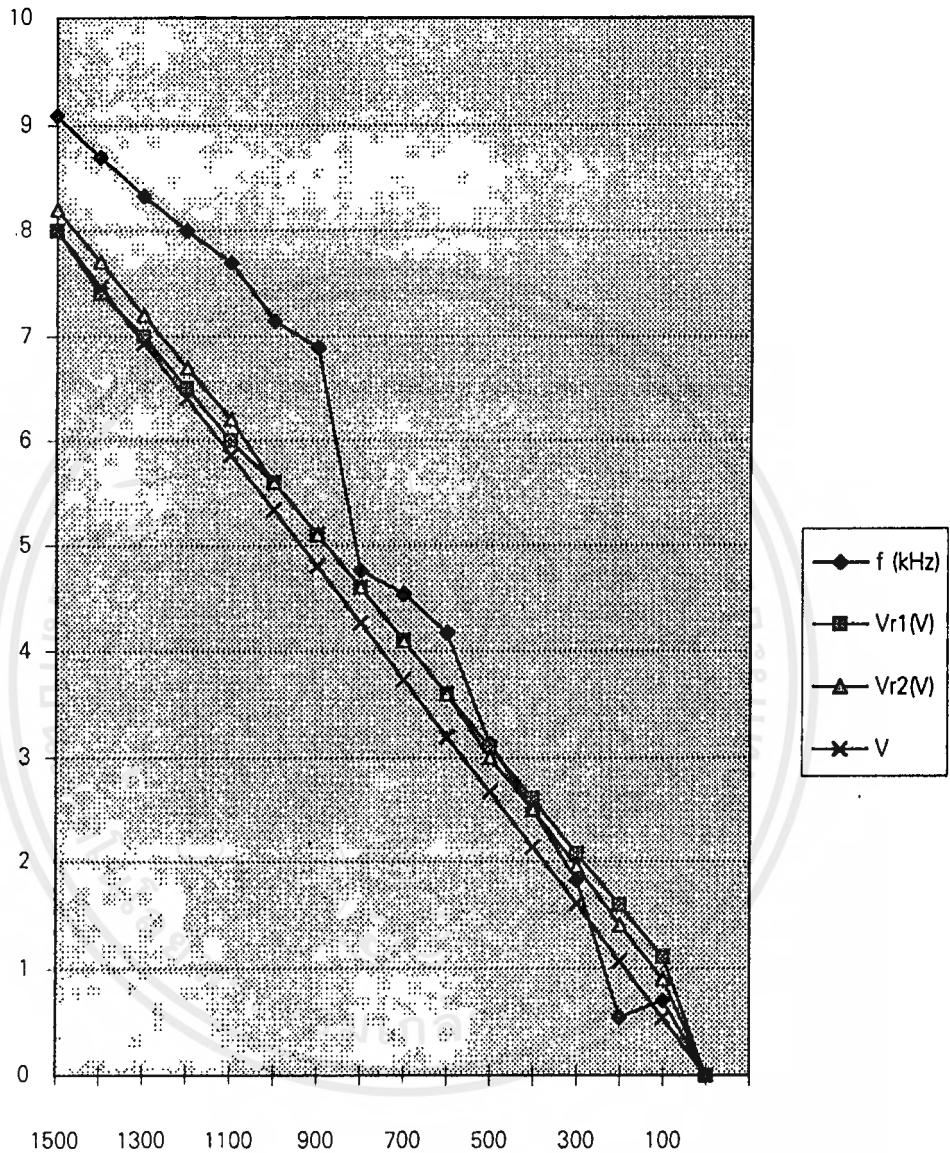
จากผลการทดลองวงจรที่จะสร้างขึ้นต้องสามารถแปลงสัญญาณความถี่เป็นแรงดันตั้งแต่ความถี่ต่ำๆ จนถึงที่ความถี่ประมาณ 9.1 กิโลเฮิรซ์ จากข้อมูลของไอซีเลือกใช้ไอซีเบอร์ 2907 โดยมีวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันดังนี้

เราต้องสร้างวงจรเปลี่ยนความถี่เป็นแรงดันขึ้นมา 2 วงจรเพื่อใช้เปลี่ยนสัญญาณความเร็วของมอเตอร์ 2 ตัว คือวงจรแรกเปลี่ยนสัญญาณความเร็วของมอเตอร์ตัวแรก และอีกวงจะเปลี่ยนสัญญาณความเร็วของมอเตอร์ตัวที่ 2 แล้วนำมาเปรียบเทียบกับก่อนป้อนเข้าฟลักซ์เวกเตอร์ตัวที่ 2 เพื่อนำไปควบคุมความเร็วของมอเตอร์ตัวที่ 2 เมื่อสร้างวงจรแล้วทำการทดสอบวงจรโดยป้อนสัญญาณความถี่จากฟังก์ชันเจนและจากสัญญาณความเร็วของมอเตอร์
กรณีป้อนด้วยสัญญาณจากความเร็วของมอเตอร์

ความเร็วของมอเตอร์(RPM)	ความถี่ (กิโลเฮิรตซ์)	ระดับแรงดัน (โวลต์)	
		วงจรที่ 1	วงจรที่ 2
1500	9.09	8	8.2
1400	8.69	7.4	7.7
1300	8.33	7.0	7.2
1200	8.00	6.5	6.7
1100	7.69	6.0	6.2
1000	7.14	5.6	5.6
900	6.89	5.1	5.1
800	6.76	4.6	4.6
700	4.54	4.1	4.1
600	4.17	3.6	3.6
500	3.13	3.1	3.0
400	2.5	2.6	2.5
300	1.82	2.07	1.95
200	1.54	1.5	1.40
100	0.7	1.1	0.9

ตารางที่ 4.17 ระดับแรงดันเมื่อป้อนสัญญาณความเร็วจากมอเตอร์
 นำค่าที่ได้มาเขียนกราฟได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความเร็วของมอเตอร์ ระดับแรงดัน ใช้สัญญาณความเร็วจากมอเตอร์

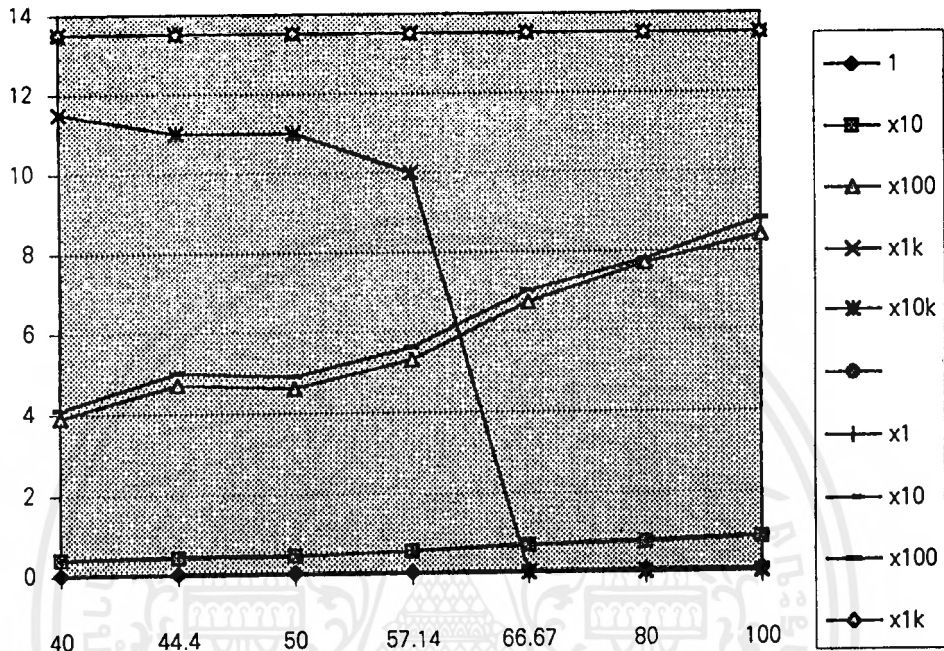
กรณีที่ป้อนสัญญาณความถี่จากฟังก์ชันเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ (กิโลเฮิรตซ์)	ระดับแรงดัน(โวลท์)	
	วงจรที่ 1	วงจรที่ 2
0.040	0.037	0.040
0.044	0.045	0.048
0.050	0.05	0.051
0.05.7	0.056	0.056
0.066	0.07	0.07
0.080	0.073	0.076
0.010	0.085	0.088
0.40	0.40	0.415
0.44	0.44	0.48
0.50	0.47	0.49
0.57	0.57	0.57
0.66	0.70	0.73
0.80	0.75	0.8
0.10	0.87	0.92
4.00	3.9	4.1
5.00	4.7	5.0
5.71	5.3	5.6
6.66	6.7	7.0
8.00	7.0	7.7
10.00	8.4	8.8

ตารางที่ 4.18 ระดับแรงดันเมื่อป้อนสัญญาณความเร็วจากฟังก์ชันเจน จากค่าที่ได้จากตารางนำมาเขียนกราฟได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



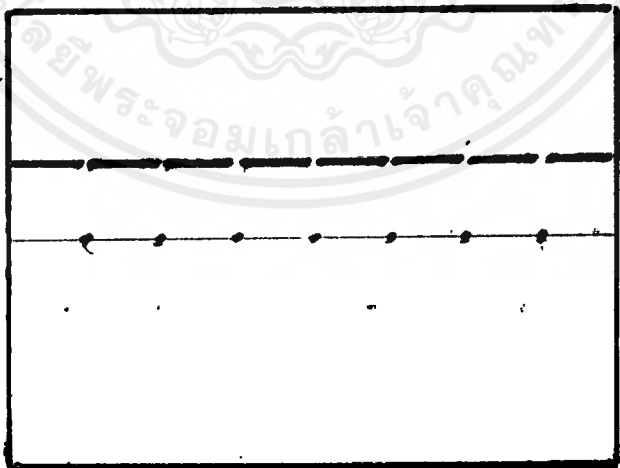
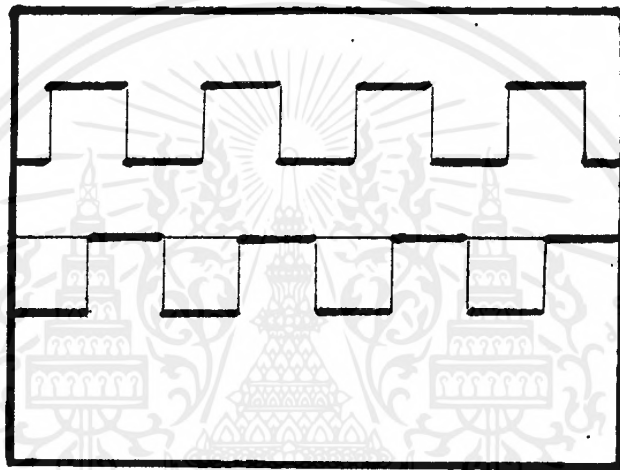
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความถี่ ระดับแรงดัน กรณีป้อนสัญญาณความเร็วจากฟังก์ชันเจน จากตารางและกราฟทั้งสองย่านความถี่ที่ใช้ของสัญญาณความเร็วและความถี่ใช้งานของวงจรข้าง มีย่านความถี่ใช้งานเดียวกันแต่ยังไม่ลิเนียร์ (Linear) ซึ่งเป็นขีดจำกัดทางด้านอิเล็กทรอนิกส์

4.5.3 ส่วนของบรรทัดควบคุมทิศทาง

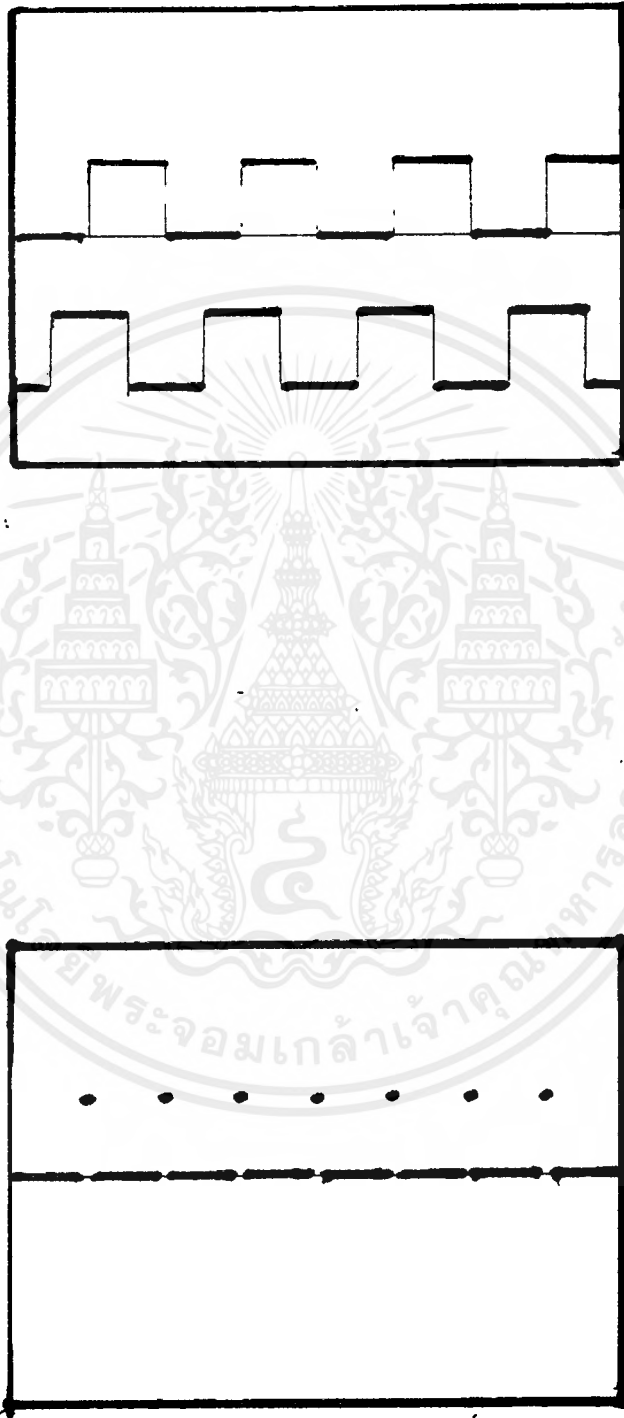
เนื่องจากสัญญาณความเร็วของมอเตอร์เป็นคลื่นรูปไซน์ 2 เฟส คือเฟส A และเฟส B ซึ่งจะนำและตามกันขึ้นอยู่กับทิศทางการหมุนของมอเตอร์จากสัญญาณที่ได้นำมาเปลี่ยนเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมโดยใช้ขมิ้นทรานซิสเตอร์ซึ่งใช้ไอซีเบอร์ 7414 (ดูรายละเอียดที่ภาคผนวก) จากนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้เฟส A เข้าที่ขา D ของดี-ฟลิปฟล็อปใช้ไอซีเบอร์ 7474 (ดูรายละเอียดที่ภาคผนวก) และใช้เฟส B เข้าที่ขา CLOCK จ่ายไฟ 5 โวลท์ที่ขา PR และ CLR จะได้สัญญาณที่ขา Q เป็น 5 โวลท์เสมอถ้าเฟส A นำเฟส B และจะได้สัญญาณที่ขา Q เป็น 0 โวลท์ถ้าหมุนกลับทิศ ซึ่งใช้สัญญาณนี้สวิตช์รีเลย์ และนำไปควบคุมการหมุนกลับทิศที่ TB1-19 และ TB1-21

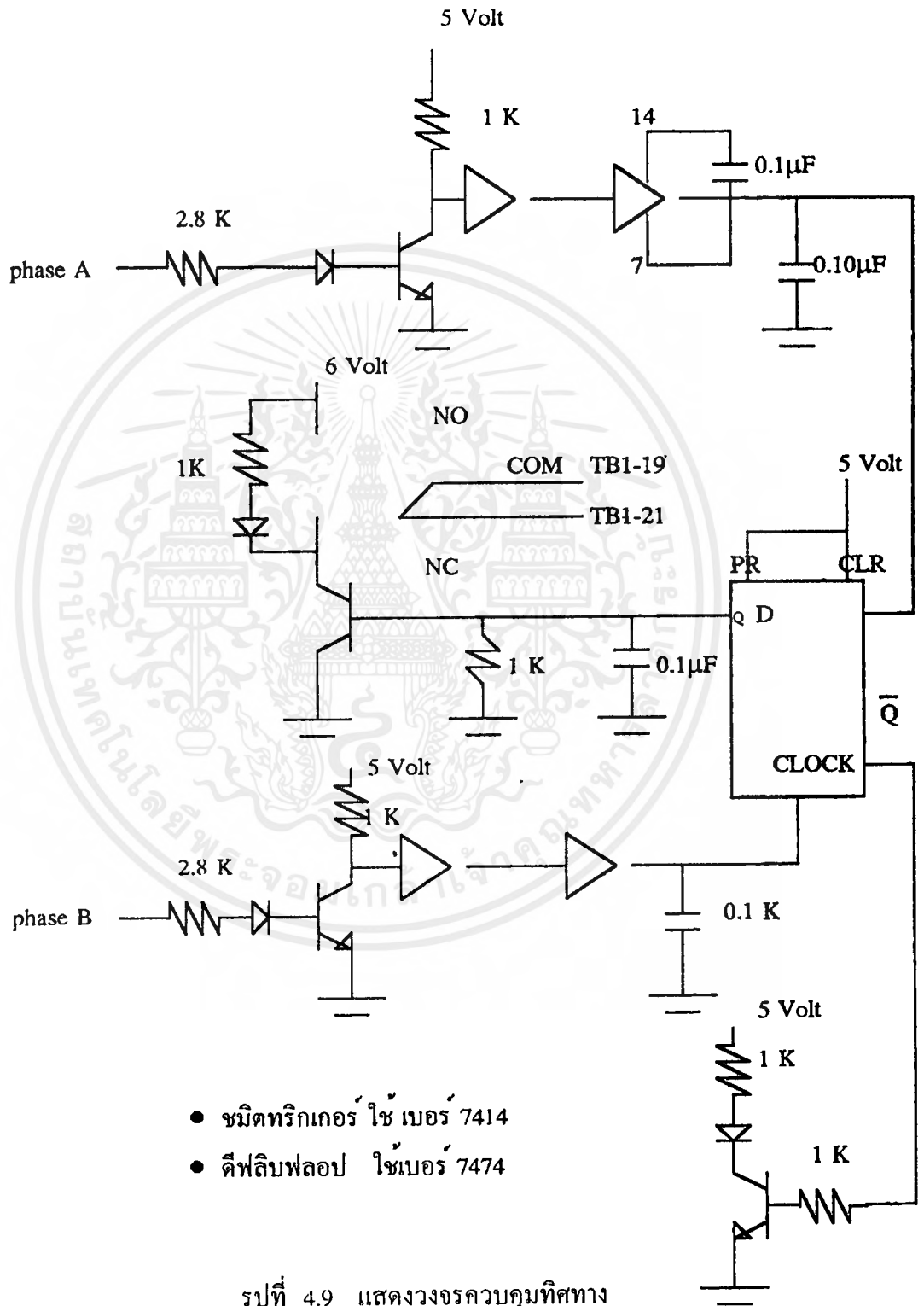


รูปที่ 4.7 รูปคลื่นสัญญาณที่ขา D, CLOCK และ Q กรณีเฟส A นำเฟส B
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 คลื่นสัญญาณที่ขา D, CLOCK และ Q กรณีเฟส A ตามเฟส B
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

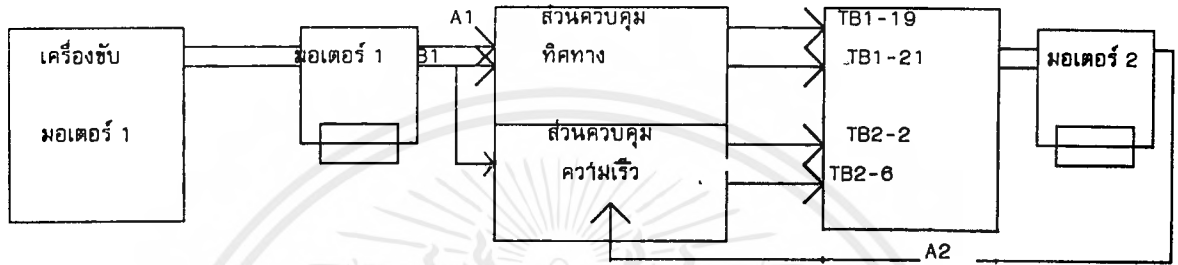
สร้างวงจรควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ได้ดังนี้



รูปที่ 4.9 แสดงวงจรควบคุมทิศทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นใช้วงจรควบคุมความเร็วและวงจรควบคุมทิศทางมาใช้ร่วมกับฟลักซ์เวกเตอร์ไคอะแกรมดังนี้



รูปที่ 4.10 บล็อกไคอะแกรมแสดงการต่อวงจรเพื่อควบคุมมอเตอร์

ทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลเกี่ยวกับความเร็ว กระแส แรงดัน ความถี่ของมอเตอร์

ได้ผลการทดลองดังนี้

ความเร็ว(RPM)		แรงดัน(โวลต์)		กระแส(แอมแปร์)		ความถี่(เฮิรตซ์)	
มอเตอร์ 1	มอเตอร์ 2	มอเตอร์ 1	มอเตอร์ 2	มอเตอร์ 1	มอเตอร์ 2	มอเตอร์ 1	มอเตอร์ 2
1500	1477-1500	394	390	5.26	5.7	50	50
1400	1409-1411	363	320-370	4.74	4.87	47	47
1300	1317-1318	337	325-340	4.80	4.9	43	44
1200	1221-1225	340	300-315	4.82	4.9	40	41
1100	1129-1130	284	275-290	4.9	4.95	37	38
1000	1032-1033	233	250-265	5.07	5.0	33	34
900	936-937	207	230-240	4.93	5.0	30	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

800	841-842	181	200-210	4.91	5.0	27	28
700	741-743	153	185-195	4.87	4.9	23	25
600	644-646	130	155-195	4.85	4.95	20	21
500	547-549	102	150-140	4.80	4.95	17	18
400	449-451	102	110-120	4.83	4.92	13	15
300	347-348	77	83-89	4.90	4.91	10	12
200	244-247	50	60-65	4.84	4.95	7	8
100	151-152	26	35-40	4.81	4.88	3	5
50	104-106	12	23-29	4.86	4.85	2	3
25	80-86	11	17-25	4.71	4.85	1	3

ตารางที่ 4.19 แสดงผลการทดลองความเร็ว กระแส แรงดัน ความถี่ของมอเตอร์
 ทำการทดลองเพื่อดูสภาวะเชิงโครโมสโอมของมอเตอร์ 2 ตัวโดยเก็บข้อมูลขณะหมุนตาม
 เข็มนาฬิกาและขณะหมุนทวนเข็มนาฬิกา
กรณีหมุนตามเข็มนาฬิกา

ความเร็วของมอเตอร์ ตัวที่ 1 (RPM)	ความเร็วของมอเตอร์ ตัวที่ 2 (RPM)
1499-1500	1499-1500
1399-1400	1400-1411
1299-1300	1317-1318
1199-1200	1223-1224
1099-1100	1127-1128
999-1000	1032-1033
899-900	936-937
799-800	840-841
699-700	741-744
599-600	645-647
499-500	545-550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

399-400	447-449
299-300	344-346
199-200	246-247
99-100	147-149

ตารางที่ 4.20 แสดงการซิงโครไนซ์ระหว่างมอเตอร์ 2 ตัวกรณีหมุนตามเข็มนาฬิกา
กรณีหมุนทวนเข็มนาฬิกา

ความเร็วของมอเตอร์ ตัวที่1(RPM)	ความเร็วของมอเตอร์ ตัวที่ 2 (RPM)
1499-1500	1499-1500
1399-1400	1405-1406
1299-1300	1311-1312
1199-1200	1217-1218
1099-1100	1122-1223
999-1000	1027-1028
899-900	931-932
799-800	835-836
699-700	737-738
599-600	640-641
499-500	543-544
399-400	444-446
299-300	343-345
199-200	243-245
99-100	144-145

ตารางที่ 4.21 แสดงการซิงโครไนซ์ระหว่างมอเตอร์ 2 ตัวกรณีหมุนทวนเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การสรุปผลและวิจารณ์

สรุป

1. ในการควบคุมสถานะเชิงโครโมโซม ระหว่างมอเตอร์ โดยใช้ฟลักซ์เวกเตอร์ สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้ดี แต่จะมีความคลาดเคลื่อน(error)เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบต่ำๆ ประมาณที่ 50 รอบต่อ นาทีลงมา และในการนำมอเตอร์ 2 ตัวมาทำงานร่วมกัน โดยให้ตัวหนึ่งทำงานตามอีกตัวหนึ่ง โดยแบ่งเป็น 3 กรณีคือ

1. มอเตอร์ตัวใหญ่ทำงานตามมอเตอร์ตัวเล็ก
2. มอเตอร์ตัวเล็กทำงานตามมอเตอร์ตัวใหญ่
3. มอเตอร์ขนาดเท่ากันทำงานตามกัน

โดยทั้ง 3 กรณี จะเชิงโครโมโซมกันได้ดีเมื่อทำงานที่ความเร็วที่ตั้งค่าได้ แต่จะมีปัญหาเมื่อเริ่มสตาร์ท ซึ่งเป็นลักษณะของมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะต่อโหลดเมื่อทำงานที่พิกัด โดยใช้คัลเป็นตัวเชื่อม

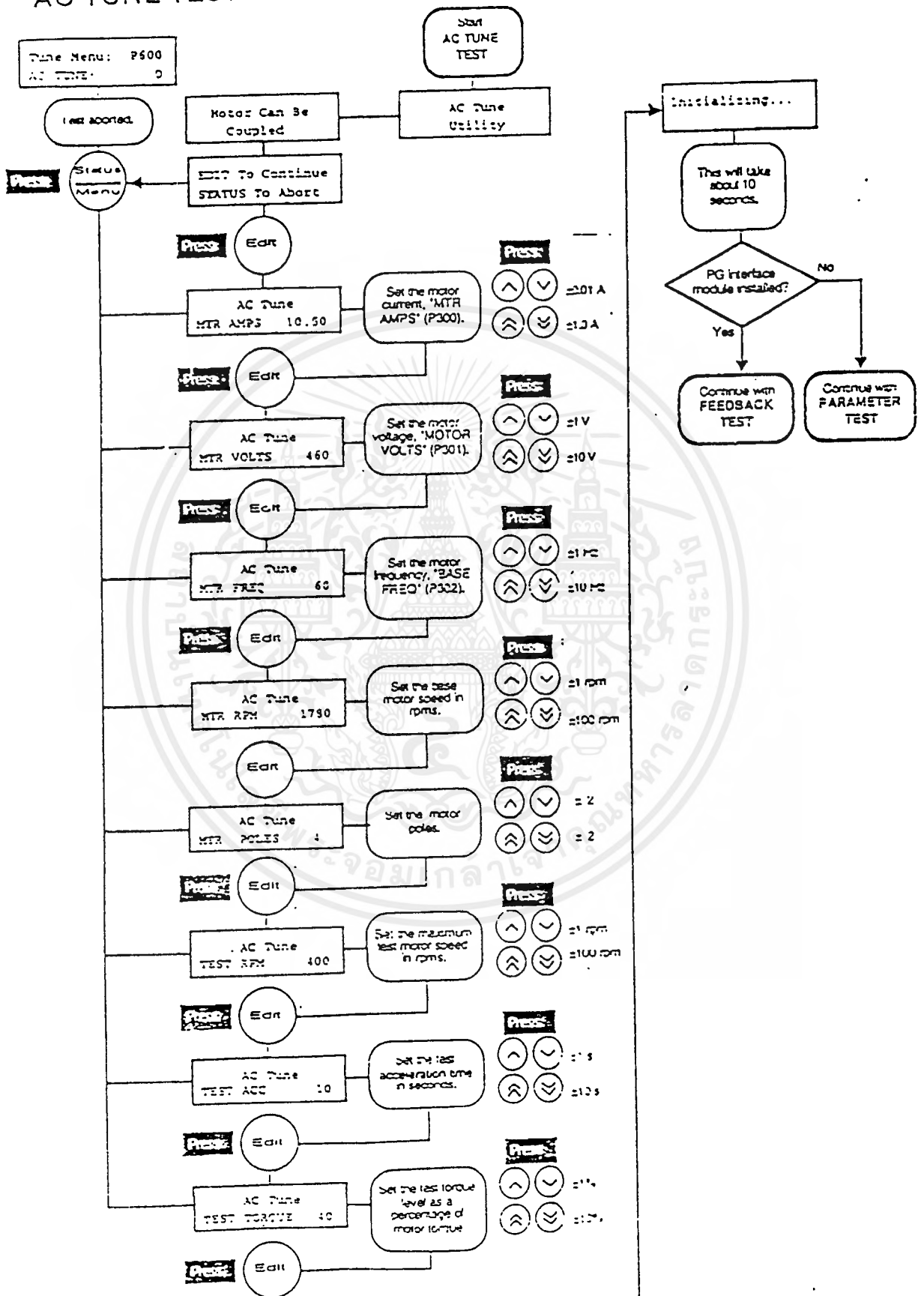
2. ในการใช้วงจรถอิลิกทรอนิกส์ ร่วมกับฟลักซ์เวกเตอร์ ยังไม่สามารถรักษาสถานะเชิงโครโมโซมของมอเตอร์เหนี่ยวนำได้ดีเท่าที่ควร เพราะวงจรถอิลิกทรอนิกส์ตอบสนองช้ากว่าฟลักซ์เวกเตอร์ ที่มีหน่วยประมวลผลเร็วกว่ามาก

3.สามารถนำการควบคุมสถานะเชิงโครโมโซมนี้ไปประยุกต์ใช้กับงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานกระดาษ ในลักษณะมอเตอร์ทุกตัวมีขนาดเท่ากัน การช่วยขับโหลดของมอเตอร์ขนาดเล็กโดยใช้ร่วมกับมอเตอร์ขนาดใหญ่

ข้อเสนอแนะ

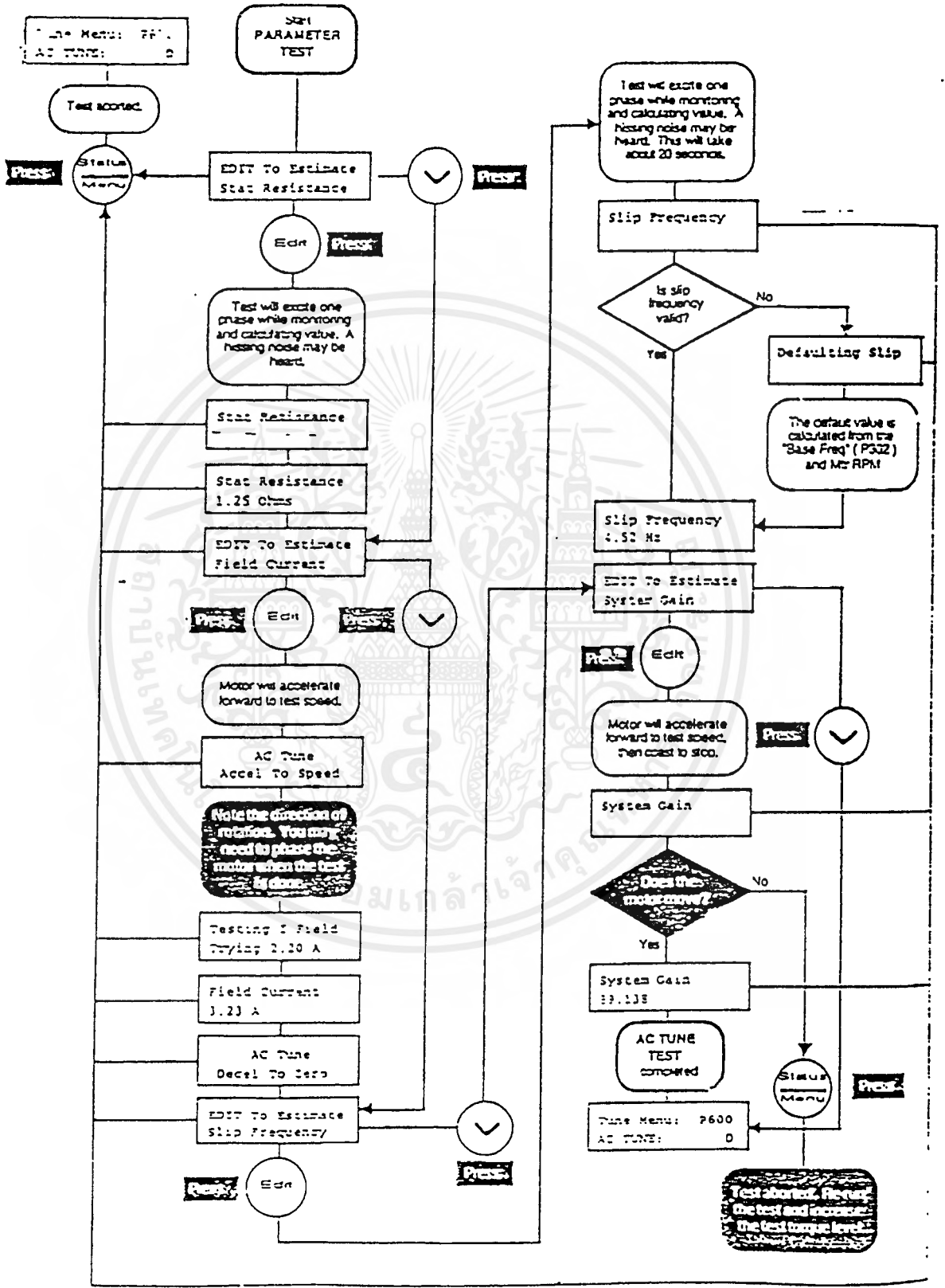
1. ในการใช้เครื่องฟลักซ์เวกเตอร์ ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด จำเป็นจะต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ควบคู่กับการทดลองเดินเครื่อง และจำเป็นต้องมีส่วนป้อนกลับโดยใช้เอนโคเดอร์
2. นอกจากเครื่องฟลักซ์เวกเตอร์ จะมีผลตอบสนองทางด้านความเร็วที่ดีแล้ว ยังสามารถควบคุมแรงบิด (ที่ทอร์ค โหมด) ได้อีกด้วย จึงต้องมีการพัฒนาการใช้ต่อไป
- 3.ปรับปรุงวงจรถอิลิกทรอนิกส์ให้ตอบสนองทันกับฟลักซ์เวกเตอร์

AC TUNE TEST

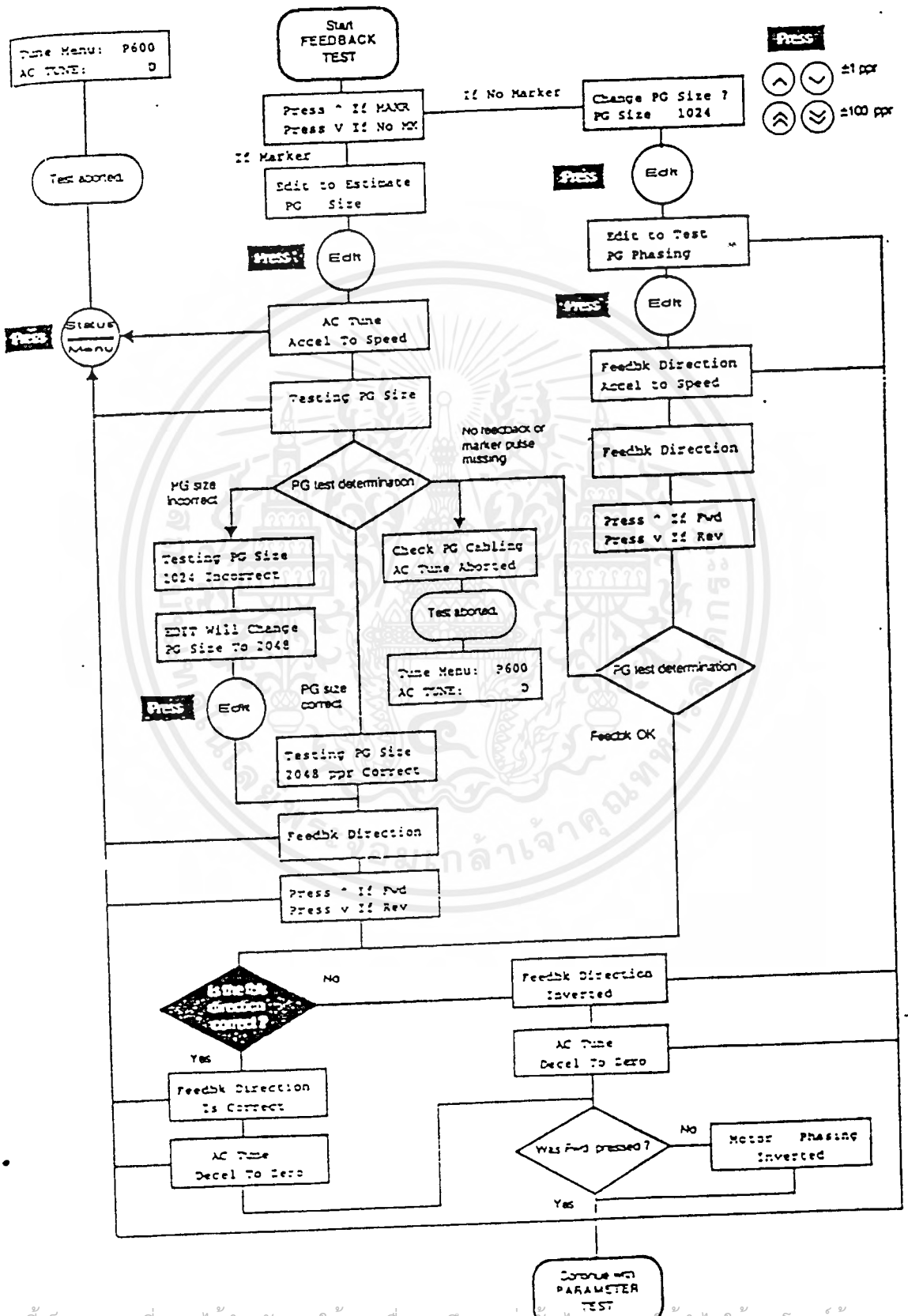


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่วการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AC Tune Test (continued)



AC Tune Test (continued)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



National Semiconductor

LM2907/LM2917

LM2907/LM2917 Frequency to Voltage Converter

General Description

The LM2907, LM2917 series are monolithic frequency to voltage converters with a high gain op amp/comparator designed to operate a relay, lamp, or other load when the input frequency reaches or exceeds a selected rate. The tachometer uses a charge pump technique and offers frequency doubling for low ripple, full input protection in two versions (LM2907-B, LM2917-B) and its output swings to ground for a zero frequency input.

Advantages

- Output swings to ground for zero frequency input
- Easy to use; $V_{OUT} = f_{IN} \times V_{CC} \times R1 \times C1$
- Only one RC network provides frequency doubling
- Zener regulator on chip allows accurate and stable frequency to voltage or current conversion (LM2917)

Features

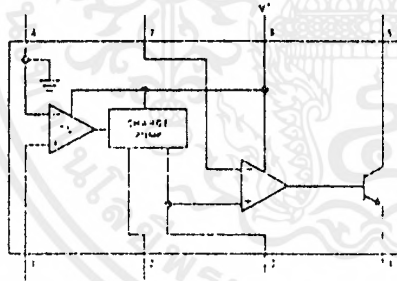
- Ground referenced tachometer input interfaces directly with variable reluctance magnetic pickups
- Op amp/comparator has floating transistor output
- 50 mA sink or source to operate relays, solenoids, meters, or LEDs

- Frequency doubling for low ripple
- Tachometer has built-in hysteresis with either differential input or ground referenced input
- Built-in zener on LM2917
- $\pm 0.3\%$ linearity typical
- Ground referenced tachometer is fully protected from damage due to swings above V_{CC} and below ground

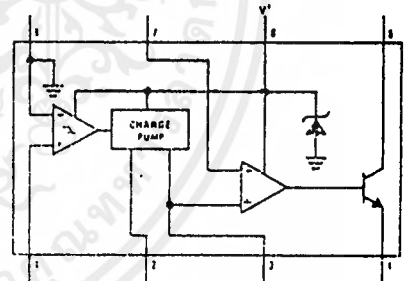
Applications

- Over/under speed sensing
- Frequency to voltage conversion (tachometer)
- Speedometers
- Breaker point dwell meters
- Hand-held tachometer
- Speed governors
- Cruise control
- Automotive door lock control
- Clutch control
- Horn control
- Touch or sound switches

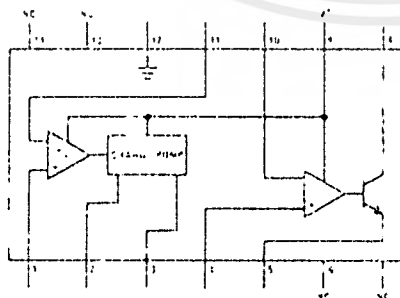
Block and Connection Diagrams Dual-In-Line and Small Outline Packages, Top Views



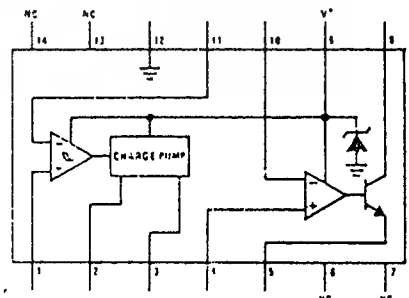
Order Number LM2907M-8 or LM2907N-5
See NS Package Number M08A or N08E



Order Number LM2917M-8 or LM2917N-8
See NS Package Number M08A or N08E



Order Number LM2907N
See NS Package Number N14A

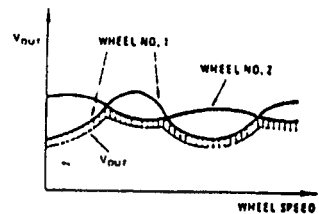
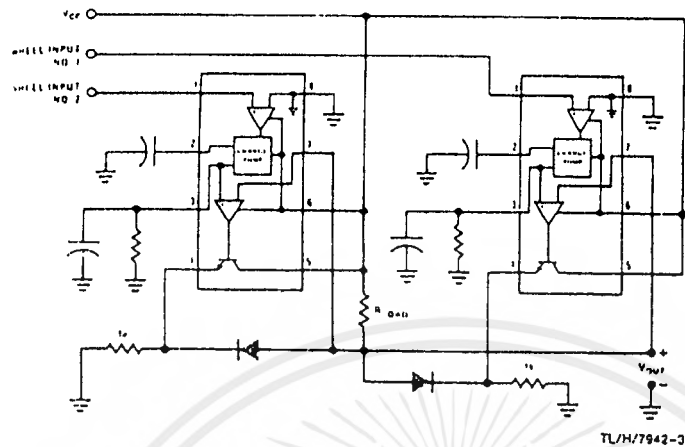


Order Number LM2917M or LM2917N
See NS Package Number M14A or N14A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Anti-Skid Circuit Functions

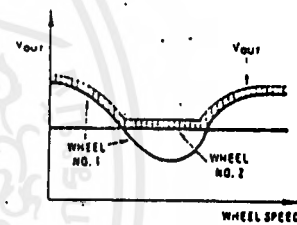
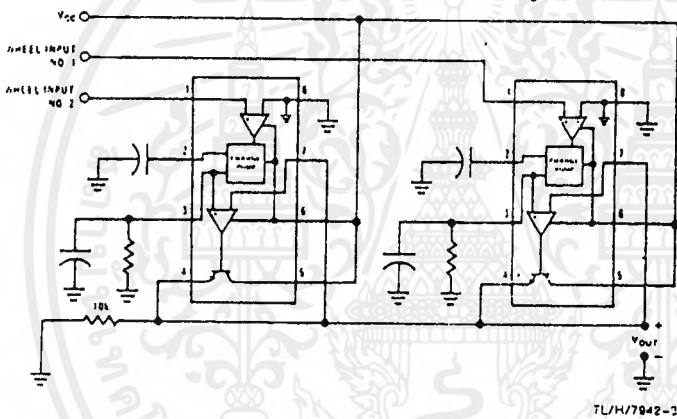
"Select-Low" Circuit



V_{out} is proportional to the lower of the two input wheel speeds.

TL/H/7942-33

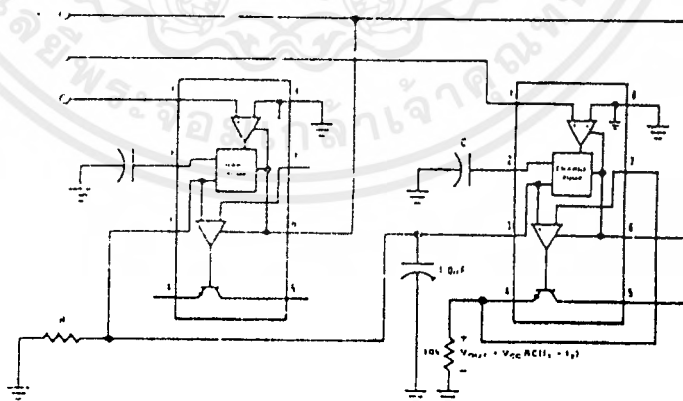
"Select-High" Circuit



V_{out} is proportional to the higher of the two input wheel speeds.

TL/H/7942-35

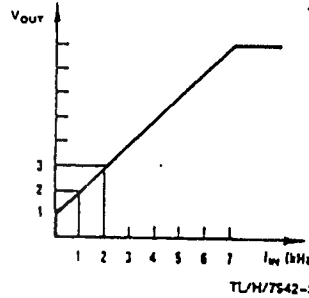
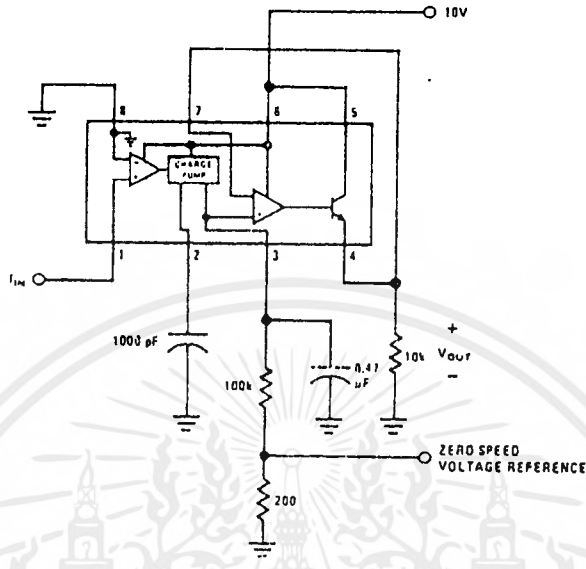
"Select-Average" Circuit



TL/H/7942-37

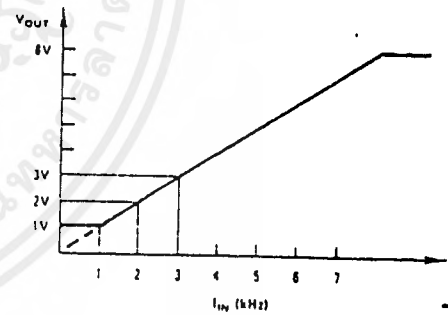
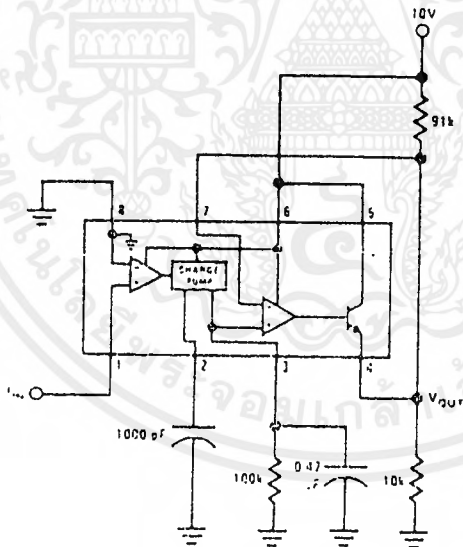
Typical Applications (Continued)

Changing the Output Voltage for an Input Frequency of Zero.



TL/H/7942-29

Changing Tachometer Gain Curve or Clamping the Minimum Output Voltage



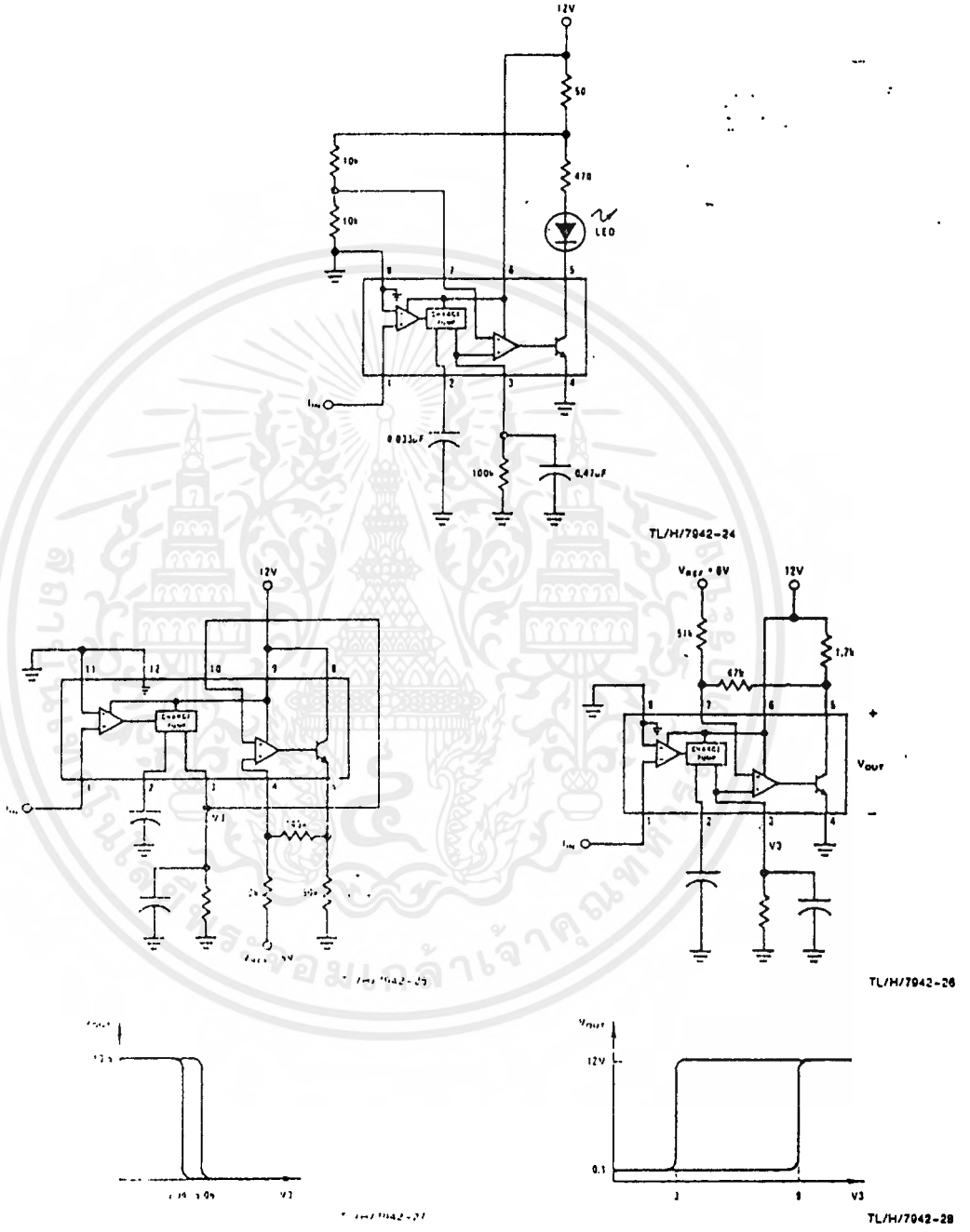
TL/H/7942-32

TL/H/7942-31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications (Continued)

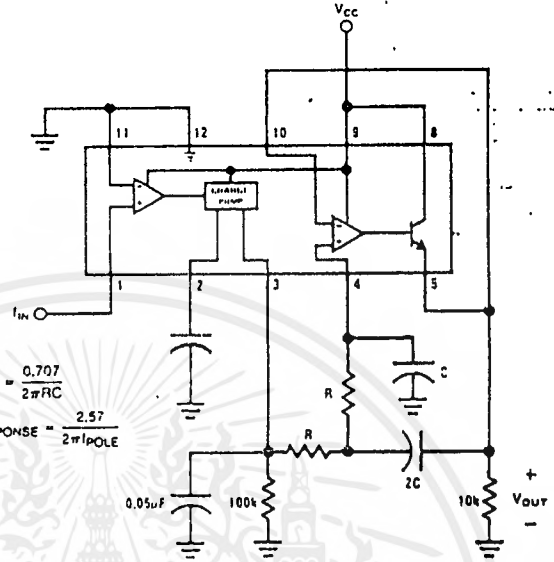
Some Frequency Switch Applications May Require Hysteresis in the Comparator Function Which can be Implemented in Several Ways:



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications (Continued)

Frequency to Voltage Converter with 2 Pole Butterworth Filter to Reduce Ripple

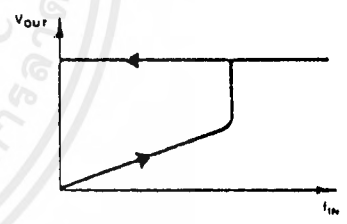
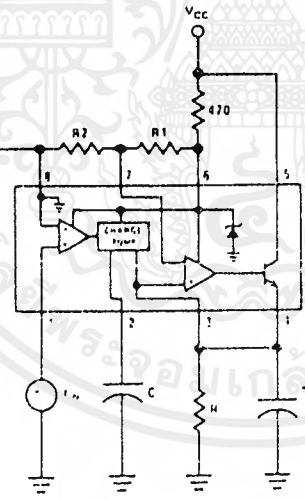


$$f_{POLE} = \frac{0.707}{2\pi RC}$$

$$RESPONSE = \frac{2.57}{2\pi f_{POLE}}$$

TL/H/7942-21

Overspeed Latch



Output latches when
 $f_{IN} = \frac{R2}{R1 - R2 RC}$
 Reset by removing Vcc.

TL/H/7942

TL/H/7942-22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

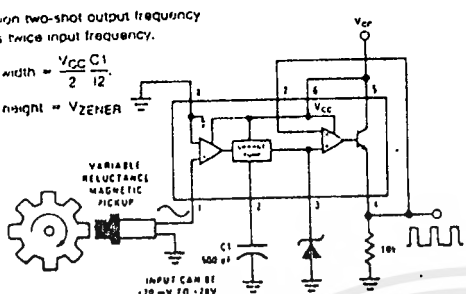
Typical Applications (Continued)

Variable Reluctance Magnetic Pickup Buffer Circuits

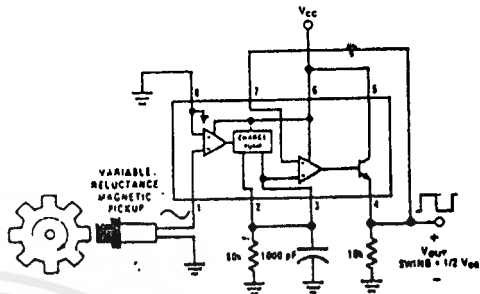
Output two-shot output frequency is twice input frequency.

$$width = \frac{V_{CC} C_1}{2 I_Z}$$

$$height = V_{ZENER}$$

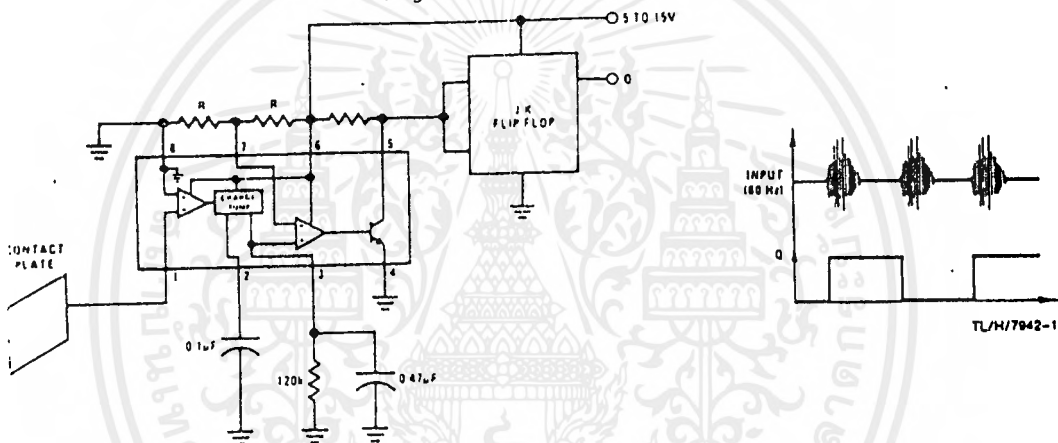


TL/H/7942-16



TL/H/7942-17

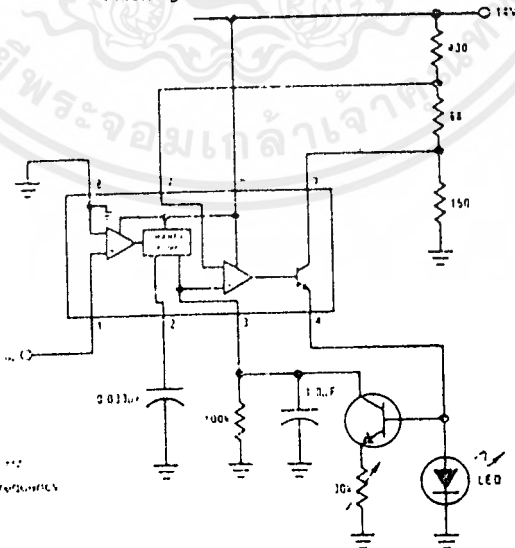
Finger Touch or Contact Switch



TL/H/7942-18

Flashing LED Indicates Overspeed

Output pulses when frequency increases with increasing input frequency beyond trip point.

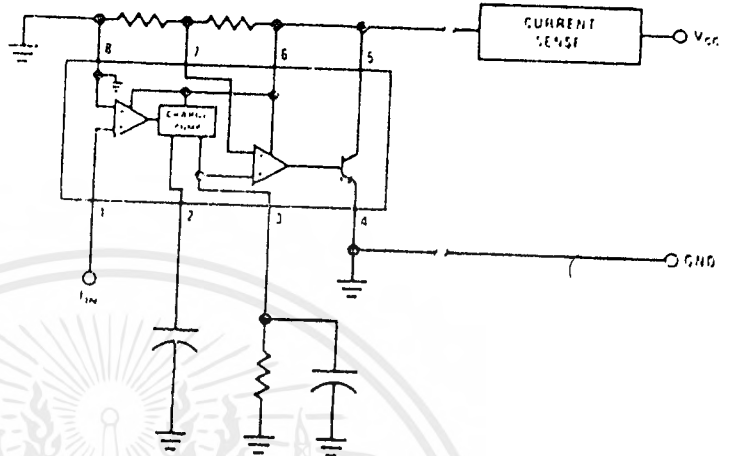


TL/H/7942-20

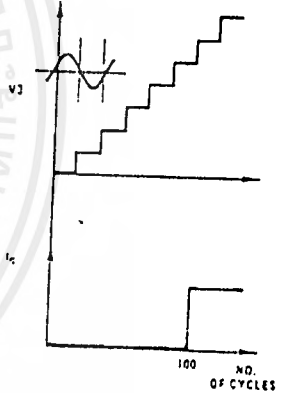
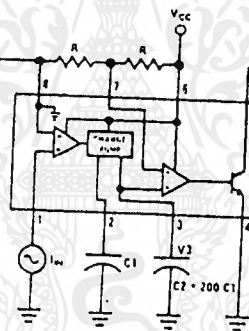
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications (Continued)

Two-Wire Remote Speed Switch



100 Cycle Delay Switch

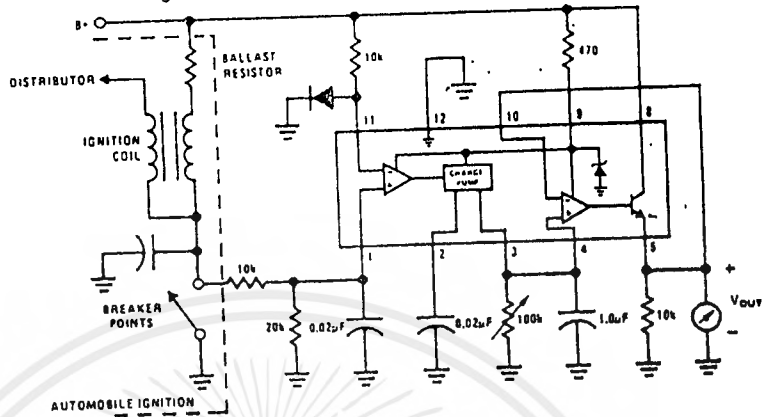


$V3$ steps up in voltage by the amount $\frac{V_{CC} \cdot C1}{C2}$ for each complete input cycle (2 zero crossings)
 Example:
 If $C2 = 200 C1$ after 100 consecutive input cycles
 $V3 = 1/2 V_{CC}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

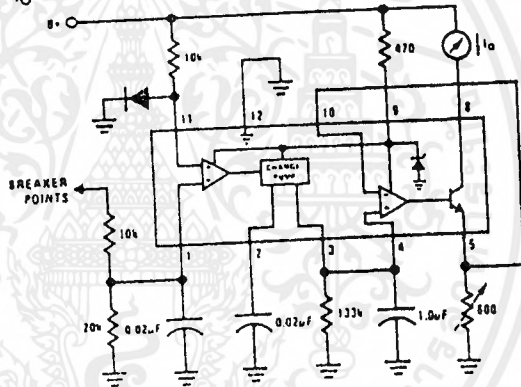
Typical Applications (Continued)

Voltage Driven Meter Indicating Engine RPM
 $V_O \approx 6V @ 400 \text{ Hz or } 6000 \text{ ERPM (8 Cylinder Engine)}$



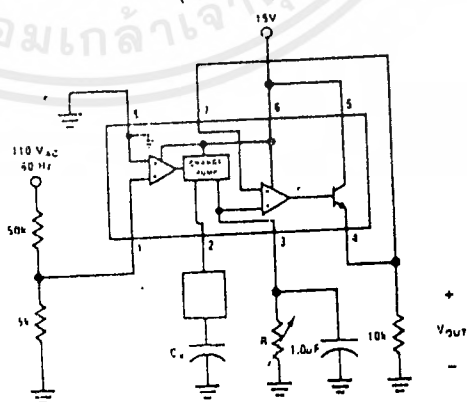
TL/H/7942-12

Current Driven Meter Indicating Engine RPM
 $I_O = 10 \text{ mA @ } 300 \text{ Hz or } 6000 \text{ ERPM (5 Cylinder Engine)}$



TL/H/7942-13

Capacitance Meter
 $V_{OUT} = 1V - 10V \text{ for } C_x = 0.01 \text{ to } 0.1 \text{ mF}$
 $(R = 111k)$

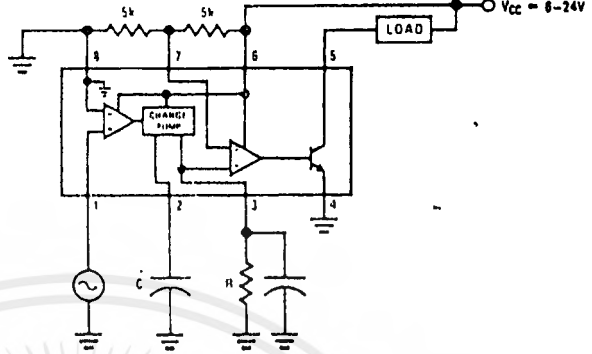


TL/H/7942-14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

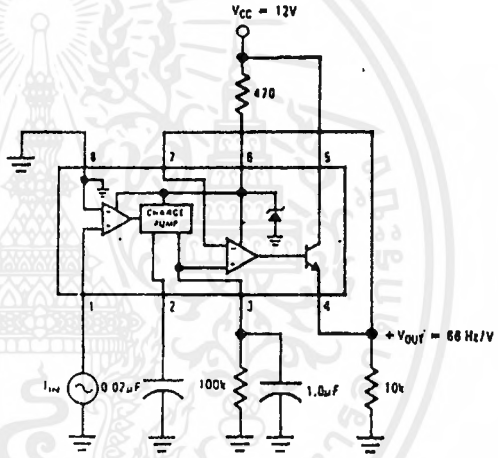
Typical Applications (Continued)

"Speed Switch" Load Is Energized When $f_{IN} \geq \frac{1}{2RC}$



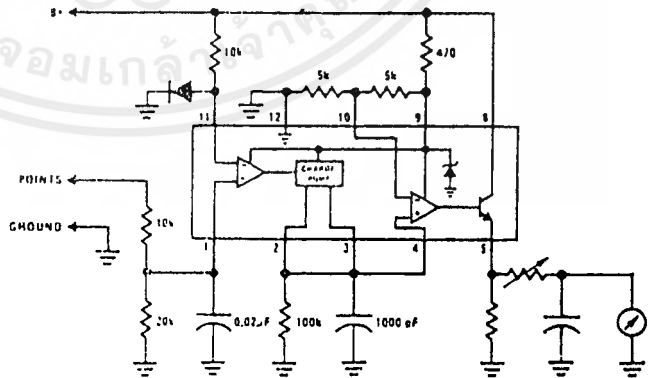
TL/H/7942-9

Zener Regulated Frequency to Voltage Converter



TL/H/7942-10

Breaker Point Dwell Meter



TL/H/7942-11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Applications Information

The LM2907 series of tachometer circuits is designed for minimum external part count applications and maximum versatility. In order to fully exploit its features and advantages, let's examine its theory of operation. The first stage of operation is a differential amplifier driving a positive feedback charge pump circuit. The input threshold voltage is the amount of differential input voltage at which the output of this stage changes state. Two options (LM2907-8, LM2917-8) have the input internally grounded so that an input signal must swing above and below ground and exceed the input thresholds to produce an output. This is offered specifically for magnetic variable reluctance pickups which typically provide a single-ended ac output. This single input is also fully protected against voltage swings to $\pm 28V$, which are easily attained with these types of pickups.

The differential input options (LM2907, LM2917) give the user the option of setting his own input switching level and will have the hysteresis around that level for excellent noise rejection in any application. Of course in order to allow the outputs to attain common-mode voltages above ground, input protection is removed and neither input should be taken outside the limits of the supply voltage being used. It is very important that an input not go below ground without some assistance in its lead to limit the current that will then flow in the epi-substrate diode.

Following the input stage is the charge pump where the input frequency is converted to a dc voltage. To do this requires one timing capacitor, one output resistor, and an integrating or filter capacitor. When the input stage changes state (due to a suitable zero crossing or differential voltage in the input) the timing capacitor is either charged or discharged linearly between two voltages whose difference is $V_{CC}/2$. Then in one half cycle of the input frequency or a time equal to $1/2 f_{IN}$ the change in charge on the timing capacitor is equal to $V_{CC}/2 \times C1$. The average amount of current pumped into or out of the capacitor then is:

$$\frac{\Delta Q}{T} = i_{c(AVG)} = C1 \times \frac{V_{CC}}{2} \times (2f_{IN}) = V_{CC} \times f_{IN} \times C1$$

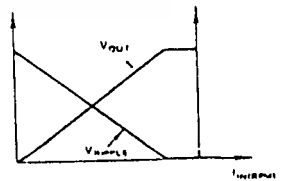
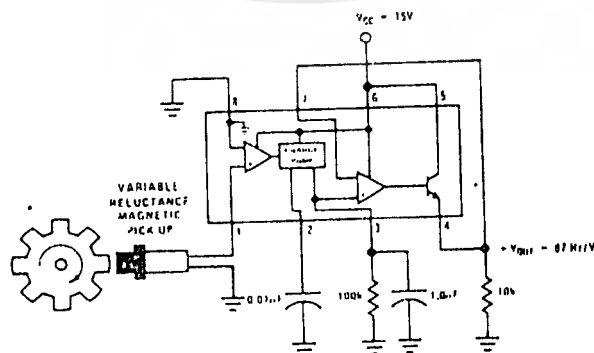
The output circuit mirrors this current very accurately into the load resistor $R1$, connected to ground such that if the pulses of current are integrated with a filter capacitor, then $i_O = i_c \times R1$, and the total conversion equation becomes:

$$V_O = V_{CC} \times f_{IN} \times C1 \times R1 \times K$$

where K is the gain constant—typically 1.0.

Typical Applications

Minimum Component Tachometer



The size of $C2$ is dependent only on the amount of ripple voltage allowable and the required response time.

CHOOSING $R1$ AND $C1$

There are some limitations on the choice of $R1$ and $C1$ which should be considered for optimum performance. The timing capacitor also provides internal compensation for the charge pump and should be kept larger than 500 pF for very accurate operation. Smaller values can cause an error current on $R1$, especially at low temperatures. Several considerations must be met when choosing $R1$. The output current at pin 3 is internally fixed and therefore $V_{CC}/R1$ must be less than or equal to this value. If $R1$ is too large, it can become a significant fraction of the output impedance at pin 3 which degrades linearity. Also output ripple voltage must be considered and the size of $C2$ is affected by $R1$. An expression that describes the ripple content on pin 3 for a single $R1C2$ combination is:

$$V_{RIPPLE} = \frac{V_{CC}}{2} \times \frac{C1}{C2} \times \left(1 - \frac{V_{CC} \times f_{IN} \times C1}{I_2} \right) \text{pk-pk}$$

It appears $R1$ can be chosen independent of ripple, however response time, or the time it takes V_{OUT} to stabilize at a new voltage increases as the size of $C2$ increases, so a compromise between ripple, response time, and linearity must be chosen carefully.

As a final consideration, the maximum attainable input frequency is determined by V_{CC} , $C1$ and I_2 :

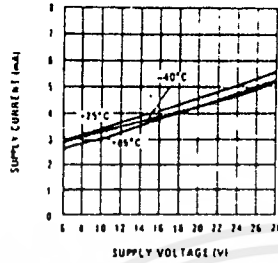
$$f_{MAX} = \frac{I_2}{C1 \times V_{CC}}$$

USING ZENER REGULATED OPTIONS (LM2917)

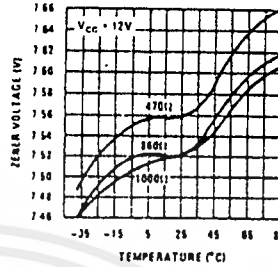
For those applications where an output voltage or current must be obtained independent of supply voltage variations, the LM2917 is offered. The most important consideration in choosing a dropping resistor from the unregulated supply to the device is that the tachometer and op amp circuitry alone require about 3 mA at the voltage level provided by the zener. At low supply voltages there must be some current flowing in the resistor above the 3 mA circuit current to operate the regulator. As an example, if the raw supply varies from 9V to 16V, a resistance of 470Ω will minimize the zener voltage variation to 160 mV. If the resistance goes under 400Ω or over 600Ω the zener variation quickly rises above 200 mV for the same input variation.

Typical Performance Characteristics

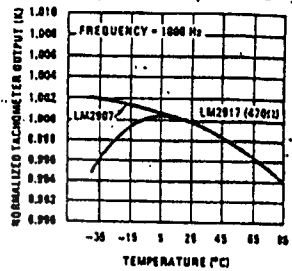
Total Supply Current



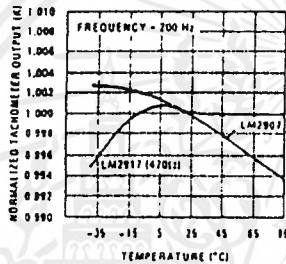
Zener Voltage vs Temperature



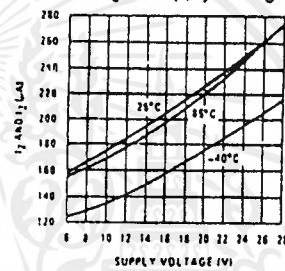
Normalized Tachometer Output vs Temperature



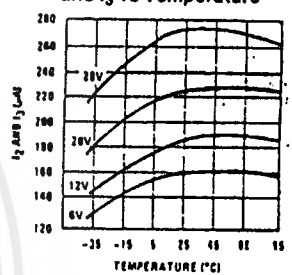
Normalized Tachometer Output vs Temperature



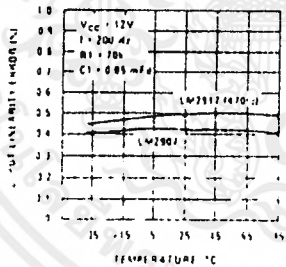
Tachometer Currents I_2 and I_3 vs Supply Voltage



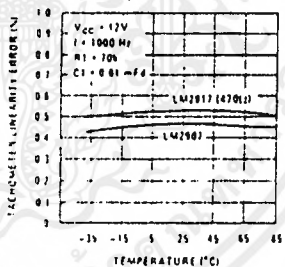
Tachometer Currents I_2 and I_3 vs Temperature



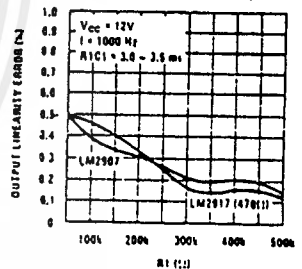
Tachometer Linearity vs Temperature



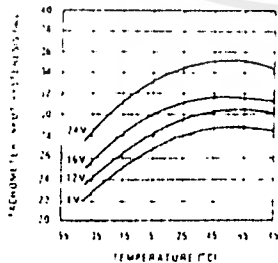
Tachometer Linearity vs Temperature



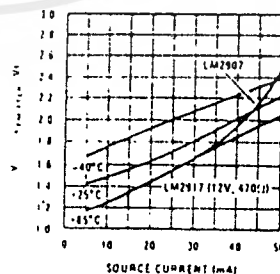
Tachometer Linearity vs R1



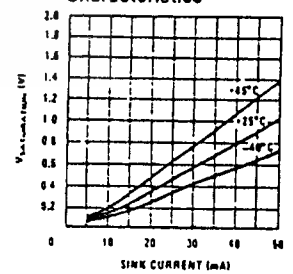
Tachometer Input Hysteresis vs Temperature



Op Amp Output Transistor Characteristics



Op Amp Output Transistor Characteristics



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical Characteristics $V_{CC} = 12 V_{DC}$, $T_A = 25^{\circ}C$, see test circuit (Continued)

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
VOLTAGE REGULATOR						
	Regulator Voltage	$R_{DCHOP} = 470\Omega$		7.56		V
	Series Resistance			10.5	15	Ω
	Temperature Stability			+1		mV/ $^{\circ}C$
	TOTAL SUPPLY CURRENT			3.8	6	mA

- Note 1: For operation in ambient temperatures above $25^{\circ}C$, the device must be derated based on a $150^{\circ}C$ maximum junction temperature and a thermal resistance of $101^{\circ}C/W$ junction to ambient for LM2907-B and LM2917-B, and $79^{\circ}C/W$ junction to ambient for LM2907-14 and LM2917-14.
- Note 2: Hysteresis is the sum of $V_{TH} - (-V_{TH})$, offset voltage is their difference. See test circuit.
- Note 3: V_{OH} is equal to $\frac{1}{4} \times V_{CC} - 1 V_{BE}$, V_{OL} is equal to $\frac{1}{4} \times V_{CC} - 1 V_{BE}$ therefore $V_{OH} - V_{OL} = V_{CC}/2$. The difference, $V_{OH} - V_{OL}$, and the mirror gain, $\beta_1 \beta_2$, are the two factors that cause the tachometer gain constant to vary from 1.0.
- Note 4: Be sure when choosing the time constant $R1 \times C1$ that $R1$ is such that the maximum anticipated output voltage at pin 3 can be reached with $I_3 \times R1$. The maximum value for $R1$ is limited by the output resistance of pin 3 which is greater than 10 M Ω typically.
- Note 5: Nonlinearity is defined as the deviation of V_{OUT} (at pin 3) for $I_{IN} = 5$ kHz from a straight line defined by the V_{OUT} @ 1 kHz and V_{OUT} @ 10 kHz. $C1 = 1000$ pF, $R1 = 68k$ and $C2 = 0.22$ mF.

General Description (Continued)

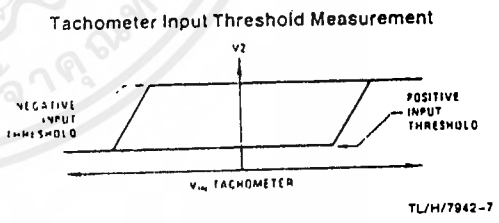
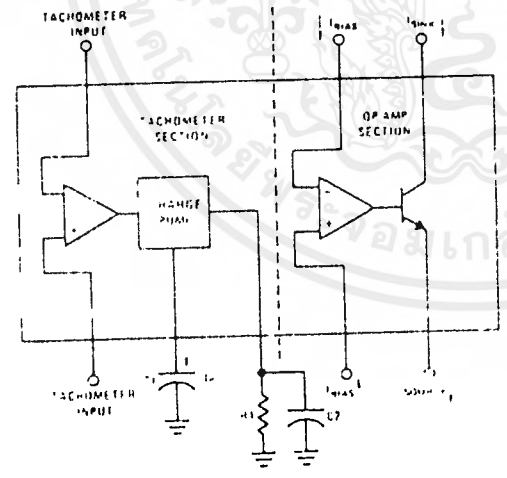
The op amp/comparator is fully compatible with the tachometer and has a floating transistor as its output. This feature allows either a ground or supply referred load of up to 50 mA. The collector may be taken above V_{CC} up to a maximum V_{CE} of 28V.

The two basic configurations offered include an 8-pin device with a *ground referenced tachometer* input and an internal connection between the tachometer output and the op amp non-inverting input. This version is well suited for single speed or frequency switching or fully buffered frequency to voltage conversion applications.

The more versatile configurations provide differential tachometer input and uncommitted op amp inputs. With this version the tachometer input may be floated and the op amp becomes suitable for active filter conditioning of the tachometer output.

Both of these configurations are available with an active shunt regulator connected across the power leads. The regulator clamps the supply such that stable frequency to voltage and frequency to current operations are possible with any supply voltage and a suitable resistor.

Test Circuit and Waveform



TL/H/7942-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings (Note 1)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage	28V
Supply Current (Zener Options)	25 mA
Collector Voltage	28V
Differential Input Voltage	
Tachometer	28V
Op Amp/Comparator	28V
Input Voltage Range	
Tachometer LM2907-8; LM2917-8	± 28V
LM2907; LM2917	0.0V to +28V
Op Amp/Comparator	0.0V to +28V

Power Dissipation

LM2907-8, LM2917-8

1200 mW

LM2907-14, LM2917-14

1580 mW

(See Note 1)

Operating Temperature Range

-40°C to +85°C

Storage Temperature Range

-65°C to +150°C

Soldering Information

Dual-In-Line Package

Soldering (10 seconds)

260°C

Small Outline Package

Vapor Phase (60 seconds)

215°C

Infrared (15 seconds)

220°C

See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.

Electrical Characteristics $V_{CC} = 12 V_{DC}$, $T_A = 25^\circ C$, see test circuit

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
TACHOMETER						
	Input Thresholds	$V_{IN} = 250 \text{ mVp-p} @ 1 \text{ kHz (Note 2)}$	± 10	± 25	± 40	mV
	Hysteresis	$V_{IN} = 250 \text{ mVp-p} @ 1 \text{ kHz (Note 2)}$		30		mV
	Offset Voltage	$V_{IN} = 250 \text{ mVp-p} @ 1 \text{ kHz (Note 2)}$		3.5	10	mV
	LM2907/LM2917			5	15	mV
	LM2907-8/LM2917-8					
	Input Bias Current	$V_{IN} = \pm 50 \text{ mV}_{DC}$		0.1	1	μA
V_{OH}	Pin 2	$V_{IN} = +125 \text{ mV}_{DC} \text{ (Note 3)}$		8.3		V
V_{OL}	Pin 2	$V_{IN} = -125 \text{ mV}_{DC} \text{ (Note 3)}$		2.3		V
I_2, I_3	Output Current	$V_2 = V_3 = 6.0 \text{ V (Note 4)}$	140	180	240	μA
I_3	Leakage Current	$I_2 = 0, V_3 = 0$			0.1	μA
K	Gain Constant	(Note 3)	0.9	1.0	1.1	
	Linearity	$f_{IN} = 1 \text{ kHz, 5 kHz, 10 kHz (Note 5)}$	-1.0	0.3	+1.0	%
OP/AMP COMPARATOR						
V_{OS}		$V_{IN} = 5.0 \text{ V}$		3	10	mV
I_{BIAS}		$V_{IN} = 5.0 \text{ V}$		50	500	nA
	Input Common-Mode Voltage		0		$V_{CC} - 1.5 \text{ V}$	V
	Voltage Gain			200		V/mV
	Output Sink Current	$I_C = 1.0$	40	50		mA
	Output Source Current	$I_E = V_{CC} - 2.0$		10		mA
	Saturation Voltage	$I_{SINK} = 5 \text{ mA}$		0.1	0.5	V
		$I_{SINK} = 20 \text{ mA}$			1.0	V
		$I_{SINK} = 50 \text{ mA}$		1.0	1.5	V

5414/7414 Hex Schmitt-Trigger Inverter

	Schottky TTL				High-Speed TTL				Low-Power Schottky TTL				Standard TTL				Low-Power TTL			
	Device Type	Package			Device Type	Package			Device Type	Package			Device Type	Package			Device Type	Package		
		C	P	M/CF		C	P	M/CF		C	P	M/CF		C	P	M/CF		C	P	M/CF
T.I.																				
FAIRCHILD								SN54LS14	J	P	M	WD	SN5414	J	P	M	WD			
MOTOROLA								SN74LS14	J	P	M	WD	SN7414	J	P	M	WD			
N. S. C.								DM54LS14					DM5414	J	P	M	WD			
PHILIPS								DM74LS14					DM7414	J	P	M	WD			
SIGNETICS								N74LS14					N7414	J	P	M	WD			
SIEMENS								N74LS14	A	I			N5414	F	P	M	WD			
FUJITSU													T7414	F	P	M	WD			
HITACHI								HLS14	M	T										
MITSUBISHI								HD74LS14	P	J			HD7414	P	J					
NEC								M74LS14	P	I			M53214	P	I					
TOSHIBA																				

Electrical Characteristics SN54LS14/SN74LS14

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range

Supply voltage, VCC	TV	Operating free-air temperature range	SN54LS14	-55°C to 125°C
Input voltage	TV	Storage temperature range	SN74LS14	°C to 150°C
				-65°C to 180°C

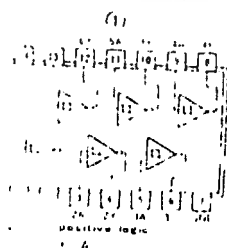
recommended operating conditions

	SN54LS14			SN74LS14			UNIT
	MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX	
Supply voltage, VCC	4.5	5	5.5	4.75	5	5.25	V
High-level output current, IOH			-400			-400	µA
Low-level output current, IOL			0			8	mA
Operating free-air temperature, Ta	-55		125	0		70	°C

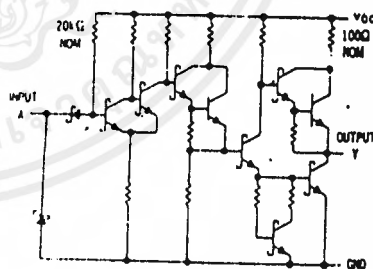
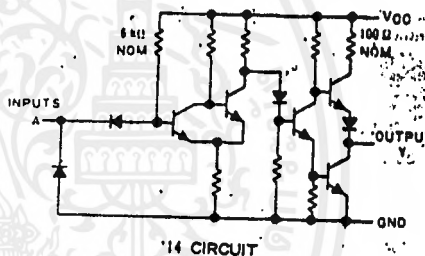
Electrical Characteristics over recommended operating free-air temperature range

PARAMETER	TEST CONDITIONS ¹	MIN	TYP ²	MAX	UNIT
V _{T+} Positive-going threshold voltage	V _{CC} = 5V	1.4	1.6	1.9	V
V _{T-} Negative-going threshold voltage	V _{CC} = 5V	0.5	0.8	1	V
Hysteresis (V _{T+} - V _{T-})	V _{CC} = 5V	0.4	0.8		V
V _I Input clamp voltage	V _{CC} = MIN, I _I = -18 mA			-1.3	V
V _{OH} High-level output voltage	V _{CC} = MIN, V _I = V _{T-} min, I _{OH} = MAX	2.7	3.4		V
V _{OL} Low-level output voltage	V _{CC} = MIN, V _I = V _{T+} max, I _{OL} = 4 mA		0.25	0.4	V
I _{T+} Input current at positive-going threshold	V _{CC} = 5V, V _I = V _{T+}	-0.14			mA
I _{T-} Input current at negative-going threshold	V _{CC} = 5V, V _I = V _{T-}	-0.18			mA
I _I Input current at maximum input voltage	V _{CC} = MAX, V _I = 7V		0.1		mA
I _{IHL} High-level input current	V _{CC} = MAX, V _I = 2.7V		20		µA
I _{IL} Low-level input current	V _{CC} = MAX, V _I = 0.4V		-0.4		mA
I _{IS} Short-circuit input current	V _{CC} = MAX	-20		100	mA
I _{OS} Short-circuit output current	V _{CC} = MAX		8.6	16	mA
I _{OL} Short-circuit output current	V _{CC} = 5V, 50% duty cycle		12	21	mA
I _{OL} Short-circuit output current	V _{CC} = 5V, I _A = 25% 15MHz, V _I = 70%		15	27	mA
I _{OL} Short-circuit output current	V _{CC} = 5V, I _A = 25% 15MHz, V _I = 70%		14	27	mA

Pin Assignment (Top View)



Schematics (each gate)



Resistor values shown are nominal and in ohms.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5474/7474 Dual D-Type Positive-Edge-Triggered Flip-Flop with Preset and Clear

	Schottky TTL				High-Speed TTL				Low-Power Schottky TTL				Standard TTL				Low-Power TTL			
	Device Type		Package		Device Type		Package		Device Type		Package		Device Type		Package		Device Type		Package	
	C	P	M	CF	C	P	M	CF	C	P	M	CF	C	P	M	CF	C	P	M	CF
T.I.	SN54S74	J(U)			SN54S74	J(U)			SN54LS74	J(D)			SN5474	J(U)			SN5474	J(U)		
FAIRCHILD	FM54S74/FM5474	J(D)	(K)		FMS4H74/FM9174	J(U)			FM54LS74/FM9174	J(D)			SN7474	J(U)			SN7474	J(U)		
MOTOROLA	FC74S74/FC9574	(D)	(K)		FC74H74/FC9574	(D)			FC74LS74/FC9574	(D)			FC7474/FC9574	(D)			FC7474/FC9574	(D)		
N.S.C.	DM74S74			ND	DM54H74	J(U)			DM54LS74	J(U)			DM7474	J(U)			DM7474	J(U)		
PHILIPS	N74S74			(U)	GJJ131/74H74				N74LS74				F7J131/7474							
SIGNETICS	S54S74				S54H74			F(U)	N74LS74			A(U)	S5474			F(U)	N7474			A(U)
SIEMENS	N74S74				N74H74			F(U)	N74LS74			A(U)	N7474			F(U)	N7474			A(U)
FUJITSU													FLJ141							
HITACHI	HD74S74			(D)	(K)				HD74LS74				HD7474/HD2510			(U)	(P)			
MITSUBISHI	M74S74			(D)	(K)				M74LS74				M8327/M8374			(D)	(K)			
NEC	74S74			(D)	(K)				74LS74				μPB214			(D)	(K)			
TOSHIBA													TD3474A			(D)	(K)			

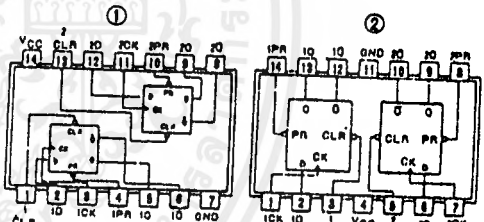
Electrical Characteristics SN54LS74/SN74LS74

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range			
Supply voltage, V _{CC}	5V	Operating free-air temperature range	-55°C to 150°C
Input voltage	5.5V	Storage temperature range	-65°C to 175°C
Recommended operating conditions			
SN54LS74 SN74LS74			
Supply voltage, V _{CC}	MIN	TYP	MAX
High-level output current, I _{OH}	5.0	5	5.5
Low-level output current, I _{OL}		-400	-400
Propagation delay, t _p	Check high	25	25
	Check low	25	25
Input setup time, t _{su}	High-level data	25	25
	Low-level data	20	20
Input hold time, t _{hd}		20	20
Operating free-air temperature, T _a		-55	175

Electrical Characteristics over Recommended Operating Free-Air Temperature Range

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
V _{IH}	High-level input voltage		2		V
V _{IL}	Low-level input voltage			0.8	V
V _I	Input clamp voltage	V _{CC} = MIN, I _I = -18 mA		-1.5	V
V _{OH}	High-level output voltage	V _{CC} = MIN, V _{IH} = 2V, V _{IL} = 0.8V, I _{OH} = MAX	2.7	3.4	V
V _{OL}	Low-level output voltage	V _{CC} = MIN, V _{IH} = 2V, V _{IL} = 0.8V, I _{OL} = 4mA	0.25	0.4	V
I _I	Input current at maximum input voltage	D, J, K, Clear		0.1	mA
		Preset		0.2	
		Clock		0.2	
I _{IH}	High-level input current	D, J, K, Clear		20	μA
		Preset		40	
		Clock		40	
I _{IL}	Low-level input current	D, J, K, Clear		-0.4	mA
		Preset		-0.8	
		Clock		-0.8	
I _{OB}	Short-circuit output current	Series 54LS		-20	mA
		Series 74LS		-100	
I _{CC}	Supply current (Average per flip-flop)	V _{CC} = MAX, See Note 1		4	mA
f	clock frequency	V _{CC} = 5V, T _A = 25°C, C _L = 15pF, R _L = 2kΩ	25	33	MHz
t _{PLH}	from clear, preset or clock		13	25	ns
t _{PHL}	(as appropriate) to 0 or 1		25	40	

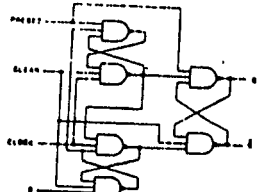
Pin Assignments (Top View)



Functional Table

'74, 'H74, 'LS74, 'S74 (See Note 2)			
INPUTS		OUTPUTS	
PRESET	CLEAR	CLOCK	D
L	H	X	X
L	L	X	X
L	L	X	X
L	H	X	X
H	H	X	X
H	H	X	X
H	H	X	X
H	H	X	X

Functional Block Diagram



'74, 'S74, 'H74, 'LS74, '74-DUAL D-FLIP FLOP WITH CLEAR AND PRESET

- NOTES: 1 With all outputs open, I_{CC} is measured with the 0- and 1- outputs high in turn. At the time of measurement, the clock input is grounded.
 2 H=high level (steady state), L=low level (steady state), X=prevalent
 † = transition from low to high level.
 0_o = the level of 0 before the indicated input conditions were established.
 * This configuration is nonstable; that is, it will not persist when preset and clear inputs return to their inactive (high) level.

For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.
 All typical values are at V_{CC} = 5V, T_A = 25°C.
 Not more than one output should be enabled at a time.
 t_{PLH} = propagation delay time, low-to-high-level output.
 t_{PHL} = propagation delay time, high-to-low-level output.
 The arrow indicates the edge of the clock pulse used for reference: † is the rising edge.

เอกสารอ้างอิง

- [1] โรงเรียนประเสริฐเสถียรจากรุการ, วรวุฒิ วาสินานนท์, ศิริวัฒน์ แสงทวี, “ การควบคุมความเร็วของอินดัคชันมอเตอร์ 3 เฟส” ปริชญานีพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ,2535
- [2] โสภณ สมัยรัฐ ,“ระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำทางเวกเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์” วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [3] พิรศักดิ์ วรสุนทรโรสด, มาบุชิ มาการิซารุ, “ เทคนิคการซ่อมแซม เทือกประเภทและติดตั้งมอเตอร์เหนี่ยวนำ” บริษัทจีเอ็คยูเคชั่นจำกัด(มหาชน) ,2538
- [4] S.A Nasar , L.E Unnewehr ,“Electromechanics and Electric Machines” John Wiley and Sons , New York ,1983
- [5] Unico, “1100 Flux Vector AC Drive” Unico, Incorporated,1994

กิตติกรรมประกาศ

1. อาจารย์สุวงศ์ โสมพงษ์
2. อาจารย์วีระเชษฐ ชันเงิน

ที่ช่วยกรุณาให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการทำโครงการชิ้นนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้