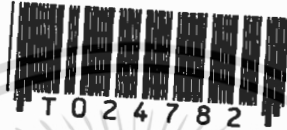


การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว
โดยใช้เทคนิคการออสซิลเลท
SPEED CONTROLLED IN SINGLE PHASE INDUCTION MOTORS
WITH USING OSCILLATION TECHNIQUE



ด 145
นายคมกฤษ โล่ห์เพชร
MR.KOMGRIT LOHPETCH

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2538

ISBN 974-621-429-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

**SPEED CONTROLLED IN SINGLE PHASE INDUCTION MOTORS
WITH USING OSCILLATION TECHNIQUE**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL**

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1995

ISBN 974-621-429-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว โดยใช้เทคนิคการออสซิลเลท
นักศึกษา	นายคมกฤษ โล่ห์เพ็ชร
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ฟูศักดิ์ ชิวสุวิทย์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	เทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.	2538

บทคัดย่อ

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวโดยทั่วไปใช้การเปลี่ยนแปลงความถี่ของแหล่งจ่ายไฟจากภายนอก เช่น การควบคุมความเร็วด้วยพัลส์วิดิมอเตอร์ (PULSE WIDTH MODULATOR), ไซโครคอนเวอร์เตอร์ (CYCLO CONVERTOR) เป็นต้น ซึ่งมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกัน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอเรื่องการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวโดยใช้เทคนิคการออสซิลเลท รวมถึงการสร้างเครื่องต้นแบบและการวิเคราะห์เครื่องต้นแบบ ซึ่งมีการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว โดยใช้เทคนิคการออสซิลเลทที่มีความไวของความถี่ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ต่ำ การปรับความเร็วและค่าแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวถูกควบคุมโดยการปรับค่าความจุกวกรเสมือนตัวเก็บประจุและปรับค่าของความต้านทานจากวงจรเสมือนความต้านทาน และส่วนขับกำลังเป็นวงจรขยายแบบตามแรงดันที่สามารถรับแรงดันไฟตรงซึ่งมีค่าสูงโดยเฉพาะ นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานของการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวจะมีค่าสูง ความสูญเสียในระบบขับกำลังจะมีค่าต่ำ เนื้อหาของวิทยานิพนธ์กล่าวถึงวิธีการการสังเคราะห์วงจรที่ประกอบด้วยอุปกรณ์น้อยที่สุด ซึ่งทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวถูกควบคุมความเร็วด้วยความถี่ของการออสซิลเลท วิธีการปรับปรุงค่าแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวโดยเทคนิคที่น่าเสนอนี้เหมาะที่จะใช้กับ มอเตอร์ขนาดเล็กที่มีขนาดไม่เกิน 0.5 กิโลวัตต์ และในตอนท้ายของวิทยานิพนธ์ได้นำเครื่องต้นแบบไปทดลองขับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวขนาด 373 วัตต์ 220 โวลท์ 50 เฮิร์ตซ์ ซึ่งผลการทดลองสามารถที่จะยืนยันได้

Thesis Title	Speed Controlled in Single Phase Induction Motors with using Oscillation Technique
Student	Mr.Komgrit Lohpetch
Thesis Advisor	Associate Professor Dr.Fusak Cheevasuvit
Thesis Co-advisor	Assistance Professor Singtong Patanasethanon
Level of Study	Master of Electrical Engineering
Department	Industrial Instrumentation Technology King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic year	1995

ABSTRACT

Generally, controlling the speed of a single phase induction motor can be done by varying the frequency of an external power supply. For example, the motor speed can be controlled by pulse width modulator or cycloconverter methods. Despite its common usage, some disadvantages appear significantly. Consequently, the objective of this thesis is to present "Speed controlled in single phase inductor motors with using oscillation technique," which has low sensitivity of frequency, including of the building and analysis of the prototype. Furthermore, speed and torque control is adjusted by electronic tuning capacitor and resistor. A driver part is a high volted power supply buffer. The efficiency of energy dc to ac inversion is high while the lost of driver part system is low. This thesis concerns a synthesis of optimum circuit that controlled speed of single phase induction motor by using oscillation technique. Then, we will find how to improve the torque of the motor. This method has appropriated for small signal phase induction motor (not over 0.5 kW 220-V 50Hz). Finally, an experiment will be conducted, using the prototype of the circuit to control a 373 W 220 V 50 Hz single phase induction motor. It is to analyze some characteristics of the circuit such as torque due to different loads and relation between angular speed and torque. Accordingly, they are also compared with the theoretical result which appear to be satisfactory.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีก็เพราะได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก อาจารย์สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษาแนะนำ และความช่วยเหลือในด้านต่างๆมาโดยตลอด ผู้วิจัยจึงขอกราบขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ มารดาของข้าพเจ้าที่ได้สนับสนุนในการศึกษาของข้าพเจ้ามาโดยตลอดทั้งกำลังใจและค่าใช้จ่ายต่างๆในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ แผนกบำรุงรักษาระบบควบคุม โรงแยกก๊าซธรรมชาติ การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย ที่ได้เอื้อเฟื้อเครื่องมือในการทดสอบ และขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์นี้ประสบความสำเร็จ

นายคมกฤษ โล่ห์เพ็ชร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
คำอธิบายสัญลักษณ์ / คำย่อ.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้น.....	5
2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....	5
2.1.1 การพิจารณาวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....	10
2.1.2 การพิจารณาค่าแรงบิดและความเร็วของตัวหมุน.....	17
2.2 การสังเคราะห์ระบบควบคุมความเร็ว.....	20
2.2.1 พื้นฐานการกำเนิดสัญญาณ.....	20
2.2.2 หลักการสังเคราะห์ระบบควบคุมความเร็ว.....	24
บทที่ 3 การสังเคราะห์วงจร.....	28
3.1 การสังเคราะห์วงจรประกอบในการควบคุม.....	28
3.1.1 การพิจารณาการออกสวิตช์.....	29
3.1.2 การพิจารณาการปรับกำลัง.....	30
3.2 ความต้านทานแบบปรับค่าได้.....	32
3.2.1 วงจรสายพานกระแส.....	32
3.2.2 วงจรตัวต้านทานปรับค่าได้.....	38
3.3 วงจรเสมือนตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้.....	40
3.4 วงจรขยายแบบตามแรงดัน.....	43
3.5 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยใช้เทคนิคการออกสวิตช์.....	46

บทที่ 4 การทดลองควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวโดยใช้เทคนิคการออสซิลเลท.....	48
4.1 คุณสมบัติมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	48
4.2 การพิจารณาค่าความถี่และความเร็วที่สภาวะคงตัวและที่สภาวะเริ่มต้น.....	51
4.2.1 การพิจารณาที่สภาวะคงตัว.....	51
4.2.2 การพิจารณาที่สภาวะเริ่มต้น.....	52
4.3 การพิจารณาค่าแรงบิดและความเร็วที่สภาวะคงตัว.....	53
4.4 ผลการทดลอง.....	56
4.4.1 การทดลองที่สภาวะเริ่มต้น.....	56
4.4.2 การทดลองที่สภาวะคงตัว.....	61
4.4.3 การทดลองปรับค่าแรงบิดที่สภาวะคงตัว.....	65
บทที่ 5 บทสรุปและแนวทางการพัฒนา.....	71
การอ้างอิง.....	72
ภาคผนวก ก ผลงานที่ได้รับการเผยแพร่ในระหว่างที่ทำการวิจัย.....	74
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	80
ประวัติผู้เขียน.....	82

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	สรุปค่าความถี่และความเร็วรอบที่สภาวะคงตัวต่อการเปลี่ยนแปลงค่า C.....	52
4.2	สรุปค่าความถี่ที่สภาวะเริ่มต้นต่อการเปลี่ยนแปลงค่า C.....	52
4.3	ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสิ้นไหลและความเร็วรอบที่ค่า C ต่างๆ.....	55
4.4	ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสิ้นไหลและความเร็วรอบที่ค่า C ต่างๆ เปรียบเทียบกับทฤษฎี.....	70



สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของมอเตอร์ที่แยกเฟสออกจากกัน.....	6
รูปที่ 2.2 (a) วงจรภายในของมอเตอร์ชนิดแยกเฟสออกจากกัน (b) เฟสเซอร์ ไดอะแกรม (c) คุณสมบัติแรงบิดต่อความเร็ว.....	7
รูปที่ 2.3 ภาพตัดแสดของมอเตอร์ชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุและ วิ่งด้วยการเหนี่ยวนำ.....	8
รูปที่ 2.4 (a) วงจรภายในของมอเตอร์ชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุและวิ่ง ด้วยการเหนี่ยวนำ (b) เฟสเซอร์ไดอะแกรม (c) คุณลักษณะแรงบิดต่อ ความเร็ว.....	9
รูปที่ 2.5 (a) วงจรภายในของมอเตอร์ชนิดที่ใช้ตัวเก็บประจุทั้งในขณะเริ่มแรกและ ในขณะวิ่ง (b) เฟสเซอร์ไดอะแกรม (c) คุณลักษณะแรงบิดต่อความเร็ว.....	10
รูปที่ 2.6 (a) แผนภาพมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีขดอยู่กับที่ 2 ขด (b) เฟสเซอร์ ไดอะแกรม (c) แผนภาพแสดงสนามแม่เหล็กหมุน.....	11
รูปที่ 2.7 แสดงสนามแม่เหล็กหมุน ซึ่งมีทั้งเค้นหน้าและถอยหลัง.....	13
รูปที่ 2.8 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว หรือเครื่องจักรเบื้องต้นสมมูลย์.....	14
รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลย์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว (a) วงจรสมมูลย์ (b) วงจรสมมูลย์แสดงค่าต่างๆ ที่ย้ายมา.....	16
รูปที่ 2.10 คุณลักษณะสมบัติด้านแรงบิด-ความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว.....	18
รูปที่ 2.11 วงจรเรโซแนนซ์ (a) แบบอนุกรม (b) แบบขนาน.....	20
รูปที่ 2.12 แสดงวงจรออสซิลเลเตอร์แบบอาศัยการป้อนกลับ.....	25
รูปที่ 2.13 วงจรทศเทียบของออสซิลเลเตอร์ที่เกิดจากผลของ LC ในอุดมคติ.....	26
รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรม สำหรับวงจรประกอบในการควบคุมความเร็วของ มอเตอร์.....	28
รูปที่ 3.2 เนทเวอร์คของสายพานกระแส.....	32
รูปที่ 3.3 แผนภาพของวงจรสายพานกระแสแบบปรับค่าได้ชนิดลบ.....	33
รูปที่ 3.4 วงจรสายพานกระแสแบบลบ.....	34
รูปที่ 3.5 การพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท x.....	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.6 การพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท y	36
รูปที่ 3.7 วงจรสะท้อนกระแสที่สามารถปรับอัตราการสะท้อนกระแสได้.....	37
รูปที่ 3.8 (a) แสดง บล็อกไดอะแกรม ของวงจรความต้านทานปรับค่าได้ (b) วงจรสมมูลย์.....	38
รูปที่ 3.9 แสดงบล็อกไดอะแกรมหลักการพื้นฐานของตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้.....	40
รูปที่ 3.10 วงจรเสมือนตัวเก็บประจุแบบเทียบศักดาที่สามารถปรับค่าได้.....	41
รูปที่ 3.11 วงจรขยายแบบตามแรงดัน.....	43
รูปที่ 3.12 แสดงวงจรสมมูลย์ของการพิจารณาอัตราขยายภาคอินพุท.....	44
รูปที่ 3.13 วงจรสมมูลย์ของการพิจารณาอัตราขยายภาคเอาต์พุทสำหรับอินพุท ที่เป็นบวก.....	45
รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลย์ของการพิจารณาอัตราขยายภาคเอาต์พุทสำหรับอินพุท ที่เป็นลบ.....	45
รูปที่ 3.15 แสดงวงจรรวมของการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวโดยใช้ เทคนิคการออสซิลเลท.....	47
รูปที่ 4.1 แผ่นป้ายบอกรายละเอียดมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	48
รูปที่ 4.2 แสดงวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	49
รูปที่ 4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเทียบกับค่าสั้น โกล.....	51
รูปที่ 4.4 วงจรที่ใช้ในการทดลอง.....	56
รูปที่ 4.5 แสดงผลการออสซิลเลทที่สภาวะเริ่มต้นที่ค่า $C = 175 \text{ uf}$	57
รูปที่ 4.6 แสดงผลการออสซิลเลทที่สภาวะเริ่มต้นที่ค่า $C = 150 \text{ uf}$	57
รูปที่ 4.7 แสดงผลการออสซิลเลทที่สภาวะเริ่มต้นที่ค่า $C = 125 \text{ uf}$	58
รูปที่ 4.8 แสดงผลการออสซิลเลทที่สภาวะเริ่มต้นที่ค่า $C = 100 \text{ uf}$	58
รูปที่ 4.9 แสดงผลการออสซิลเลทที่สภาวะเริ่มต้นที่ค่า $C = 75 \text{ uf}$	59
รูปที่ 4.10 แสดงผลการออสซิลเลทที่สภาวะเริ่มต้นที่ค่า $C = 50 \text{ uf}$	59
รูปที่ 4.11 แสดงผลการออสซิลเลทที่สภาวะเริ่มต้นที่ค่า $C = 25 \text{ uf}$	60
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองและทฤษฎี.....	60

บทที่ 4 การทดลอง เป็นการนำเครื่องต้นแบบที่ได้จากการสังเคราะห์วงจรมา
ทดลองขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว และนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับ
ทฤษฎี

บทที่ 5 บทสรุปและแนวทางการพัฒนา
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งได้ตีพิมพ์ทาง
วารสารวิชาการ



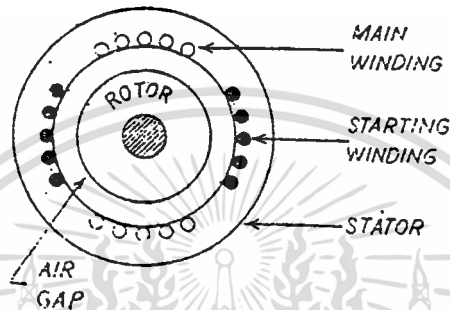
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ใช้กันอยู่ปัจจุบันในบ้านเรือนหรือโรงงานขนาดเล็ก ส่วนใหญ่จะเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว เนื่องจากความไม่แพร่หลายในระบบพลังงานที่ใช้ เช่น ระบบไฟ 3 เฟส มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวมีประสิทธิภาพต่ำกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ในขนาดกำลังที่เท่ากัน มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเป็นมอเตอร์ที่มีโครงสร้างและหลักการทำงานในการที่ทำให้มันหมุนได้คล้ายกับมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟส แต่จะแตกต่างกันตรงที่ตัวอยู่กับที่มีการพันขดลวดเป็นแบบเฟสเดียวและได้รับ ไฟจากไฟเฟสเดียวกันด้วย ดังนั้นจึงทำให้เกิดสนามแม่เหล็กสลับกันไปมาขึ้นที่ตัวอยู่กับที่ ซึ่งไม่ใช่สนามแม่เหล็กที่ความเร็วแบบซิงโครนัส (synchronous) เหมือนอย่างกับพวกที่มีการพันแบบสองเฟสหรือสามเฟส สนามแม่เหล็กเฟสเดียวจะมีลักษณะรูปคลื่นเป็นไซน์ โดยขั้วแม่เหล็กจะกลับไปมาทุกๆ ครึ่งรอบของคลื่น ซึ่งจากการที่ขั้วแม่เหล็กกลับไปมาดังกล่าว ทำให้ไม่สามารถเกิดแรงหมุนขึ้นได้ในขณะที่ตัวหมุนยังหยุดอยู่ หรือมอเตอร์ไม่สามารถหมุนด้วยตัวมันเอง แต่ถ้าหากมีแรงทางกลมากระทำทำให้ส่วนของโรเตอร์หมุน ย่อมทำให้เกิดแรงบิดและอัตราเร่งเกิดขึ้นกับมอเตอร์นั้นจนกระทั่งมีความเร็วเต็มที่ ได้ และจะมีคุณสมบัติคล้ายมอเตอร์สามเฟสแบบซิงโครนัส (Three phase synchronous motor) ในสมัยก่อนการเริ่มหมุนมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ทำโดยการพันเชือกแล้วดึงเพลาให้หมุน สำหรับในปัจจุบันกระทำโดยสร้างไฟเฟสที่สองขึ้นในตัวมอเตอร์ โดยใช้พลังงานจากแหล่งกำเนิดเดียวกันเป็นแหล่งจ่าย ส่วนตัวหมุน (Rotor) ของมอเตอร์แบบนี้ส่วนใหญ่เป็นแบบกรงกระรอก (Squirrel cage) ส่วนทางตัวอยู่กับที่นั้นมีการพันขดลวดตัวนำผิดแผกแตกต่างกันไปบ้างแล้วแต่ชนิดของมอเตอร์ การที่กล่าวว่ามีมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวมีโครงสร้างและหลักการทำงานในการที่ทำให้มันหมุนได้คล้ายกับมอเตอร์เหนี่ยวนำหลายเฟสนั้น หมายความว่า มอเตอร์แบบนี้มีทั้งตัวอยู่กับที่และตัวหมุน โดยที่ตัวอยู่กับที่นั้นจะมีการพันขดลวดเพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในช่วงขณะเริ่มแรกหรือมืออยู่ตลอดไปได้ โดยอาศัยอุปกรณ์ช่วยอื่นๆ เช่น ขดเริ่มทำให้หมุน (Starting winding) หรือตัวเก็บประจุ (Capacitor) ต่อร่วมกับขดทำให้หมุน (Main winding) หรืออาจทำให้เกิดสนามแม่เหล็กเลื่อนหรือเคลื่อนที่ไปรอบ หรือเกิดสนามแม่เหล็กโดยอาศัยคุณสมบัติของตัวอยู่กับที่ร่วมกันได้ ส่วนตัวหมุนนั้นอาจเป็นกรงกระรอกหรืออาจไม่เป็นก็ได้ แต่ต้องเป็นตัวที่จะทำให้เกิดมีการ

เหนี่ยวนำขึ้นในตัวมันเพื่อทำให้เกิดแรงบิดขึ้นได้ เมื่อมีสนามแม่เหล็กหมุนหรือเลื่อนผ่าน
ตัวมัน ซึ่งแบ่งตามชนิดของมอเตอร์ได้ดังนี้

มอเตอร์ที่แยกเฟสออกจากกัน (Split phase motor)



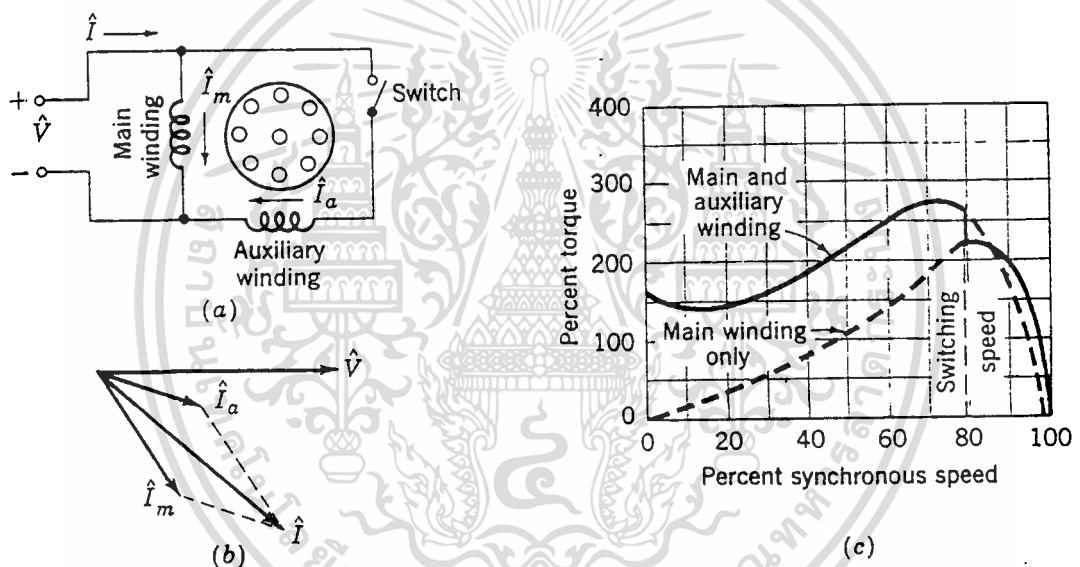
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของมอเตอร์ที่แยกเฟสออกจากกัน

โครงสร้างของมอเตอร์ประกอบด้วย

1. ตัวที่อยู่กับที่ (Stator) มีขดลวดอยู่ 2 ชุด ชุดหนึ่งมีไว้สำหรับใช้งานตามปกติ เรียกว่า ชุดสำหรับวิ่ง (Running winding or Main winding) ชุดขดลวดชุดนี้มีความต้านทานต่ำแต่รีแอกแตนซ์ (Reactance) สูงกว่าชุดสำหรับทำให้มอเตอร์หมุน โดยที่มีขนาดเส้นลวดใหญ่กว่าชุดหมุน ชุดสำหรับวิ่งหรือใช้งานนี้เป็นชุดหลักที่มีไฟผ่านอยู่ตลอดเวลา ไม่ว่าจะเริ่มหมุนที่แรกหรือขณะที่ทำงานปกติ ชุดที่สองเป็นชุดสำหรับเริ่มทำให้หมุน (Starting winding) ขดลวดชุดนี้พันไว้ที่ตัวอยู่กับที่เช่นกัน แต่ให้ลงในช่อง (Slot) เป็นมุมห่างไปจากชุดหลัก 90 องศาทางไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้นในขณะเริ่มแรก ชุดนี้มีความต้านทานของขดลวดตัวนำสูง แต่รีแอกแตนซ์ต่ำและเส้นลวดมีขนาดเล็ก ขดลวดชุดนี้ต่ออนุกรมกับสวิตช์หนีศูนย์กลาง (Centrifugal switch) แล้วจึงนำไปต่อขนานกับชุดสำหรับวิ่ง ถ้าไม่ใช้สวิตช์หนีศูนย์กลาง อาจใช้รีเลย์เป็นตัวตัดขดเริ่มทำให้หมุนหรือขดช่วยทำให้หมุน (Starting winding or Auxiliary winding) ก็ได้ ดังเช่นที่ใช้กับมอเตอร์อัดน้ำยา (Compressor) ของตู้เย็นหรือเครื่องปรับอากาศก็ได้ โดยปรกติมอเตอร์ที่ใช้อัดน้ำยาของตู้เย็นหรือเครื่องปรับอากาศที่ใช้กับไฟฟเสเตียนนั้นจะใช้ตัวเก็บประจุต่ออยู่ด้วย

2. ตัวหมุน (Rotor) เป็นแบบกรงกระรอกธรรมดาซึ่งอาจมี 2 กรงซ้อนกันหรือกรงเดียวแล้วแต่จุดประสงค์ของการใช้งาน ตัวนำที่ฝังอยู่ในตัวหมุนเป็นรูปกรงกระรอกนี้ อาจจะมีอยู่เฉียงๆ (Skew) ก็ได้ และที่แกนของตัวหมุนมีสวิตช์หนีศูนย์กลางติดอยู่ด้วย ทั้งนี้เพื่อจะตัดขดเริ่มทำให้หมุนออกไปหลังจากที่มอเตอร์มีความเร็วประมาณ 75% ของความเร็วซิงโครนัส (Synchronous)

วงจรรวมของมอเตอร์ชนิดนี้ดูได้ ดังรูปที่ 2.2 (a) บางทีอาจพบว่ามีความต้านทานที่มีค่าสูงอีก 1 ตัว ต่ออนุกรมเข้ากับขดทำให้หมุนความต้านทานนี้อาจไม่ต้องใช้ก็ได้ ถ้าความต้านทานของขดเริ่มทำให้หมุนมีค่าสูงพอ



รูปที่ 2.2 (a) วงจรภายในของมอเตอร์ชนิดแยกเฟสออกจากกัน (b) เฟสเซอร์ไดอะแกรม (c) คุณสมบัติแรงบิดต่อความเร็ว

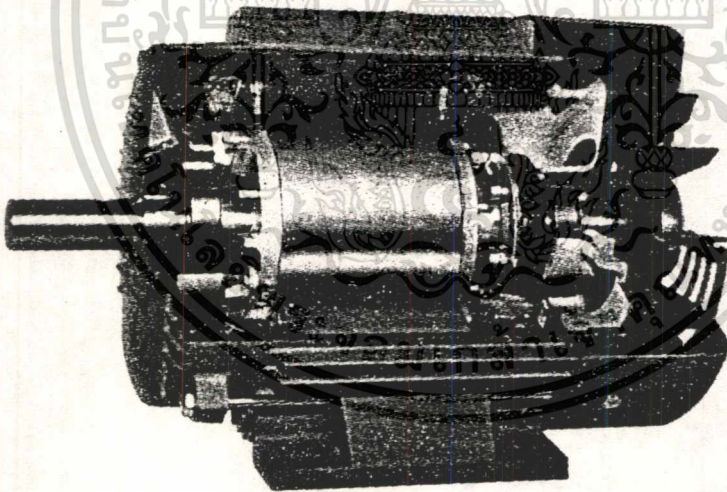
จากคุณสมบัติของขดลวดทั้งสองที่กล่าวมาแล้ว จึงทำให้กระแส I_A และ I_M มีมุมแตกต่างกันเกือบ 90 องศา ดังรูป กระแส I_A มาที่หลัง (Lag) แรงเคลื่อนไป V ไปเป็นมุมเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะค่าความต้านทานสูงกว่าค่ารีแอกแตนซ์มาก ดังนั้นจึงทำให้กระแส I_A เกือบเท่ากับ V แต่ว่ากระแส I_M อันเนื่องมาจากขดลวดหลักนั้นมีค่าความต้านทานต่ำ แต่ค่ารีแอกแตนซ์สูง จึงทำให้ I_M มาที่หลัง V เกือบ 90 องศา จึงทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนขึ้น เพื่อใช้ในการเริ่มหมุนของมอเตอร์ ส่วนสวิตช์หนีศูนย์กลาง SW นี้ ทำหน้าที่ตัดไฟของขดเริ่มหมุน

ออกไป หลังจากที่มีมอเตอร์วิ่งได้เกือบใกล้ความเร็วพิกัด หรือประมาณที่ 75% ของความเร็วที่ซิงโครนัส

มอเตอร์แบบนี้มีแรงบิดเริ่มแรกประมาณ 1 ถึง 2 เท่าของแรงบิดที่พิกัด โดยใช้กระแสเริ่มแรกตั้งแต่ 5 ถึง 7 เท่า ของกระแสที่พิกัด จึงทำให้เหมาะสมในการใช้งานกับเครื่องกลชนิดเล็ก ตัวแยกโดยอาศัยแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal separators) และตัวเป่า (Blower) เหล่านี้ เป็นต้น

ทิศทางการหมุนของมอเตอร์เหล่านี้กลับทิศได้โดยการสลับขั้วต่อไฟของขดลวดขุดหนึ่งจาก 2 ขุดนั้น (แต่ไม่ใช่สลับทั้งสองขุด) หลังจากนั้นจึงจ่ายไฟกับขดทั้งสอง ซึ่งจะทำให้มอเตอร์หมุนกลับทิศ มอเตอร์แบบนี้บางที่เรียกว่า “มอเตอร์ที่เริ่มหมุนโดยใช้ความต้านทาน” นอกจากมอเตอร์ที่กล่าวข้างต้นแล้ว ยังมีมอเตอร์แบบแยกเฟสที่อาศัย Capacitor-start capacitor run ดังนั้นเพื่อแยกให้เห็นถึงความแตกต่างของมอเตอร์ทั้งสองชนิดนี้จึงแยกได้ดังต่อไปนี้

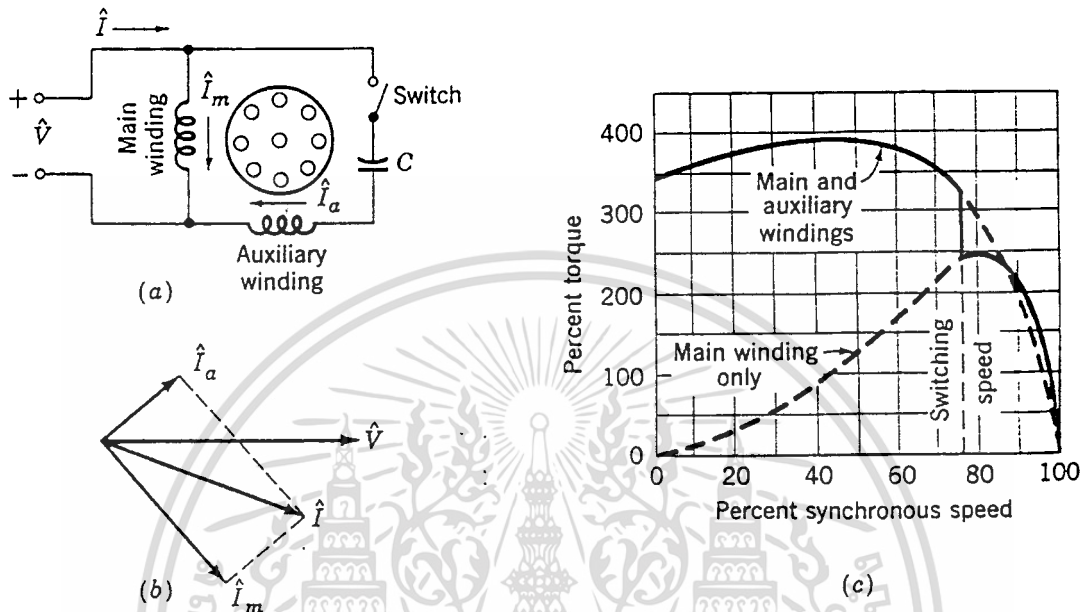
มอเตอร์ชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุและวิ่งด้วยการเหนี่ยวนำ (Capacitor start induction motor)



รูปที่ 2.3 ภาพตัดแสดงมอเตอร์ชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุและวิ่งด้วยการเหนี่ยวนำ

มอเตอร์แบบนี้มีโครงสร้างคล้ายกันกับแบบแรกต่างกันว่า มอเตอร์แบบนี้ทำให้กระแส I_A และ I_m มีเฟสแยกกันโดยใช้ตัวเก็บประจุหรือตัวควบแน่น (Capacitor or condenser) ต่ออนุกรมเข้ากับขดเริ่มทำให้หมุนดังรูปที่ 2.4(a) ตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ใช้นี้เป็นชนิดสารละลาย (Electrolytic) ดังนั้นจึงต้องต่อขั้วบวกและลบให้ถูกต้องด้วย ตัวเก็บประจุนี้ออกโดย

สวิตช์หนีสุนัขกลาง หลังจากที่มีความเร็วประมาณ 75% ของความเร็วที่ซิงโครนัสตัวเก็บประจุนี้ติดอยู่ที่เปลือกหรือแยกออกต่างหากจากตัวโรเตอร์ก็ได้



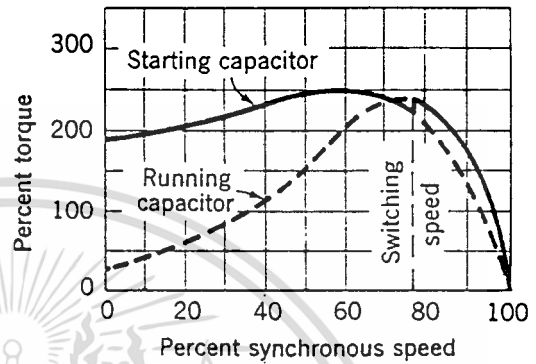
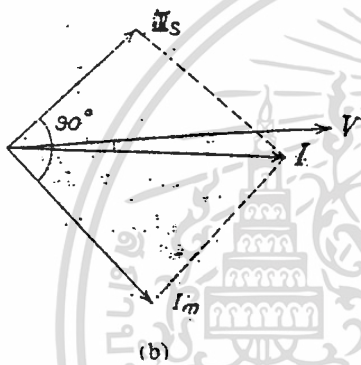
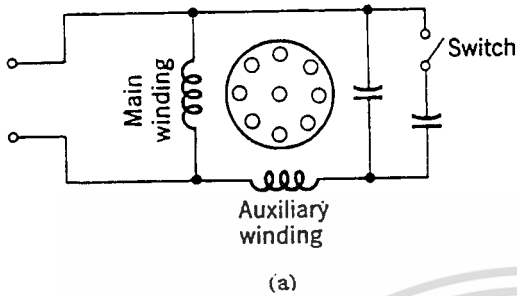
รูปที่ 2.4 (a) วงจรภายในของมอเตอร์ชนิดเริ่มหมุนด้วยตัวเก็บประจุและวงจรวัดการเหนี่ยวนำ (b) เฟสเซอร์โวลเตจแอมแปร์ (c) คุณลักษณะแรงบิดต่อความเร็ว

กระแส $I_{m\alpha}$ นี้มาที่หลัง V เป็นมุมใหญ่มุมหนึ่ง ในขณะที่เดียวกัน I_a มาก่อน V เป็นมุมเช่นกัน จึงทำให้ได้กระแสลัด I เกือบเท่ากับ V ดังนั้นจึงทำให้แรงบิดเริ่มแรกสูง ซึ่งทำให้เหมาะสมที่จะไปขับตัวอัด (Compressor) ปั่นเครื่องผสมเหนียว (Dough mixers) และอื่นๆ

มอเตอร์ชนิดที่ใช้ตัวเก็บประจุทั้งในขณะที่เริ่มแรกและในขณะที่วิ่งหรือทำงานตามปกติ (Capacitor start capacitor run motor)

มอเตอร์แบบนี้มีตัวประจุไฟ 2 ตัว คือ C_s , C_r ตัวเก็บประจุ C_s ซึ่งใช้เป็นตัวทำให้มอเตอร์เริ่มหมุนนี้ มีความจุเกือบ 3 เท่า ของตัวเก็บประจุ C_r ซึ่งใช้สำหรับวิ่งและเป็นตัวเก็บประจุแบบ PAPER ตัวเก็บประจุ C_s นี้จะโค่นตัดออกไปโดยอัตโนมัติ หลังจากที่มีมอเตอร์หมุนได้ใกล้ถึงความเร็วที่พิกัด ในการตัดตัวเก็บประจุ C_s นี้ นอกจากใช้สวิตช์หนีสุนัขกลางเป็นตัวตัดแล้ว ก็อาจใช้ Current coil relay เป็นตัวตัดโดยการใช้ตัวเก็บประจุ C_r ที่เหมาะสม

จึงทำให้กระแส I_A และ I_M แยกต่างกันอย่างเกือบ 90 องศา ซึ่งทำให้ เหมือนกับว่ามอเตอร์นั้นได้รับ ไฟจาก 2 เฟส



รูปที่ 2.5 (a) วงจรภายในของมอเตอร์ชนิดที่ใช้ตัวเก็บประจุทั้งในขณะเริ่มแรกและในขณะวิ่ง
(b) เฟสเซอร์ไคอะแกรม (c) คุณลักษณะแรงบิดต่อความเร็ว

ข้อดีของการต่อตัวเก็บประจุขนาดเล็กไว้ในวงจรของมอเตอร์ก็คือ

1. ทำให้สามารถทน Over load ได้ดีขึ้น
2. มีตัวประกอบกำลัง (P.F.) สูงขึ้นกว่าเดิม

2.1.1 การพิจารณาวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวมีส่วนประกอบโรเตอร์เป็นแบบกรง มีขลวดหลักพันอยู่ที่ส่วนอยู่นิ่ง และขลวดช่วยสำหรับการเริ่มต้นหมุน

พิจารณาส่วนที่อยู่กับที่ ซึ่งประกอบไปด้วยขลวด 2 ขด วางห่างกันด้วยมุม μ ซึ่งขลวดแต่ละอันจะผลิตสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารูปไซน์ ที่แยกกันกระทำต่อพื้นผิวของส่วนหมุน ขลวดทำให้เกิดกำลังแปรผันตามกับเวลาของกระแสรูปไซน์กับความแตกต่างกัน

$\epsilon_1, \epsilon_2 =$ ระยะสั้นที่สุดระหว่างช่ององศาไฟฟ้าเรเดียน (fundamental short-chord angle, electrical rad)

ด้วยความเหมาะสมของค่า F_1, F_2, ψ และ φ ค่าสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้าจะมีค่ามากกว่าค่าสนามแม่เหล็กหมุนถอยหลัง ดังแสดงในรูปที่ 2.6C ผลของความแตกต่างของสนามแม่เหล็กหมุนที่เหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันในส่วนหมุนและผลของกระแสที่กระทำกับสนามที่อยู่กับที่ ซึ่งทำให้เกิดแรงบิดทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งด้านไปข้างหน้าและด้านถอยหลัง แรงอัดที่ไปข้างหน้ามีผลมากกว่าและทำให้มอเตอร์เริ่มมีความเร็วไปในทิศทางเดียวกันที่ความเร็วเชิงมุมของตัวหมุน ω_r และค่าลื่นไถล S ดังนี้

1. กระแสเหนี่ยวนำตัวหมุนที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนไปข้างหน้ามีค่าความถี่เชิงมุมเป็น $S\omega$
2. กระแสเหนี่ยวนำตัวหมุนที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนถอยหลังมีค่าความเร็วเชิงมุมเป็น $(2 - S)\omega$

ในกรณีนี้มี 2 ขดลวดที่เหมือนกันวางห่างกัน เท่ากับความแตกต่างของเฟส

แรงดัน $= \frac{\pi}{2}$ (นั่นคือ $\varphi = \psi = \frac{\pi}{2}$) จากสมการที่ 2.7 และ 2.8 จะได้

$$\hat{F}_f = \hat{F}_1 \quad (2.9)$$

$$\hat{F}_b = 0 \quad (2.10)$$

หมายความว่า มอเตอร์ที่มีลักษณะเป็น Two Phase Winding และมีความสมดุลงันระหว่างกระแส จะมีเฉพาะค่าแรงบิดในทางที่ไปข้างหน้าเท่านั้น

การพิจารณาขดหลัก

ในกรณีที่เราพิจารณาเฉพาะขดหลักโดยการตัดขดช่วยหมุนออกไปจากสมการที่ 2.7 และ 2.8 จะสามารถลดรูปได้เป็น

$$\hat{F}_f = \frac{\hat{F}_1}{2} \quad (2.11)$$

$$\hat{F}_b = \frac{\hat{F}_1}{2} \quad (2.12)$$

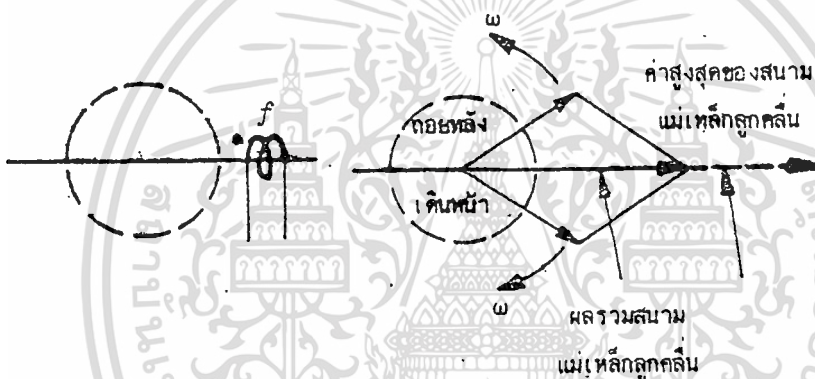
สนามแม่เหล็กหมุน 2 ทาง

ในมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบนี้ การป้อนกระแสลับที่ขดลวดสเตเตอร์แล้วจะยังผลให้เกิดการสร้างสนามแม่เหล็กหมุน ในลักษณะที่เป็นลูกคลื่น กล่าวคือสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะเป็นคลื่นที่เดินทางไปและกลับ ซึ่งมีขนาดเท่ากับครึ่งหนึ่งของ

เอกสารค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็กสูงสุดของสเตเตอร์ โดยมีความเร็วเชิงมุมเท่ากับ ω และองค์ประกอบการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูป 2 สนามแม่เหล็กนี้จะวางเป็นมุมฉากกันกับแกนของขดลวด ซึ่งปรกติจะมีค่าเท่ากับและทิศทางตรงกันข้ามตามรูปที่ 2.7 สนามแม่เหล็กทั้ง 2 จะพยายามเดินไปทางของคน คือ เดินหน้าและถอยหลัง ตามลำดับ

จากการพิจารณาขดลวดทางสเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ซึ่งจะมีสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในลักษณะสนามแม่เหล็กเดินหน้าและถอยหลังแล้ว สนามแม่เหล็กแต่ละตัวจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันในขดลวดโรเตอร์มีค่าเท่ากัน และผลรวมของกระแสในลวดตัวนำนั้นเป็นผลรวมของกระแสที่ไหลในขดลวดโรเตอร์ ซึ่งครบวงจรอยู่ โดยเป็นไปตามค่าแรงดันของแต่ละค่าของมัน



รูปที่ 2.7 แสดงสนามแม่เหล็กหมุน ซึ่งมีทั้งเดินหน้าและถอยหลัง

ถ้าแสดงลวดโรเตอร์ในลักษณะมีขดลวด 2 ชุดตั้งฉากกัน จะได้ว่ามีกระแสใน 2 เฟสของโรเตอร์ I_+ และ I_- มีขนาดเท่ากัน แต่ทิศทางตรงข้าม คือ เดินหน้าและถอยหลังตามลำดับ สนามแม่เหล็กหมุนเดินหน้าจะเหนี่ยวนำก่อให้เกิดกระแสสมมูลย์

I_+ ในขดลวดแกน d

และ

I_- ในขดลวดแกน q

สนามแม่เหล็กหมุนถอยหลังจะเหนี่ยวนำก่อให้เกิดกระแสสมมูลย์

I_- ในขดลวดแกน d

และ

$-jI_-$ ในขดลวดแกน q

ผลรวมของกระแสในขดลวด d และขดลวด q จะเป็น

$$I_d = I_+ + I_- \tag{2.13}$$

และ

$$I_q = j(I_+ - I_-) \tag{2.14}$$

จะได้ว่า

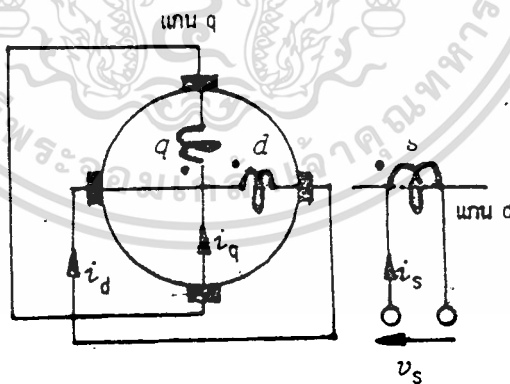
$$I_+ = \frac{1}{2}(I_d - j I_q) \tag{2.15}$$

$$I_- = \frac{1}{2}(I_d + j I_q) \tag{2.16}$$

วงจรสมมูลย์และสมการเฟสเซอร์

เครื่องจักรเบืองตันสมมูลย์สำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแสดงไว้ใน

รูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว หรือเครื่องจักรเบืองตันสมมูลย์

ซึ่งจะมีสมการแรงดัน คือ

$$\begin{bmatrix} v_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_s + L_s p) & Mp & 0 \\ Mp & (R_d + L_d p) & -\omega_r L_d \\ \omega_r M & \omega_r L_d & (R_d + L_d p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

พารามิเตอร์ในแกน d และ q จะเหมือนกันถ้าเครื่องจักรมีช่องอากาศโตสม่ำเสมอ
สำหรับการทำงานในสภาวะคงตัว สมการเฟสเซอร์จะได้จากการแทนค่า $j\omega$ ในส่วน

ของอนุพันธ์ต่อเวลาในสมการ

$$\begin{bmatrix} v_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_s + j\omega L_s) & j\omega M & 0 \\ j\omega M & (R_d + j\omega L_d) & -\omega_r L_d \\ \omega_r M & \omega_r L_d & (R_d + j\omega L_d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

แทนค่า I_d และ I_q จากสมการ (2.13) และ (2.14) จะได้ว่า

$$V_s = (R_s + j\omega L_s)I_s + j\omega M(I_+ - I_-) \quad (2.19)$$

$$0 = j\omega M I_s + (R_d + j\omega L_d)(I_+ - I_-) - j\omega_r L_d (I_+ - I_-) \quad (2.20)$$

$$0 = \omega_r M I_s + \omega_r L_d (I_+ - I_-) + j(R_d + j\omega L_d)(I_+ - I_-) \quad (2.21)$$

สมการ (2.20) และ (2.21) จับมาคูณด้วย j และหาความสัมพันธ์กัน

$$\omega_r = (1-s)\omega \quad (2.22)$$

$$0 = j\omega M I_s + R_d (I_+ - I_-) + j\omega L_d [sI_+ + (2-s)I_-] \quad (2.22)$$

$$0 = j\omega M(1-s)I_s - R_d (I_+ - I_-) - j\omega L_d [sI_+ - (2-s)I_-] \quad (2.23)$$

จับสมการ (2.22) บวกกับ (2.23) และหารด้วย $(2-s)$

$$0 = j\omega M I_s + \left[\frac{R_d}{(2-s)} + j\omega L_d \right] 2I_- \quad (2.24)$$

ลบสมการ (2.23) จาก (2.22) และหารด้วยค่า s

$$0 = j\omega M I_s + \left[\frac{R_d}{s} + j\omega L_d \right] 2I_+ \quad (2.25)$$

เขียนสมการ (2.19), (2.24) และ (2.25) ใหม่เป็น

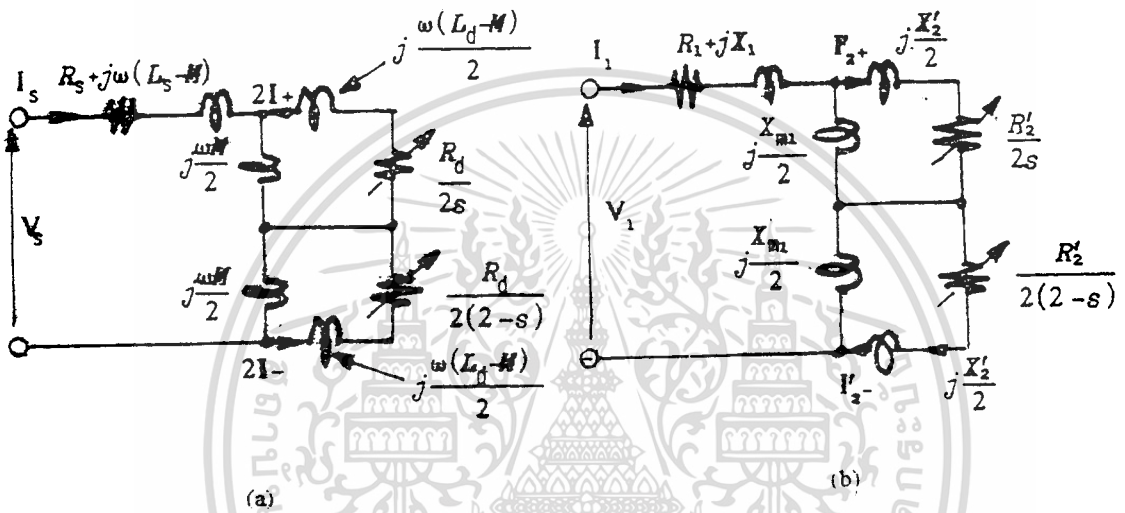
$$V_s = [R_s + j\omega(L_s - M)]I_s + \frac{j\omega M}{2}(I_s + 2I_+) + \frac{j\omega M}{2}(I_s + 2I_-) \quad (2.26)$$

$$0 = \frac{j\omega M}{2}(I_s + 2I_+) + \left[\frac{R_d}{2s} + \frac{j\omega(L_d - M)}{2} \right] 2I_+ \quad (2.27)$$

$$0 = \frac{j\omega M}{2}(I_s + 2I_+) + \left[\frac{R_d}{2(2-s)} + \frac{j\omega(L_d - M)}{2} \right] 2I_- \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรมูลยสำหรับเครื่องจักรได้แสดงในรูปที่ 2.9 ค่าต่างๆ ทางสเตเตอร์และโรเตอร์ จะถูกกำหนดให้ใช้ตัวเลข 1 และ 2 ตามลำดับ ค่าทางโรเตอร์จะถูกย้ายมาทางสเตเตอร์จะกลายเป็นดังรูปที่ 2.9 และสำหรับอัตราส่วนจำนวนของสเตเตอร์และโรเตอร์จะเป็น n และต่อไปนี้จะแสดงความสัมพันธ์ดังนี้



รูปที่ 2.9 วงจรมูลยสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว
(a) วงจรมูลย (b) วงจรมูลยแสดงค่าต่างๆ ที่ย้ายมา

ค่ารีแอกแตนซ์จากสนามกระตุ้นที่ย้ายมาทางสเตเตอร์ $X_m = n\omega M \quad (2.29)$

ค่ารีแอกแตนซ์รั่วซึมทางสเตเตอร์ $X_1 = (\omega L_s - X_m) \quad (2.30)$

ค่ารีแอกแตนซ์รั่วซึมทางโรเตอร์ที่ย้ายค่าไปทางสเตเตอร์ $X'_2 = \omega n^2 L_d - X_m \quad (2.31)$

ค่าความต้านทานโรเตอร์ที่ย้ายค่ามาทางสเตเตอร์ $R'_2 = n^2 R_d \quad (2.32)$

ค่าแรงดันสเตเตอร์ $V_1 = V_s \quad (2.33)$

ค่ากระแสสเตเตอร์ $I_1 = I_s \quad (2.34)$

กระแสโรเตอร์ที่ย้ายค่ามาทางสเตเตอร์ถูกกำหนดให้เป็น

$$\text{องค์ประกอบในส่วนเคินหน้า} \quad I_2' \cdot = \frac{-2I_+}{n} \quad (2.35)$$

$$\text{องค์ประกอบในส่วนถอยหลัง} \quad I_2' - = \frac{-2I_-}{n} \quad (2.36)$$

2.1.2 การพิจารณาค่าแรงบิดและความเร็วของตัวหมุน

ในเครื่องจักรเบื้องต้น ค่ากำลังงานขณะเวลาหนึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นค่าแรงบิด (สนามแม่เหล็กไฟฟ้า) คือ

$$P_e = \omega_r [i_t][G][i]$$

เมื่อผลคูณของ $\omega_r[G][i]$ เป็นค่าเมตริกซ์ของแรงดันในส่วนที่หมุนให้ดูในรูปเฟสเซอร์ ค่ากำลังงานเฉลี่ยจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปแรงบิดไฟฟ้า

$$P_e = R_e \{ \omega_r [I_t^*][G][I] \} \quad (2.37)$$

เมื่อ I^* เป็นค่าคอนจูเกทของกระแสเฟสเซอร์ \pm แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าเฉลี่ยเป็น $\frac{P_e}{\omega_m}$ นำสมการที่ (2.37) มาหารด้วย ω_m แรงบิดแม่เหล็กไฟฟ้าจะได้จากความสัมพันธ์ ดังนี้

$$T_e = \text{Re} \{ (\text{จำนวนคู่ขั้ว}) [I_r^*][G][I] \}$$

แทนค่า $[I_r^*]$, $[G]$, $[I]$ จากสมการ (2.18)

$$T_e = \text{Re} \left\{ (\text{จำนวนคู่ขั้ว}) [I_r^* I_d^* I_q^*] \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -L_d \\ M & L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_d \\ I_q \end{bmatrix} \right\}$$

$$= \text{Re} \{ (\text{จำนวนคู่ขั้ว}) (-L_d I_d^* I_q^* + M I_q^* I_s + L_d I_q^* I_d^*) \}$$

ดูเทอมที่เป็นอิมเมจินารีและไม่มีจำนวนจริง โดยแยกออกมา คือ $L_d(-I_d^* I_q^* + I_q^* I_d^*)$

$$T_e = \text{Re} \{ (\text{จำนวนคู่ขั้ว}) M I_q^* I_s \}$$

แทนค่า I_q^* จากสมการ (2.14)

$$T_e = \text{Re} \{ (\text{จำนวนคู่ขั้ว}) (-jMI_s) (I_+^* - I_-^*) \} \quad (2.38)$$

คูณสมการ (2.24) ด้วย I_+^* และ (2.25) ด้วย I_+^*

$$0 = j\omega MI_+ I_-^* + \left[\frac{R_d}{(2-s)} + j\omega L_d \right] 2I_- I_-^*$$

$$0 = j\omega MI_+ I_+^* + \left[\frac{R_d}{s} + j\omega L_d \right] 2I_+ I_+^*$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับใช้ในงานวิชาการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดรูปสมการใหม่และหาส่วนที่เป็นจำนวนจริง คือ

$$\operatorname{Re}(-j\omega MI, I_+^*) = \operatorname{Re} \left[\frac{R_d}{s\omega} 2I_+^2 + jL_d 2I_+^2 \right] = \frac{2R_d}{s\omega} I_+^2 \quad (2.39)$$

$$\operatorname{Re}(+j\omega MI, I_-^*) = -\operatorname{Re} \left[\frac{R_d}{(2-s)\omega} 2I_-^2 + jL_d 2I_-^2 \right] = \frac{-2R_d}{(2-s)\omega} I_-^2 \quad (2.40)$$

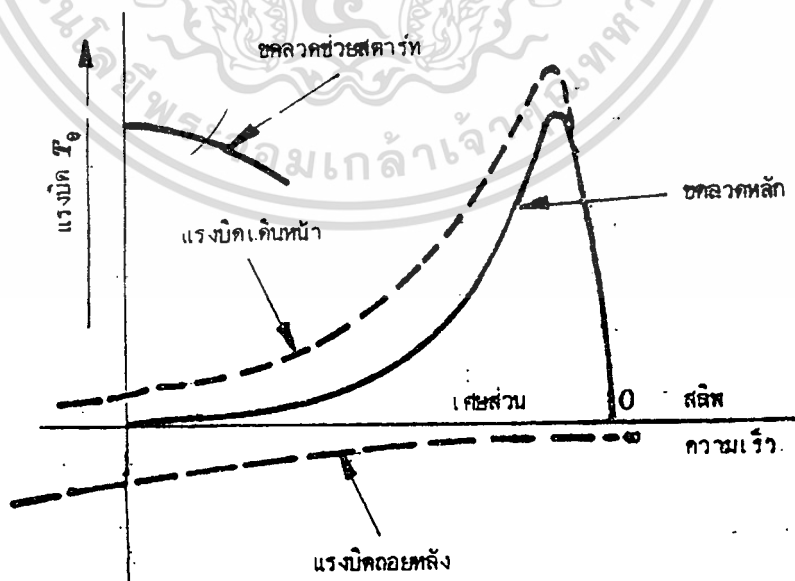
แทนค่าสมการ (2.39) และ (2.40) ในสมการ (2.38)

$$T_e = (\text{จำนวนคู่ขั้ว}) \times 2 \left[\frac{R_d}{s\omega} I_+^2 - \frac{R_d}{(2-s)\omega} I_-^2 \right] \quad (2.41)$$

จากสมการ (2.38) เห็นได้ว่าค่าแรงบิดมี 2 ส่วนประกอบ คือ

- ส่วนประกอบแรก ได้มาจากกระแสที่สร้างสนามแม่เหล็กเดินหน้า ซึ่งคล้ายหรือสอดคล้องกับแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งมีค่าสลิป s
- ส่วนประกอบที่ 2 จะสอดคล้องกับแรงบิดของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งมีค่าสลิป $(2 - s)$

คุณลักษณะสมบัติทางแรงบิด-สลิปรวม ในรูปที่ 2.10 จะเป็นผลรวม 2 คุณลักษณะ และแสดงให้เห็นว่า ไม่มีแรงบิดผลรวมเลขณะที่กำลังจะออกตัว $s = 1$



รูปที่ 2.10 คุณลักษณะสมบัติด้านแรงบิดต่อความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

ค่าสลิปและความถี่ของกระแสตัวหมุน

ได้มีการกำหนดค่าจำกัดความของความเร็วซิงโครนัสมอเตอร์ (N_s)

$$N_s = 120f / P \quad (2.42)$$

เมื่อ f คือ ความถี่ของไฟที่ป้อน

P คือ จำนวนขั้วของแม่เหล็กที่ตัวอยู่กับที่

ความเร็วที่สถานะใดๆ สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์กับความเร็วที่ซิงโครนัส ดังนี้ คือ

$$N_r = (1-S) N_s \quad (2.43)$$

S คืออัตราการลื่นไถล

$$S = (N_s - N_r) / N_s \quad (2.44)$$

สถานะที่มอเตอร์หยุดนิ่ง สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากตัวอยู่กับที่จะมีความเร็วสัมพันธ์เท่ากับความเร็วของสนามแม่เหล็กที่ตัวอยู่กับที่ ดังนั้นภาวะนี้ความถี่ของกระแสที่ตัวอยู่กับที่จะมีค่าเท่ากับความถี่ของกระแสที่ตัวหมุน ที่สถานะที่ความเร็วซิงโครนัส โรเตอร์จะไม่หมุนและความถี่ของกระแสที่ตัวหมุนจะเป็นศูนย์ที่สถานะความเร็วใดๆ ความถี่ของกระแสที่ตัวหมุนจะขึ้นอยู่กับค่าสลิป ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการของสลิปใหม่ได้ว่า

$$S = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (2.45)$$

เมื่อ ω = ความเร็วของโรเตอร์ที่ภาวะใดๆ มีหน่วยเป็น rad/sec เราสังเกตเห็นได้ว่า

$$\omega_s = \frac{\omega \cdot 2}{P} \quad (2.46)$$

เพราะว่าความเร็วสัมพันธ์ระหว่างตัวหมุนและสนามแม่เหล็กหมุนที่เหนี่ยวนำ โดยตัวอยู่กับที่เป็น $\omega_s - \omega_m$

ความเร็วเชิงมุม

$$\omega_R = \frac{P \cdot (\omega_s - \omega_m)}{2} \quad (2.47)$$

$$\omega_R = \frac{S \cdot \omega \cdot P}{2} \quad (2.48)$$

$$\omega_R = S \cdot \omega \quad (2.49)$$

หรือ $f_r = Sf \quad (2.50)$

f_r = ความถี่ของกระแสที่ตัวหมุน (cycle/sec)

f = ความถี่ของกระแสตัวอยู่กับที่ (cycle/sec)

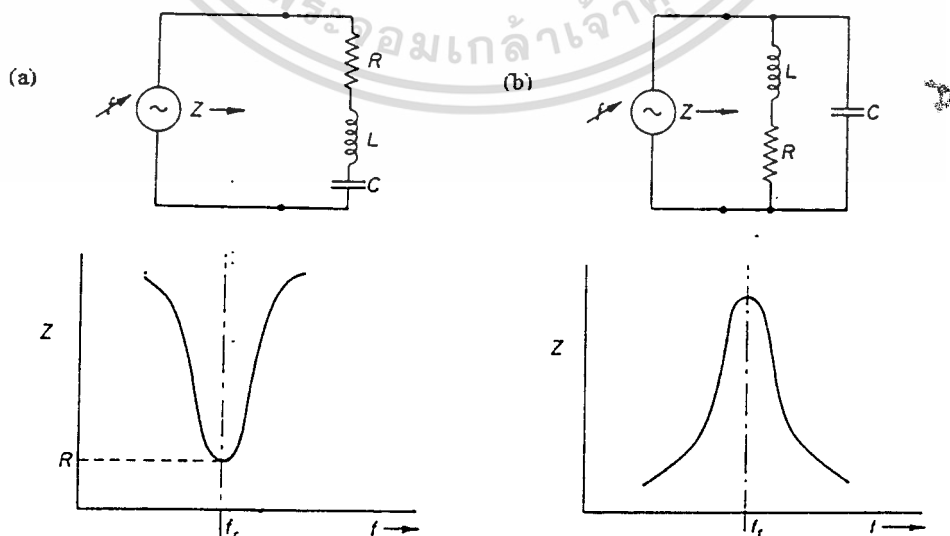
2.2 การสังเคราะห์ระบบการควบคุมความเร็ว

เทคนิคในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวหรือสามเฟส สามารถทำได้หลายวิธีการ โดยวิธีที่นิยมใช้ควบคุมมีดังนี้ การใช้พัลส์วัดมอดูเลชัน (PWM) เทคนิค, การควบคุมความถี่ของ เฮซี 6 สเต็ป หรือไซโครคอนเวอร์เตอร์เทคนิค (Cyclo-converter techniques) โดยแต่ละลักษณะของการควบคุมความเร็วของมอเตอร์จะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามการสร้างวงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะมีความซับซ้อนและสิ้นเปลืองอุปกรณ์จำนวนมาก เทคนิคใหม่ที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวโดยใช้อุปกรณ์ประกอบภายนอก เพื่อให้เกิดการออสซิลเลท จากการวิเคราะห์พบว่า การควบคุมความเร็วของมอเตอร์สามารถทำได้โดยการปรับค่าของตัวเก็บประจุและการปรับกำลังค่าแรงบิดโดยการปรับตัวต้านทานในระบบ

ในการสังเคราะห์ระบบการควบคุมความเร็วมอเตอร์นั้นเราใช้เทคนิคการกำเนิดสัญญาณของวงจรเรโซแนนซ์ โดยมีตัวเก็บประจุและขดลวดเป็นอุปกรณ์สำคัญ สำหรับค่าเหนี่ยวนำนั้น เราพิจารณาได้จากค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดของตัวมอเตอร์เอง ส่วนตัวเก็บประจุเป็นส่วนที่เราสังเคราะห์เพิ่มเข้าไปเพื่อให้เกิดเป็นวงจรเรโซแนนซ์

2.2.1 พื้นฐานการกำเนิดสัญญาณ

วงจรออสซิลเลเตอร์แบบพื้นฐานที่เรารู้จักกันเป็นอย่างดีเป็นชนิดที่ประกอบไปด้วยขดลวดเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุอย่างละหนึ่งตัว แบ่งตามลักษณะการต่อได้ 2 แบบ ดังรูป



รูปที่ 2.11 วงจรเรโซแนนซ์ (a) แบบอนุกรม (b) แบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

จากรูปที่ 2.11 (a) เราสามารถหาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม ซึ่งประกอบไปด้วย RLC ต่ออนุกรมกัน เพื่อกำเนิดความถี่ คือ

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (2.51)$$

$$= \frac{\omega CR + j(\omega^2 LC - 1)}{\omega C} \quad (2.52)$$

ถ้าจตุเรโซแนนซ์ $\omega = \omega_r$ จะได้ว่า

$$\omega_r L = \frac{1}{\omega_r C} \quad (2.53)$$

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.54)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.55)$$

f_o จะเป็นความถี่เรโซแนนซ์ และค่ากระแสที่ไหลในวงจรขณะเกิดเรโซแนนซ์ จะเรียกว่า กระแสเรโซแนนซ์

ถ้ากระแสเรโซแนนซ์ I_o เท่ากัน

$$I_o = \frac{V}{Z_{SO}} = \frac{V}{R} \quad (2.56)$$

จากสมการที่ (2.50) และ (2.51) หรือ $\omega = \omega_r$ จะได้ว่า

$$Z = R \quad (2.57)$$

นั่นหมายความว่าเราจะได้ค่าความต้านทานเพียงอย่างเดียวที่จตุเรโซแนนซ์ เราจัดรูปของสมการที่ (2.51) ให้อยู่ในเทอมที่ง่าย ๆ ไปได้ดังนี้

$$Z = \frac{\omega CR + jL\left(\omega^2 - \frac{1}{LC}\right)}{\omega C} \quad (2.58)$$

$$Z = \frac{R + jL(\omega^2 - \omega_r^2)}{\omega} \quad (2.59)$$

หรือ $\omega_r^2 = \frac{1}{LC} \quad (2.60)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวงจรที่ไม่มี ความสูญเสีย (ในอุดมคติ) เราจะกำหนดให้ $R = 0$ จะได้

$$Z = j \frac{L}{\omega} (\omega^2 - \omega_r^2) \quad (2.61)$$

2. วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

อินพุทอิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน ซึ่งประกอบไปด้วย L , R และ C โดยที่ R ต่ออนุกรมอยู่กับขดลวด ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (b) ซึ่งเกิดจากความต้านภายในของขดลวดเอง จะได้สมการดังนี้

$$Z = \frac{(R + j\omega L) \left[-j \left(\frac{1}{\omega C} \right) \right]}{R + j \left[\omega L - \left(\frac{1}{\omega C} \right) \right]} \quad (2.62)$$

$$Z = \frac{R + j\omega L}{j\omega CR + (1 - \omega^2 LC)}$$

โดยปกติแล้ว $\omega L \gg R$ ถ้าค่า Q ของขดลวด มีค่ามาก

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (2.63)$$

ค่า Q ในสมการที่ (2.63) ด้านบน จะวัดค่าคุณภาพของขดลวด ซึ่งตัวประกอบคุณภาพของขดลวดนี้ จะเรียกว่า ค่า Q ของขดลวด (Q factor) ด้วยเหตุนี้

$$Z = \frac{j\omega L}{j\omega CR + (1 - \omega^2 LC)} \quad (2.64)$$

ที่จุดเรโซแนนซ์ $\omega = \omega_r$ จะได้

$$\omega_r L = \frac{1}{\omega_r C} \quad (2.65)$$

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.66)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.67)$$

และ $Z = \frac{j\omega_r L}{j\omega_r CR} \quad (2.68)$

$$Z = \frac{L}{CR} = Z_d \quad (2.69)$$

ซึ่งเราจะเรียกว่า Z_d โคนามิกอิมพีแดนซ์ของวงจร รูปทั่วไปของ (2.64) สามารถเขียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z = \frac{j\omega L}{j\omega CR + LC\left(\frac{1}{LC} - \omega^2\right)}$$

$$Z = \frac{j\omega L}{j\omega CR + LC(\omega_r^2 - \omega^2)} \quad (2.70)$$

สำหรับวงจรที่ไม่มีค่าความสูญเสีย(วงจรในอุดมคติ) ให้ $R = 0$ จะได้

$$Z = \frac{j\omega L}{LC(\omega_r^2 - \omega^2)}$$

$$Z = \frac{\omega}{jC} \left[\frac{1}{(\omega_r^2 - \omega^2)} \right] \quad (2.71)$$

จากสมการที่ (2.64) จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$Z = \frac{j\omega L}{j\omega CR \left[1 + \frac{LC}{j\omega CR} \left(\frac{1}{LC} - \omega^2 \right) \right]}$$

$$Z = \frac{\frac{L}{CR}}{\left[1 + \frac{LC}{j\omega CR} \left(\frac{1}{LC} - \omega^2 \right) \right]} \quad (2.72)$$

เมื่อ

$$Q \cong \frac{\omega L}{R} \cong \frac{1}{\omega CR}$$

เมื่อค่า ω เข้าใกล้ ω_r

$$LC \cong \frac{1}{\omega_r^2}$$

ทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z = \frac{\frac{L}{CR}}{1 + \frac{Q}{j\omega_r^2}(\omega_r^2 - \omega^2)} \quad (2.73)$$

$$Z = \frac{\frac{L}{CR}}{1 + j\left(\frac{Q}{\omega_r^2}\right)(\omega^2 - \omega_r^2)} \quad (2.74)$$

เมื่อ $\omega^2 = (\omega_r \pm \delta\omega)^2 \cong \omega_r^2 \pm 2\omega_r \cdot \delta\omega$ โดย $(\delta\omega)^2$ มีค่าน้อยมาก เมื่อ ω มีค่าเข้าใกล้จุดเรโซแนนซ์ ทำให้ $(\omega^2 - \omega_r^2) = 2\omega_r \delta\omega$ (เลือกเฉพาะค่าบวก)

และ

$$Z = \frac{Z_d}{1 + 2j\frac{Q\delta\omega}{\omega_r}} \quad (2.75)$$

$$Z = \frac{Z_d}{[1 + 2jQ\delta]} \quad (2.76)$$

เมื่อ

$$\delta = \frac{\delta\omega}{\omega_r} = \frac{\delta f}{f_r}$$

อิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนานจะได้

$$|Z| = \frac{Z_d}{\sqrt{1 + 4Q^2 \cdot \delta^2}} = \frac{\frac{L}{CR}}{\sqrt{1 + 4Q^2 \cdot \delta^2}} \quad (2.77)$$

ซึ่งเป็นรูปทั่วไปของอิมพีแดนซ์ Z ของวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน ที่จุดเรโซแนนซ์ในรูปของ Z_d , Q และ δ

2.2.2 หลักการสังเคราะห์ระบบควบคุมความเร็ว

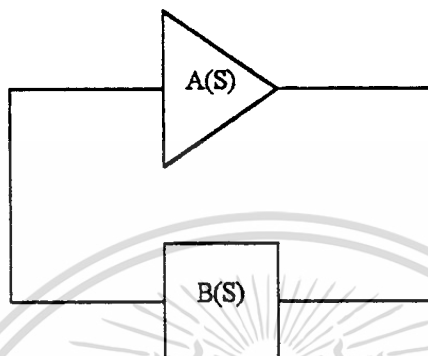
เงื่อนไขของการออสซิลเลท และการบังคับความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์หรือวงจรเรโซแนนซ์ หาได้จากสมการชาแรกเตอร์ริสติก (Characteristic equation) ซึ่งปกติจะพิจารณาโดยทฤษฎีของลินีเยร์เนทเวิร์ค นอกจากนั้นยังสามารถใช้ การพิจารณาวงจรสองทางเข้าออกให้อยู่ในลักษณะของวงจร LC ในอุดมคติ ในการหาข้อกำหนดความถี่ และข้อกำหนดการเริ่มออสซิลเลท จากลักษณะของวงจรที่เชื่อมอิมพีแดนซ์ที่มีค่าลบและบวกต่อขนานกันอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวิชาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออสซิลเลตแบบอาศัยการป้อนกลับ

การพิจารณากการป้อนกลับของวงจรรออสซิลเลเตอร์ในรูป 2.12 ซึ่งมี $A(s)$ เป็นวงจรรขยายสัญญาณ และ $B(s)$ เป็นวงจรรป้อนกลับ



รูปที่ 2.12 แสดงวงจรรออสซิลเลเตอร์แบบอาศัยการป้อนกลับ

ในสภาวะสแตตีสเตจ (Steady State) ขนาดสัญญาณจะมีค่าคงที่ ข้อกำหนดของการออสซิลเลต สามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$A(s)B(s) = 1 \quad (2.78)$$

เมื่อ $s = j\omega$

เนื่องจาก $A(s)$ และ $B(s)$ เป็นเลขจำนวนเชิงซ้อน (Complex Number) ค่าตอบที่ได้จึงมีสองค่าตอบ คือ ส่วนหนึ่งเป็นเลขจำนวนจริง (Real Number) และอีกส่วนหนึ่งเป็นเลขจำนวนเชิงซ้อน (Imajinary Number) ซึ่งแสดงได้ว่า ส่วนของเลขจำนวนจริงคือ

$$\text{Re}(A(s)B(s)) = 1 \quad (2.79)$$

และส่วนของเลขจินตภาพคือ

$$\text{Im}(A(s)B(s)) = 0 \quad (2.80)$$

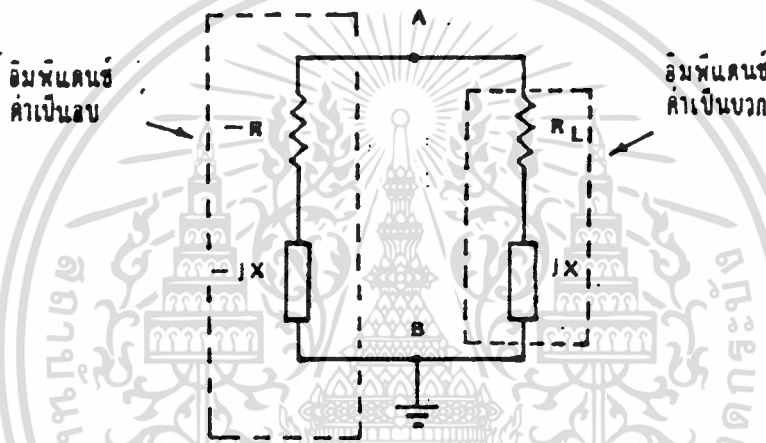
สมการที่ (2.79) เรียกว่าข้อกำหนดค่าขยายของสัญญาณ (Condition of Osillation) ซึ่งใช้หาค่าของ $A(s)$ และ $B(s)$ ที่จะทำให้เกิดการออสซิลเลตในสภาวะสแตตีสเตจ (Steady State) สมการ

ที่ (2.80) เรียกว่าข้อกำหนดของความถี่ในการออสซิลเลทสัญญาณ (Frequency of Oscillation) ซึ่งจะใช้หาค่าความถี่ที่ได้จากวงจร

วงจรออสซิลเลเตอร์ แบบอาศัยการป้อนกลับนี้ยังสามารถที่จะแยกพิจารณาในส่วนของวงจรขยายและส่วนของวงจรป้อนกลับได้

ออสซิลเลเตอร์ที่เกิดจากผลของ L C ในอุดมคติ

การออสซิลเลทที่เกิดจาก L C ในอุดมคติ พิจารณาได้โดยใช้ส่วนประกอบวงจรทศนิยมของออสซิลเลเตอร์ดังรูปที่ 2.13



รูป 2.13 วงจรทศนิยมของออสซิลเลเตอร์ที่เกิดจากผลของ L C ในอุดมคติ

การพิจารณาอิมพีแดนซ์ ที่ทางเข้าของ วงจรสองทางเข้าออก (Two Port Network) ซึ่งมีอิมพีแดนซ์ค่าเป็นลบโดย ส่วนประกอบของอิมพีแดนซ์ลบคือ

$$-Z = -R - jX \quad (2.81)$$

พิจารณาอิมพีแดนซ์ที่มีค่าเป็นบวกมาเป็นโหลด ซึ่งมีส่วนประกอบคือ

$$Z_L = R_L + jX_L \quad (2.82)$$

เมื่อนำอิมพีแดนซ์ในสมการที่ (2.81) และ (2.82) มาต่อขนานกัน ถ้าเกิดการกระตุ้นให้เกิดการไหลของกระแส เป็นผลให้มีการถ่ายเทพลังงานของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งการถ่ายเทพลังงานจะดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการออสซิลเลชันสามารถพิจารณาได้โดยมีเงื่อนไขที่จุดวิกฤตคือ ผลรวมของความต้านทานในรูป 2.13 มีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือ

$$-R + R_L = 0 \quad (2.83)$$

และ

$$-jX + jX_L = 0 \quad (2.84)$$

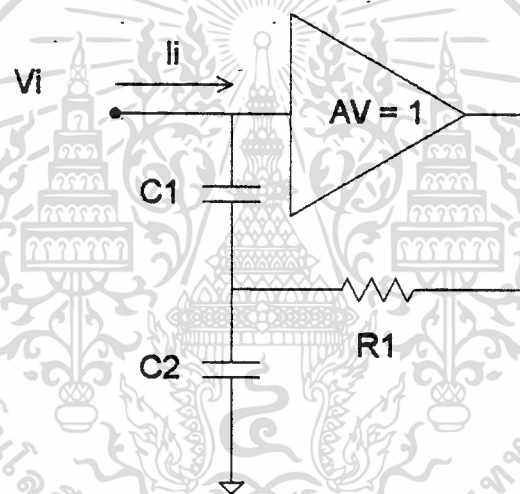
จะเห็นว่าสมการ (2.83) จะใช้สำหรับกำหนดค่าขยายของสัญญาณ ส่วนสมการ (2.84) จะใช้สำหรับการกำหนดความถี่ในการออสซิลเลชัน



บทที่ 3 การสังเคราะห์วงจร

3.1 การสังเคราะห์วงจรประกอบในการควบคุม

หลักการที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 2.2.2 เป็นหลักการเบื้องต้นในสังเคราะห์ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวโดยใช้เทคนิคการออสซิลเลท ซึ่งจากหลักการเบื้องต้นดังกล่าวสามารถที่จะนำมาเขียนเป็น บล็อกไดอะแกรม สำหรับออกแบบวงจรได้ดังรูปที่ 3.1 โดยการพิจารณาเฉพาะในส่วนของ $-R$ และ C ที่เราจะต้องทำการสังเคราะห์ขึ้นเพื่อที่จะนำไปประกอบกับ ค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ และจะทำให้เกิดการออสซิลเลท



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรม สำหรับวงจรประกอบในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์

จากรูปที่ 3.1 เป็นบล็อกไดอะแกรม สำหรับวงจรประกอบในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเสมือนค่าความต้านทานลบและตัวเก็บประจุ โดยมีการวิเคราะห์โดยสมการคุณลักษณะดังนี้

การพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ทางเข้า (z_i) ของรูปที่ 3.1

$$\text{เมื่อ } Z_i = \frac{V_i}{I_i} \quad (3.1)$$

เนื่องจากแรงดันที่ทางเข้าและออกของวงจรขยายที่มีอัตราขยายเท่ากับ 1 มีค่าเท่ากันดังนั้น

$$\frac{I_1}{SC_1} = I_2 R_1 \quad (3.2)$$

แรงดันทางเข้าคือ

$$V_i = \frac{I_1}{SC_1} + \frac{(I_1 + I_2)}{SC_2} \quad (3.3)$$

แทนค่า จากสมการที่ (3.2) ในสมการที่ (3.3) จะได้

$$\frac{V_i}{I_1} = \left[\frac{1}{S} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) + \frac{1}{S^2 C_1 C_2 R_1} \right] \quad (3.4)$$

ดังนั้น

$$Z_i = \left[\frac{1}{S} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) + \frac{1}{S^2 C_1 C_2 R_1} \right] \quad (3.5)$$

หรือ

$$Z_i = \left[-\frac{1}{C_1 C_2 R_1} + \frac{1}{S} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \right] \quad (3.6)$$

ซึ่งจากสมการที่ (3.6) สามารถที่จะเทียบกับสมการที่ (2.81) จะได้ค่าความต้านทานลบและค่าอิมพีแดนซ์ลบเป็น

$$-R = \left[-\frac{1}{C_1 C_2 R_1} \right] \quad (3.7)$$

$$-X = \left[\frac{1}{S} \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \right] \quad (3.8)$$

เมื่อ $S = j\omega$

3.1.1 การพิจารณาการออสซิลเลท

จากบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมความเร็วตามรูปที่ 2.14 เมื่อนำอิมพีแดนซ์ลบตามสมการที่ 3.7 และ 3.8 มาประกอบกับอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ จะสามารถพิจารณาการออสซิลเลทได้ดังนี้

การออสซิลเลทในสภาวะคงที่ พิจารณาได้จากเงื่อนไขที่จุดวิกฤติ เนื่องจากผลรวมของความต้านทานภายในรูปที่ 2.13 มีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือ

$$-R + R_L = 0 \quad (3.9)$$

และจากสมการที่ 3.7 แทนค่าในสมการกำหนดเงื่อนไขจะได้ว่า

$$R_L = -\frac{1}{C_1 C_2 R_1} \quad (3.10)$$

สมการกำหนดความถี่จะสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 3.8 และสมการที่ 2.82

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.11)$$

ความไวของความถี่ที่ใช้ในการออสซิลเลทต่อการเปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์คือ

$$C_T s \omega_0 = \frac{C_T \partial \omega_0}{\omega \partial C_T} = -\frac{1}{2} \quad (3.12)$$

$$L s \omega_0 = \frac{L \partial \omega_0}{\omega \partial L} = -\frac{1}{2} \quad (3.13)$$

3.1.2 การพิจารณาการปรับกำลัง

วงจรสมมูลย์ของตัวเหนี่ยวนำเฟสเดียวที่แสดงค่าของขดลวดสนามแม่เหล็กหมุนทางตรง และสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับในรูปที่ 2.9 สามารถที่จะนำมาเขียนในรูปของอิมพีแดนซ์ได้ดังนี้ (ประมาณให้ค่าความสูญเสียทองแดงมีค่าน้อย)

$$Z = R_1 + jX_1 + Z_f + Z_b \quad (3.14)$$

โดยที่ $Z_f = R_f + jX_f \quad (3.15)$

$$Z_f = \frac{R_2}{2S} + j\frac{X_2}{2} \quad \text{ต่อขนานกับ} \quad j\frac{X_m}{2} \quad (3.16)$$

$$Z_b = R_b + jX_b \quad (3.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_b = \frac{R_2}{2(2-S)} + j\frac{X_2'}{2} \text{ ต่อขนานกับ } j\frac{X_m}{2} \quad (3.18)$$

จะได้

$$Z_f = \frac{X_m^2}{2X_{22}} \cdot \frac{1}{SQ_2 + \frac{1}{SQ_2}} + j\left(\frac{X_2X_m}{2X_{22}} + \frac{R_f}{SQ_2}\right) \quad (3.19)$$

$$Z_b = \frac{R_2}{2(2-S)} \cdot \left(\frac{X_m}{X_{22}}\right)^2 + j\left(\frac{X_2X_m}{2X_{22}} + \frac{R_b}{2(2-S)Q_2}\right) \quad (3.20)$$

โดยที่

$$X_{22} = X_2' + X_m \quad (3.21)$$

$$Q = \frac{X_{22}}{R_2} \quad (3.22)$$

จากสมการแรงบิด ในหัวข้อ 2.1.2 สมการที่ 2.41

$$T_e = \text{จำนวนคู่ขั้ว} \times 2 \left[\frac{R_d}{S\omega} I_+^2 - \frac{R_d}{(2-S)\omega} I_-^2 \right]$$

จะเห็นได้ว่า สมการแรงบิดมีตัวแปรที่จะทำให้แรงบิด เปลี่ยนแปลงได้ดังนี้

1. ค่า Slip
2. ค่า $\omega = 2\pi f$ หรือค่า f
3. ค่ากระแส I_+
4. ค่ากระแส I_-

ส่วนค่าอื่นๆจะเป็นค่าคงที่ของมอเตอร์เช่น ค่าความต้านทานโรเตอร์ , ค่าจำนวนคู่ขั้ว โดยตัวแปรที่เราสามารถควบคุมได้ จะมีเพียง f , I_+ และ I_- การควบคุมค่าความถี่ f จะทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เปลี่ยน ถ้าเราใช้การควบคุมค่ากระแสของตัวหมุน โดยการส่งผ่านจากขดหมุนไปยังตัวหมุน จะทำให้สามารถควบคุมค่าแรงบิดได้ การควบคุมค่ากระแสที่ผ่านเข้าไปยังขดหมุนสามารถทำได้โดยการควบคุมค่าความต้านทานรวมของอิมพีแดนซ์ในรูปที่ 2.13

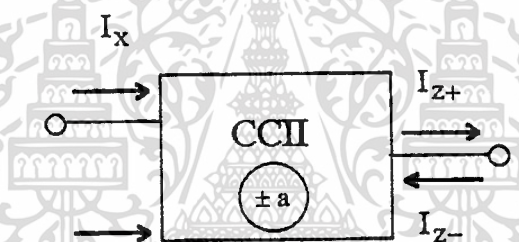
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ความต้านทานปรับค่าได้

การสังเคราะห์วงจรประกอบในการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ในหัวข้อ 3.1 มีตัวแปรที่ใช้ในการปรับค่าแรงบิด เป็นความต้านทาน R_1 ตามสมการที่ 3.7 เพื่อให้เป็นการสะดวกต่อการควบคุม จึงได้มีการออกแบบความต้านทานแบบปรับค่าได้โดยใช้วิธีอิเล็กทรอนิกส์โดยการใช้วงจรสายพานกระแสมาประกอบกันซึ่งมีพื้นฐานวงจรสายพานกระแสดังนี้

3.2.1 วงจรสายพานกระแส

วงจรสายพานกระแสจะแทนด้วยเนทเวอร์ค 3 ทางเข้าออก คือ ทางเข้าออก x , y และ z ดังแสดงในรูปที่ 3.2 คุณสมบัติของเนทเวอร์ค สามารถอธิบายได้ด้วยไฮบริดพารามิเตอร์ ซึ่งจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน และกระแสที่ทางเข้าออก ต่างๆ ดังสมการที่ 3.23



รูปที่ 3.2 เนทเวอร์คของสายพานกระแส

$$\begin{bmatrix} I \\ V_x \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \pm a & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ I_x \\ V_z \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

จากสมการที่ 3.23 เราจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$I_y = 0 \quad (3.24)$$

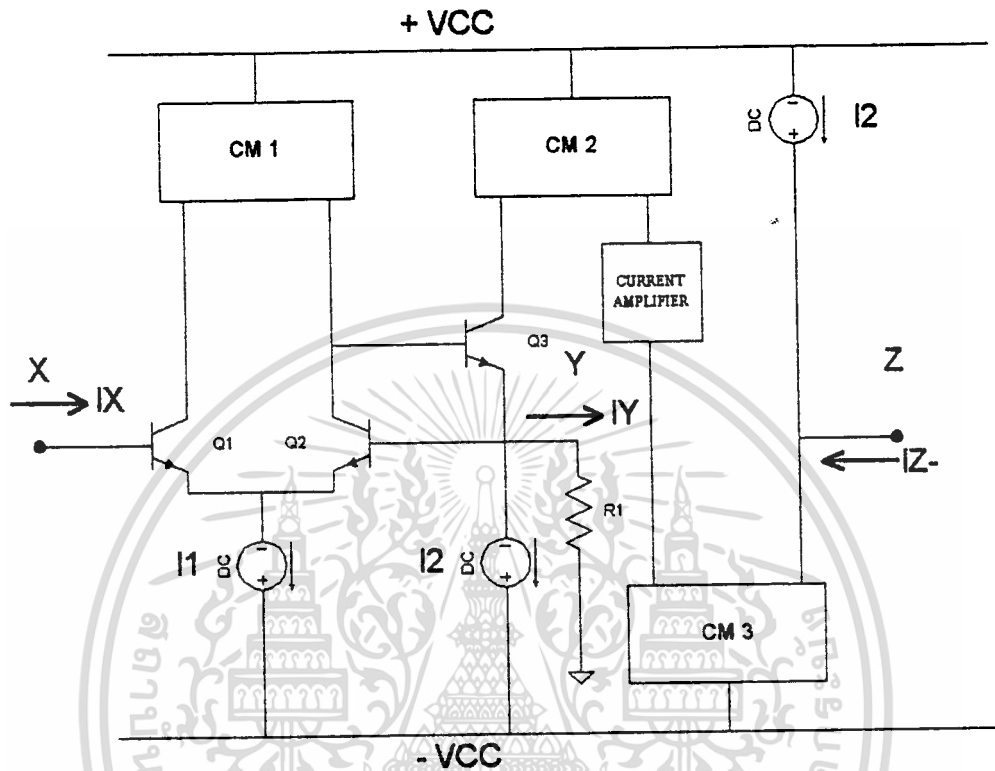
$$V_x = V_y \quad (3.25)$$

$$I_z = \pm a I_x \quad (3.26)$$

จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่พอร์ท x , y และ z จะได้ว่า a เป็นอัตราขยายของวงจรสายพานกระแส การออกแบบวงจรสายพานกระแสแบบปรับค่าได้ใช้

เอกสารนี้เป็นหลักการเดิมของวงจรสายพานกระแส แต่ปรับปรุงวงจรสายพานกระแสให้สามารถขยายไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสได้ ซึ่งเป็นการปรับอัตราค่าของการส่งผ่าน กระแสโดยมีแผนภาพของวงจรสายพาน
กระแสแบบลบดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภาพของวงจรสายพานกระแสแบบปรับค่าได้ชนิดลบ

จากแผนภาพเราสามารถแบ่งการทำงานของอุปกรณ์ออกเป็น กลุ่มๆ ได้คือ วงจรตามสัญญาณ ซึ่งประกอบไปด้วย Q_1 , Q_2 วงจรสะท้อนกระแสลบ CM1 (Negative Current Mirror) และ I_1 โดยกระแส I_C ของทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวเท่ากันอยู่เสมอ โดยมี CM1 เป็นตัวควบคุมกระแส ซึ่งส่งผลให้

$$V_{be_1} = V_{be_2} \quad (3.27)$$

จากเหตุผลนี้เองทำให้แรงดันที่จุด X และ จุด Y มีค่าเท่ากันอยู่เสมอ จากแผนภาพของวงจรสายพานกระแสสามารถที่จะนำมาเขียนเป็นวงจรได้ดังรูปที่ 3.4 โดยมีการทำงานดังนี้ ทรานซิสเตอร์ Q_4 , Q_5 และ Dz_1 ประกอบกันเป็นวงจรป้อนกลับที่มีอัตราขยายสูงเพื่อควบคุมกระแสที่ไหลผ่าน Q_3 ซึ่งเป็นวงจรตามสัญญาณให้มีค่าเท่ากับกระแสอ้างอิง I_2 เสมอ โดยซีเนอร์ไดโอด Dz_1 ทำหน้าที่ยกแรงดันที่พอร์ต x ให้มีค่าสูงเพื่อเพิ่มย่านการแกว่งของระดับแรงดันที่พอร์ต x ให้มีค่าสูงตามแรงดันที่พอร์ต y โดยการแกว่งของแรงดันสัญญาณด้านล่างมีค่าต่ำสุดได้ คือ $(-V_{cc} + 3V_{be})$ ดังนั้นเพื่อให้การแกว่งของ แรงดัน

เอกสารนี้
สัญญาณสมมูลจะต้องใช้ Dz_1 ที่มีค่าแรงดัน สอดคล้อง ตามสมการ 3.28, 3.29 ดังนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{out} = I_2 - (I_2 - I_x) \quad (3.33)$$

$$I_{out} = I_x \quad (3.34)$$

การพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์

ค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท x

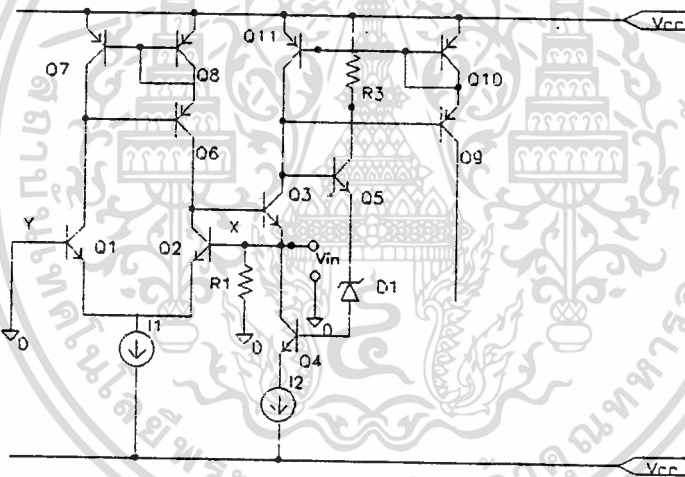
ค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท x หาได้จากการต่อพอร์ท y เข้ากับสัปดาห์คาคิน จากรูปที่ 3.5 จะได้

$$i = V_{in} / 2r_e \quad (3.35)$$

$$V_{in} = V \text{ ที่พอร์ท } x$$

$$r_e = \text{ความต้านทานไดนามิกของทรานซิสเตอร์}$$

$$Q_1, Q_2 = V_T / I_c$$



รูปที่ 3.5 การพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท x

ที่พอร์ท x จะได้

$$I_{in} = \frac{2\beta_3 i + i + 2\beta_3 \beta_4 \beta_5 i}{\beta_2} \quad (3.36)$$

แทนค่า i จากสมการที่ (3.35)

$$I_{in} = \left[\frac{V_{in}}{2r_e} \right] \left[2\beta_3 + \left(\frac{1}{\beta_2} \right) + 2\beta_3 \beta_4 \beta_5 \right] \quad (3.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

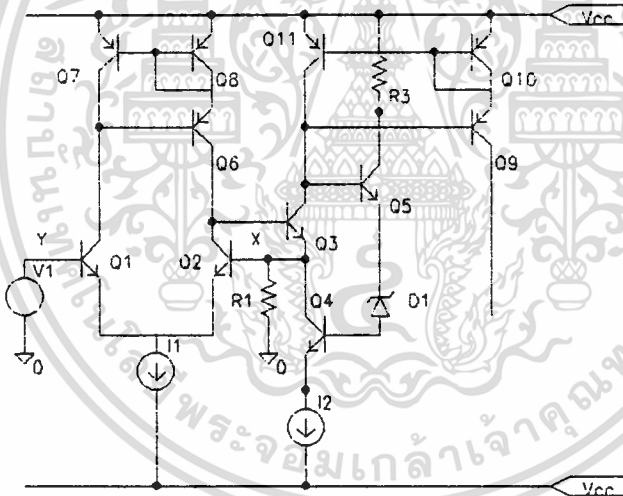
$$\frac{V_{in}}{I_{in}} = Z_x = \frac{2\beta_2 r_e}{(1 + 2\beta_2\beta_3 + 2\beta_2\beta_3\beta_4\beta_5)} \quad (3.38)$$

โดยทั่วไปอัตราค่าการขยายกระแสของทรานซิสเตอร์แบบ NPN จะมีค่า β สูงจากสมการที่ 3.38 เราจะประมาณค่า Z_x ได้ว่ามีค่าต่ำมาก

ค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท y

ค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท y จะหาได้โดยที่ พอร์ท x ต่อความต้านทาน R ลงสู่กักคาดิน ที่พอร์ท y นั้นแรงดันเข้าเป็น V_{in} ได้กระแสสัญญาณ เข้าสู่วงจรที่พอร์ท y มีค่าเป็น I_{in}

$$Z_y = \frac{V_{in}}{I_{in}} \quad (3.39)$$



รูปที่ 3.6 การพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท y

จากรูปที่ 3.6 จะได้

$$i_x = \frac{V_x}{R} = \frac{V_{in}}{R} \quad (3.40)$$

$$I = \beta_1 I_{in} \quad (3.41)$$

จากสมการที่ 3.25 $V_x = V_y = V_{in}$

ที่พอร์ท x จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$i_x = \frac{i}{\beta_2} + 2\beta_3 i + 2\beta_3\beta_4\beta_5 \quad (3.42)$$

แทนค่าสมการที่ (3.39) ด้วยสมการที่ (3.42) จะได้

$$\frac{V_{in}}{R} = I_{in}\beta_1 \left\{ \frac{1}{\beta_2} + 2\beta_3 + 2\beta_3\beta_4\beta_5 \right\} \quad (3.43)$$

$$Z_y = \frac{V_{in}}{I_{in}} = R \left\{ \frac{\beta_1}{\beta_2} + 2\beta_1\beta_3 + 2\beta_1\beta_3\beta_4\beta_5 \right\} \quad (3.44)$$

โดยทั่วไป ทรานซิสเตอร์ NPN จะมีค่า β สูง เราสมมติให้ค่า β ประมาณเท่ากันจะได้

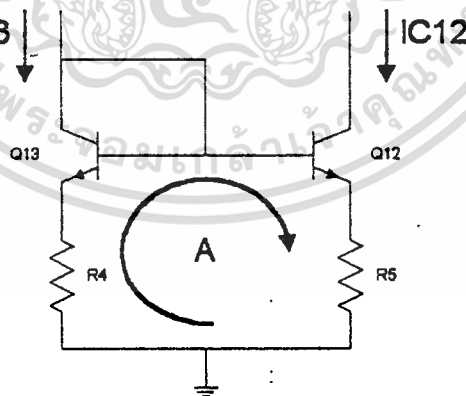
$$Z_y = R[1 + 2\beta^2 + 2\beta^4] \quad (3.45)$$

จะเห็นได้จากสมการที่ (3.45) เมื่อค่า β มีค่าสูง จะได้ว่า Z_y จะมีค่าอิมพีแดนซ์สูง

ค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท z

ค่าอิมพีแดนซ์ที่พอร์ท z ประมาณค่าเท่ากับ : อิมพีแดนซ์ของวงจรจ่ายกระแส คงตัว I_z ต่อขนานกับ อิมพีแดนซ์ที่จุดสัญญาณของวงจรสะท้อนกระแส ซึ่งทั้งสองค่ามีค่าสูง จึงประมาณได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์มีค่า สูงด้วย

การพิจารณาวงจรสะท้อนกระแสที่สามารถปรับอัตราขยาย ได้



รูปที่ 3.7 วงจรสะท้อนกระแสที่สามารถปรับอัตราการสะท้อนกระแสได้ จากวงจรในรูปที่ 3.7 พิจารณาวงจรกระแส A จะได้

$$V_{be_{13}} - V_{be_{12}} - I_{c_{13}} R_4 - I_{c_{12}} R_5 = 0 \quad (3.46)$$

โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{be13} = V_{be12} = V_T \ln \frac{I_C}{I_S} \quad (3.47)$$

แทนค่า (3.47) ใน (3.46) จะได้

$$V_T \ln \frac{I_{C13}}{I_{S13}} - V_T \ln \frac{I_{C12}}{I_{S12}} - I_{C13} R_4 - I_{C12} R_5 = 0 \quad (3.48)$$

สมมติให้ทรานซิสเตอร์มีความสมพงค์กันดี จากสมการ (3.48) จะได้

$$I_{C12} = \frac{1}{R_5} \left\{ I_{C13} R_4 + V_T \ln \frac{I_{S12}}{I_{S13}} \frac{I_{C13}}{I_{C12}} \right\} \quad (3.49)$$

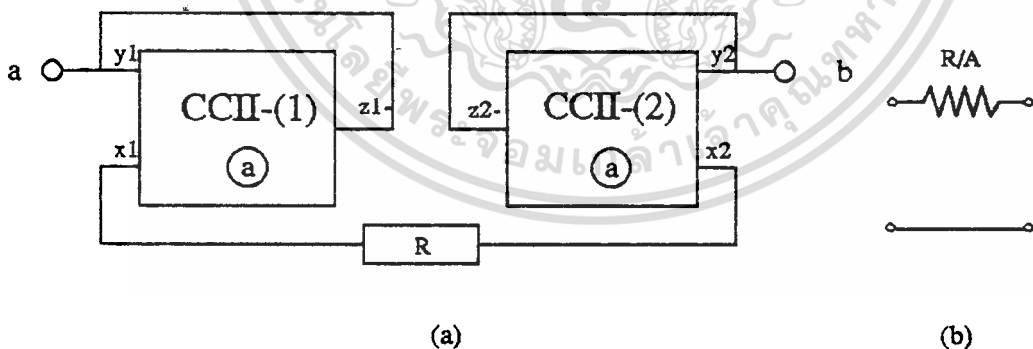
เทอมหลังของสมการ (3.49) จะมีค่าน้อยมาเมื่อ อัตราการขยายกระแสมีมากโดยเราจะประมาณได้ว่า

$$I_{C12} \approx I_{C13} \frac{R_4}{R_5} \quad (3.50)$$

โดยที่ $\frac{R_4}{R_5}$ เป็นอัตราการขยายของวงจร

3.2.2 วงจรตัวต้านทานแบบปรับค่าได้

ค่าความต้านทานปรับค่าได้ที่สร้างขึ้น ประกอบด้วยวงจรสายพานกระแส 2 ตัวมาประกอบกันดังรูปที่ 3.8 โดยความต้านทานที่สร้างขึ้นเป็นความต้านทานแบบลอยตัว โดยมีลักษณะการทำงานดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 (a) แสดง บล็อกโคอะแกรม ของวงจรความต้านทานปรับค่าได้ (b) วงจรสมมูล

จากบล็อกโคอะแกรม ประกอบไปด้วยวงจรสายพานกระแสแบบปรับค่าได้ 2 ตัวประกอบกับความต้านทานในลักษณะการส่งกระแสผ่านตัวต้านทาน กระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานและอัตราการส่งผ่านกระแส โดยสามารถหาค่าความสัมพันธ์ได้ดังนี้

ให้ $V_{ij} - I_{ij}$ คือค่าแรงดันและกระแสที่พอร์ท i ของวงจรสายพานกระแส $CCII_j$; $j = 1, 2$ ด้านการคำนวณว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรสายพานกระแส CCH1 จะมีความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสที่พอร์ท x_1, y_1 และ z_1 - เป็น

$$I_{y_1} = 0 \quad (3.51)$$

$$V_{x_1} = V_{y_1} \quad (3.52)$$

$$I_{z_1-} = AI_{x_1} \quad (3.53)$$

วงจรสายพานกระแส CCH2 จะมีความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสที่พอร์ท x_2, y_2 และ z_2 - เป็น

$$I_{y_2} = 0 \quad (3.54)$$

$$V_{x_2} = V_{y_2} \quad (3.55)$$

$$I_{z_2-} = AI_{x_2} \quad (3.56)$$

เมื่อมีแรงดันสัญญาณตกคร่อมจุด a และ b เป็น $V_a - V_b = V_{ab}$ จากวงจรตามรูป

$$V_{y_1} = V_a \quad (3.57)$$

$$V_{y_2} = V_b \quad (3.58)$$

โดยคุณสมบัติของวงจรสายพานกระแส CCH1

$$V_{x_1} = V_{y_1} = V_a \quad (3.59)$$

โดยคุณสมบัติของวงจรสายพานกระแส CCH2

$$V_{x_2} = V_{y_2} = V_b \quad (3.60)$$

ดังนั้น จะมีแรงดันสัญญาณตกคร่อมความต้านทาน R เท่ากับ

$$V_{x_1} - V_{x_2} = V_{ab} \quad (3.61)$$

และมีกระแสสัญญาณไหลผ่านความต้านทาน R ในทิศทางจาก x_1 ไปยัง x_2

$$I_R = \frac{V_{ab}}{R} \quad (3.62)$$

วงจรสายพานกระแส CCH2 จะมีสัญญาณไหลออกจากวงจรที่พอร์ท x_2

$$I_{x_1} = I_R = \frac{V_{ab}}{R} \quad (3.63)$$

จากคุณสมบัติของวงจร CCH1 และสมการที่ (3.62)

$$I_{z_1-} = AI_{x_1} = A \frac{V_{ab}}{R} \quad (3.64)$$

และ

$$I_{y_1} = 0$$

ดังนั้นที่จุด a จะมีกระแสไหลเข้าวงจรเท่ากับ $I_{z1-} = A \frac{V_{ab}}{R}$
 จากคุณสมบัติของ CCI2 และสมการที่ (3.63)

$$I_{z2-} = AI_{x2} = A \frac{V_{ab}}{R} \quad (3.65)$$

และ $I_{y2} = 0$

ดังนั้น ที่จุด b จะมีกระแสไหลออกจากวงจรเท่ากับ $I_{z2-} = A \frac{V_{ab}}{R}$

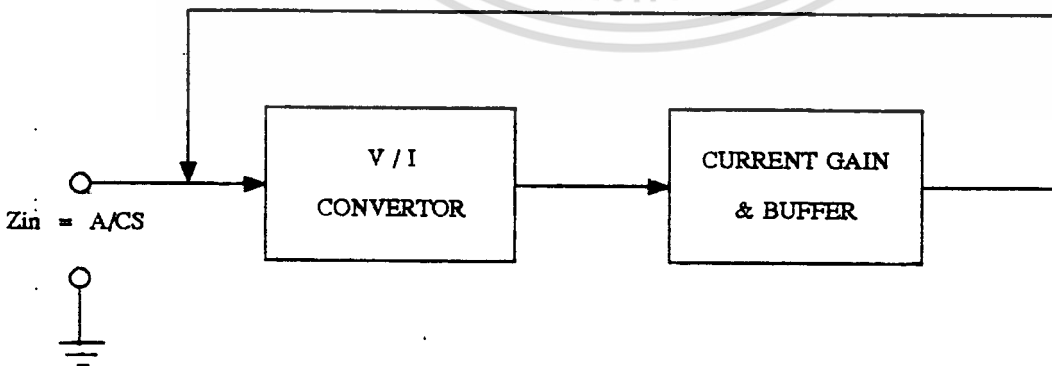
ดังนั้นเมื่อมีแรงดันสัญญาณตกคร่อมจุด a และ b เท่ากับ V_{ab} จะมีกระแสสัญญาณไหลเข้า
 วงจรที่จุด a และไหลออกจากวงจรที่จุด b เท่ากับ $A \frac{V_{ab}}{R}$ วงจรตามรูปที่ 3.8 จึงเป็นวงจร
 ปรับค่าความต้านทาน และค่าความต้านทานที่ได้จะมีค่าเป็น

$$R_{eq} = \frac{V_{ab}}{A \frac{V_{ab}}{R}} \quad (3.66)$$

$$R_{eq} = \frac{R}{A} \quad (3.67)$$

3.3 วงจรเสมือนตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้

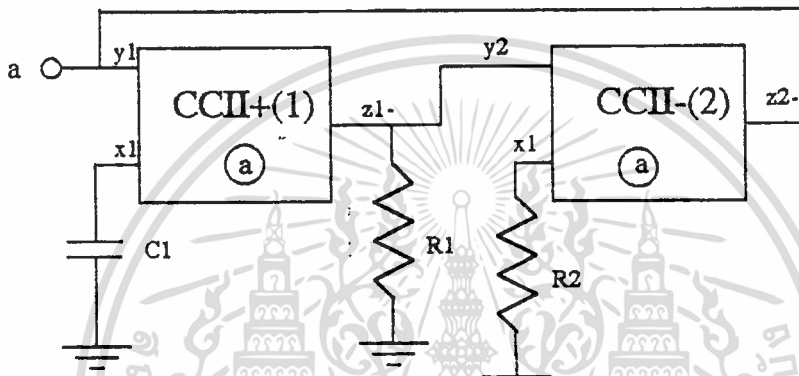
การออกแบบตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ จะใช้พื้นฐานของวงจรสายพานกระแส
 ตามสมการที่ (3.23) ถึง (3.27) มาเป็นพื้นฐานในการออกแบบซึ่งสามารถทำได้ทั้งแบบ
 เทียบศักดาและแบบลอยตัวโดยมี-บล็อกลอยโอะแกรมหลักการแบบเทียบศักดา ดังนี้



รูปที่ 3.9 แสดงบล็อกลอยโอะแกรมหลักการพื้นฐานของตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของบล็อกโคอะแกรม โดยการแบ่งออกเป็น 2 ส่วนประกอบไปด้วยส่วนส่งผ่านกระแสที่สามารถปรับอัตราการขยายได้ และส่วนส่งผ่านกระแสโดยในส่วนแรกทำหน้าที่ในการเปลี่ยนแรงดันให้เป็นกระแสในรูปแบบของกระแสของตัวเก็บประจุและสามารถปรับอัตราการขยายกระแสได้ และส่วนที่สองทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสกลับไปยังจุดสัญญาณเข้าจากบล็อกโคอะแกรม เรานำวงจรสายพานกระแสมาประกอบเป็นวงจรได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรเสมือนตัวเก็บประจุแบบเทียบศักดาที่สามารถปรับค่าได้

การทำงานของวงจรจะประกอบไปด้วยวงจรสายพานกระแสแบบบวกที่สามารถปรับอัตราการขยายได้ CCII1 ทำหน้าที่ส่งผ่านและปรับอัตราการขยายของกระแสที่ไหลผ่านคาปาซิเตอร์ ค่ากระแสที่ออกจากวงจรสายพานกระแส CCII1 จะถูกเปลี่ยนให้เป็นแรงดันโดย R_1 และจะถูกส่งผ่านกระแสโดยวงจรสายพานกระแส CCII2 ซึ่งเป็นกระแสที่ไหลผ่าน R_2 ไปยังจุดสัญญาณเข้า เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของส่วนต่างๆ ได้ดังนี้

ให้ V_{ij}, I_{ij} คือแรงดันและกระแสที่พอร์ท i และ $CCII_j$; $j = 1, 2$

วงจรสายพานกระแส CCII1 จะมีความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่พอร์ท x, y, z เป็น

$$I_{y_1} = 0 \quad (3.68)$$

$$V_{x_1} = V_{y_1} \quad (3.69)$$

$$I_{z_1} = a I_{x_1} \quad (3.70)$$

วงจรสายพานกระแส CCII2 จะมีความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันที่พอร์ท x, y, z เป็น

$$I_{y_2} = 0 \quad (3.71)$$

$$V_{x_2} = V_{y_2} \quad (3.72)$$

$$I_{z_2} = -a I_{x_2} \quad (3.73)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีแรงดันสัญญาณ V_{in} ที่พอร์ท Y ของ CCH1 จะได้

$$V_{x_1} = V_{y_1} = V_{in} \quad (3.74)$$

ที่พอร์ท X ของวงจรสายพาดกระแส CCH1 จะมีค่ากระแสเป็น

$$I_{x_1}(S) = C(SV_{x_1}(S)) = CSV_{in}(S) \quad (3.75)$$

จากคุณสมบัติของวงจรสายพาดกระแสและสมการที่ (3.70) จะได้ว่า

$$I_{z_1}(S) = a I_{x_1}(S) \quad (3.76)$$

$$I_{z_1}(S) = a CSV_{in}(S) \quad (3.77)$$

และ

$$V_{z_1}(S) = R_1 I_{z_1}(S) \quad (3.78)$$

$$V_{z_1}(S) = R_1 a CSV_{in}(S) \quad (3.79)$$

$$V_{z_1} = V_{y_2} \quad (3.80)$$

$$V_{y_2} = V_{x_1} \quad (3.81)$$

$$I_{x_2}(S) = \frac{V_{x_1}(S)}{R_2} = \frac{R_1}{R_2} a CSV_{in}(S) \quad (3.82)$$

$$I_{z_2-}(S) = -I_{x_2}(S) \quad (3.83)$$

จากคุณสมบัติของวงจรสายพาดกระแส $I_{y_1} = 0$ จะได้กระแสที่จุดเข้าของวงจรที่พอร์ท y ของวงจรสะท้อนกระแสเป็น

$$I_{in}(S) = -I_{z_2-}(S) \quad (3.84)$$

$$I_{in}(S) = \frac{R_1}{R_2} a CSV_{in}(S) \quad (3.85)$$

วงจรจะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดสัญญาณเข้าเท่ากับ

$$Z_{in}(S) = \frac{V_{in}(S)}{I_{in}(S)} \quad (3.86)$$

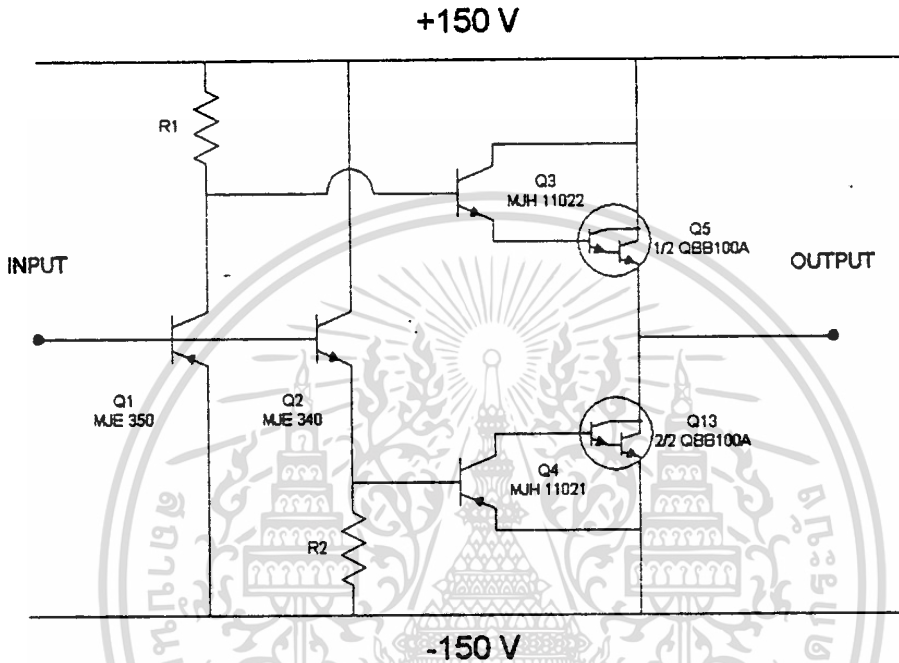
$$Z_{in}(S) = \frac{R_2}{R_1 a CS} \quad (3.87)$$

ดังนั้นค่าตัวเก็บประจุจะขึ้นอยู่กับค่าตัวแปร 4 ตัวคือ R_1 , R_2 , a และ C เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วงจรขยายแบบตามแรงดัน

รูปที่ 3.11 เป็นวงจรขยายแบบตามแรงดัน ที่สามารถทนแรงดันได้สูงเป็นพิเศษ โดยสามารถทนแรงดันได้ถึง ± 150 Vdc และสามารถที่จะจ่ายกระแสได้ถึง 1.5 Adc ที่แรงดันเต็มพิกัด



รูปที่ 3.11 วงจรขยายแบบตามแรงดัน

วงจรขยายแบบตามแรงดันที่ใช้ทรานซิสเตอร์แบบภาคอินพุตซึ่งประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์ Q1 และ Q2 เป็นตัวรับสัญญาณที่ประกอบวงจรเป็นแบบ คอลเลคเตอร์ร่วมซึ่งวิธีการไบอัสแปลงให้อยู่ในรูปวงจรสมมูลย์ในรูปที่ 3.12 การไบอัสไปข้างหน้า (+) ของทรานซิสเตอร์แบบ NPN (Q2) ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของ I_{c2} ซึ่งเท่ากับ $g_m V$ เพิ่ม $g_m V + I_b$ ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของแรงดันตกคร่อม R_{E2} ซึ่งเท่ากับแรงดันเอาท์พุทเพิ่ม ซึ่งนั่นหมายความว่า V_i เพิ่มทำให้ V_o เพิ่มจึงไม่มีการกลับเฟสของสัญญาณและเป็นในทำนองเดียวกับทรานซิสเตอร์ PNP (Q1)

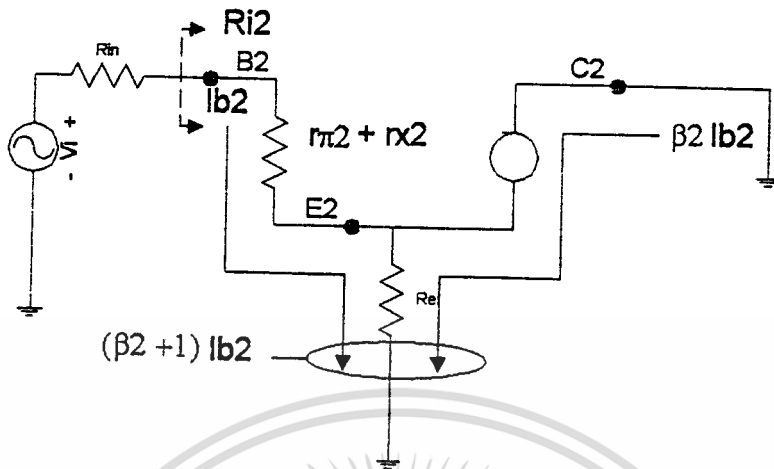
อินพุทอิมพีแดนซ์ของวงจรสมมูลย์ในรูปที่ 3.12 คือ

$$R_{i2} = \frac{V_i}{I_{b2}} = r_{x2} + r_{\pi2} + (\beta_2 + 1)R_e \quad (3.88)$$

และ
$$V_o = R_e(\beta_2 + 1)I_{b2} \quad (3.89)$$

แทนค่า I_{b2} จากสมการที่ 3.88

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{(\beta_2 + 1)R_e}{R_{i2}} = \frac{(\beta_2 + 1)R_e}{r_{x2} + r_{\pi2} + (\beta_2 + 1)R_e} \quad (3.90)$$



รูปที่ 3.12 แสดงวงจรสมมูลของการพิจารณาอัตราขยายภาคอินพุท

สมมติให้ $(r_{x2} + r_{\pi 2}) \ll (\beta_2 + 1)R_e$ เทอม $r_{x2} + r_{\pi 2}$ ในสมการที่ 3.90 จะสามารถตัดออกได้ทำให้ประมาณได้ว่า

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \approx 1 \quad ; \quad (r_{x2} + r_{\pi 2}) \ll (\beta_2 + 1)R_e \quad (3.91)$$

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{(\beta_2 + 1)I_{b2}}{I_{b2}} = (\beta_2 + 1) \quad (3.92)$$

ในส่วนของอินพุท Q1 ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์แบบ PNP ต้องจกรเป็นแบบคอลเลกเตอร์ร่วมจะได้อัตราขยายของ $A_v = 1$ เช่นเดียวกัน

ภาคเอาต์พุทจะประกอบไปด้วย Q3 และ Q5 ประกอบกันเป็นวงจรทรานซิสเตอร์แบบคาร์ลิงตันขยายส่วนของสัญญาณอินพุทที่เป็นซิกนัล ทรานซิสเตอร์ Q4 และ Q6 ประกอบกันเป็นวงจรคาร์ลิงตันแบบทรานซิสเตอร์คนละชนิด (Inverted darlington amplifier) เพื่อหลีกเลี่ยงความลำบากในการหาทรานซิสเตอร์แบบ PNP ที่มีกำลังสูง โดยอธิบายการทำงานได้ดังนี้

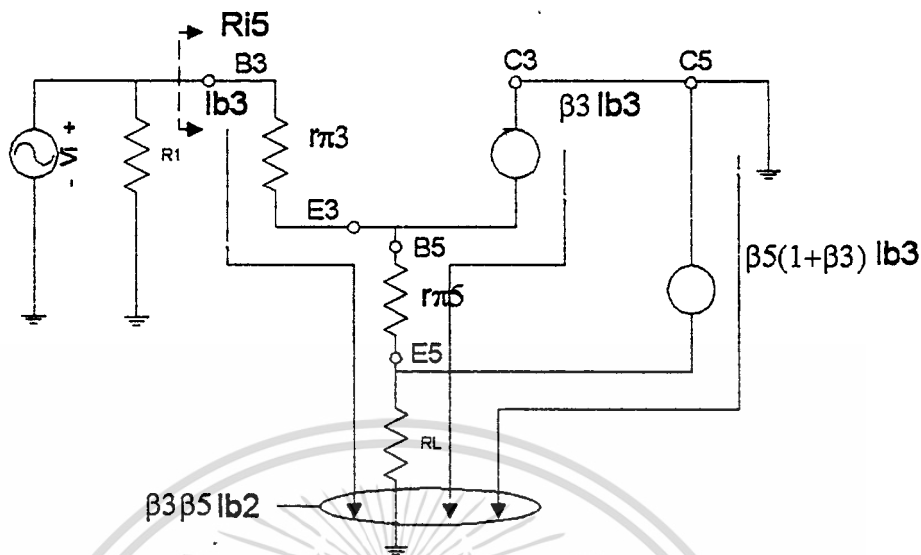
สัญญาณอินพุทที่เป็นบวก

จากรูปที่ 3.11 เราจะพบว่าในกรณีนี้ที่สัญญาณอินพุทเป็นบวกทรานซิสเตอร์ Q3, Q5 นำกระแสและ Q4, Q6 ไม่นำกระแส จากวงจรสมมูลของวงจรขยายแบบตามแรงดันในส่วนของเอาต์พุทในรูปที่ 3.13 จะได้กระแส I_{b3} ทำให้เกิด $\beta_3 I_{b3}$ และไหลผ่าน $r_{\pi 5}$ เพื่อจะถูกคูณด้วย β_5 จะได้อัตราขยายกระแสเป็น

$$A_{i_3} = \frac{I_o}{I_{in}} = I_{b3} \cdot \frac{(1 + \beta_3 + \beta_5(1 + \beta_3))}{I_{b3}} \cong \beta_5 \beta_3 \quad (3.93)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



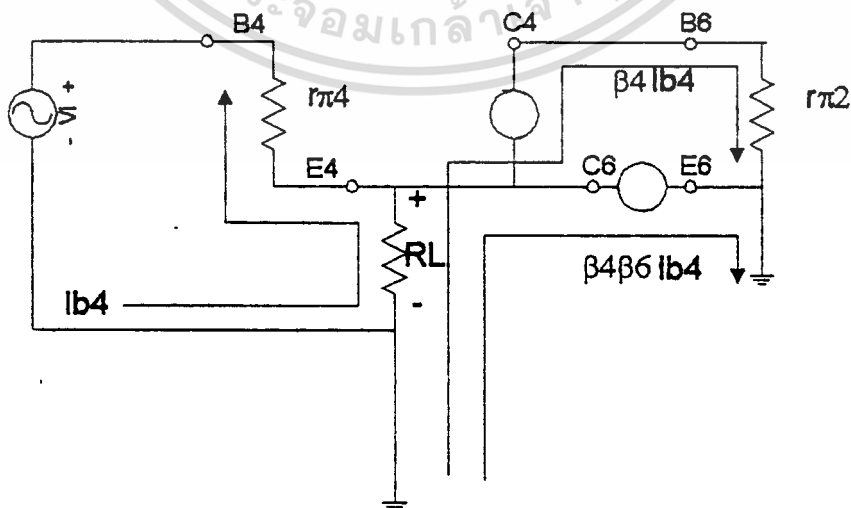
รูปที่ 3.13 วงจรสมมูลของการพิจารณาอัตราขยายภาคเอาต์พุตสำหรับอินพุตที่เป็นบวก ความต้านทานอินพุต R_{i5} จากรูป 3.13

$$R_{i5} = r_{\pi 3} + (\beta_3 + 1)r_{\pi 5} + (\beta_5 + 1)R_L = \beta_3\beta_5R_L \quad (3.94)$$

$$A_{v_s} = \frac{V_o}{V_i} = \frac{I_o R_L}{i_{in} R_{i5}} = \frac{\beta_3\beta_5R_L}{\beta_3\beta_5R_L} \cong 1 \quad (3.95)$$

สัญญาณอินพุตที่เป็นลบ

ถ้า V_i ในรูปที่ 3.10 เป็นลบทรานซิสเตอร์ Q4, Q6 จะนำกระแส และทรานซิสเตอร์ Q3, Q5 หยคนำกระแสทำให้ได้วงจรสมมูลเป็นดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วงจรสมมูลของการพิจารณาอัตราขยายภาคเอาต์พุตสำหรับอินพุตที่เป็นลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.14 กระแส I_{b4} ทำให้เกิด $\beta_4 I_{b4}$ ซึ่งจะทำให้เกิด $\beta_6 \beta_4 I_{b4}$ พิจารณาอัตราขยายกระแสและค่าความต้านทานอินพุตจะได้

$$A_{i_6} = \frac{I_{b4}(1 + \beta_4 + \beta_6 \beta_4)}{I_{b4}} = \beta_4 \beta_6 \quad (3.96)$$

$$R_{i_6} = r_{\pi 4} + \beta_4(1 + \beta_6)R_L = \beta_4 \beta_6 R_L \quad (3.97)$$

$$A_{v_6} = \frac{V_o}{V_i} = \frac{A_{i_6}}{R_{i_6}} R_L \cong 1 \quad (3.98)$$

จากวงจรสมมูลย์ในรูปที่ 3.14 ทรานซิสเตอร์ Q4 ถูกประกอบวงจรเป็นแบบคอลเลกเตอร์ร่วม Q6 ได้รับสัญญาณอินพุตที่ขาเบสของมัน และเอาต์พุตถูกเอาออกมาจากขาคอลเลกเตอร์ ดังนั้นทรานซิสเตอร์ Q6 จึงทำงานเป็นแบบอิมิเตอร์ร่วม แต่เนื่องจาก V_o ต่อแบบอนุกรมต่อต้าน V_i ทำให้เป็นการป้อนกลับ 100 % และคิ่งนั้นอัตราขยายแรงคิ่งเท่ากับ 1

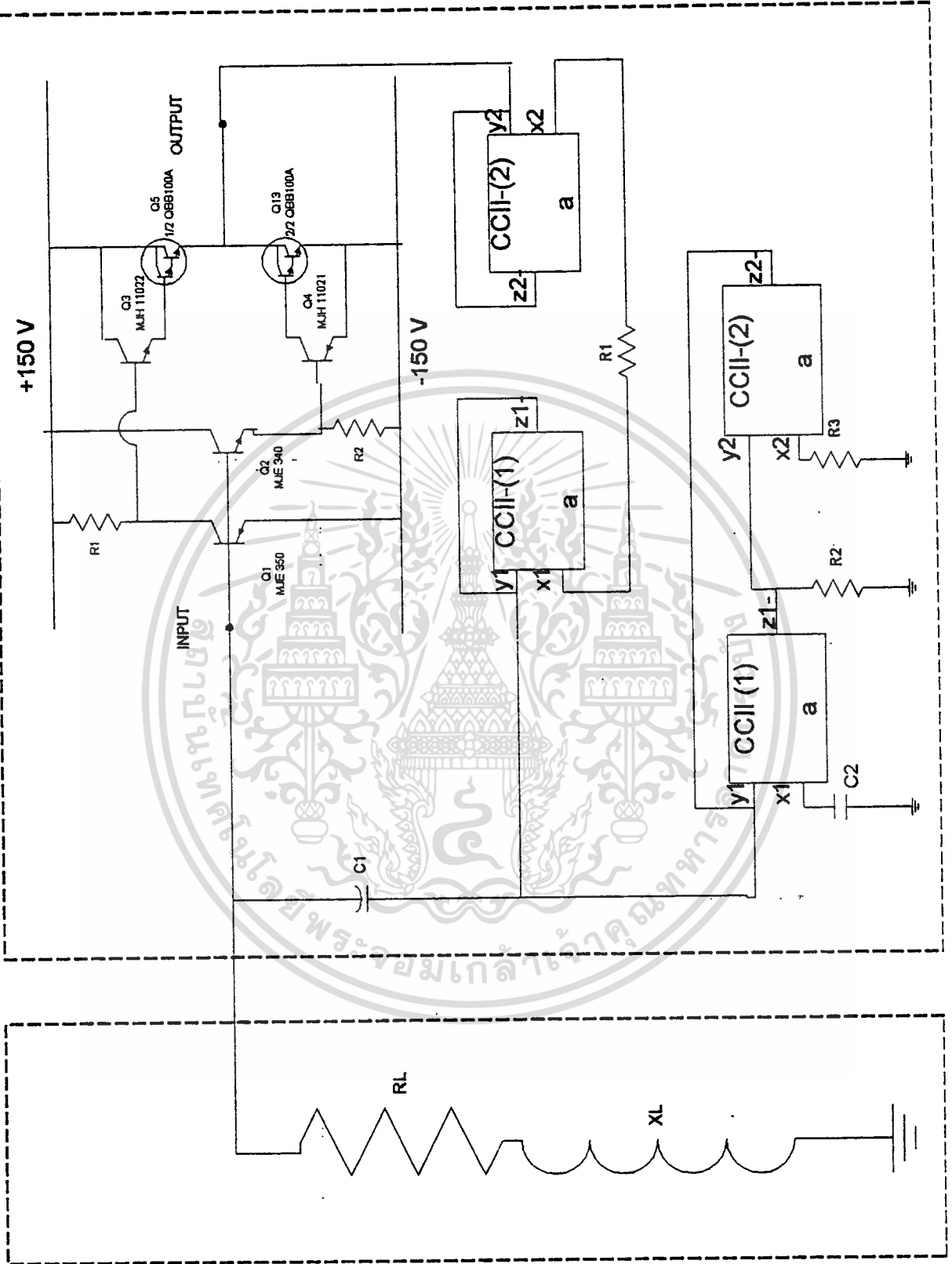
3.5 วงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยใช้เทคนิคการออสซิลเลท

จากหัวข้อ 3.1 ถึง 3.4 สามารถนำมาประกอบเป็นวงจรควบคุมความเร็วมอเตอร์โดยใช้เทคนิคการออสซิลเลท ได้ดังรูปที่ 3.15



CONTROL CIRCUIT (-R +C)

MOTOR



รูปที่ 3.15 แสดงวงจรรวมของการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวโดยใช้เทคนิคการอสติเลท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

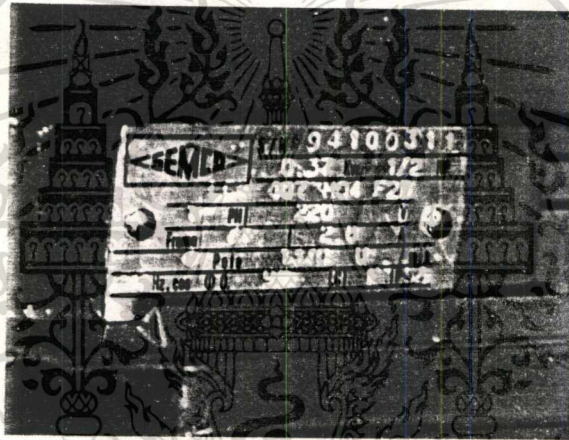
บทที่ 4

การทดลองควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวโดยใช้เทคนิคการอสซิโลสโคป

4.1 คุณสมบัติมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

การทดลองใช้เทคนิคการอสซิโลสโคปในการควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว จำเป็นที่จะต้องทดสอบคุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเพื่อเลือกและออกแบบวงจร ประกอบในการควบคุมความเร็วเนื่องจากความเร็วของมอเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมขึ้นอยู่กับวงจรที่ใช้ในการประกอบเพื่อให้เกิดการอสซิโลสโคปและคุณสมบัติของตัวมอเตอร์ตามสมการที่ (2.29) ถึง (2.34)

มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบมีแผ่นป้ายบอกรายละเอียด (Name Plate) ดังรูปที่ 4.1



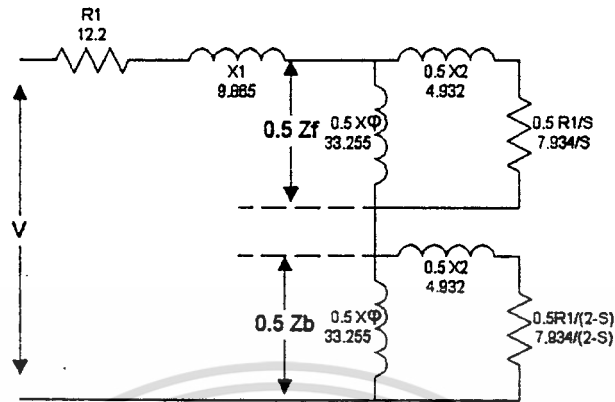
รูปที่ 4.1 แผ่นป้ายบอกรายละเอียดมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

Manufacture	SAMCO	Serial No.	94100311
HP.	1/2 HP.	Power	0.37 kW
Model	LCN 407 M04 F2B	Phase	1
Volts	220 V	Frame	71
Current	2.8 A	Pole	4
Speed	1370 RPM.	Frequency	50 Hz
Cos Φ	0.90	ICI. Class	F

มอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ สามารถหาค่าตัวแปรต่างๆของมอเตอร์ได้จากแผ่นป้ายบอกรายละเอียดและผลการทดสอบตัวมอเตอร์แสดงในภาคผนวก 2 โดยสามารถนำมาเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

ค่าอิมพีแดนซ์รวมของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวคิดที่สถานะสั้นโหลดเป็น 1 ซึ่งเป็นสภาวะก่อนที่มอเตอร์จะเริ่มหมุน ซึ่งอิมพีแดนซ์ของขดหมุนทางตรงและขดหมุนย้อนกลับจะเท่ากัน ตามสมการที่ 4.1 และ 4.2

$$0.5 Z_f \equiv 0.5(R_f + jX_f) \equiv 0.5\left\{\left(\frac{R_2}{S} + jX_2\right)\right\} \text{ ต่อขนานกับ } jX_\phi \quad (4.1)$$

$$0.5 Z_b \equiv 0.5(R_b + jX_b) \equiv 0.5\left\{\left(\frac{R_2}{2-S} + jX_2\right)\right\} \text{ ต่อขนานกับ } jX_\phi \quad (4.2)$$

และจากรูปที่ 4.2 อิมพีแดนซ์รวมของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวจะได้จาก

$$Z_t = R_1 + X_1 + 0.5 Z_f + 0.5 Z_b \quad (4.3)$$

จากวงจรสมมูลย์ในรูปที่ 4.2 อิมพีแดนซ์ของขดหมุนทางตรงและขดหมุนย้อนกลับมีค่าเป็น

$$Z_f = \left(\frac{7.934}{1} + j4.932\right) // 33.255 = 5.897 + j5.198$$

$$Z_b = \left(\frac{7.934}{2-1} + j4.932\right) // 33.255 = 5.897 + j5.198$$

จากผลลัพธ์ของสมการที่ 4.1 และ 4.2 เมื่อนำมารวมกับ R1 และ X1 ตามสมการที่ 4.3 จะได้ อิมพีแดนซ์รวมเป็น

$$Z_t = 12.2 + j9.865 + 5.897 + j5.198 + 5.897 + j5.198$$

$$Z_t = 23.994 + j20.26$$

หรือ

$$Z_t = 23.994 + s(0.02953) \quad (4.4)$$

และในลักษณะเดียวกันค่าอิมพีแดนซ์รวมของมอเตอร์คิดที่สภาวะคลื่นไกลเท่ากับ 0.03 ซึ่งเป็น จุดพักคของมอเตอร์ที่สภาวะคงตัว (Steady Stage) และเป็นสภาวะที่ใกล้กับความเร็ว ชิงโครนัส มีค่าดังนี้

อิมพีแดนซ์ของสนามแม่เหล็กหมุนทางตรง

$$Z_f = \left(\frac{7.934}{0.03} + j4.932 \right) // 33.255 = 4.098 + j32.67$$

อิมพีแดนซ์ของสนามแม่เหล็กหมุนทางย้อนกลับ

$$Z_b = \left(\frac{7.934}{2 - 0.03} + j4.932 \right) // 33.255 = 3.901 + j4.288$$

อิมพีแดนซ์รวม

$$Z_t = 12.2 + j9.865 + 4.098 + j32.67 + 3.901 + j4.288$$

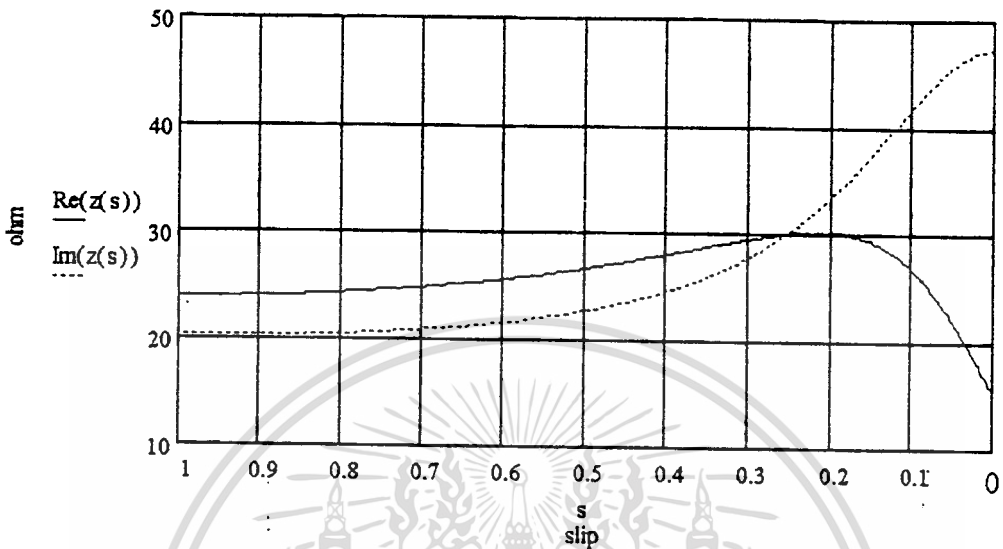
$$Z_t = 19.389 + j46.823$$

หรือ

$$Z_t = 19.389 + s(0.149) \quad (4.5)$$

จากวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์ที่สภาวะมอเตอร์คงตัวจำเป็นต้องกำหนดค่าความต้านทาน -R ตามสมการที่ (2.83) ให้ได้ค่าเท่ากับค่าในส่วนของอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ตามสมการที่ 4.3 ซึ่งมีค่าเป็น 23.994 Ω เพื่อให้ได้วงจรเรโซแนนซ์ LC ในอุดมคติและภายหลังจากที่ มอเตอร์เริ่มหมุนค่าอิมพีแดนซ์ในส่วนจริงจะเปลี่ยนแปลงไปค่าคลื่นไกล ณ จุดใกล้กับ ความเร็วชิงโครนัสความต้านทานจะมีค่าเป็น 19.29 Ω ตามสมการที่ 4.4 จึงต้องมีการปรับ ค่าความต้านทานลบให้เท่ากันเพื่อปรับวงจรเรโซแนนซ์ LC ให้เป็นวงจรในอุดมคติ

ค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวจะแปรผันตามค่าลื่นไถล โดยสามารถนำมาวาดเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเทียบกับค่าลื่นไถล

4.2 การพิจารณาค่าความถี่และความเร็วที่สภาวะคงตัวและที่สภาวะเริ่มต้น

4.2.1 การพิจารณาที่สภาวะคงตัว

การพิจารณาค่าความเร็วที่สภาวะคงตัวกระทำได้โดยการพิจารณาค่าความถี่ของการออสซิลเลทที่เกิดขึ้นโดยมีค่า C เป็นตัวแปรสำคัญในสมการที่ 2.67 เนื่องจากค่า C ที่ประกอบอยู่ในวงจรถูกกำหนดค่าความถี่ในการออสซิลเลท การพิจารณาค่าความเร็วที่สภาวะคงตัวต้องใช้ค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ที่จุดใกล้กับความถี่เชิงโครนอส ซึ่งมีค่าลื่นไถลเป็น 0.03 โดยการกำหนดค่า C เพื่อใช้ในการทดลองดังนี้

ค่า C ที่ 175 μf

ความถี่ที่ออสซิลเลทที่สภาวะคงตัวเป็น

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(0.149 \cdot 175\mu\text{f})}} = 31 \text{ Hz}$$

ค่าความเร็วรอบที่สภาวะคงตัวหาได้จากสมการที่ 2.42 ได้เป็น

$$N_r = \frac{120 \cdot 31}{4} = 932 \text{ RPM}$$

สำหรับค่า C ที่ใช้ในการทดลองสามารถสรุปเป็นตารางค่าความถี่และความเร็วรอบที่สภาวะคงตัวได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สรุปค่าความถี่และความเร็วรอบที่สภาวะคงตัวต่อการเปลี่ยนแปลงค่า C

การทดลองที่	ค่า C	ค่าความถี่	ค่าความเร็วรอบ
1.1	175 uf	31.16 Hz	935 Rpm.
1.2	150 uf	33.66 Hz	1010 Rpm.
1.3	125uf	36.87 Hz	1106 Rpm.
1.4	100 uf	41.23 Hz	1237 Rpm.
1.5	75 uf	47.61 Hz	1428 Rpm.
1.6	50 uf	58.31 Hz	1749 Rpm.
1.7	25 uf	82.46 Hz	2474 Rpm.

4.2.2 การพิจารณาที่สภาวะเริ่มต้น

การพิจารณาค่าความเร็วที่สภาวะเริ่มต้นกระทำได้ในลักษณะเดียวกันกับการพิจารณาที่สภาวะคงตัว แต่จะต้องเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ โดยใช้ค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ก่อนที่มอเตอร์จะเริ่มหมุนหรือที่ค่าคลื่นโกลเป็น 1 โดยใช้ค่า C เดียวกันกับที่สภาวะคงตัวเพื่อดูความถี่ที่คอนเริ่มหมุน ความถี่ในคอนเริ่มต้นสามารถหาได้ดังนี้

ค่า C ที่ 175 uf

ความถี่ที่ออกสวิตช์ที่สภาวะเริ่มต้นเป็น

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(0.0295 \cdot 175\text{uf})}} = 70.01 \text{ Hz}$$

สำหรับค่า C ที่ใช้ในการทดลองสามารถสรุปเป็นตารางค่าความถี่ที่สภาวะเริ่มต้น ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สรุปค่าความถี่ที่สภาวะเริ่มต้นต่อการเปลี่ยนแปลงค่า C

การทดลองที่	ค่า C	ค่าความถี่
2.1	175 uf	70.01 Hz
2.2	150 uf	75.62 Hz
2.3	125 uf	82.83 Hz
2.4	100 uf	92.61 Hz
2.5	75 uf	106.94 Hz
2.6	50 uf	130.98 Hz
2.7	25 uf	185.23 Hz

4.3 การพิจารณาค่าแรงบิดและความเร็วที่สภาวะคงตัว

การพิจารณาค่าแรงบิดสามารถกระทำได้โดยการพิจารณาสมการที่ 2.41 โดยแปลงให้อยู่ในรูปของแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนทางตรงและแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับ

แรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนทางตรง

$$T_f = \frac{1}{\omega_s} P_{gf} \quad (4.6)$$

ค่ากำลังที่ผ่านเข้าไปในอิมพีแดนซ์ $0.5 Z_f$ คือ

$$P_{gf} = I_m^2 0.5 \cdot R_f \quad (4.7)$$

โดยที่ R_f เป็นค่าความต้านทานในส่วนประกอบของสนามแม่เหล็กหมุนทางตรงในสมการที่ 4.1 และในทำนองเดียวกัน

แรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับ

$$T_b = \frac{1}{\omega_s} P_{gb} \quad (4.8)$$

ค่ากำลังที่ผ่านเข้าไปในอิมพีแดนซ์ $0.5 Z_b$ คือ

$$P_{gb} = I_m^2 0.5 \cdot R_b \quad (4.9)$$

ค่าแรงบิดรวมเกิดจากแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนทางตรงและแรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับรวมกันแต่ค่าสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับมีทิศทางตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กหมุนทางตรงทำให้ได้ค่าแรงบิดรวมเป็น

$$T_f = \frac{1}{\omega_s} P_{gf} \quad (4.6)$$

ค่ากำลังที่ผ่านเข้าไปในอิมพีแดนซ์ $0.5 Z_f$ คือ

$$T = T_f - T_b = \frac{1}{\omega_s} (P_{gf} - P_{gb}) \quad (4.7)$$

$$T = \frac{I_m^2}{2\omega_s} (R_f - R_b) \quad (4.8)$$

$$T = \frac{I_m^2}{2\omega_s} \left(\frac{R_2}{S} - \frac{R_2}{(2-S)} \right) \quad (4.9)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวมีผลต่อค่าแรงบิดและความถี่ ดังนั้นเพื่อให้การพิจารณาค่าแรงบิดและความถี่ถูกต้อง จึงจำเป็นต้องคิดจากอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ที่ใช้ในงานในการทดสอบ

ค่าสั้นโหลดเป็น 0.03

$$Z_f = \left(\frac{7.934}{0.03} + j4.932 \right) // 33.255 = 4.098 + j32.67$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_b = \left(\frac{7.934}{2-0.03} + j4.932 \right) // 33.255 = 3.901 + j4.288$$

หาค่าอิมพีแดนซ์รวมโดยการแทนค่า R_1 , X_1 , Z_b , Z_f ในสมการที่ 4.3 ได้

$$Z_t = 19.383 + j46.823 \quad ; \text{ ที่ความถี่ } 50 \text{ Hz}$$

$$\text{หรือ} \quad Z_t = 19.383 + s(0.149) \quad ; s = 2\pi f$$

ค่าความถี่ที่ค่า $C = 175 \text{ uf}$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{0.149 \cdot 175 \text{uf}}} = 31 \text{ Hz}$$

ค่าอิมพีแดนซ์รวมที่ความถี่ 31 Hz

$$\begin{aligned} Z_t &= 19.29 + j(2\pi 31)(0.149) = 19.29 + j 29.02 \\ &= 34.84 \angle 56.38 \end{aligned}$$

ค่ากระแส I_m ได้จาก

$$I_m = \frac{110}{(2 \cdot (34.84 \angle 56.38))} = 1.57 \angle -56.38$$

ค่าความเร็วรอบที่ 31 Hz

$$N_r = \frac{120 \cdot 31}{4} = 930 \text{ Rpm.}$$

ค่าแรงบิดที่ความถี่ 31 Hz แทนค่า I_m , S , ω_s , R_2 ในสมการที่ 4.9 จะได้

$$T = \frac{1.57^2}{2(2\pi \cdot 31)} \left(\frac{7.934}{0.03} - \frac{7.934}{(2-0.03)} \right) = 1.658 \text{ Nm}$$

สำหรับที่ค่าสลิปอื่น ๆ และที่ค่า C อื่น ๆ สามารถหาได้ด้วยวิธีเดียวกันโดยนำมาสรุปเป็นค่าในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเดินไถลและความเร็วรอบที่ค่า C ต่างๆ

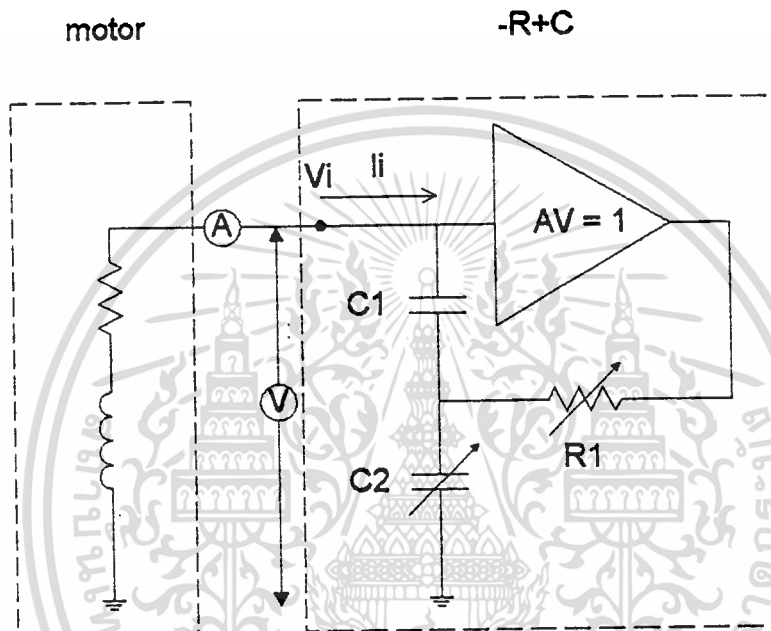
ค่า C	การทดลองที่	ค่าเดินไถล	Im	ค่าแรงบิด	ความถี่	ความเร็วรอบ
175 uf	3.1	0.03	1.57	1.658 Nm	31	930
		0.06	1.51	0.754 Nm	31.7	951
		0.1	1.47	0.417 Nm	32.8	984
150 uf	3.2	0.03	1.50	1.42 Nm	33	990
		0.06	1.45	0.656 Nm	34.2	1027
		0.1	1.42	0.368 Nm	35.5	1065
125 uf	3.3	0.03	1.41	1.151 Nm	36	1080
		0.06	1.38	0.537 Nm	37.5	1125
		0.1	1.36	0.307 Nm	38.8	1164
100 uf	3.4	0.03	1.28	0.826 Nm	41	1230
		0.06	1.26	0.394 Nm	41.9	1257
		0.1	1.26	0.231 Nm	43.4	1302
75 uf	3.5	0.03	1.14	0.576 Nm	47	1410
		0.06	1.13	0.279 Nm	48.4	1452
		0.1	1.15	0.168 Nm	50.2	1506
50 uf	3.6	0.03	0.95	0.325 Nm	58	1740
		0.06	0.96	0.161 Nm	59.3	1779
		0.1	0.99	0.100 Nm	61.4	1842
25 uf	3.7	0.03	0.69	0.121 Nm	82	2460
		0.06	0.71	0.062 Nm	83.8	2514
		0.1	0.74	0.040 Nm	86.9	2607

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะกิจเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการทดลอง

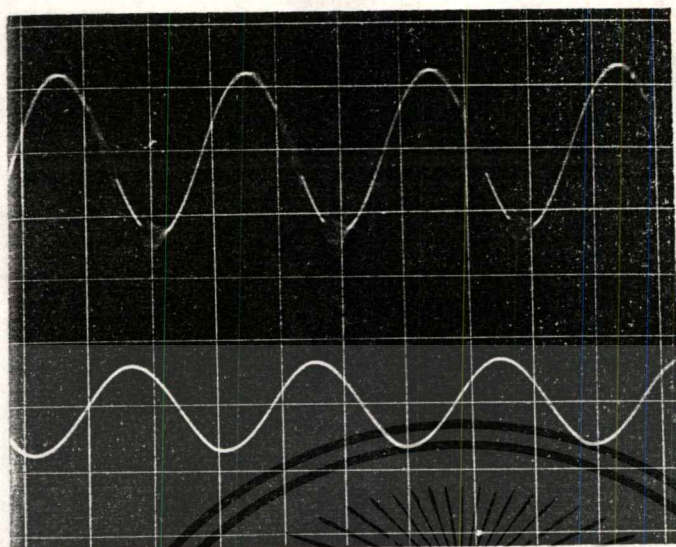
ทำการประกอบวงจรที่ออกแบบและสังเคราะห์ขึ้นในรูปที่ 3.15 มาประกอบเป็นวงจร ดังรูปที่ 4.4 ต่ออุปกรณ์เพื่อบันทึกค่าต่างๆ



รูปที่ 4.4 วงจรที่ใช้ในการทดลอง

4.4.1 การทดลองที่สถานะเริ่มต้น

ทำการทดลองโดยใช้การทดลองในหัวข้อ 4.2.2 การพิจารณาที่สถานะเริ่มต้น โดยใช้ วงจรประกอบที่ 4.4 ปรับค่า R ให้เกิดการออสซิลเลชันบันทึกค่าความถี่ของการออสซิลเลชัน ซึ่งได้ ผลการทดลองหลังจากการจ่ายแรงดันและปรับค่าความต้านทานลบจนได้ค่าเป็น 24Ω พบว่าวงจรได้เกิดการออสซิลเลชันที่ความถี่ต่างๆ ตามค่า C ต่างๆ ที่ประกอบในวงจร โดยมีค่า กระแสและแรงดันดังรูปที่ 4.5 ถึง 4.11

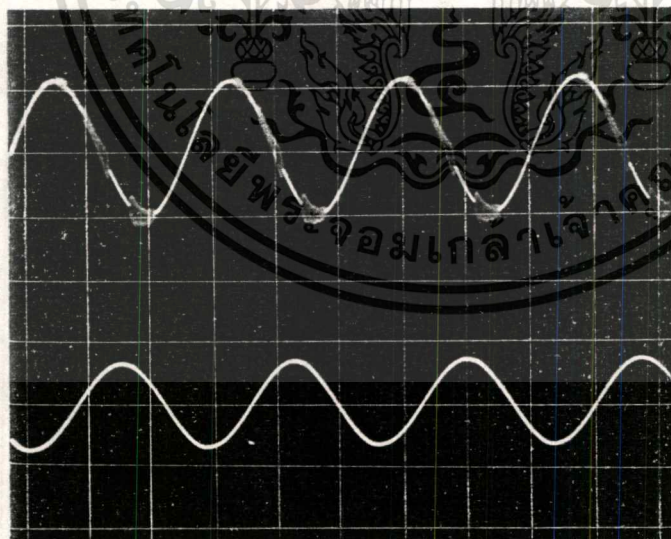


I 2 A / Div

Time 5 ms / Div

V 200 V / Div

รูปที่ 4.5 แสดงผลการออสซิลเลทที่สภาวะเริ่มต้นที่ค่า $C = 175 \mu\text{f}$
 แรงดันตกคร่อมมอเตอร์ $V = 104 \text{ V}$ กระแสที่ไหลเข้าไปยังมอเตอร์ $I = 2.58 \text{ A}$
 ความเร็วรอบ $= 0$ ค่าลื่นไถล $= 1$
 frequency $= 69.1 \text{ Hz}$ Power $= 213 \text{ W}$



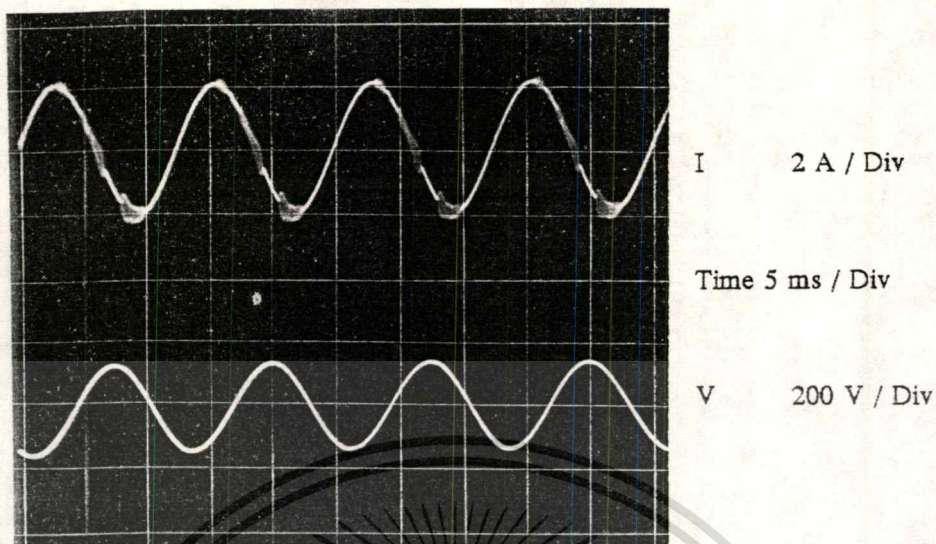
I 2 A / Div

Time 5 ms / Div

V 200 V / Div

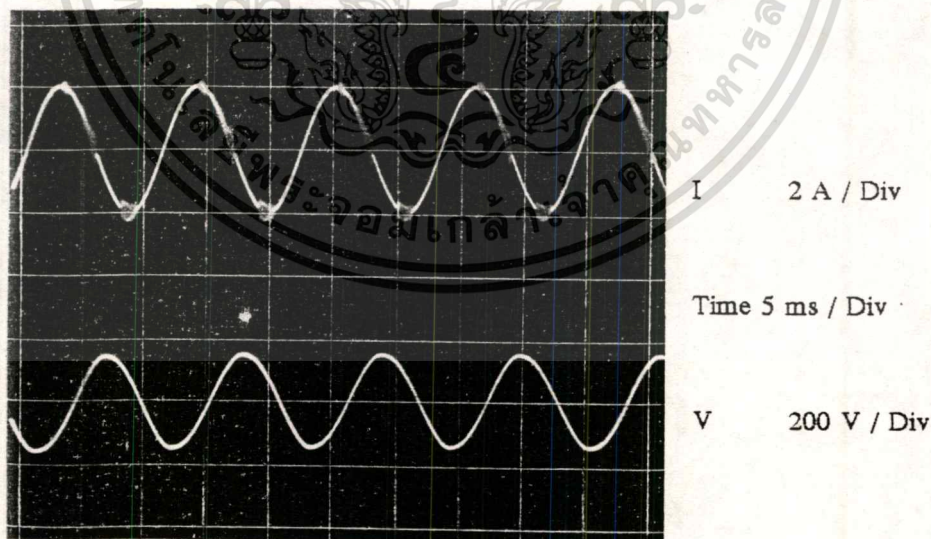
รูปที่ 4.6 แสดงผลการออสซิลเลทที่สภาวะเริ่มต้นที่ค่า $C = 150 \mu\text{f}$
 แรงดันตกคร่อมมอเตอร์ $V = 102 \text{ V}$ กระแสที่ไหลเข้าไปยังมอเตอร์ $I = 2.24 \text{ A}$
 ความเร็วรอบ $= 0$ ค่าลื่นไถล $= 1$
 frequency $= 72 \text{ Hz}$ Power $= 177 \text{ W}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงผลการออซซิเลทที่สภาวะเริ่มต้นที่ค่า $C = 125 \mu\text{f}$

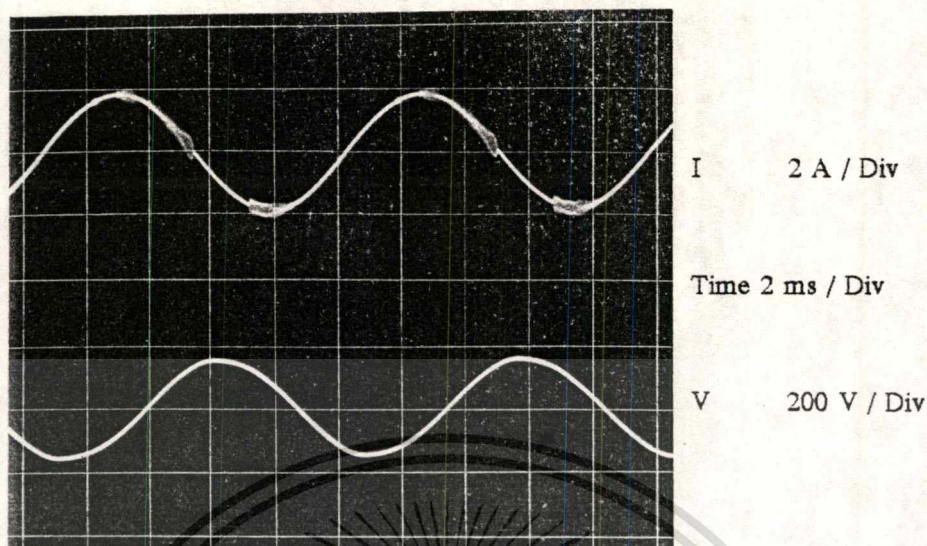
แรงดันตกคร่อมมอเตอร์ $V = 104 \text{ V}$ กระแสที่ไหลเข้าไปยังมอเตอร์ $I = 2.3 \text{ A}$
 ความเร็วรอบ $= 0$ ค่าลื่นไถล $= 1$
 frequency $= 76 \text{ Hz}$ Power $= 156 \text{ W}$



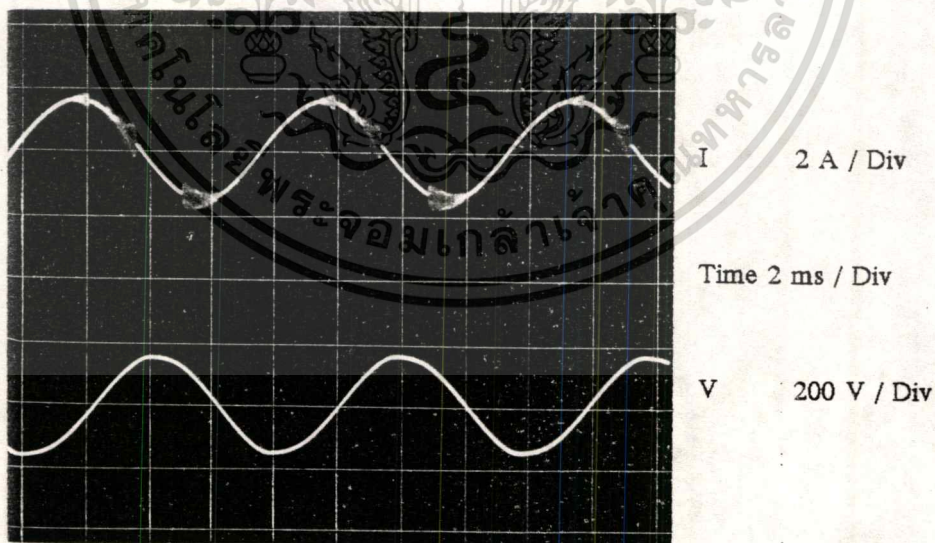
รูปที่ 4.8 แสดงผลการออซซิเลทที่สภาวะเริ่มต้นที่ค่า $C = 100 \mu\text{f}$

แรงดันตกคร่อมมอเตอร์ $V = 104 \text{ V}$ กระแสที่ไหลเข้าไปยังมอเตอร์ $I = 2.12 \text{ A}$
 ความเร็วรอบ $= 0$ ค่าลื่นไถล $= 1$
 frequency $= 90.9 \text{ Hz}$ Power $= 144 \text{ W}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

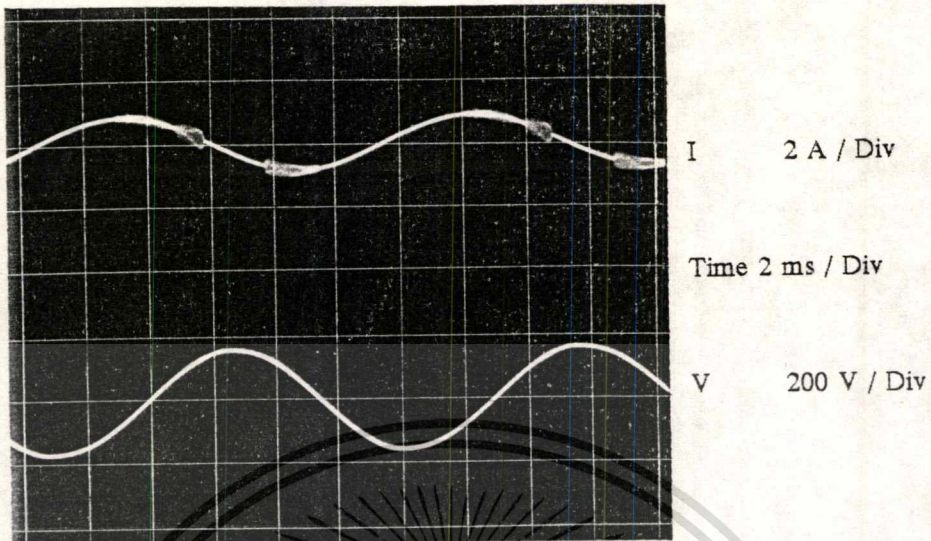


รูปที่ 4.9 แสดงผลการออสซิลเลทที่สภาวะเริ่มต้นที่ค่า $C = 75 \mu\text{f}$
 แรงดันตกคร่อมมอเตอร์ $V = 106 \text{ V}$ กระแสที่ไหลเข้าไปยังมอเตอร์ $I = 1.94 \text{ A}$
 ความเร็วรอบ $= 0$ ค่าลื่นไถล $= 1$
 frequency $= 108 \text{ Hz}$ Power $= 108 \text{ W}$



รูปที่ 4.10 แสดงผลการออสซิลเลทที่สภาวะเริ่มต้นที่ค่า $C = 50 \mu\text{f}$
 แรงดันตกคร่อมมอเตอร์ $V = 106 \text{ V}$ กระแสที่ไหลเข้าไปยังมอเตอร์ $I = 1.68 \text{ A}$
 ความเร็วรอบ $= 0$ ค่าลื่นไถล $= 1$
 frequency $= 124 \text{ Hz}$ Power $= 80 \text{ W}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



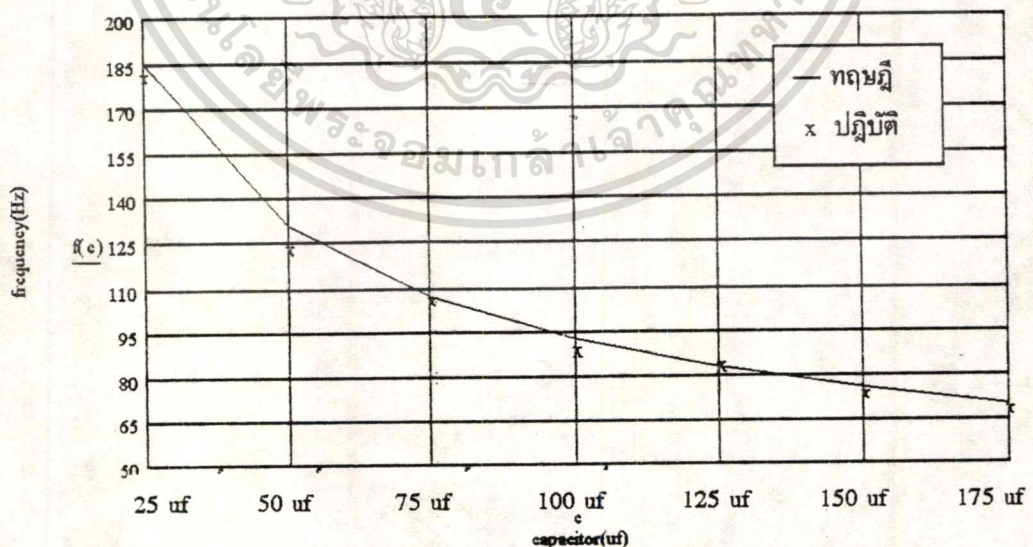
รูปที่ 4.11 แสดงผลการออสซิลเลทที่สภาวะเริ่มต้นที่ค่า $C = 25 \text{ uf}$

แรงดันตกคร่อมมอเตอร์ $V = 106 \text{ V}$ กระแสที่ไหลเข้าไปยังมอเตอร์ $I = 0.96 \text{ A}$

ความเร็วรอบ $= 0$ ค่าลื่นไหล $= 1$

frequency $= 181 \text{ Hz}$ Power $= 52 \text{ W}$

การทดลองในหัวข้อ 4.4.1 สามารถนำมาสรุปเป็นกราฟเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณได้ดังกราฟรูปที่ 4.12



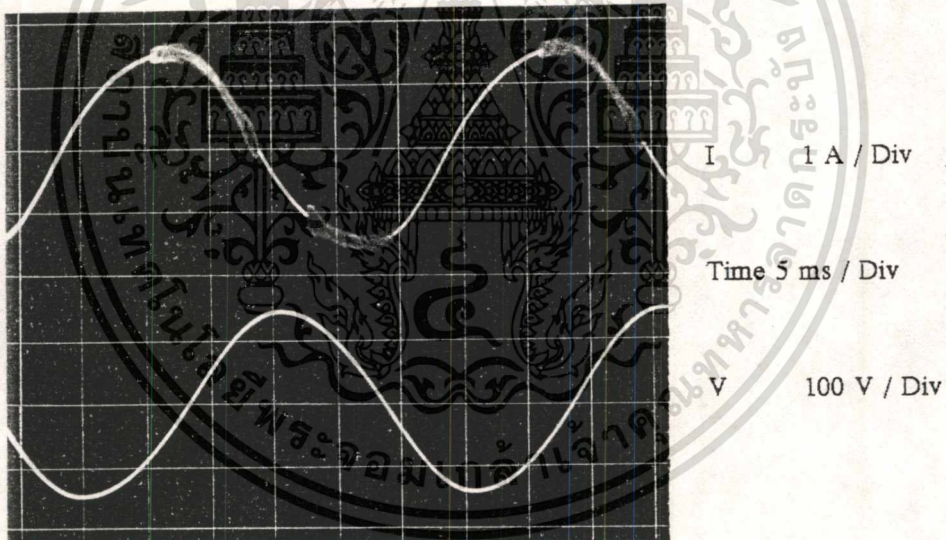
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองและทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 การทดลองที่สภาวะคงตัว

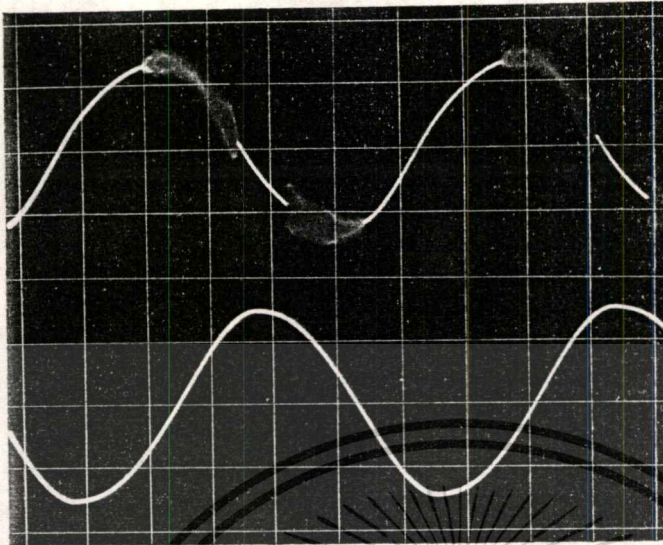
ทำการทดลองตามหัวข้อที่ 4.2.1 การพิจารณาที่สภาวะคงตัว โดยใช้วงจรประกอบที่ 4.4 ปรับค่า R ให้เกิดการอสชิลเทและช่วยหมุนมอเตอร์ให้เริ่มหมุนและปรับค่า R เพื่อให้วงจรที่ประกอบขึ้นเป็นวงจรเรโซแนนซ์ในอุดมคติ

ผลการทดลองหลังจากที่มอเตอร์เริ่มหมุนได้ปรับค่าความต้านทานลงจาก 24Ω เป็น 19Ω พบว่าวงจรได้เกิดการอสชิลเทที่ความถี่ต่างๆ ตามค่า C ต่างๆ ที่ประกอบในวงจร โดยมีค่ากระแสและแรงดันดังรูปที่ 4.13 ถึง 4.18



รูปที่ 4.13 แสดงผลการอสชิลเทที่สภาวะคงตัวที่ค่า $C = 175 \mu\text{f}$

แรงดันตกคร่อมมอเตอร์	$V = 105 \text{ V}$	กระแสที่ไหลเข้าไปยังมอเตอร์	$I = 1.62 \text{ A}$
ความเร็วรอบ	$= 963$	ค่าสิ้นโกล	$= 0.012$
frequency	$= 32.5 \text{ Hz}$	Power	$= 170 \text{ W}$

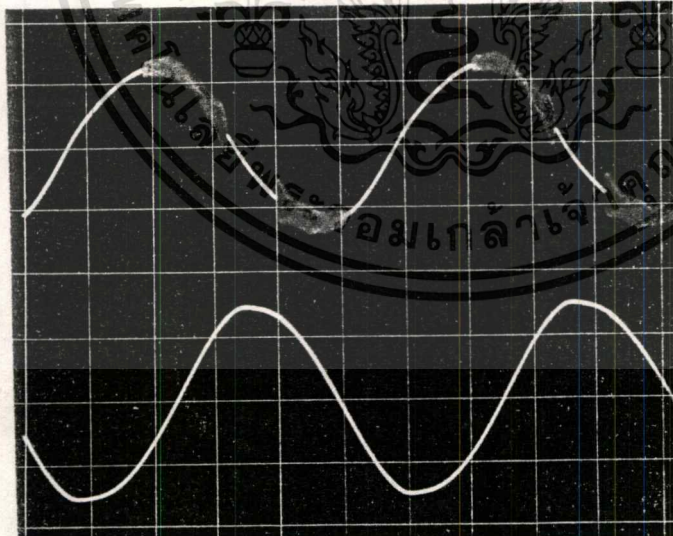


I 1 A / Div

Time 5 ms / Div

V 100 V / Div

รูปที่ 4.14 แสดงผลการออสซิลเลทที่สภาวะคงตัวที่ค่า $C = 150 \mu\text{f}$
 แรงดันตกคร่อมมอเตอร์ $V = 104 \text{ V}$ กระแสที่ไหลเข้าไปยังมอเตอร์ $I = 1.39 \text{ A}$
 ความเร็วรอบ $= 1031$ ค่าลื่นไถล $= 0.008$
 frequency $= 34.6 \text{ Hz}$ Power $= 144 \text{ W}$



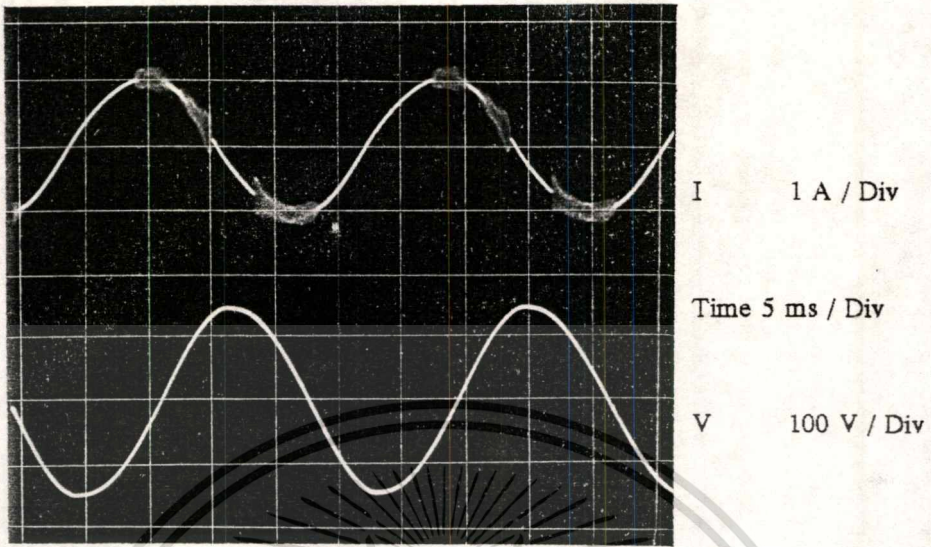
I 1 A / Div

Time 5 ms / Div

V 100 V / Div

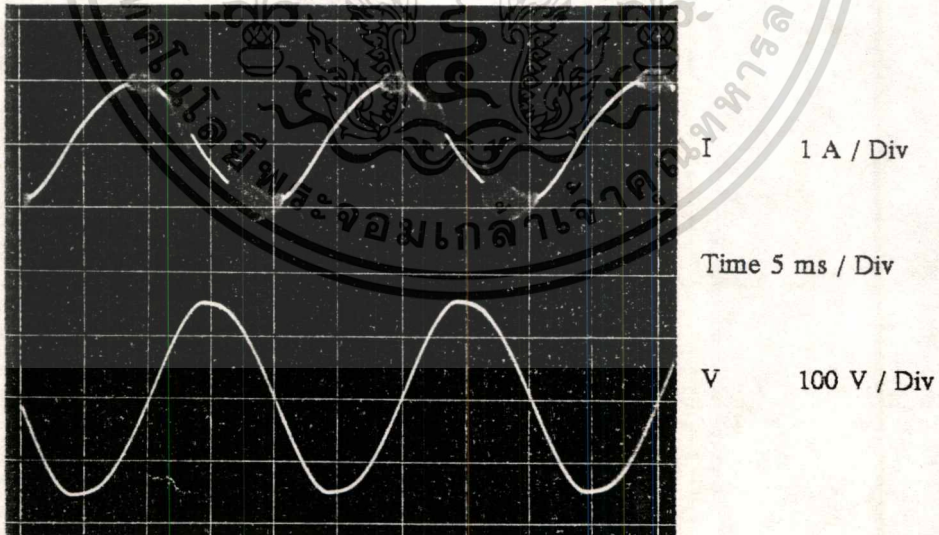
รูปที่ 4.15 แสดงผลการออสซิลเลทที่สภาวะคงตัวที่ค่า $C = 125 \mu\text{f}$
 แรงดันตกคร่อมมอเตอร์ $V = 106 \text{ V}$ กระแสที่ไหลเข้าไปยังมอเตอร์ $I = 1.3 \text{ A}$
 ความเร็วรอบ $= 1120$ ค่าลื่นไถล $= 0.017$
 frequency $= 38 \text{ Hz}$ Power $= 137 \text{ W}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงผลการออสซิลิโตนที่สภาวะคงตัวที่ค่า $C = 100 \mu\text{f}$

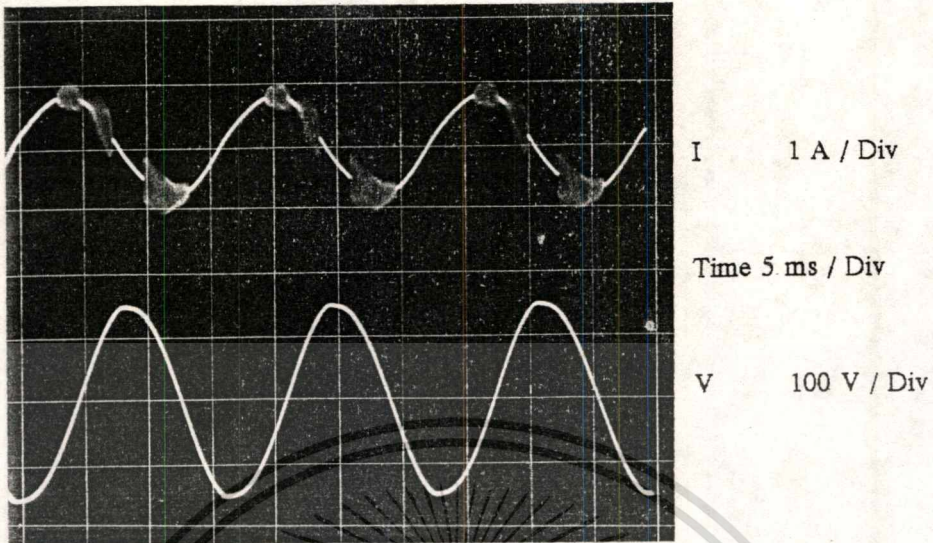
แรงดันตกคร่อมมอเตอร์ $V = 104 \text{ V}$ กระแสที่ไหลเข้าไปยังมอเตอร์ $I = 1.15 \text{ A}$
 ความเร็วรอบ $= 1243$ ค่าลื่นไถล $= 0.013$
 frequency $= 42 \text{ Hz}$ Power $= 119 \text{ W}$



รูปที่ 4.17 แสดงผลการออสซิลิโตนที่สภาวะคงตัวที่ค่า $C = 75 \mu\text{f}$

แรงดันตกคร่อมมอเตอร์ $V = 102 \text{ V}$ กระแสที่ไหลเข้าไปยังมอเตอร์ $I = 1.00 \text{ A}$
 ความเร็วรอบ $= 1442$ ค่าลื่นไถล $= 0.019$
 frequency $= 49 \text{ Hz}$ Power $= 102 \text{ W}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



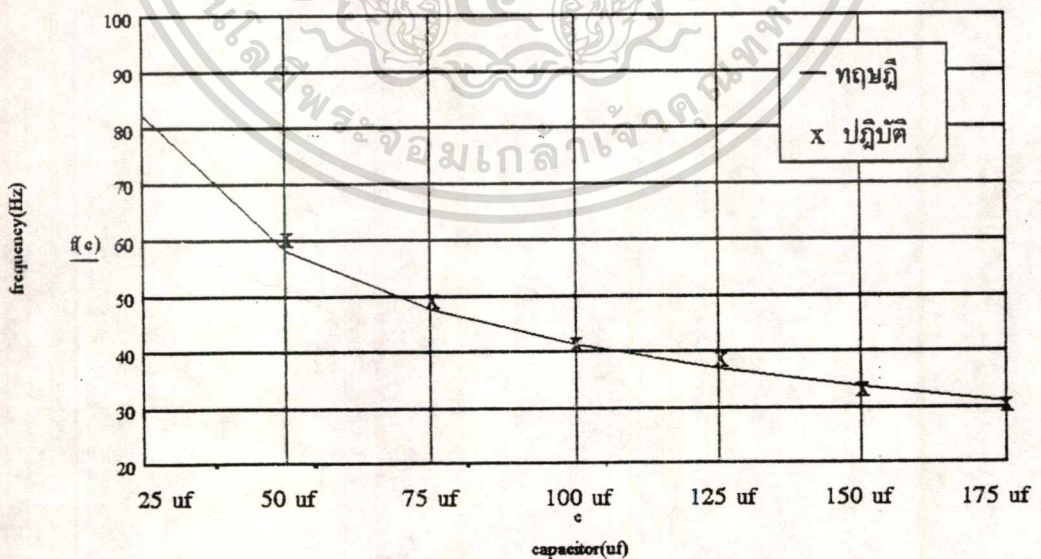
รูปที่ 4.18 แสดงผลการออสซิลเลทที่สภาวะคงตัวที่ค่า $C = 50 \mu\text{f}$

แรงดันตกคร่อมมอเตอร์ $V = 104 \text{ V}$ กระแสที่ไหลเข้าไปยังมอเตอร์ $I = 0.79 \text{ A}$

ความเร็วรอบ $= 1813$ ค่าดีนไทม์ $= 0.017$

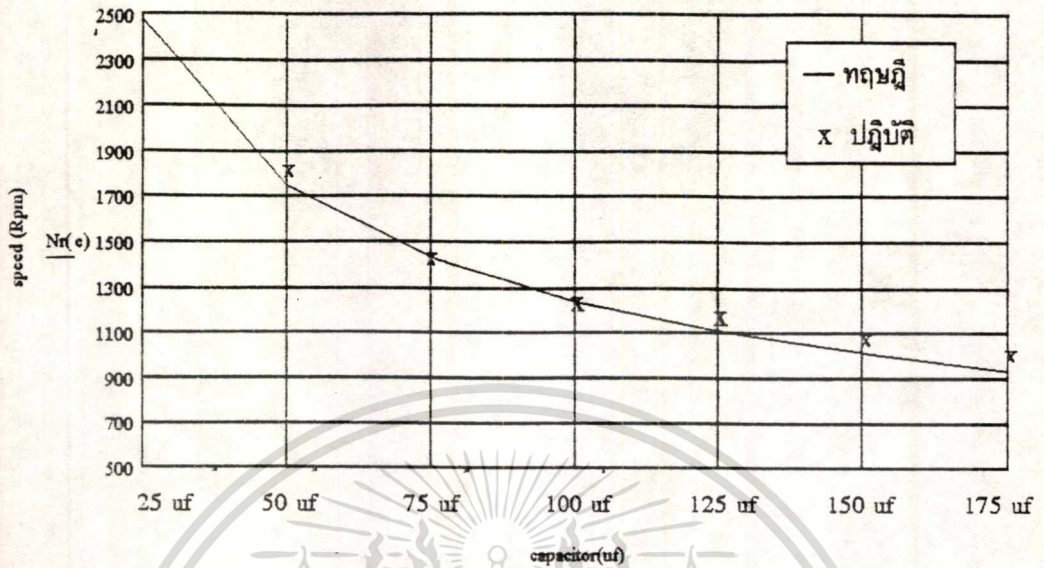
frequency $= 61.5 \text{ Hz}$ Power $= 82 \text{ W}$

การทดลองในหัวข้อ 4.4.2 สามารถนำมาสรุปเป็นกราฟเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณได้ดังกราฟรูปที่ 4.19



(a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุต่อความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุต่อความเร็วรอบ
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองและทฤษฎี

(a) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุต่อความถี่

(b) กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าตัวเก็บประจุต่อความเร็วรอบ

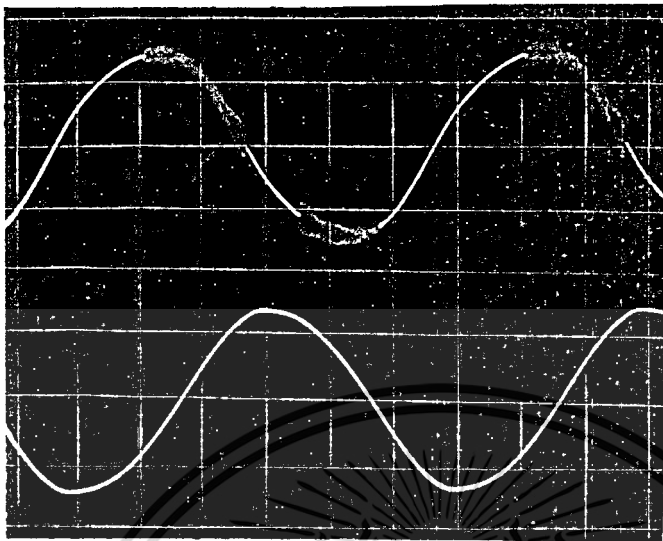
4.4.3 การทดลองปรับค่าแรงบิดที่สภาวะคงตัว

ทำการทดลองตามหัวข้อที่ 4.2.3 การพิจารณาที่ค่าแรงบิดและความเร็วรอบ โดยใช้ วงจรประกอบที่ 4.4 ปรับค่า R ให้เกิดการออสซิลเลทและช่วยหมุนมอเตอร์ให้เริ่มหมุนและ ปรับค่า R เพื่อให้วงจรที่ประกอบขึ้นเป็นวงจรเรโซแนนซ์ในอุดมคติ ทำการใส่ภาระ ให้กับตัวมอเตอร์โดยใช้ตุ้มน้ำหนักแขวนกับเพลลาที่ตัวมอเตอร์ โดยค่าแรงบิดจะแปรตาม น้ำหนักที่มอเตอร์รับภาระ

ผลการทดลองภายหลังจากที่มอเตอร์เริ่มหมุนได้ปรับค่าความต้านทานลอบอยู่ในช่วง 30Ω ถึง 15Ω พบว่าวงจรได้เกิดการออสซิลเลทที่ความถี่ต่างๆ โดยค่าความถี่ที่เกิดขึ้นไม่ได้เป็นไปตามทฤษฎีของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวแบบเก่าที่เมื่อมอเตอร์มีภาระมากขึ้นความเร็วรอบจะลดลงทำให้เกิดค่าสั่นโถล แต่กลับเป็นในลักษณะตรงกันข้ามคือเมื่อมอเตอร์มีภาระมากขึ้นความเร็วรอบจะเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งสามารถอธิบายได้จากวงจรสมมูลย์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว เมื่อมอเตอร์มีภาระมากขึ้นค่าอิมพีแดนซ์ในส่วนที่เป็นสนามแม่เหล็กหมุนทางตรง และสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับมีค่าเปลี่ยนแปลง ไปส่งผลกระทบต่อค่าอิมพีแดนซ์โดยรวม เปลี่ยน จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้นทำให้ค่าความถี่ที่ออสซิลเลทเปลี่ยนแปลงไปด้วยส่งผลให้ค่า

เอกสาร ความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงไป สามารถดูผลการเปลี่ยนแปลง ได้จากการพิจารณาในหัวข้อที่ 4.3 การปรับค่า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



I 1 A / Div

Time 5 ms / Div

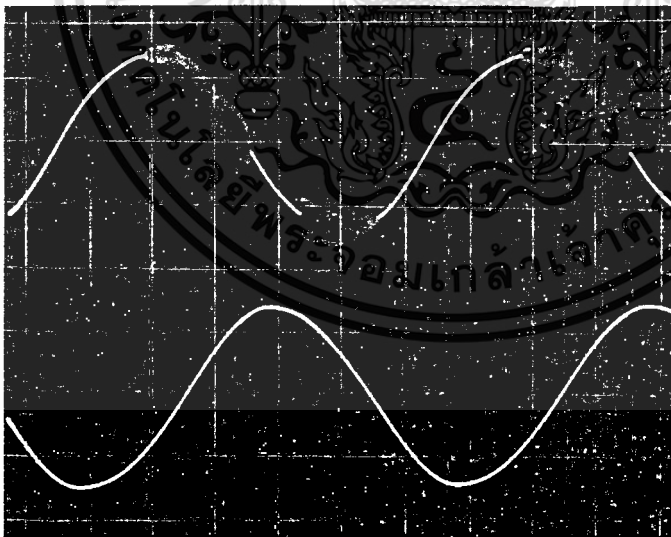
V 100 V / Div

รูปที่ 4.20 แสดงผลการทดสอบขั้วที่สภาวะคงตัวที่ค่า $C = 175 \mu\text{f}$ แรงดันตกคร่อมมอเตอร์ $V = 104 \text{ V}$ กระแสที่ไหลเข้าไปยังมอเตอร์ $I = 1.51 \text{ A}$

ความเร็วรอบ = 959 ค่าสิ้นไกล = 0.04

frequency = 33.3 Hz Power = 148 W

น้ำหนัก = 4 kg



I 1 A / Div

Time 5 ms / Div

V 100 V / Div

รูปที่ 4.21 แสดงผลการทดสอบขั้วที่สภาวะคงตัวที่ค่า $C = 175 \mu\text{f}$ แรงดันตกคร่อมมอเตอร์ $V = 104 \text{ V}$ กระแสที่ไหลเข้าไปยังมอเตอร์ $I = 1.49 \text{ A}$

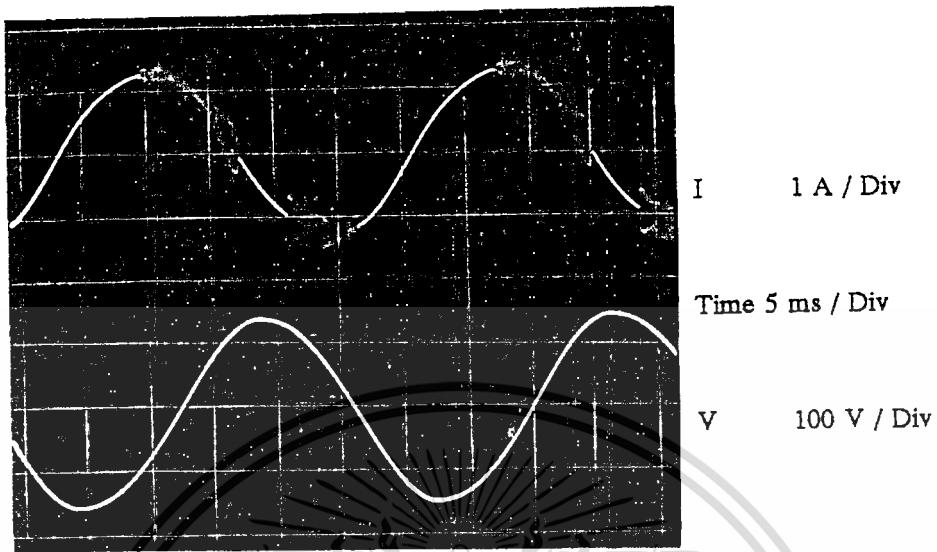
ความเร็วรอบ = 978 ค่าสิ้นไกล = 0.021

frequency = 33.3 Hz Power = 144 W

น้ำหนัก = 8 kg

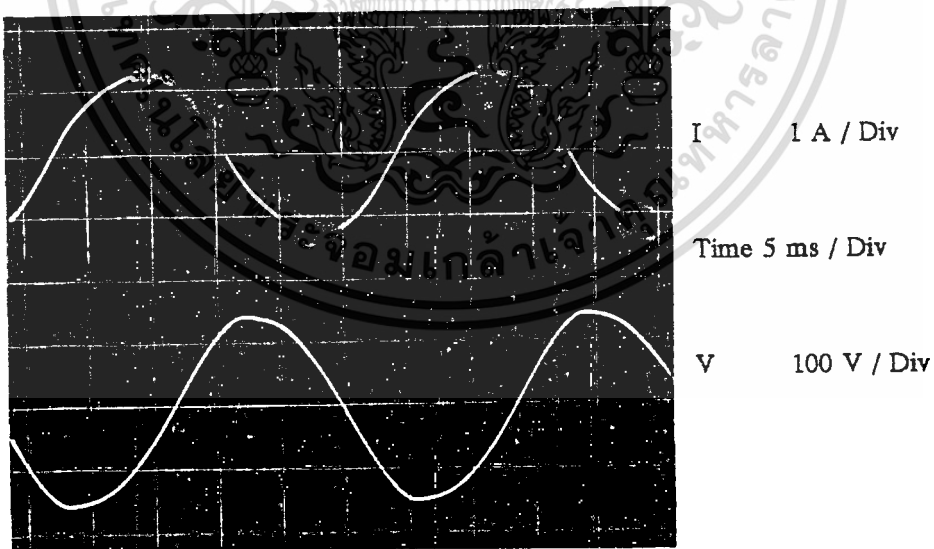
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 แสดงผลการออสซิลิโกลที่สภาวะคงตัวที่ค่า $C = 150 \mu\text{f}$

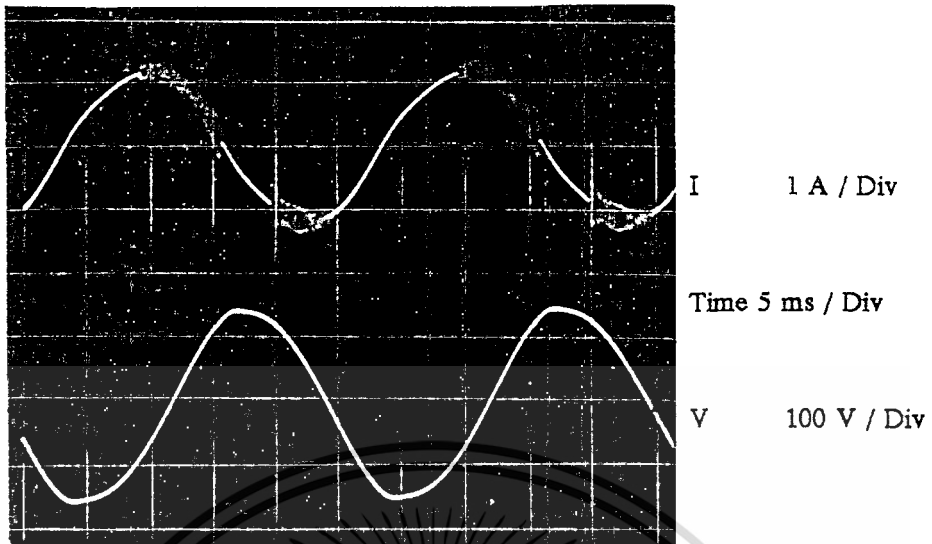
แรงดันตกคร่อมมอเตอร์ $V = 102 \text{ V}$ กระแสที่ไหลเข้าไปยังมอเตอร์ $I = 1.36 \text{ A}$
 ความเร็วรอบ $= 1028$ ค่าลื่นไถล $= 0.023$
 frequency $= 35.0 \text{ Hz}$ Power $= 129 \text{ W}$
 น้ำหนัก $= 4 \text{ kg}$



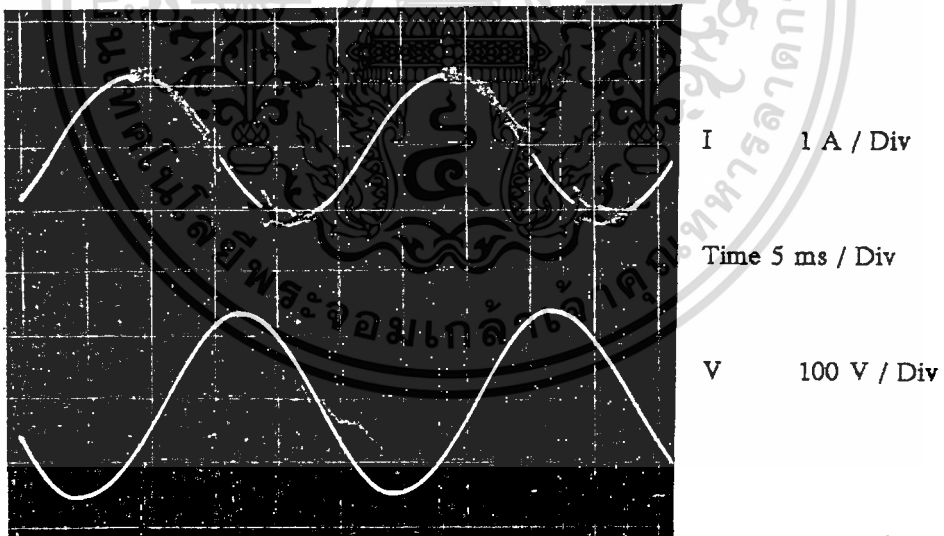
รูปที่ 4.23 แสดงผลการออสซิลิโกลที่สภาวะคงตัวที่ค่า $C = 150 \mu\text{f}$

แรงดันตกคร่อมมอเตอร์ $V = 102 \text{ V}$ กระแสที่ไหลเข้าไปยังมอเตอร์ $I = 1.35 \text{ A}$
 ความเร็วรอบ $= 1055$ ค่าลื่นไถล $= 0.032$
 frequency $= 36.3 \text{ Hz}$ Power $= 124 \text{ W}$
 น้ำหนัก $= 8 \text{ kg}$

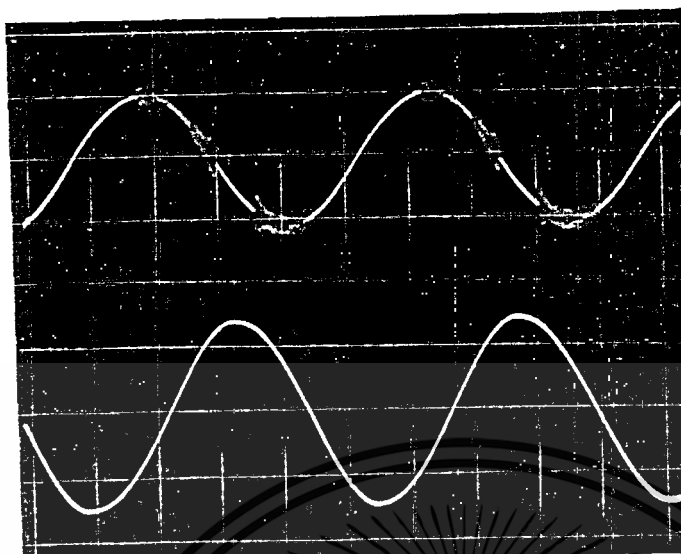
เอกสารนี้เป็นน้ำหนักรหัสที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในห้องเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 แสดงผลการทดสอบขั้วที่สภาวะคงตัวที่ค่า $C = 125 \mu\text{f}$
 แรงดันตกคร่อมมอเตอร์ $V = 104 \text{ V}$ กระแสที่ไหลเข้าไปยังมอเตอร์ $I = 1.27 \text{ A}$
 ความเร็วรอบ $= 1142$ ค่าสิ้นโถง $= 0.048$
 frequency $= 40 \text{ Hz}$ Power $= 118 \text{ W}$
 น้ำหนัก $= 4 \text{ kg}$



รูปที่ 4.25 แสดงผลการทดสอบขั้วที่สภาวะคงตัวที่ค่า $C = 125 \mu\text{f}$
 แรงดันตกคร่อมมอเตอร์ $V = 104 \text{ V}$ กระแสที่ไหลเข้าไปยังมอเตอร์ $I = 1.19 \text{ A}$
 ความเร็วรอบ $= 1153$ ค่าสิ้นโถง $= 0.039$
 frequency $= 40 \text{ Hz}$ Power $= 108 \text{ W}$
 น้ำหนัก $= 8 \text{ kg}$



I 1 A / Div

Time 5 ms / Div

V 100 V / Div

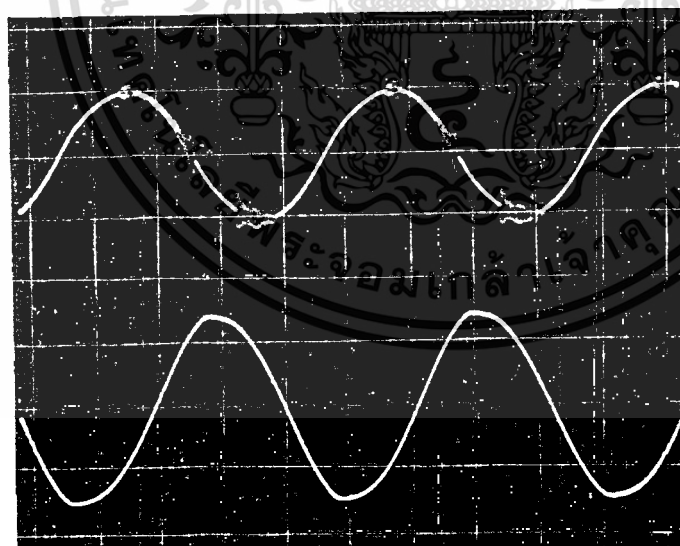
รูปที่ 4.26 แสดงผลการทดสอบที่สภาวะคงตัวที่ค่า $C = 100 \mu\text{f}$

แรงดันตกคร่อมมอเตอร์ $V = 104 \text{ V}$ กระแสที่ไหลเข้าไปยังมอเตอร์ $I = 1.10 \text{ A}$

ความเร็วรอบ = 1274 คำลื่น/ไกล = 0.023

frequency = 43.4 Hz Power = 104 W

น้ำหนัก = 4 kg



I 1 A / Div

Time 5 ms / Div

V 100 V / Div

รูปที่ 4.27 แสดงผลการทดสอบที่สภาวะคงตัวที่ค่า $C = 100 \mu\text{f}$

แรงดันตกคร่อมมอเตอร์ $V = 104 \text{ V}$ กระแสที่ไหลเข้าไปยังมอเตอร์ $I = 1.09 \text{ A}$

ความเร็วรอบ = 1356 คำลื่น/ไกล = 0.05

frequency = 47.6 Hz Power = 101 W

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินส่วนราชการที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคลื่น โกลและความเร็วรอบที่ค่า C ต่างๆเปรียบเทียบกับทฤษฎี

ค่า C	การทดลองที่	ค่าคลื่น โกล		กระ แส		ความ ถี่		ความเร็ว รอบ	
		เทียบกับการควบคุมแบบปกติ	จริง	ทฤษฎี	จริง	ทฤษฎี	จริง	ทฤษฎี	จริง
175 uf	3.1	0.06	0.04	1.51	1.51	31.7	33.3	951	959
		0.1	0.02	1.47	1.49	32.8	33.3	984	978
150 uf	3.2	0.06	0.02	1.45	1.36	34.2	35.0	1027	1028
		0.1	0.03	1.42	1.35	35.5	36.3	1065	1055
125 uf	3.3	0.06	0.05	1.38	1.27	37.5	40	1125	1142
		0.1	0.04	1.36	1.19	38.8	40	1164	1153
100 uf	3.4	0.06	0.02	1.26	1.10	41.9	43.4	1257	1274
		0.1	0.05	1.26	1.09	43.4	47.6	1302	1356

จากตารางที่ 4.4 ซึ่งเป็นตารางเปรียบเทียบค่าแรงบิดและความเร็วรอบที่เปลี่ยนไปของทฤษฎีเทียบกับการปฏิบัติจริง โดยใช้ตุ้มน้ำหนักขนาด 4 kg เพื่อทำให้เกิดค่าคลื่น โกลเป็น 0.06 เมื่อเทียบกับการควบคุมด้วยวิธีปรกติที่ความเร็วรอบซิงโครนัสเป็น 1500 Rpm. และตุ้มน้ำหนักขนาด 8 kg เพื่อทำให้เกิดค่าคลื่น โกลที่ 0.1 จะเห็นได้ว่ามีความใกล้เคียงกันกับทฤษฎี



รูปที่ 4.28 แสดงภาพถ่ายวงจรต้นแบบและเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุป

การศึกษาและออกแบบวงจรควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว ในปริภูมิตฤษฎีฉบับนี้เป็นเทคนิคการควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบใหม่ ซึ่งใช้อิมพีแดนซ์ของตัวมอเตอร์ มาประกอบกับอุปกรณ์ภายนอกเพื่อให้เป็นวงจรเรโซแนนซ์ในอุดมคติ ซึ่งเป็นตัวควบคุมความถี่ของการออซซิลเลท การออซซิลเลทนี้เองนำไปสู่ความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เปลี่ยนแปลง โดยความไวของความถี่ต่อการเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ในระบบมีค่าต่ำซึ่งส่งผลให้การควบคุมมีเสถียรภาพค่อนข้างสูง ข้อดีของการใช้เทคนิคการออซซิลเลทนี้จะอยู่ที่การควบคุมค่าแรงบิดและการใช้พลังงานในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ โดยการควบคุมค่าแรงบิดทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ในส่วนจริงของวงจร ซึ่งจะถูกหักล้างจากความต้านทานลบบที่สังเคราะห์ขึ้นซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานรวมของวงจรที่เป็นส่วนจริงนั้น จะเป็นตัวกำหนดค่ากระแสที่ไหลอยู่ภายในระบบ ซึ่งผลจากค่ากระแสที่เปลี่ยนแปลงนี้สามารถควบคุมค่าแรงบิดได้ การควบคุมสามารถพัฒนาไปใช้การควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ได้ ดังกล่าวไว้ในปริภูมิตฤษฎี โดยใช้วงจรสายพานกระแสมาประกอบเป็นความต้านทานและตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ ฮาร์โมนิกส์ของวงจรเมื่อเทียบกับการควบคุมแบบ PWM จะแตกต่างกันโดยสิ้นเชิงเนื่องจากการควบคุมโดยใช้เทคนิคการออซซิลเลทนี้จะมีเพียงแต่ความถี่พื้นฐานเท่านั้น

ผลการทดลองการควบคุมค่าแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำถูกทดลองอยู่ในช่วงจำกัด เนื่องจากค่ากำลังงานของมอเตอร์ที่ตนได้มีค่าจำกัด การเปลี่ยนแปลงความถี่ไปในช่วงความถี่ต่ำๆจะทำให้ภาระทั้งหมดตกอยู่ที่ตัวมอเตอร์ ซึ่งค่าเฉลี่ยกำลังงานของมอเตอร์ที่ความถี่ต่ำจะสูง และที่ความถี่ต่ำนี้เอง แกนเหล็กภายในตัวมอเตอร์จะเกิดการอิ่มตัว ทำให้เกิดความร้อนสูง จากกราฟในผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการทดลองอยู่ในช่วง 30 ถึง 60 Hz ซึ่งเป็นช่วงที่ปลอดภัยและสามารถหมุนให้เกิดการออซซิลเลทได้

การพัฒนาของการควบคุมในอนาคต จะต้องทำการพัฒนาในส่วนของแรงบิดเริ่มต้น เนื่องจากระบบทำให้เริ่มหมุนของมอเตอร์นี้มีมากมายหลายแบบ แต่ละแบบมีลักษณะแตกต่างกันทำให้ยากต่อการควบคุม การควบคุมโดยใช้เทคนิคการออซซิลเลทนี้มีข้อเสียคือ การควบคุมจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะเฉพาะของมอเตอร์แต่ละตัว ซึ่งทำให้การควบคุมไม่เป็นลักษณะแบบใช้ในเชิงธุรกิจได้

การอ้างอิง

- [1] สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์ และ คมกฤษ โล่ห์เพ็ชร. “อินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบใหม่ ซึ่งใช้พัลส์วิดมอดูเลชันเทคนิคสำหรับเพาเวอร์มอสเฟส.” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 14 คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.สงขลานครินทร์ หาดใหญ่ สงขลา, 7-8 พฤศจิกายน 2534.
- [2] รองศาสตราจารย์ ดร.พีรศักดิ์ วรสุนทรโรสถ และ ณรงค์เดช ศรีอัสวอมร. “ทฤษฎีวิเคราะห์วงจรเครื่องจักรไฟฟ้า.” พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพมหานคร. โครงการตำราภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 1989.
- [3] R.D. Adam and R.S.Fox. “Several Modulation Techniques PWM Invertor.” IEEE Conf. Record of fifth annual meeting of Industry and General Application Group, 1970.
- [4] John G.Kassakian , Matin F.Schlecht, George C.Vergheese. “Principles of Power Electronics.” : Addison - Wesley Publishing Comp., 1991.
- [5] “Linear Databook.” National Semiconductor, 1990.
- [6] J.M. D.Murphy, F.G.Turnbull. “Power Electronic Control of AC Motors.” Pergamon Press, 1988.
- [7] A.E. Fitzgerald, C.Kingsley JR, Stephen D.Umans. “Electronic machinery 4th ed.” : McGraw-Hill, 1983.
- [8] P.C.Sen. “Principles of Electric Machines and Power Electronics.” : John Wiley & Sons, 1989.
- [9] Denis O’Kelly. “Performance and Control of Electrical Machines.” : McGraw-Hill, 1992.
- [10] F.R. Connor. “Networks.” : Edward Arnold, 1972.
- [11] “Bipolar Power Transister Data.” : Motorola, 1989.
- [12] J.A. Connelly. “Analog Integrated Circuits.” : John-Wiley & Sons, 1985.
- [13] Cyril G. Veinott. “Fractional Horsepower Electric Motors.” 3d ed.: McGraw-Hill, 1970.

- [14] Donato Vincenti, Phoivos D.Ziogas, Rajnikant V.Patel. "A PC-Base Pulse Width Modulator for Static Converters." IEEE Trans.Ind.Electron. Vol.37 No.1, February 1990.
- [15] John A.Houldworth, Duncan A.Grant. "The Use of Harmonic Distortion to Increase the Output Voltage of a Three-Phase PWM Inverter." IEEE. Trans. Ind. Appl. Vol. IA-20. No.5, September/October 1984.
- [16] Takashi Kenjo. "Power Electronics for the Microprocessor Age." Oxford University Press,1990.
- [17] Michael A.Boost, Phoivos D.Ziogas. "State-of-the-Art Carrier PWM Techniques : A Critical Evaluation." IEEE. Trans. Ind. Appl. Vol.24 No.2, March/April 1988.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวโดยใช้เทคนิคการออสซิลเลท

Speed controlled in single phase induction motors with using oscillation technique.

คมกฤษ โล่ห์เพ็ชร * สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์ **

บทคัดย่อ - บทความนี้นำเสนอวิธีการสังเคราะห์วงจรที่ประกอบด้วยอุปกรณ์น้อยที่สุดที่ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวถูกควบคุมความเร็วด้วยความถี่ของการออสซิลเลท ความไวของความถี่ที่ใช้ควบคุมความเร็วมอเตอร์จะมีค่าต่ำ การปรับความเร็วมอเตอร์ควบคุมได้โดยการปรับค่าของตัวเก็บประจุ ส่วนขับกำลังจะเป็นวงจรขยายแบบตามแรงดันที่ทนแรงดันได้สูง ผลการทดลองจะถูกจำกัดตามคุณสมบัติของมอเตอร์นอกจากนั้นการเริ่มต้นหมุนและการกลับทิศทางของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว สามารถใช้ผลการทดลองอธิบายได้

Abstract - This paper is presented a synthesis of optimum circuit which controlled speed of single phase induction motor by using the oscillation technique.

A sensitivity of frequency is low. Speed control is adjusted by varying a capacitor. A driver part is a high volted power supply buffer. Experimental results are limited with some characteristics in single phase induction motor ; however, a starting action and reverse direction are shown.

1) บทนำ

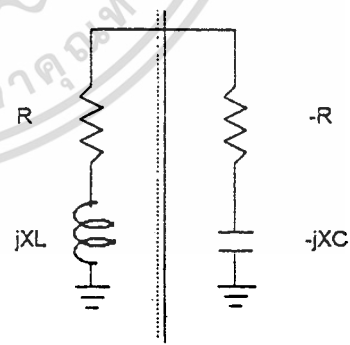
เทคนิคในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวหรือ 3 เฟส สามารถทำได้หลายวิธีการ โดยวิธีที่นิยมใช้ควบคุมมีดังนี้ การใช้พัลส์วิดธมอดูเลชัน (PWM) เทคนิค, การควบคุมความถี่ของ เอชอี 6 สเต็ป, หรือ ไซโคลคอนเวอร์เตอร์เทคนิค (Cycloconverter Techniques) โดยแต่ละลักษณะของการควบคุมความเร็วของมอเตอร์จะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน [1 - 3] แต่อย่างไรก็ตามการสังเคราะห์วงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จะมีความซับซ้อนและสิ้นเปลืองอุปกรณ์จำนวนมาก

เทคนิคใหม่ที่ได้นำเสนอในบทความวิจัยนี้เป็นการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวโดยใช้อุปกรณ์ประกอบภายนอกเพื่อให้เกิดการออสซิลเลเตอร์จากการวิเคราะห์พบว่า การควบคุมความเร็วมอเตอร์สามารถทำได้ โดยการปรับค่าของตัวเก็บประจุและการปรับกำลัง (Torque) ทำได้โดยการปรับตัวต้านทานในระบบ

ระบบการควบคุมทั้งหมดจึงประกอบด้วย อุปกรณ์อย่างประหยัด คือ ตัวเก็บประจุ 2 ตัว ตัวต้านทาน 1 ตัว และวงจรขยายที่ใช้แรงดันไฟตรงได้สูงถึง ± 250 โวลท์ ผลการทดลองพบว่า ความเร็วของมอเตอร์มีเสถียรภาพดีมาก เนื่องจากมีความไวของความถี่ที่เกิดจากการออสซิลเลทต่ออุปกรณ์ควบคุมในระบบต่ำ, ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานมีค่าสูง ความสูญเสียในระบบการขับกำลังมีค่าต่ำ และจากเทคนิคที่ได้นำเสนอนี้สามารถที่จะพัฒนาให้เป็นการควบคุมโดยวิธีอิเล็กทรอนิกส์ และเป็น เอชอี เซอร์โว ไดโนที่ สุด

2) หลักการสังเคราะห์ระบบการควบคุมความเร็ว

ถ้าพิจารณาจากรวมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเป็น ค่าความต้านทาน และค่าตัวเหนี่ยวนำ เมื่อนำมาต่อกับวงจรที่ประกอบในรูปที่ 1 จะได้วงจรสมมูลเบื้องต้นในการสังเคราะห์วงจรออสซิลเลเตอร์



รูปที่ 1 วงจรสมมูลของระบบควบคุมในการออสซิลเลเตอร์

จากรูปที่ 1 เมื่อค่าความต้านทาน R และ -R มีค่าเท่ากันแล้ว ระบบจะมีค่าเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุในอุดมคติ ซึ่งวงจรจะออสซิลเลทจึงถูกใช้ในการบังคับการหมุนของมอเตอร์ได้

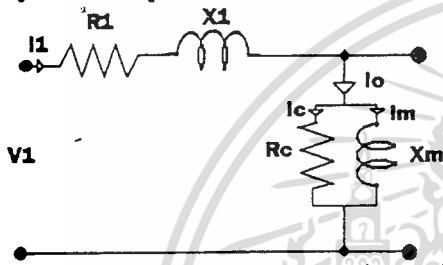
* นักศึกษาปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
** อาจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

อย่างไรก็ตามสภาวะการเริ่มหมุนของมอเตอร์นั้นขนาดของตัวต้านทานลบ(-R) ที่เป็นพลังงานที่ได้รับจากวงจรขั้วกำลังต้องมีค่าเท่ากับความต้านทาน(R) ซึ่งเป็นแรงเสียดทานและความสูญเสียต่าง ๆ ทางไฟฟ้าภายในตัวของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

2.1 การพิจารณาวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

ในการพิจารณาวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวเราจะพิจารณาโดยการนำ วงจรสมมูลของสเตเตอร์และวงจรสมมูลของโรเตอร์ มาเขียนรวมกัน

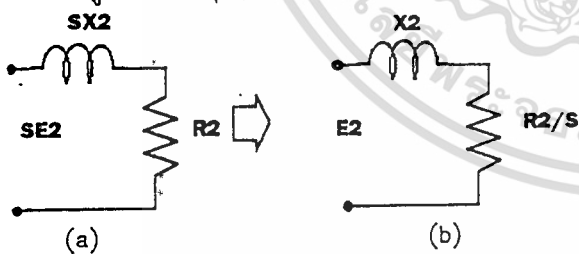
วงจรสมมูลของขดที่อยู่กับที่ (Stator equivalent circuit)



รูปที่ 2 แสดงวงจรสมมูลของขดที่อยู่กับที่

- V1 = แรงดันที่ขั้วทางเข้า
- R1 = ความต้านทานขดสเตเตอร์
- L1 = ค่าเหนี่ยวนำรั่วไหลของขดสเตเตอร์
- E1 = แรงดันเหนี่ยวนำของขดสเตเตอร์
- Lm = ค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก
- Rc = ความสูญเสียของขดสเตเตอร์

วงจรสมมูลของขดหมุน(Rotor equivalent circuit)

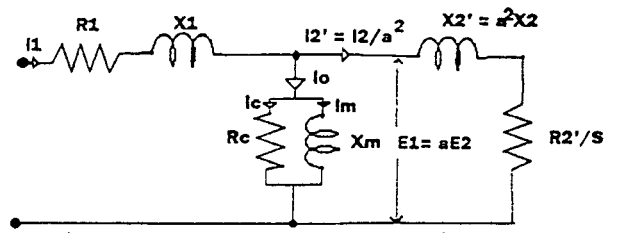


รูปที่ 3 แสดงวงจรสมมูลของขดหมุน

- E2 = แรงดันเหนี่ยวนำของโรเตอร์
- R2 = ค่าความต้านทานของโรเตอร์
- L2 = ค่าเหนี่ยวนำรั่วไหลของโรเตอร์
- S = สลิป

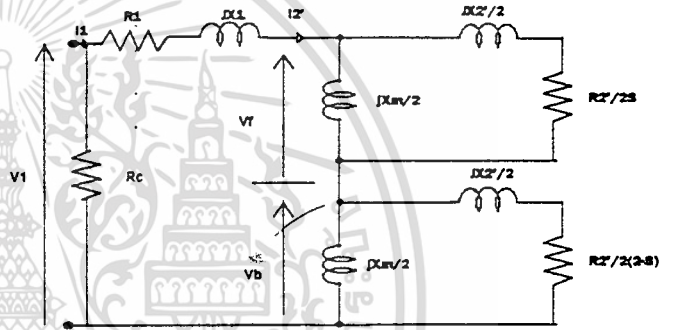
เมื่อนำวงจรสมมูลของทั้งสองวงจรมารวมกันจะได้วงจรสมมูลที่สมบูรณ์ดังรูปที่

โดย a = อัตราส่วนรอบ (N1/N2) ระหว่างขดสเตเตอร์และขดโรเตอร์



รูปที่ 4 แสดงวงจรสมมูลของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

จากวงจรสมมูลเราแบ่งการพิจารณาออกเป็นสองส่วนคือการพิจารณาค่าสนามแม่เหล็กหมุนทางตรง (Forward rotating field) และสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับ (Backward rotating field) โดยการแบ่งวงจรสมมูลโดยพิจารณาจากค่าลื่นไถล ในส่วนที่เป็นขดที่อยู่กับที่ และขดหมุนออกเป็นดังรูป



รูปที่ 5 แสดงวงจรสมมูลที่แสดงค่าของขดสร้างสนามแม่เหล็กหมุนทางตรงและสนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับ

จากวงจรในรูปที่ 5 เราประมาณให้ค่าความสูญเสียทองแดงมีค่าน้อย จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำดังนี้

$$Z = R_1 + jX_1 + Z_f + Z_b \quad (1)$$

โดยที่ $Z_f = R_f + jX_f$

$$= \frac{R_2'}{2S} + \frac{jX_2'}{2} \quad \text{ต่อขนานกับ } jX_m \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Z_b &= R_b + jX_b \\ &= \frac{R_2'}{2(2-S)} + \frac{jX_2'}{2} \quad \text{ต่อขนานกับ } jX_m \quad (3) \end{aligned}$$

$$\text{เมื่อ } Z_f = \frac{X_m^2}{2X_{22}} \frac{1}{SQ_2 + 1/SQ_2} + j \left\{ \frac{X_2' X_m}{2X_{22}} + \frac{R_f}{SQ_2} \right\} \quad (4)$$

$$Z_b = \frac{R_2}{2(2-s)} \left\{ \frac{X_m}{X_{22}} \right\}^2 + j \left\{ \frac{X_2' X_m}{2X_{22}} + \frac{R_b}{2(2-S)Q_2} \right\} \quad (5)$$

โดยที่ $X_{22} = X_2' + X_m$ และ $Q = X_{22}/R_2'$

ค่ากำลังที่สนามแม่เหล็กหมุนทางตรงได้รับเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา $P_{gd} = I R_f^2 + R_f$ าดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน (6) คำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ ค่ากำลังที่สนามแม่เหล็กหมุนย้อนกลับได้รับเป็น

$$P_{gb} = IR_b^2 R_b \quad (7)$$

เพราะฉะนั้น ค่ากำลังที่ส่งผ่านขดที่อยู่หนึ่งทั้งหมดคือ

$$P = P_{gf} - P_{gb} \quad (8)$$

จะได้ค่ากำลังส่งออกทั้งหมดคือ

$$P_{out} = P(1-S) - \text{ค่าความสูญเสียการหมุน} \quad (9)$$

ซึ่ง ค่าความสูญเสียการหมุน = ค่าความสูญเสียในทองแดง + ความผิด + ค่าความสูญเสียผ่านช่องอากาศ

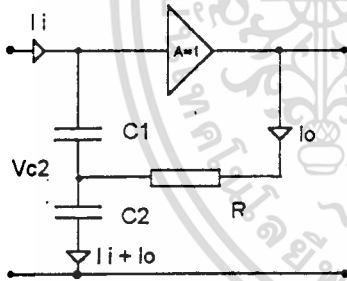
และจากค่ากำลังส่งออกทั้งหมดจะได้ ค่าแรงบิดเป็น

$$T = P_{out} / \omega S \quad (10)$$

โดยที่ ωS = ค่าความเร็วเชิงมุมของตัวหมุน (เรเดียน/วินาที) จากสมการที่ (15) , (9) และ (10) แสดงให้เห็นว่าในการปรับเปลี่ยนแรงบิดสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่า I_2 ซึ่งสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่า $-R$ โดยเป็นผลมาจากกาปรับค่าความต้านทาน R จากวงจรในรูปที่ 6 ซึ่งเป็นวงจรที่สังเคราะห์ความต้านทาน $-R$ ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวมอเตอร์มีค่าเปลี่ยนไปส่งผลให้ค่ากระแส I_2 และค่ากำลังที่ส่งออกเปลี่ยนไป ค่าแรงบิดจึงเปลี่ยนแปลงด้วย

2.2 การสังเคราะห์วงจรประกอบในการควบคุมความเร็ว

วงจรประกอบในการควบคุมความเร็วซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเสมือนค่าความต้านทานลบและตัวเก็บประจุนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 วงจรประกอบในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ จากรูปที่ 6 การพิจารณาอิมพีแดนซ์ทางเข้า (Z_i) ของวงจรมันสามารถทำได้ดังนี้

$$\text{เมื่อ } Z_i = V_i / I_i \quad (11)$$

$$\text{เมื่อ } V_i = V_{c1} + V_{c2} \text{ แล้ว}$$

$$V_i = I_i \cdot \frac{1}{SC_1} + (I_i + I_o) \cdot \frac{1}{SC_2} \quad (12)$$

$$\text{เมื่อ } I_o R = I_i \cdot \frac{1}{SC_1}$$

$$\therefore I_o = \frac{I_i}{SC_1 R} \quad (13)$$

แทนค่าสมการที่ (12) และ (13) ในสมการที่ (11) จะได้

$$Z_i = \frac{1}{SC_1} + \frac{1}{SC_2} + \frac{1}{S^2 C_1 C_2 R} \quad (14)$$

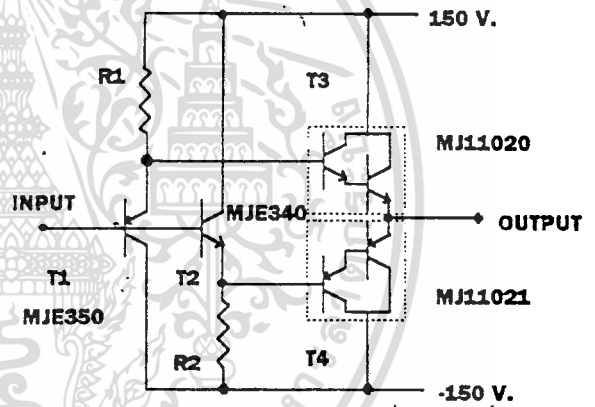
เมื่อ $S = j\omega$

$$\therefore Z_i = - \frac{1}{\omega^2 C_1 C_2 R} - j \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) \quad (15)$$

$$\text{นั่นคือ } Z = -R - jX_c \quad (16)$$

2.2.1 วงจรขับกำลังแบบตามแรงดัน

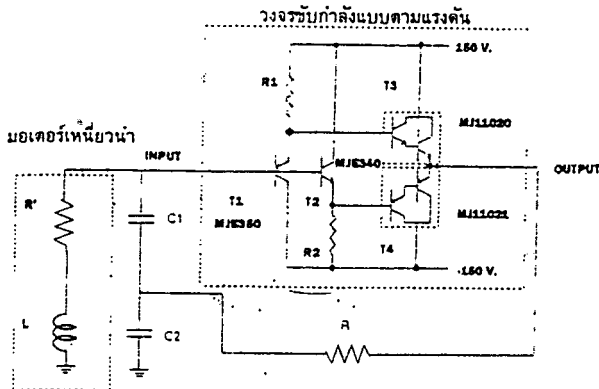
โดยทั่วไปแล้ววงจรขยายแบบตามแรงดันหรือบัฟเฟอร์(Buffer) ที่เป็นชุดสำเร็จนั้นใช้แรงดันไฟตรงไม่เกิน 90 โวลต์[4] ดังนั้นเพื่อให้มอเตอร์ที่ออกแบบไว้ที่ 220 โวลต์สามารถทำงานได้นั้น วงจรบัฟเฟอร์ที่ใช้จึงต้องออกแบบให้มีแรงดันสวิงได้สูงสุด $\pm \sqrt{2} \times 110$ โวลต์ โดยวงจรแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 วงจรขับกำลังแบบตามแรงดัน

2.3 การพิจารณาการออสซิลเลต

จากรูปที่ 1 สามารถเขียนเป็นวงจรที่สมบูรณ์ได้ดังรูปที่ 8 แล้วทำการพิจารณาหาสมการกำหนดความเร็วและสมการกำหนดเงื่อนไขในการเริ่มสตาร์ทของมอเตอร์ได้ดังนี้ การเริ่มหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว พิจารณาได้จากสมการ R' เท่ากับ $-R$ จากวงจรในรูปที่ 1



รูปที่ 8 วงจรควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียว

เมื่อ R' เป็นความสูญเสียทางไฟฟ้ารวมกับความสูญเสียทางกล $-R$ เป็นพลังงานที่วงจรควบคุมกำเนิดขึ้นดังนั้นจะได้ การเริ่มหมุนของมอเตอร์เกิดขึ้นได้เมื่อ

$$R' = - \frac{1}{\omega 2C_1 C_2 R} \quad (17)$$

ขณะเดียวกันความเร็วในการหมุนของมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับความถี่ในการออสซิลเลตซึ่งมีค่าเป็น

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_T}} \quad \text{Hz} \quad (18)$$

$$\text{เมื่อ } C_T = C_1 C_2 / C_1 + C_2$$

ความเร็วในการหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวคือ

$$\text{rpm} = 120 f / P \quad (19)$$

ความไวของความถี่ในการออสซิลเลตต่อการเปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์คือ

$$C_T S \omega = \frac{C_T \partial \omega}{\omega \partial C_T} = \frac{-1}{2} \quad (20)$$

และ

$$L S \omega = \frac{L \partial \omega}{\omega \partial L} = \frac{-1}{2} \quad (21)$$

3) การทดลอง

จากวงจรในรูปที่ 8 มอเตอร์เหนี่ยวนำเฟสเดียวมีแรง

ขับสูงสุด $1/2$ แรงม้า 220 โวลท์, 50 เฮิรตซ์

จากการทดสอบสรุปค่าได้ดังนี้

$$R_1 = 1.98 \, \Omega \quad X_1 = 2.82 \, \Omega \quad R_2' = 4.02 \, \Omega$$

$$X_2' = 2.42 \, \Omega \quad X_m = 69.9 \, \Omega$$

ค่าความสูญเสียทองแดง = 18 W

ค่าความสูญเสียความฝืดและค่าความสูญเสียในอากาศ = 14 W

จากสมการที่ (1) จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ ดังนี้

$$Z = 5.72 + j 12.42 \, \Omega$$

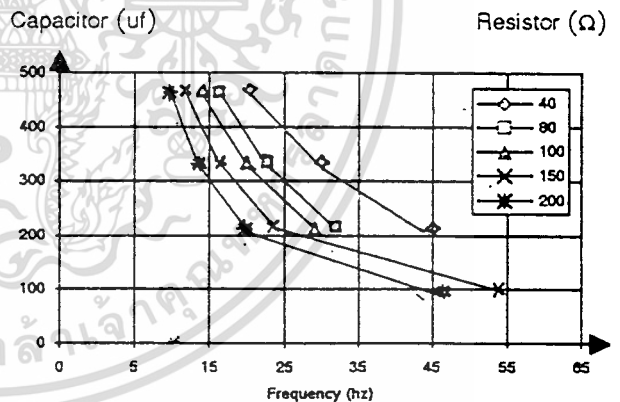
เพราะฉะนั้นค่าความต้านทานลบที่สังเคราะห์ขึ้นจึงต้องมีค่า

เท่ากับ 5.72 Ω

ตัวอย่างการคำนวณค่า R จากสมการที่ (17) และ (15) ถ้าเราต้องการความถี่ในการหมุนเป็น 20 Hz จะได้ความตัวเก็บประจุ C_1 และ $C_2 = 275 \, \mu\text{f}$ ซึ่งจะได้ค่าความต้านทาน R ที่จะทำให้มอเตอร์เริ่มหมุนเป็น 145.9 Ω และเป็นค่าสูงสุดที่จะทำให้มอเตอร์เริ่มหมุน โดยถ้าค่าความต้านทานลบที่สังเคราะห์ขึ้นมีค่าน้อยกว่า ค่าจริงของอิมพีแดนซ์ของตัวมอเตอร์เหนี่ยวนำ จะทำให้มอเตอร์ไม่สามารถเอาชนะค่าความสูญเสียได้ มีผลทำให้มอเตอร์ไม่หมุนและ ในทำนองกลับกันถ้าค่าความต้านทานลบที่สังเคราะห์ขึ้นมีค่ามากกว่าจะทำให้ค่าจริงของอิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์มีค่าลบผลก็คือจะทำให้เกิดการออสซิลเลตมากไปสัญญาณที่ส่งผ่านไปยังตัวมอเตอร์แทนที่จะเป็นสัญญาณชานจะเพี้ยนเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม

อุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรต้นแบบมีดังนี้ ตัวเก็บประจุ C_1 และ C_2 แสดงในกราฟรูปที่ 9 R มีค่า 200 โอห์ม 100 วัตต์ ปรับค่าได้ วงจรขับเฟิร์มีทรานซิสเตอร์ T1, T2, T3 และ T4 ใช้เบอร์ MJE350, MJE340, MJ11022 และ MJ11021 ตามลำดับ

ผลการทดลองของการเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุกับการเปลี่ยนแปลงความถี่โดยการคงที่ ค่าความต้านทาน (R) แสดงได้ดังรูปที่ 9



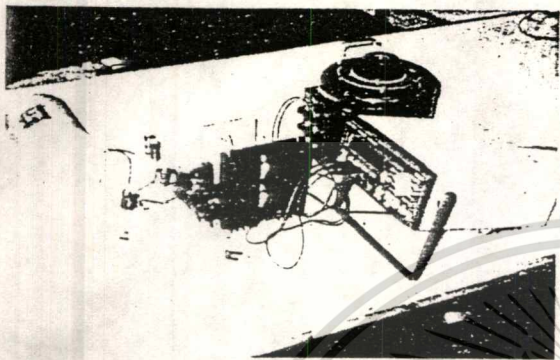
รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวเก็บประจุกับความถี่ จากกราฟในรูปที่ 9 สามารถอธิบายได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเรโซแนนซ์ในส่วนของค่าจริงนั้นเป็นตัวกำหนดค่าแบนด์วิดธ์ของการเกิดการออสซิลเลต ตามสมการ

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (22)$$

$$BW = \frac{f}{Q} \quad (23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังจะเห็นได้จากกราฟที่ค่า R น้อยๆ ค่าความต้านทานลบ จากสมการที่ (15) จะมีค่ามาก มีผลไปหักล้างค่าความสูญเสียของมอเตอร์ ทำให้ค่าจริงของอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ เหนียวนำมีค่าลดลงซึ่งเมื่อค่าจริงของวงจรวจรเรโซแนนซ์มีค่าจริงน้อยจะทำให้ค่าแบนด์วิดมีค่าน้อยตามลงไป



รูปที่ 10 แสดงภาพวงจรต้นแบบของระบบที่ใช้ในการควบคุม
4) สรุป

ผลการวิจัยนี้แสดงการสังเคราะห์วงจรควบคุมความเร็วของมอเตอร์ที่เหมาะสมกับงานที่ต้องการความเร็วคงที่ และไม่ใช้กำลังขับโหลดมากนักจากการวิเคราะห์พบว่าการเสถียรภาพของความเร็วที่ใช้ควบคุมการหมุนของมอเตอร์ เหนียวนำเฟสเดียวอยู่ในเกณฑ์ดีเพราะความไวของความเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ในระบบมีค่าต่ำ ข้อดีของวงจรที่สังเคราะห์ขึ้นนี้คือ ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานมีค่าสูงเนื่องจากเราสามารถปรับลดค่าความสูญเสียของวงจรรวมโดยความต้านทานลบที่สังเคราะห์ขึ้น การปรับเปลี่ยนค่าแรงบิดสามารถทำได้โดยง่าย ข้อเสียของการขับเคลื่อนแบบนี้จะอยู่ที่การเริ่มต้นหมุนของมอเตอร์มีค่าแรงบิดต่ำมาก การหมุนไม่มีทิศทางที่แน่นอน การเริ่มหมุนของมอเตอร์สามารถปรับได้ที่ตัวต้านทานส่วนความเร็วสามารถปรับค่าได้โดยการปรับเปลี่ยนค่าตัวเก็บประจุ ซึ่งการพัฒนาวิธีควบคุมเป็นแบบอิเล็กทรอนิกส์ นั้นสามารถทำได้โดยการปรับปรุงส่วนทั้งสองของระบบนี้ เพื่อจะได้ระบบการควบคุมมอเตอร์เหนียวนำเฟสเดียวแบบเซอร์โวอย่างสมบูรณ์ ส่วนในเรื่องของแรงบิดในตอนเริ่มต้นหมุน และทิศทางการหมุนนั้นสามารถแก้ไขได้โดยการนำขดช่วยหมุนขอตัวมาเป็นตัวเสริม อย่างไรก็ตามขดขับกำลังควรที่จะสร้างขึ้นเป็นโมดูลเดียวกัน ซึ่งจะทำให้สมรรถนะดีกว่าการใช้อุปกรณ์แอกทีฟแยกส่วนเพราะอุณหภูมิจะมีผลต่อจุดไบอัสของการทำงาน

7. เอกสารอ้างอิง

1. R.D. ADAM and R.S.FOX 'Several Modulation Techniques PWM Invertor' IEEE conf.Record' of fifth annual meeting of Industry and Genral Application Group P.P. 687-693, 1970.
2. John G.Kassakian, Matin F.Schlecht, George C. Verghese, 'Principles of Power Electronics' Addison - Wesely Publishing Comp., 1991.
3. สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐานนท์, คมกฤษ โล่ห์เพ็ชร, ... 'อินเวอร์เตอร์สามเฟสแบบใหม่ซึ่งใช้ฟัลสวิตมอดูเลชัน เทคนิคสำหรับเพาเวอร์มอสเฟส.'การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 14 คณะวิศวกรรมศาสตร์, ม.สงขลานครินทร์, หาดใหญ่, สงขลา 7-8 พฤศจิกายน 2534
4. Linear Databook, National Semiconductor, 1990
5. J.M. D.MURPHY, F.G.TURNBUIL, Power Electronic Control of AC Motors' PERGAMON Press , 1988.
6. A.E. FIZGERAL, O.KINGSLEY JR, STEPHEN D.UMANS, 'Electric Machinery 4th ed.', McGraw-Hill , 1983.
7. P.C.SEN 'Principles of Electric Machines and Power Electronics.', John Wiley & Sons, 1989.
8. Performance and Control of Electrical Machines , McGraw- Hill 1992.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดสอบมอเตอร์ที่มี name plate ดังรูปที่ 4.1

Test 1 : Nolad test at 50 Hz

Applied Voltage $V = 220 \text{ V}$

Average line current $I_{nl} = 2.75 \text{ A}$

Power $P_{nl} = 180 \text{ W}$

Test 2 : Blocked-rotor test at 60 Hz

Applied Voltage $V = 87.5 \text{ V}$

Average line current $I_{nl} = 2.8 \text{ A}$

Power $P_{nl} = 190 \text{ W}$

Test 3 : Average dc resistance (measured immediately after test 2)

$R_1 = 12.2 \Omega$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายคมกฤษ โล่ห์เพชร
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 17 ธันวาคม พ.ศ. 2513
สถานที่เกิด	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการควบคุมทางอุตสาหกรรม
สถานที่สำเร็จการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2534
ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์	เรื่องการควบคุมความเร็วมอเตอร์ โดยใช้เทคนิคการออสซิลเลท
ประสบการณ์การทำงาน	วิศวกร แผนกบำรุงรักษาระบบควบคุม ส่วนบำรุง รักษาโรงแยกก๊าซ การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย ปี พ.ศ.2535 ถึงปัจจุบัน(พ.ศ.2538)
อาชีพปัจจุบัน	พนักงานรัฐวิสาหกิจ ระดับ 5 วิศวกร แผนกบำรุง- รักษาระบบควบคุม ส่วนบำรุงรักษาโรงแยกก๊าซ การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย