

ห้องสมุดบัณฑิตวิทยาลัย สจล.

ระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก

ด้วยสตาติกคอนเวอร์เตอร์

SPEED CONTROL OF SEPARATELY EXCITED DC MOTOR
BY STATIC CONVERTER

นนทวัฒน์ จุลเดช

NONTAWAT CHULADAYCHA

อาจารย์ที่ปรึกษา

วิศณุ พงศ์พิพัฒน์ Dr.-Ing.

ADVISOR

WISNU BHONGBHIBHAT Dr.-Ing.

วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

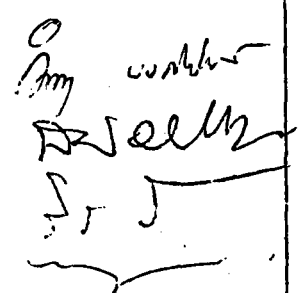
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2528

ACCESSION NO.	00041
DATE	23 MAR 1990
CALL NUMBER	

คณะกรรมการบัณฑิตศึกษา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตเจ้าพระยา ลาดกระบัง
แบบฟอร์มการให้คะแนนการสอบวิทยานิพนธ์
สำหรับนักศึกษาระดับมหาบัณฑิต

ชื่อนักศึกษา.....นายณนทวัฒน์ จุลเดช..... เลขประจำตัว.....๒๔:๐๐๑๕.....
ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์.....ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกด้วยสตาติคคอนเวอร์เตอร์
Speed Control of Separately Excited DC Motor by Static Converter

ชื่ออาจารย์ผู้ควบคุมการสอบ	ลายมือชื่อ	ผลการสอบ
ดร.วิศณุ พงศ์พิพัฒน์		ผ่าน
รศ.ดร.พิรศักดิ์ วรสุนทรโรสถ		ผ่าน
ผศ.วิริยะ พิเชษฐจำเริญ		ผ่าน
อาจารย์นิทัศน์ กฤษณจินดา		ผ่าน

วัน/ เดือน/ปี ที่สอบ.....๕ สิงหาคม ๒๕๒๔..... เวลา.....๑๐:๐๐ น. สถานที่.....ห้อง A - ๓๐๔


 ลงนามแทน
 คณะกรรมการบัณฑิตศึกษา

สารบัญ

	หน้า
สารบัญรูป	II
สารบัญตาราง	VII
บทคัดย่อ	VIII
Abstract	XI
สัญลักษณ์	X
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 วัตถุประสงค์และแนวความคิดในการทำวิทยานิพนธ์	4
บทที่ 3 วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง	8
บทที่ 4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก	37
บทที่ 5 อุปกรณ์วัด	43
บทที่ 6 ระบบควบคุมและวงจรควบคุม	49
บทที่ 7 การทดลอง, ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง	64
บทที่ 8 บทสรุป	81
กิตติกรรมประกาศ	82
เอกสารอ้างอิง	83
ภาคผนวก ก. รายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในแต่ละวงจร	84
ก.1 รายละเอียดอุปกรณ์ในแผนผังวงจรในรูปที่ 3.8 (ก)	85
ก.2 รายละเอียดอุปกรณ์ในแผนผังวงจรในรูปที่ 3.9 (ก)	85
ก.3 รายละเอียดอุปกรณ์ในแผนผังวงจรในรูปที่ 3.11 (ก)	85
ก.4 รายละเอียดอุปกรณ์ในแผนผังวงจรในรูปที่ 6.14	86
ก.5 คู่มือการใช้ IC TCA 780	87
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยในระหว่างการศึกษาปริญญาโทที่ได้รับการเผยแพร่ ในการสัมมนาทางวิชาการสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 6 ณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	92

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	แสดงบล็อกไดอาแกรมแนวความคิด เริ่มแรกของระบบควบคุมความเร็ว รอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก	5
รูปที่ 2.2	แสดงบล็อกไดอาแกรมแนวความคิดของระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์	6
รูปที่ 3.1	(ก) แสดงแผนผังวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังแบบควบคุมได้เต็มทีชนิด 3 เฟส (ข) แสดงรูปสัญญาณศักดาไฟฟ้าสลับ (ค) แสดงรูปสัญญาณ ที่ทางออก	9
รูปที่ 3.2	(ก) แสดงวงจรสมมูลของวงจรในรูปที่ 3.1 (ก) (ข) แสดงรูป สัญญาณของศักดาไฟฟ้าสลับในรูปที่ 3.2 (ก)	11
รูปที่ 3.3	(ก) แสดงการทำงานของวงจรในรูปที่ 3.2 (ก) เมื่อกระแสไฟฟ้า โหลดไหลอย่างต่อเนื่อง (ข) เมื่อกระแสไฟฟ้าโหลดไหลไม่ต่อเนื่อง	14
รูปที่ 3.4	(ก) แสดงไดอาแกรมการทำงานของวงจรรูปที่ 3.3 (ก) (ข) แสดงย่านการทำงานของวงจรในรูปที่ 3.3 (ก) เมื่อ $\phi = 90$ องศา	17
รูปที่ 3.5	แสดงแผนผังการทำงานของคอมพิวเตอรเพื่อเขียนกราฟในรูปที่ 3.4 (ก)	18
รูปที่ 3.6	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกระตุ้นและศักดาไฟฟ้าตรงที่ทางออก	19
รูปที่ 3.7	(ก) แสดงช่วงเวลาการทำงานของ SCR เมื่อมุมกระตุ้นเป็น 0 องศา (ข) แสดงสัญญาณกระตุ้นเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.7 (ก) (ค) แสดง สัญญาณกระตุ้นซึ่งใช้งานจริง	21
รูปที่ 3.8	(ก) แสดงแผนผังวงจรส่วนลดแรงดันศักดาไฟฟ้าสลับ และวงจรกรอง สัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (ข) แสดงรูปสัญญาณที่ทางเข้า และทางออก ของส่วนนี้	22
รูปที่ 3.9	(ก) แสดงวงจรสร้างสัญญาณกระตุ้น (ข) แสดงรูปสัญญาณศักดาไฟฟ้า ที่ขาต่าง ๆ ของ IC_1 ในวงจร 3.9 (ก)	23

รูปที่ 3.10	(ก) แสดงแผนผังวงจร เมื่อนำส่วนวงจรลดแรงดันคิกดาไฟฟ้าสลับ และวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านมาต่อกับวงจรสร้างสัญญาณกระตุ้น 3 ชุด (ข) แสดงสัญญาณกระตุ้นซึ่งออกมาจากแต่ละชุดของวงจร (ค) แสดงลำดับของสัญญาณกระตุ้นซึ่งเรียงตามลำดับการกระตุ้น SCR	26
รูปที่ 3.11	(ก) แสดงแผนผังวงจรขยายสัญญาณกระตุ้น (ข) แสดงรูปสัญญาณที่ขา Base ของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวที่มุมกระตุ้น 0 องศา	28
รูปที่ 3.12	แสดงรูปสัญญาณที่จุดต่าง ๆ ของแผนผังวงจรในรูปที่ 3.11 (ก)	29
รูปที่ 3.13	แสดงแผนผังวงจรทั้งหมดของวงจรกระตุ้น	30
รูปที่ 3.14	แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง	31
รูปที่ 3.15	(ก) แสดงการวางของแกนเหล็ก EI ของตัวอินดักเตอร์ (ข) แสดงการกำหนดพื้นที่ A ของอินดักเตอร์	32
รูปที่ 3.16	(ก) แสดงแผนผังหม้อแปลงสัญญาณกระตุ้น (ข) แสดงรูปสัญญาณของสัญญาณกระตุ้น และรูปสัญญาณของค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก	34
รูปที่ 4.1	แสดงไดอะแกรมอย่างง่ายของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก	37
รูปที่ 4.2	แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วรอบ และกำลังบิดเมื่อคิกดาไฟฟ้าตรงที่ขั้วของอาร์มาเจอร์มีค่าคงที่ N/N_R เป็นความเร็วรอบต่อหนึ่งหน่วย (Per Unit) และ N_R เป็นความเร็วรอบที่พิกัด T_D/T_R เป็นกำลังบิดต่อหนึ่งหน่วย และ T_R เป็นกำลังบิดที่พิกัด	39
รูปที่ 4.3	แสดงบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก	41
รูปที่ 4.4	(ก) แสดงแผนผังการต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อขับมอเตอร์ (ข) แสดงวงจรสมมูลภายในของวงจรอาร์มาเจอร์ เมื่อรวมกับอินดักเตอร์ L_d	42

รูปที่ 5.1	(ก) แสดงวงจรวัดกระแสไฟฟ้าตรงเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ โดยวิธีวัดจากกระแสไฟฟ้าสลับที่ไหลในแต่ละเฟสเข้าวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (ข) แสดงรูปสัญญาณของวงจรในรูปที่ 5.1 (ก)	44
รูปที่ 5.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ I_a และศักดาไฟฟ้าตรง V_{ac} ซึ่งได้จากการวัดกระแสไฟฟ้าสลับแต่ละเฟสไหลเข้าวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง	45
รูปที่ 5.3	แสดงบล็อกไดอาแกรมของการวัดกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์	45
รูปที่ 5.4	แสดงไดอาแกรมอย่างง่ายของทาโคเจนเนอเรเตอร์กระแสไฟฟ้าตรงชนิดแม่เหล็กถาวร	46
รูปที่ 5.5	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์ n และศักดาไฟฟ้าตรง V_T ที่ถูกสร้างขึ้นโดยทาโคเจนเนอเรเตอร์	46
รูปที่ 5.6	แสดงบล็อกไดอาแกรมของการวัดความเร็วรอบ	47
รูปที่ 5.7	แสดงวงจรสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน	47
รูปที่ 5.8	แสดงบล็อกไดอาแกรมของวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ	48
รูปที่ 6.1	แสดงระบบควบคุมซึ่งมีวงจรควบคุมชนิด PI และมีอุปกรณ์ถูกควบคุมชนิดอุปกรณ์ท่วงออร์เตอร์หนึ่ง	49
รูปที่ 6.2	แสดงระบบควบคุมซึ่งมีวงจรควบคุมชนิด PI และมีอุปกรณ์ถูกควบคุมชนิดอินทิเกรต	50
รูปที่ 6.3	แสดงคุณสมบัติในโดเมนของความถี่ของสมการ (6.15)	52
รูปที่ 6.4	แสดงระบบซึ่งมีอุปกรณ์ถูกควบคุมชนิดอุปกรณ์อินทิเกรตและอุปกรณ์ท่วงออร์เตอร์หนึ่งขนาดเล็ก	53
รูปที่ 6.5	แสดงการตอบสนองในทันทีทันใดของระบบซึ่งถูกกำหนดให้ทำงานดีที่สุดด้วยวิธีซิมเมตริกอล ออปติมัม	54

รูปที่ 6.6	แสดงระบบซึ่งมีอุปกรณ์ถูกควบคุมชนิดอุปกรณ์หนึ่งวงจรหนึ่ง ขนาดใหญ่และอุปกรณ์หนึ่งวงจรหนึ่งขนาดเล็ก	65
รูปที่ 6.7	แสดงระบบควบคุมในรูปที่ 6.6 เมื่อพิจารณาเฉพาะผลจากโหลด	67
รูปที่ 6.8	แสดงการตอบสนองของระบบควบคุมในรูปที่ 6.7 ซึ่งได้รับโหลด ในทันทีทันใดเมื่อความสัมพันธ์ระหว่าง T_1 และ T_e ต่าง ๆ กัน	68
รูปที่ 6.9	แสดงวงจรควบคุมชนิด PI	69
รูปที่ 6.10	แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรควบคุมชนิด PI	69
รูปที่ 6.11	แสดงคุณสมบัติการจำกัดศักดาไฟฟ้าควบคุมของวงจรจำกัดกระแสไฟฟ้า	60
รูปที่ 6.12	แสดงความสัมพันธ์ของศักดาไฟฟ้าควบคุมกับมุมกระตุ้นของวงจร สร้างสัญญาณกระตุ้น	61
รูปที่ 6.13	แสดงคุณสมบัติของวงจรจำกัดศักดาไฟฟ้าควบคุมของวงจรจำกัดมุม กระตุ้น	61
รูปที่ 6.14	แสดงวงจรจำกัดปริมาณซึ่งใช้จำกัดกระแสไฟฟ้าและจำกัดความเร็ว รอบ	62
รูปที่ 6.15	แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ ไฟฟ้ากระแสตรง	63
รูปที่ 7.1	(ก) แสดงระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ (ข) แสดงระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ อย่างง่าย	65
รูปที่ 7.2	แสดงวงจรควบคุมซึ่งใช้ในการทดลอง	68
รูปที่ 7.3	แสดงการตอบสนองของระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจร อาร์มาเจอร์ เมื่อได้รับคำสั่งในทันทีทันใดและไรเตอร์ของมอเตอร์ ถูกล็อคไว้ (ก) เมื่อได้รับคำสั่งเพิ่มกระแสไฟฟ้าจาก 1 A ไปยัง 2 A (ข) เมื่อได้รับคำสั่งเพิ่มกระแสไฟฟ้าจาก 5 A ไปยัง 6.3 A (ค) เมื่อได้รับคำสั่งเพิ่มกระแสไฟฟ้าจาก 10 A ไปยัง 13.6 A	71

รูปที่ 7.4	แสดงบล็อกไดอาแกรมของระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าตรงไหล เข้าวงจรอาร์มาเจอร์	72
รูปที่ 7.5	(ก) แสดงบล็อกไดอาแกรมของระบบควบคุมความเร็วรอบ (ข) แสดงบล็อกไดอาแกรมอย่างง่ายของรูปที่ 7.5 (ก) เมื่อ พิจารณาเฉพาะได้รับคำสั่ง n_{Ref}	73
รูปที่ 7.6	แสดงความเร็วรอบมอเตอร์ในกราฟรูปบนและแสดงกระแสไฟฟ้า ตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ในกราฟรูปล่างเมื่อระบบควบคุม ความเร็วรอบได้รับคำสั่งในทันทีทันใด โดยที่ (ก) ได้รับคำสั่ง เพิ่มความเร็วรอบจาก 500 รอบต่อนาที ไปยัง 800 รอบต่อนาที (ข) ได้รับคำสั่งเพิ่มความเร็วรอบจาก 800 รอบต่อนาที ไปยัง 1,000 รอบต่อนาที	77
รูปที่ 7.7	แสดงความเร็วรอบมอเตอร์ในกราฟรูปบนและแสดงปริมาณโหลด ในกราฟรูปล่าง เมื่อระบบควบคุมได้รับโหลดในทันทีทันใด โดยที่ (ก) เมื่อมอเตอร์ได้รับโหลด 31.25 % ของพิกัดโหลด (ข) เมื่อ มอเตอร์ได้รับโหลด 62.25 % ของพิกัดโหลด และ (ค) เมื่อ มอเตอร์ได้รับโหลด 100 % ของพิกัดโหลด	79

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปที่ 3.1 กับรูปที่ 3.2	12
ตารางที่ 3.2 แสดงสัญญาณที่กระตุ้น SCR แต่ละตัว	27

VIII

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้อธิบายถึง การออกแบบ การสร้าง และการทดลองของระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก (Separately Excited DC Motor) โดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic Circuit) ทำหน้าที่จ่ายกำลังให้มอเตอร์, ระบบควบคุมที่ใช้เป็นระบบควบคุมชนิดคาสเคด (Cascade Control System) โดยมีระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ (Armature Circuit) เป็นลูฟควบคุมภายใน (Subordinary Control Loop) และมีระบบควบคุมความเร็วรอบเป็นลูฟควบคุมภายนอกอีกชั้นหนึ่ง, ส่วนวงจรควบคุม (Controller Circuit) ใช้วงจรควบคุมอนาล็อกชนิด PI (Proportional plus Integral Analog Controller Circuit) จากผลการทดลองระบบที่สร้างขึ้นโดยให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที แล้วเพิ่มโหลดให้กับมอเตอร์ในทันทีทันใด (Step-load) จากไม่มีโหลดไปยังโหลดเต็มที่ของมอเตอร์ ระบบนี้สามารถทำให้มอเตอร์หมุนกลับสู่ความเร็วรอบเดิมได้ภายใน 2 วินาที

Abstract

This thesis describes the design, development and experimental analysis of the speed control of a separately excited DC motor, using a power electronic circuit which controls the power of the motor.

This control system is a cascade control system having direct current of armature circuit as the subordinate control loop and speed control as the external control loop. The controller unit uses proportional plus integral analog control.

The result of tests on the built system show that if the motor rotates at a speed of 1,000 revolutions per minute, and an increased load is immediately applied to the motor, its status changing from unloaded to fully loaded condition, the system causes the motor to return to its former speed within 2 seconds.

สัญลักษณ์

- e_a : ศักดาไฟฟ้าย้อนกลับของมอเตอร์
 i : กระแสไฟฟ้า
 i_a : กระแสไฟฟ้าไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์
 i_f : กระแสไฟฟ้าไหลเข้าวงจรสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์
 i_g : กระแสไฟฟ้าไหลเข้าขาเกตของ SCR
 i_o : กระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
 i_R, i_S, i_T : กระแสไฟฟ้าในสายส่ง
 i_μ : กระแสไฟฟ้าแม่กนีโตซิงค์
 m : อัตราส่วนระหว่าง V_C กับ $\sqrt{2} V, \sin \alpha$
 n : ความเร็วรอบ
 t : เวลา
 t_D : กำลังบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น
 t_L : กำลังบิดที่โหลดต้องการ
 t_q : ค่าเวลาที่ใช้ในการหยุดทำงานของ SCR (Turn-off Time)
 t_{sm} : ค่าเวลาคงที่ของวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน
 u : ศักดาไฟฟ้าที่ขั้วอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์
 v : ศักดาไฟฟ้า
 v_B : ศักดาไฟฟ้าที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์
 $v_C(t)$: ศักดาไฟฟ้าควบคุม
 v_f : ศักดาไฟฟ้าที่ขั้ววงจรสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์
 $v(n)$: ศักดาไฟฟ้าที่จุด n เปรียบเทียบกับจุด GND
 $v(n_1) - (n_2)$: ศักดาไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างจุด n_1 กับจุด n_2
 v_o : ศักดาไฟฟ้าที่ทางออกของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
 v_{RS}, v_{ST}, v_{TR} : ศักดาไฟฟ้าระหว่างสายของสายส่ง

- V_{RN}, V_{SN}, V_{TN} : ศักดาไฟฟ้าเฟสของสายส่ง
- A : พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก
- A_S : ค่าคงที่
- A_R : ค่าอัตราขยายของวงจรควบคุม
- B : ค่าความหนาแน่นของเส้นแรงสนามแม่เหล็ก
- C : คาปาซิเตอร์
- D : ไดโอด
- E_a : ศักดาไฟฟ้าเฉลี่ยย้อนกลับของมอเตอร์
- $E_a(s)$: ศักดาไฟฟ้าย้อนกลับของมอเตอร์ในโดเมน s
- $E(s)$: ค่าความผิดพลาดในโดเมน s
- GND : จุดกราวด์
- H : ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก
- I : กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย
- I_a : กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์
- $I_a(s)$: กระแสไฟฟ้าไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ในโดเมน s
- I_{ac} : กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากวงจรวัดกระแสไฟฟ้าไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์
- I_O : กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยออกจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
- J : โมเมนต์อินเฉียของมอเตอร์
- K_1, K_2 : ค่าคงที่ของมอเตอร์
- K_{ac} : ค่าคงที่ของระบบวัดกระแสไฟฟ้า
- K_T : ค่าคงที่ของระบบวัดความเร็วรอบ
- L : อินดักเตอร์
- L_a : ค่าอินดักเตอร์ภายในวงจรอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์
- L_d : ค่าอินดักเตอร์ใช้สำหรับกรองกระแสไฟฟ้า
- N : ความเร็วรอบเฉลี่ยของมอเตอร์
- $N(s)$: ความเร็วรอบในโดเมนของ s

- Q : SCR
 R : ความต้านทาน
 R_a : ความต้านทานภายในของวงจรอาร์มาเจอร์
 R_{ac} : ความต้านทานซึ่งใช้ประกอบในการวัดกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์
 T : หม้อแปลงสัปดาห์ไฟฟ้าสลับ
 T_a : ค่าเวลาคงที่ทางไฟฟ้าภายในวงจรอาร์มาเจอร์
 T_{a1} : ค่าเวลาคงที่ทางไฟฟ้าภายในวงจรอาร์มาเจอร์รวมกับอินดักเตอร์สำหรับกรองกระแสไฟฟ้า
 T_D : กำลังบิดเฉลี่ยที่มอเตอร์สร้างขึ้น
 $T_D(s)$: กำลังบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นในโดเมน s
 T_L : กำลังบิดเฉลี่ยที่โหลดต้องการ
 $T_L(s)$: กำลังบิดที่โหลดต้องการในโดเมน s
 T_m : ค่าเวลาคงที่เชิงกล
 T_n : ค่าเวลาคงที่รีเซ็ต (Reset Time Constant)
 T_r : ทรานซิสเตอร์
 T_t : ค่าเวลาคงที่ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
 U : ศักดาไฟฟ้าเฉลี่ยที่เข้าอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์
 $U(s)$: ศักดาไฟฟ้าที่เข้าอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ในโดเมน s
 V : ศักดาไฟฟ้าเฉลี่ย
 V_{ac} : ศักดาไฟฟ้าเฉลี่ยที่ได้จากวงจรวัดกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์
 $V_{ac}(s)$: ศักดาไฟฟ้าที่ได้จากวงจรวัดกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ในโดเมน s
 V_c : ศักดาไฟฟ้าตรงซึ่งทำหน้าที่ในโหลด
 V_c : ค่าคงที่ของศักดาไฟฟ้าควบคุม
 $V_c(s)$: ศักดาไฟฟ้าควบคุมในโดเมน s
 V_o : ศักดาไฟฟ้าเฉลี่ยที่ทางออกของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง
 V_S : แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าตรง

- V_T : ศักดาไฟฟ้าเฉลี่ยได้จากวงจรวัดความเร็วรอบ
 $V_T(s)$: ศักดาไฟฟ้าได้จากวงจรวัดความเร็วรอบในโดเมน s
 W : จำนวนรอบการพันขดลวดของหม้อแปลงศักดาไฟฟ้า
 W : ตัวแปรคำสั่ง
 $W(s)$: ตัวแปรคำสั่งในโดเมน s
 X : ตัวแปรที่ต้องการ
 $X(s)$: ตัวแปรที่ต้องการในโดเมน s
 Z : อิมพีแดนซ์ของโหลด
 $Z(s)$: ตัวแปรของโหลดในโดเมน s
 Z_{step} : ค่าคงที่ตัวแปรของโหลดในทันทีทันใด
 α : มุมกระตุ้น
 γ : ระยะมุมซึ่ง SCR ทำงาน
 θ : แรงเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า
 ϕ : มุมของอิมพีแดนซ์ของโหลด
 ϕ : ปริมาณเส้นแรงสนามแม่เหล็กภายในมอเตอร์
 σ : ระยะห่างของแกน EI
 μ_o : ค่าเพอร์มิอานิติของอากาศ
 μ_r : ค่าเพอร์มิอานิติสัมพัทธ์ของแกน เหล็ก
 ω : ความเร็วเชิงมุม

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าแบบควบคุมความเร็วรอบได้ สามารถแยกประเภทตามชนิดของมอเตอร์ซึ่งใช้เป็นต้นกำลังได้คือ ระบบซึ่งใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นต้นกำลัง และระบบซึ่งใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นต้นกำลัง ในระบบแรกแม้ว่าราคาของมอเตอร์ และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาของมอเตอร์จะต่ำกว่าระบบหลังมาก แต่อุปกรณ์สำหรับขับและควบคุมการทำงานของมอเตอร์ชนิดนี้ให้ทำงานได้แม่นยำ จะมีเทคนิคยุ่งยาก และราคาสูง ดังนั้นเมื่อมีความต้องการระบบขับเคลื่อนซึ่งจำเป็นต้องมีคุณสมบัติในการทำงานที่แม่นยำ ระบบขับเคลื่อนซึ่งใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นต้นกำลังจะได้รับความนิยมสูงกว่า โดยเฉพาะมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก ทั้งนี้เพราะการควบคุมศักดาไฟฟ้าตรงที่วงจรอาร์มาเจอร์ และการควบคุมปริมาณเส้นแรงสนามแม่เหล็ก (Flux) ภายในมอเตอร์สามารถแยกการควบคุม เป็นอิสระต่อกัน ซึ่งทำให้มอเตอร์ชนิดนี้ง่ายต่อการควบคุม

ในอดีตระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ชนิดนี้ อาจจะถูกสร้างขึ้นมาได้หลายวิธีและหลายรูปแบบ [1] เช่น ระบบควบคุมความเร็วรอบโดยวิธีปรับปริมาณเส้นแรงสนามแม่เหล็กภายในมอเตอร์ หรือระบบควบคุมความเร็วรอบซึ่งมีชื่อเรียกว่า ระบบ Ward-Leonard แต่ระบบควบคุมความเร็วรอบทั้งสองแบบมีข้อจำกัดคือ ในระบบแรก การควบคุมความเร็วรอบจะมีผลทำให้กำลังบิด (Torque) ของมอเตอร์เปลี่ยนแปลง ส่วนระบบหลังมีข้อจำกัดคือ การตอบสนองต่อการทำงานช้า, มีขนาดใหญ่และราคาแพง ปัจจุบันเมื่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power Electronic Element) ได้รับการพัฒนามากขึ้นทำให้เกิดการพัฒนาวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อนำไปใช้ควบคุมกำลังขนาดใหญ่ และเมื่อนำวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังมาสร้างเป็นระบบควบคุมมอเตอร์ ก็จะทำให้การทำงานของระบบนี้สามารถตอบสนองต่อการทำงานได้เร็วกว่า ขนาดเล็กและราคาถูกกว่า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอธิบายถึง การออกแบบ การสร้าง และการทดลองระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังชนิด SCR (Silicon Controlled Rectifier) ต่อเป็นวงจรตัวกระทำไฟฟ้าแบบควบคุมได้เต็มทีชนิด 3 เฟส (Fully-controlled Three-phase Rectifier) ทำหน้าที่จ่ายกำลังให้มอเตอร์ และมีระบบควบคุมชนิดคาสเคด ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบ ในระบบควบคุมชนิดคาสเคดจะประกอบด้วย ลูฟควบคุมสองลูฟ คือ ลูฟควบคุมกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์เป็นลูฟควบคุมภายใน ลูฟนี้มีหน้าที่

ควบคุมการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง และควบคุมมิให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์เกินพิกัด การวัดกระแสไฟฟ้านี้ในระบบควบคุม ไม่ได้วัดกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์โดยตรง แต่จะวัดจากกระแสไฟฟ้าสลับซึ่งไหลจากแหล่งจ่ายพลังงาน (Power Supply) เข้าสู่วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังแทน ลูฟควบคุมอีกลูฟหนึ่งเป็นลูฟควบคุมการทำงานของลูฟแรกและควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ลูฟนี้ใช้ทาโคเจนเนอเรเตอร์ (Tacho-generator) วัดความเร็วรอบ วงจรควบคุมของทั้งสองลูฟจะใช้วงจรควบคุมอนุโลกชนิด PI และวงจรควบคุมนี้จะถูกปรับแต่งเพื่อให้ระบบทำงานได้ดีที่สุด (Optimization) ด้วยวิธี ซิมเมตริกอล ออปติมัม (Symmetrical Optimum) รายละเอียดและผลการทดลองระบบจะอธิบายในรายละเอียดในบทต่อ ๆ ไป

ข้อดีของระบบควบคุมความเร็วรอบชนิดนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบเดิมคือ

1. การตอบสนองต่อการทำงานรวดเร็ว
2. ความเชื่อถือต่อการทำงานสูง
3. ประสิทธิภาพสูง
4. ค่าใช้จ่ายในการลงทุน และการบำรุงรักษาต่ำ
5. มีขนาดเล็ก

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 8 บท ซึ่งในแต่ละบทมีเนื้อหาสาระดังนี้คือ

บทที่ 2 อธิบายถึงวัตถุประสงค์ของการทำวิทยานิพนธ์ และแนวความคิดในการทำวิทยานิพนธ์

บทที่ 3 อธิบายถึงวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ โดยอธิบายถึงวงจรกำลัง (Power Circuit) และวงจรกระตุ้น (Triggering Circuit) ซึ่งวงจรทั้งสองนี้ถูกเรียกชื่อรวมว่าวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง นอกจากนี้ยังอธิบายถึงบล็อกไดอาแกรม (Block Diagram) และทรานเฟอร์ฟังก์ชัน (Transfer Function) ของวงจรนี้ด้วย

บทที่ 4 อธิบายถึงไดอาแกรมอย่างง่ายของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก, สมการความเร็วรอบของมอเตอร์ และสาเหตุซึ่งต้องมีระบบควบคุม นอกจากนี้จะอธิบายถึงบล็อกไดอาแกรม และทรานเฟอร์ฟังก์ชันของมอเตอร์

บทที่ 5 อธิบายถึงอุปกรณ์วัด, วิธีวัด, บล็อกไดอาแกรม และทรานเฟอร์ฟังก์ชันของอุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ และอุปกรณ์วัดความเร็วรอบของมอเตอร์

บทที่ 6 อธิบายถึงคุณสมบัติของระบบควบคุมซึ่งมีวงจรควบคุมชนิด PI, การออกแบบวงจรควบคุมให้ระบบควบคุมมีคุณสมบัติในการทำงานดีที่สุด, การสร้างวงจรควบคุมชนิด PI และแสดงบล็อกไดอแกรม และทรานเฟอร์ฟังก์ชันของวงจรควบคุมนี้ นอกจากนี้ยังอธิบายถึงวงจรจำกัดปริมาณ (Amplitude Limiter Circuit) ซึ่งจะใช้จำกัดปริมาณสัญญาณควบคุมของระบบนี้เพื่อให้ระบบทำงานเกินพิกัด

บทที่ 7 อธิบายถึงวิธีการทดลอง ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

บทที่ 8 เป็นการสรุปผลของวิทยานิพนธ์ทั้งหมด

ท้ายสุดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แสดงรายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในแต่ละวงจร และได้แสดงผลงานวิจัยในระหว่างการศึกษาปริญญาโทที่ได้รับการเผยแพร่ ในการสัมมนาทางวิชาการ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 6 ณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ไว้เป็นภาคผนวกด้วย

บทที่ 2

วัตถุประสงค์และแนวความคิดในการทำวิทยานิพนธ์

2.1 บทนำ

ในบทที่ 2 นี้จะอธิบายถึงวัตถุประสงค์ของการทำวิทยานิพนธ์ และอธิบายถึงแนวความคิดในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อเป็นพื้นฐานประกอบก่อนที่จะทำความเข้าใจ เกี่ยวกับ เนื้อหารายละเอียดของระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่จะกล่าวถึงต่อไป

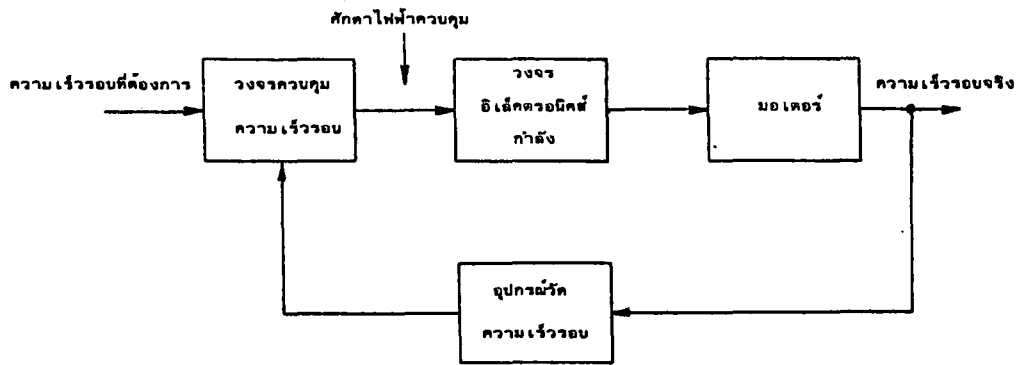
2.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีเกี่ยวกับระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังทำหน้าที่จ่ายกำลังให้มอเตอร์ได้รับการแพร่หลายในประเทศที่ได้รับการพัฒนาแล้ว แต่ทว่าในประเทศไทย เทคโนโลยีเกี่ยวกับสาขานี้ยังไม่แพร่หลายเท่าที่ควร ปกติระบบควบคุมชนิดนี้ส่วนมากจะถูกสั่งเข้ามาโดยตรงจากต่างประเทศ และถ้าเป็นระบบที่มีขนาดใหญ่การติดตั้งและการปรับแต่ง บริษัทผู้ผลิตก็จะส่งวิศวกรของบริษัท เข้ามาปฏิบัติงานโดยตรง ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีสาขานี้จึงไม่พัฒนาเท่าที่ควร เมื่อ เป็นเช่นนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เสนอวิธีการออกแบบ และสร้างระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังทำหน้าที่จ่ายกำลังให้มอเตอร์ โดยพยายามใช้อุปกรณ์ที่หาได้ภายในประเทศ เพื่อสร้างระบบควบคุมชนิดนี้ขึ้นมาให้สามารถนำไปใช้งานได้จริง และมีความเชื่อถือสูง ทั้งนี้เพื่อกระตุ้นให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีสาขานี้ให้ก้าวหน้าขึ้น และเป็นการส่งเสริมให้มีการนำเอาระบบควบคุมชนิดนี้ไปใช้ให้เป็นประโยชน์แพร่หลายมากขึ้น

2.3 แนวความคิดในการทำวิทยานิพนธ์

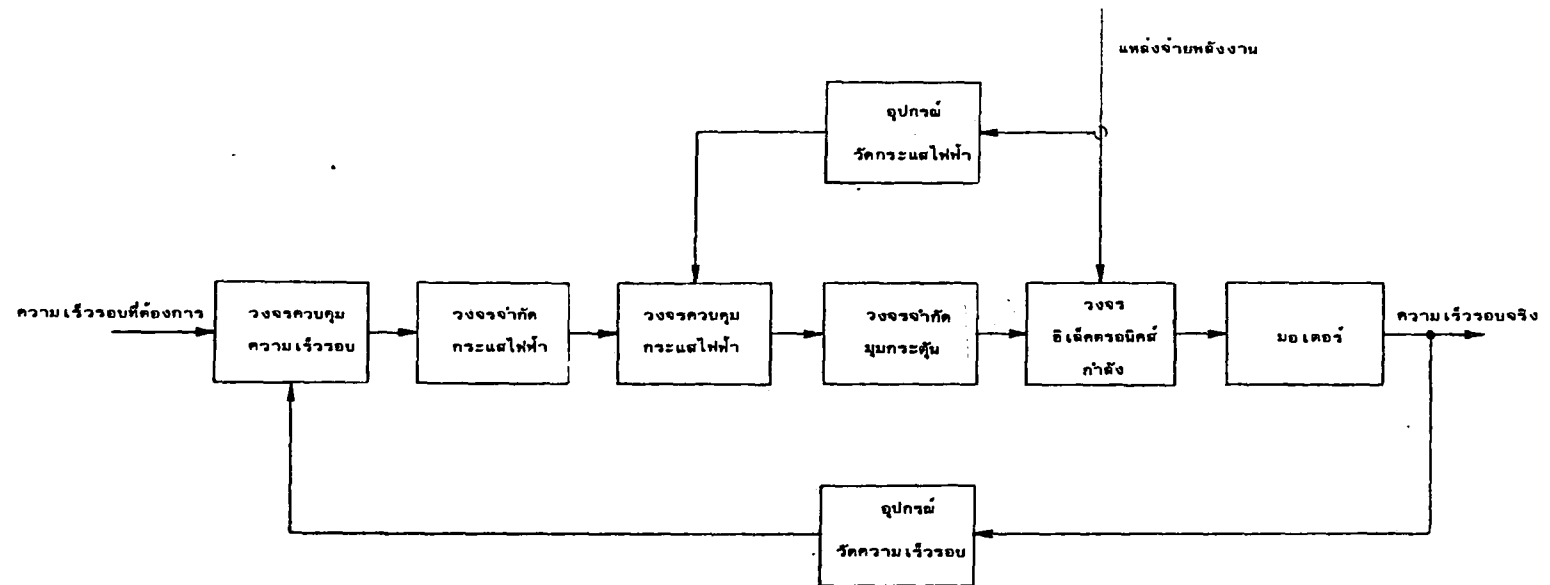
เนื่องจากความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกสามารถควบคุมได้โดยควบคุมศักดาไฟฟ้าตรงที่ป้อนเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ และเนื่องจากวงจรตัดกระแสไฟฟ้าแบบควบคุมได้เต็ม ที่ชนิด 3 เฟส มีคุณสมบัติที่สามารถควบคุมศักดาไฟฟ้าตรงที่ทางออก (Output) ได้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงได้เสนอแนวความคิด และวิธีการใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังชนิดนี้มาสำหรับขับมอเตอร์ โดยมีศักดาไฟฟ้าควบคุม (Controlled Voltage) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังอีกชั้นหนึ่ง รูปที่ 2.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของแนวความคิดเริ่มแรกที่จะสร้างระบบควบคุมความเร็วรอบ โดยใช้วงจรควบคุมความเร็วรอบทำหน้าที่เปรียบเทียบกับความเร็วรอบที่ต้องการกับความเร็วยุติ จากนั้นวงจรควบคุมจะสร้างศักดาไฟฟ้าควบคุม ควบคุมการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง-

อีกชั้นหนึ่ง



รูปที่ 2.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมแนวความคิด เริ่มแรกของระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก

ระบบควบคุมดังแสดงในรูปที่ 2.1 มีข้อจำกัดคือ เมื่อมอเตอร์ได้รับโหลดมากขึ้น กระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ก็จะเพิ่มมากขึ้น และความเร็วรอบของมอเตอร์จะลดลง วงจรควบคุมจะทำหน้าที่ปรับศักดาไฟฟ้าควบคุม เพื่อให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังขับมอเตอร์ให้หมุนเร็วขึ้น จนกระทั่งมีความเร็วรอบตามต้องการ จากแผนการทำงานดังกล่าวแล้ว เมื่อมอเตอร์ได้รับโหลดเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ วงจรควบคุมจะพยายามปรับความเร็วรอบให้ได้ความเร็วรอบที่ต้องการ โดยมีได้ควบคุมกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ ดังนั้นสำหรับระบบควบคุมดังกล่าวนี้ มอเตอร์อาจจะเสียหายเนื่องจากกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์เกินพิกัด แต่ข้อจำกัดนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยเพิ่มวงจรจำกัดศักดาไฟฟ้าควบคุม ก่อนที่จะไปควบคุมวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังในระบบควบคุมความเร็วรอบ ระบบนี้มีการทำงานคือ เมื่อกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์เกินพิกัด ศักดาไฟฟ้าควบคุมซึ่งควบคุมการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังก็ถูกจำกัด ซึ่งมีผลทำให้ศักดาไฟฟ้าที่ทางออกของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังถูกจำกัดด้วย เมื่อศักดาไฟฟ้านี้ถูกจำกัด ความเร็วรอบของมอเตอร์ก็就会被จำกัดตามมา ดังนั้นการจำกัดกระแสไฟฟ้าตรงด้วยวิธีนี้จะไปจำกัดความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วย เพื่อลดข้อบกพร่องนี้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้คิดใช้ระบบควบคุมชนิดคาสเคด ดังแสดงบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.2 มาประยุกต์ใช้งาน ระบบนี้มีการทำงานดังนี้คือ วงจรควบคุมความเร็วรอบจะเปรียบเทียบความเร็วรอบที่ต้องการกับความเร็วรอบจริง จากนั้นวงจรควบคุมความเร็วรอบจะส่งศักดาไฟฟ้าควบคุมเพื่อควบคุมระบบ-



รูปที่ 2.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมแนวความคิดของระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยกที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

ควบคุมกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ โดยที่ก่อนจะเข้าระบบควบคุมกระแสไฟฟ้านั้นจะต้องผ่านวงจรจำกัดกระแสไฟฟ้าก่อน วงจรนี้จะจำกัดศักดาไฟฟ้าควบคุมซึ่งได้จากวงจรควบคุมความเร็วรอบ เพื่อกันมิให้ระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าบังคับให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์เกินพิกัด เมื่อวงจรควบคุมกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับศักดาไฟฟ้าควบคุมนี้กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลจริงแล้ว ก็จะส่งศักดาไฟฟ้าควบคุมผ่านวงจรจำกัดมุมกระตุ้น ซึ่งวงจรนี้จะจำกัดศักดาไฟฟ้าตรงที่ทางออกของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อป้องกันมิให้มอเตอร์ได้รับศักดาไฟฟ้าตรงเกินพิกัด จากนั้นวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังก็จะใช้ศักดาไฟฟ้าควบคุมนี้เพื่อขับมอเตอร์ต่อไป ระบบนี้จะมีการทำงานเมื่อมีโหลดคือ เมื่อมอเตอร์ได้รับโหลดมากขึ้น มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วลดลง ดังนั้นวงจรควบคุมความเร็วรอบก็ควบคุมวงจรควบคุมกระแสไฟฟ้าให้ขับมอเตอร์ให้หมุนด้วยความเร็วรอบตามต้องการ

ข้อดีของระบบควบคุมนี้คือ การจำกัดความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์จะไม่เกี่ยวข้องกัน และระบบนี้สามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าได้แม้ว่าแหล่งจ่ายพลังงานเข้าวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเปลี่ยนแปลงไป

2.4 บทสรุป

จากวัตถุประสงค์และแนวความคิดในการทำวิทยานิพนธ์ดังได้อธิบายไปแล้วนั้นได้แสดงถึงโครงสร้างและส่วนประกอบของระบบควบคุมความเร็วรอบ ซึ่งในบทต่อไปนี้จะอธิบายถึงแต่ละส่วนของระบบนี้ และการนำแต่ละส่วนมาประกอบกัน เพื่อสร้างเป็นระบบควบคุมความเร็วรอบต่อไป

บทที่ 3

วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

(Power Electronic Circuit)

3.1 บทนำ

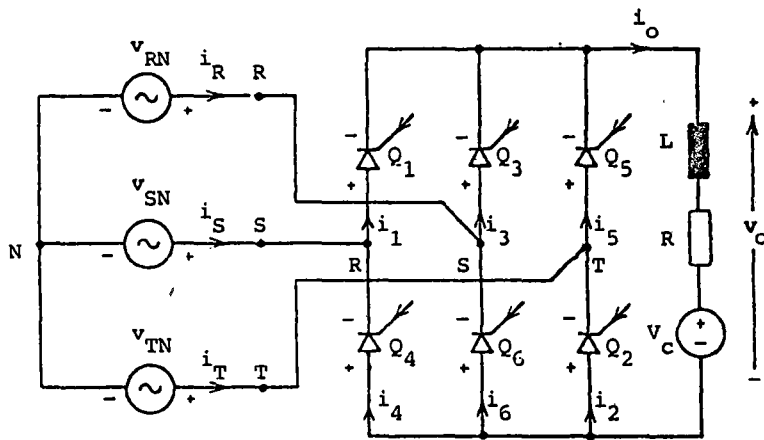
เนื้อหาของบทนี้จะอธิบายถึงวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ วงจรนี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกเป็นวงจรกำลัง (Power Circuit) ซึ่งได้แก่วงจรตัวแปรสลับไฟฟ้าแบบควบคุมได้เต็มทีชนิด 3 เฟส และส่วนที่สองเป็นวงจรกระตุ้นซึ่งใช้กระตุ้นการทำงานของวงจรแรก เนื่องจากวงจรทั้งสองนี้จะทำงานร่วมกัน ฉะนั้นในการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบจึงใช้บล็อกไดอาแกรมและทรานเฟอร์ฟังก์ชันเพียงหนึ่งชุด เพื่อแทนวงจรทั้งสอง ในบทนี้จะอธิบายถึงบล็อกไดอาแกรมและทรานเฟอร์ฟังก์ชันดังกล่าวนี้ ตอนท้ายของบทจะอธิบายถึงวิธีการออกแบบ และการสร้างตัวอินดักเตอร์ (Inductor) ซึ่งใช้ประกอบในวงจรกำลัง และวิธีออกแบบและการสร้างหม้อแปลงสัญญาณพัลส์ (Pulse Transformer) ซึ่งประกอบในวงจรกระตุ้นด้วย

3.2 วงจรกำลัง

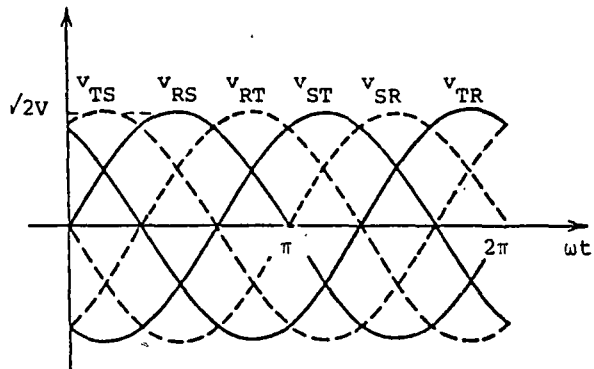
ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงวงจรกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งแผนผังวงจรนี้แสดงในรูปที่ 3.1 วงจรนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า วงจรตัวแปรสลับไฟฟ้าแบบควบคุมได้ชนิด 6 พัลส์ (Six-pulse Controlled Rectifier) [2] - [4] ซึ่งแสดงรูปสัญญาณที่ทางออก (Output) ในรูปที่ 3.1 (ค) เส้นประในรูปนี้จะแสดงการทำงานในกรณีเมื่อมุมกระตุ้น (α) ของ SCR แต่ละตัวลดลง ก่อนที่จะกล่าวถึงรายละเอียดของวงจรจะอธิบายถึงการทำงานของวงจรซึ่งทำให้เกิดศักดาไฟฟ้างดังในรูปที่ 3.1 (ค) เพื่อเป็นพื้นฐานในการทำความเข้าใจไว้ก่อน

การวิเคราะห์จะเริ่มต้นโดยกำหนดให้ L และ V_C ในวงจรมีค่าเป็นศูนย์ และสมมุติให้ SCR ทำงานเช่นเดียวกับไดโอด SCR ตัวใดจะทำงานก็จะขึ้นอยู่กับว่าที่เวลานั้น ศักดาไฟฟ้าสลับ v_{RS} , v_{ST} , v_{TR} ศักดาไฟฟ้าใดจะมีค่าสัมบูรณ์ (Absolute Value) มากที่สุด เช่น เมื่อ $\omega t = \pi/2$ v_{RS} จะมีค่าสัมบูรณ์มากที่สุด ดังนั้นที่เวลานี้ SCR ที่ทำงานคือ Q_1 , Q_6 เพื่อทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าที่ทางออกมีค่าสัมบูรณ์ของศักดาไฟฟ้านั้น กล่าวคือ

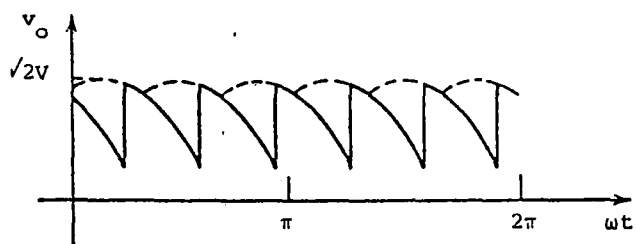
$$v_o = v_{RS} \quad | \quad \omega t = \pi/2 \quad (3.1)$$



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.1 (ก) แสดงแผนผังวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังแบบควบคุมได้เต็มชัณภูมิ 3 เฟส

(ข) แสดงรูปสัญญาณศักดาไฟฟ้าสลับ (ค) แสดงรูปสัญญาณที่ทางออก

และที่ $\omega t = 3\pi/2$ ค่าสัมบูรณ์ของ v_{RS} ก็จะมีค่ามากที่สุด ดังนั้น SCR ที่ทำงานคือ Q_3, Q_4 ทำให้เกิด ศักดาไฟฟ้าที่ทางออกคือ

$$v_o = -v_{RS} = v_{SR} \quad | \quad \omega t = 3\pi/2 \quad (3.2)$$

ดังนั้นสามารถพิจารณาจากข้อสรุปดังกล่าวและจากรูปที่ 3.1 ได้คือ ถ้าศักดาไฟฟ้า $v_{RS}, v_{ST}, v_{TR}, v_{SR}, v_{TS}, v_{RT}$ ศักดาไฟฟ้าใดมีค่ามากที่สุดเวลานั้น ศักดาไฟฟ้าที่ทางออก v_o จะมีค่าเท่ากับศักดาไฟฟ้าที่มีค่ามากที่สุด และจากรูปที่ 3.1 (ข). (ค) จะสังเกตได้ว่าช่วงเวลา (Interval) ซึ่งศักดาไฟฟ้านั้นปรากฏจะเป็น $\pi/3$ เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์จะแทนวงจรในรูปที่ 3.1 (ก) ด้วยวงจรสมมูล (Equivalent Circuit) ดังแสดงในรูปที่ 3.2

จากรูปที่ 3.2 ศักดาไฟฟ้าสลับในวงจรนี้จะมีความสัมพันธ์กับศักดาไฟฟ้าสลับของวงจรในรูปที่ 3.1 คือ

$$v_{AN} = v_{RS} = \sqrt{2}V\sin\omega t \quad (3.3)$$

$$v_{BN} = v_{RT} = \sqrt{2}V\sin(\omega t - \pi/3) \quad (3.4)$$

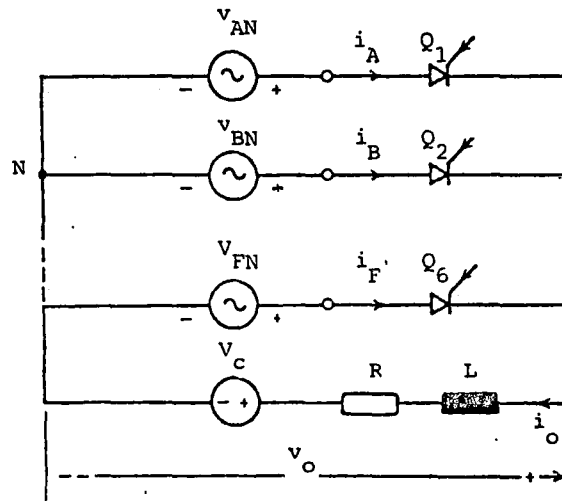
$$v_{CN} = v_{ST} = \sqrt{2}V\sin(\omega t - 2\pi/3) \quad (3.5)$$

$$v_{DN} = v_{SR} = \sqrt{2}V\sin(\omega t - \pi) \quad (3.6)$$

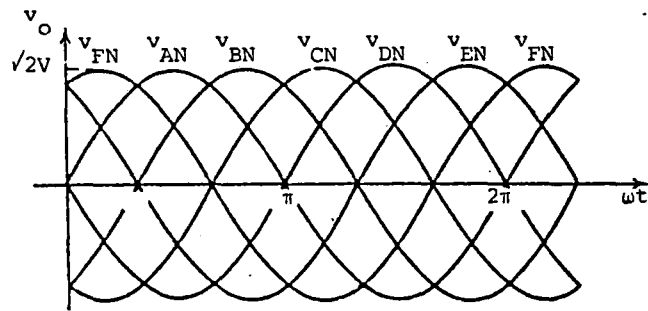
$$v_{EN} = v_{TR} = \sqrt{2}V\sin(\omega t - 4\pi/3) \quad (3.7)$$

$$v_{FN} = v_{TS} = \sqrt{2}V\sin(\omega t - 5\pi/3) \quad (3.8)$$

และในตารางที่ 3.1. จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการทำงานของ SCR ของวงจรในรูปที่ 3.1 กับวงจรในรูปที่ 3.2 คือ



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.2 (ก) แสดงวงจรสมมูลของวงจรในรูปที่ 3.1 (ก) (ข) แสดงรูปสัญญาณของศักดาไฟฟ้าสลับในรูปที่ 3.2 (ก)

ตารางที่ 3.1

ช่วงเวลา	วงจรในรูปที่ 3.1		วงจรในรูปที่ 3.2	
	v_o	SCR ที่ทำงาน	v_o	SCR ที่ทำงาน
$\pi/3 < \omega t < 2\pi/3$	v_{RS}	Q_6, Q_1	v_{AN}	Q_1
$2\pi/3 < \omega t < \pi$	v_{RT}	Q_1, Q_2	v_{BN}	Q_2
$\pi < \omega t < 4\pi/3$	v_{ST}	Q_2, Q_3	v_{CN}	Q_3
$4\pi/3 < \omega t < 5\pi/3$	v_{SR}	Q_3, Q_4	v_{DN}	Q_4
$5\pi/3 < \omega t < 2\pi$	v_{TR}	Q_4, Q_5	v_{EN}	Q_5
$2\pi < \omega t < 7\pi/3$	v_{TS}	Q_5, Q_6	v_{FN}	Q_6

ถ้า SCR Q_1 ในรูปที่ 3.2 ถูกกระตุ้นให้ทำงาน ซึ่งที่เวลานี้เป็นจุดเริ่มต้น ที่ศักดาไฟฟ้า v_{AN} จะมีค่าบวกสูงสุด SCR จะทำงานทันที และศักดาไฟฟ้าที่ทางออกจะเป็น

$$v_o = v_{AN} \quad (3.9)$$

ดังนั้นที่ $\omega t = \pi/3$ คือจุดซึ่งมุมกระตุ้นจะมีค่าต่ำสุด ซึ่งจะกำหนดให้เป็น

$$\alpha = 0 \quad (3.10)$$

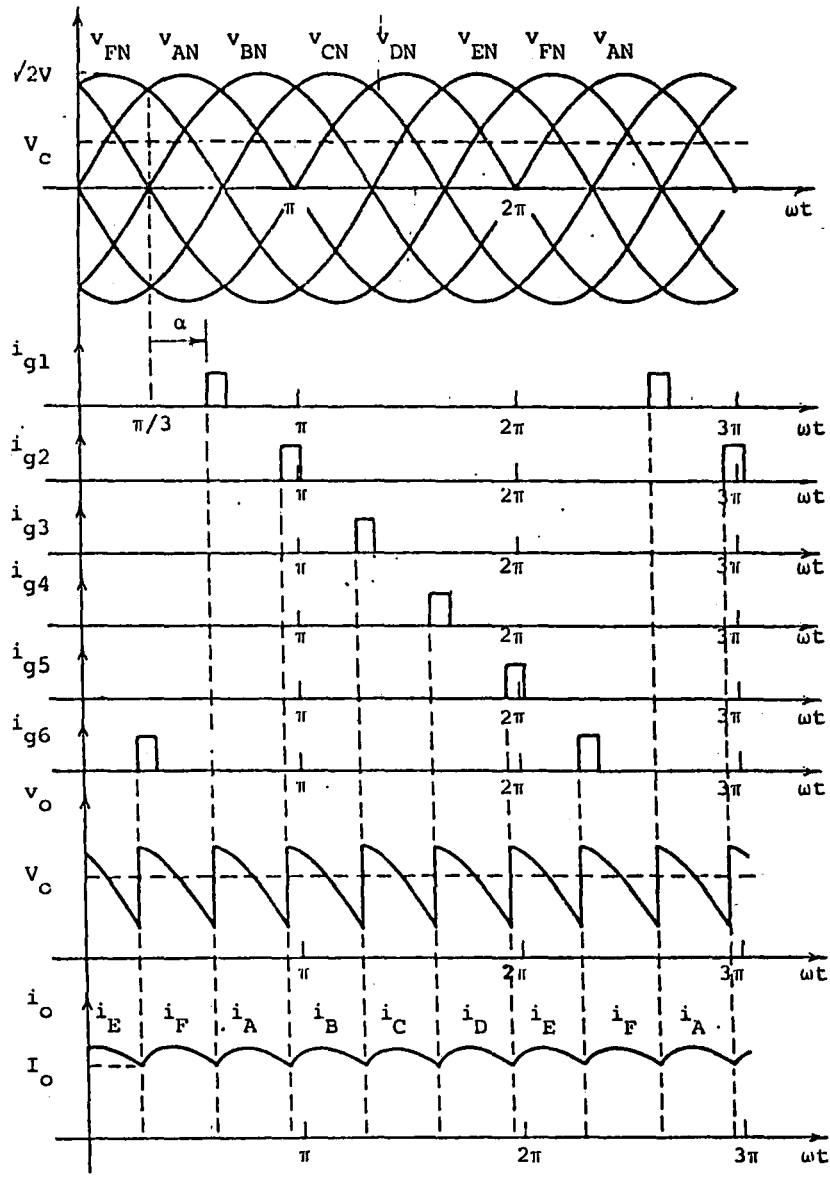
การทำงานของวงจรในรูปที่ 3.2 นี้จะแบ่งการทำงานได้เป็นสองแบบคือ การทำงานซึ่งทำให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าโหลดไหลอย่างต่อเนื่อง และการทำงานซึ่งทำให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าโหลดไหลไม่ต่อเนื่อง การทำงานทั้งสองแบบได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.3 (ก) สำหรับแบบแรก และแสดงในรูปที่ 3.3 (ข) สำหรับแบบหลัง เวลาจะเกิดกรณีแรกหรือจะเกิดกรณีหลัง สามารถวิเคราะห์ได้โดยพิจารณาสมการของกระแสไฟฟ้าโหลดที่ไหลไม่ต่อเนื่องในรูปที่ 3.3 (ข) ซึ่งสมการนี้คือ [2]

$$i_o = \frac{\sqrt{2}V}{Z} \left[\sin(\omega t - \phi) - \left(\frac{m}{\cos\phi} - \left(\frac{m}{\cos\phi} - \sin(\alpha - \phi) \right) e^{(\alpha - \omega t)/\tan\phi} \right) \right] \quad (3.11)$$

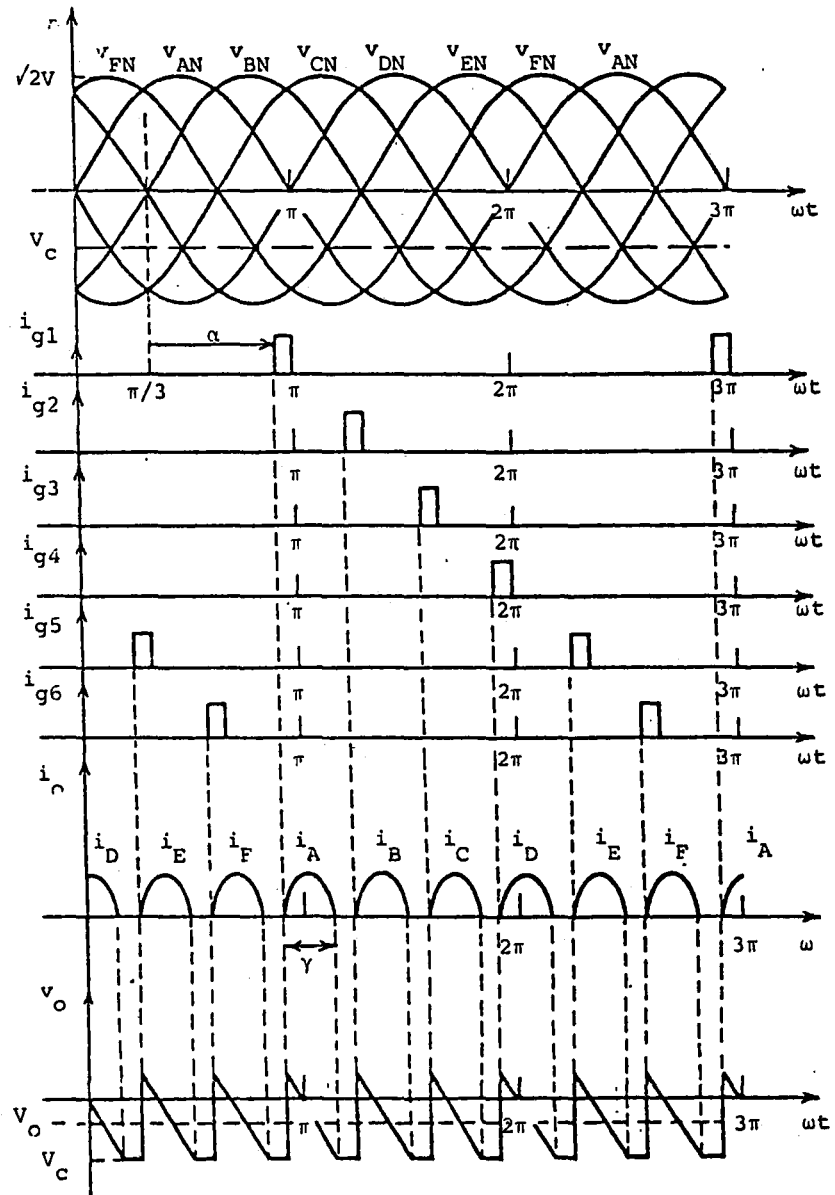
เมื่อ

$$\alpha < \omega t < \alpha + \gamma \quad (3.12)$$

$$\phi = \tan^{-1}(\omega L/R) \quad (3.13)$$



(n)



(ข)

รูปที่ 3.3 (ก) แสดงการทำงานของวงจรในรูปที่ 3.2 (ก) เมื่อกระแสไฟฟ้าโหลดไหลอย่างต่อเนื่อง (ข) เมื่อกระแสไฟฟ้าโหลดไหลไม่ต่อเนื่อง

$$Z = \{R^2 + (\omega L)^2\}^{1/2} \quad (3.14)$$

$$m = \frac{V_c}{\sqrt{2}V} \quad (3.15)$$

จากสมการ (3.11) สามารถแสดงย่านการทำงานของวงจรนี้ เมื่อโหลดและมุมกระตุ้นต่างกันดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ก) และรูปที่ 3.4 (ข) แสดงรายละเอียดของรูปที่ 3.4 (ก) เมื่อ $\phi = 90$ องศา กราฟในรูปที่ 3.4 ได้มาจากการคำนวณและเขียนกราฟโดยคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีแผนผังการคำนวณดังแสดงในรูปที่ 3.5

ย่านการทำงานของวงจรนี้จะแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ

3.2.1 ส่วน ก

เป็นย่านการทำงานซึ่งกระแสไฟฟ้าโหลดไหลไม่ต่อเนื่อง และ SCR จะทำงานต่อเมื่อ

$$\alpha = \omega t - \pi/3 = \sin^{-1} m \quad (3.16)$$

3.2.2 ส่วน ข

เป็นย่านการทำงานซึ่งกระแสไฟฟ้าโหลดไหลอย่างต่อเนื่อง และ SCR จะทำงานทันทีเมื่อถูกกระตุ้นแม้ว่า

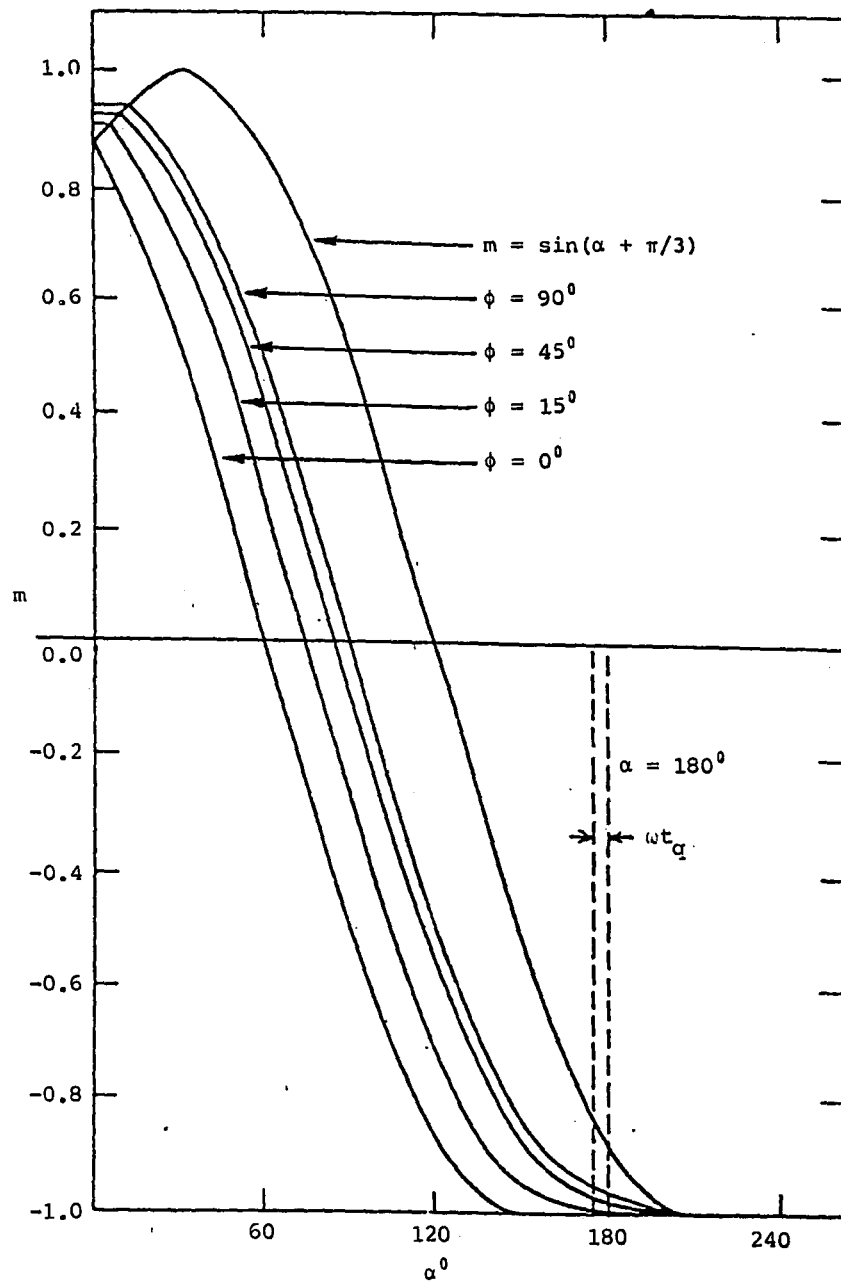
$$\alpha = \omega t - \pi/3 \leq \sin^{-1} m \quad (3.17)$$

3.2.3 ส่วน ค

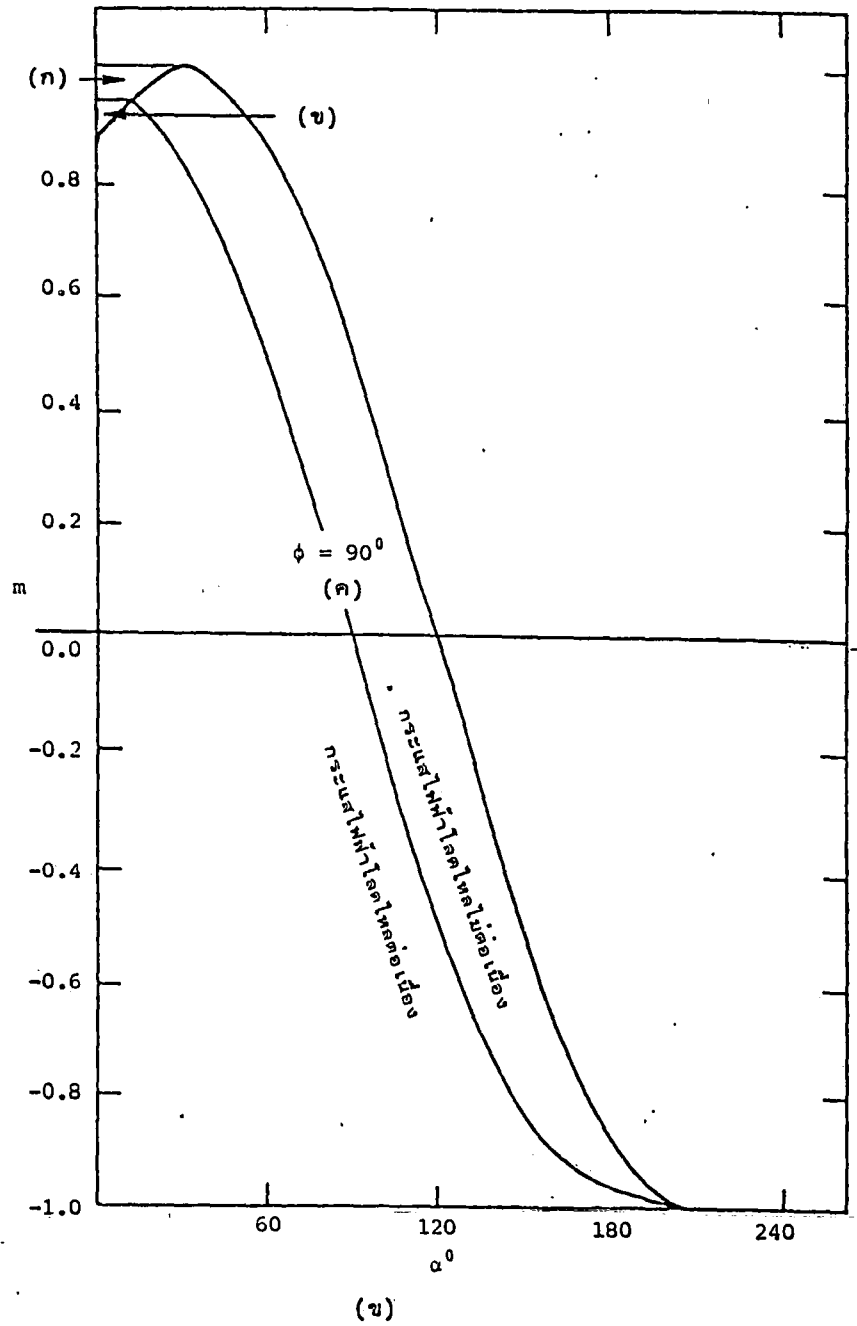
เป็นย่านการทำงานซึ่งทำงานได้ทั้งสองแบบ โดยแบ่งแยกด้วยเส้นกราฟค่า ϕ ของโหลด

ข้อควรระวังสำหรับวงจรชนิดนี้คือ ถ้าวางจรทำงานแบบกระแสไฟฟ้าโหลดไหลต่อเนื่องแล้ว และมุมกระตุ้นมีค่าตั้งแต่ 180 องศาขึ้นไป จะมีผลทำให้ SCR ซึ่งยังคงทำงานอยู่จะไม่หยุดทำงาน ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการลัดวงจรได้ ในทางปฏิบัติมุมกระตุ้นจะถูกจำกัดไม่ให้เกิน 165 องศา ทั้งนี้เพราะต้องให้เวลาสำหรับการหยุดทำงานของ SCR ด้วย

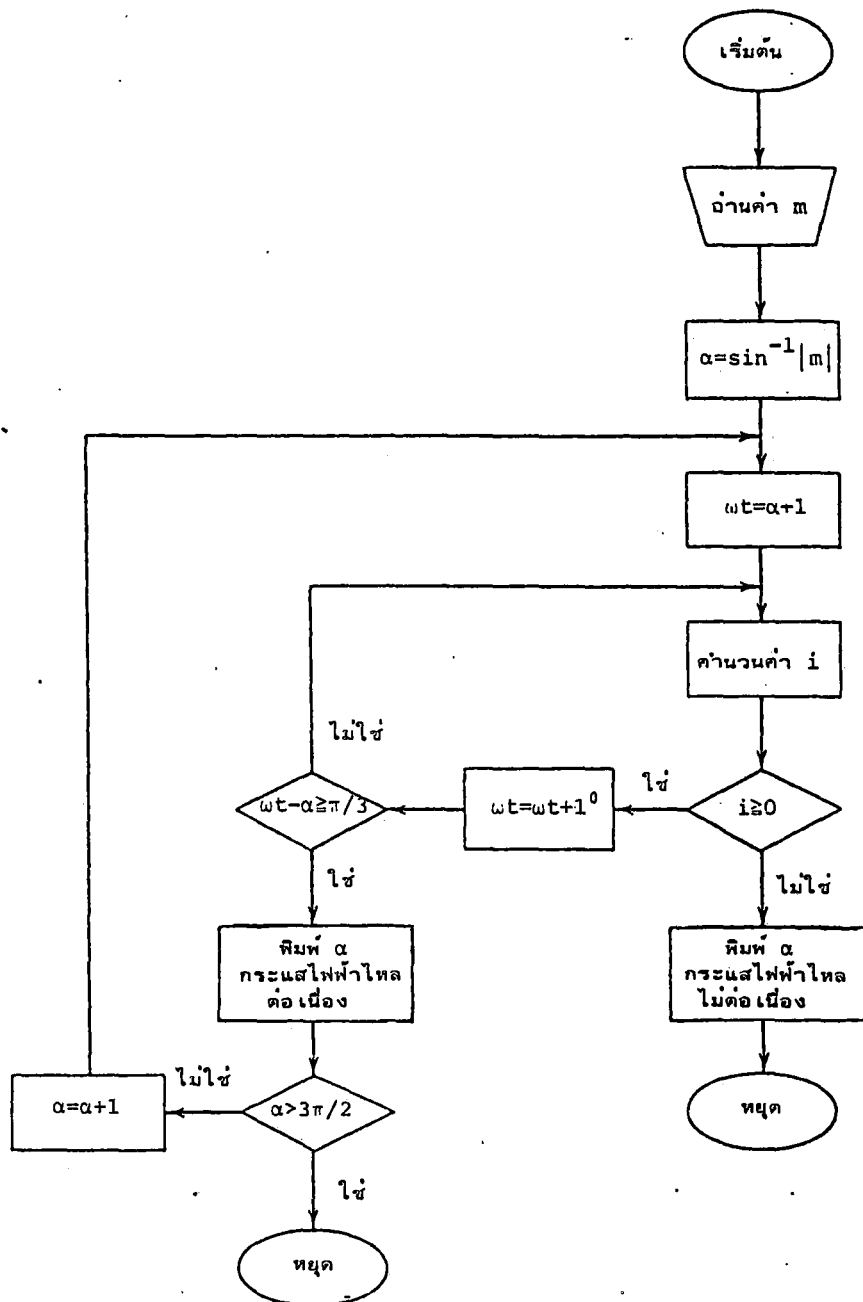
เมื่อนำวงจรนี้ไปขับมอเตอร์ การวิเคราะห์ก็จะเหมือนกับกรณีซึ่งได้อธิบายไปแล้ว ทั้งนี้เพราะวงจรอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ประกอบด้วย อินдукแตนซ์, ความต้านทาน และศักดาไฟฟ้าตรง ซึ่งจะแสดงโดยละเอียดในบทต่อไป แต่ในการขับมอเตอร์ กระแสไฟฟ้าตรงซึ่งไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์



(n)



รูปที่ ๓.๔ (ก) แสดงไดอแกรมการทำงานของวงจรรูปที่ ๓.๓ (ก) (ข)แสดง
ย่านการทำงานของวงจรในรูปที่ ๓.๓ (ก) เมื่อ $\phi = 90^\circ$ องศา



รูปที่ 3.5 แสดงแผนผังการทำงานของคอมพิวเตอร์เพื่อเขียนกราฟในรูปที่ 3.4 (ก)

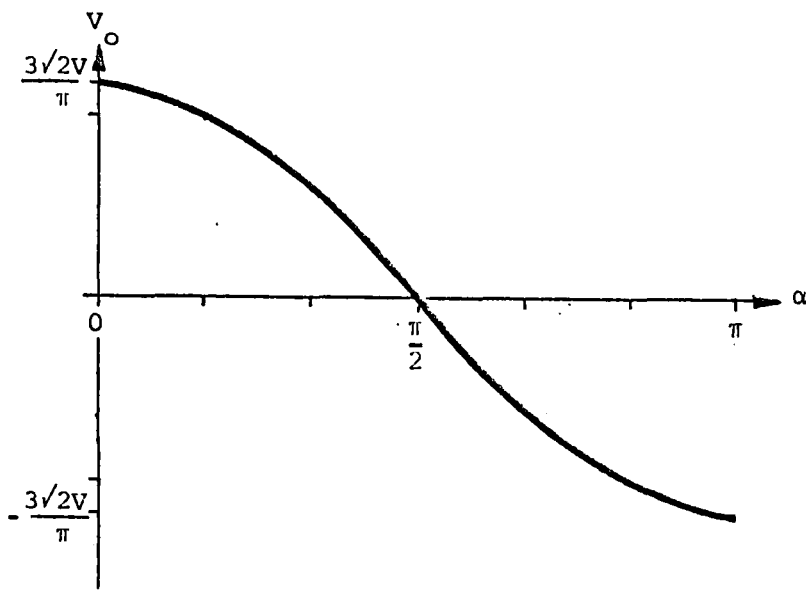
ต้องไหลอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นในกรณีนี้ศักดาไฟฟ้าตรงที่ทางออกของวงจรนี้ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.3

(ก) คือ [1].[2]

$$V_o = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha + (\pi/3)}^{\alpha + (2\pi/3)} \sqrt{2}V \sin \omega t (d\omega t) \quad (3.18)$$

$$V_o = \frac{3\sqrt{2}V}{\pi} \cos \alpha \quad (3.19)$$

ซึ่งสมการนี้สามารถแสดงความสัมพันธ์ด้วยกราฟดังในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกระตุ้นและศักดาไฟฟ้าตรงที่ทางออก

เนื่องจากระบบควบคุมความเร็วรอบที่สร้างขึ้น เป็นระบบควบคุมชนิดที่มีมอเตอร์หมุนทิศทางเดียว ดังนั้นศักดาไฟฟ้าตรงซึ่งถูกควบคุมที่วงจรอาร์มาเจอร์จึงมีค่าบวกเพียงอย่างเดียวเท่านั้น และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.6 แล้วพหุคูณของมุมกระตุ้นซึ่งทำให้ศักดาไฟฟ้าตรงนี้มีทิศทางบวกอย่างเดียวคือ ตั้งแต่ 0 องศา ถึง 90 องศา นอกจากนี้มีข้อสำคัญที่ต้องได้รับการพิจารณาคือ กระแสไฟฟ้าตรงซึ่งไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ต้องไหลอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เพราะทำให้การออกแบบวงจรควบคุมง่าย และสามารถใส่ SCR ขนาดเล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีซึ่งกระแสไฟฟ้าไหลไม่ต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.4 (ก) และ (ข) ถ้ามุมกระตุ้นมีพหุคูณดังกล่าวและต้องการให้กระแสไฟฟ้าไหลอย่างต่อเนื่อง ค่า ϕ ของโหลดต้องมีค่าใกล้เคียงกับ 90 องศา ดังนั้นเมื่อพิจารณาสมการที่ 3.13 ถ้าค่าทั้งสองทำให้ค่า ϕ ของโหลดมีค่าไม่ใกล้เคียงกับ 90 องศา จำเป็นต้องเพิ่มค่าอินดักแตนซ์ โดยสร้างอินดักเตอร์แล้วต่อเพิ่มเข้าไปในวงจร ซึ่ง

ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลต่อเนื่อง อินดักเตอร์ที่สร้างนี้เรียกว่า L_d และกำหนดให้ L_t เป็นผลรวมของอินดักเตอร์ L และ L_d . L_d มีชื่อเรียกว่าอินดักเตอร์สำหรับกรองกระแสไฟฟ้า (Smoothing Inductor) รูปที่ 3.7 (ก) แสดงช่วงเวลาการทำงานของ SCR แต่ละตัว เมื่อมุมกระตุ้นมีค่า 0 องศา และรูปที่ 3.7 (ข) จะแสดงสัญญาณกระตุ้นของ SCR แต่ละตัวให้ทำงาน แต่ในรูปนี้เป็นการแสดงสัญญาณกระตุ้นเมื่อวงจรนี้ทำงานแล้ว กล่าวคือ เช่นที่ $\omega t = \pi/3$ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ SCR Q_1 และ SCR Q_6 ต้องทำงาน เมื่อ SCR Q_1 ถูกกระตุ้น วงจรนี้จะสามารถทำงานต่อไปได้ ก็ต่อเมื่อ SCR Q_6 ต้องทำงานมาก่อนแล้วจึงแสดงในรูปที่ 3.7 (ก) ดังนั้นถ้าสัญญาณกระตุ้นเป็นดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ข) วงจรนี้จะไม่สามารถเริ่มต้นการทำงานได้ เพื่อที่จะให้วงจรนี้เริ่มต้นการทำงานได้สัญญาณกระตุ้นต้องเป็นดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ค) โดย SCR แต่ละตัวจะต้องได้รับสัญญาณกระตุ้นสองครั้งในหนึ่งคาบ สัญญาณกระตุ้นครั้งแรกจะเป็นสัญญาณกระตุ้นให้ SCR ตัวนั้นทำงาน ส่วนสัญญาณกระตุ้นครั้งที่สองจะเป็นสัญญาณกระตุ้นซึ่งจะช่วยให้วงจรเริ่มต้นทำงานได้ กล่าวคือ เช่นที่ $\omega t = \pi/3$ ถ้า SCR Q_1 ถูกกระตุ้นให้ทำงาน SCR Q_6 จะต้องได้รับสัญญาณกระตุ้นให้ทำงานด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ค)

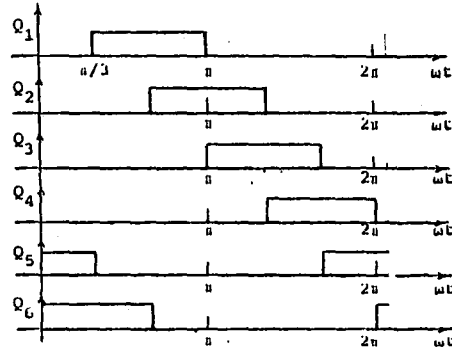
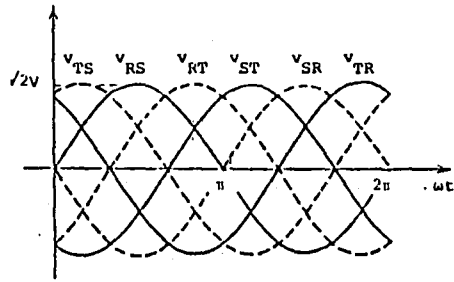
3.3 วงจรกระตุ้น

หัวข้อนี้จะอธิบายถึงการทำงานและการสร้างวงจรสร้างสัญญาณกระตุ้น ซึ่งสามารถให้สัญญาณกระตุ้นที่มีพิสัยและรูปสัญญาณตามต้องการ วงจรนี้ประกอบด้วยวงจรสามส่วนคือ

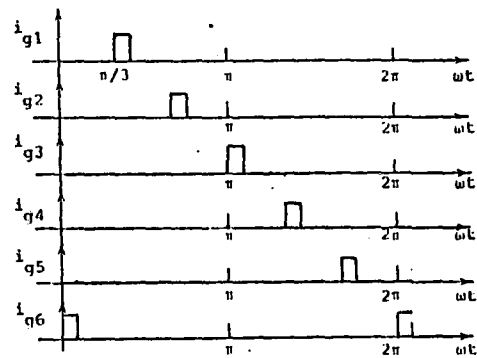
3.3.1 วงจรส่วนลดแรงดันคิกดาไฟฟ้าสลับและวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน

(Low-pass Filter)

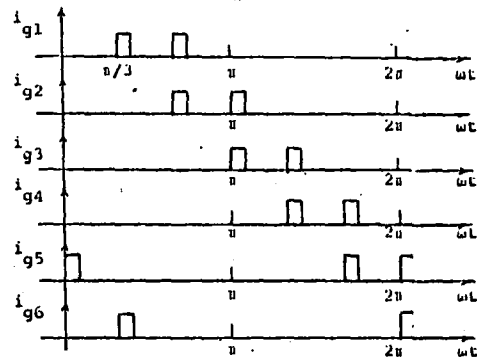
เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.7 จะสังเกตได้ว่า สัญญาณกระตุ้นและคิกดาไฟฟ้าสลับซึ่งจะถูกนำเข้าวงจรกำลังนั้น จะต้องกระทำให้มีพร้อมกันไป (Synchronize) ดังนั้นในวงจรกระตุ้นจะต้องมีส่วนซึ่งนำสัญญาณคิกดาไฟฟ้าสลับเข้าในวงจร เพื่อนำไปประกอบการสร้างเป็นสัญญาณกระตุ้นต่อไป แต่เนื่องจากคิกดาไฟฟ้าสลับนี้มีแรงดันสูง จึงจำเป็นต้องมีหม้อแปลงคิกดาไฟฟ้า (Voltage Transformer) เพื่อลดค่าคิกดาไฟฟ้าสลับนั้นก่อน จากนั้นจึงให้คิกดาไฟฟ้านี้ผ่านวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน เพื่อลดสัญญาณรบกวนซึ่งอาจจะเข้ามาด้วยกัน นอกจากนั้นวงจรนี้ยังมีหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ เลื่อนเฟสของสัญญาณที่ทางออกเพื่อให้มีค่าเฟสต่างจากเฟสของสัญญาณคิกดาไฟฟ้าสลับที่ขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding) ของหม้อแปลงคิกดาไฟฟ้า 60 องศา ซึ่งรูปที่ 3.8 (ก) แสดงแผนผังวงจรของส่วนนี้ และรูปที่ 3.8 (ข) แสดงสัญญาณที่ทางเข้า (Input) และทางออก สาเหตุซึ่งจะต้องมีการเลื่อน



(ก)



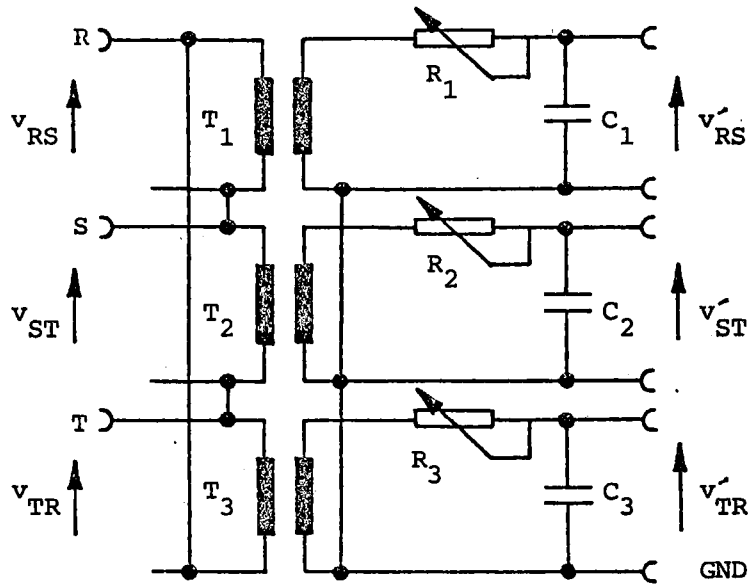
(ข)



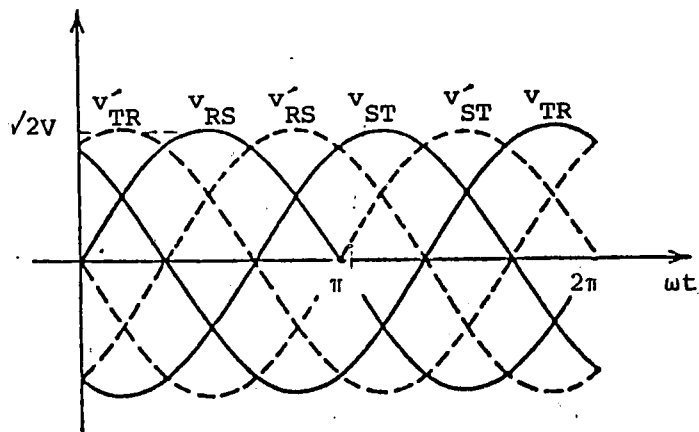
(ค)

รูปที่ 3.7 (ก) แสดงช่วงเวลาการทำงานของ SCR เมื่อมุมกระตุ้นเป็น 0 องศา
(ข) แสดงสัญญาณกระตุ้นเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.7 (ก) (ค) แสดง
สัญญาณกระตุ้นซึ่งใช้งานจริง

เฟสจะอธิบายในส่วนต่อไป ส่วนสาเหตุซึ่งใช้วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านชนิดนี้ เพราะว่า ในการเลื่อนเฟสและลดสัญญาณรบกวนนั้นวงจรนี้ก็สามารถใช้งานได้ดี ไม่จำเป็นต้องใช้วงจรซึ่งยุ่งยากให้สิ้นเปลือง



(ก)



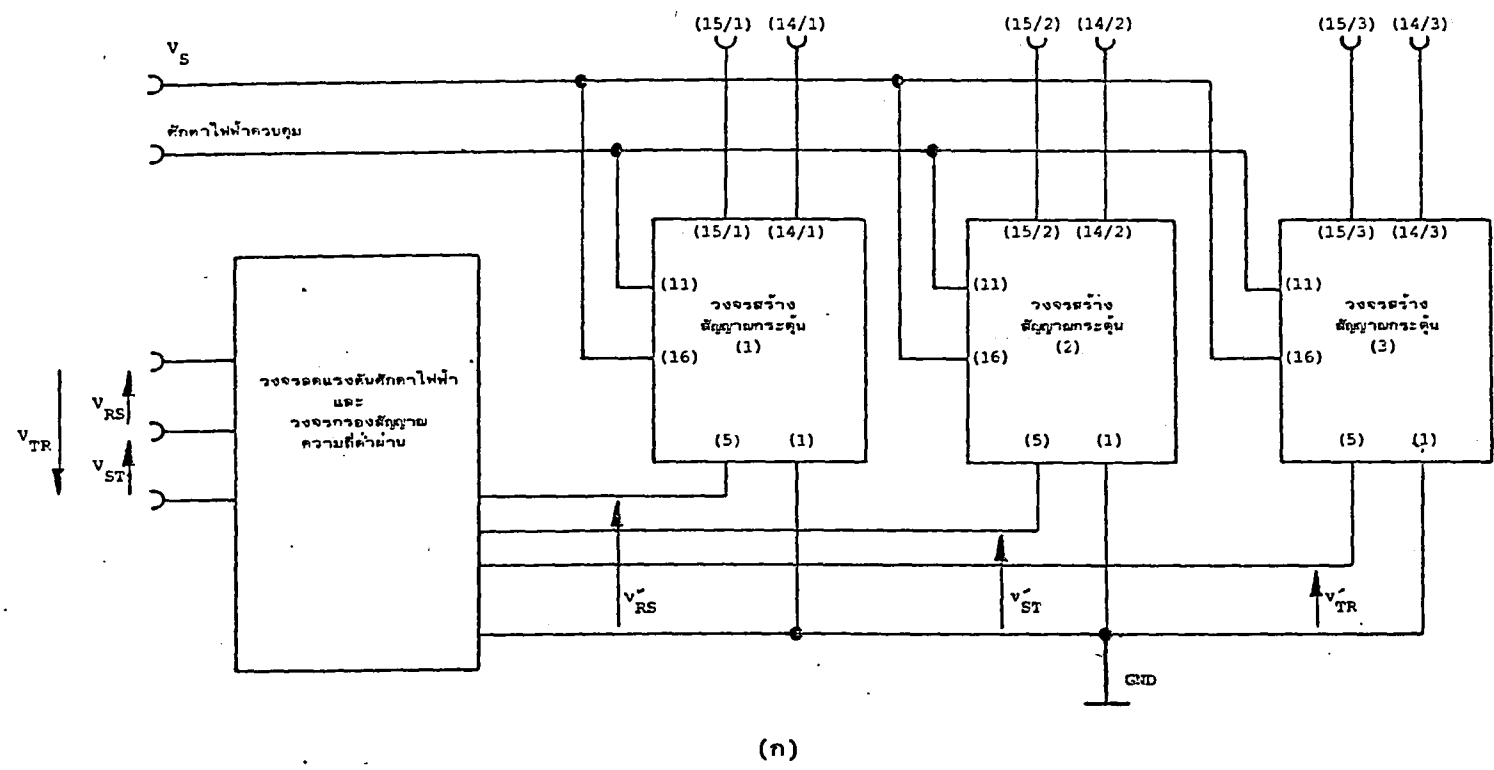
(ข)

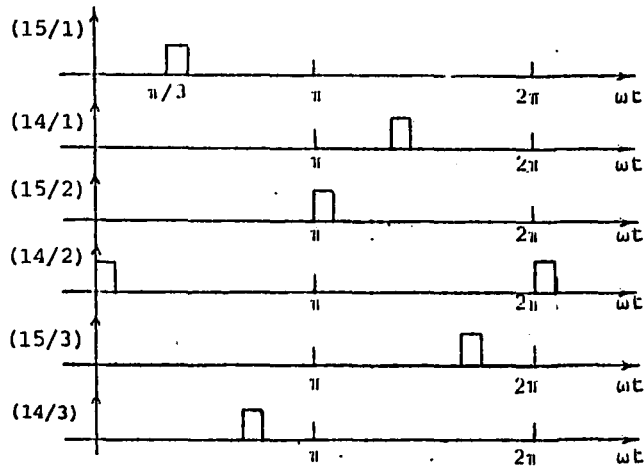
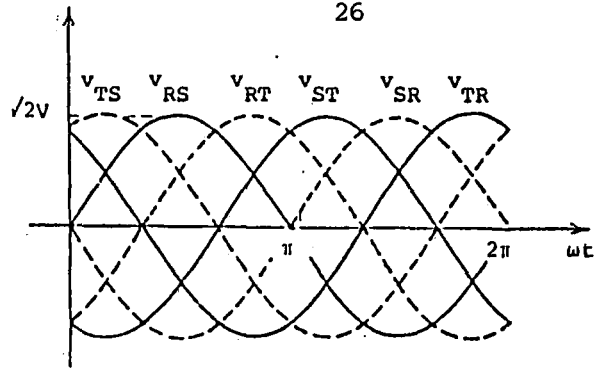
รูปที่ 3.8 (ก) แสดงแผนผังวงจรส่วนลดแรงดันคิกคาไฟฟ้าสลับ และวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน (ข) แสดงรูปสัญญาณที่ทางเข้า และทางออกของส่วนนี้

วงจรสร้างสัญญาณกระตุ้นดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ก) มีการทำงานดังนี้คือ สัญญาณสัปดาห์ไฟฟ้าสลับซึ่งได้จากวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านในส่วนแรก จะถูกป้อนเข้าที่ขา (5) ของ IC และ IC จะนำสัญญาณนี้มาสร้างเป็นสัญญาณแรมป์ (Ramp Signal) ซึ่งสัญญาณนี้จะแสดงออกมาที่ขา (10) ต่อมาสัญญาณนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับศักดาไฟฟ้าตรงที่ขา (11) ซึ่งศักดาไฟฟ้านี้จะถูกเรียกว่า ศักดาไฟฟ้าควบคุม จุดซึ่งศักดาไฟฟ้าควบคุมและสัญญาณแรมป์ตัดกันจะทำให้เกิดสัญญาณกระตุ้นออกมาที่ขา (15) และ (14) โดยที่ขา (15) นั้นสัญญาณกระตุ้นจะมีเฟสเดียวกับศักดาไฟฟ้าสลับที่ขา (5) แต่ที่ขา (14) จะเลื่อนเฟสไป 180 องศา ดังนั้นถ้าศักดาไฟฟ้าควบคุมเปลี่ยนแปลงไปมุมกระตุ้นก็เปลี่ยนแปลงไปด้วย ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้กำหนดความสูงของสัญญาณแรมป์เป็น 10 โวลต์ ดังนั้นเมื่อศักดาไฟฟ้าควบคุมมีพิสัย 0 โวลต์ ถึง 10 โวลต์ พิสัยของมุมกระตุ้นก็จะเป็น 0 องศา ถึง 180 องศา (การใช้งานโดยละเอียดของ IC เบอร์นี้ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก) รูปที่ 3.10 (ก) แสดงการนำวงจรสร้างสัญญาณกระตุ้นนี้สามชุดต่อร่วมกับ วงจรลดแรงดันศักดาไฟฟ้าสลับและวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน ส่วนในรูปที่ 3.10 (ข) แสดงสัญญาณกระตุ้นซึ่งออกจากขา (15) และ ขา (14) ของแต่ละชุดของวงจรสร้างสัญญาณกระตุ้นเมื่อมุมกระตุ้นมีค่า 0 องศา และรูปที่ 3.10 (ค) แสดงการลำดับของสัญญาณกระตุ้นในรูปที่ 3.10 (ข) ซึ่งจะถูกนำไปกระตุ้น SCR แต่ละตัวเมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 3.7 (ข) เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.10 แล้ว จะเข้าใจถึงเหตุผลซึ่งจำเป็นต้องมีวงจรเลื่อนเฟสในหัวข้อที่แล้ว คือ ที่มุมกระตุ้นเป็น 0 องศา สัญญาณกระตุ้นของ SCR Q_1 จะเลื่อนเฟสไปเมื่อเปรียบเทียบกับ V_{RS} เป็น 60 องศา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจรนี้เพื่อเลื่อนเฟสของศักดาไฟฟ้าสลับที่จะถูกนำไปเข้าวงจรสร้างสัญญาณกระตุ้นต่อไป

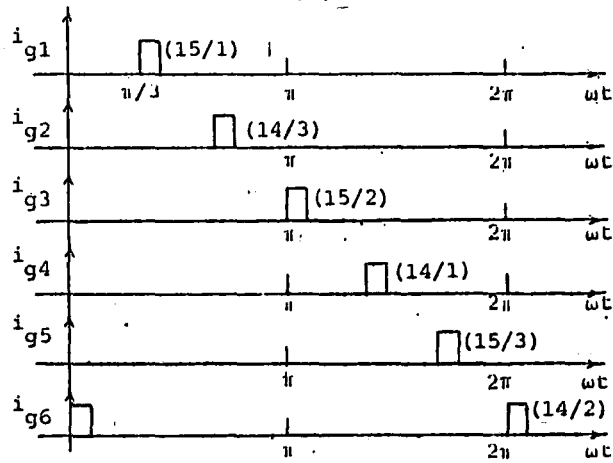
3.3.3 วงจรส่วนขยายสัญญาณกระตุ้น

ถ้าวงจรสร้างสัญญาณกระตุ้นและวงจรกำลังต่อกันโดยตรงแล้ว จะมีปัญหาในการวัดระบบกราวด์ และปัญหาเนื่องจากวงจรสร้างสัญญาณกระตุ้นอาจจะเสียหายได้เมื่อวงจรกำลังทำงานผิดพลาด ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงใช้วงจรในส่วนนี้ขยายสัญญาณกระตุ้น โดยส่งสัญญาณนี้ผ่านหม้อแปลงสัญญาณพัลส์ ซึ่งทำหน้าที่แยกระบบกราวด์ระหว่างวงจรกำลังกับวงจรสร้างสัญญาณกระตุ้น แล้วสัญญาณที่ผ่านหม้อแปลงนี้จะไปกระตุ้น SCR ต่อไป รูปที่ 3.11 (ก) แสดงแผนผังวงจรของส่วนขยายสัญญาณกระตุ้น เนื่องจากสัญญาณกระตุ้นซึ่งใช้กระตุ้นการทำงานของวงจรกำลังจะต้องมีรูปสัญญาณดังในรูปที่ 3.7 (ค) แต่สัญญาณกระตุ้นซึ่งได้จากวงจรสร้างสัญญาณกระตุ้นมีรูปสัญญาณดังในรูปที่ 3.10 (ค) ดังนั้นในวงจรขยายสัญญาณกระตุ้นจึงใช้ไดโอด D_1 และ D_2 ทำหน้าที่เป็นวงจรตรรก (Logic Circuit)





(ข)



(ค)

รูปที่ 3.10 (ก) แสดงแผนผังวงจร เมื่อนำส่วนวงจรลดแรงดันสวิตช์ไฟฟ้าสลับ และวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านมาต่อกับวงจรสร้างสัญญาณกระตุ้น 3 ชุด (ข) แสดงสัญญาณกระตุ้นซึ่งออกมาจากแต่ละชุดของวงจร (ค) แสดงลำดับของสัญญาณกระตุ้นซึ่งเรียงตามลำดับการกระตุ้น SCR

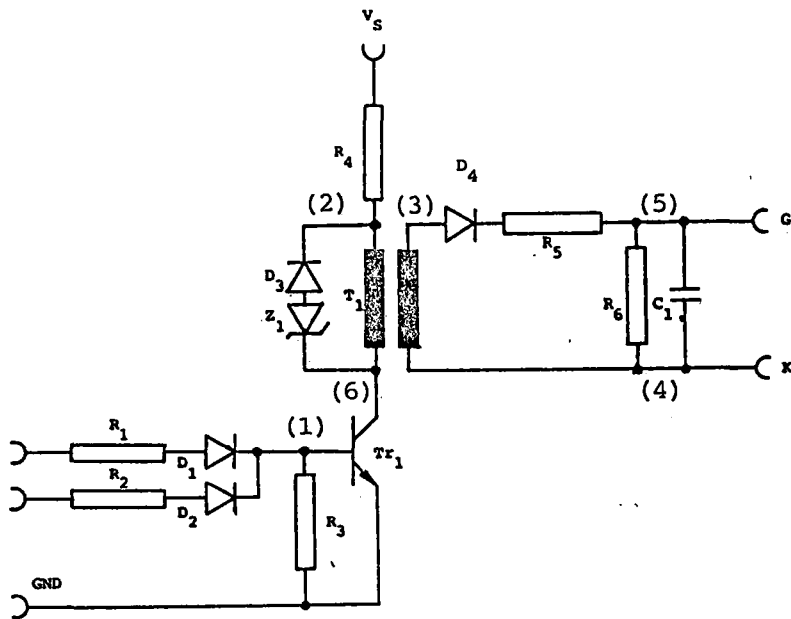
ทำหน้าที่ OR สัญญาณกระตุ้นสองชุดก่อนเพื่อให้ได้สัญญาณกระตุ้นซึ่งใช้งานจริง ตารางที่ 3.2 แสดงการ OR ของสัญญาณกระตุ้นก่อนจะเข้าวงจรขยายสัญญาณ ซึ่งแสดงรูปสัญญาณก่อนเข้าขา Base ของทรานซิสเตอร์ดังแสดงในรูป 3.11 (ข)

ตารางที่ 3.2

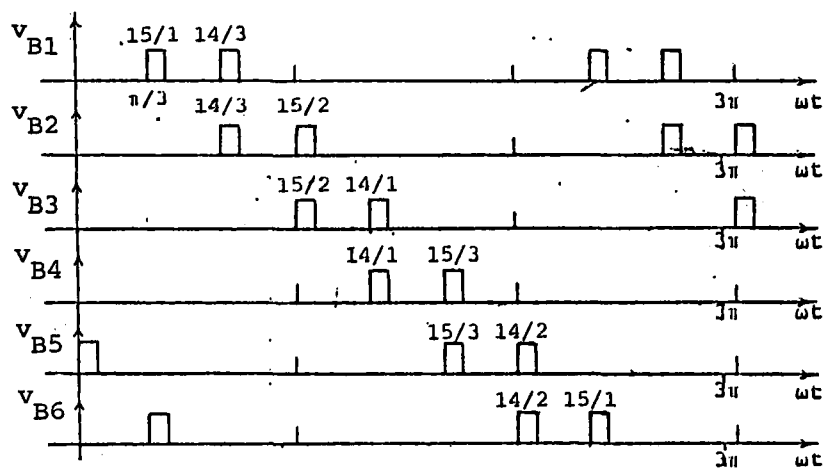
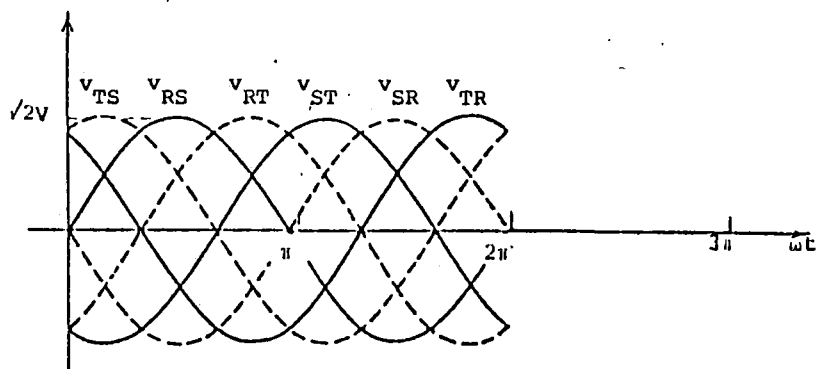
<u>SCR</u>	<u>สัญญาณซึ่งถูก OR ด้วยกัน</u>
Q_1	15/1 , 14/3
Q_2	14/3 , 15/2
Q_3	15/2 , 14/1
Q_4	14/1 , 15/3
Q_5	15/3 , 14/2
Q_6	14/2 , 15/1

หลังจากทรานซิสเตอร์ Q_1 ได้รับสัญญาณกระตุ้นดังแสดงในรูปที่ 3.11 (ข) แล้ว ก็ส่งสัญญาณผ่านหม้อแปลงสัญญาณพัลส์ โดยที่รูปสัญญาณที่จุดต่าง ๆ ของวงจรนี้จะแสดงในรูปที่ 3.12

รูปที่ 3.13 แสดงแผนผังวงจรโดยสมบูรณ์ของวงจรกระตุ้น ซึ่งประกอบด้วยวงจรส่วนลดแรงดันสวิตคาไฟฟ้า และวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน วงจรสร้างสัญญาณกระตุ้น และวงจรขยายสัญญาณกระตุ้น



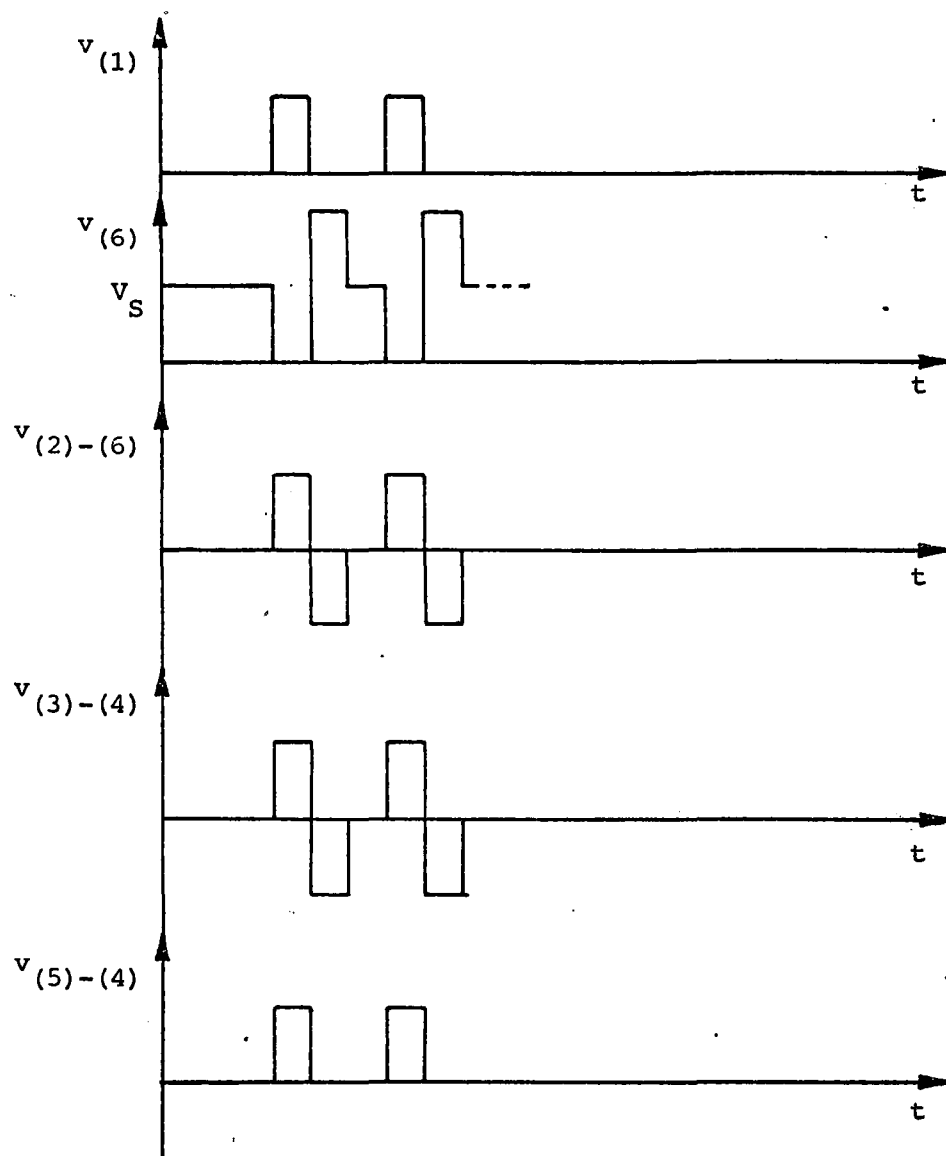
(n)



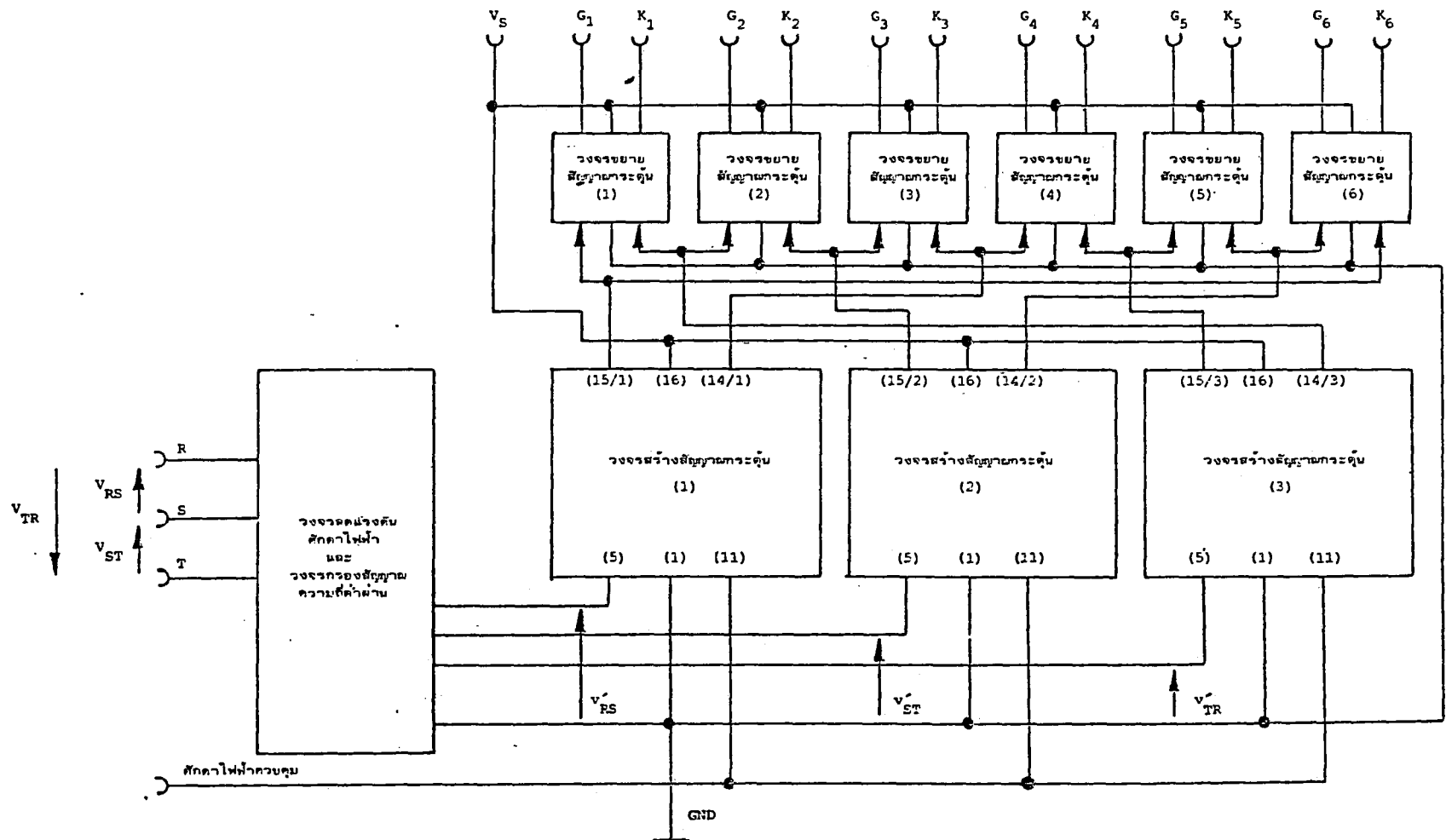
(ข)

รูปที่ 3.11 (n) แสดงแผนผังวงจรขยายสัญญาณกระตุ้น (ข) แสดงรูปสัญญาณ

ที่ขา Base ของทรานซิสเตอร์แต่ละตัวที่มุมกระตุ้น 0 องศา



รูปที่ 3.12 แสดงรูปสัญญาณที่จุดต่าง ๆ ของแผนผังวงจรในรูปที่ 3.11 (ก)



รูปที่ 3.13 แสดงแผนผังวงจรทั้งหมดของวงจรกระตุ้น

3.4 ทราานเฟอรฟังก์ชันและบล็อกไดอาแกรมของวงจรรี เล็คตรอนิกส์กำลัง

ก่อนที่จะออกแบบระบบควบคุมจำเป็นต้องทราบทราานเฟอรฟังก์ชันของวงจรรี เล็คตรอนิกส์กำลัง ดังนั้นในหัวข้อนี้จะอธิบายถึงวิธีหาทราานเฟอรฟังก์ชันนี้โดยพิจารณาคือ

วงจรรี เล็คตรอนิกส์กำลัง เมื่อถูกกระตุ้นให้ทำงานแล้ว จะไม่สามารถควบคุมการทำงานได้จนกระทั่งถึงเวลาที่จะถูกกระตุ้นครั้งต่อไปจึงจะควบคุมได้ ดังนั้นวงจรรี เล็คตรอนิกส์กำลังจึงมีคุณสมบัติที่เรียกว่าเป็น อุปกรณ์เดทไทม์ (Dead Time Component) ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้มีสมการแสดงความสัมพันธ์คือ

$$v_o(t) = v_c(t)A_{S1}(t - T_t) \quad (3.20)$$

T_t เรียกว่าเวลาเดทไทม์ ซึ่งค่ามากที่สุดของวงจรรี เล็คตรอนิกส์กำลังชนิดนี้คือ

$$T_t = \frac{\text{คาบเวลาของสัญญาณความถี่ไฟฟ้าสลับที่ใช้}}{\text{จำนวนพัลส์ของกระแสไฟฟ้าในหนึ่งลูกคลื่นของศักดาไฟฟ้าสลับที่ใช้}} \quad (3.21)$$

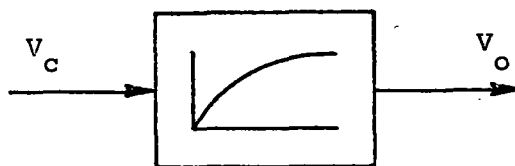
เนื่องจาก T_t มีค่าน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเวลาคงที่ (Time Constant) ของอุปกรณ์อื่น ๆ ในระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ ดังนั้นจึงสามารถแทนคุณสมบัติของวงจรรี เล็คตรอนิกส์กำลังได้ด้วยอุปกรณ์หน่วงเวลาอันดับหนึ่ง (First Order Delay Element) ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้าตรงที่เข้าของวงจรรี เล็คตรอนิกส์กำลังกับศักดาไฟฟ้าควบคุมชนิดเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด (Step Controlled Voltage) คือ

$$v_o(t) = V_c A_{S1} (1 - e^{-t/T_t}) \quad (3.22)$$

หรือ เขียนแทนด้วยทราานเฟอรฟังก์ชันได้เป็น

$$\frac{V_o(s)}{V_c(s)} = \frac{A_{S1}}{(1 + sT_t)} \quad (3.23)$$

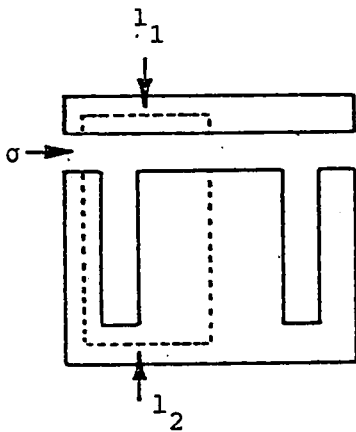
และสามารถแสดงบล็อกไดอาแกรมได้ดังรูปที่ 3.14



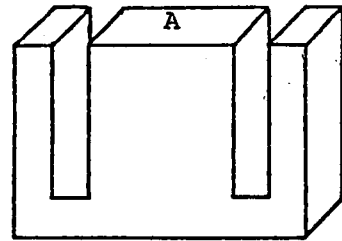
รูปที่ 3.14 แสดงบล็อกไดอาแกรมของวงจรรี เล็คตรอนิกส์กำลัง

3.5 การออกแบบและการสร้างตัวอินดักเตอร์

อินดักแตนซ์ที่สร้างขึ้นจะใช้แกนเหล็กชนิด EI ซึ่งใช้สำหรับพันหม้อแปลงศักดาไฟฟ้า การออกแบบพิจารณาจากรูปการวางแกนเหล็ก EI ดังแสดงในรูปที่ 3.15 (ก) โดยเริ่มต้นจากสมการของค่าอินดักแตนซ์คือ



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.15 (ก) แสดงการวางของแกนเหล็ก EI ของตัวอินดักเตอร์ (ข) แสดงการกำหนดพื้นที่ A ของอินดักเตอร์

$$L = W \frac{d\phi}{di} \quad (3.24)$$

สมการปริมาณสนามแม่เหล็กภายในแกนเหล็กคือ

$$\phi = AB \quad (3.25)$$

โดยที่ A เป็นพื้นที่ดังแสดงในรูป 3.15 (ข) สมการ (3.24) และ (3.25) สามารถจัดใหม่ได้คือ

$$L = WA \frac{dB}{di} \quad (3.26)$$

และ

$$L = W^2 A \frac{dB}{dWi} \quad (3.27)$$

และ

$$L = W^2 A \frac{dB}{d\theta} \quad (3.28)$$

เมื่อ θ เป็น mmf ของวงจรแม่เหล็ก ซึ่งมีค่าเป็น

$$\theta = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 \sigma + H_3 \sigma = W i \quad (3.29)$$

จาก

$$B = \mu_o \mu_r H \quad (3.30)$$

สมการ (3.29) และ (3.30) สามารถจัดใหม่ได้เป็น

$$\theta = \frac{B_1 l_1}{\mu_o \mu_{r1}} + \frac{B_2 l_2}{\mu_o \mu_{r2}} + \frac{2\sigma B_3}{\mu_o} \quad (3.31)$$

สมมติให้ $B_1 \cong B_2 \cong B_3 \cong B$, $\mu_{r1} \gg \mu_o$, $\mu_{r2} \gg \mu_o$ ดังนั้นสมการ (3.31) สามารถจัดใหม่คือ

$$\theta \cong \frac{2\sigma B}{\mu_o} \quad (3.32)$$

สมการ (3.28) และ (3.32) สามารถนำมาจัดได้ใหม่จะได้สมการโดยประมาณของค่าอินดักแตนซ์คือ

$$L \cong \frac{W^2 A \mu_o}{2\sigma} \quad (3.33)$$

สมการ (3.33) จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบอินดักเตอร์ แต่ในการออกแบบจริงจะต้องพิจารณาระยะห่างของแกน EI (Air Gap) ต่ำสุดซึ่งจะทำให้อินดักเตอร์อิ่มตัว (Saturation) การพิจารณาเริ่มต้นโดยสมมติให้ mmf ที่เกิดขึ้นบนวงจรแม่เหล็กจะปรากฏบนระยะห่างของแกน EI และปริมาณสนามแม่เหล็กสูงสุด (B_{max}) จะเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลสูงสุด (I_{max}) ซึ่งจะได้สมการของ mmf คือ

$$W i_{max} = H_{max} 2\sigma \quad (3.34)$$

และ

$$B_{max} = \mu_o H_{max} \quad (3.35)$$

สมการ (3.34) และ (3.35) สามารถจัดใหม่ได้เป็น

$$\sigma_{min} \geq \frac{W i_{max} \mu_o}{2 B_{max}} \quad (3.36)$$

สมการ (3.36) แสดงค่าระยะห่างต่ำสุดของแกน EI

ดังนั้นสามารถสรุปวิธีการออกแบบอินดักเตอร์ได้คือ

- 3.5.1 ต้องทราบค่าอินดักแตนซ์ที่ต้องการและกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่จะใช้
- 3.5.2 เลือกแกนเหล็ก EI ซึ่งทราบค่า B_{max} , W
- 3.5.3 หาค่าระยะห่างของแกน EI ต่ำสุด (σ_{min}) จากสมการ (3.36)
- 3.5.4 นำค่าจาก 3.5.2 และ 3.5.3 ไปคำนวณค่าอินดักแตนซ์สูงสุดซึ่งไม่ทำให้

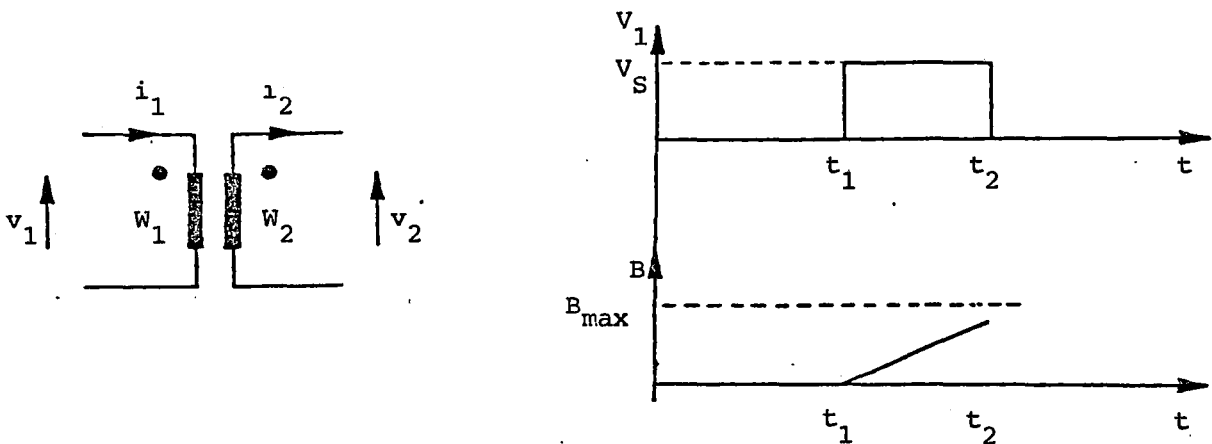
แกนหลักอ้อมตัวดังในสมการ (3.33)

3.5.5 ถ้าค่าอินดักแตนซ์ที่ได้มากเกินไป ก็ปรับแต่งค่าอินดักแตนซ์โดยการเพิ่มค่าระยะห่างของแกน EI

3.5.6 ถ้าค่าอินดักแตนซ์ที่ได้น้อยไป ก็ปรับแต่งค่าอินดักแตนซ์โดยการเพิ่มค่า A หรือ W

3.6 การออกแบบและการสร้างหม้อแปลงสัญญาณกระตุ้น

หม้อแปลงสัญญาณกระตุ้นที่สร้างขึ้นจะมีลักษณะเดียวกับหม้อแปลงศักดาไฟฟ้าธรรมดา ดังแสดงในรูปที่ 3.16 (ก) การคำนวณเริ่มต้นจากเงื่อนไขดังนี้คือ



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.16 (ก) แสดงแผนผังหม้อแปลงสัญญาณกระตุ้น (ข) แสดงรูปสัญญาณของสัญญาณกระตุ้น และ รูปสัญญาณของค่าความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก

ขดลวด W_1 ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมาก่อน และ t_1 เป็นเวลานาน ดังนั้นความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กภายในแกนหม้อแปลงจะเป็น

$$B = 0 \mid i_1 = 0, i_2 = 0, v_1 = 0, v_2 = 0 \quad (3.37)$$

และถ้าค่ากระแสไฟฟ้าแมกนีไทซิงค์ (Magnetising Current) มีค่าดังนี้คือ

$$i_\mu \ll i_1, i_2 \quad (3.38)$$

สามารถอนุมานได้ว่า

$$i_\mu \approx 0 \quad (3.39)$$

เมื่อทรานซิสเตอร์ในวงจรขยายสัญญาณกระตุ้นทำงาน ศักดาไฟฟ้าที่ขดลวด W_1 จะเป็น

$$v_1 = v_s \mid t_1 \leq t \leq t_2 \quad (3.40)$$

ถ้ากำหนดให้ความต้านทานภายในของขดลวดมีค่าน้อยมาก

$$v_1 = v_s = w_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (3.41)$$

$$v_1 = w_1 A \frac{dB}{dt} \quad (3.42)$$

ค่า A สามารถวัดได้เช่นเดียวกับในรูปที่ 3.15 (ข)

จากสมการ (3.42) จะได้สมการใหม่คือ

$$B = B_0 + \frac{v_s}{w_1 A} (t_2 - t_1) \quad (3.43)$$

ถ้า B_0 ในสมการ (3.43) สามารถทำให้หมดไปโดยการทำให้แกนลดสภาพการเป็นแม่เหล็ก

(Demagnetizing) ซึ่งได้มีการกระทำเช่นนี้อยู่แล้วในวงจรขยายสัญญาณกระตุ้น ดังนั้นสมการ (3.43)

สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$B = \frac{v_s}{w_1 A} \Delta t \mid \Delta t = t_2 - t_1 \quad (3.44)$$

และสมการของจำนวนขดลวดทางปฐมภูมิ (Primary Winding) คือ

$$w_1 = \frac{v_s}{BA} \Delta t \quad (3.45)$$

ข้อสำคัญอย่างหนึ่งซึ่งต้องพิจารณาคือ เมื่อพิจารณาอุปสรรคของสมการ (3.45) ดังในรูปที่ 3.15 (ข) ค่า B ของสมการนี้จะต้องไม่เกินค่า B สูงสุด ($B_{\max}$) มิฉะนั้นจะทำให้แกนของหม้อแปลงอิ่มตัว ดังนั้น สมการการคำนวณจำนวนขดลวดทางปฐมภูมิคือ

$$W_1 \geq \frac{V_S \Delta t}{B_{\max} A} \quad (3.46)$$

สมการจำนวนขดลวดทางทุติยภูมิคือ

$$W_2 = \frac{v_2}{v_1} W_1 \quad (3.47)$$

3.7 บทสรุป

ในบทนี้ได้อธิบายถึง แผนผังวงจร และการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งใช้ขับมอเตอร์ โดยแยกอธิบายเป็นสองส่วนคือส่วนวงจรกำลัง และส่วนวงจรกระตุ้น นอกจากนี้ได้อธิบายถึงทรานเฟอร์ฟังก์ชันของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งใช้ในการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบ และตัวแปรของทรานเฟอร์ฟังก์ชันนั้น ตอนท้ายจะอธิบายถึงการออกแบบและสร้างอินดัคเตอร์ และหม้อแปลงสัญญาณกระตุ้นซึ่งใช้ในวงจรกำลังและวงจรกระตุ้นตามลำดับ เมื่อนำวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังนี้ไปขับมอเตอร์ การวิเคราะห์ก็เหมือนเช่นเดิม ทั้งนี้เพราะโหลดในบทนี้ก็คือ วงจรภายในของอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์นั่นเอง กล่าวคือ R ก็คือ R_a ของมอเตอร์ L ก็คือ L_a ของมอเตอร์ และ V_c ก็คือ e_a ของมอเตอร์ ดังนั้นในบทต่อไปนี้จะอธิบายและวิเคราะห์คุณสมบัติของมอเตอร์เพื่อทำความเข้าใจก่อนการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบต่อไป

บทที่ 4

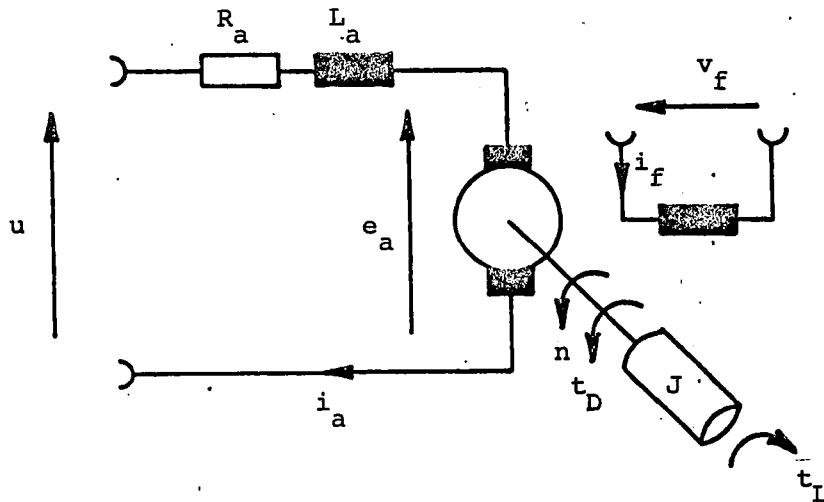
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก

(Separately Excited DC Motor)

4.1 บทนำ

ในการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์นั้น ถึงแม้ว่าจะไม่จำเป็นต้องศึกษาถึงการออกแบบและการสร้างตัวมอเตอร์โดยละเอียด แต่ก็ยังคงจำเป็นต้องศึกษาถึงคุณสมบัติที่สำคัญบางอย่างของมอเตอร์ เพื่อประกอบในการออกแบบระบบควบคุมต่อไป ดังนั้นในบทนี้จะอธิบายถึงคุณสมบัติเหล่านี้ซึ่งได้แก่ สมการความเร็วรอบของมอเตอร์ซึ่งจากสมการนี้จะสามารถอธิบายถึงวิธีปรับความเร็วรอบมอเตอร์ นอกจากสมการนี้แล้วก็จะอธิบายถึงสาเหตุซึ่งทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เปลี่ยนไป และตอนต่อมาของบทนี้จะอธิบายถึงทรานเฟอร์ฟังก์ชัน และบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ ซึ่งจะถูกนำไปใช้ประกอบในการออกแบบระบบควบคุม

4.2 สมการความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก



รูปที่ 4.1 แสดงไดอะแกรมอย่างง่ายของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก

วงจรอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จะประกอบด้วย e_a เป็นศักดาไฟฟ้าย้อนกลับ (Back emf), R_a เป็นความต้านทานของวงจรอาร์มาเจอร์ และ L_a เป็นค่าอินดักแตนซ์ของวงจรอาร์มาเจอร์เช่นกัน จากไดอะแกรมและคุณสมบัติของมอเตอร์สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ได้ดังนี้ [1], [2]

สมการของศักดาไฟฟ้าย้อนกลับคือ

$$e_a = K_1 \phi n \quad (4.1)$$

สมการกำลังบิดของมอเตอร์คือ

$$t_D = K_2 \phi i_a \quad (4.2)$$

และสมการของวงจรอาร์มาเจอร์คือ

$$u = i_a R_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (4.3)$$

สมการ (4.1), (4.2), (4.3) สามารถแสดงในกรณีของค่าเฉลี่ยได้คือ

สมการค่าเฉลี่ยของศักดาไฟฟ้าย้อนกลับคือ

$$E_a = K_1 \phi N \quad (4.4)$$

สมการค่าเฉลี่ยของกำลังบิดคือ

$$T_D = K_2 \phi I_a \quad (4.5)$$

และสมการในเทอมเฉลี่ยของวงจรอาร์มาเจอร์คือ

$$U = R_a I_a + E_a \quad (4.6)$$

จากสมการ (4.4) และ (4.6) สามารถนำมาจัดใหม่ได้เป็นสมการของความเร็รรอบคือ

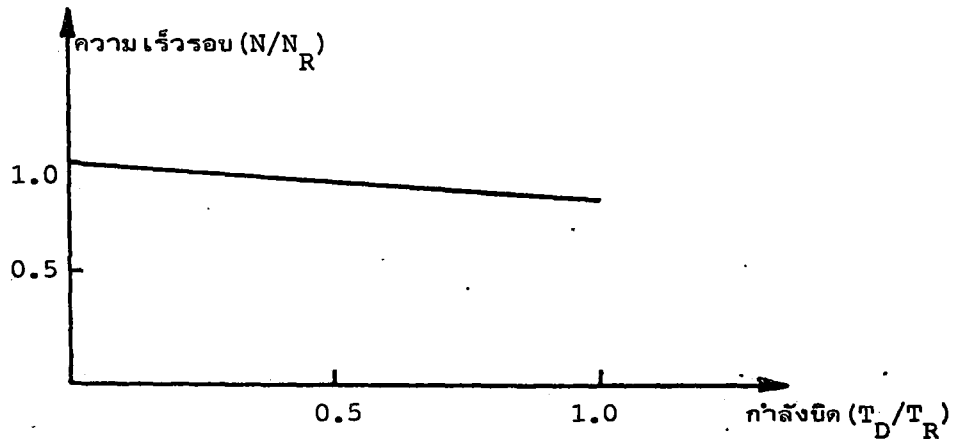
$$N = \frac{U - I_a R_a}{K_1 \phi} \quad (4.7)$$

เมื่อพิจารณาสมการ (4.5) สังเกตได้ว่ากำลังบิดของมอเตอร์ และกระแสไฟฟ้าไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์จะแปรผันตรงต่อกัน ดังนั้นถ้ากำลังบิดของมอเตอร์มีขนาดคงที่ ก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์มีปริมาณคงที่ด้วย นั่นคือเมื่อพิจารณาสมการ (4.7) ถ้ากำลังบิดและปริมาณสนามแม่เหล็กภายในมอเตอร์มีปริมาณคงที่แล้ว ความเร็รรอบของมอเตอร์จะถูกควบคุมด้วยศักดาไฟฟ้าที่ขั้วของวงจรอาร์มาเจอร์ ซึ่งจากคุณสมบัติข้อนี้เองจึงทำให้เกิดวิธีควบคุมความเร็รรอบมอเตอร์ชนิดนี้ โดยควบคุมศักดาไฟฟ้าขั้วของวงจรอาร์มาเจอร์

4.3 สาเหตุซึ่งทำให้ความเร็รรอบของมอเตอร์เปลี่ยนไป

เมื่อพิจารณาสมการ (4.7) จะสังเกตได้ว่าศักดาไฟฟ้าตรงที่ขั้วของอาร์มาเจอร์ (U) ในสมการนี้มีปริมาณคงที่ และกำลังบิดของมอเตอร์เปลี่ยนแปลง (I_a เปลี่ยนแปลง) จะมีผลทำให้ความเร็ว-

รอบ ในสมการนี้เปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งความสัมพันธ์ของความเร็วรอบกับกำลังบิดของมอเตอร์ในกรณีนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วรอบ และกำลังบิดเมื่อศักดาไฟฟ้าตรงที่
 ขั้วของอาร์มาเจอร์มีค่าคงที่ N/N_R เป็นความเร็วรอบต่อหนึ่งหน่วย
 (Per Unit) และ N_R เป็นความเร็วรอบที่ติด T_D/T_R เป็นกำลังบิด
 ต่อหนึ่งหน่วย และ T_R เป็นกำลังบิดที่ติด

จากรูปที่ 4.2 สามารถสรุปได้ว่า สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก เมื่อ
 ศักดาไฟฟ้าที่ขั้วอาร์มาเจอร์มีปริมาณคงที่แล้ว ถ้าโหลดของมอเตอร์เพิ่มขึ้นก็จะทำให้ความเร็วรอบลดลง
 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบควบคุมเพื่อควบคุมมอเตอร์ไม่ให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เปลี่ยนแปลง

4.4 ทราานเฟอ์ฟังก์ชันและบล็อกไดอาแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก

จากไดอาแกรมของมอเตอร์ในรูปที่ 4.1 จะได้สมการกำลังบิดคือ

$$t_D = T_L + J \frac{d\omega}{dt} \quad (4.8)$$

สมการ (4.1), (4.2), (4.3), และ (4.8) สามารถเขียนใหม่ในโดเมนของลาปลาซ (Laplace Domain) คือ

$$E_a(s) = K_1 \Phi N(s) \quad (4.9)$$

$$T_D(s) = K_2 \Phi I_a(s) \quad (4.10)$$

$$U(s) = I_a(s) R_a + s L_a I_a(s) + E_a(s) \quad (4.11)$$

$$T_D(s) = T_L(s) + s J \omega(s) \quad (4.12)$$

จากสมการ (4.11) สามารถจัดเป็นสมการใหม่ได้คือ

$$I_a(s) = \frac{U(s) - E_a(s)}{R_a + sL_a} \quad (4.13)$$

หรือ

$$I_a(s) = \frac{U(s) - E_a(s)}{R_a} \frac{1}{1 + sT_a} \quad (4.14)$$

เมื่อ

$$T_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (4.15)$$

T_a นี้มีชื่อเรียกว่า ค่าเวลาคงที่ทางไฟฟ้าของวงจรอาร์มาเจอร์

และจากสมการ (4.12) สามารถจัดเป็นสมการใหม่ได้คือ

$$N(s) = \frac{T_D(s) - T_L(s)}{\frac{s2\pi J}{60}} \quad (4.16)$$

หรือ

$$N(s) = \frac{T_D(s) - T_L(s)}{sT_m} \quad (4.17)$$

เมื่อ

$$T_m = \frac{2\pi J}{60} \quad (4.18)$$

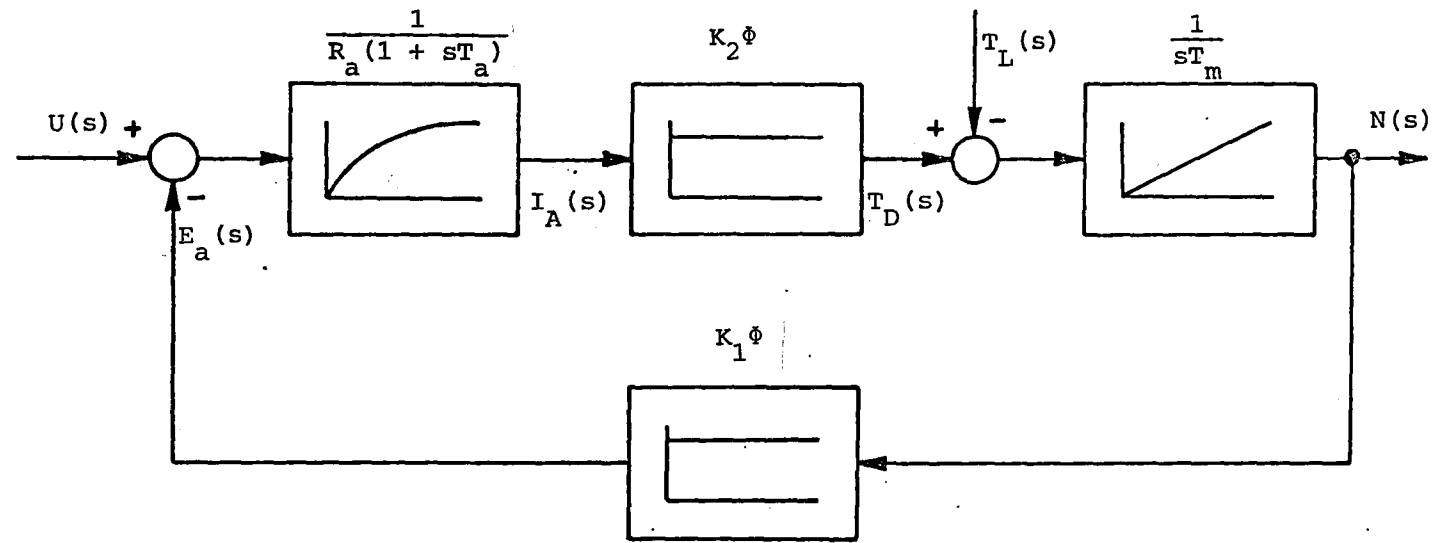
T_m นี้มีชื่อเรียกว่า ค่าเวลาคงที่เชิงกล (Mechanical Time Constant)

จากสมการ (4.9), (4.10), (4.12) และ (4.17) สามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 4.3

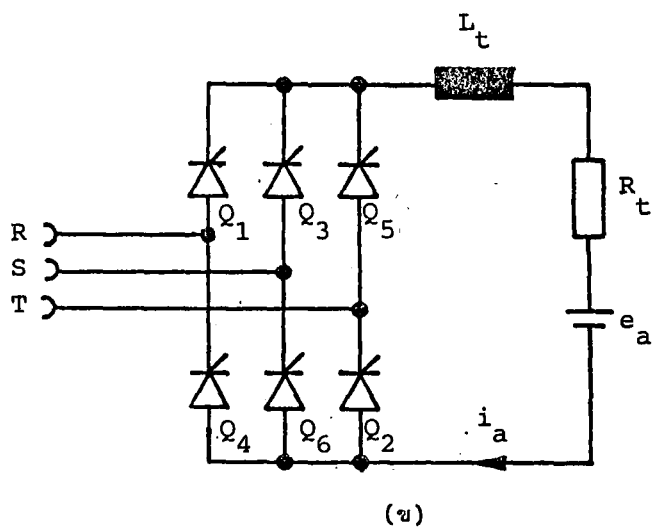
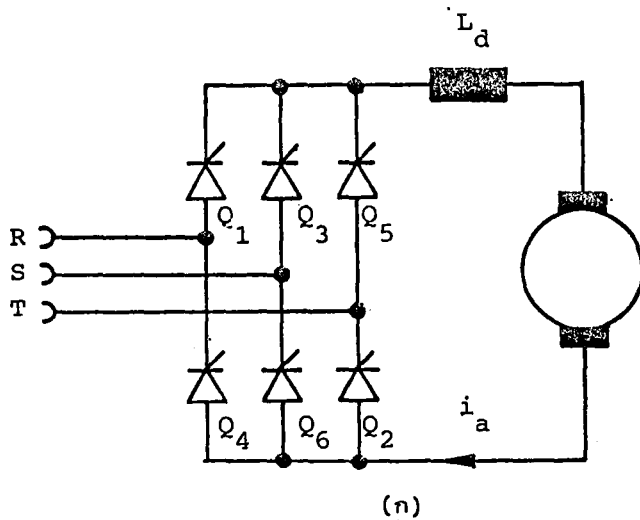
เมื่อนำมอเตอร์มาต่อกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง สามารถแสดงแผนผังได้ในรูปที่ 4.4 (ก)

โดยที่ L_d เป็นอินดักเตอร์ซึ่งไปเพิ่มค่าอินดักแตนซ์เพื่อทำให้กระแสไฟฟ้าตรงไหลต่อเนื่อง และรูปที่ 4.4

(ข) แสดงวงจรสมมูลภายในของวงจรอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์เมื่อรวมกับอินดักเตอร์ L_d



รูปที่ 4.3 แสดงบล็อกไดอแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก



รูปที่ 4.4 (n) แสดงแผนผังการต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพื่อขับมอเตอร์ (ข)

แสดงวงจรสมมูลภายในของวงจรอาร์มาเจอร์ เมื่อรวมกับอินดักเตอร์

L_d

4.5 บทสรุป

บทนี้ได้อธิบายถึงคุณสมบัติที่จำเป็นของมอเตอร์ ซึ่งต้องนำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบ คุณสมบัตินี้ได้แก่ สมการความเร็วรอบ บล็อกไดอแกรมและทรานเฟอร์ฟังก์ชันของมอเตอร์ นอกจากคุณสมบัติเหล่านี้แล้ว ในระบบควบคุมจำเป็นต้องมีการวัดค่าตัวแปรที่ถูกควบคุม ดังนั้นในบทต่อไปจะอธิบายถึงระบบการวัดตัวแปร เหล่านี้ของมอเตอร์ต่อไป

บทที่ 5

อุปกรณ์วัด

(Measuring Instrument)

5.1 บทนำ

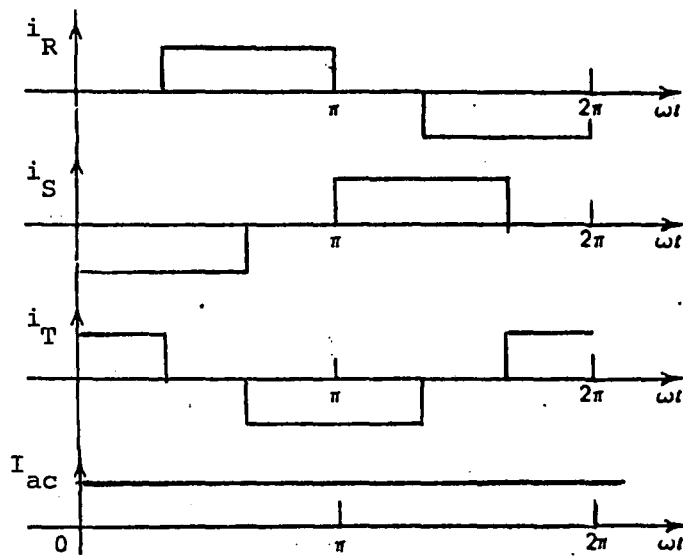
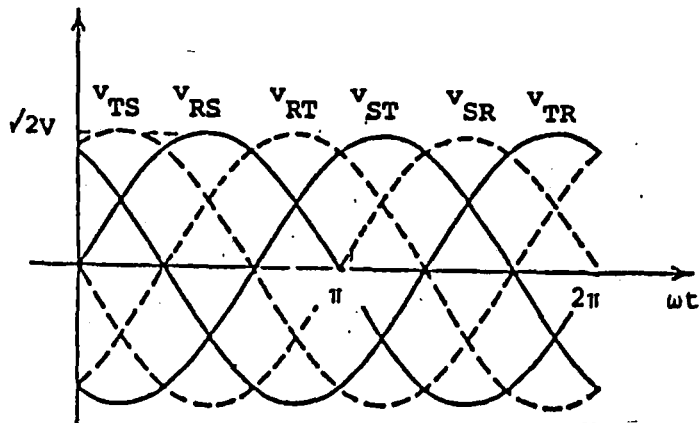
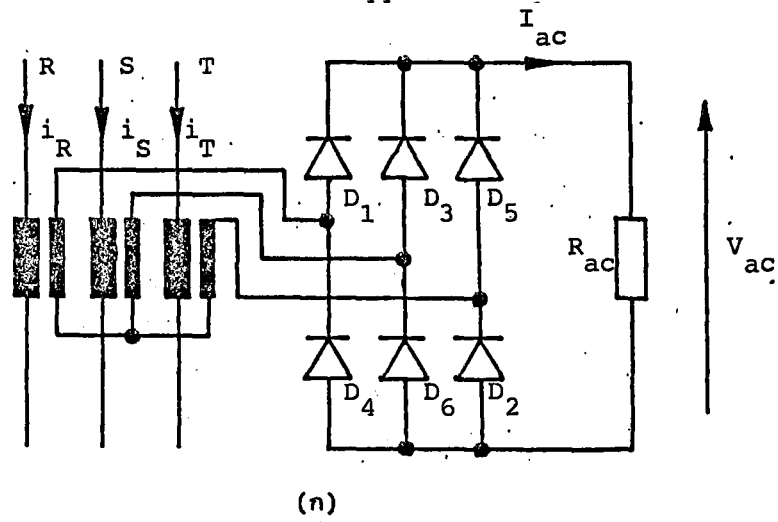
ในระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่สร้างขึ้นจะประกอบด้วยระบบควบคุมสองระบบคือ ระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ และระบบควบคุมความเร็วรอบ ในระบบควบคุมทั้งสองนี้จะต้องมีอุปกรณ์วัด เพื่อที่จะใช้วัดตัวแปรที่จะถูกควบคุม ดังนั้นในบทนี้จะอธิบายถึง วิธีวัด, อุปกรณ์วัด, ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน และบล็อกไดอแกรมของอุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้าตรงเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ และ อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ ในตอนท้ายของบทจะอธิบายคุณสมบัติของวงจรรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านพร้อมทั้ง ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน และบล็อกไดอแกรม ซึ่งวงจรนี้จะได้นำไปใช้เพื่อกรองสัญญาณตัวแปรที่ถูกวัดโดยอุปกรณ์วัดให้เรียบขึ้น

5.2 วิธีวัดและอุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์

เนื่องจากการวัดกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์โดยตรง โดยทั่วไปมักจะใช้อุปกรณ์ที่มีราคาแพงหรือมีความยุ่งยากในการวัด ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงดัดแปลงใช้หม้อแปลงกระแสไฟฟ้าสลับ (AC Current Transformer) 3 ชุด วัดกระแสไฟฟ้าในแต่ละเฟสที่ไหลเข้าวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าสลับทั้ง 3 ชุด จะต่อกันแบบ Y และกระแสไฟฟ้าสลับที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าสลับทั้ง 3 ชุดจะถูกรวมกันเข้าเพื่อทำให้เป็นกระแสไฟฟ้าตรง I_{ac} โดยวงจรวัดกระแส ดังแสดงในรูปที่ 5.1 (ก) รูปสัญญาณของวงจรนี้จะแสดงในรูปที่ 5.1 (ข) กระแสไฟฟ้าตรง I_{ac} เมื่อไหลผ่านความต้านทาน R_{ac} ทำให้เกิดศักดาไฟฟ้าตรง V_{ac} ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง V_{ac} และกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ I_a ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ศักดาไฟฟ้า V_{ac} นี้จะก่อให้เกิดเป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้าป้อนกลับของระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ต่อไป

เพราะว่าผลการตอบสนองของวิธีการวัดชนิดนี้เป็นไปอย่างรวดเร็วมากจึงทำให้เราสามารถอนุมานได้ว่าระบบของเราไม่มีการหน่วงเวลาเกิดขึ้นเลยระหว่างตัวแปรที่ป้อนเข้าวงจรกับตัวแปรที่ต้องการ ซึ่งถ้าสมมุติดังนี้แล้ว เราจะได้ว่าทรานเฟอร์ฟังก์ชันของวิธีวัดนี้จะเป็นดังต่อไปนี้ คือ

$$\frac{V_{ac}(s)}{I_a(s)} = K_{ac} \quad (5.1)$$

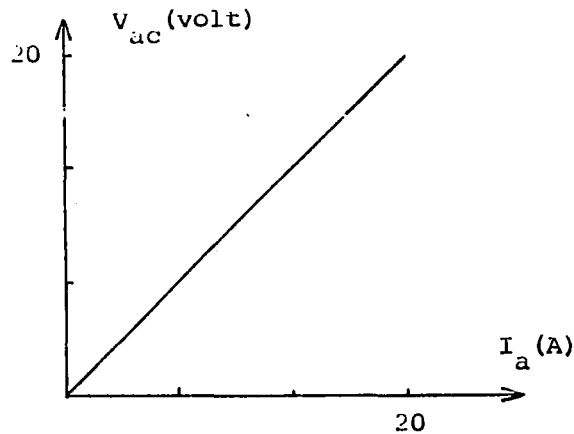


(ข)

รูปที่ 5.1 (ก) แสดงวงจรวัดกระแสไฟฟ้าตรงเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ โดยวิธีวัดจาก

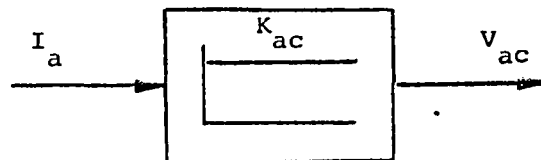
กระแสไฟฟ้าสลับที่ไหลในแต่ละเฟสเข้าวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

(ข) แสดงรูปสัญญาณของวงจรในรูปที่ 5.1 (ก)



รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ I_a และศักดาไฟฟ้าตรง V_{ac} ซึ่งได้จากการวัดกระแสไฟฟ้าสลับแต่ละเฟสไหลเข้าวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

และสมการที่ 5.1 สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้คือ

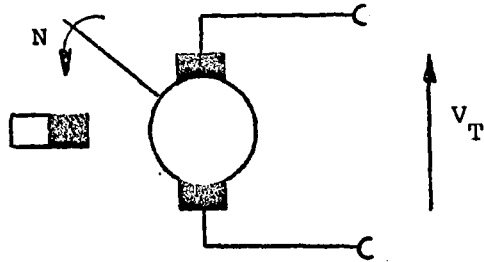


รูปที่ 5.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการวัดกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์

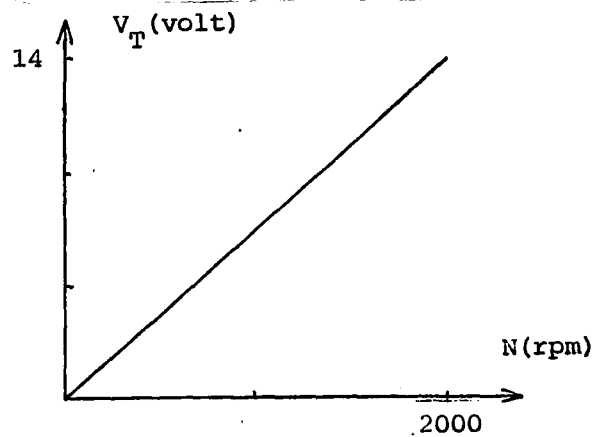
5.3 วิธีการวัดและอุปกรณ์วัดความเร็วรอบมอเตอร์

ในระบบควบคุมความเร็วรอบที่สร้างขึ้นจะใช้วิธีการวัดความเร็วรอบ โดยติดตั้งทาโคเจน-เนอเรเตอร์ศักดาไฟฟ้าตรงชนิดแม่เหล็กถาวรกับมอเตอร์ที่ถูกควบคุม ซึ่งรูปที่ 5.4 แสดงไดอะแกรมของทาโคเจน เนอเรเตอร์ชนิดนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์ N และศักดาไฟฟ้าตรงที่ถูกสร้างขึ้น V_T มีดังแสดงในรูปที่ 5.5 แกกตาไฟฟ้า V_T นี้ จะถูกใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับของระบบควบคุม

ความเร็วรอบต่อไป



รูปที่ 5.4 แสดงไดอะแกรมอย่างง่ายของทาโคเอนเนอเรเตอร์กระแสไฟฟ้าตรงชนิดแม่เหล็กถาวร

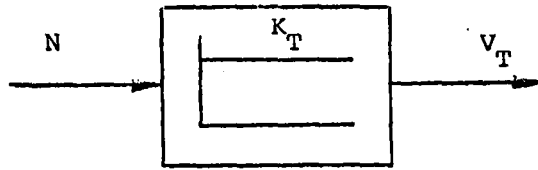


รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์ n และศักดาไฟฟ้าตรง V_T ที่ถูกสร้างขึ้นโดยทาโคเอนเนอเรเตอร์

เพราะว่าการตอบสนองของวิธีวัดชนิดนี้เป็นไปอย่างทันทีทันใดรวดเร็วมากคล้ายกับวงจรวัดกระแส ดังนั้นทรานเฟอร์ฟังก์ชันของการวัดชนิดนี้จึงอยู่ในลักษณะเดียวกับสมการ (5.1) คือ

$$\frac{V_T(s)}{N(s)} = K_T \quad (5.2)$$

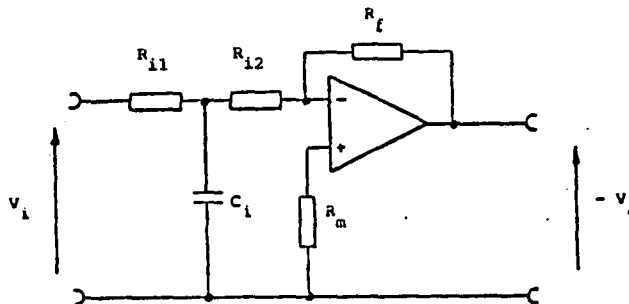
และสมการ (5.2) สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรม ดังในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการวัดความเร็วรอบ

5.4 วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน

โดยปกติศักดาไฟฟ้า V_{ac} และ V_T ที่ได้จากอุปกรณ์วัดมักจะมีลักษณะ เป็นสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนปนอยู่ด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน เพื่อทำหน้าที่ลดสัญญาณรบกวนนั้นและทำให้สัญญาณที่ได้จากการวัดเรียบขึ้น เพื่อที่จะทำให้ระบบควบคุมทำงานได้เที่ยงตรงขึ้น วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านสำหรับในที่นี้มีดังแสดงในรูปที่ 5.7 และวงจรนี้สามารถวิเคราะห์ได้คือ



รูปที่ 5.7 แสดงวงจรสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน

ค่าคอมเพล็กซ์อิมพีแดนซ์ (Complex Impedance) ของด้านเข้าสามารถแสดงแทนได้โดย [5]

$$Z_i = (R_{i1} + R_{i2}) \left(1 + \frac{SR_{i1}R_{i2}}{R_{i1} + R_{i2}} C_i \right) \quad (5.3)$$

และทรานเฟอร์ฟังก์ชันของวงจรเป็น

$$F(s) = \frac{-V_a(s)}{V_i(s)} = \frac{R_f}{R_{i1} + R_{i2}} \frac{1}{1 + \frac{SR_{i1}R_{i2}}{R_{i1} + R_{i2}} C_i} \quad (5.4)$$

เมื่อกำหนดให้

$$A_R = \frac{R_f}{R_{i1} + R_{i2}} \quad (5.5)$$

และ

$$t_{sm} = \frac{R_{i1} R_{i2}}{R_{i1} + R_{i2}} C_i \quad (5.6)$$

สมการ 5.4 อาจสามารถจัดใหม่ได้เป็น

$$F(s) = \frac{-V_a(s)}{V_i(s)} = A_R \frac{1}{1 + s t_{sm}} \quad (5.7)$$

สมการที่ 5.7 สามารถแสดงบล็อกไดอแกรมได้ดัง รูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 แสดงบล็อกไดอแกรมของวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ

5.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้อธิบายถึงอุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ และอุปกรณ์วัดความเร็วรอบ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้มีความจำเป็นต้องใช้ในระบบควบคุมความเร็วรอบ นอกจากอธิบายถึงอุปกรณ์แล้วยังอธิบายถึงทรานเฟอร์ฟังก์ชันของอุปกรณ์วัดซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุม โดยปกติค่าซึ่งได้จากการวัดจะมีสัญญาณรบกวนอยู่ด้วย ดังนั้นในตอนท้ายได้อธิบายถึง วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านซึ่งใช้กรองสัญญาณรบกวนเหล่านั้น เมื่อเข้าใจถึงอุปกรณ์การวัด และส่วนต่าง ๆ ของระบบดังแสดงในบทก่อนหน้านี้แล้ว ในบทต่อไปจะอธิบายถึงการออกแบบวงจรควบคุมซึ่งใช้ในระบบควบคุมความเร็วรอบ

บทที่ ๖

ระบบควบคุมและวงจรควบคุม

(Control System and Controller Circuit)

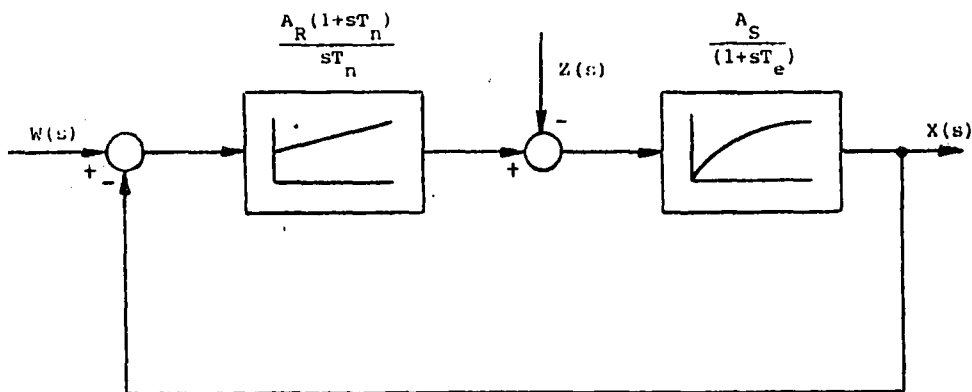
๖.๑ บทนำ

โดยปกติการขับมอเตอร์โดยตรงด้วยวิธีลูฟเปิด (Open-loop) ความเร็วรอบของมอเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อโหลดของมอเตอร์เปลี่ยน ดังนั้นในระบบขับเคลื่อนซึ่งต้องการควบคุมความเร็วรอบซึ่งเที่ยงตรงจำเป็นต้องมีระบบควบคุมชนิดลูฟปิด (Closed-loop) ส่วนสำคัญส่วนหนึ่งของระบบควบคุมนี้คือ วงจรควบคุมซึ่งวงจรควบคุมจะเป็นส่วนที่กำหนดคุณสมบัติของระบบ และสามารถทำให้ระบบทำงานได้ดีที่สุด ในบทนี้จะอธิบายถึงรายละเอียดดังกล่าวคือ อธิบายถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของระบบควบคุมและชนิดของวงจรควบคุมซึ่งจะทำให้ระบบทำงานได้ดีที่สุด

๖.๒ คุณสมบัติของระบบควบคุมซึ่งมีวงจรควบคุมชนิด PI

หัวข้อนี้จะอธิบายถึงคุณสมบัติของระบบควบคุมซึ่งมีวงจรควบคุมชนิด PI โดยพิจารณาเป็นสองกรณีคือ พิจารณาเมื่อระบบได้รับคำสั่งในทันทีทันใด (Step-command) และในกรณีเมื่อได้รับโหลดในทันทีทันใด ระบบควบคุมที่จะถูกพิจารณามีสองชนิดคือ

๖.๒.๑ ระบบควบคุมซึ่งมีอุปกรณ์ถูกควบคุมชนิดอุปกรณ์หนึ่งวงออร์เตอร์หนึ่ง



รูปที่ ๖.๑ แสดงระบบควบคุมซึ่งมีวงจรควบคุมชนิด PI และมีอุปกรณ์ถูกควบคุมชนิดอุปกรณ์หนึ่งวงออร์เตอร์หนึ่ง

ทราน เฟอร์ฟังก์ชันของระบบนี้คือ

$$\frac{X(s)}{W(s)} = \frac{A_R A_S (1 + sT_n)}{sT_n (1 + sT_e) + A_R A_S (1 + sT_n)} \quad (6.1)$$

เมื่อพิจารณาสมการของความผิดพลาด (Error) คือ

$$\frac{E(s)}{W(s)} = \frac{W(s) - X(s)}{W(s)} = \frac{sT_n (1 + sT_e)}{sT_n (1 + sT_e) + A_R A_S (1 + sT_n)} \quad (6.2)$$

เมื่อพิจารณาสมการ (6.2) ที่สภาวะคงตัว ($t \rightarrow \infty$)

$$\frac{E(s)}{W(s)} = 0 \quad (6.3)$$

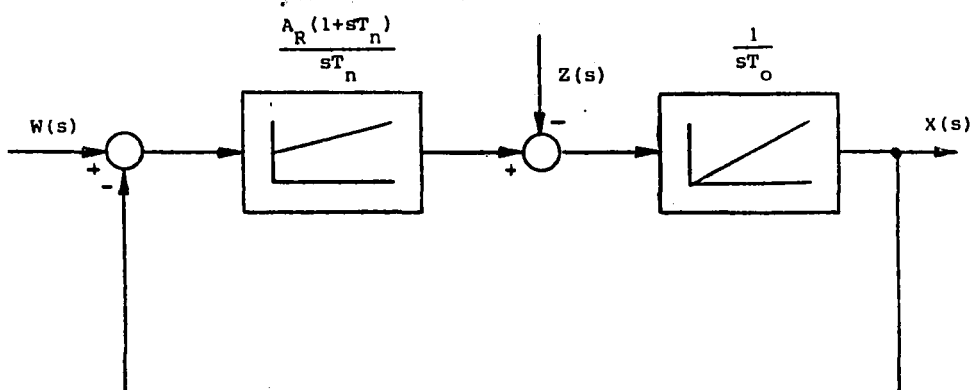
เมื่อพิจารณาทราน เฟอร์ฟังก์ชันระหว่างตัวแปรที่ต้องการกับโหลดจะได้สมการคือ

$$\frac{X(s)}{Z(s)} = \frac{sT_n A_S}{sT_n (1 + sT_e) + A_S A_R (1 + sT_e)} \quad (6.4)$$

และเมื่อพิจารณาสมการ (6.4) ที่สภาวะคงตัว ($t \rightarrow \infty$)

$$\frac{X(s)}{Z(s)} = 0 \quad (6.5)$$

6.2.2 ระบบควบคุมซึ่งมีอุปกรณ์ถูกควบคุมชนิดอินทิเกรต



รูปที่ 6.2 แสดงระบบควบคุมซึ่งมีวงจรควบคุมชนิด PI และมีอุปกรณ์ถูกควบคุมชนิดอินทิเกรต

ทราน เฟอร์ฟังก์ชันของระบบควบคุมนี้คือ

$$\frac{X(s)}{W(s)} = \frac{A_R (1 + sT_n)}{s^2 T_n T_o + A_R (1 + sT_n)} \quad (6.6)$$

เมื่อพิจารณาสมการของความผิดพลาดคือ

$$\frac{E(s)}{W(s)} = \frac{W(s) - X(s)}{W(s)} = \frac{s^2 T_n T_o}{s^2 T_n T_o + A_R (1 + sT_n)} \quad (6.7)$$

และเมื่อพิจารณาสมการ (6.7) ที่สภาวะคงตัว ($t \rightarrow \infty$)

$$\frac{E(s)}{W(s)} = 0 \quad (6.8)$$

และ เมื่อพิจารณาทราน เฟอร์ฟังก์ชันระหว่างตัวแปรที่ต้องการกับโหลดจะได้สมการคือ

$$\frac{X(s)}{Z(s)} = \frac{sT_n}{s^2 T_n T_o + A_R (1 + sT_n)} \quad (6.9)$$

และ เมื่อพิจารณาที่สภาวะคงตัว ($t \rightarrow \infty$)

$$\frac{X(s)}{Z(s)} = 0 \quad (6.10)$$

เมื่อพิจารณาสมการ (6.3), (6.5), (6.8) และ (6.10) จะสามารถสังเกตได้ถึงคุณสมบัติของวงจรควบคุมชนิด PI ซึ่งสามารถทำให้ตัวแปรที่ต้องการเป็นไปตามต้องการที่สภาวะคงตัว และตัวแปรที่ต้องการของระบบไม่เปลี่ยนแปลงไปที่สภาวะคงตัว เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงใช้วงจรควบคุมชนิดนี้ในการควบคุมการทำงานของระบบ

6.3 การทำให้ระบบทำงานดีที่สุด (Optimization)

ระบบควบคุมจะทำงานดีที่สุดเมื่อระบบสามารถตอบสนองต่อการทำงานได้เร็ว, มีความแม่นยำ และมีเสถียรภาพ (Stability) ซึ่งคุณสมบัตินี้เมื่อพิจารณาในโดเมนของความถี่คือ ระบบต้องมีโดเมนของความถี่กว้างที่สุด และมีขนาดไคล้เคียงหนึ่ง [6], [8] จากแนวความคิดนี้สามารถแสดงวิธีการ

ทำให้ระบบทำงานได้ดีที่สุดคือ

ถ้าสมมุติสมการทราาน เพอร์ฟังก์ชันของระบบควบคุม เป็น

$$F_w(j\omega) = \frac{a_0 + j\omega a_1}{a_0 + j\omega a_1 + (j\omega)^2 a_2 + (j\omega)^3 a_3} \quad (6.11)$$

ขนาดของสมการ (6.11) คือ

$$|F_w(\omega)| = \sqrt{\frac{a_0^2 + \omega^2 a_1^2}{a_0^2 + \omega^2 (a_1^2 - 2a_0 a_2) + \omega^4 (a_2^2 - 2a_1 a_3) + \omega^6 a_3^2}} \quad (6.12)$$

ถ้ากำหนดให้

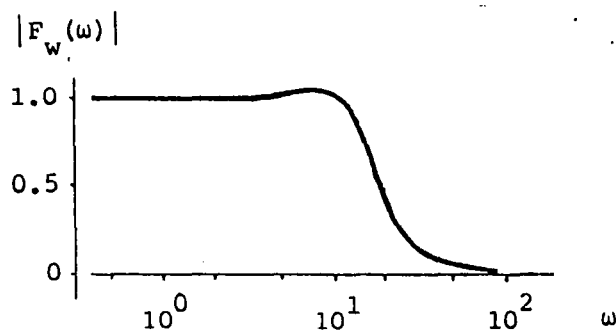
$$a_1^2 = 2a_0 a_2 \quad (6.13)$$

$$a_2^2 = 2a_1 a_3 \quad (6.14)$$

เมื่อนำสมการ (6.13), (6.14) แทนลงในสมการ (6.12) ได้สมการใหม่คือ

$$|F_w(\omega)| = \sqrt{\frac{1 + \omega^2 (a_1/a_0)^2}{1 + \omega^6 (a_3/a_0)^2}} \quad (6.15)$$

สมการ (6.15) สามารถแสดงเมื่อเป็นฟังก์ชันของความถี่ได้ดังในรูปที่ 6.3

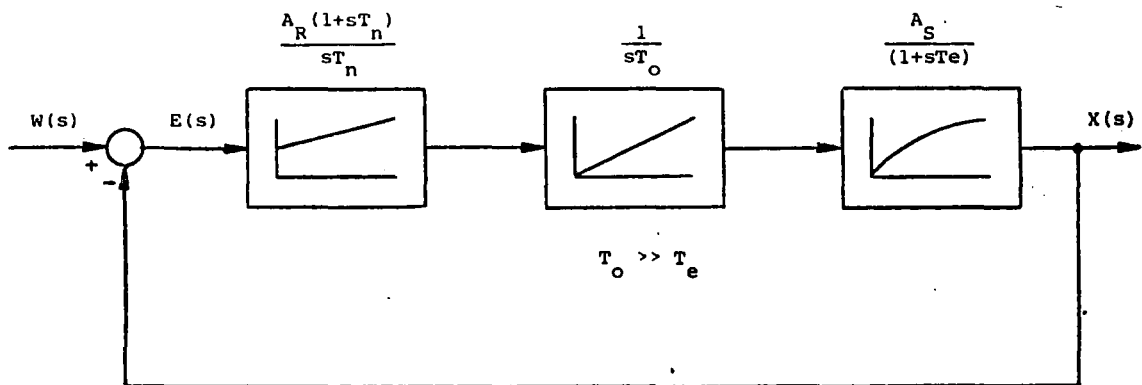


รูปที่ 6.3 แสดงคุณสมบัติในโดเมนของความถี่ของสมการ (6.15)

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6.3 สังเกตได้ว่าถ้าเงื่อนไขดังในสมการ (6.13) และ (6.14) เป็นจริงก็จะได้คุณสมบัติของระบบซึ่งทำงานได้ดีที่สุดตามต้องการ การทำให้ระบบทำงานได้ดีที่สุดวิธีนี้เรียกว่า ซิมเมตริกคอล ออปติมัม ต่อไปจะอธิบายถึงวิธีการทำให้ระบบทำงานได้ดีที่สุดของระบบควบคุมสองชนิดคือ

6.3.1 ระบบซึ่งมีอุปกรณ์ถูกควบคุมชนิดอินทิเกรตและอุปกรณ์หน่วงออร์เดอร์หนึ่ง

ขนาดเล็ก



รูปที่ 6.4 แสดงระบบซึ่งมีอุปกรณ์ถูกควบคุมชนิดอุปกรณ์อินทิเกรตและอุปกรณ์หน่วงออร์เดอร์หนึ่งขนาดเล็ก

ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของระบบคือ

$$F_w(s) = \frac{X(s)}{W(s)} = \frac{A_R A_S (1 + sT_n)}{A_R A_S + sA_R A_S T_n + s^2 T_n T_o + s^3 T_n T_o T_e} \quad (6.16)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการ (6.11) กับสมการ (6.16) จะได้ความสัมพันธ์คือ

$$a_0 = A_R A_S \quad (6.17)$$

$$a_1 = A_R A_S T_n \quad (6.18)$$

$$a_2 = T_n T_o \quad (6.19)$$

$$a_3 = T_n T_o T_e \quad (6.20)$$

แทนค่าสมการ (6.17), (6.18), (6.19) และ (6.20) ลงในสมการ (6.13) และ (6.14) จะได้ความสัมพันธ์คือ

$$(A_R A_S T_n)^2 = 2A_R A_S T_n T_o \quad (6.21)$$

$$T_n^2 T_o^2 = 2A_R A_S T_n^2 T_o T_e \quad (6.22)$$

จากสมการ (6.21) และ (6.22) จะได้สมการใหม่คือ

$$T_n = 4T_e \quad (6.23)$$

$$A_R = T_o / 2A_S T_e \quad (6.24)$$

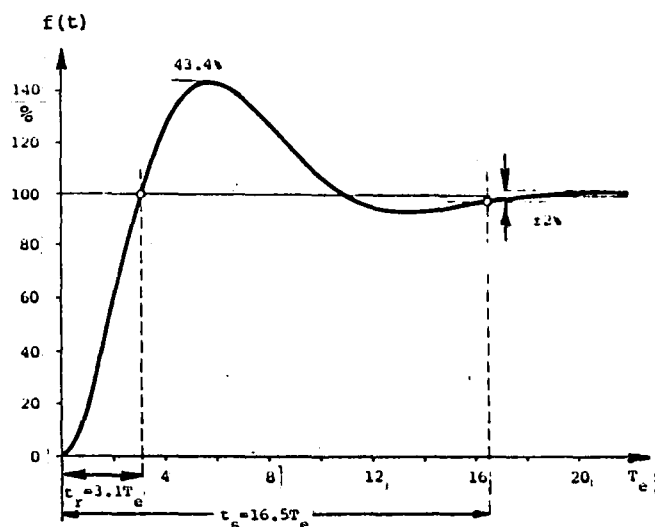
เมื่อนำสมการ (6.23) และ (6.24) แทนลงในสมการ (6.16) จะได้สมการใหม่คือ

$$F_w(s) = \frac{1 + s4T_e}{1 + s4T_e + s^2 8T_e^2 + s^3 8T_e^3} \quad (6.25)$$

สมการ (6.25) จะได้คำตอบในโดเมนของเวลา เมื่อคำสั่งเป็นชนิดขั้นบันได (Step-command) ขนาดเท่าหนึ่งคือ

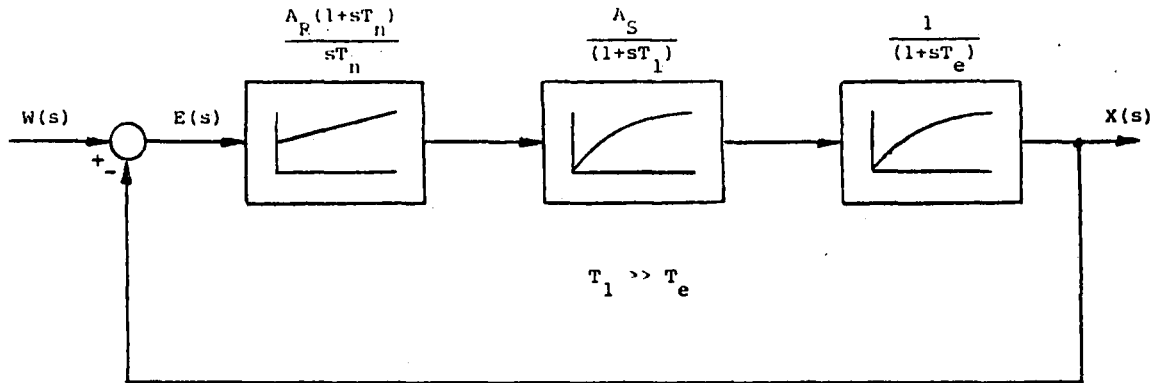
$$f(t) = 1 + e^{-t/2T_e} - 2e^{-t/4T_e} \cos \frac{\sqrt{3}t}{4T_e} \quad (6.26)$$

สมการ (6.26) สามารถแสดงรูปสัญญาณได้ดังในรูปที่ 6.5 รูปนี้จะเป็นการแสดงผลการตอบสนองของระบบที่ทำงานดีที่สุด เมื่อได้รับคำสั่งในขั้นบันได โดยที่วงจรควบคุมในระบบนี้มีค่าตัวแปรดังในสมการ (6.23) และ (6.24)



รูปที่ 6.5 แสดงการตอบสนองในขั้นบันไดของระบบซึ่งถูกกำหนดให้ทำงานดีที่สุดด้วย
วิธีหิมเมตริกอล ออปติมัม

6.3.2 ระบบซึ่งมีอุปกรณ์ควบคุมชนิดอุปกรณ์หนึ่งขนาดใหญ่และ
อุปกรณ์หนึ่งขนาดเล็ก



รูปที่ 6.6 แสดงระบบซึ่งมีอุปกรณ์ถูกควบคุมชนิดอุปกรณ์หนึ่งขนาดใหญ่
และอุปกรณ์หนึ่งขนาดเล็ก

ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของระบบนี้คือ

$$\frac{X(s)}{W(s)} = \frac{1 + sT_n}{1 + sT_n \left(1 + \frac{1}{A_R A_S} \right) + s^2 T_n \left(\frac{T_l + T_e}{A_R A_S} \right) + s^3 T_n \left(\frac{T_l T_e}{A_R A_S} \right)} \quad (6.27)$$

นำสมการ (6.25) มาพิจารณาโดยแทน T_e ด้วย β จะได้สมการใหม่คือ

$$\frac{X(s)}{W(s)} = \frac{1 + s4\beta}{1 + s4\beta + s^2 8\beta^2 + s^3 8\beta^3} \quad (6.28)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ (6.27) และ (6.28) จะได้ความสัมพันธ์คือ

$$4\beta = T_n \left(1 + \frac{1}{A_R A_S} \right) \quad (6.29)$$

$$8\beta^2 = T_n \left(\frac{T_l + T_e}{A_R A_S} \right) \quad (6.30)$$

$$8\beta^3 = T_n \frac{T_l T_e}{A_R A_S} \quad (6.31)$$

สมการ (6.29) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\beta = \frac{T_n}{4} \left(1 + \frac{1}{A_R A_S} \right) \quad (6.32)$$

นำสมการ (6.30) ทารด้วยสมการ (6.29)

$$\beta = \frac{1}{2} \frac{T_1 + T_e}{1 + A_R A_S} \quad (6.33)$$

นำสมการ (6.31) ทารด้วยสมการ (6.30)

$$\beta = \frac{T_1 T_e}{T_1 + T_e} \quad (6.34)$$

ดังนั้นจากสมการ (6.32), (6.33) และ (6.34) จะได้ค่า A_R และ T_n ของวงจรควบคุมคือ

$$A_R = \frac{T_1}{2A_S T_e} \left(1 + \frac{T_e^2}{T_1^2} \right) \quad (6.35)$$

$$T_n = \frac{4T_e \left(1 + \frac{T_e^2}{T_1^2} \right)}{(1 + T_e/T_1)^3} \quad (6.36)$$

และเมื่อนำสมการ (6.35) และ (6.36) ลงในสมการ (6.27) จะได้สมการใหม่คือ

$$F_w = \frac{1 + s4T_e \left(\frac{1 + T_e^2/T_1^2}{(1 + T_e/T_1)^2} \right)}{1 + s \left(\frac{4T_e}{1 + T_e/T_1} \right) + s^2 \left(\frac{8T_e^2}{(1 + T_e/T_1)^2} \right) + s^3 \left(\frac{8T_e^3}{(1 + T_e/T_1)^3} \right)} \quad (6.37)$$

ถ้า $T_e \ll T_1$ จะได้สมการ (6.35), (6.36) และ (6.37) ใหม่คือ

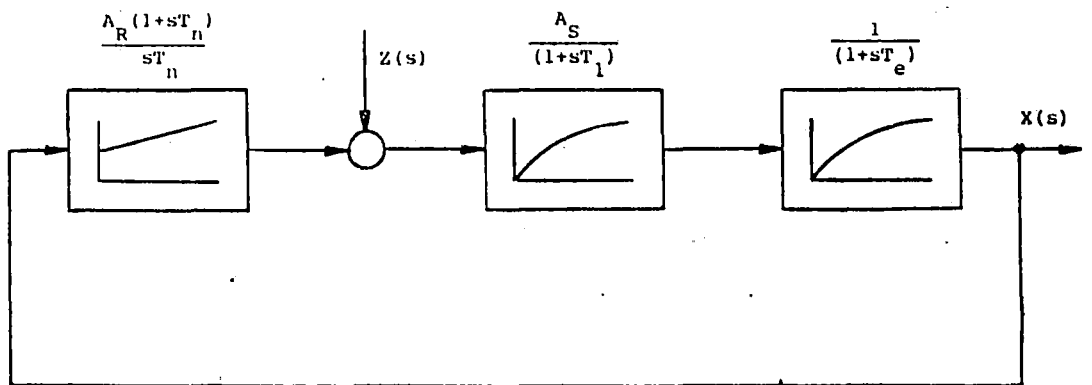
$$A_R \cong \frac{T_1}{2A_S T_e} \quad (6.38)$$

$$T_n \approx 4T_e \frac{T_1}{T_1 + 3T_e} \quad (6.39)$$

$$F_w \approx \frac{1 + s4T_e}{1 + s4T_e + s^2 8T_e^2 + s^3 8T_e^3} \quad (6.40)$$

เมื่อพิจารณาสมการ (6.40) จะมีลักษณะเป็นเช่นเดียวกับสมการ (6.26) ดังนั้นในระบบนี้ถ้าค่า $T_e \ll T_1$ เป็นจริงแล้วการตอบสนองต่อระบบ เมื่อได้รับคำสั่งในทันทีทันใดก็เป็นเช่นเดียวกับรูปที่ 6.5

เมื่อวงจรควบคุมของระบบในรูปที่ 6.4 และ รูปที่ 6.6 มีตัวแปรตามสมการที่ (6.23), (6.24) หรือ (6.38), (6.39) จะทำให้ระบบทั้งสองทำงานได้ดีที่สุด นอกจากพิจารณาคุณสมบัติของระบบเมื่อได้รับคำสั่งแล้ว จำเป็นต้องพิจารณาเมื่อระบบควบคุมได้รับโหลดด้วย ดังนั้นต่อไปจะอธิบายถึงผลที่จะเกิดขึ้นเมื่อระบบควบคุมซึ่งถูกปรับแต่งให้ทำงานดีที่สุด แล้วได้รับโหลดทันทีทันใดจะมีผลทำให้ตัวแปรนี้ต้องเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร พิจารณาจากระบบควบคุมในรูปที่ 6.6 เมื่อพิจารณาเฉพาะผลของโหลดจะแสดงในรูปที่ 6.7

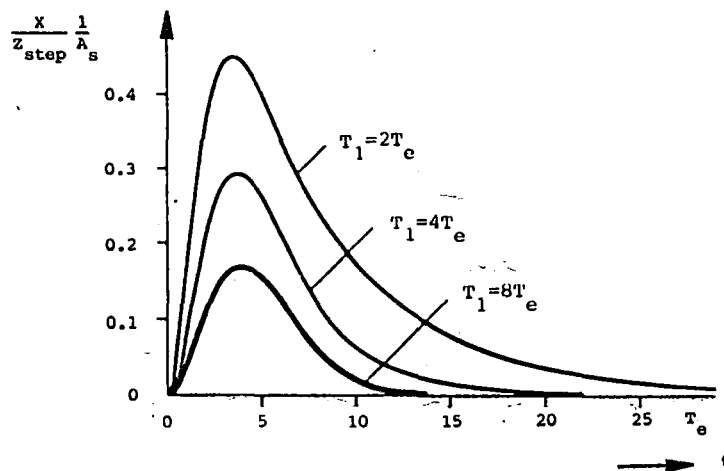


รูปที่ 6.7 แสดงระบบควบคุมในรูปที่ 6.6 เมื่อพิจารณาเฉพาะผลจากโหลด

ทราบเฟอ์ฟังก์ชันระหว่างตัวแปรที่ต้องการกับโหลดของระบบควบคุม เมื่อระบบควบคุมถูกปรับให้ทำงานดีที่สุดคือ

$$\frac{X(s)}{Z(s)} = \frac{A_S}{1 + s2T_e} \cdot \frac{4T_e}{T_1} \cdot \frac{s2T_e}{1 + s2T_e + s^2 4T_e^2} \quad (6.41)$$

ซึ่งรูปที่ 6.8 จะแสดงการตอบสนองของสมการ (6.41) เมื่อระบบควบคุมได้รับโหลดในทันทีโดยในรูปนี้จะแสดงในการนี้ที่ $T_1 = 8T_e$, $T_1 = 4T_e$ และ $T_1 = 2T_e$



รูปที่ 6.8 แสดงการตอบสนองของระบบควบคุมในรูปที่ 6.7 ซึ่งได้รับโหลดในทันทีทันใด เมื่อความสัมพันธ์ระหว่าง T_1 และ T_e ต่าง ๆ กัน

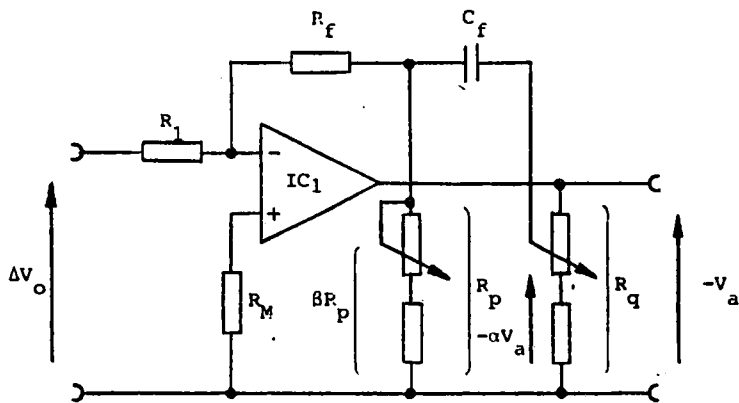
หัวข้อนี้ได้อธิบายถึงวิธีการหาค่าตัวแปรของวงจรควบคุมซึ่งทำให้ระบบควบคุมทำงานได้ดีที่สุด นอกจากนี้ได้แสดงคุณสมบัติการตอบสนองต่อคำสั่งและโหลดของระบบควบคุมนี้ ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจะอธิบายถึงรายละเอียดวงจรควบคุม

6.4 วงจรควบคุม

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะประกอบด้วยลูปควบคุมสองลูป ซึ่งทั้งสองลูปใช้วงจรควบคุมเปิด PI ซึ่งมีทรานเฟอร์ฟังก์ชันคือ

$$\frac{\Delta V_o(s)}{-V_a(s)} = A_R \frac{1 + sT_n}{sT_n} \quad (6.42)$$

วงจรควบคุมชนิด PI ที่ใช้แสดงในรูปที่ 6.8 และสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมได้ดังในรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.9 แสดงวงจรควบคุมชนิด PI

จากวงจรในรูปที่ 6.9 จะได้ค่าตัวแปรที่ต้องการในสมการ (6.42) คือ

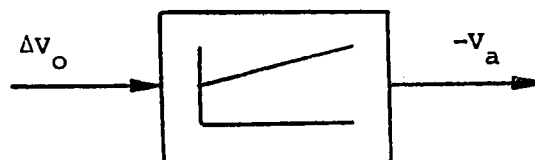
$$A_{R\alpha} = \frac{R_f}{R_1} \frac{1}{\alpha} \quad (6.43)$$

$$T_{n\beta} = \frac{R_f \beta R_p}{R_f + \beta R_p} C_f \quad (6.44)$$

สมการ (6.43) และ (6.44) จะเป็นจริงก็เมื่อเงื่อนไขต่อไปนี้เป็นจริง

$$\frac{R_q}{R_f} \leq 0.1 \quad (6.45)$$

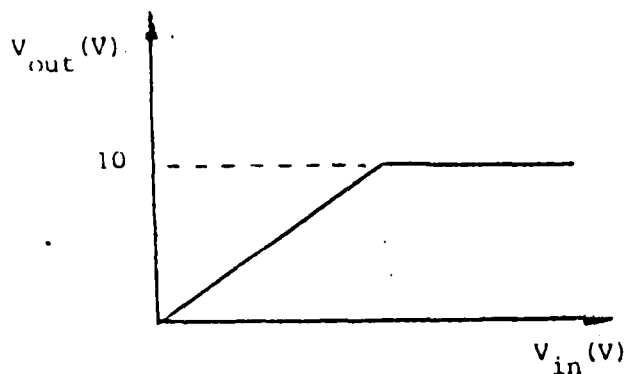
$$\frac{R_q}{R_p} \leq 1 \quad (6.46)$$



รูปที่ 6.10 แสดงบล็อกไดอแกรมของวงจรควบคุมชนิด PI

6.5 วงจรจำกัดปริมาณ

รูปที่ 2.2 แสดงบล็อกไดอแกรมทั้งหมดของระบบควบคุมความเร็วรอบ ซึ่งในระบบนี้จะประกอบด้วยวงจรจำกัดปริมาณสองชุดคือ วงจรจำกัดกระแสไฟฟ้า และวงจรจำกัดมุมกระตุ่น ในวงจรจำกัดกระแสไฟฟ้าจะทำหน้าที่จำกัดสัปดาห์ไฟฟ้าควบคุมซึ่งกำหนดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าวงจรควบคุมกระแสไฟฟ้าไม่ให้ไหลเกินพิกัด เพราะว่าระบบควบคุมความเร็วรอบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นระบบควบคุมมอเตอร์ชนิดหมุนทิศทางเดียว ดังนั้นกระแสไฟฟ้าไหลเข้ามอเตอร์จึงมีทิศทางเดียว และเนื่องจากสัปดาห์ไฟฟ้าควบคุมที่ใช้มีพิสัยตั้งแต่ 0 โวลต์ถึง 10 โวลต์ ซึ่งสัปดาห์ไฟฟ้าควบคุมที่มีขนาด 10 โวลต์นี้จะเป็นสัปดาห์ไฟฟ้าควบคุมซึ่งทำให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้ามอเตอร์ที่พิกัด รูปที่ 6.11 จะแสดงคุณสมบัติของวงจรจำกัดกระแสไฟฟ้านี้



รูปที่ 6.11 แสดงคุณสมบัติการจำกัดสัปดาห์ไฟฟ้าควบคุมของวงจรจำกัดกระแสไฟฟ้า

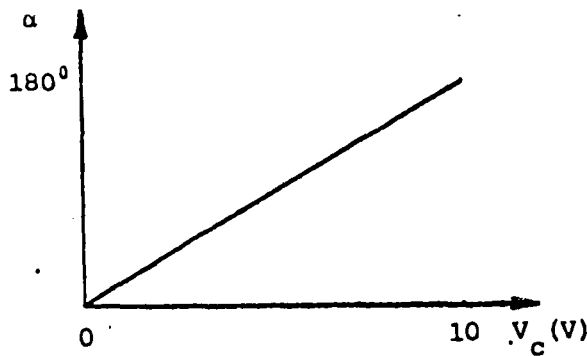
นอกจากวงจรจำกัดนี้แล้วยังคงมีวงจรจำกัดมุมกระตุ่นของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังอีกส่วนหนึ่ง เพื่อป้องกันมิให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังจ่ายสัปดาห์ไฟฟ้าตรงให้มอเตอร์เกินพิกัด โดยใช้วิธีจำกัดสัปดาห์ไฟฟ้าควบคุมซึ่งเข้าวงจรกระตุ่น ในบทที่ 3 ได้อธิบายถึงมุมกระตุ่นสูงสุดต้องไม่เกิน 165 องศา ดังนั้นมุมกระตุ่นสูงสุดที่ถูกจำกัดคือ

$$\alpha_{\max} = 165 \text{ องศา} \quad (6.47)$$

และเนื่องจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้มอเตอร์ที่มีสัปดาห์ไฟฟ้าตรงที่วงจรอาร์มาเจอร์สูงสุดเป็น 220 โวลต์และสัปดาห์ไฟฟ้าสลับป้อนเข้าวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นชนิด 3 เฟส 220 โวลต์ ดังนั้นจากสมการ (3.19) และจากรูปที่ 3.6 จะได้ค่ามุมกระตุ่นต่ำสุดคือ

$$\alpha_{\min} = \cos^{-1}\left(\frac{\pi}{3\sqrt{2}}\right) = 42.2 \text{ องศา} \quad (6.48)$$

ความสัมพันธ์ของมุมกระตุ้นและศักดาไฟฟ้าควบคุมของวงจรสร้างสัญญาณกระตุ้น เมื่อค่าสูงสุดของศักดาไฟฟ้าควบคุมที่วงจรกระตุ้นเป็น 10 โวลต์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.12 คือ

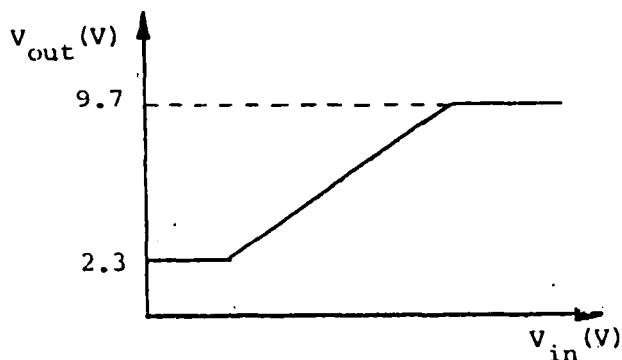


รูปที่ 6.12 แสดงความสัมพันธ์ของศักดาไฟฟ้าควบคุมกับมุมกระตุ้นของวงจรสร้างสัญญาณกระตุ้น

ดังนั้นจากสมการ (6.47), (6.48) และจากรูปที่ 6.12 จะได้ศักดาไฟฟ้าควบคุมต่ำสุดและสูงสุดก่อนเข้าวงจรสร้างสัญญาณกระตุ้นคือ

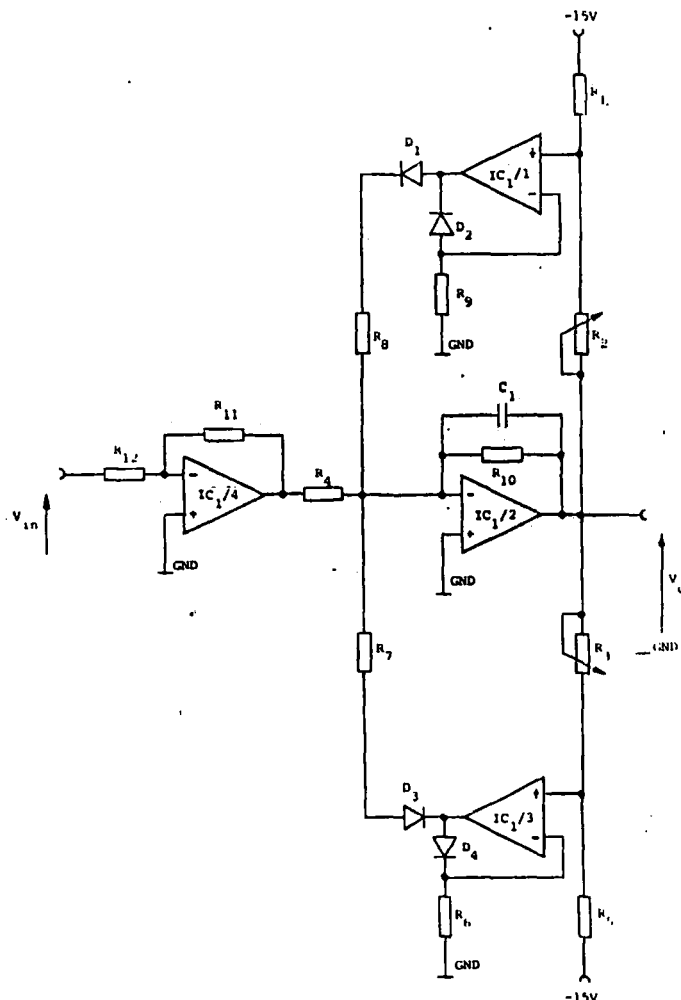
$$V_{o \max} = \frac{10}{180} \times 165 = 9.7 \text{ โวลต์} \quad (6.49)$$

$$V_{o \min} = \frac{10}{180} \times 42.2 = 2.3 \text{ โวลต์} \quad (6.50)$$



รูปที่ 6.13 แสดงคุณสมบัติของวงจรจำกัดศักดาไฟฟ้าควบคุมของวงจรจำกัดมุมกระตุ้น

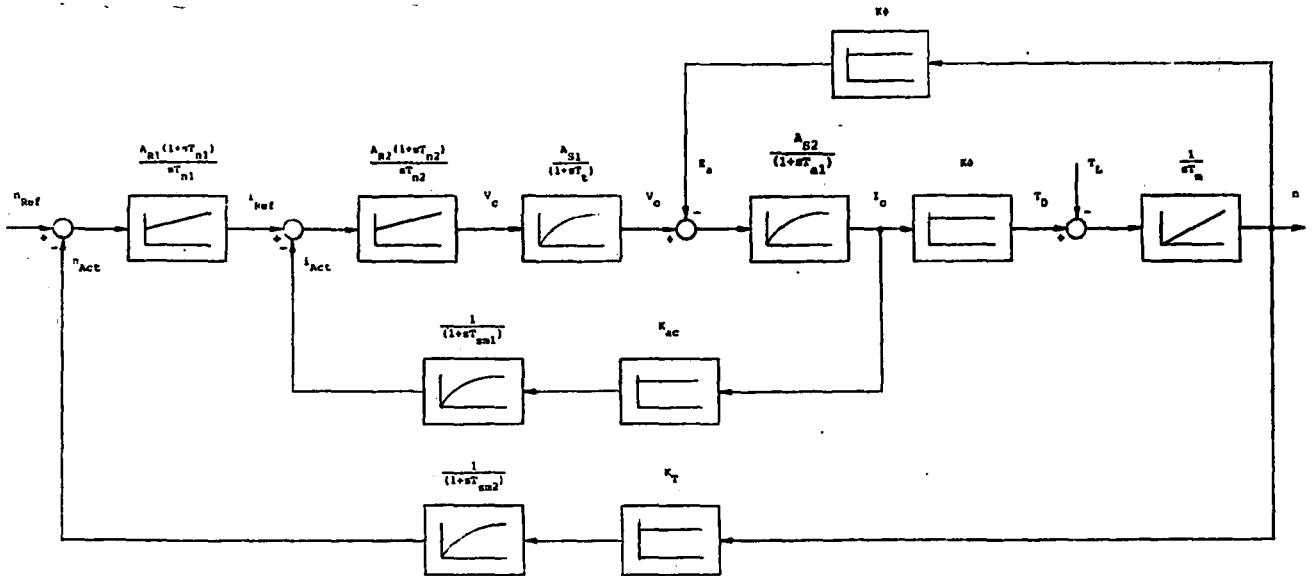
รูปที่ 6.14 จะแสดงวงจรจำกัดปริมาณ ซึ่งใช้เป็นวงจรจำกัดกระแสไฟฟ้า และวงจรจำกัดความเร็วรอบ วงจรนี้สามารถปรับปริมาณศักดาไฟฟ้าจำกัดสูงสุดและปรับปริมาณศักดาไฟฟ้าจำกัดต่ำสุดได้โดยการปรับ R_2 และ R_3 ตามลำดับ วงจรนี้จะมีการทำงานดังนี้คือ ถ้าศักดาไฟฟ้าที่ทางเข้ายังอยู่ในพิสัยของศักดาไฟฟ้าจำกัดสูงสุดและต่ำสุด $IC_1/1$ จะทำให้ D_1 ไม่ทำงาน และ $IC_1/3$ จะทำให้ D_3 ไม่ทำงานเช่นกัน เมื่อศักดาไฟฟ้าที่ทางเข้ามีปริมาณเกินศักดาไฟฟ้าจำกัดสูงสุด $IC_1/1$ จะทำให้ D_1 ทำงาน และ $IC_1/1$ จะจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่าน R_8 เพื่อทำให้ศักดาไฟฟ้าที่ทางออกคงที่ ถ้าศักดาไฟฟ้าที่ทางออกต่ำกว่าศักดาไฟฟ้าจำกัดต่ำสุด $IC_1/3$ จะทำให้ D_3 ทำงาน และ $IC_1/3$ จะดึงกระแสไฟฟ้าผ่าน R_7 เพื่อรักษาให้ศักดาไฟฟ้าที่ทางออกคงที่



รูปที่ 6.14 แสดงวงจรจำกัดปริมาณซึ่งใช้จำกัดกระแสไฟฟ้าและจำกัดความเร็วรอบ

6.6 บล็อกไดอแกรมของระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากรายละเอียดของระบบควบคุมดังได้อธิบายไปแล้ว รูปที่ 6.15 จะแสดงบล็อกไดอแกรมทั้งหมดของระบบนี้ ซึ่งในรูปนี้จะไม่แสดงวงจรจำกัดปริมาณลงไปด้วย ทั้งนี้เพราะในรูปนี้จะแสดงเฉพาะ เมื่อระบบยังไม่ทำงาน เกินพิกัด



รูปที่ 6.15 แสดงบล็อกไดอแกรมของระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

6.7 บทสรุป

ในบทนี้ได้อธิบายถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของระบบควบคุม เช่น คุณสมบัติของระบบควบคุมเมื่อมีวงจรควบคุมชนิด PI เมื่อได้รับการเปลี่ยนแปลงคำสั่งและโหลด การออกแบบวงจรควบคุมซึ่งทำให้ระบบทำงานดีที่สุด และอธิบายถึงรายละเอียดวงจรควบคุมชนิด PI นอกจากนี้ยังได้แสดงวงจรจำกัดปริมาณซึ่งใช้ป้องกันมิให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ความเร็วรอบมอเตอร์เกินพิกัด และในตอนท้ายได้แสดงบล็อกไดอแกรมรวมของระบบ ซึ่งในบทต่อไปจะอธิบายถึงการออกแบบวงจรควบคุมของระบบควบคุมแต่ละรูปและผลการทดลองระบบเหล่านั้น

บทที่ 7

การทดลอง, ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

7.1 บทนำ

บทนี้จะอธิบายถึงการออกแบบ และการสร้างระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยจะแยกการอธิบายออกเป็นสองระบบ คือระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ และระบบควบคุมความเร็วรอบ นอกจากนี้จะแสดงผลการทดลองของแต่ละระบบและวิจารณ์ผลของการทดลองด้วย

7.2 รายละเอียดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและ เยน เนอ เร มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งใช้ในการทำวิทยานิพนธ์

มอเตอร์ซึ่งใช้ทำวิทยานิพนธ์มีรายละเอียดดังนี้คือ

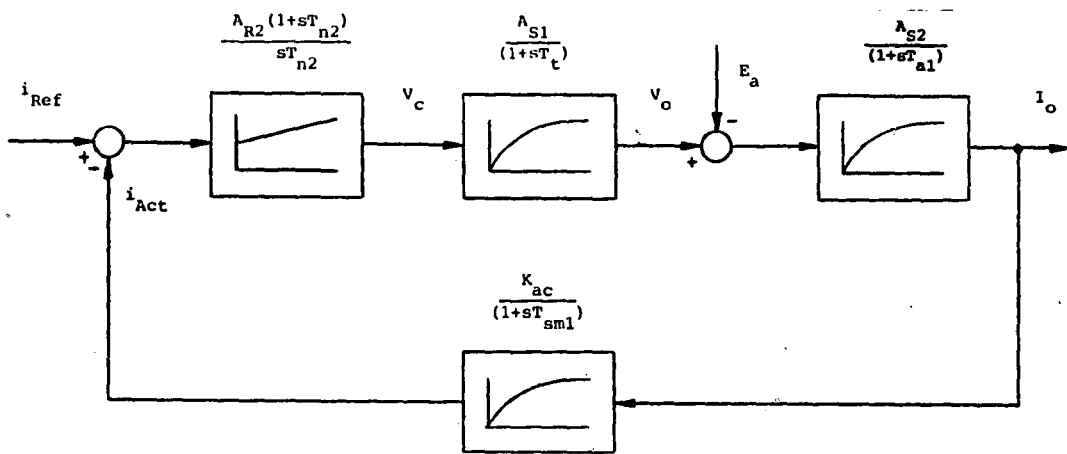
ความเร็วรอบสูงสุด	1,500	RPM
ศักดาไฟฟ้าตรงสูงสุดที่วงจรอาร์มาเจอร์	220	V
ศักดาไฟฟ้าตรงสูงสุดที่วงจรสร้างสนามแม่เหล็ก	220	V
ขนาดกำลังของมอเตอร์	3	kW
กระแสไฟฟ้าตรงเข้าวงจรอาร์มาเจอร์สูงสุด	16	A

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้ เยน เนอ เร มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เป็นโหลดของมอเตอร์ ซึ่ง เยน เนอ เร-มอเตอร์นี้มีรายละเอียดดังนี้คือ

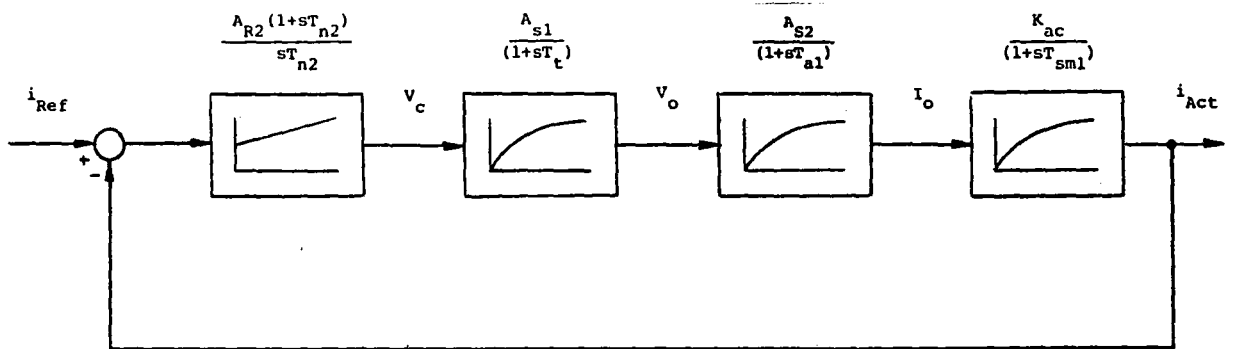
ความเร็วรอบสูงสุด	1,500	RPM
ศักดาไฟฟ้าตรงสูงสุดที่วงจรอาร์มาเจอร์	220	V
ศักดาไฟฟ้าตรงสูงสุดที่วงจรสร้างสนามแม่เหล็ก	220	V
ขนาดกำลังของ เยน เนอ เร มอเตอร์	3	kW
กระแสไฟฟ้าตรงที่ทางออกของวงจรอาร์มาเจอร์สูงสุด	13.6	A

7.3 การออกแบบและทดลองระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์

7.3.1 การออกแบบระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์



(ก)



(ข)

รูปที่ 7.1 (ก) แสดงระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์

(ข) แสดงระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์อย่างง่าย

ระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าในรูปที่ 7.1 (ก) จะมี i_{Ref} เป็นสัญญาณคำสั่งและ E_a เป็นโหลดของลูฟนี้ เมื่อพิจารณาเฉพาะสัญญาณคำสั่งและทำเป็นบล็อกไดอแกรมอย่างง่ายได้ในรูปที่ 7.1 (ข) จากรูปนี้จะแสดงค่าตัวแปรของแต่ละบล็อกไดอแกรมได้คือ

7.3.1.1 ค่าตัวแปรของบล็อกไดอแกรมของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของบล็อกไดอแกรมนี้คือ

$$\frac{V_o(s)}{V_c(s)} = \frac{A_{s1}}{(1 + sT_t)} \quad (7.1)$$

ค่าตัวแปร T_t สามารถหาได้จากสมการ (3.21) คือ

$$T_t = \frac{20 \text{ ms}}{6} = 3.3 \text{ ms} \quad (7.2)$$

ค่าตัวแปร A_{s1} จะเป็นผลคูณของตัวแปรย่อยสองตัวคือ A_{s11} และ A_{s12}

$$A_{s1} = A_{s11} A_{s12} \quad (7.3)$$

A_{s11} เป็นความสัมพันธ์ศักดาไฟฟ้าควบคุมกับมุมกระตุ้นของวงจรสร้างสัญญาณกระตุ้น ซึ่งจากรูปที่ 6.12 จะได้ความสัมพันธ์คือ

$$A_{s11} = \frac{180^\circ}{10 \text{ V}} = 18^\circ/\text{V} \quad (7.4)$$

และ A_{s12} เป็นความสัมพันธ์ของมุมกระตุ้นกับศักดาไฟฟ้าที่ทางออกของวงจรกำลัง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.6 และสมการที่ (3.19) จะได้ค่าความสัมพันธ์สูงสุดคือ

$$A_{s12} = 5.18 \text{ V/}^\circ \quad (7.5)$$

ดังนั้นตัวแปร A_{s1} จึงมีค่าเป็น

$$A_{s1} = A_{s11} A_{s12} = 93.29 \quad (7.6)$$

7.3.1.2 ค่าตัวแปรของบล็อกไดอานแกรมของวงจรอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์

ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก

ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของบล็อกไดอานแกรมนี้คือ

$$\frac{I_o(s)}{V_o(s)} = \frac{A_{s2}}{(1 + sT_{a1})} \quad (7.7)$$

ค่าตัวแปร T_a เป็นค่าเวลาคงที่ของวงจรอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ร่วมกับค่าเวลาคงที่ของอินดักเตอร์ L_d ซึ่งค่านี้ได้จากการทดลอง และผลจากการทดลองจะได้ค่าของ T_a คือ

$$T_{a1} = 330 \text{ ms} \quad (7.8)$$

และค่าของ A_{s2} คือ

$$A_{s2} = \frac{1}{R_t} = 0.710 \text{ ๖} \quad (7.9)$$

7.3.1.3 ค่าตัวแปรของบล็อกไดอแกรมของระบบวัดกระแสไฟฟ้าไหลเข้า

วงจรอาร์มาเจอร์

ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของบล็อกไดอแกรมนี้คือ

$$\frac{i_{Act}(s)}{I_o(s)} = \frac{K_{ac}}{1 + sT_{sml}} \quad (7.10)$$

ค่าตัวแปร T_{sml} เป็นค่าเวลาคงที่ของวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านของระบบวัดกระแสไฟฟ้าซึ่งในระบบที่สร้างขึ้นจะมีค่าเป็น

$$T_{sml} = 2 \text{ ms} \quad (7.11)$$

ค่าตัวแปร K_{ac} เป็นความสัมพันธ์ของสัญญาณแทนกระแสไฟฟ้าจริงกับกระแสไฟฟ้าจริง ซึ่งมีค่าคือ

$$K_{ac} = 0.625 \text{ V/A} \quad (7.12)$$

จากหัวข้อ (7.3.1.1), (7.3.1.2) และ (7.3.1.3) สามารถคำนวณอัตราขยายของ ลูป (Loop-gain) ได้คือ

$$A_T = A_{s1} A_{s2} K_{ac} = 41.4 \quad (7.13)$$

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับรูปที่ 6.6 กับรูปที่ 7.1 (ข) จะได้ความสัมพันธ์คือ

$$T_1 = T_{a1} = 330 \text{ ms} \quad (7.14)$$

$$T_e = T_{sm1} + T_t = 3.3 \text{ ms} + 2 \text{ ms} = 5.3 \text{ ms} \quad (7.15)$$

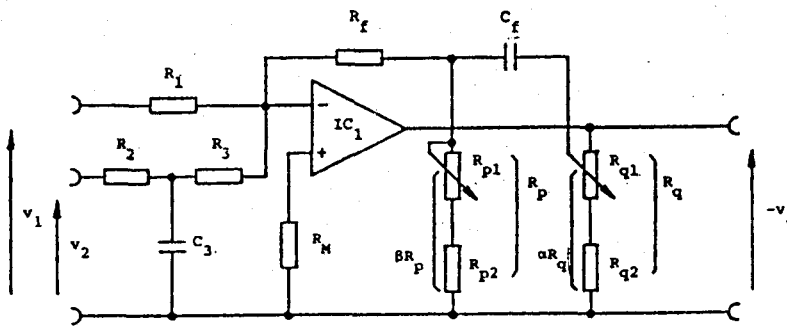
$$A_S = A_T = 41.4 \quad (7.16)$$

ดังนั้นจากหัวข้อ 6.3.2 และสมการ (6.38) และ (6.39) สามารถคำนวณตัวแปรของ
วงจรควบคุมได้คือ

$$T_n = 4 \times 5.3 \text{ ms} \frac{330 \text{ ms}}{330 \text{ ms} + 3 \times 5.3 \text{ ms}} = 20.2 \text{ ms} \quad (7.17)$$

และ

$$A_R = \frac{330 \text{ ms}}{2 \times 41.4 \times 5.3 \text{ ms}} = 0.75 \quad (7.18)$$



รูปที่ 7.2 แสดงวงจรควบคุมซึ่งใช้ในการทดลอง

วงจรควบคุมในรูปที่ 7.2 จะทำงานได้สองกรณีคือ เป็นวงจรควบคุมชนิด PI และ R_2 , R_3 , C_3 จะประกอบกันเป็นวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านด้วย โดยที่ V_1 เป็นสัญญาณจากคำสั่ง และ V_2 เป็นสัญญาณจากการวัดตัวแปรที่ต้องการควบคุม การคำนวณค่าอุปกรณ์ในวงจรนี้เริ่มต้นโดยกำหนดให้

$$R_1 = 44 \text{ k}\Omega \quad (7.19)$$

และถ้าให้

$$\alpha = 0.5 \quad (7.20)$$

ดังนั้นจากสมการ (6.43), (7.19) และ (7.20) สามารถคำนวณค่า R_f ได้คือ

$$R_f = 0.75 \times 0.5 \times 44 \text{ k}\Omega = 16.5 \text{ k}\Omega \quad (7.21)$$

ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ $R_f = 18 \text{ k}\Omega$ และ $R_q = 1.1 \text{ k}\Omega$ โดยที่ $R_{q1} = 1 \text{ k}\Omega$ และ $R_{q2} = 100 \Omega$ ซึ่งทำให้เงื่อนไขดังในสมการ (6.45) เป็นจริงและทำให้พิสัยของ A_R เป็น

$$0.40 \leq A_R \leq 4.5 \quad \left| \quad 0.09 \leq \alpha \leq 1 \right. \quad (7.22)$$

และจากสมการ (6.44) ถ้ากำหนดให้

$$\beta = 0.5 \quad (7.23)$$

และ

$$R_p = 520 \text{ k}\Omega \quad (7.24)$$

ซึ่งค่าของ R_p นี้ทำให้สมการ (6.46) เป็นจริง จะสามารถคำนวณค่า C_f ได้จากสมการที่ (6.44) คือ

$$C_f = 20.2 \text{ ms} \frac{18 \text{ k}\Omega + 0.5 \times 520 \text{ k}\Omega}{0.5 \times 18 \text{ k}\Omega \times 520 \text{ k}\Omega} = 1.19 \text{ }\mu\text{F} \quad (7.25)$$

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ $C_f = 1.22 \text{ }\mu\text{F}$, $R_{p2} = 51 \text{ k}\Omega$ และ $R_{p1} = 470 \text{ k}\Omega$ จึงทำให้พิสัยของ $T_{n\beta}$ คือ

$$13 \text{ ms} \leq T_{n\beta} \leq 21.12 \text{ ms} \quad \left| \quad 0.098 \leq \beta \leq 1 \right. \quad (7.26)$$

วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านในวงจรควบคุมนี้จะประกอบด้วย R_2 , R_3 และ C_3 ถ้ากำหนดให้

$$R_2 = R_3 = 22 \text{ k}\Omega \quad (7.27)$$

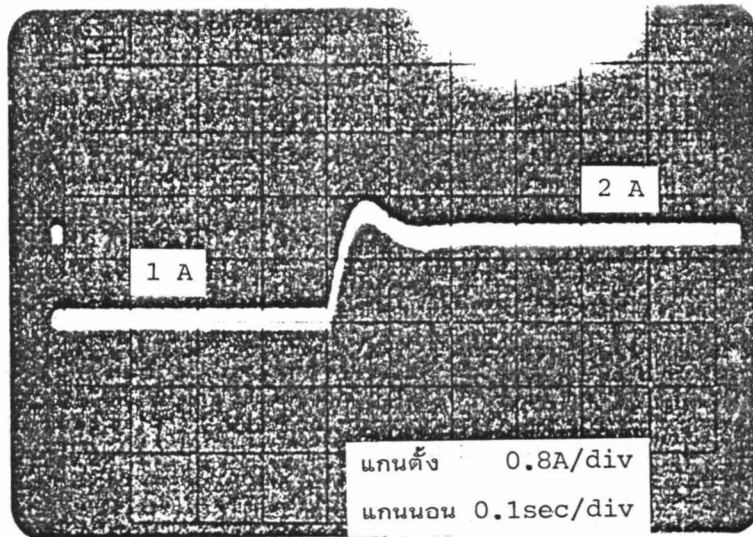
จากสมการ (5.6) และ (7.11) สามารถคำนวณค่า C_3 คือ

$$C_3 = 2 \text{ ms} \frac{22 \text{ k}\Omega + 22 \text{ k}\Omega}{22 \text{ k}\Omega \times 22 \text{ k}\Omega} = 0.18 \text{ }\mu\text{F} \quad (7.28)$$

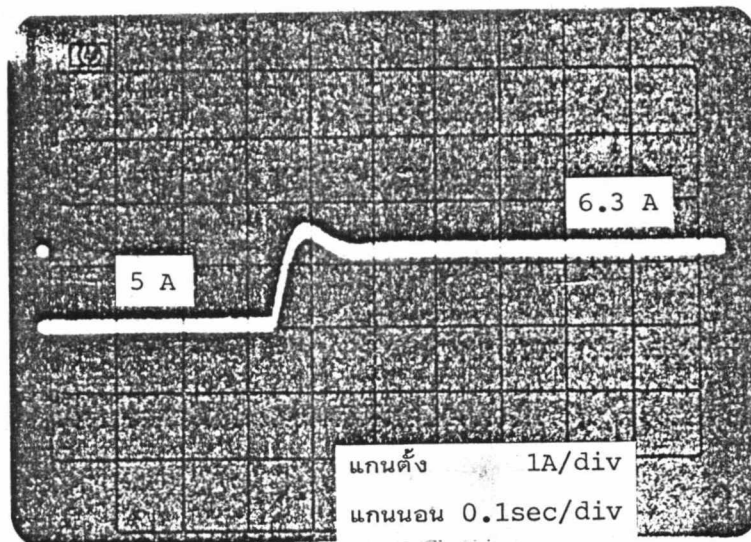
7.3.2 การทดลองและผลการทดลองระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจร

อาร์มาเจอร์

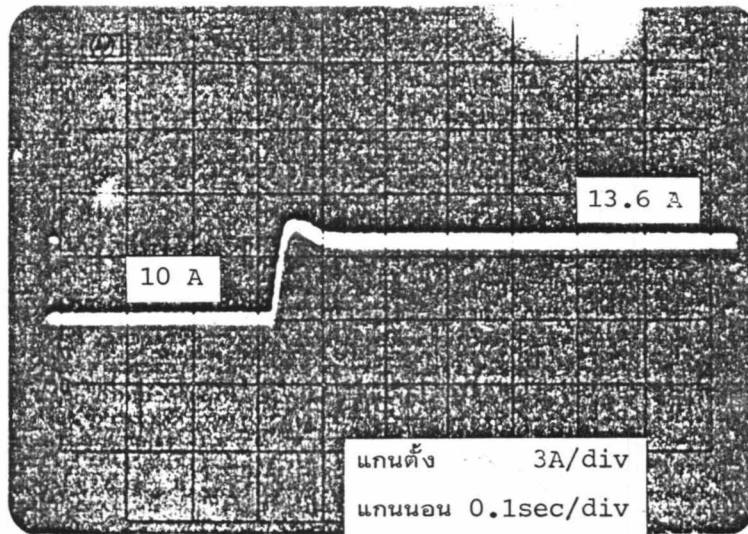
การทดลองระบบควบคุมกระแสไฟฟ้านี้จะทดลองดูผลการตอบสนองของระบบต่อการได้รับ
คำสั่งในทันทีทันใด ซึ่งในการทดลองลักษณะเช่นนี้จะไม่พิจารณาผลของโหลด ดังนั้นในการทดลองนี้จะลัด-
โรเตอร์ของมอเตอร์ให้หยุดนิ่งแล้วจึงทำการทดลองโดยให้คำสั่งในทันทีทันใด รูปที่ 7.1 (ก) แสดงระบบ-
ซึ่งทำการทดลอง และรูปที่ 7.3 แสดงผลการทดลองที่คำสั่งต่างกัน



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 7.3 แสดงการตอบสนองของระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าตรงโหลดเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ เมื่อได้รับคำสั่งในทันทีที่ทันใดและไรเตอร์ของมอเตอร์ถูกล็อคไว้ (ก) เมื่อได้รับคำสั่งเพิ่มกระแสไฟฟ้าจาก 1 A ไปยัง 2 A
 (ข) เมื่อได้รับคำสั่งเพิ่มกระแสไฟฟ้าจาก 5 A ไปยัง 6.3 A
 (ค) เมื่อได้รับคำสั่งเพิ่มกระแสไฟฟ้าจาก 10 A ไปยัง 13.6 A

7.3.3 วิจัยผลลัพธ์การทดลองระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์

เนื่องจากระบบควบคุมนี้ได้ถูกปรับแต่งให้ทำงานได้ดีที่สุดที่อัตราขยายของลูฟสูงสุด คือที่กระแสไฟฟ้าน้อย ๆ ดังนั้นในรูปที่ 7.3 (ก) จึงแสดงการตอบสนองของระบบเมื่อระบบทำงานดีที่สุดเพราะที่ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่อัตราขยายของลูฟจะมีค่าสูงสุด จากผลการทดลองได้ $\text{Overshoot} = 34\%$, $t_r = 25 \text{ ms}$ และ $t_s = 200 \text{ ms}$ ผลการทดลองจะได้ใกล้เคียงกับการคำนวณในรูปที่ 6.5 ส่วนผลการทดลองในรูปที่ 7.3 (ข) และ (ค) จะเป็นผลการทดลองที่ค่าสั่งต่าง ๆ กัน เพื่อทดลองคุณสมบัติการทำงานของระบบ จากผลการทดลองทั้งหมดจะสังเกตได้ว่า ระบบนี้สามารถตอบสนองต่อคำสั่งได้ตามต้องการ แต่ที่มีการผิดพลาดเกิดขึ้น เนื่องจากในการคำนวณค่าเวลาหน่วงของอุปกรณ์บางส่วนไม่ได้นำมาใช้ประกอบการคำนวณด้วย

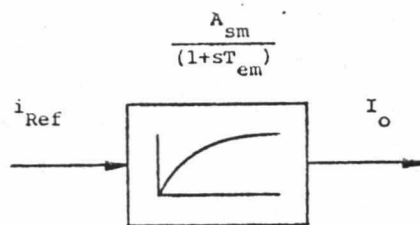
7.4 การออกแบบและทดลองระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

7.4.1 การออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

ในรูปที่ 6.15 แสดงบล็อกไดอะแกรมรวมของระบบควบคุมความเร็วรอบ ในระบบนี้จะมีระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์เป็นลูฟภายใน ซึ่งลูฟภายในนี้เมื่อถูกออกแบบให้ทำงานดีที่สุดแล้วสามารถเขียนแทนด้วยบล็อกไดอะแกรมหนึ่งบล็อก รูปที่ 7.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ โดยที่ A_{sm} เป็นอัตราขยายของระบบและ T_{em} เป็นค่าเวลาคงที่ของระบบซึ่งมีค่าคือ [5]

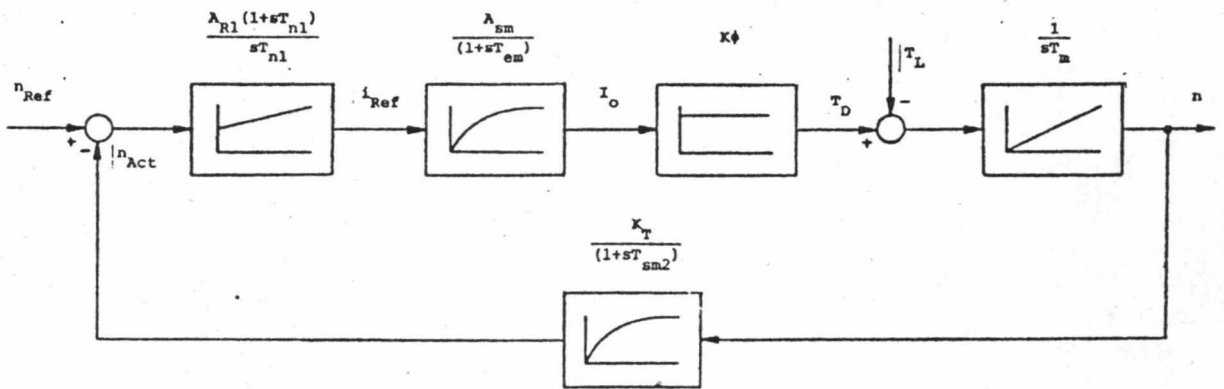
$$T_{em} = 4T_e \quad (7.29)$$

ค่า T_e ในสมการนี้ได้จากการคำนวณของสมการ (7.15)

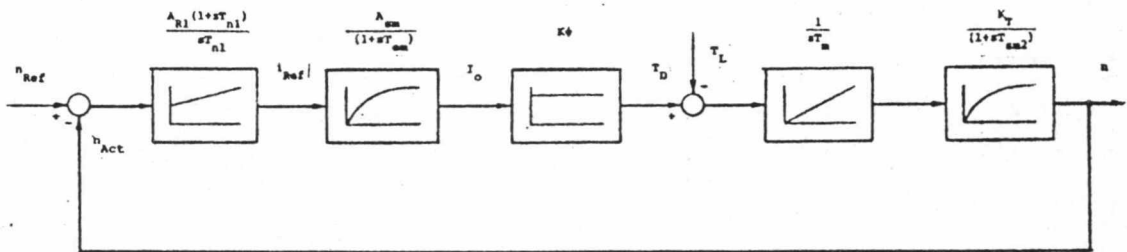


รูปที่ 7.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์

ดังนั้น เมื่อนำบล็อกไดอแกรมในรูปที่ 7.4 เขียนแทนลงในรูปที่ 6.15 สามารถแสดงบล็อกไดอแกรมของระบบควบคุมความเร็วรอบใหม่ดังในรูปที่ 7.5 (ก) และรูปที่ 7.5 (ข) แสดงบล็อกไดอแกรมของระบบนี้อย่างง่ายเมื่อพิจารณาเฉพาะกรณีที่ได้รับคำสั่ง n_{Ref}



(ก)



(ข)

รูปที่ 7.5 (ก) แสดงบล็อกไดอแกรมของระบบควบคุมความเร็วรอบ (ข) แสดงบล็อกไดอแกรมอย่างง่ายของรูปที่ 7.5 (ก) เมื่อพิจารณาเฉพาะที่ได้รับคำสั่ง n_{Ref}

การออกแบบวงจรควบคุมเริ่มต้นโดยพิจารณาเปรียบเทียบกับรูปที่ 7.5 (ข) กับรูปที่ 6.4 ซึ่งจะ

ได้ความสัมพันธ์คือ

$$T_o = T_m = 1 \text{ s} \quad (7.30)$$

(ค่า T_m ได้จากการทดลอง) และ

$$T_e = T_{em} + T_{sm2} \quad (7.31)$$

ค่า T_{sm2} เป็นค่าเวลาคงที่ของวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ค่า 5 ms และ T_{em} เป็นค่าเวลาคงที่ของระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าตรงโวลต์เข้าวงจรอาร์มาเจอร์ ซึ่งได้จากสมการ (7.29) คือ 21.2 ms ดังนั้นค่า T_e ในสมการ (7.31) คือ

$$T_e = 21.2 \text{ ms} + 5 \text{ ms} = 26.2 \text{ ms} \quad (7.32)$$

อัตราขยายของลูฟควบคุมความเร็วรอบ สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างศักดาไฟฟ้าควบคุมสูงสุด ซึ่งทำให้ระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าควบคุมให้กระแสไฟฟ้าตรงโวลต์เข้าวงจรอาร์มาเจอร์สูงสุดกับศักดาไฟฟ้า ซึ่งแทนความเร็วรอบของมอเตอร์เมื่อมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วสูงสุด และเนื่องจากวงจรควบคุมที่สร้างคือ ถูกกำหนดให้ศักดาไฟฟ้า 10 โวลต์ เป็นศักดาไฟฟ้าสูงสุด ดังนั้นอัตราขยายของลูฟคือ

$$A_s = \frac{n_{Act}}{i_{Ref}} = \frac{10}{10} = 1 \quad (7.33)$$

ดังนั้นจากหัวข้อ 6.3.1 และสมการ (6.23), (6.24) สามารถคำนวณตัวแปรของวงจรควบคุมได้คือ

$$T_n = 4T_e = 4 \times 26.2 \text{ ms} = 104.8 \text{ ms} \quad (7.34)$$

$$A_R = T_o / 2A_s T_e = \frac{1000 \text{ ms}}{2 \times 1 + 26.2 \text{ ms}} = 19.08 \quad (7.35)$$

วงจรควบคุมซึ่งจะใช้เช่นเดียวกับในรูปที่ 7.2 ซึ่งถ้ากำหนดให้

$$R_1 = 44 \text{ k}\Omega \quad (7.36)$$

และถ้าให้

$$\alpha = 0.5 \quad (7.37)$$

ดังนั้นจากสมการ (6.43), (7.36) และ (7.32) สามารถคำนวณ R_f ได้คือ

$$R_f = 19.08 \times 0.5 \times 44 \text{ k}\Omega = 420 \text{ k}\Omega \quad (7.38)$$

ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ $R_f = 390 \text{ k}\Omega$ โดยที่กำหนดให้ $R_{q1} = 2 \text{ k}\Omega$ และ $R_{q2} = 1 \text{ k}\Omega$ ซึ่งทำให้เงื่อนไขดังในสมการ (6.45) เป็นจริงและทำให้พิสัยของ A_R เป็น

$$8.8 \leq A_R \leq 26.5 \quad \left| \quad 0.3 \leq \alpha \leq 1 \right. \quad (7.39)$$

และจากสมการ (6.44) ถ้ากำหนดให้

$$\beta = 0.5 \quad (7.40)$$

และ

$$R_p = 530 \text{ k}\Omega \quad (7.41)$$

ซึ่งค่าของ R_p นี้ทำให้สมการ (6.46) เป็นจริง จะสามารถคำนวณค่า C_f ได้จากสมการที่ (6.44) คือ

$$C_f = 104.8 \text{ ms} \frac{390 \text{ k}\Omega + 0.5 \times 530 \text{ k}\Omega}{0.5 \times 390 \text{ k}\Omega \times 530 \text{ k}\Omega} = 6.3 \text{ }\mu\text{F} \quad (7.42)$$

ในวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ $C_f = 5 \text{ }\mu\text{F}$, $R_{p2} = 20 \text{ k}\Omega$ และ $R_{p1} = 510 \text{ k}\Omega$ ซึ่งจะทำให้พิสัยของ $T_{n\beta}$ คือ

$$95 \text{ ms} \leq T_{n\beta} \leq 1 \text{ s} \quad \left| \quad 0.037 \leq \beta \leq 1 \right. \quad (7.43)$$

วงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำผ่านในวงจรควบคุมของระบบควบคุมความเร็วรอบนี้ประกอบด้วย

R_2 , R_3 และ C_3

ถ้ากำหนดให้

$$R_2 = R_3 = 22 \text{ k}\Omega \quad (7.44)$$

จากสมการ (5.6) และถ้าเวลาคงที่ต้องการคือ 5 ms สามารถคำนวณค่า C_3 คือ

$$C_3 = 5 \text{ ms} \frac{22 \text{ k}\Omega + 22 \text{ k}\Omega}{22 \text{ k}\Omega \times 22 \text{ k}\Omega} = 0.45 \text{ }\mu\text{F} \quad (7.45)$$

ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ค่า $C_3 = 0.47 \text{ }\mu\text{F}$

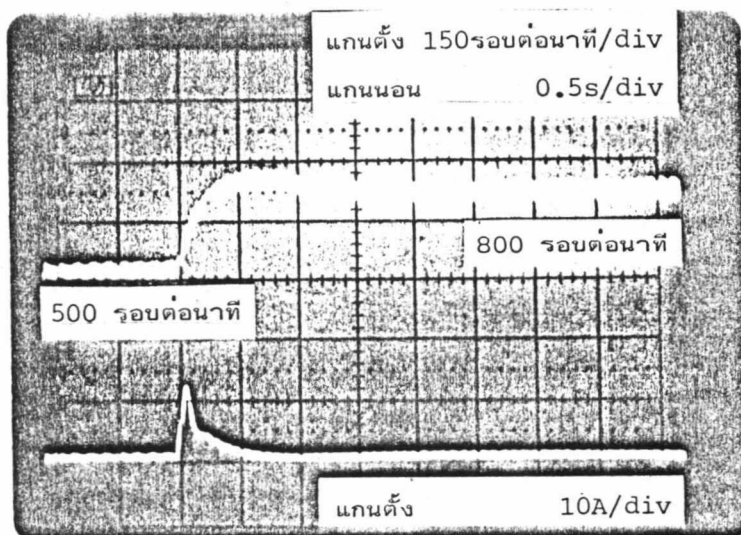
7.4.2 การทดลองและผลการทดลองระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

ระบบควบคุมความเร็วรอบที่สร้างขึ้นจะถูกทดลองเป็นสามกรณีคือ

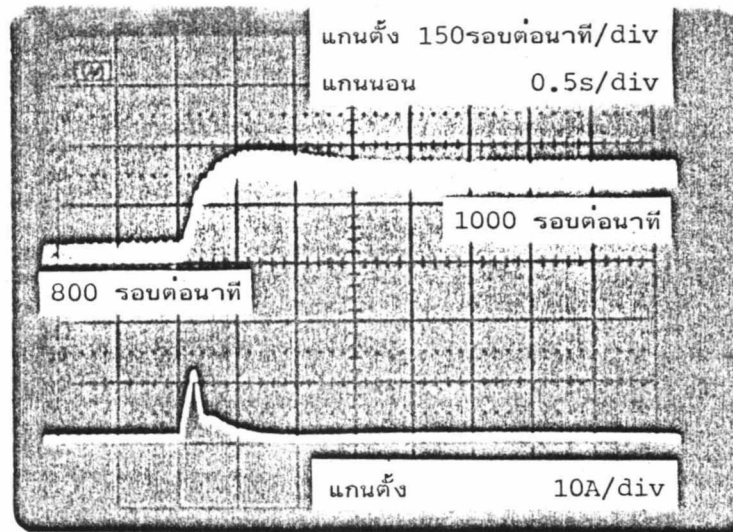
7.4.2.1 การทดลอง เมื่อระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ได้รับคำสั่งใน

ทันทีทันใด

การทดลองนี้จะทำการทดลอง เมื่อมอเตอร์ไม่มีโหลด และระบบได้รับคำสั่งให้เพิ่มความเร็วรอบของมอเตอร์อย่างทันทีทันใด ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 7.6 โดยที่รูปที่ 7.6 (ก) แสดงผลของความเร็วรอบมอเตอร์ในการฟรอปน เมื่อระบบได้รับคำสั่งในทันทีทันใดให้เพิ่มความเร็วของมอเตอร์จาก 500 รอบต่อนาทีไปยัง 800 รอบต่อนาที และรูปด้านล่างแสดงกระแสไฟฟ้าตรงที่ไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ ส่วนในรูปที่ 7.6 (ข) เป็นในกรณีที่ได้รับคำสั่งในทันทีทันใดให้เพิ่มความเร็วรอบมอเตอร์จาก 800 รอบต่อนาทีไปยัง 1,000 รอบต่อนาที



(ก)



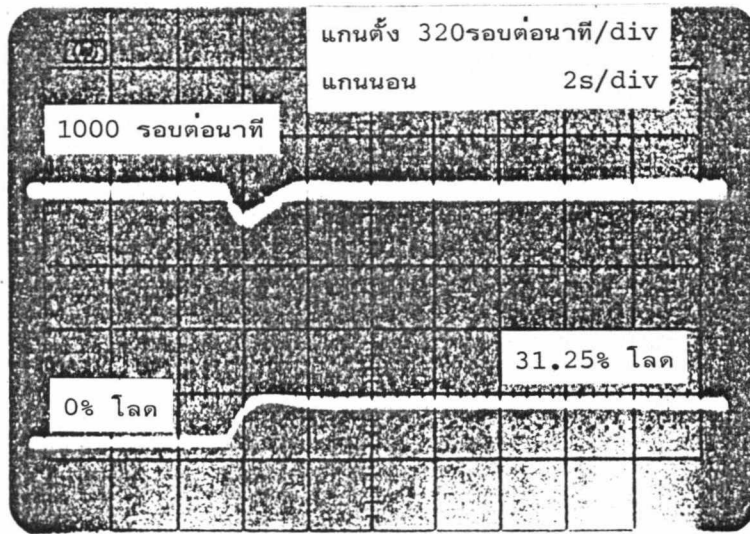
(ข)

รูปที่ 7.6 แสดงความเร็วรอบมอเตอร์ในกราฟรูปบนและแสดงกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ในกราฟรูปล่างเมื่อระบบควบคุมความเร็วรอบได้รับคำสั่งในทันทีทันใด โดยที่ (ก) ได้รับคำสั่งเพิ่มความเร็วรอบจาก 500 รอบต่อนาที ไปยัง 800 รอบต่อนาที (ข) ได้รับคำสั่งเพิ่มความเร็วรอบจาก 800 รอบต่อนาที ไปยัง 1,000 รอบต่อนาที

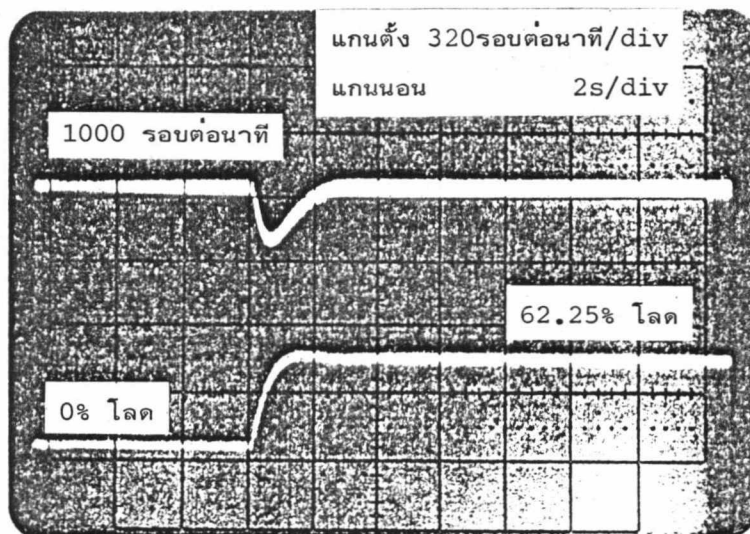
7.4.2.2 การทดลองเมื่อระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ได้รับโหลดใน

ทันทีทันใด

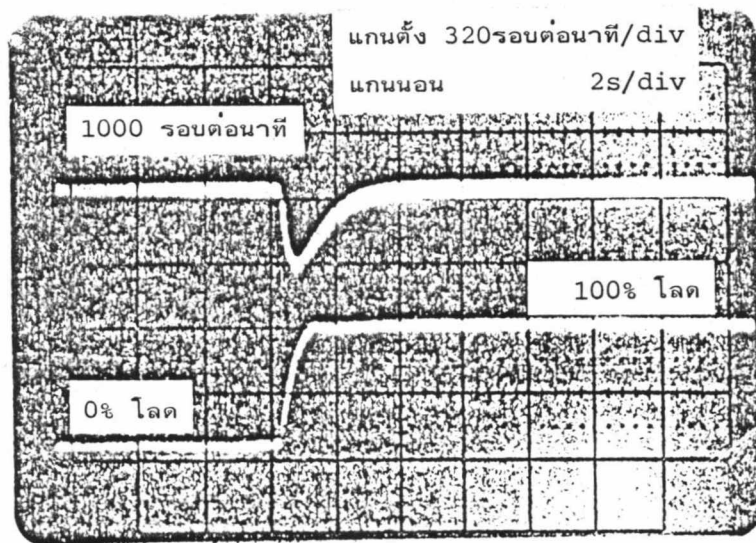
การทดลองนี้ทำการทดลองโดยให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที แล้วเพิ่มโหลดให้กับระบบในทันทีทันใด ผลการทดลองนี้แสดงในรูป 7.7 โดยที่รูปที่ 7.7 (ก) แสดงผลของความเร็วรอบมอเตอร์ในกราฟรูปบนและกราฟรูปล่างแสดงขนาดของโหลด เมื่อมอเตอร์ได้รับโหลดทันทีทันใด 31.25 % ของพิกัดโหลด ในรูปที่ 7.7 (ข) เมื่อมอเตอร์ได้รับโหลดในทันทีทันใด 62.25 % ของพิกัดโหลด และในรูปที่ 7.7 (ค) เมื่อมอเตอร์ได้รับโหลดในทันทีทันใด 100 % ของพิกัดโหลด



(n)



(ข)



(ค)

รูปที่ 7.7 แสดงความเร็วรอบมอเตอร์ในกราฟรูปบนและแสดงปริมาณโหลดในกราฟรูปล่าง เมื่อระบบควบคุมได้รับโหลดในทันทีทันใด โดยที่ (ก) เมื่อมอเตอร์ได้รับโหลด 31.25 % ของพิกัดโหลด (ข) เมื่อมอเตอร์ได้รับโหลด 62.25 % ของพิกัดโหลด และ (ค) เมื่อมอเตอร์ได้รับโหลด 100 % ของพิกัดโหลด

7.4.3 วิจารณ์ผลการทดลองระบบควบคุมความเร็วรอบ

ในการทดลองแรกซึ่งเป็นการทดลองให้ระบบได้รับคำสั่งในทันทีทันใด โดยที่มอเตอร์อยู่ในสถานะไม่มีโหลด ผลการทดลองวัด Overshoot ได้ 35 % และ $t_r = 250$ ms ทั้งสองกรณี การทดลองนี้สังเกตได้ว่าผลการทดลองแตกต่างจากการคำนวณในบทที่ 6 ไปบ้าง ทั้งนี้เพราะว่าค่าเวลาคงที่ของอุปกรณ์นั้นได้มากจากการประมาณค่า และในการคำนวณอุปกรณ์บางอย่างไม่ได้ทำค่าเวลาคงที่ของอุปกรณ์นั้นมาประกอบการคำนวณด้วย การทดลองที่สองเป็นการทดลองเมื่อระบบได้รับโหลดในทันทีทันใด ผลการทดลองได้แสดงในรูปที่ 7.7 ซึ่งทั้งสามกรณีแสดงความสามารถของระบบเมื่อมอเตอร์ได้รับโหลด ในกรณีที่มอเตอร์ได้รับโหลดเต็มพิกัด ระบบสามารถทำให้มอเตอร์กลับไปหมุนที่ความเร็วรอบเดิมได้ภายใน 2 วินาที

7.5 บทสรุป

บทนี้ได้อธิบายถึงการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบ วิธีการทดลอง และในตอนท้ายได้สรุปผลการทดลองแต่ละการทดลองไว้ด้วย ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวได้แสดงถึงประสิทธิภาพของระบบที่สร้างขึ้น

บทที่ 8

บทสรุป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้แสดงการออกแบบ และสร้างระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดกระตุ้นแยก โดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังทำหน้าที่ขับมอเตอร์ และมีระบบควบคุมสองระบบทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบ ซึ่งทั้งสองระบบประกอบด้วย ระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าตรงไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์เป็นระบบควบคุมภายใน และระบบควบคุมความเร็วรอบ เป็นระบบควบคุมภายนอก วงจรควบคุมออกแบบโดยใช้วงจรควบคุมอนาล็อกชนิด PI ซึ่งมีคุณสมบัติสามารถทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าเป็นศูนย์ จากผลการทดลองระบบที่สร้างขึ้นสามารถสังเกตได้ว่า ถึงแม้ผลการทดลองมีข้อแตกต่างจากการคำนวณบ้างแต่ก็ไม่มากนัก ทั้งนี้เพราะว่าในการคำนวณบางจุดจะใช้วิธีการคำนวณโดยประมาณ แต่ถึงอย่างไรก็ดีเมื่อพิจารณาความต้องการหลักของระบบนี้คือ ระบบจะต้องสามารถรักษาความเร็วรอบที่ต้องการได้ถึงแม้ว่าโหลดของระบบเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจากผลการทดลองเพิ่มโหลดให้กับระบบในทันทีทันใด 31.25 %, 62.25 % และ 100 % ของพิกัดโหลด ระบบก็ยังคงสามารถรักษาความเร็วรอบที่ต้องการได้ในเวลาอันรวดเร็ว ก็สามารถสรุปผลได้ว่า การทำงานของระบบนี้เป็นที่น่าพอใจ โดยเฉพาะเมื่อเปรียบการทำงานกับระบบ Ward-Leonard ระบบนี้สามารถตอบสนองต่อการทำงานเร็วกว่ามาก

อย่างไรก็ดีระบบที่สร้างขึ้นที่มีข้อจำกัดบางประการคือ L_d มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก ทั้งนี้เพราะว่าต้องการให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าวงจรอาร์มาเจอร์ไหลอย่างต่อเนื่อง เพื่อที่จะทำให้การออกแบบวงจรควบคุมได้ง่าย แนวทางแก้ไขสามารถทำได้คือ ไม่ใช้ L_d ซึ่งจะมีผลทำให้การออกแบบวงจรควบคุมจะต้องใช้วงจรควบคุมชนิดที่สามารถปรับค่าตัวแปรภายในตัวเองได้ โดยปรับค่าตัวแปรไปตามคุณสมบัติของระบบ เพื่อที่จะได้ระบบซึ่งทำงานได้ดีที่สุด นอกจากนี้ L_d จะมีผลทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ลดลงไปในเวลาชั่วขณะมาก เมื่อมอเตอร์ได้รับโหลดในทันทีทันใดในเวลานั้น ทั้งนี้เพราะ เกิดศักดาไฟฟ้าตกคร่อม L_d ซึ่งการลดค่า L_d จะสามารถช่วยแก้ปัญหานี้ได้เช่นกัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.วิศณุ พงศ์พิพัฒน์ เป็นอย่างสูงยิ่ง ที่ท่านได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้แก่ผู้เขียน ตลอดจนให้คำปรึกษาแนะนำ และช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ มาโดยตลอดจนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.โยธิน เปรมปราชญ์ รัชต์ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำในบางเรื่อง ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.วิวัฒน์ กิรานนท์ และ อาจารย์ ดร.จเร สุรวัฒนปัญญา ซึ่งช่วยในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับร่าง ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ให้อุปกรณ์เครื่องมือในการทดลอง ขอขอบคุณคุณวรศักดิ์ จิตรภักดี ที่ช่วยในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณ คุณวันเพ็ญ พ่วงเขียว ที่ช่วยพิมพ์ต้นฉบับวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้สิ่งที่สำคัญที่สุดคือ ขอขอบพระคุณ คุณแม่ของข้าพเจ้าที่ให้ทุนในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] P.C. Sen, "THYRISTOR DC DRIVES", John Wiley & Sons, Inc., 1981.
- [2] S.B. Dewan and A. Stranughen, "POWER SEMICONDUCTOR CIRCUITS", John Wiley & Sons, Inc., 1975.
- [3] Cyril W. Lander, "POWER ELECTRONICS", McGRAW-HILL Book Company (UK) LTD, 1981.
- [4] R.K. Sugandhi and K.K. Sugandhi, "THYRISTORS THEORY AND APPLICATIONS", Wiley Eastern LTD, 1981.
- [5] Friedrich Fröhr and Fritz Ortteneburger, "INTRODUCTION TO ELECTRONIC CONTROL ENGINEERING", Siemens Aktiengesellschaft Heyden & Son LTD, 1982.
- [6] Equipment of Research Laboratories and Training Center . E48, Siemens Aktiengesellschaft, 1978.
- [7] David F. Stout and Milton Kanfman, "HANDBOOK OF OPERATIONAL AMPLIFIER CIRCUIT DESIGN", McGRAW-HILL Book Company, 1976.
- [8] John J. D'Azzo and Constantine H. Houpis, "LINEAR CONTROL SYSTEM ANALYSIS AND DESIGN CONVENTIONAL AND MODERN", McGRAW-HILL INC, 1975.
- [9] Gunnar Kronborg, "INDUSTRIAL D.C. MOTOR DRIVES", ASEA JOURNAL 1975, Vol 48, No 5.
- [10] David Finney, "THE POWER THYRISTOR AND ITS APPLICATION", McGRAW-HILL Book Company (UK) LTD, 1980.
- [11] T. Krishan and B. Ramaswami, "SPEED CONTROL OF D.C. MOTOR USING THYRISTOR DUAL CONVERTER", IEEE Trans. Ind. Elec. and Cont. Inst., Vol. IECT-23, No. 4, 1976.

ภาคผนวก ก

รายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในแต่ละวงจร

ก.1 รายละเอียดอุปกรณ์ในแผนผังวงจรในรูปที่ 3.8 (ก)

T_1, T_2, T_3 หม้อแปลงศักดาไฟฟ้าสลับ 220 V/35 V

R_1, R_2, R_3 ความต้านทานชนิดปรับค่าได้ 10 k Ω

C_1, C_2, C_3 330 nF

ก.2 รายละเอียดอุปกรณ์ในแผนผังวงจรในรูปที่ 3.9 (ก)

IC_1 TCA 780

R_1 56 k Ω

R_2 15 k Ω

R_3 50 k Ω

R_4 22 k Ω

R_5 ความต้านทานชนิดปรับค่าได้ 100 k Ω

C_1, C_2 22 nF

C_3 1 nF

C_4 0.047 μ F

D_1, D_2 ไดโอด 1N4002

V_S 15 V DC

ก.3 รายละเอียดอุปกรณ์ในแผนผังวงจรในรูปที่ 3.11 (ก)

T_1 หม้อแปลงสัญญาณพัลส์

Tr_1 2N3053

R_1, R_2 270 Ω

R_3 1 k Ω

R_4 15 Ω

R_5 47 Ω

R_6 20 Ω

D_1, D_2, D_3, D_4 ไดโอด 1N4148

Z_1 เซนเซอร์ไดโอด 15 V

C_1 3.3 μ F 50 V

V_S 24 V DC

ก.4 รายละเอียดอุปกรณ์ในแผนผังวงจรในรูปที่ 6.14

IC_1 LM 324

C_1 5 pF

D_1, D_2, D_3, D_4 ไดโอด 1N4148

R_1, R_5 15 k Ω

R_2, R_3 ความต้านทานชนิดปรับค่าได้ 10 k Ω

$R_4, R_6, R_7, R_8, R_9, R_{10}, R_{11}, R_{12}$ 10 k Ω

ก.5 คู่มือการใช้ IC TCA 780

Phase Control

TCA 780; D

Phase control, intended to control thyristors, triacs and transistors. The trigger pulses can be shifted within the phase angle of 0° and 180° el.

The output current is 50 mA. The selection TCA 780 D is available for applications up to 100 mA. Typical application includes converter circuits, ac controller and anti-ductor.

- Reliable recognition of zero passage
- Large application field
- May be used as zero point switch
- LSL compatible
- Threephase operation possible (3 ICs)

Type	Ordering code	Package outlines
TCA 780	Q67000-A1087	} DIP 16
TCA 780 D	Q67000-A1087-E10	

Maximum ratings

Supply voltage	V_S	18	V
Max. output current pin 14, 15	I_O	55	mA
Inhibit voltage	V_6	V_S	V
Control voltage	V_{11}	V_S-2	V
Pulse control voltage	V_{13}	V_S	V
Synchronization input current	I_5	200	μA
Max. output voltage at pin 14,15	V_O	V_S	V
Junction temperature	T_j	150	°C
Storage temperature range	T_s	-40 to 125	°C
Thermal resistance; system - ambient air	R_{thsamb}	120	K/W

Range of operation

Supply voltage	V_S	8 to 18	V
Operating frequency	f	10 to 500	Hz
Ambient temperature	T_{amb}	0 to 70	°C

TCA 780; D

Characteristics

 $V_S = 15\text{ V}$, $T_{\text{amb}} = 0\text{ to }70\text{ }^{\circ}\text{C}$

Open loop supply current consumption

Synchronization pin 5

Input current

Offset voltage

Control input pin 11

Control voltage range

Input resistance

Firing point

Ramp generator

Max. load current

Load current

Ramp voltage

Max. ramp voltage

Saturation voltage at the capacitor

Ramp resistance

Ramp capacitance

Sawtooth return time ($C_{10} = 47\text{ nF}$)

Inhibit pin 6

Outputs inhibited

Outputs enabled

Signal transition time

Input current with $V_6 = 10\text{ V}$ Input current with $V_6 = 1.7\text{ V}$ Pulse control ($180^{\circ} = \alpha$) pin 13

Short pulse at Q

Long pulse at Q

Input current when $V_{13} = 10\text{ V}$ Input current when $V_{13} = 1.7\text{ V}$

Outputs pin 2, 3, 4, 7

Reverse current when $V_Q = V_S = 15\text{ V}$ Saturation voltage when $I_Q = 1.35\text{ mA}$

Outputs pin 14, 15

H-Output voltage

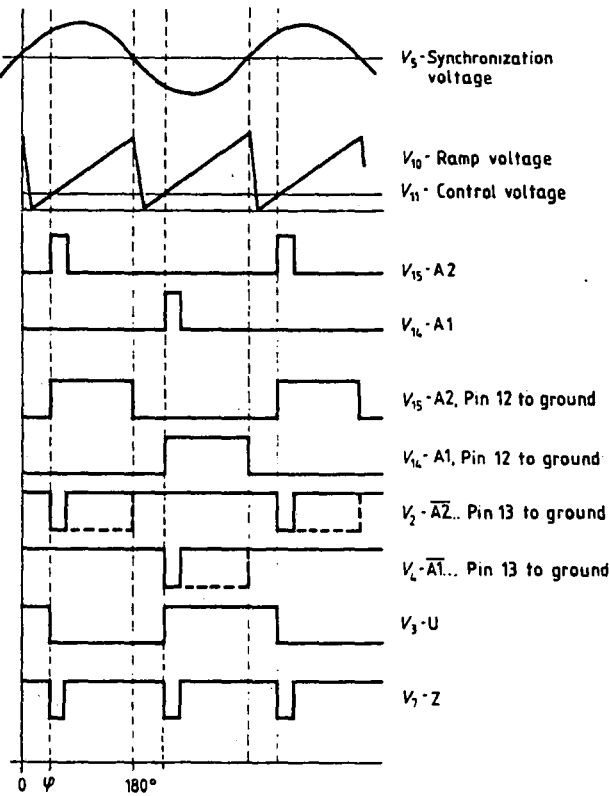
when $-I_Q = 50\text{ mA}$ (TCA 780) $T_{\text{amb}} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ when $-I_Q = 125\text{ mA}$ (TCA 780) $T_{\text{amb}} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ L-Output voltage when $I_Q = 1.35\text{ mA}$ Pulse width (short pulse) without C_{12} Pulse width (short pulse) with C_{12}

	min	typ	max	
I_S		5	10	mA
I_5	1.5		200	μA
ΔV_5		30	75	mV
V_{11}	-0.5		$V_S - 2$	V
R_i		15		k Ω
t_{fir}		$\frac{V_{11} \cdot R_9 \cdot C_{10}}{V_{\text{ref}} \cdot K}$ 3)		
I_{10}	100		20	μA
I_{10}		$\frac{V_{\text{ref}} \cdot K}{R_9}$ 3)		
V_{10}		$\frac{V_{\text{ref}} \cdot K \cdot t}{R_9 \cdot C_{10}}$ 3)		
V_{10}			$V_S - 2$	V
V_{10}			200	mV
R_9	39		200	k Ω
C_{10}			0.1 ⁵⁾	μF
t_i		25		μs
V_{6L}			2	V
V_{6H}	3.5			V
t_r	1		5	μs
I_{6H}			10	μA
I_{6L}			-10	μA
V_{13H}	3.5			V
V_{13L}			2	V
I_{13H}			10	μA
I_{13L}			-10	μA
I_{CEO}			10	μA
V_{sat}			2	V
$V_{14/15H}$	$V_S - 2.5$			V
$V_{14/15L}$			2	V
t_p		30		μs
t_p	400		600	$\mu\text{s/nF}$

3) $K = 1.25$

5) Return times are to be taken into account

Pulse diagram



TCA 780; D

Functional description

The synchronization signal is obtained via a high-ohmic resistance from the mains voltage (voltage V_5). A zero voltage detector evaluates the zero passages and transfers them to the synchronization register.

This synchronization register controls a ramp generator, the capacitor C_{10} of which is charged by a constant current (determined by R_0). If the ramp voltage V_{10} exceeds the control voltage V_{11} (switching point φ) a signal is processed to the logic. Dependent on the magnitude of the control voltage V_{11} , the switching point φ can be shifted within a phase angle of 0° to 180° el.

A positive pulse of approx. 30 μsec duration appears for every halfwave at the outputs A_1 and A_2 . The pulse duration can be prolonged up to 180° via a capacitor C_{12} . If pin 12 is connected to ground, pulses with a duration of φ to 180° will result.

Outputs $\bar{A}_1$ and $\bar{A}_2$ supply the inverse signals of A_1 and A_2 .

A signal of $\varphi + 180^\circ$ which can be used for controlling an external logic that is available at pin 3.

A signal which corresponds to the NOR link of A_1 and A_2 is available at output Z (pin 7).

The inhibit input can be used to block outputs A_1 , A_2 , and $\bar{A}_1$, $\bar{A}_2$.

ภาคผนวก ข

ผลงานวิจัยในระหว่างการศึกษาปริญญาโทที่ได้รับการเผยแพร่ ในการสัมมนาทางวิชาการ
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 6 ณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

เทคนิคการวัดความเร็วของมอเตอร์ในระบบการควบคุมมอเตอร์โดยไมโครคอมพิวเตอร์

นนทวัฒน์ จุลเดชะ

ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์

โยธิน เปรมปราณีรัชต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอวิธีการใหม่ในการวัดความเร็วของมอเตอร์ซึ่งใช้ในระบบการควบคุมมอเตอร์โดยไมโครคอมพิวเตอร์ วิธีการนี้ได้พัฒนาจากวงจรสร้างพัลส์ วงจรนับสัญญาณและไมโครคอมพิวเตอร์ ผลที่ได้จากเทคนิคใหม่นี้สามารถวัดความเร็วของมอเตอร์ในระยะเวลานั้น มีความเที่ยงตรงและความละเอียดสูง ผลการวิเคราะห์จากกรณีศึกษา ค่าความเที่ยงตรงน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วต่ำสุด และ 0.025 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วสูงสุด

Abstract

This paper is to introduce a new method measuring the motor speed using in the system controlled by microcomputer. Its structure is developed from pulse generator circuit, counter circuit and microcomputer. The advantage of this new technique can be used to measure motor in a short period of time with high accuracy and resolution. The case study result appears value of measuring error which is lower 3 percent at lowest speed and 0.025 percent at the limited speed.

บทนำ

ในระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ที่มีความเที่ยงตรง และความละเอียดสูง จำเป็นต้องมีระบบการวัดความเร็วของมอเตอร์ที่มีความเที่ยงตรงและความละเอียดสูง เช่นกัน นอกจากนั้นยังต้อง

ใช้เวลาสั้นในการวัดความเร็ว ในปัจจุบันระบบวัดความเร็วของมอเตอร์ที่ใช้ในระบบที่มีการควบคุมด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ ส่วนมากจะใช้วิธีการสร้างพัลส์จากเอนโคเดอร์ (Encoder) โดยที่ความถี่ของพัลส์เป็นสัดส่วนกับความเร็วของมอเตอร์ ค่าความถี่นั้นจะถูกคำนวณเพื่อหาค่าความเร็วของมอเตอร์ต่อไป

วิธีการคำนวณความเร็วของมอเตอร์ดั้งเดิมมีอยู่ 2 วิธีคือ วิธีการคำนวณแบบแรก (M-method) [1] คำนวณจากจำนวนของพัลส์ในช่วงเวลาที่กำหนดให้ วิธีการคำนวณที่สอง (T-method) [1] คำนวณจากระยะเวลาระหว่างพัลส์สองลูกต่อกัน แต่ในการคำนวณโดยวิธีการแรกค่าความละเอียดและความเที่ยงตรงจะมีค่าต่ำที่ความเร็วต่ำ ๆ และการคำนวณโดยวิธีการหลัง จะมีค่าความเที่ยงตรงและความละเอียดที่ความเร็วสูง ๆ วิธีการคำนวณแบบใหม่ในบทความนี้จะแก้ไขปัญหาข้อเสียในวิธีการคำนวณทั้งสองแบบข้างต้น โดยที่จะมีค่าความละเอียด ความเที่ยงตรงสูง และใช้เวลาในการวัดสั้น วิธีการนี้เรียกว่า M/T-method โดยจะมีวงจรนับสัญญาณสองชุด ชุดแรกนับจากพัลส์ที่ออกจากเอนโคเดอร์ในช่วงเวลาที่ทำการวัด ชุดที่สองนับจำนวนพัลส์ของสัญญาณความถี่คงที่ซึ่งกำหนดในช่วงเวลานั้น แล้วจึงนำจำนวนพัลส์ที่นับได้ทั้งสองชุดมาคำนวณหาความเร็วของมอเตอร์ต่อไป

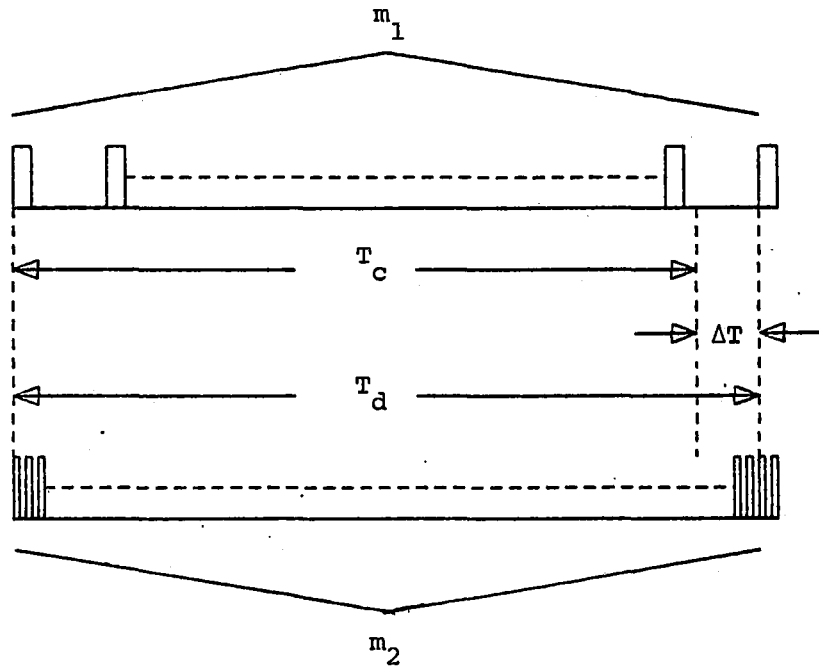
ระบบวัดความเร็ว

ก. คุณสมบัติ

คุณสมบัติที่สำคัญของเทคนิคการวัดความเร็วของมอเตอร์ในระบบควบคุมมอเตอร์โดยใช้ไมโครคอมพิวเตอร์คือ

1. ความละเอียดสูง (High Resolution) ระบบควบคุมมอเตอร์ที่ต้องการพิสัยการควบคุมกว้าง จึงต้องมีระบบวัดความเร็วที่มีความละเอียดสูง
2. ความเที่ยงตรงสูง (High accuracy) ระบบวัดความเร็วที่มีความเที่ยงตรงสูงจะมีผลทำให้ ความเที่ยงตรงในการควบคุมที่จุดสภาวะคงตัว (Steady State) ดี
3. เวลาในการวัดสั้น (Short detecting Time) เนื่องจากค่าความเร็วที่วัดได้ไม่ได้เป็นความเร็วชั่วขณะ แต่เป็นความเร็วเฉลี่ยในช่วงเวลาที่วัด นอกจากนี้ช่วงเวลานี้ยังคงเป็นตัวแปรซึ่งกำหนดคุณสมบัติความเร็วในการตอบสนองของระบบควบคุมมอเตอร์ด้วย ดังนั้นถ้าต้องการให้ระบบควบคุมมอเตอร์มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว ช่วงเวลาที่ใช้วัดควรจะมีค่าต่ำ

หลักการของเทคนิคการวัดความเร็วแบบใหม่ แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงหลักการเทคนิคการวัดความเร็วแบบ M/T-Method

ช่วงเวลาที่ใช้วัด T_d (วินาที) ถูกกำหนดโดยพัลส์ลูกแรกต่อจากช่วงเวลา T_c (วินาที) ที่กำหนด N_f (รอบต่อวินาที) เป็นความเร็วของมอเตอร์ที่วัดได้ และ X (เรเดียน) เป็นระยะทางเชิงมุมที่มอเตอร์เคลื่อนไปในช่วงเวลา T_d ดังนั้นความเร็วของมอเตอร์ที่วัดได้คือ

$$N_f = \frac{60X}{2\pi T_d} = \frac{60X}{2\pi (T_c + \Delta T)} \quad (1)$$

m_1 เป็นจำนวนพัลส์ที่ได้จากมอเตอร์ในช่วงเวลา T_d และเมื่อมอเตอร์หมุนหนึ่งรอบมีจำนวนพัลส์ P พัลส์ นั่นคือ

$$X = \frac{2\pi m_1}{P} \quad (2)$$

สัญญาณความถี่ที่มีความถี่ f_c (Hertz) และสัญญาณนับได้ m_2 ในช่วงเวลา T_d

$$T_d = \frac{m_2}{f_c} \quad (3)$$

แทนค่าสมการ (2), (3) ลงในสมการที่ (1)

$$N_f = \frac{60f_c m_1}{m_2} \quad (4)$$

ข. คุณสมบัติ

พิจารณาคำนวนสมการของค่าความละเอียด (Resolution) Q_n (รอบต่อวินาที) ค่าความเที่ยงตรง (Accuracy) E (เปอร์เซ็นต์) และช่วงเวลาที่ใช้วัด T_d (วินาที) ของการวัดแบบ M/T-Method

ค่าความละเอียด Q_n (รอบต่อวินาที) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) เมื่อ m_2 เปลี่ยนไปจาก m_2 เป็น $m_2 - 1$

$$Q_n = \frac{60f_c m_1}{P} \left(\frac{1}{m_2 - 1} - \frac{1}{m_2} \right) = \frac{60f_c m_1}{P m_2 (m_2 - 1)} \quad (5)$$

ถ้าวัดความเที่ยงตรงเชิงมุมของพัลส์สองลูกต่อกันมีค่า E_p (เปอร์เซ็นต์) ดังนั้นเมื่อนับพัลส์จากมอเตอรได้ m_1 พัลส์ ค่าความเที่ยงตรง E จะมีค่า

$$E = E_p / m_1 \quad (6)$$

ช่วงเวลาที่ใช้วัดแสดงได้ดังสมการ

$$T_d = T_c \quad (T = 0)$$

$$T_d = \left[\left(\frac{PNT_c}{60} + 1 \right) \frac{60}{PN} \right] \quad (T \neq 0) \quad (7)$$

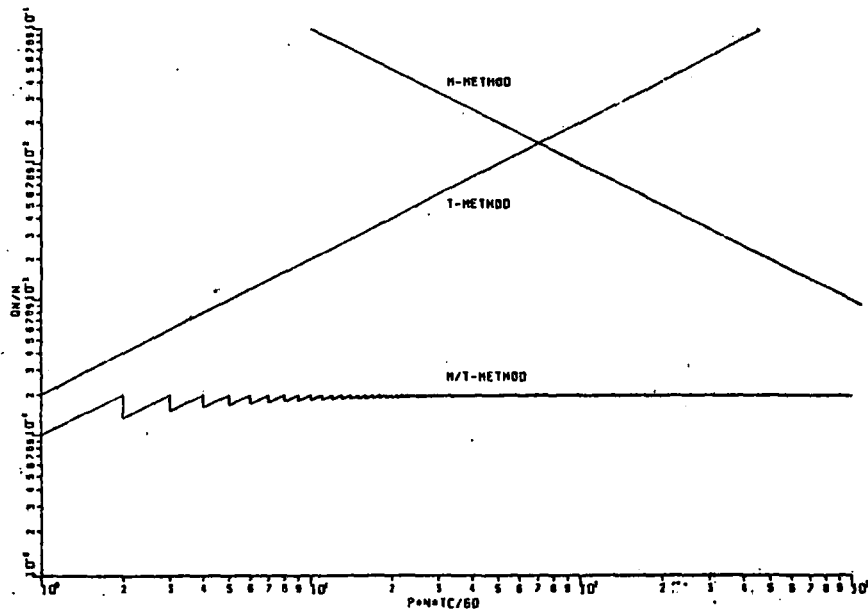
ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบหลักการ, สมการความเร็วที่วัดได้, สมการค่าความละเอียด, สมการค่าความเที่ยงตรง, และสมการช่วงเวลาที่ใช้วัดของวิธีการวัดแบบ M-Method, T-Method และ M/T-Method รูปที่ 2, รูปที่ 3, รูปที่ 4 แสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างเทคนิคการวัดทั้งสามแบบ เมื่อ $P = 300$ พัลส์/รอบ $f_c = 500$ KHz $T_c = 10$ mSec

ค. แผนผังการวัดความเร็ว

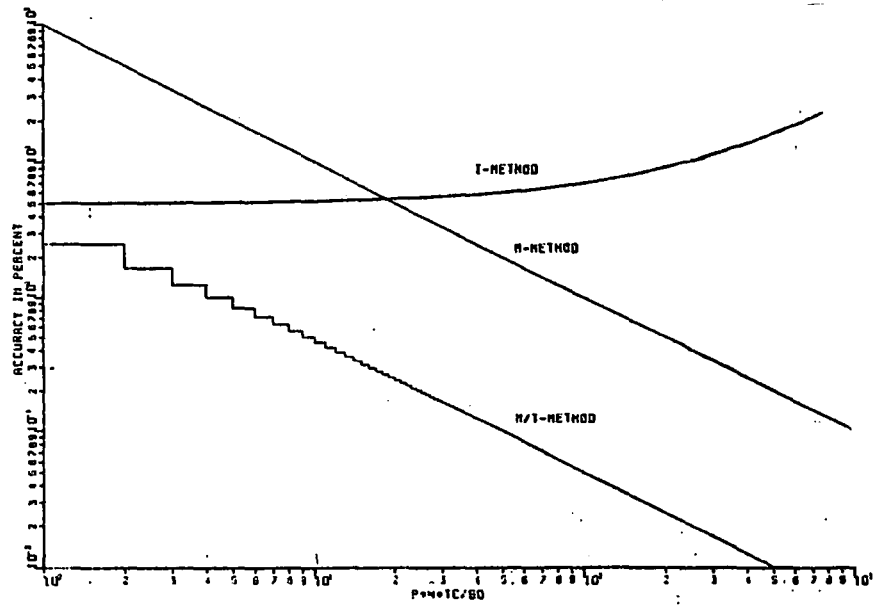
รูปที่ 5 แสดงส่วนต่าง ๆ ของระบบวัดความเร็วแบบ M/T method ซึ่งได้ทดลองสร้างขึ้น เมื่อมีสัญญาณพัลส์จากมอเตอร์ Detect Timer เริ่มทำงาน M1 Counter และ M2 counter ถูกกระตุ้นให้ทำงาน เมื่อ Detect Timer หยุดทำงาน Single Pulse Counter จะทำหน้าที่หยุดการ

METHOD	M	T	M/T
PRINCIPLE			
MEASURED SPEED VALUE N_f (rpm)	$60m_1/PNT_c$	$60f_c/Pm_2$	$60f_c m_1/Pm_2$
DETECTING TIME T_d/T_c	1	$60/PNT_c$	$60 \left[\left(PNT_c/60 \right) + 1 \right] / PNT_c$
RESOLUTION q_n/N_f	$1/m_1 \cdot (m_2 - 1) < PNT_c/60 < m_2 + 1$	$1 / \left[(60f_c/PNf_2) - 1 \right]$	$1 / \left[(60f_c m_1/PNf_2) - 1 \right]$
ACCURACY $\epsilon(\%)$	q_n/N	$\epsilon_p \cdot \left[100 / (m_2 - 1) \right]$	ϵ_p / m_1

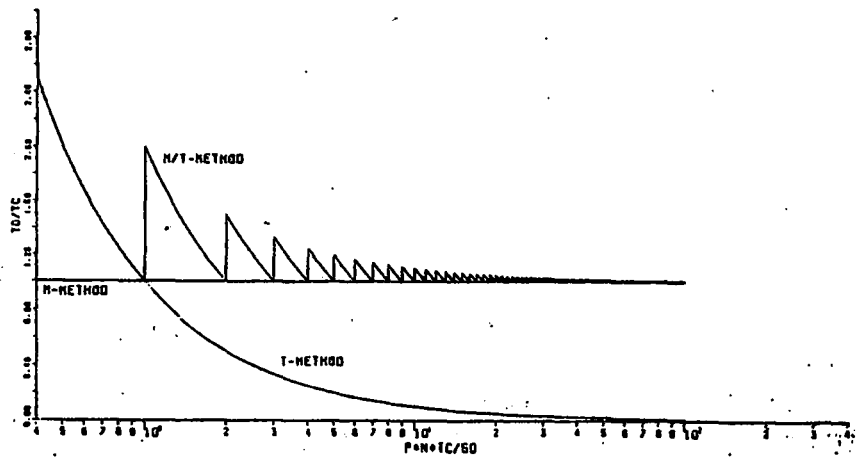
ตารางที่ 1



รูปที่ 2 แสดงค่าความละเอียดเปรียบเทียบระหว่าง วิธีการวัดแบบ M-method, T-method และ M/T-method

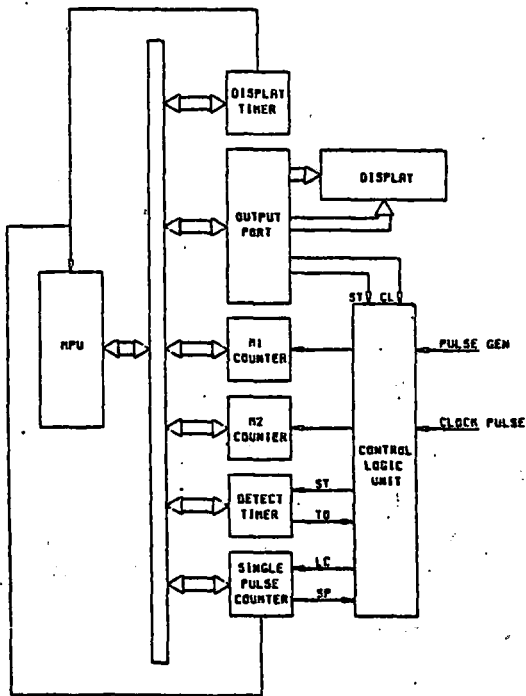


รูปที่ 3 แสดงค่าความเที่ยงตรงเปรียบเทียบระหว่างวิธีการวัดแบบ M-method, T-method และ M/T-method

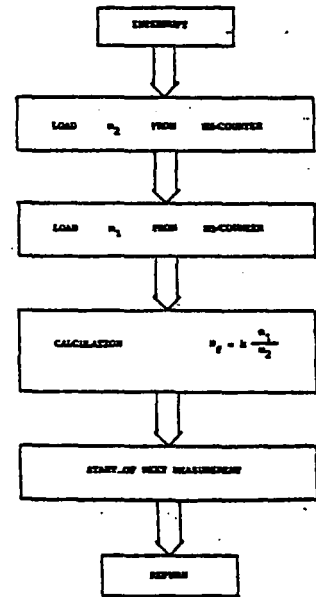


รูปที่ 4 แสดงค่าช่วงเวลาที่ใช้เปรียบเทียบระหว่างวิธีการวัดแบบ M-method, T-method และ M/T-method

ทำงานของ M1 Counter และ M2 Counter เมื่อได้รับพัลส์จากมอเตอร์อีกหนึ่งลูกหลังจากช่วงเวลา T_c ช่วงเวลาต่อมา MPU จะนำข้อมูลใน M1 Counter และ M2 Counter ไปคำนวณเพื่อหาความเร็วของมอเตอร์ รูปที่ 6 แสดงขั้นตอนการทำงานของไมโครคอมพิวเตอร์



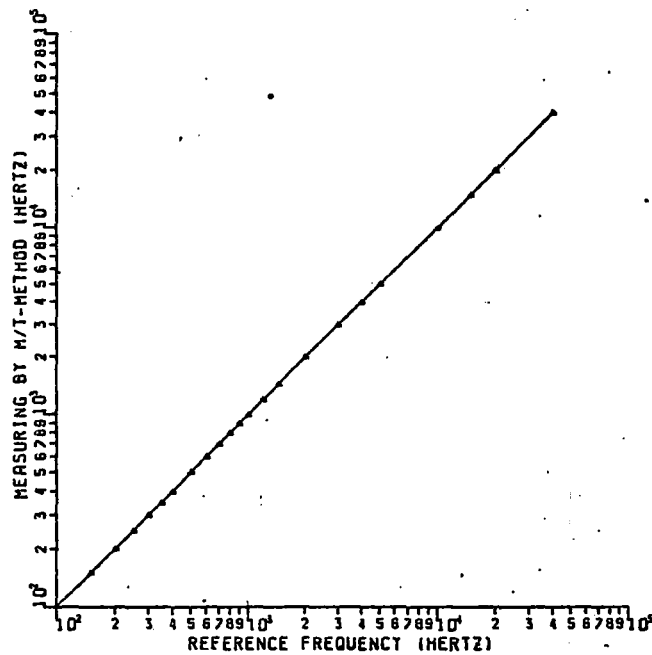
รูปที่ 5 แสดงส่วนประกอบของระบบวัดความเร็วแบบใหม่



รูปที่ 6 แสดงการทำงานของไมโครคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณความเร็วมอเตอร์

ผลการทดลอง

รูปที่ 7 แสดงผลการทดลองเทคนิคการวัดแบบ M/T-Method โดยนำชุดทดลอง ทดลองวัดความถี่มาตรฐานที่ทราบค่า ผลการทดลองเทคนิคการวัดแบบ M/T-Method สามารถวัดได้ทั้งที่ส่ายกว้างและมีค่าความเที่ยงตรงสูง



รูปที่ 7 แสดงผลการทดลองเทคนิคการวัดแบบ M/T-Method

สรุป

เทคนิคการวัดความเร็วแบบ M/T-Method ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อทดสอบการทำงาน ผลการทดลองแสดงถึงความเที่ยงตรงในการทำงาน และใช้เวลาสั้นในการวัดผล ดังนั้นเทคนิคการวัดความเร็วแบบ M/T-method จึงเหมาะสมกับระบบควบคุมมอเตอร์โดยไม่โครคอมพิวเตอร์

เอกสารอ้างอิง

- (1) Tsutomu Ohmae, Toshihiko Matsuda, Kenzo Kamiyama and Makoto Tachikawa, "A Microprocessor-Controlled High-Accuracy Wide-Range Speed Regulator for Motor Drives", IEEE Trans. Ind. Elec. vol. IE-29, pp. 207-211, August 1982.