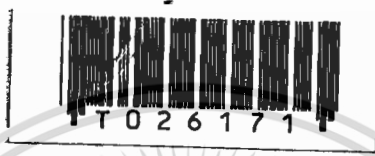


การวิเคราะห์การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4 ควอดแรนต์โดยใช้ PSPICE
ANALYSIS OF 4-QUADRANT DC MOTOR DRIVE USING PSPICE



นายสุรวีร์ บัณจุกุล

MR. SURAVEE BANDHUKUN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ 2539

ISBN 974-621-549-3

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....26171
.....เดือน, ปี 10 ต.ค. 2539

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ANALYSIS OF 4-QUADRANT DC MOTOR DRIVE USING PSPICE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

1996

ISBN 974-621-549-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรงแบบกระตุ้นแยกขึ้น เพื่อให้สามารถใช้กับการชิมมูลชั้นด้วยโปรแกรม Pspice การวิเคราะห์นี้ได้พิจารณาถึงกรณีที่ มอเตอร์อยู่ในสภาวะคงตัวในทิศทางความเร็วรอบ ทวนเข็มนาฬิกาและตามเข็มนาฬิกาทั้งในกรณี กระแสเมเจอร์ไหลต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ตลอดจนในสภาวะทรานเซียนต์ซึ่งอยู่ในช่วงขณะเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ แบบรีเจนเนอเรทีฟ ทั้งในทิศทางความเร็วรอบ ทวนเข็มนาฬิกาและตามเข็มนาฬิกา จากการวิเคราะห์ดังกล่าวนี้ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ ผลการทดลองปรากฏว่าได้ผลใกล้เคียงกันเป็นที่น่าพอใจ



THESIS TITLE ANALYSIS OF 4-QUADRANT DC MOTOR DRIVE USING PSPICE
STUDENT MR. SURAVEE BANDHUKUN
THESIS ADVISOR ASSOC. PROF DR. VIRIYA PICHETJAMROEN
LEVEL OF STUDY MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
DEPARTMENT ELECTRICAL ENGINEERING, KING MONGKUT'S INSTITUTE OF
TECHNOLOGY LADKRABANG
YEAR 1996

ABSTRACT

This thesis presents the design and construction of an anti-parallelly connected dual converter used to control the speed of separately-excited dc machine capable of operating in four quadrants of voltage and current parameters. The circuit configuration is composed of two main units of fully-controlled converter in anti-parallel to each other. The speed of the motor while delivering torque either in forward or reverse directions can be reduced by operating in a regenerative mode by which the mechanical energy is feedback through the other converter to the ac supply after the forward converter is switched off by the reverse voltage of ac supply. By this method, the response of speed reduction can be obtained within a short time period and the machine can operate in this mode with high efficiency. In this thesis, the operating principle of the dual converter is analyzed by the development of electrical model of thyristor used for ac supply and the model of separately-excited dc machine, which are suitable for simulation with program Pspice. The analysis is performed in two cases of steady and transient states. In the steady-state, the analysis concerns the forward and reverse operation under the condition of continuous and discontinuous current flow. In the transient-state, the analysis concerns the regenerative brake operation during the speed drive both in forward and

reverse directions. From the simulated and experimental results, It can be seen that both results are well agreed to each other



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **IV** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเพราะได้รับความเมตตากรุณาจากท่านอาจารย์ รศ.ดร.วิริยะ พิเชฐจำเริญ ซึ่งได้ให้คำปรึกษาและแนะนำผู้วิจัยตลอดมา ผู้วิจัยรู้สึกทราบบ้างซึ่งในความอนุเคราะห์จากท่านและกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ สิงห์ทอง พัฒนเศรษฐฐานนท์ ที่ได้ให้คำแนะนำในการทำวิจัยและ ดร.นนท์วัฒน์ จุลเดชะ ได้แนะนำการใช้เครื่องมือวัดดิจิทัลออสซิลอสโคป ขอขอบคุณ ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง บริษัท HEWLETT PACKARD ที่ให้ยืมเครื่องมือวัด ดิจิทัลออสซิลอสโคป และห้องสมุด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย ที่เป็นแหล่งสนับสนุนทางด้านตำราและเอกสารอ้างอิงพร้อมทั้ง รุ่นพี่และรุ่นน้องทุกคนได้ให้กำลังใจ ประการที่สำคัญที่สุดที่ขาดมิได้คือ ขอขอบพระคุณ คุณยาย สาโรช จินดาประเสริฐ คุณพ่อและคุณแม่ เป็นอย่างสูงที่ได้ให้กำลังใจและสั่งสอน ผมมาโดยตลอดในการทำ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ศรวิร์ บัณฑกุล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	iii
กิตติกรรมประกาศ.....	v
สารบัญ.....	vi
สารบัญภาพ.....	xi
สารบัญสัญลักษณ์.....	xviii
บทที่	
1. บทนำ.....	1
ความเป็นมาของการวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้จากการวิจัย.....	3
2. การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 2 ควอดแรนต์.....	4
การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระแสเมเจอร์ไม่ไหลกลับทิศ (2 ควอดแรนต์).....	4
การขับเคลื่อนโหลดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้กับการเบรกความเร็วรอบ มอเตอร์แบบรีเจนเนอเรทีฟ.....	8
การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระแสเมเจอร์ไหลกลับทิศ (2 ควอดแรนต์).....	2
3. ลักษณะโครงสร้างระบบควบคุมและระบบกำลังของดิวอัลคอนเวอร์เตอร์.....	16
วงจรกำลังและวงจรควบคุม.....	16
สัญญาณควบคุมขณะเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในทิศทางทวนเข็ม	

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
นาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกา.....	18
สัญญาณควบคุมขณะกลับทิศทางความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจากความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกาไปสู่ความเร็วรอบตามเข็มนาฬิกา.....	20
4. การสับเปลี่ยนการทำงานระหว่างคอนเวอร์เตอร์ชุด A กับคอนเวอร์เตอร์ชุด B (Change-over logic) ทำงานได้ในสภาวะ 4 ควอดแรนต์.....	25
การกลับทิศทาง ความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยการเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ทางไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ.....	26
การรีเจนเนอเรทีฟพลังงานแบบกระแสเมเจอร์ไม่ไหลกลับทิศ.....	26
การรีเจนเนอเรทีฟพลังงานแบบกระแสเมเจอร์ไหลกลับทิศ.....	26
เงื่อนไขการโอนย้ายการทำงานจากคอนเวอร์เตอร์ชุด A ไปสู่คอนเวอร์เตอร์ชุด B ที่จ่ายกระแสให้มอเตอร์แบบกระแสเมเจอร์ไม่ไหลกลับทิศ (+1a) จะปรากฏการทำงานในสภาวะดังต่อไปนี้.....	25
กระแสลดลงเป็นศูนย์.....	28
การตรวจจับกระแสเป็นศูนย์.....	29
การหน่วงการทำงานของคอนเวอร์เตอร์.....	29
มูมนำกระแสไทรสเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์.....	29
ลำดับการทำงานในแต่ละโหมด การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4 ควอดแรนต์กระแสไม่กลับทิศ.....	30
เงื่อนไขการโอนย้ายการทำงานจากคอนเวอร์เตอร์ชุด A ไปสู่คอนเวอร์เตอร์ชุด B จ่ายกระแสแบบกระแสเมเจอร์ไหลกลับทิศ (1a) จะปรากฏการทำงานในสภาวะดังต่อไปนี้.....	33
การบล็อกคอนเวอร์เตอร์ให้หยุดนำกระแส.....	34
มูมนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ชุด B.....	34

สารบัญ(ต่อ)

บทที่

หน้า

ลำดับการทำงานในแต่ละโหมด การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4 ควอดแรนต์แบบกระแสกลับทิศ.....	35
การทำงานของวงจร DCAI(Digital control analog inverter) ขณะกลับทิศทาง ความเร็วรอบ.....	38
5. การวิเคราะห์กระแสเมเจอร์ในทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกา- หรือตามเข็มนาฬิกา.....	40
การวิเคราะห์กระแสเมเจอร์ไหลต่อเนื่องใน ทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกา- โหมดมอเตอร์วิ่ง (ควอดแรนต์ที่ 1).....	40
การวิเคราะห์กระแสเมเจอร์ไหลไม่ต่อเนื่องใน ทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกา- โหมดมอเตอร์วิ่ง (ควอดแรนต์ที่ 1).....	47
การวิเคราะห์กระแสเมเจอร์ไหลต่อเนื่องในทิศทางความเร็วรอบตามเข็มนาฬิกา- โหมดมอเตอร์วิ่ง (ควอดแรนต์ที่ 3).....	50
เปรียบเทียบผลการซิมูเลชันทิศทางการไหลกระแสเมเจอร์โหมดกระแส- ไหลต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องที่สภาวะคงตัวด้วยโปรแกรม Pspice กับผลการทดลอง- จากวงจรที่ได้ออกแบบไว้.....	53
6. การซิมูเลชันเปรียบเทียบกับผลการทดลอง เมื่อเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้า- กระแสตรง แบบบริเจนเนอร์ที่เฟ กระแสเมเจอร์ไหลกลับทิศโหมดมอเตอร์วิ่งและ- อินเวอร์ติง.....	58
การกำหนดโมเดลไทรสเตอร์กระแสลับที่ใช้วิเคราะห์กับโปรแกรม Pspice.....	59
การนำกระแสของไทรสเตอร์สามารถกล่าวถึงได้ตามขั้นตอนต่อไปนี้.....	60
การหยุดนำกระแสของไทรสเตอร์สามารถอธิบายโดยขั้นตอนต่อไปนี้.....	60

สารบัญ(ต่อ)

บทที่

หน้า

การพิจารณาตัวแปรของทรานซิสเตอร์ที่มีอยู่ใน data sheet ถูกเลือกจากค่าที่เหมาะสมเพื่อกำหนดให้มีคุณสมบัติเหมือนกับการสภาวะการทำงานจริงของทรานซิสเตอร์.....	62
โมเดลทรานซิสเตอร์ที่เขียนอยู่ในรูป Subcircuit.....	64
การกำหนดโมเดลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกที่ใช้ วิเคราะห์กับโปรแกรม Pspice.....	65
การซิมมูลชันทิศทางการไหลกระแสแอมแปร์เมื่อเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกในทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกา.....	68
การซิมมูลชันทิศทางการไหลกระแสแอมแปร์เมื่อเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกในทิศทางความเร็วรอบตามเข็มนาฬิกา.....	73
7. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	78
บรรณานุกรม.....	81
ภาคผนวก ก.....	82
ความสัมพันธ์สมการไดนามิกกับการหาค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชันของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	83
ระบบควบคุมแบบลูปิดควบคุมการรีเจนเนอเรทีฟพลังงานที่โรเตอร์ขณะหมุนกลับแหล่งจ่ายไฟสลับ.....	86
การออกแบบลูปิดควบคุมกระแสมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	89
การออกแบบลูปิดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	92
การหาอัตราขยายของคอนเวอร์เตอร์ KPS.....	94
การหาทรานเฟอร์ฟังก์ชันและเวลาคงที่ของคอนเวอร์เตอร์ Tt.....	96
การหาทรานเฟอร์ฟังก์ชันและเวลาคงที่ของทรานสดิวเซอร์กระแส T2.....	96
การหาทรานเฟอร์ฟังก์ชันและเวลาคงที่ของทาโคเจนเนอเรเตอร์ T1.....	97

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

การหาค่าเวลาคงที่ทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง T_m สามารถทำ- ตามขั้นตอนต่อไปนี้.....	97
การหาค่าโมเมนต์อินเนอเทีย J	102
ภาคผนวก ข.....	107
การหยุดนำกระแสของคู่อัลคอนเวอร์เตอร์เมื่อได้รับแรงดันเอซีไลนรีเวอร์ส แหล่งจ่าย- แรงดันอินพุทเป็นชนิด 1 เฟส.....	108
ภาคผนวก ค.....	110
ขั้นตอนการชิมมูล์ชั้นกระแสเมเจอร์ไหลต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องในทิศทางความเร็ว- รอบทวนเข็มนาฬิกา.....	111
ภาคผนวก ง.....	112
ขั้นตอนการชิมมูล์ชั้นทิศทางการไหลของกระแสเมเจอร์ขณะกลับ ทิศทางความเร็ว- รอบมอเตอร์ จาก ความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกา ไปสู่ ความเร็วรอบ ตามเข็มนาฬิกา.....	113
ภาคผนวก จ.....	115
รายละเอียดของไทรสเตอร์กำลัง PK(PD,PE,KK)70F.....	116
ภาคผนวก ฉ.....	118
ผลงานวิจัยในระหว่างการศึกษาปริญญาโท ที่ได้รับการเผยแพร่ ในการประชุมวิชา- การทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 18 พ.ศ 2538 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ประวัติผู้เขียน.....	127

สารบัญภาพ

หน้า

1. คอนเวอร์เตอร์แบบฟูลคอนโทรลจ่ายกระแสเมเจอร์ไหลได้ทิศทางเดียว ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก.....	5
2. แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์แบบฟูลคอนโทรลต่อมุนำกระแส α ที่อยู่ ในช่วง $0 < \alpha < \pi$	6
3. เอาต์พุตของกระแสและแรงดันที่เข้าคอนเวอร์เตอร์แบบฟูลคอนโทรลในควอ- แดรนต์ที่ 1 และ 4.....	6
4. แสดงทิศทางเครื่องหมายกระแสเมเจอร์ I_a และความเร็วรอบมอเตอร์ Ω_m แต่ละควอแดรนต์.....	7
5. คอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดมอเตอร์จริง (ควอแดรนต์ที่ 1) ขับเคลื่อนความเร็วรอบใน ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	7
6. คอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดมอเตอร์จริง (ควอแดรนต์ที่ 4) ขับเคลื่อนความเร็วรอบ ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	8
7. การแสดงทิศทางการไหลกระแสเมเจอร์ ขั้วแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ และขั้วแรงดันคอนเวอร์เตอร์ (แบบฟูลคอนโทรลในแต่ละควอแดรนต์).....	11
8. มอเตอร์ทำงานในโหมดมอเตอร์จริงจ่ายกระแสเมเจอร์โดยคอนเวอร์เตอร์ ชุด A (ควอแดรนต์ที่ 1) ความเร็วรอบมอเตอร์ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	14
9. มอเตอร์ทำงานในโหมดอินเวอร์ติ่งจ่ายกระแสโดยคอนเวอร์เตอร์ชุด B (ควอแดรนต์ที่ 2) เบรกความเร็วรอบมอเตอร์ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	14
10. วงจรควบคุมแบบลูบปิดและวงจรกำลังแบบดวลคอนเวอร์เตอร์ไม่มีวงจรกระแส.....	17
11. เครื่องหมายสัญลักษณ์ควบคุมในแต่ละควอแดรนต์.....	18

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

12. ขั้นตอนการเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกา.....	23
13. ขั้นตอนการกลับทิศทางความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจากทิศทางทวนเข็มนาฬิกาไปสู่ทิศทางตามเข็มนาฬิกา.....	24
14. การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระแสเมเจอร์ไม่ไหลกลับทิศ.....	27
15. การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระแสเมเจอร์ไหลกลับทิศ.....	28
16. โหมด A คอนเวอร์เตอร์ชุด A นำกระแสโหมดมอเตอร์วิ่ง (ควอแดรนต์ที่ 1).....	30
17. การโอนย้ายโหมดการทำงานจากคอนเวอร์เตอร์ชุด A (Change over logic) แบบกระแสเมเจอร์ไม่ไหลกลับทิศ.....	31
18. โหมด B คอนเวอร์เตอร์ชุด A นำกระแสโหมดอินเวอร์ติง (ควอแดรนต์ที่ 4).....	32
19. โหมด C บล็อกคอนเวอร์เตอร์ชุด A ให้หยุดนำกระแสโดยแรงดันเอซีไลน์รีเวอร์ส.....	32
20. โหมด D คอนเวอร์เตอร์ชุด B นำกระแสในโหมดมอเตอร์วิ่ง (ควอแดรนต์ที่ 3).....	33
21. การโอนย้ายโหมดการทำงานจากคอนเวอร์เตอร์ชุด A ไปสู่คอนเวอร์เตอร์ชุด B (Change over logic) แบบกระแสเมเจอร์ไหลกลับทิศ.....	35
22. โหมด A คอนเวอร์เตอร์ชุด A นำกระแสโหมดมอเตอร์วิ่ง (ควอแดรนต์ที่ 1).....	35
23. โหมด B บล็อกคอนเวอร์เตอร์ชุด A หยุดนำกระแสโดยแรงดันเอซีไลน์รีเวอร์ส.....	36
24. โหมด B คอนเวอร์เตอร์ชุด B นำกระแส โหมดอินเวอร์ติง (ควอแดรนต์ที่ 2).....	37
25. โหมด C คอนเวอร์เตอร์ชุด B นำกระแสโหมดมอเตอร์วิ่ง (ควอแดรนต์ที่ 3).....	37
26. ไทม์มิงไดอะแกรมของวงจร DCAI ขณะกลับทิศทาง ความเร็วรอบมอเตอร์จากทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกาไปสู่ทิศทางความเร็วรอบตามเข็มนาฬิกา.....	39
27. คอนเวอร์เตอร์พูลคอนโทรล จ่ายกำลังให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก.....	41

สารบัญญภาพ(ต่อ)

หน้า

28. คอนเวอร์เตอร์ฟูลคอนโวลต์ ขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	40
29. รูปคลื่นแรงดันและกระแสเมเจอร์ เมื่อคอนเวอร์เตอร์ชุด A ทำงานในควอดแรนต์ที่ 1 โหมดมอดูเลตอริงกระแสเมเจอร์ไหลต่อเนื่องที่สภาวะคงตัว.....	43
30. แรงดันไฟตรงเฉลี่ยที่เอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์เทียบกับมุมนำกระแส α	46
31. รูปคลื่นแรงดันและกระแสเมเจอร์เมื่อคอนเวอร์เตอร์ชุด A ทำงานในควอดแรนต์ที่ 1 โหมดมอดูเลตอริง กระแสเมเจอร์ไหลไม่ต่อเนื่อง.....	49
32. รูปคลื่นแรงดันและกระแสเมเจอร์เมื่อคอนเวอร์เตอร์ชุด B ทำงานในควอดแรนต์ที่ 3 โหมดมอดูเลตอริง กระแสเมเจอร์ไหลต่อเนื่อง.....	51
33. รูปคลื่นแรงดันและกระแสเมเจอร์เมื่อคอนเวอร์เตอร์ชุด B ทำงานในควอดแรนต์ที่ 3 โหมดมอดูเลตอริง กระแสเมเจอร์ไหลไม่ต่อเนื่อง.....	52
34. ผลการซิมมูลชันกระแสเมเจอร์ไหลต่อเนื่อง โหมดมอดูเลตอริง (ควอดแรนต์ที่ 1) ที่มุมนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ $\alpha=30$ แอมป์ไหลลด TL=5kg ความเร็วรอบในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	54
35. ผลการวัดกระแสเมเจอร์ไหลต่อเนื่อง โหมดมอดูเลตอริง (ควอดแรนต์ที่ 1) ที่มุมนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ $\alpha=30$ แอมป์ไหลลด TL=5kg ที่ได้จากการทดลองสเกลวัด 1 ช่องเท่ากับ 10A.....	54
36. ผลการซิมมูลชันกระแสเมเจอร์ไหลไม่ต่อเนื่อง โหมดมอดูเลตอริง (ควอดแรนต์ที่ 1) มุมนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ $\alpha=60$ แอมป์ไหลลด TL=1.5kg ความเร็วรอบในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	55

สารบัญญภาพ(ต่อ)

หน้า

37. ผลการวัดกระแสแอมเพอร์ไหลไม่ต่อเนื่อง โหมดมอดเตอริง (ควอแดรนต์ที่ 1) ที่มูนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ $\alpha=60$ แรงบิดโหลด TL=1.5kg ความเร็วรอบในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจากการทดลองสเกลวัด 1 ช่องเท่ากับ 10A.....	55
38. ผลการชิมมูละชั้นกระแสแอมเพอร์ไหลต่อเนื่อง โหมดมอดเตอริง (ควอแดรนต์ที่ 3) ที่มูนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ $\alpha=30$ แรงบิดโหลด TL=5kg ความเร็วรอบในทิศทางตามเข็มนาฬิกา.....	56
39. ผลการวัดกระแสแอมเพอร์ไหลต่อเนื่อง โหมดมอดเตอริง (ควอแดรนต์ที่ 3) ที่มูนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ $\alpha=30$ แรงบิดโหลด TL=5kg ความเร็วรอบในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจากการทดลองสเกลวัด 1 ช่องเท่ากับ 10A.....	56
40. ผลการชิมมูละชั้นกระแสแอมเพอร์ไหลไม่ต่อเนื่องโหมดมอดเตอริง (ควอแดรนต์ที่ 3) ที่มูนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ $\alpha=60$ แรงบิดโหลด TL=1.5kg ความเร็วรอบในทิศทางตามเข็มนาฬิกา.....	57
41. ผลการวัดกระแสแอมเพอร์ไหลไม่ต่อเนื่องโหมดมอดเตอริง (ควอแดรนต์ที่ 3) ที่มูนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ $\alpha=60$ แรงบิดโหลด TL=1.5kg ความเร็วรอบในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจากการทดลองสเกลวัด 1 ช่องเท่ากับ 10A.....	57
42. วงจรไทรสเตอร์ที่ใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ.....	59
43. โมเดลทางไฟฟ้าของไทรสเตอร์กระแสสลับสร้างขึ้นจากโปรแกรม Pspice.....	61
44. วงจรขดลวดกระตุ้นแยกของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	65
45. คู่มือคอนเวอร์เตอร์แบบพูลคอนโทรลไม่มีวงจรกระแสชนิด 1 เฟส.....	66

สารบัญญภาพ(ต่อ)

หน้า

46. โครงข่ายอินทรีเกตุแรงบิดสุทธิของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	67
47. การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกาจาก ควอดแรนต์ที่ 1 ไปสู่ควอดแรนต์ที่ 2.....	68
48. คอนเวอร์เตอร์ชุด A นำกระแสใน โหมดมอเตอร์รีกควอดแรนต์ที่ 1 ขับเคลื่อนความเร็วรอบ ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา มุมนำกระแส $\alpha=60$ แรงบิดโหลด $T_d=1\text{Kg}$ ก่อนเกิดการเบรก.....	69
49. คอนเวอร์เตอร์ชุด B นำกระแสใน โหมดอินเวอร์ติงควอดแรนต์ที่ 2 ขับเคลื่อนความเร็วรอบ ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา มุมนำกระแส $\alpha=-150$ แรงบิดโหลด $T_d=1\text{Kg}$ หลังเกิดการ เบรกความเร็วรอบ.....	70
50. ผลการชิมมุเลชั่นทิศทางกระแสของกระแสเมเจอร์จากโหมดมอเตอร์รีก (ควอดแรนต์ที่ 1) ไปสู่ โหมดอินเวอร์ติง (ควอดแรนต์ที่ 2).....	71
51. ผลการวัดกระแสเมเจอร์ โหมดมอเตอร์รีก (ควอดแรนต์ที่ 1) และโหมดอินเวอร์ติง (ควอดแรนต์ที่ 2) ที่ได้จากการทดลอง 1 ช่องเท่ากับ 10A.....	71
52. ผลการชิมมุเลชั่นแรงดันที่ขั้วมอเตอร์จากโหมดมอเตอร์รีก (ควอดแรนต์ที่ 1) ไปสู่โหมดอิน เวอร์ติง (ควอดแรนต์ที่ 2).....	72
53 ผลการวัดแรงดันที่ขั้วมอเตอร์จากโหมดมอเตอร์รีก (ควอดแรนต์ที่ 1) ไปสู่โหมดอินเวอร์ติง (ควอดแรนต์ที่ 2) ที่ได้จากการทดลอง 1 ช่องเท่ากับ 100V.....	72
54 การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในทิศทาง ความเร็วรอบตามเข็มนาฬิกาจาก ควอดแรนต์ที่ 3 ไปสู่ควอดแรนต์ที่ 4.....	73
55. คอนเวอร์เตอร์ชุด B นำกระแสใน โหมดมอเตอร์รีกควอดแรนต์ที่ 3 ความเร็วรอบใน ทิศทางตามเข็มนาฬิกา มุมนำกระแส $\alpha=-60$ แรงบิดโหลด $T_d=1\text{Kg}$ ก่อนเกิดการเบรก.....	74

สารบัญญภาพ(ต่อ)

หน้า

56. คอนเวอร์เตอร์ชุด A นำกระแสใน โหมดอินเวอร์ตดิ้งควอแดรนต์ที่ 4 ขับเคลื่อนความเร็วรอบ ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา มุมนำกระแส $\alpha=150$ แรงแบิดโหลด $T_d=-1\text{Kg}$ หลังเกิดการเบรก ความเร็วรอบ.....	75
57. ผลการชิมมุเลชั่นกระแสเมเจอร์จาก โหมดมอเตอริง (ควอแดรนต์ที่ 3) ไปสู โหมด อินเวอร์ตดิ้ง (ควอแดรนต์ที่ 4).....	76
58. ผลการวัดกระแสเมเจอร์จาก โหมดมอเตอริง (ควอแดรนต์ที่ 3) ไปสูโหมด อินเวอร์ตดิ้ง (ควอแดรนต์ที่ 4) ที่ได้จากการทดลอง 1 ช่องเท่ากับ 10A.....	76
59. ผลการชิมมุเลชั่นแรงดันที่ขั้วมอเตอริงจาก โหมดมอเตอริง (ควอแดรนต์ที่ 3) ไปสู โหมดอินเวอร์ตดิ้ง (ควอแดรนต์ที่ 4) ที่ได้จากการทดลอง 1 ช่องเท่ากับ 100V.....	77
60. ผลการวัดแรงดันที่ขั้วมอเตอริงจาก โหมดมอเตอริง (ควอแดรนต์ที่ 3) ไปสูโหมด อินเวอร์ตดิ้ง (ควอแดรนต์ที่ 4) ที่ได้จากการทดลอง 1 ช่องเท่ากับ 100V.....	77
61. วงจรอิเล็กทรอนิกส์ควบคุม การรีเจนเนอเรทีฟพลังงานที่โรเตอร์ขณะหมุนแบบ 4 ควอ- แดรนต์.....	79
62. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ขนาดกำลังเอาต์พุต 3.3KW กระแสเมเจอร์ 16A ความเร็วรอบ 1500 รอบ/นาที ที่ใช้ในการทดลอง.....	80
63. บล็อกไดโอดแกรมมอเตอริ์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก.....	85
64. บล็อกไดโอดแกรมแสดงในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	85
65. บล็อกไดโอดแกรมทรานเฟอร์ฟังก์ชัน มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแทนโดยสัญลักษณ์.....	86
66. การควบคุม แบบลูปปิดที่ประกอบด้วยลูปควบคุมกระแสและลูปควบคุมความเร็วรอบ พร้อมทั้งโมเดลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก.....	87
67. ลูปควบคุมกระแสเมเจอร์เป็นลูปควบคุมภายใน.....	89
68. ลูปควบคุมความเร็วรอบเป็นลูปควบคุมภายนอก.....	93

สารบัญญภาพ(ต่อ)

หน้า

69. แรงดันเอาท์พุทที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์ช่วงเป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นต่อมุนำกระแส α	95
70. การหาอัตราขยายของคอนเวอร์เตอร์แบบฟูลคอนโทรลชนิด 1 เฟส.....	95
71. การหาค่าเวลาคงที่ทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยการทดสอบ.....	98
72. การตอบสนองต่อสแต็ปอินพุทที่เอาท์พุททาโคเจนเนอเรเตอร์.....	99
73. กราฟความสัมพันธ์แรงดันสแต็ปอินพุทอ้างอิงต่อเวลาตอบสนองที่ เอาท์พุททาโคเจนเนอเรเตอร์จากการทดสอบ.....	101
74. การเคลื่อนที่ของวัตถุในแนวราบ.....	102
75. การเคลื่อนที่ของวัตถุรอบแกนหมุนระนาบรัศมี.....	103
76. การบล็อกคอนเวอร์เตอร์หยุดนำกระแสโดยแรงดันเอซีไลน์รีเวอร์ส.....	108

สัญลักษณ์

I_g :	กระแสเมเจอร์ มีหน่วยเป็น A
I_g :	กระแสเกตไทรสเตอร์ มีหน่วยเป็น mA
I_c :	กระแสอ้างอิงของลูบควบคุมกระแส มีหน่วยเป็น V
I_L :	กระแสเลตซิงของไทรสเตอร์ มีหน่วยเป็น mA
B:	ค่าคงที่แรงบิด หน่วยเป็น N-m/(rad/sec)
C_T :	ค่าปัสเตอร์ในโมเดลไทรสเตอร์ หน่วยเป็น F
$F1, F2, F3$:	แหล่งจ่ายแรงดันควบคุมสวิตช์
$K1$:	อัตราการขยายของลูบควบคุมความเร็วรอบ
$K2$:	อัตราการขยายของลูบควบคุมกระแส
K_{ps} :	อัตราการขยายคอนเวอร์เตอร์
K_p :	อัตราขยายลูบควบคุมกระแสและลูบความเร็ว
T_d, M_d :	แรงบิดที่เพลามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง หน่วยเป็น N-m
L_g :	อินดักแตนส์เมเจอร์ หน่วยเป็น henry(H)
R_g :	ความต้านทานเมเจอร์ หน่วยเป็น Ω
R_g :	ความต้านทานเกตไทรสเตอร์ หน่วยเป็น Ω
R_{on} :	ค่าความต้านทานของสวิตช์ S1 ขณะเปิดวงจร Ω
R_{off} :	ค่าความต้านทานของสวิตช์ S1 ขณะเปิดวงจร Ω
R_T :	ค่าความต้านทานขนานกับแหล่งจ่ายกระแส F1 ในโมเดลไทรสเตอร์ หน่วยเป็น Ohm
T_f :	เวลาที่คอนเวอร์เตอร์ หน่วยเป็น sec
T_i :	เวลาที่วงจรรองหาโคเจนเนอเรเตอร์ หน่วยเป็น sec
T_2 :	เวลาที่วงจรรองกระแสเมเจอร์ หน่วยเป็น sec

สัญลักษณ์(ต่อ)

T_a, T_a' :	เวลาคงที่วงจรมอเตอร์ หน่วยเป็น sec
T_o :	ผลรวมเวลาขนาดเล็กในรูปควบคุมความเร็วรอบอ้างอิงจากรูปควบคุมกระแส
T_m, T_m' :	เวลาคงที่ทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก หน่วยเป็น sec
I_{TM} :	กระแสในดสูงสุดขณะนำกระแส หน่วยเป็น A
T_{σ} :	ผลรวมเวลาขนาดเล็กในรูปควบคุมกระแส หน่วยเป็น sec
T_{σ} :	ผลรวมเวลาขนาดเล็กทั้งหมดในรูปควบคุมความเร็วรอบ หน่วยเป็น sec
U_A :	แรงดันไฟตรงเฉลี่ยที่ขั้วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง หน่วยเป็น V
U_o :	ค่าความเร็วที่ต้องการของรูปควบคุมความเร็วรอบ หน่วยเป็น V
U_m :	แรงดันสูงสุดของแหล่งจ่ายไฟสลับ หน่วยเป็น V
U_n :	แรงดันเอาท์พุททาโคเจนเนอเรเตอร์ หน่วยเป็น V
$U_d(n)$:	แรงดันย้อนกลับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง หน่วยเป็น V
U_s :	แรงดันอินพุทแหล่งจ่ายไฟสลับ หน่วยเป็น V
V_g :	แรงดันเกตไทรสเตอร์ หน่วยเป็น V
V_{on} :	แรงดันควบคุมสวิตซ์ให้นำกระแส หน่วยเป็น V
V_{off} :	แรงดันควบคุมสวิตซ์ให้หยุดนำกระแส หน่วยเป็น V
V_{RRM} :	แรงดันตามเข็มนาฬิกาสูงสุด หน่วยเป็น V
V_{Tm} :	แรงดันสูงสุดที่ขาเกตไทรสเตอร์ขณะนำกระแส หน่วยเป็น V
$V_x V_y$:	แหล่งจ่ายแรงดันศูนย์โวลต์ หน่วยเป็น V
α_1 :	มุมนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ชุด A หน่วยเป็น degree or radian
α_2 :	มุมนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ชุด B หน่วยเป็น degree or radian
J:	โมเมนต์อินเนอเทีย หน่วยเป็น $Kg \cdot m^2$
ω_m :	ความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง หน่วยเป็น rad/sec
Con A:	คอนเวอร์เตอร์ชุด A
Con B:	คอนเวอร์เตอร์ชุด B

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาของการวิจัย

การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์เพื่อควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ให้ไปสู่ค่าความเร็วรอบที่ต้องการและรวมไปถึงการทำให้มอเตอร์หยุดเดินบ่อยๆ ที่ใช้ในขบวนการผลิตที่ซับซ้อนจะต้องนำพลังงานที่มอเตอร์กำเนิดขึ้นออกจาก ตัวมอเตอร์ในสมัยที่เพาเวอร์เซมิคอนดักเตอร์ (power semiconductor) และอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ยังไม่มีการพัฒนามากนัก การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์จะอาศัยหลักการ เบรกแบบไดนามิกเบรกโดยใช้ความต้านทานเป็นตัวรับพลังงานที่จ่ายออกจากมอเตอร์ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียในรูปความร้อน ความเร็วรอบในการเบรกมอเตอร์จะช้าเพราะว่า ความต้านทานที่เป็นโหลดให้แก่มอเตอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้การดูดซับพลังงานจากมอเตอร์เป็นไปได้ช้าทำให้ประสิทธิภาพการเบรกต่ำ การเบรกแบบไดนามิกจะใช้กับมอเตอร์ที่มีขนาดไม่เกิน 1 Kw ถ้ามอเตอร์มีขนาดใหญ่กว่านี้จะต้องใช้ความต้านทานที่มีกำลังทนความร้อนได้สูงซึ่งเป็นการยากที่จะหาได้ในท้องตลาดทั่วไป ในเวลาต่อมาได้มีการพัฒนามาใช้หลักการของ (ward leonard) ซึ่งควบคุมและเบรกความเร็วรอบของมอเตอร์ แบบรีเจนเนอเรทีฟ หลักการนี้ประกอบด้วยเครื่องจักรกลไฟฟ้าถึงสามตัวทำให้มีขนาดใหญ่และผลตอบสนองทางด้านไดนามิกช้าและสิ้นเปลืองพลังงาน เครื่องจักรกลไฟฟ้าตัวแรกจะใช้ มอเตอร์เหนี่ยวนำขับเคลื่อนเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงตัวที่สอง เพื่อต้องการทำเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงโดยการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้กับ เครื่องจักรกลไฟฟ้าตัวที่สามเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อต้องการเบรกความเร็วรอบมอเตอร์โดย การรีเจนเนอเรทีฟพลังงานที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ขณะหมุนจะต้องไหลจาก มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไปสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ในช่วงนี้การทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้าจะเปลี่ยนหน้าที่ในการทำงานโดยที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าตัวที่สองจากเดิมเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเปลี่ยนเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงตัวที่สามจากเดิมเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเปลี่ยนเป็นเครื่องกำเนิดไฟ-

ฟ้ากระแสตรง เมื่อเป็นเช่นนี้แล้วความเร็วรอบมอเตอร์จะลดลงเท่ากับความเร็วรอบที่ต้องการ การทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงก็จะกลับสู่สภาพเดิมซึ่ง การรีเจนเนอเรทีฟพลังงานที่เกิดขึ้นบนมอเตอร์ไม่สามารถคืนพลังงานกลับแหล่งจ่ายไฟสลับได้ทำให้ไม่เป็นการประหยัดพลังงาน

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาทางด้าน เพาเวอร์เซมิคอนดักเตอร์ (power semiconductor) และวงจรถวลีกรอนิกส์โดยการพัฒนา การควบคุมและเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธี รีเจนเนอเรทีฟโดยใช้คู่อัลคอนเวอร์เตอร์ต่อขนานกลับทิศทางกัน (Anti-parallel) สามารถเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ใน ทิศทางทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกา เพื่อคืนพลังที่เกิดจากมอเตอร์ให้ไหลกลับแหล่งจ่ายไฟสลับทำให้ไม่เกิดการสูญเสียในตัว เครื่องจักรกลไฟฟ้าและใช้เวลาเบรกความเร็วรอบมอเตอร์น้อยลง เหมาะสมกับงานที่ต้องการลดและเร่งความเร็วรอบหรือหยุดเดินความเร็วรอบมอเตอร์บ่อยๆ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถกลับทิศทางการหมุนได้ทันทีทันใดดังนั้น มอเตอร์สามารถทำงานได้ทั้ง 4 ควอดแรนต์ของระนาบกระแส-แรงดัน

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาถึงการออกแบบสร้าง วิเคราะห์และทดสอบ คู่อัลคอนเวอร์เตอร์ซึ่งใช้ไทรซิสเตอร์เป็นอุปกรณ์ ควบคุมทิศทางและปริมาณของกระแสเมเจอร์ใน วงจรกำลังในโหมดมอเตอร์รีจหรือโหมดอินเวอร์ตติงและตัวขับเคลื่อนสามารถทำงานได้ทั้ง 4 ควอดแรนต์ในระนาบแรงบิด-ความเร็ว การโอนย้ายการทำงานในแต่ละควอดแรนต์จะต้องมีตัวตรวจจับกระแสเป็นศูนย์กลาง ในขณะที่ต้องการ เบรกความเร็วรอบมอเตอร์หรือกลับทิศทางความเร็วรอบมอเตอร์ ตัวขับเคลื่อนทำงานในโหมดอินเวอร์ตติง พลังงานที่กำเนิดขึ้นที่มอเตอร์ถูกส่งกลับไปแหล่งจ่ายไฟหลัก เมื่อมอเตอร์ทำงานในโหมดมอเตอร์รีจ พลังงานจากแหล่งจ่ายไฟหลักจะไหลเข้ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในการย้ายตำแหน่งควอดแรนต์จะต้องมีตัวตรวจจับกระแสติดตาม การทำงานอยู่ตลอดเวลาและแรงดันที่ขั้วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อทำหน้าที่กำหนดมุมนำกระแส (โหมดมอเตอร์รีจหรืออินเวอร์ตติง) ของคอนเวอร์เตอร์แต่ละชุดด้วย ตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะทำงานได้ทั้ง 4 ควอดแรนต์ของ ระนาบกระแส-แรงดัน โดยการออกแบบวงจรควบคุมแบบรูปปิดโดยใช้หลัก

เอก การชิมเมตรีคอลลีออปติมัมทั้ง รูปควบคุมความเร็วและรูปควบคุมกระแส วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้การคำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 3.3KW แรงดันที่ขั้วมอเตอร์ 200V กระแสเมเจอร์ 16A ความเร็วรอบ 1500 รอบ/นาที

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

จุดเด่นประการสำคัญของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยคู่อัลคอนเวอเตอร์ไม่มีวงจรถะแสที่ประกอบด้วยคอนเวอเตอร์แบบฟูลคอนโทรลสองชุดต่อขนาน แบบกลับขั้วสามารถรับพลังงานรีเจนเนอเรทีฟที่เกิดขึ้นที่ ตัวมอเตอร์ได้ขณะเบรกความเร็วรอบในทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกาและกลับทิศทางความเร็วรอบมอเตอร์จากทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกา ไปสู่ทิศทางความเร็วรอบตามเข็มนาฬิกาหรือจากทิศทางความเร็วรอบตามเข็มนาฬิกาไปสู่ทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกา และสามารถคืนพลังงานที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ ขณะหมุนกลับแหล่งจ่ายไฟกลับได้โดย การควบคุมมุมทริกไทรสเตอร์ของชุดคอนเวอเตอร์ที่ทำหน้ารับพลังงานรีเจนเนอเรทีฟ ให้ทำงานในโหมดอินเวอร์ตึง ทำให้ความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงลดลงได้อย่างรวดเร็วและไม่เกิดการสูญเสียพลังงานขณะ เบรกความเร็วรอบแต่อย่างใด การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในลักษณะนี้ ทำงานได้ทั้ง 4 ควอดแรนต์ของระนาบ กระแส-แรงดัน และนำไปใช้กับงานที่ต้องการหยุดเดินบ่อยๆ ได้

บทที่ 2

การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 2 ควอดแดรนต์

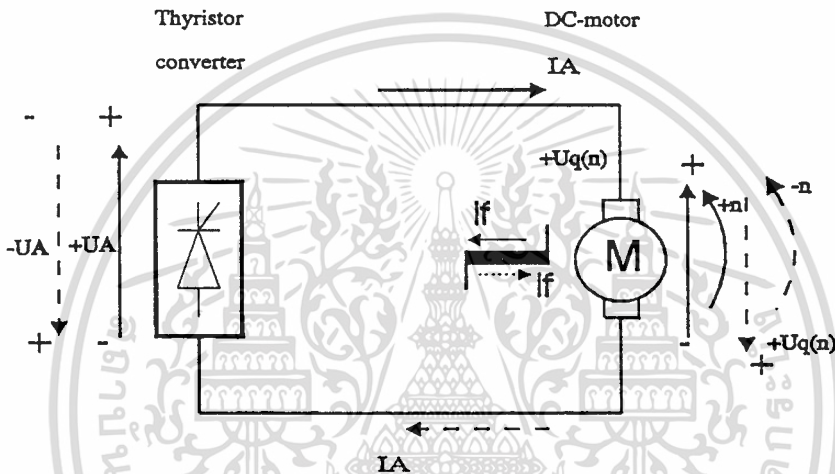
การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบบกระแสเอมเจอร์ไม่ไหล กลับทิศ

การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีการ รีเจนเนอเรทีฟ พลังงานที่เกิดขึ้นบนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกลับไปสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (แบบกระแสไม่ไหลกลับทิศ) โดยการควบคุมมุมนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ แบบฟูลคอนโทรล ให้กระทำในโหมดมอเตอร์รีจหรืออินเวอร์ต ดังในภาพที่ 2 ซึ่งป้อนพลังงานให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ที่แสดงในภาพที่ 1 สามารถแบ่งการทำงานได้เป็น 2 โหมด

1. โหมดมอเตอร์รีจ การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในสภาวะคงตัวแสดงในภาพที่ 5 ชั่วแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (+UA) แรงดันย้อนกลับ $+U_q(n)$ เป็นบวกและกระแสเอมเจอร์ (+ia) มีทิศทางไหลเข้ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการทำงานในโหมดมอเตอร์รีจ (ควอดแดรนต์ที่ 1) ในทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกา แรงดันไฟตรงเฉลี่ยที่ชั่วเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์มีค่าเป็นบวก (+UA) เนื่องจากแรงดันเอาต์พุตของคอนเวอร์เตอร์เป็นฟังก์ชันของโคซาย (COS α) และมากกว่าแรงดันย้อนกลับ $+U_q(n)$ ซึ่งเกิดจากมุมนำกระแสคอนเวอร์เตอร์อยู่ในช่วง $0 < \alpha < \pi/2$ ดังในภาพที่ 2 ทำให้ทิศทางกระแสเอมเจอร์มีทิศทางบวก (+ia) ไหลเข้ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและสร้างแรงบิด (+Md) และความเร็ว (+n) ดังนั้นมอเตอร์จะเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าให้เป็นกำลังงานทางกล

2. โหมดอินเวอร์ตติง การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในสภาวะทรานเซิลลซ์แรงดันที่เอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ถูกทำให้กลับขั้วจากบวก (+UA) เป็นลบ (-UA) เกิดจากมุมนำกระแสของคอนเวอร์เตอร์เลื่อนจากโหมดมอเตอร์ริง (ควอดแรนต์ที่ 1) $0 < \alpha < \pi/2$ ไปสู่มุมนำกระแสในโหมดอินเวอร์ตติง (ควอดแรนต์ที่ 4) $\pi/2 < \alpha < \pi$ ดังในภาพที่ 2 แรงดันย้อนกลับของมอเตอร์-

ภาพที่ 1



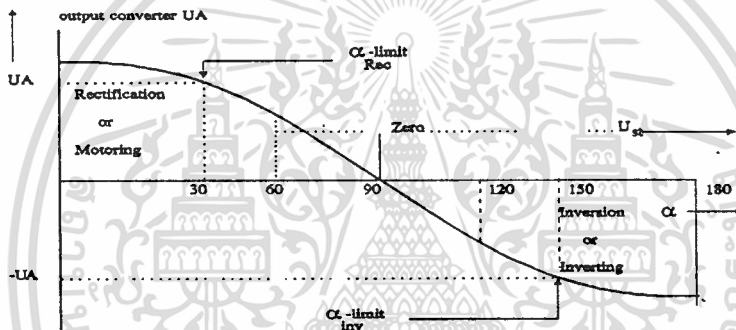
คอนเวอร์เตอร์แบบฟลูคอนโทรล จ่ายกระแสเมเจอร์ (+ia) ไหลได้ในทิศทางเดียวให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

ไฟฟ้ากระแสตรง $+Uq(n)$ ถูกทำให้มีทิศทางกลับจากเดิมโดย การกลับทิศทางกระแสของกระแสสร้างสนามแม่เหล็กของขดลวดกระตุ้นแยก (if) แรงดันย้อนกลับจะมีขั้วเป็นลบ $-Uq(n)$ ทำให้แรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง $Uq(n)$ มีค่ามากกว่าแรงดันที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์ (UA) กระแสเมเจอร์ (+ia) สามารถไหลกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟสลับผ่าน คอนเวอร์เตอร์ชุดเดิมที่จ่ายกระแสเมเจอร์ใน โหมดมอเตอร์ริงก่อนการเปลี่ยนโหมดการทำงานและกระแสเมเจอร์ยังคงไหลในทิศทางเดิมเป็น การรีเจนเนอเรทีฟ พลังงานออกจากตัวโรเตอร์ขณะหมุน เพื่อเบรคความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและสามารถที่จะกระทำได้ที่ความเร็วใดๆ ทำให้ความเร็วรอบมอเตอร์เป็นลบ ($-n$) (ควอดแรนต์ที่ 4) ดังในภาพที่ 4 และลดลง คอนเวอร์เตอร์แบบฟลูคอนโทรลเท่านั้นที่สามารถรับกำลังไฟฟ้าวิเจนเนอเรทีฟที่เกิดจากมอเตอร์โดยการป้อนกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟสลับสถานะนี้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเปลี่ยนการทำงานเป็น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

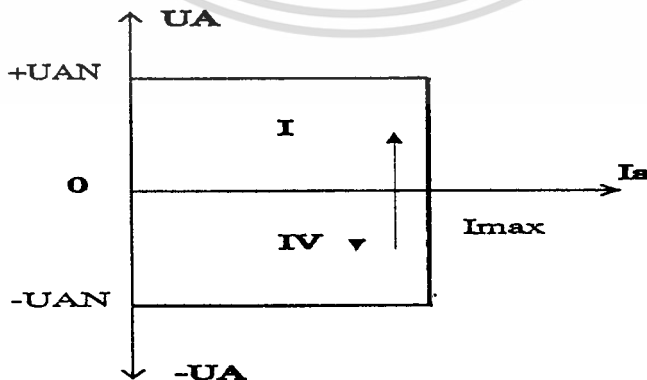
กระแสตรง แต่คอนเวอร์เตอร์แบบฮาฟคอนโทรลไม่สามารถทำให้เปลี่ยนชั่วแรงดันเอาต์พุตได้จึงรับพลังงานรีเจนเนอเรทีฟไม่ได้ดังนั้น ความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงลดลงและเป็นการเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ในทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกา แบบกระแสไม่ไหลกลับทิศจากหลักการ ดังกล่าวจะเห็นได้ว่าแรงบิดที่เพลามอเตอร์มีค่าเป็นบวก ไม่เป็นลบเนื่องจากกระแสอเมเจอร์ยังคงไหลในทิศทางเดิมแต่ ความเร็วรอบมอเตอร์มีค่าเป็นลบในควอดแรนต์ที่ 4 เกิดจากพลังงานไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงไปสู่แหล่งจ่ายไฟกลับในช่วง การเบรกความเร็วรอบทำให้ความเร็วรอบลดลงได้

ภาพที่ 2



แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์แบบฟลูคอนโทรลต่อมุมนำกระแส α ที่อยู่ในช่วง $0 < \alpha < \pi$

ภาพที่ 3

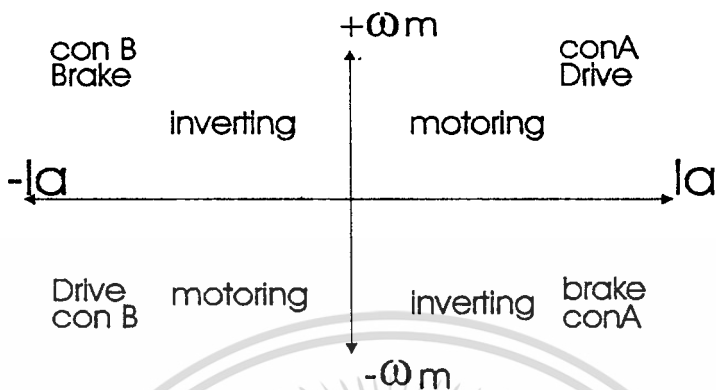


เอาต์พุตของกระแสและแรงดันที่ชั่วคอนเวอร์เตอร์แบบฟลูคอนโทรลในควอดแรนต์ที่ 1

และ 4

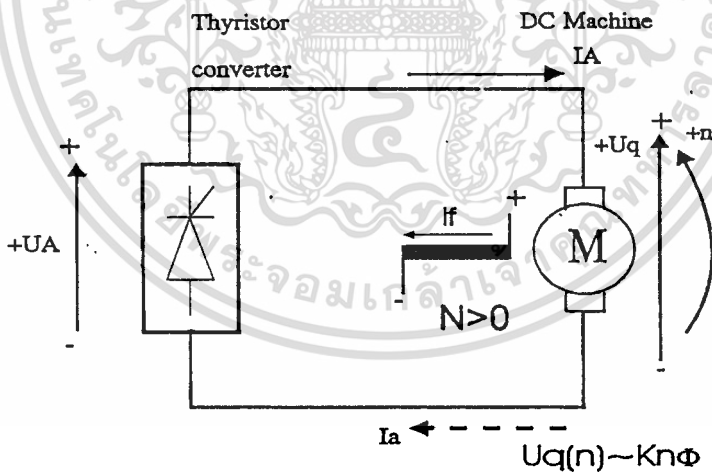
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4



แสดงทิศทางเครื่องหมายกระแสเอมเจอร์ I_a และความเร็วรอบมอเตอร์ ω_m แต่ละควอดรันท์

ภาพที่ 5



คอนเวอร์เตอร์แบบฟูลคอนโทรล ทำงานในโหมดมอเตอร์รีก (ควอดรันท์ที่ 1) ขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

การเปลี่ยนโหมดการทำงานจากโหมดมอเตอร์รีกควอดรันท์ที่ 1 ในภาพที่ 5 ไปสู่มอเตอร์อินเวอร์ติงในภาพที่ 6 ควอดรันท์ที่ 4 เอ็มเจอร์ทุกคอนเวอร์เตอร์ UA มีค่าเป็นลบคอนเวอร์เตอร์ทำงานอยู่ในอินเวอร์ติงโหมด แรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ $U_q(n)$ จะมีทิศทางกลับจากเดิมโดยการกลับทิศ

โหลดแบบแอกทีฟหมายถึง โหลดที่มีการสะสมพลังงานกลและถ่ายเทพลังงานนี้ไปให้แก่เพลามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อแรงดันที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์ถูกทำให้น้อยกว่าแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ $U_q(n)$ เมื่อต้องการเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ สามารถทำได้ตามข้อ 1

1. ทิศทางกระแสของสนามกระตุ้นอาจที่จะถูกทำให้กลับทิศทางสำหรับมอเตอร์ที่กำลังทำงานในทิศทางทวนหรือตามเข็มนาฬิกาเป็นการให้ รีเจนเนอเรทีฟ เบรกในทิศทางความเร็วรอบนี้ กรณีนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลกระแสแอมเพอร์

2. ขั้วแรงดันคอนเวอร์เตอร์ แบบฟูลคอนโทรลสามารถทำให้กลับขั้วได้เมื่อ เทียบการทำงานในสถานะทรานเซียนต์ เมื่อความเร็วรอบมอเตอร์หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาหรือในทิศทางตามเข็มนาฬิกาทำให้คอนเวอร์เตอร์สามารถรับ พลังงานรีเจนเนอเรทีฟจากโรเตอร์ขณะหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและความเร็วรอบมอเตอร์จะลดลง ความสัมพันธ์ของมุมนำกระแสเทียบกับแรงดันเฉลี่ยที่ขั้ว คอนเวอร์เตอร์ตามสมการที่ (2.1)

$$U_A = [2U_m/\pi] \cos(\alpha_1) \dots\dots\dots(2.1)$$

มุมนำกระแสของคอนเวอร์เตอร์ในช่วง $\pi/2 < \alpha < \pi$ อยู่ในโหมดอินเวอร์ตติง

การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไม่สามารถใช้ได้กับคอนเวอร์เตอร์แบบฮาฟคอนโทรลเพราะว่าแรงดันที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์ไม่สามารถกลับขั้วแรงดันเฉลี่ยได้ ตัวขับเคลื่อนจะทำงานเพียงควอแควร์นต์เดียวเท่านั้น ความสัมพันธ์มุมนำกระแสเทียบกับแรงดันเฉลี่ยที่ขั้วเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ตามสมการที่ (2.2)

$$U_A = \frac{2U_m}{\pi} \cos[1 + \cos(\alpha_1)] \dots\dots\dots 2.2)$$

มุมนำกระแสคอนเวอร์เตอร์อยู่ในช่วง $\pi/2 < \alpha < \pi$ แรงดันเฉลี่ยไฟตรงที่เอาต์พุต คอนเวอร์เตอร์ไม่สามารถกลับขั้วได้

การเบรคความเร็วรอบมอเตอร์แบบไดนามิกโดย การต่อความต้านทานภายนอกเพื่อที่จะทำให้กระแสเมเจอร์ให้เป็นศูนย์ทำให้ มอเตอร์มีประสิทธิภาพการเบรคความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต่ำ การเบรคความเร็วรอบมอเตอร์ทางไฟฟ้าแบบรีเจนเนอเรทีฟแบบกระแสเมเจอร์ไม่ไหลกลับทิศจากทิศเดิมโดย การคืนพลังงานที่เกิดบนมอเตอร์กลับแหล่งจ่ายไฟฟ้าสลับและมอเตอร์ทำงานในโหมดอินเวอร์ตึงทำให้ประสิทธิภาพการเบรคสูง ชั่วแรงดันคอนเวอร์เตอร์ต่อกับชั่วแรงดันของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะได้รับความสัมพันธ์

$$\frac{2U_m}{\pi} \cos(\alpha) = U_q(n) + I_a R_a \dots\dots\dots(2.3)$$

$$U_A = \frac{2U_m}{\pi} \cos(\alpha)$$

จากสมการ (2.3)

$$I_a = \frac{2U_m \cos(\alpha) - U_q(n)}{R_a} \dots\dots\dots(2.4)$$

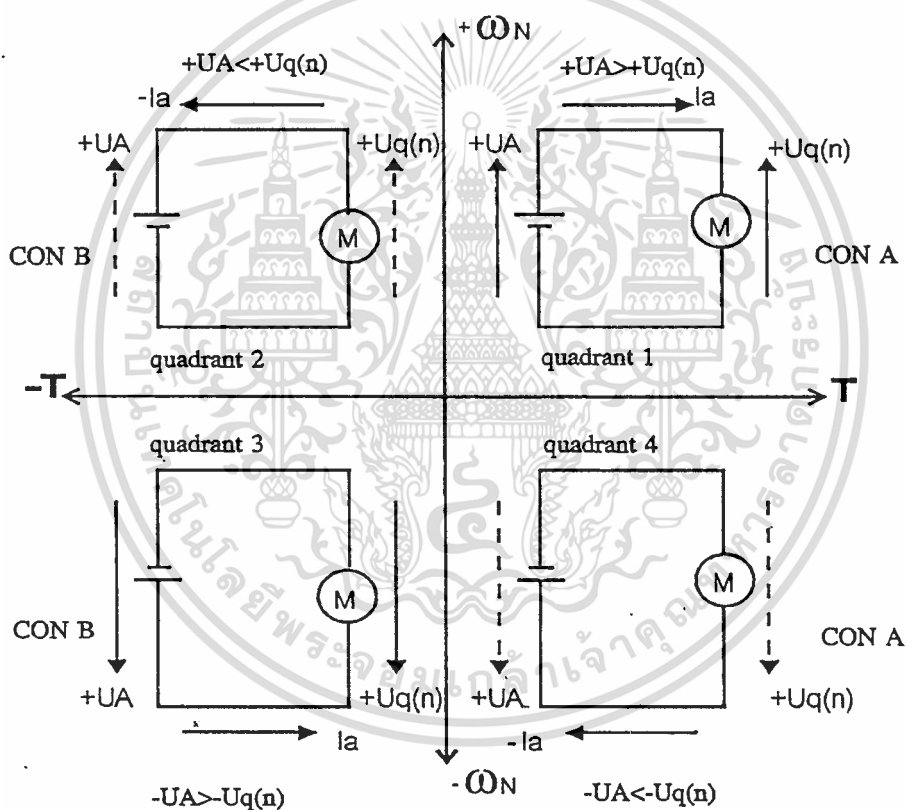
ดังนั้น

$$U_q(n) = K n \phi \dots\dots\dots(2.5)$$

การขับเคลื่อนความเร็วรอบให้มอเตอร์ทำงานอยู่ในควอดแรนต์ที่ 1 จากสมการที่ 2.4 จะเห็นได้ว่ากระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์จะมี แรงดันย้อนกลับเป็นตัวต้าน การไหลของกระแสในช่วงมอเตอร์หยุดนิ่งแรงดันย้อนกลับจะเป็นศูนย์กระแสเมเจอร์จะเป็นฟังก์ชันของมุม α ที่มุม $\alpha=0$ $I_a = (U_m/\pi) \cos(\alpha_1)$ และที่มุม $\alpha_1=0$ ทำให้กระแสไหลสูงสุดดังนั้น การเริ่มเดินมอเตอร์มุมของ α_1 ควรอยู่ที่ π เพราะค่าความต้านทานภายในวงจรมอเตอร์มีค่าต่ำมาก กระแสส่วนนี้เป็นตัวสร้างแรงบิดให้เกิดขึ้นและมอเตอร์มีความเร็วเพิ่มขึ้นทำให้แรงดันย้อนกลับของมอเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นทำให้กระแส I_a ลดลงจะเห็นได้ว่าเมื่อมอเตอร์รับโหลดมากความเร็วของมอเตอร์ลดลงและทำให้กระแส I_a เพิ่มขึ้นเพื่อสร้างแรงบิดที่ เพลามอเตอร์และความเร็วรอบมอเตอร์ให้มีค่าคงที่ เมื่อต้องการเบรคความเร็วรอบมอเตอร์เมื่อต่ออยู่กับโหลดที่มี moment inertia สูงการเบรคทางไฟฟ้า

เป็นสิ่งที่จำเป็น ดังภาพที่ 6 ที่ได้กล่าวมาแล้วเป็น การทำงานของมอเตอร์แบบสอง ควอดแรนท์ เมื่อมุม α เพิ่มขึ้นมากกว่า $\pi/2$ จึงทำให้แรงดันที่ขั้วคอนเวอเตอร์กลับขั้วซึ่งแรงดันเฉลี่ยที่ขั้วคอนเวอเตอร์เป็นลบในช่วงการเปลี่ยนขั้วแรงดันนี้ ความเร็วรอบมอเตอร์ยังคงหมุนในทิศทางเดิม และแรงบิดของมอเตอร์จะน้อยกว่าแรงบิดไหลดในช่วงการทำงานนี้มอเตอร์จะกลายเป็นเครื่องกำเนิด ไฟฟ้าและแรงดัน $U_q(n)$ จะมากกว่า U_A ดังนั้นจะต้องมี การโอนย้ายพลังงานที่เกิดจาก

ภาพที่ 7



การแสดงทิศทางการไหลกระแสเอเมเจอร์ ขั้วแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์และขั้วแรงดันคอนเวอเตอร์แบบฟูลคอนโทรลในแต่ละ ควอดแรนท์

มอเตอร์กลับไปสู่แหล่งจ่ายไฟสลับเพื่อทำให้ความเร็วรอบมอเตอร์ลดลงสู่ 0 เมื่อมีการจ่ายกระแสจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงไหลไม่กลับทิศไปให้แหล่งจ่ายไฟสลับจึงทำให้ความเร็วรอบมอเตอร์เป็นลบจากความสัมพันธ์ของ $P_d = T_L \omega_m$ จากภาพที่ 7 แรงดันย้อนกลับของมอเตอร์มีค่าเป็นลบ $-U_q(n)$ โดยกลับทิศทางกระแสสร้างสนามแม่เหล็กของขดลวดกระตุ้นแยก สามารถเขียนการคำนวณว่ากรณีใดทั้งสี่ อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ แรงดันที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์ เมื่อเกิดการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟกระแสไม่กลับทิศ ตามภาพที่ 7 ควอดแรนท์ที่ 4

$$U_A = U_q(n) + I_a R_a \dots\dots\dots(2.6)$$

$$-U_A = -U_q(n) + I_a R_a \dots\dots\dots 2.7)$$

$$U_q(n) - U_A = I_a R_a \dots\dots\dots(2.8)$$

$$I_a = \frac{U_q(n) - U_A}{R_a} \dots\dots\dots(2.9)$$

$$I_a = \frac{U_q(n) + 2U_m / \pi \cos(\alpha)}{R_a} \quad \pi/2 < \alpha < \pi \dots\dots\dots(2.30)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าเมื่อ α มีค่าเพิ่มขึ้นแรงดันที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์มีค่ามากกว่าแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง $U_q(n)$ กระแสเมเจอร์จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงสามารถไหลกลับไปสู่แหล่งจ่ายไฟสลับได้ทำให้กระแสลดลงสู่ศูนย์และแรงบิดที่เพลลาของมอเตอร์และความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงลดลงสู่ศูนย์ด้วยหมายความว่าความเร็วรอบมอเตอร์หยุดนิ่งอยู่กับที่

การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ กระแสเมเจอร์ไหลกลับทิศ

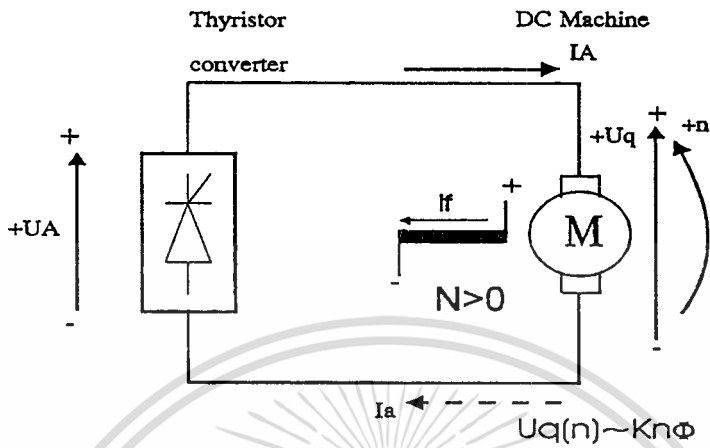
การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ด้วยวิธีการเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟพลังงานที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ขณะหมุนทางด้านแหล่งจ่ายไฟตรงถูกป้อนกลับไปสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ แบบกระแสเมเจอร์ไหลกลับทิศ จะต้องใช้คอนเวอร์เตอร์แบบฟลูคอนโทรลสองชุดต่อขนานแบบกลับขั้ว (คู่ลคอนเวอร์เตอร์) ทำให้สามารถรับพลังงานรีเจนเนอเรทีฟที่เกิดจากโรเตอร์ขณะหมุนได้ การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานของคอนเวอร์เตอร์จะสลับกันทำงาน เมื่อคอนเวอร์เตอร์ชุดหนึ่งทำงานในโหมดมอดเตอร์รีจ คอนเวอร์เตอร์อีกชุดหนึ่งต้องหยุดทำงาน เมื่อเกิดการเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไปสู่ค่าความเร็วรอบใหม่ที่ต่ำกว่าความเร็วรอบเดิมโดยการควบคุมมุนำกระแส คอนเวอร์เตอร์แบบฟูลคอนโทรลให้นำกระแสในโหมดอินเวอร์ตติ้ง (ควอดแรนต์ที่ 2,4) ในภาพที่ 7 คอนเวอร์เตอร์ป้อนหรือรับพลังงานให้แก่ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ถ้าแรงดันเฉลี่ยไฟตรงที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์มีค่าเป็นบวกหรือมีค่าเป็นลบตามลำดับ สามารถแบ่งโหมดการขับเคลื่อนได้เป็น 2 โหมด

1.โหมดมอดเตอร์รีจ การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในสภาวะคงตัวแสดงในภาพที่ 8 ขั้วแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ (UA) แรงดันย้อนกลับ $U_q(n)$ เป็นบวกและกระแสอเมเจอร์ (+Ia) มีทิศทางไหลเข้าอเมเจอร์ กระแสถูกจ่ายโดยคอนเวอร์เตอร์ชุด A ทำงาน (ควอดแรนต์ที่ 1) สำหรับการทำงานในโหมดมอดเตอร์รีจและสร้างแรงบิดที่เพลามอเตอร์มีค่าบวก (+Md) ในทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกา แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์เป็นบวก (+UA) เนื่องจากเอาต์พุตของ คอนเวอร์เตอร์เป็นฟังก์ชันของโคไซน์ (COS α) ที่เกิดจากมุนำกระแสของคอนเวอร์เตอร์อยู่ในช่วงระหว่าง $0 < \alpha < \pi/2$ ในภาพที่ 2 ทิศทางกระแสอเมเจอร์ไหลเข้ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นบวก (+Ia) เกิดจากความต่างศักย์ ที่ขั้วแรงดันคอนเวอร์เตอร์มีค่ามากกว่าแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ $U_q(n)$ ในภาพที่ 8 คอนเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าไปสู่มอเตอร์กระแสตรงและเปลี่ยนกำลังงานไฟฟ้าไปเป็นกำลังงานทางกล

2.โหมดอินเวอร์ตติ้ง การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในสภาวะทรานเซียนัล จะต้องมีการโอนย้ายการทำงานจากคอนเวอร์เตอร์ชุด A ไปสู่คอนเวอร์เตอร์ชุด B ขั้วแรงดันคอนเวอร์เตอร์ชุด B ถูกทำให้กลับขั้วแรงดันจากบวก (+UB) เมื่อทำงานในโหมดมอดเตอร์รีจ (ควอดแรนต์ที่ 3) ให้เป็นขั้วลบเมื่อทำงานในโหมดอินเวอร์ตติ้ง (ควอดแรนต์ที่ 2) เกิดจากมุนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ชุด B ถูกเลื่อนจากโหมดมอดเตอร์รีจ $0 < \alpha < \pi/2$ ไปสู่โหมดอินเวอร์ตติ้ง $\pi/2 < \alpha < \pi$ ดังใน ภาพที่ 2 โดยที่คอนเวอร์เตอร์ชุด A จะต้องหยุดนำกระแสก่อนที่คอนเวอร์เตอร์ชุด B จะนำกระแสโดยแรงดันเอซีไลเนอร์เวอร์ เพื่อหลีกเลี่ยงการลัดวงจรระหว่างไลน์กับนิวทรัล ขั้วแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไม่เปลี่ยนเพราะความเร็วรอบหมุนในทิศทางเดิมและแรงดันที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์มีขั้วเป็นบวกทำให้ $U_q(n)$ เป็นบวกและกระแสอเมเจอร์ไหลออกจากโรเตอร์

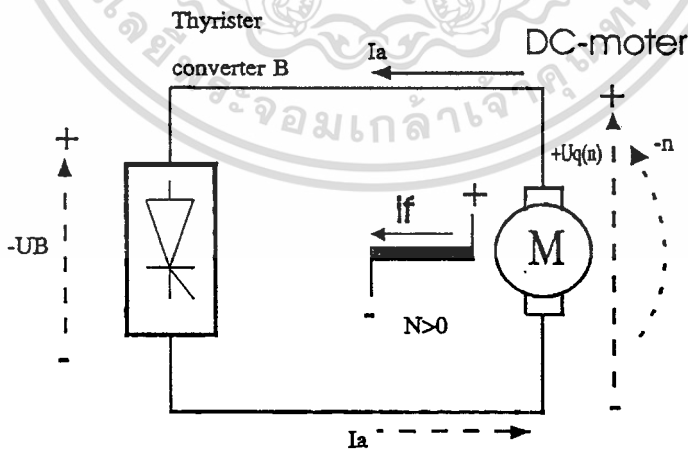
ภาพที่ 8



มอเตอร์ทำงานในโหมดมอเตอร์วิ่งจ่ายกระแสเมเจอร์โดยคอนเวอร์เตอร์ชุด A (ควอดแรนต์ที่ 1) ความเร็วรอบมอเตอร์ใน ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

ขณะหมุนมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางเดิมมีทิศทางไหลเป็นลบ (-Ia) กลับไปสู่แหล่งจ่ายไฟสลับ

ภาพที่ 9



มอเตอร์ทำงานในโหมดอินเวอร์ตจ่ายกระแสโดยคอนเวอร์เตอร์ชุด B (ควอดแรนต์ที่ 2) เบรกความเร็วรอบมอเตอร์ใน ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

ผ่านคอนเวอร์เตอร์ชุด B สำหรับการทำงานในโหมดอินเวอร์ติง (ควอดแรนต์ที่ 2) กระแส
 อเมเจอร์มีค่าเป็นลบ (-Ia) ซึ่งเกิดจากความต่างศักย์แรงดันที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์ ภาพที่ 9 น้อย
 กว่า แรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงคอนเวอร์เตอร์ชุด B ทำหน้าที่รับกำลังไฟฟ้า
 แบบกระแสอเมเจอร์ไหลกลับทิศด้วยการทำงานเหมือนกับการขับเคลื่อนความเร็วรอบในทิศทาง
 ทวนเข็มนาฬิกาต่างกันแต่เครื่องหมายของ แรงบิด ความเร็วรอบ แรงดันย้อนกลับ ของมอเตอร์
 และขั้วแรงดันเฉลี่ยไฟตรงคอนเวอร์เตอร์เท่านั้น



บทที่ 3

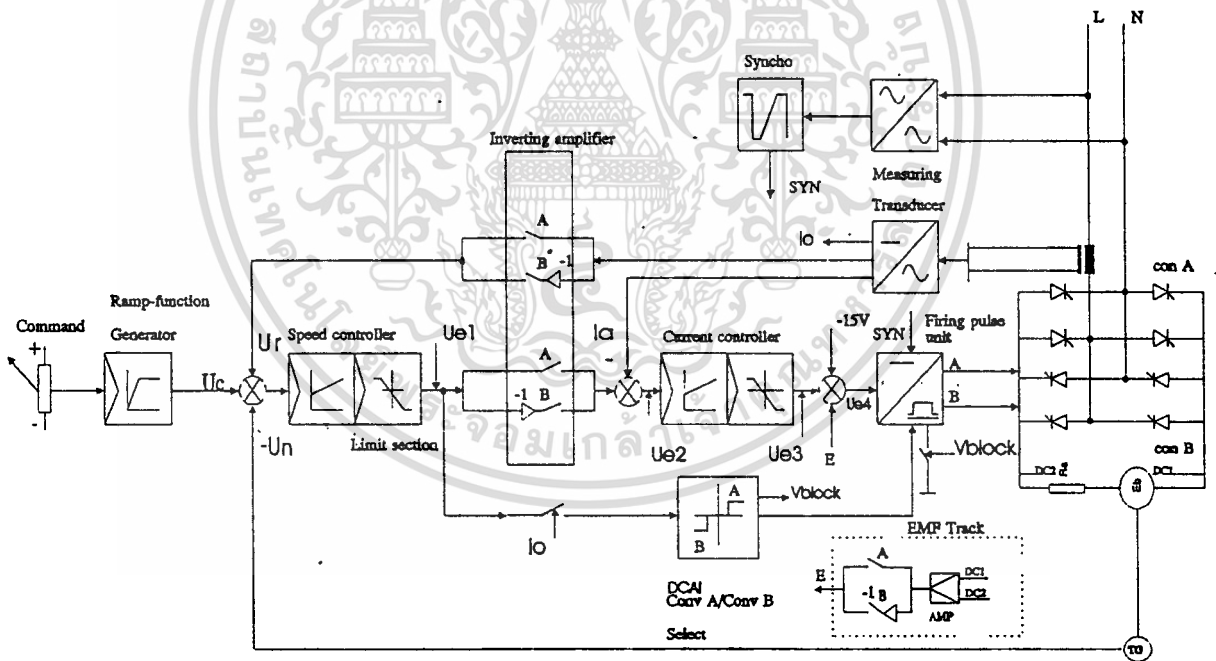
ลักษณะโครงสร้างระบบควบคุมและระบบกำลังของดวลคอนเวอร์เตอร์

วงจรกำลังและวงจรควบคุม

การควบคุมแรงบิดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สามารถที่จะทำงานในทิศทางบวกและลบจะต้องออกแบบวงจรควบคุมแบบรูปปิดดูภาพที่ 10 มีการป้อนกลับสัญญาณกระแสเมเจอร์และสัญญาณความเร็วจากแทคโคเจนเนอร์เรเตอร์มาทำ การเปรียบเทียบกับสัญญาณความเร็วที่ต้องการเพื่อให้รู้ถึงสถานะของระบบว่าต้องการให้คอนเวอร์เตอร์ชุด A หรือ ชุด B นำกระแสในโหมดมอเตอร์หรือโหมดอินเวอร์ตติง ระบบควบคุมประกอบไปด้วยรูปควบคุมความเร็วซึ่งเป็นรูปควบคุมภายนอกและรูปควบคุมกระแสเมเจอร์เป็นรูปควบคุมภายใน การออกแบบรูปควบคุมด้วยหลักการซิมเมตริกคอลลอปติ่มมี ดูรายละเอียดได้ในภาคผนวก ก การทำงานในรูปควบคุมจะกล่าวถึง รูปควบคุมความเร็วที่เป็นรูปควบคุมภายนอกที่ประกอบด้วย ตัวควบคุมแบบอนาล็อก PI และได้รับสัญญาณป้อนกลับจากแทคโคเจนเนอร์เรเตอร์ (U_n) และสัญญาณกระแสเมเจอร์ (U_r) เพื่อเป็นสัญญาณเปรียบเทียบของตัวควบคุมความเร็ว รูปความเร็วสามารถกลับขั้วเป็นบวกหรือเป็นลบได้เพื่อให้แรงบิดเป็นบวกหรือลบสัญญาณป้อนกลับที่ได้กล่าวมาแล้ว ข้างต้นจะรวมกับสัญญาณ U_c ทำให้ได้รับ สัญญาณผิดพลาดมีค่าเป็นบวกหรือลบป้อนให้แก่อินพุท ตัวควบคุมความเร็วและที่เอาท์พุท U_{e1} จะมีขั้วต่างกับอินพุทโดยป้อนให้แก่วงจร DCAI(Digital Control Analog Inverter) โดยผ่านสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ แบบอนาล็อกเพื่อทำการเลือกคอนเวอร์เตอร์ชุด A หรือ ชุด B ส่วนรูปควบคุมกระแสซึ่งใช้ตัวควบคุมแบบ PI เหมือนกับตัวควบคุมความเร็วและอินพุทตัวควบคุมได้รับสัญญาณจากเอาท์พุทของรูปควบคุมความเร็วและสัญญาณกระแสที่ตรวจ

จับโดย หม้อแปลงกระแส ที่มีอัตราส่วน 1:1000 รอบทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับ เพื่อทำหน้าที่ ป้อนสัญญาณกระแสและตรวจจับกระแสเป็นศูนย์กลางในแต่ละ ควอเตอร์และทำให้ผลตอบสนอง ต่อสภาวะทรานเซียนต์ดีขึ้นและมี รูปสัญญาณกระแสเหมือนกับ กระแสไหลจากคอนเวอร์เตอร์ไปสู่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง รูปคลื่นจะประกอบไปด้วยซีกบวกและซีกลบที่สมมาตรกันและป้อนเข้าสู่ วงจรเรียงกระแสและต่อความต้านทานขนาด 1K ที่เอาท์พุทวงจรเรียงกระแส เพื่อให้ได้ค่าแรงดัน 1V ต่อกระแสที่ไหลในแหล่งจ่ายไฟหลัก 1A เพื่อให้ขั้วสัญญาณคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับทิศทางกรไหลกระแสเอมเมอร์ที่ เอาท์พุทวงจรเรียงกระแสมี สัญญาณแรงดัน I_{zero} และ I_a เพื่อป้อนให้ สวิตซ์ อิเล็กทรอนิกส์แบบอนาล็อกและอุปกรณ์รวมทั้งใช้เป็นกระแสอ้างอิงของลูบควบคุมควบคุม-ความเร็ว

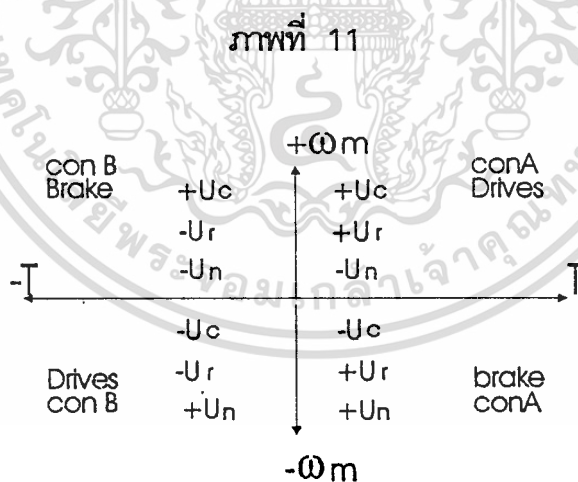
ภาพที่ 10



วงจรควบคุมแบบลูบปิดและวงจรกำลังแบบดวลคอนเวอร์เตอร์ไม่มีวงจรกระแส

สัญญาณควบคุมขณะเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในทิศทาง ทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกา

การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงใน ทิศทางทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกา มีขั้นตอนการทำงานที่เหมือนกันแต่ต่างกันว่า เครื่องหมายควบคุมในแต่ละควอดแรนต์ ดังในภาพที่ 11 การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะกล่าวถึงเพียงความเร็วรอบใน ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ความเร็วรอบมอเตอร์หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาใหม่ดมอเตอร์ริง (ควอดแรนต์ที่ 1) มุมนำกระแส α อยู่ในช่วง $0 < \alpha < \pi/2$ สัญญาณความเร็วที่ต้องการมีค่า เป็นบวก (+Uc) เพื่อสร้างแรงบิด (+Md) และความเร็วรอบในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (n) และจ่าย กระแสอเมเจอร์(IA) โดยคอนเวอร์เตอร์ชุด A แรงดันเฉลี่ยที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์เป็นบวกเพราะเป็น ฟังก์ชันของโคไซน์กระแสจะไหลจากแหล่งจ่ายไฟหลักไปสู่ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อมอเตอร์ เริ่มหมุนขดลวดอเมเจอร์จะสร้างแรงดันย้อนกลับ $U_q(n)$ ที่เป็นสัดส่วนกับความเร็วรอบ ความแตก



เครื่องหมายสัญญาณควบคุมในแต่ละควอดแรนต์

ต่างระหว่าง แรงดันที่ขั้วมอเตอร์เป็นบวกเพราะ แรงดันย้อนกลับมีค่าน้อยกว่าแรงดันที่ขั้วมอเตอร์ ดังสมการที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นของ... $U_A > U_q(n) \therefore U_A - (+U_q(n)) = +\Delta U_A$... ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำหรือใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ที่สภาวะคงตัว เมื่อต้องการเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ด้วยหลักการเบรกทางไฟฟ้าแบบรีเจนเนอเรทีฟ สัญญาณความเร็วที่ต้องการ U_c ถูกทำให้น้อยกว่าความเร็วจริง ดังนั้นสัญญาณที่ป้อนกลับจาก แทคโคเจนเนอเรเตอร์มีค่าเป็นลบ $-(n)$ มีค่ามากกว่าสัญญาณ U_c และ U_r ทำให้ได้รับสัญญาณเอาต์พุตที่ ตัวควบคุมความเร็วเป็นบวกในช่วงทรานเซียนลและป้อนให้แก่วงจร DCAI(Digital Control Analog-Inverter) เพื่อเลือกคอนเวอร์เตอร์ชุด B โดยผ่านอนาล็อกสวิตช์ที่ควบคุมโดย วงจรตรวจจับกระแสเป็นศูนย์ ซึ่งมีการกำหนดค่าแรงดันอ้างอิงไว้ที่ 1A เมื่อกระแสเมเจอร์ไหลไม่เกิน 1A อนาล็อกสวิตช์ถูกทำให้ ปิดและกระแสเมเจอร์ไหลในวงจรเมเจอร์เกิน 1A อนาล็อกสวิตช์ยังคงเปิดอยู่ในขณะเดียวกันก็จะป้อนให้แก่ อินพุทของตัวควบคุมกระแสโดยผ่านสภาวะคอมมานด์ที่ประกอบไปด้วย วงจรอินเวอร์ตติ้งและนอนอินเวอร์ตติ้งแอมพลิไฟเออร์ เพื่อทำหน้าที่กลับขั้วแรงดัน เครื่องหมายสัญญาณควบคุม เมื่อต้องการกลับทิศทางแรงบิดมอเตอร์ วงจรที่ทำหน้าที่ในครั้งนี้เป็นชุด (A) และที่แรงดันเอาต์พุตควบคุมกระแสมีค่าเป็นบวกเพื่อเลือกมุนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ชุด A จากเดิมทำงานในโหมดมอเตอร์วิ่งในควอดแรนต์ที่ 1 ให้ทำงานในโหมดอินเวอร์ตติ้งควอดแรนต์ที่ 1 ที่มุนำกระแส $5\pi/6$ เพื่อให้กระแสที่ไหลผ่านอเมเจอร์มีค่าต่ำกว่า 1A ตัวตรวจจับกระแสเป็นศูนย์ก็จะส่งสัญญาณโลจิกแอกทีฟไลให้ อนาล็อกสวิตช์ (Izero) ปิดวงจรและสัญญาณ U_{e1} จ่ายไปให้วงจร DCAI ในขณะเดียวกันวงจร DCAI ก็ส่งสัญญาณบล็อก (Io) คอนเวอร์เตอร์ชุด A ให้หยุดนำกระแสโดย การปลดพลัสทริกไทรสเตอร์ออกจากคอนเวอร์เตอร์และหน่วงเวลาประมาณครึ่งไซเคิลของความถี่ 50 Hz เพื่อให้โวลต์เอซีไลน์รีเวอร์ส ทำให้ไทรสเตอร์หยุดนำกระแสโดย เอซีไลน์คอมมิวเตทหลังจากคอนเวอร์เตอร์หยุดนำกระแสวงจร DCAI ก็จะส่งพลัสทริกไทรสเตอร์ คอนเวอร์เตอร์ชุด B นำกระแสที่มุนสูงสุด $\alpha = 5\pi/6$ โหมดอินเวอร์ตติ้งและลดมุนนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ชุด B ลงอย่างต่อเนื่องจนแรงดันคอนเวอร์เตอร์เท่ากับแรงดันมอเตอร์และน้อยกว่า เพื่อให้มีการไหลของกระแสเมเจอร์ในช่วงเริ่มแรกต่ำสุดและมากขึ้นเป็นลำดับจนถึงค่าสูงสุด แรงดันเฉลี่ยที่ขั้ว คอนเวอร์เตอร์ชุด B มีค่าเป็นลบทำให้ ขั้วแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีขั้วคงเดิม ความแตกต่างของแรงดันระหว่าง มอเตอร์กับคอนเวอร์เตอร์มีค่าเป็นลบเพราะว่า แรงดันย้อนกลับของมอเตอร์มี ค่ามากกว่าแรงดันที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์ ในสมการที่ 3.2

$$U_A < U_q(n) \therefore U_A - (+U_q(n)) = -\Delta U_A \dots\dots\dots(3.2)$$

ทำให้กระแสเมเจอร์ไหลกลับแหล่งจ่ายไฟสลับมีทิศทางสวนกับทางเดิมโดยผ่าน คอนเวอเตอร์ชุด B ทำหน้าที่รับพลังงานรีเจนเนอเรทีฟหลังจากคอนเวอเตอร์ชุด B นำกระแส สภาวะคอมมานด์ก็จะเปลี่ยนการทำงานให้ชุด B ทำหน้าที่เป็นอินเวอร์ตดิ้งแอมพลิไฟเออร์ เพื่อกลับขั้วสัญญาณควบคุมและหักล้างกับส่วนที่ป้อนกลับจนกว่าค่าผิดพลาดจะเป็นศูนย์ แรงบิดมอเตอร์ในช่วงที่เกิดการรีเจนเนอเรทีฟมี ค่าสวนกับทิศทางเดิมทำให้แรงบิดเป็นลบ เนื่องจากแรงบิดของไหลดมีค่ามากกว่าแรงบิดมอเตอร์และหมุนขับเฟลาอเมเจอร์ให้เป็น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำให้เกิดพลังงานที่มอเตอร์ การที่ทำให้ความเร็วรอบมอเตอร์ลดลงจะต้องนำพลังงานนี้ออกจากตัวมอเตอร์ โดยการส่งพลังงานกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับด้วย วิธีการรีเจนเนอเรทีฟ เมื่อความเร็วที่ลดลงถึงค่าความเร็วใหม่ที่กำหนดไว้ซึ่งมีค่าต่ำกว่าความเร็วเดิม สัญญาณความเร็วที่ป้อนกลับจากแทคโคเจนเนอเรเตอร์ U_n มีค่าน้อยกว่าสัญญาณความเร็วที่ต้องการ (U_c) และสัญญาณกระแสอ้างอิง U_r ที่เอาต์พุตตัวควบคุมความเร็วรอบ U_{e1} มีค่าเป็นลบและถูกป้อนผ่านอินเวอร์ตดิ้งแอมพลิไฟเออร์ (B) ให้อินพุตตัวควบคุมกระแส เพื่อให้ได้เอาต์พุตตัวควบคุมกระแสมีค่าเป็นบวก โดยรวมกับสัญญาณอ้างอิง -15 V และสัญญาณแรงดันที่ขั้วมอเตอร์ เพื่อเลื่อนมุมนำกระแสเข้าสู่โหมดอินเวอร์ตดิ้ง (ควอดแรนต์ที่ 2) ทำให้กระแสเมเจอร์มีค่าน้อยกว่า 1A ตัวตรวจจับกระแสเป็นศูนย์ (I_{zero}) ก็ส่งสัญญาณ U_{e1} ให้วงจร DCAI เพื่อเลือกคอนเวอเตอร์ชุด A ก่อน การโอนย้ายการทำงานคอนเวอเตอร์ชุด B ไปสู่คอนเวอเตอร์ชุด A วงจร DCAI ก็ส่งสัญญาณบล็อกคอนเวอเตอร์ชุด B ให้หยุดนำกระแสโดย โวลต์เอซีไลนรีเวอร์ส ใช้เวลาในช่วงครึ่งไซเคิลของความถี่ 50Hz หลังจากนั้นคอนเวอเตอร์ชุด A ได้รับสัญญาณทริกไทรสเตอร์ให้นำกระแสในโหมดอินเวอร์ตดิ้ง ควอดแรนต์ที่ 1 ที่มุม $\alpha = 5\pi/6$ เพื่อไม่ให้กระแสไหลเข้าอเมเจอร์มากเกินไป และมุมนำกระแสลดลงตาม สัญญาณควบคุมเข้าสู่โหมดมอเตอร์จริงในควอดแรนต์ที่ 1 ที่ความเร็วใหม่และมอเตอร์จะทำงานที่สภาวะคงตัวและมีขั้นตอนการทำงานตามชบวนการดังใน ภาพที่

12

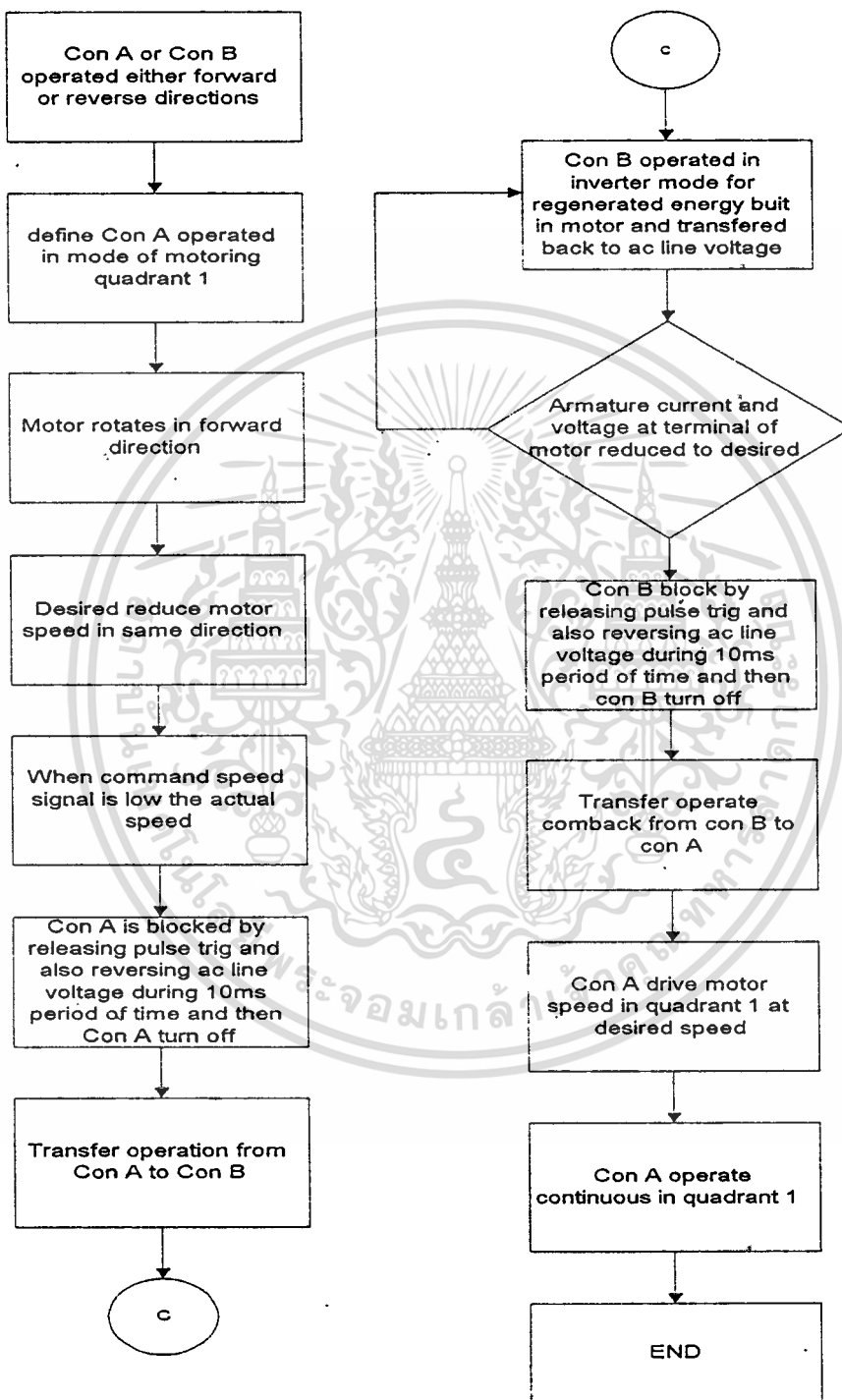
สัญญาณควบคุมขณะกลับ ทิศทางความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงใน ทิศทางทวนเข็มนาฬิกาไปสู่ทิศทางความเร็วรอบตามเข็มนาฬิกา

การกลับทิศทางความเร็วรอบ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจากความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกา ไปสู่ความเร็วรอบในทิศทางตามเข็มนาฬิกาหรือความเร็วรอบในทิศทางตามเข็มนาฬิกาไปสู่ความเร็วรอบในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาสามารถกระทำได้อย่างต่อเนื่องและมีตัวตรวจจับกระแสเป็นศูนย์ในแต่ละควอดแดรนต์ เพื่อกำหนดการทำงานที่แน่นอนในแต่ละควอดแดรนต์ได้อย่างถูกต้อง การทำงานจะต้องผ่านขั้นตอนคล้ายกับการเบรกความเร็วรอบในทิศทางเดิมสัญญาณ U_c ได้ถูกทำให้ กลับขั้วจากบวกเป็นลบหรือจากลบเป็นบวก สัญญาณควบคุมในแต่ละควอดแดรนต์ ดูได้ จากภาพที่ 11 เมื่อมอเตอร์หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาโหมดมอเตอร์วิ่ง (ควอดแดรนต์ที่ 1) สัญญาณความเร็วที่ต้องการมีค่าเป็นบวก ($+U_c$) เพื่อสร้างแรงบิดที่เป็นบวก ($+M_d$) และความเร็วรอบมอเตอร์ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา เมื่อต้องการกลับทิศทางความเร็วรอบมอเตอร์ ต้องเบรกความเร็วรอบมอเตอร์จากความเร็วรอบในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาก่อนไปสู่ ความเร็วรอบในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ($-n$) สัญญาณความเร็วที่ต้องการ (U_c) ถูกทำให้กลับขั้วเป็นลบทันที ($-U_c$) ที่อินพุตตัวควบคุมความเร็วสัญญาณ ($-U_c$) จะถูกรวมกับสัญญาณ $+U_n$ และ U_r ได้สัญญาณมิตพลาดเป็นลบและที่เอาต์พุต ตัวควบคุมความเร็วเป็นบวกป้อนให้แก่วงจร DCAI โดยผ่านอนาล็อกสวิตช์ I_{zero} ในขณะนี้สวิตช์ยังคงเปิด อยู่เพราะกระแสเอมเจอร์ไหลในวงจรเกิน 1A ขณะเดียวกันก็ป้อนให้แก่ อินพุตควบคุมกระแสโดยผ่านอินเวอร์ตติ้งแอมพลิไฟเออร์ ($-A$) สัญญาณนี้จะรวมกับสัญญาณกระแสเอมเจอร์ที่มีการป้อนกลับให้แก่คู่ควบคุมกระแส ดังนั้น เอาต์พุต ตัวควบคุมกระแสจะมีค่าเป็นบวกและรวมกับแรงดันอ้างอิง $-15V$ ป้อนให้แก่ชุดทริกไทรสเตอร์ ทำการเลื่อนมุมนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ชุด A ให้ทำงานในโหมดอินเวอร์ตติ้ง (ควอดแดรนต์ที่ 1) ทำให้กระแสมีค่าต่ำกว่า 1A อนาล็อกสวิตช์ก็จะปิดวงจรให้สัญญาณ U_{e1} ผ่านไปสู่วงจร DCAI เลื่อนคอนเวอร์เตอร์ชุด B ก่อนที่จะมีการโอนย้ายการทำงานจากคอนเวอร์เตอร์ชุด A ไปสู่คอนเวอร์เตอร์ชุด B วงจร DCAI จะส่งสัญญาณบล็อกคอนเวอร์เตอร์ชุด A ให้หยุดนำกระแส โดยแรงดันเอซีไลน์รีเวอร์ส หลังจากนั้นไปแล้วคอนเวอร์เตอร์ชุด B นำกระแสใน โหมดอินเวอร์ตติ้ง (ควอดแดรนต์ที่ 2) มุมนำกระแสอยู่ในช่วง $\pi/2 < \alpha < \pi$ ทำให้แรงดันเฉลี่ยไฟตรงที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์ชุด B มีค่าเป็นลบสูงสุดที่มุมนำกระแส $\alpha = 5\pi/6$ และสร้างแรงบิดในทิศทางลบ ดังนั้นขั้วแรงดันย้อนกลับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ยังมีขั้วคงเดิมและมีแรงดันมากกว่าแรงดันที่ขั้วมอเตอร์ ทำให้ พลังงานที่เกิดบนมอเตอร์สามารถไหลกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟสลับได้กระแสเอมเจอร์จะไหลสวนทางกับทิศทางเดิมหมายถึงเป็น การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในควอดแดรนต์ที่ 2 เพื่อสร้างแรงบิดที่เป็นลบ ($-M_d$) ทำให้ความเร็วรอบมอเตอร์ลดลง มุมนำกระแสคอนเวอร์เตอร์จะลดลงตาม แรงดันที่ขั้วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ลดลง เมื่อมีการส่งพลังกลับคืน

แหล่งจ่ายไฟสลับเมื่อความเร็วรอบเป็นศูนย์มุมนำกระแสอยู่ที่ $\alpha = \pi/2$ เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาสัญญาณความเร็วที่ ป้อนกลับจากทาโคเจนเนอเรเตอร์มีค่าเป็นบวกแต่ยังมีค่าน้อยกว่า U_c และตัวควบคุมก็จะบังคับให้มอเตอร์ เร่งความเร็วไปสู่ค่าความเร็วใหม่ใน ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (ควอดแรนต์ที่ 3) ซึ่งมีความเร็วรอบเท่ากับ ทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจนกระทั่งสัญญาณ $-U_c$ บวก U_r และเปรียบกับสัญญาณ $+U_n$ มีค่าเป็นศูนย์ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงก็จะทำงาน ที่สภาวะคงตัวและมีขั้นตอนการทำงาน ดังในภาพที่ 13



ภาพที่ 12

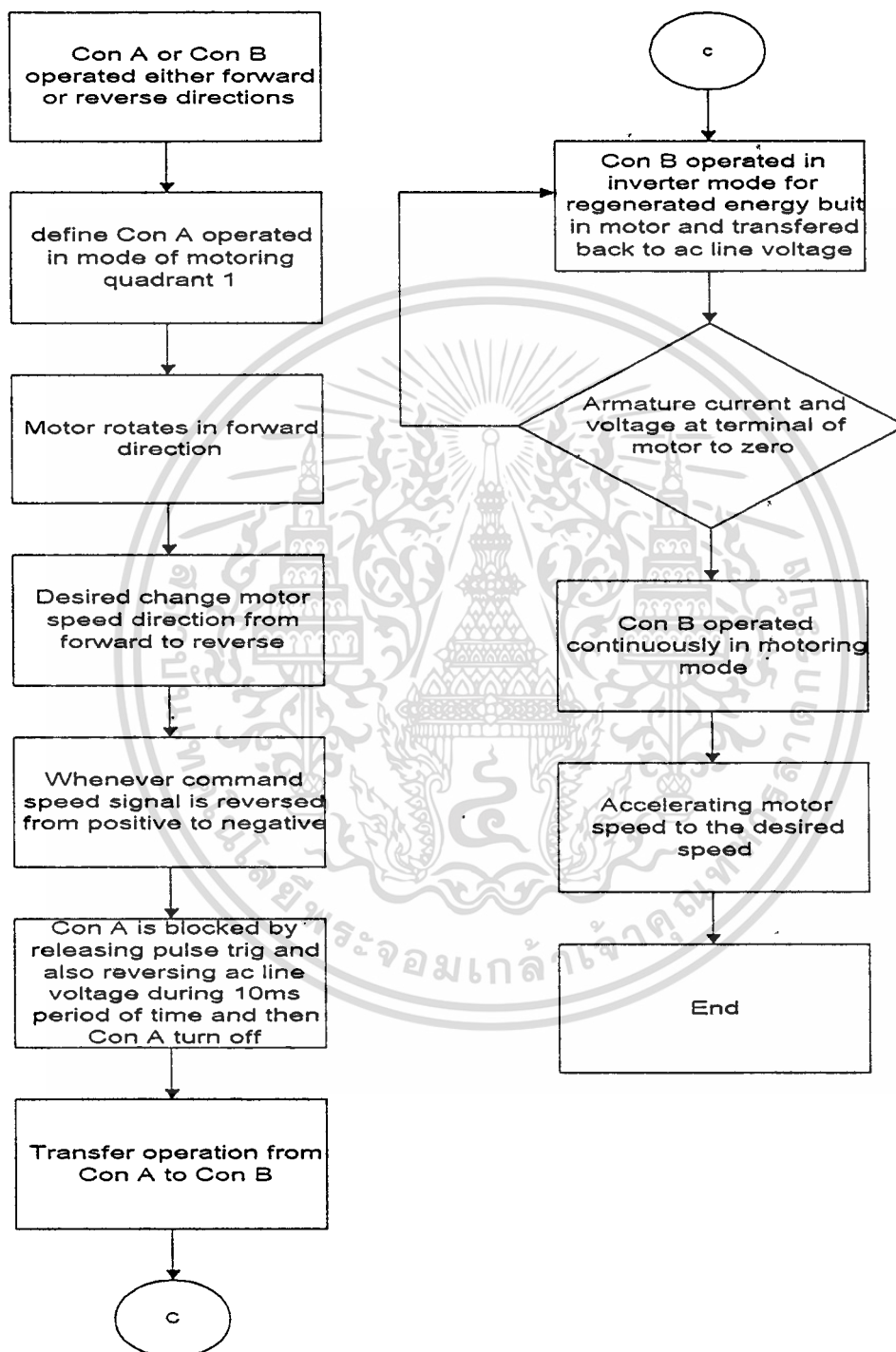


ขั้นตอนการเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในทิศทางความเร็วรอบทวนเข็ม

นาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 13



ขั้นตอนการกลับทิศทางความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจากทิศทางความเร็วรอบ

ทวนเข็มนาฬิกาไปสู่ทิศทางความเร็วรอบตามเข็มนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การสับเปลี่ยนการทำงานระหว่างคอนเวอร์เตอร์ชุด A กับคอนเวอร์เตอร์ชุด B (change-over logic) ทำงานได้ในสภาวะ 4 ควอดแรนต์-ของระนาบกระแส-แรงดัน

การขับเคลื่อนมอเตอร์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีระบบไดนามิกสูง เมื่อต้องการกลับทิศทางความเร็วรอบมอเตอร์จากทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกาไปสู่ทิศทางความเร็วรอบตามเข็มนาฬิกาหรือจากทิศทางความเร็วรอบตามเข็มนาฬิกาไปสู่ทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกาและเบรกความเร็วรอบในทิศทางเดิมเช่น ทวนเข็มนาฬิกาเบรกหรือตามเข็มนาฬิกาเบรก ระบบขับเคลื่อนจะต้องลดเวลาหน่วง การโอนย้ายการทำงานจากคอนเวอร์เตอร์ชุดหนึ่ง ทำงานในโหมดมอเตอร์วิ่งไปสู่คอนเวอร์เตอร์อีกชุดหนึ่ง ทำงานในโหมดอินเวอร์ติง พลังงานรีเจนเนอเรทีฟที่เกิดขึ้นที่ ตัวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งถูกเปลี่ยนโหมดการทำงานให้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงถูกป้อนกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟสลับและใช้เวลาให้น้อยที่สุด การทำงานของระบบควบคุมให้มีเงื่อนไขตามที่ได้กล่าวมาแล้ว วงจรควบคุมจะมีความซับซ้อนมากขึ้นเพื่อให้มีการทำงานที่แน่นอนในสภาวะชั่วขณะของไทรสเตอร์ที่ได้รับ สัญญาณเกตที่มูนนำกระแสเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์และกระแสเอมเจอร์ในระนาบ ความเร็ว-แรงบิด การป้อนกลับสัญญาณ กระแสเอมเจอร์ให้วงจรตรวจจับกระแสเป็นศูนย์และแรงดันที่ตัวมอเตอร์ให้แก่ วงจรควบคุมซึ่งเป็นตัวกำหนด การสับเปลี่ยนหน้าที่ระหว่างคอนเวอร์เตอร์ชุดหนึ่งไปสู่คอนเวอร์เตอร์อีกชุดหนึ่งได้โดยทำการ บล็อกคอนเวอร์เตอร์ให้หยุดนำกระแสโดย แรงดันเอซีไลเนอร์เวอร์ส ในช่วงเวลาที่แน่นอน เพื่อให้คอนเวอร์เตอร์หยุดนำกระแสสนิทก่อนที่ คอนเวอร์เตอร์อีกชุดนำกระแสเพื่อป้องกัน การลัดวงจรระหว่างไลน์กับนิวทรัล กระแสลัดวงจรจะไหลผ่านชุดคอนเวอร์เตอร์ทำให้เกิดความเสียหาย

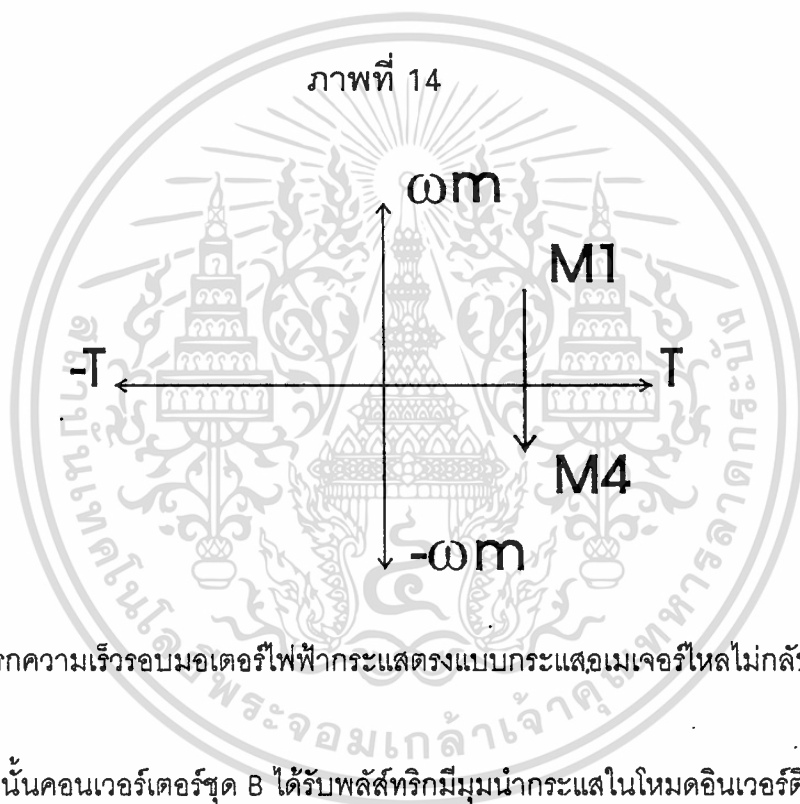
การกลับทิศทางความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยการเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ทางไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ

1. การรีเจนเนอเรทีฟพลังงานแบบกระแสเมเจอร์ไม่ไหลกลับทิศ

กระแสเมเจอร์ที่จ่ายจากคอนเวอร์เตอร์ชุด A ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทิศทางกระแสเมเจอร์ไหลเข้า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นบวก (+Ia) และสร้างแรงบิดที่เพลา (+Md) และความเร็วรอบ (+n) มีค่าเป็นบวกในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา การทำงานของตัวขับเคลื่อนอยู่ในสภาวะคงตัวที่จุด M1 ในควอดแดรนต์ที่ 1 ซึ่งมีมุมนำกระแสในโหมดมอเตอร์ริง $0 < \alpha < \pi/2$ เมื่อต้องการเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มุมนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ถูกทำให้เพิ่มขึ้นเพื่อเลื่อนโหมดการทำงาน จากโหมดมอเตอร์ริงไปสู่โหมดอินเวอร์ติงทำให้แรงดันไฟฟ้าตรงเฉลี่ยที่ขั้วมอเตอร์ซึ่งเท่ากับแรงดันที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์ เมื่อมีการเปลี่ยนจากขั้วบวกเป็นขั้วลบ เมื่อเป็นเช่นนี้แล้วตามคุณสมบัติมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขั้วแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ $U_q(n)$ ไม่เปลี่ยนขั้วตามแรงดันไฟตรงเฉลี่ยที่ขั้วมอเตอร์ แรงดันย้อนกลับจะต้องทำให้มี ขั้วกลับจากทิศทางเดิมโดยการกลับทิศทางการไหลของกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (if) ของขดลวดกระตุ้นแยก $U_q(n) = -K_n \phi$ เพื่อให้มีขั้วเหมือนกับแรงดันที่ขั้วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและมีค่ามากกว่า โหมดการทำงานเคลื่อนที่จากจุด M1 (ควอดแดรนต์ที่ 1) ไปสู่ M4 (ควอดแดรนต์ที่ 4) มอเตอร์จะเปลี่ยนสภาวะ การทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสเมเจอร์ไหลออกจาก เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงผ่าน คอนเวอร์เตอร์ชุด A กลับไปยังแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสลับ เพื่อเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงใน ควอดแดรนต์ที่ 4 กระแสเมเจอร์ยังคงไหลในทิศทางเดิมเป็นบวก(+Ia) เมื่อถึงค่าความเร็วที่ต้องการซึ่งเป็นค่าความเร็วใหม่ มุมนำกระแสคงไว้ที่ตำแหน่งใหม่ การเบรกในลักษณะนี้เรียกว่า รีเจนเนอเรทีฟเบรกแบบกระแสเมเจอร์ไม่กลับทิศ ดังในภาพที่ 14 และใช้คอนเวอร์เตอร์แบบพูลคอนโทรลเพียงชุดเดียว

2. การรีเจนเนอเรทีฟพลังงานแบบกระแสเมเจอร์ไหลกลับทิศ

กระแสเมเจอร์ที่ถูกจ่ายจากคอนเวอร์เตอร์ชุด A ให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ทิศทางกระแสเมเจอร์ไหลเข้ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นบวก (+Ia) และสร้างแรงบิดที่เพลา (+Md) และความเร็วย้อน (+n) มีค่าเป็นบวกในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา การทำงานของตัวขับเคลื่อนอยู่ในสภาวะคงตัวที่จุด M1 ในควอดแรนต์ที่ 1 ซึ่งมีมุมนำกระแสในโหมดมอเตอร์จริงอยู่ในช่วง $0 < \alpha < \pi/2$ เมื่อต้องการเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ขาเกตคอนเวอร์เตอร์ชุด A พัลส์ทริกถูกปลดออกและหยุดนำกระแสเองโดยแรงดันเอซีไลน์ตามเข็มนาฬิกาในช่วงเวลา 1/2



การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระแสเมเจอร์ไหลไม่กลับทิศ

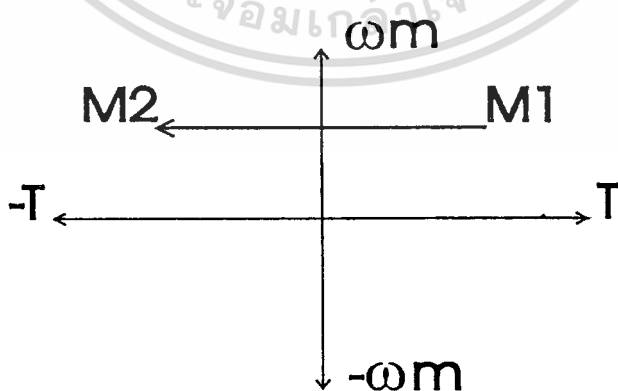
ไซเคิลหลังจากนั้นคอนเวอร์เตอร์ชุด B ได้รับพัลส์ทริกมีมุมนำกระแสในโหมดอินเวอร์ตถึง $\pi/2 < \alpha < \pi$ และมุมนำกระแสเริ่มต้นในโหมดอินเวอร์ตอยู่ที่ $5\pi/6$ แรงดันเฉลี่ยไฟตรงที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์ชุด B ถูกทำให้กลับขั้วแรงดันเพื่อให้มีขั้วแรงดันเหมือนกับแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ $U_q(n)$ เพราะแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ไม่สามารถ เปลี่ยนขั้วได้เนื่องจากความเร็วรอบมอเตอร์หมุนในทิศทางเดิมและทำหน้าที่ รับพลังงานรีเจนเนอเรทีฟที่เกิดจากมอเตอร์ สภาวะนี้มอเตอร์ได้เปลี่ยนการทำงานเป็น เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงดังนั้น แรงดันย้อนกลับมีค่ามากกว่าแรงดันที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์ กระแสเมเจอร์ไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงเป็นลบ (-Ia) แรงบิดมีค่าเป็นลบ (-Md) ผ่านคอนเวอร์เตอร์ชุด B กลับไปยังแหล่งจ่ายไฟสลับ ทิศทางกระแสเมเจอร์สวนทางกับทิศทางเดิมแต่ ขั้วแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ยังคงๆ เดิม การโอนย้ายการทำงานคอนเวอร์เตอร์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับการเคลื่อนจากจุด M1 ควอดแรนต์ที่ 1 ไปสู่ M2 ควอดแรนต์ที่ 2 โหมดอินเวอร์ตจึงและทำการเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ในควอดแรนต์ที่ 2 ทำให้ความเร็วรอบ

มอเตอร์ลดลงไปสู่ค่าความเร็วใหม่และคงไว้ที่ค่าความเร็วนี้ การเบรกแบบนี้เรียกว่า รีเจนเนอเรทีฟเบรกกระแสเมเจอร์ไหลกลับทิศ จากทิศทางเดิมดังใน ภาพที่ 15 การรีเจนเนอเรทีฟพลังงานเกิดขึ้นที่มอเตอร์แบบ กระแสเมเจอร์ไหลกลับทิศจะต้องใช้ คอนเวอร์เตอร์แบบฟูลคอนโทรลสองชุดต่อ ขนานแบบกลับทิศ (Anti-parallel) เพื่อทำหน้าที่รับพลังงานรีเจนเนอเรทีฟที่โรเตอร์ขณะหมุน

เงื่อนไขการโอนย้าย การทำงานจากคอนเวอร์เตอร์ชุด A ไปสู่คอนเวอร์เตอร์ชุด B ที่จ่ายกระแสเมเจอร์ให้มอเตอร์ แบบไม่กลับทิศทางการไหล (+la) จะปรากฏการทำงานในสภาวะ ดังต่อไปนี้

1. กระแสลดลงเป็นศูนย์ กำหนดให้คอนเวอร์เตอร์ชุด A จ่ายกระแสเมเจอร์ไหลเข้ามอเตอร์มีทิศทางเป็นบวก (+la) ให้ความเร็วรอบมอเตอร์เป็นบวก (+n) หมุนในทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกาซึ่งจะทำงานในโหมดมอเตอร์ริง (ควอดแรนต์ที่ 1) มุมนำกระแสอยู่ในช่วง $0 < \alpha < \pi/2$ ในสภาวะคงตัวใน

ภาพที่ 15



การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระแสเมเจอร์ไหลกลับทิศ

โหมด A ภาพที่ 17 เมื่อมอเตอร์ได้รับคำสั่งให้หมุนในทิศทางความเร็วรอบตามเข็มนาฬิกา มุมการนำกระแสของ α เพิ่มขึ้นจากค่ามุม α ที่สภาวะเริ่มต้นไปยังมุม α สูงสุดที่มุม $\alpha_1 = 5\pi/6$ เพื่อ

เข้าสู่โหมดพูลอินเวอร์เตอร์และแรงดันที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์ถูกทำให้กลับขั้วแรงดันจากบวกเป็นลบ และมีค่าน้อยกว่าแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ $U_q(n)$ การเพิ่มขึ้นของมุม α เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามคำสั่งของตัวควบคุมเพื่อรีเจนเนอเรทีฟพลังงานที่เกิดขึ้นที่ มอเตอร์กลับไปยังแหล่งจ่ายไฟ สลับทำให้กระแสเมเจอร์ของมอเตอร์ยังคงไหลในทิศทางเดิมและจนกระทั่งลดลงเป็นศูนย์และความเร็วก็เป็นศูนย์ด้วย

2. การตรวจจับกระแสเป็นศูนย์ การรีเจนเนอเรทีฟพลังงานที่โรเตอร์ขณะหมุนออกจากมอเตอร์โดยการป้อนกลับพลังงานนี้สู่แหล่งจ่ายไฟสลับ การทำงานอยู่ในโหมด B ในภาพที่ 17 เมื่อสิ้นสุดการทำงานในโหมดนี้คอนเวอร์เตอร์ชุด A จะต้องถูกปลดออกจากระบบโดยการบล็อกคอนเวอร์เตอร์ชุด A ให้หยุดนำกระแสโดยการ ปลดพลัสทริกไทรสเตอร์เป็นไปไม่ได้ที่จะทำให้คอนเวอร์เตอร์ชุด A หยุดนำกระแสอย่างทันทีทันใดโดย เฉพาะอย่างยิ่งแล้วคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดอินเวอร์ตบางครั้งก็มี อุปสรรคในการตรวจจับกระแสเป็นศูนย์ เมื่อมีการนำกระแสในช่วงไม่ต่อเนื่อง พลัสทริกไทรสเตอร์อาจที่จะถูกปลดออกก่อนได้ใน สภาวะการทำงานที่ไม่ปกติของกระแสซึ่งทำให้เกิดอันตรายกับคอนเวอร์เตอร์โดยการลัดวงจร เมื่อกระแสตกลงสู่ศูนย์ประมาณ 1 ใน 100 ของกระแสปกติทำให้ การรีเจนเนอเรทีฟเบรก เป็นไปอย่างไม่สมบูรณ์ซึ่ง การตรวจจับกระแสเป็นศูนย์ เพื่อจะปลดพลัสทริกหลังจากผ่านช่วงรีเจนเนอเรทีฟออกจาก ขาเกตไทรสเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์ชุด A

3. การหน่วงการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ การปลดพลัสทริกออกจากขาเกตไทรสเตอร์ของชุดคอนเวอร์เตอร์จะต้องมีเวลาหน่วงจนกระทั่งไทรสเตอร์ชุด A ของคอนเวอร์เตอร์ชุด A ที่กำลังนำกระแสหยุดทำงานโดย แรงดันเอซีไลน์รีเวอร์ส ในโหมด C ในภาพที่ 17 ถ้าไทรสเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์ชุด A ไม่หยุดนำกระแสก่อนที่ไทรสเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์ชุด B ที่ได้รับสัญญาณพลัสทริกไทรสเตอร์ให้นำกระแส ถ้าไม่เกิดเหตุการณ์นี้ขึ้นเป็น การที่จะทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้นระหว่างเฟสและเวลาการหน่วงสามารถกำหนดให้อยู่ในช่วง 1/2 ไซเคิลดูในภาคผนวก ข

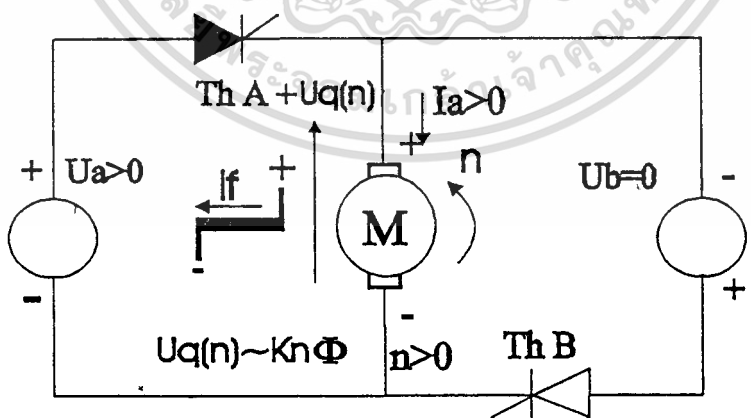
4. มุมนำกระแสไทรสเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์ชุด B พลัสทริกที่จ่ายให้ขาเกตไทรสเตอร์คอนเวอร์เตอร์ชุด B โหมด D ตามภาพที่ 17 วงจรควบคุมจะปรับให้มุมของ α_2 เปลี่ยนจากมุมเริ่มต้นซึ่ง α_1 ในช่วง $0 < \alpha_2 < \pi/2$ สู่โหมดมอเตอร์ซึ่งที่ $\alpha_2 = \cos(\pi + \alpha_1)$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำข้อมูลนี้ไปเผยแพร่ และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
อยู่ในช่วงมุมนำกระแสตามที่ต้องการซึ่งมีมุมเท่ากับ $-\alpha_1$ ทิศทางความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้า

กระแสตรง ในสภาวะคงตัวโหมด F ตามภาพที่ 17 มีขนาดเท่ากับ ความเร็วรอบในทิศทางทวน
เข็มนาฬิกาแต่หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (-n)

ลำดับการทำงานในแต่ละโหมด การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบบ
4 ควอดแรนต์ กระแสไม่กลับทิศ

1. โหมด A การทำงานที่สภาวะคงตัวและความเร็วรอบมอเตอร์หมุนในทิศทางทวนเข็
มนาฬิกาเป็นบวก (+n) และกระแสเมเจอร์ไหลเข้ามอเตอร์เป็นบวก (+Ia) และแรงบิดที่เพล
มอเตอร์ (+Md) มีทิศทางเดียวกับความเร็วรอบ ผลที่ได้นี้เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ชุด A นำกระแส
และมุมของ α อยู่ในช่วง $0 < \alpha_1 < \pi/2$ ซึ่งอยู่ในควอดแรนต์ที่ 1 โหมดมอเตอร์วิ่ง แรงดันไฟตรง
เฉลี่ยที่ขั้วเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ชุด A มีค่าเป็นบวกในสภาวะนี้เครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง
กระทำตัวเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงดังใน ภาพที่ 16

ภาพที่ 16



โหมด A คอนเวอร์เตอร์ชุด A นำกระแสโหมดมอเตอร์วิ่ง (ควอดแรนต์ที่ 1)

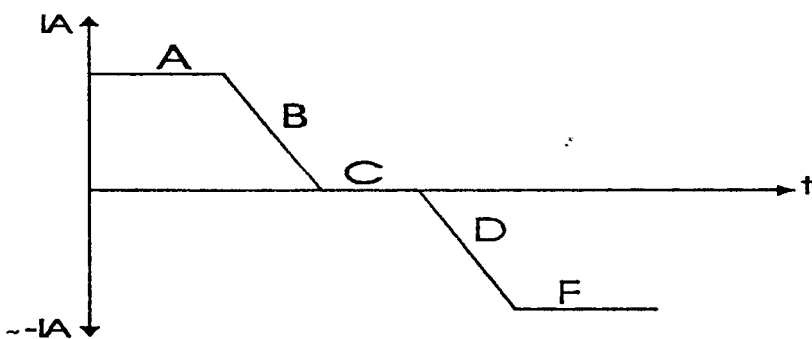
2. โหมด B เมื่อต้องการเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ รีเจนเนอเร-

ทีฟ กระแสเมเจอร์ไม่ไหลกลับทิศ คอนเวอร์เตอร์ชุด A นำกระแสโดยที่คอนเวอร์เตอร์ชุด B
ไม่นำกระแสและมุมของ α ถูกเลื่อนเข้าสู่ช่วง $\pi/2 < \alpha_1 < \pi$ เพื่อเข้าสู่โหมดอินเวอร์ตติงและแรง-
ดันไฟตรงเฉลี่ยที่ขั้วเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ชุด A มีค่าเท่ากับ $U_A = 2U_m \cos(\alpha)$ ส่วนกระแสโอม

ย้ายโหมดการทำงานจากโหมดมอเตอร์วิ่งไปสู่โหมดอินเวอร์ตดิ้งมีค่าเป็นบวกหลังจาก การย้าย โหมดการทำงาน แรงดันที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์มีค่าเป็นลบ เนื่องจากสมการแรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์เป็นฟังก์ชันของโคไซน์ซึ่งมี มุมนำกระแสอยู่ในช่วง $\pi/2 < \alpha < \pi$ แรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง $U_q(n)$ ไม่สามารถกลับขั้วได้ เมื่อมอเตอร์หมุนในทิศทางเดิมและทิศทางกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (if) ไหลในทิศทางเดิม ในหลักการนี้เลือกวิธี กลับทิศทางกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (if) ทำให้แรงดันย้อนกลับมีค่าเป็นลบ $U_q(n) = -Kn\Phi$ ดังในภาพที่ 18 และมีค่ามากกว่าแรงดันที่ ขั้วคอนเวอร์เตอร์ชุด A ที่แกนเพลลาของมอเตอร์ถูกต่ออยู่กับโหลด เมื่อมอเตอร์หมุน ขั้วโหลดก็จะมี พลังงานที่สะสมอยู่ที่โหลดในรูป พลังงานกลพลังงานนี้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับมวลของโหลดและความเร็วรอบในการหมุน ถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยการหมุนขั้วแกนเพลลา มอเตอร์เพราะว่า แรงบิดมอเตอร์มีค่าน้อยกว่าแรงบิดโหลด การทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรงกลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นกระแสเมเจอร์ไหลจากมอเตอร์กลับไปสู่แหล่งจ่ายไฟสลับและสร้างความเร็วรอบมอเตอร์เป็นลบ (-n) เพราะว่า พลังงานได้ถูกจ่ายออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทิศทางกระแสเมเจอร์ยังคงไหลในทิศทางเดิม การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์แบบรีเจนเนอเรทีฟ ทำให้ความเร็วรอบมอเตอร์ลดลงไปสู่ค่าความเร็วใหม่จนกระทั่งเป็นศูนย์ การทำงานในโหมดนี้มอเตอร์อยู่ในควอดแรนต์ที่ 4 โหมดอินเวอร์ตดิ้ง

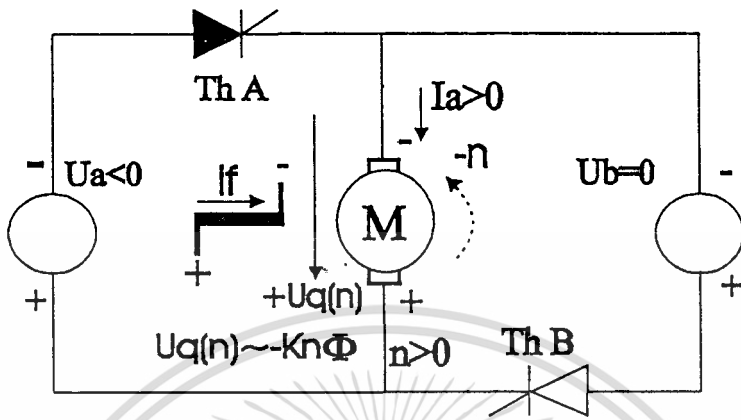
กราฟอธิบายการทำงานในแต่ละโหมดการเปลี่ยนทิศทางการทำงานความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระแสเมเจอร์ไม่ไหลกลับทิศ

ภาพที่ 17



เอกสารนี้เป็น การโอนย้ายโหมดการทำงานจากคอนเวอร์เตอร์ชุด A ไปสู่คอนเวอร์เตอร์ชุด B (Change-การค้ำไม่ Over logic) แบบกระแสเมเจอร์ไหลไม่กลับทิศ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

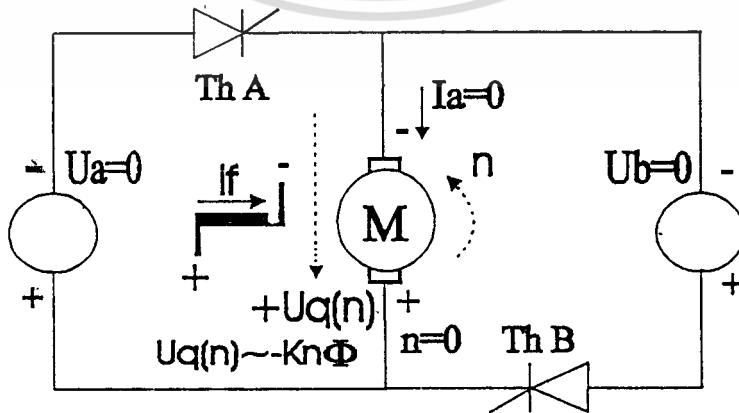
ภาพที่ 18



โหมด B คอนเวอร์เตอร์ชุด A นำกระแสโหมดอินเวอร์ติง (ควอดแรนต์ที่ 4)

3. โหมด C เมื่อกระแสแม่เจอรด์ลดลงเป็นศูนย์ก็เข้าสู่การทำงานในโหมด C ทำการบล็อกให้คอนเวอร์เตอร์ชุด A หยุดนำกระแสโดยการปลดพลัสทริกที่ขาเกตไทรสเตอร์และมีเวลาหน่วงประมาณ 1/2 ไซเคิล ให้หยุดนำกระแสเองโดย เอซีไลนรีเวอร์ส แล้วให้คอนเวอร์เตอร์ชุด B นำกระแสเพื่อหลีกเลี่ยง การนำกระแสพร้อมกันจะทำให้เกิด กระแสลัดวงจรระหว่างเฟสกับนิวทรัลผ่านคอนเวอร์เตอร์

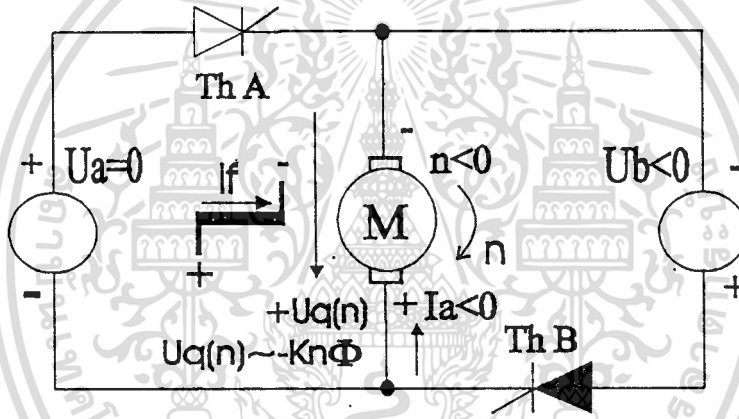
ภาพที่ 19



โหมด C บล็อกคอนเวอร์เตอร์ชุด A ให้หยุดนำกระแส โดยแรงดันเอซีไลนรีเวอร์ส

4. โหมด D ตัวขับเคลื่อนจะเร่งความเร็วรอบมอเตอร์เข้าสู่ความเร็วรอบใหม่ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาตามคำสั่งคอมมานด์ที่ต้องการที่เป็นความเร็วในทิศทางตรงกันข้ามคือ $(-n)$ และมีการทำงานในควอดแรนต์ที่ 3 (โหมดมอเตอร์รีจ) ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ชุด B นำกระแสเมเจอร์ให้มีทิศทางที่เป็นลบ $(-I_a)$ และแรงดันย้อนกลับมีขั้วเป็นบวก $U_q(n) = K_n \Phi$ เพราะความเร็วรอบมอเตอร์ได้หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา มุมนำกระแส $\alpha_2 = \cos(\pi + \alpha_1)$ ตัวควบคุมทำการเร่งต่อไปจนกระทั่งความเร็วรอบมอเตอร์เข้าสู่โหมด F

ภาพที่ 20



โหมด D คอนเวอร์เตอร์ชุด B นำกระแสในโหมดมอเตอร์รีจ(ควอดแรนต์ที่ 3)

5. โหมด F การทำงานในสภาวะคงตัวเหมือนกับโหมด D แต่ความเร็วรอบมอเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ดังใน ภาพที่ 20 การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระแสเมเจอร์ไหลทิศทางเดิมจะต้องมีการเปลี่ยนทิศทางการไหลกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (if) ของขดลวดกระตุ้นแยกให้กลับจากทิศทางเดิมในช่วง รีเจนเนอเรทีฟ พลังงานเกิดขึ้นที่โรเตอร์ขณะหมุนของทิศทางความเร็วรอบตามเข็มนาฬิกา กลับไปสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสลับ

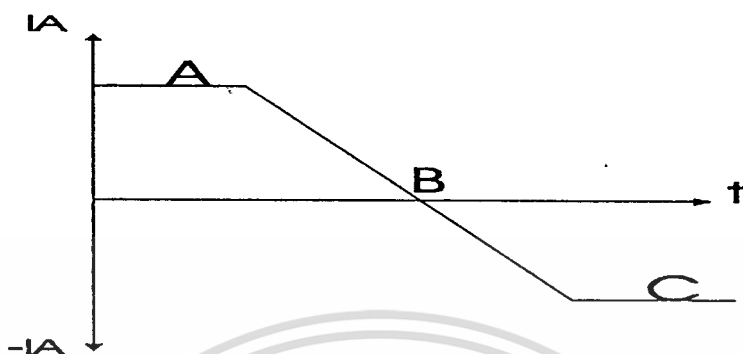
เงื่อนไขการการโอนย้ายการทำงานจากคอนเวอร์เตอร์ชุด A ไปสู่คอนเวอร์เตอร์ชุด B จ่ายกระแสแบบกระแสเมเจอร์ไหลกลับทิศ $(-I_a)$ จะปรากฏการทำงานในสภาวะดังต่อไปนี้ สำหรับการใช้นี้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การบล็อกคอนเวอร์เตอร์ให้หยุดนำกระแส กำหนดให้คอนเวอร์เตอร์ชุด A ภาพที่ 22 จ่ายกระแสแม่เจอร์ไหลเข้ามอเตอร์มีทิศทางเป็นบวก (+)a) ให้ความเร็วรอบมอเตอร์เป็นบวก (+n) หมุนในทิศทางความเร็วรอบ ทวนเข็มนาฬิกาซึ่งจะทำงานในโหมดมอเตอร์ริง (ควอแดรนต์ที่ 1) มุมนำกระแสอยู่ในช่วง $0 < \alpha < \pi/2$ ในสภาวะคงตัว เมื่อตัวขับเคลื่อนได้รับคำสั่งให้กลับทิศทางความเร็วรอบคอนเวอร์เตอร์ชุด A สภาวะนี้กำหนดให้ความเร็วรอบคงที่ จะต้องบล็อกให้หยุดนำกระแสโดย การปลดพลัสทริกไทรสเตอร์เป็นไปไม่ได้ที่ทำให้ไทรสเตอร์หยุดนำกระแสอย่างทันทีทันใดโดยเฉพาะอย่างยิ่งแล้วคอนเวอร์เตอร์ทำงานในโหมดอินเวอร์ติง การโอนย้ายการทำงานจากคอนเวอร์เตอร์ชุด A ไปสู่คอนเวอร์เตอร์ชุด B เมื่อได้รับคำสั่งจากวงจรควบคุมพลัสทริกไทรสเตอร์จะต้องถูกปลดออกจากคอนเวอร์เตอร์ชุด A และจะต้องมีเวลาหน่วงประมาณ 1/2 ไซเคิลเพื่อต้องการให้คอนเวอร์เตอร์ชุด A หยุดนำกระแสโดย แรงดันเอซีไลนรีเวอร์ส ก่อนที่จะจ่ายพลัสทริกให้ขาเกตไทรสเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์ชุด B นำกระแสในโหมดของอินเวอร์ติง (ควอแดรนต์ที่ 2) ที่มุมนำกระแส $\alpha = 5\pi/6$

2. มุมนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ชุด B เมื่อคอนเวอร์เตอร์ชุด B ได้รับการโอนย้ายการทำงานจากคอนเวอร์เตอร์ชุด A มุมของ α เพิ่มขึ้นจากค่าสภาวะเริ่มต้นไปยังมุม α สูงสุดเพื่อเข้าสู่สภาวะของโหมดฟูลอินเวอร์เตอร์ที่มุมนำกระแส $\alpha = 5\pi/6$ โหมด B ช่วงกระแส IA เป็นบวกใน ภาพที่ 21 แรงดันเอาต์พุตที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์ชุด B ยังคงมีขั้วเหมือนกับแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ $U_q(n)$ และแรงดันที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์ชุด B (U_B) น้อยกว่าแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ $U_q(n)$ เพื่อรีเจนเนอเรทีฟให้กระแสแม่เจอร์ไหลกลับไปแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ จนกระทั่งเป็นศูนย์ หลังจากผ่านเหตุการณ์นี้ ตัวควบคุมจะปรับมุมนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ชุด B เข้าสู่โหมดมอเตอร์ริง (ควอแดรนต์ที่ 3) โหมด B ช่วงกระแส IA เป็นลบใน ภาพที่ 21 และเร่งความเร็วรอบไปสู่ค่าความเร็วรอบที่ต้องการแต่มี ทิศทางสวนกับทิศทางเดิมซึ่งหมายถึงมอเตอร์ หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

กราฟอธิบายการทำงานในแต่ละโหมดการเปลี่ยนความเร็วรอบมอเตอร์แบบกระแสแม่เจอร์ไหลกลับทิศ

ภาพที่ 21

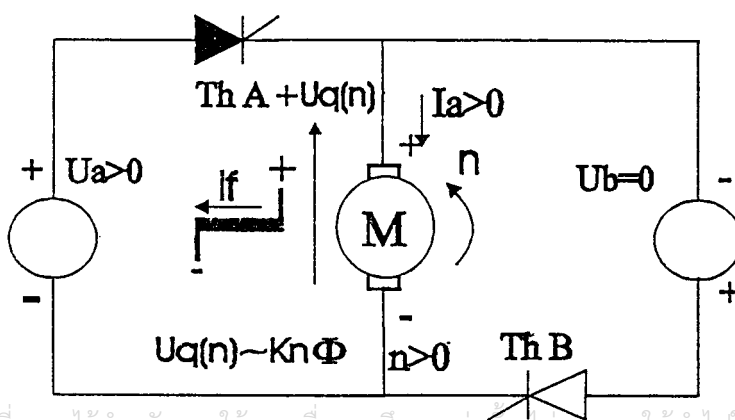


การโอนย้ายการทำงานจากคอนเวอร์เตอร์ชุด A ไปสู่คอนเวอร์เตอร์ชุด B (Change-over logic) แบบกระแสเมเจอร์ไหลกลับทิศ

ลำดับการทำงานในแต่ละโหมด การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4 ควอดแรนต์ กระแสไหลกลับทิศ

1. โหมด A การทำงานที่สภาวะคงตัวเหมือนกับการทำงานแบบเบรกความเร็วรอบ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระแสเมเจอร์ไม่ไหลกลับทิศในโหมด A ดังใน ภาพที่ 22

ภาพที่ 22



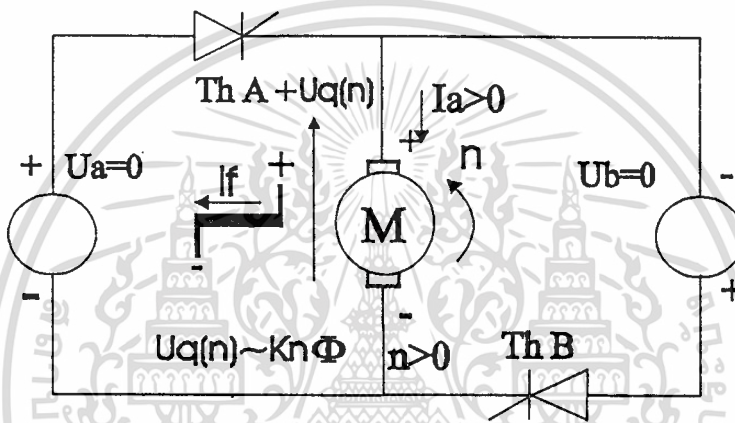
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหมด A คอนเวอร์เตอร์ชุด A นำกระแสโหมดมอเตอร์วิ่ง (ควอดแรนต์ที่ 1)

2. โหมด B การโอนย้ายคอนเวอร์เตอร์จากชุด A ไปสู่คอนเวอร์เตอร์ชุด B ในช่วงขอบเขต A ไปสู่ช่วงขอบเขต B ที่กระแส I_A เป็นบวก ในสภาวะนี้กำหนดให้ความเร็วรอบมอเตอร์คงที่ บล็อกให้คอนเวอร์เตอร์ชุด A หยุดนำกระแสก่อนหลังจากปลดสัญญาณพัลส์ทริกออกจากไทรสเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์ชุด A และจะหยุดนำกระแสโดยแรงดันเอซีไลเนียร์เวอรัลเมื่อคอนเวอร์-

ภาพที่ 23

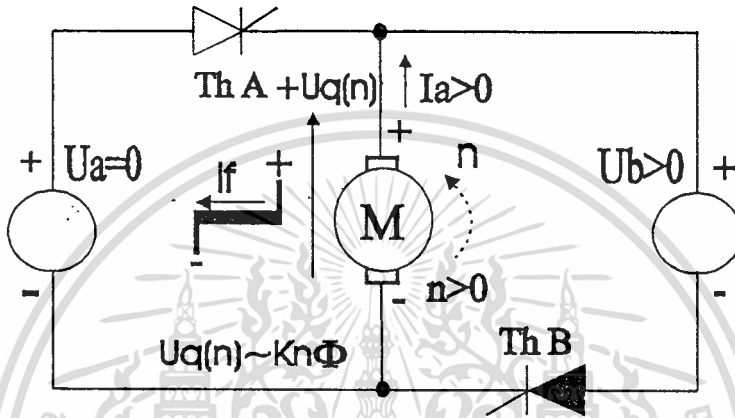


โหมด B บล็อกคอนเวอร์เตอร์ชุด A หยุดนำกระแสโดยแรงดันเอซีไลเนียร์เวอรัล

เตอร์ชุด B ดูภาพที่ 24 เริ่มนำกระแสของ α ถูกทำให้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โหมด B ช่วงกระแส I_A เป็นบวกใน ภาพที่ 21 เพื่อทำให้เข้าสู่โหมดฟูลอินเวอร์ตดิ้ง รีเจนเนอเรทีฟ พลังงานที่เกิดบนมอเตอร์กลับสู่แหล่งจ่ายไฟสลับและกระทำอยู่ในควอดแดรนต์ที่ 2 ซึ่งทิศทางกระแสเมเจอร์ไหลสวนทางกับทิศทางเดิม ชั่วแรงดันคอนเวอร์เตอร์ชุด B ถูกทำให้กลับชั่วเพราะต้องการให้มี ชั่วเหมือนกับแรงดันย้อนกลับ $U_q(n)$ เนื่องชั่วแรงดันย้อนกลับ ยังชั่วคงเดิมเพราะมอเตอร์หมุนในทิศทางเดิมและทิศทางกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (i_f) คงเดิม แรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ $U_q(n)$ มีค่ามากกว่าแรงดันที่ชั่วคอนเวอร์เตอร์ U_A ในสภาวะนี้มอเตอร์จะกลายเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงดังนั้น กระแสเมเจอร์จะไหลออกไปยังแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับทำให้ไม่เกิด การสูญเสียพลังงานและประสิทธิภาพการเบรกสูง การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ให้ความเร็วลดลงซึ่งมี มุมหน่วงเป็นมุมที่เพิ่มขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ แรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ในช่วงที่ต้องการกลับทิศทางหมุน ความเร็วรอบมอเตอร์และลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันย้อนกลับ เมื่อกระแสเมเจอร์เป็นศูนย์ มอเตอร์ก็จะหยุดนิ่ง มุมหน่วงก็เป็นศูนย์จากช่วง B ถึง C ช่วง I_A เป็นลบในภาพที่ 21 ก็จะเข้าไปสู่ การทำงานโหมดมอเตอร์-

ริง ควอแดรนท์ที่ 3 กระแสเมเจอร์ไหลกลับทิศเป็นลบ ($-I_a$) และเร่งความเร็วขึ้นไปสู่ค่าที่ต้องการซึ่งมีขนาดเท่ากับ ความเร็วรอบมอเตอร์ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาแต่ ความเร็วรอบมอเตอร์

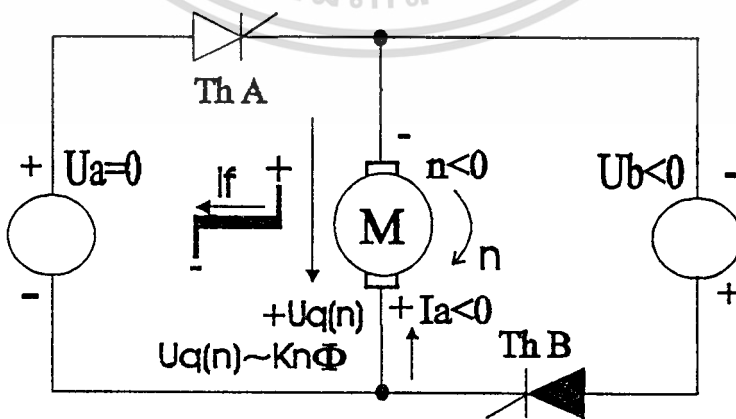
ภาพที่ 24



โหมต B คอนเวอร์เตอร์ชุด B นำกระแสโหมตอินเวอร์ตัง (ควอแดรนท์ที่ 2)

หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา กระทำอยู่ในควอแดรนท์ที่ 3 โหมตมอเตอร์ริง

ภาพที่ 25



โหมต C คอนเวอร์เตอร์ชุด B นำกระแสโหมตมอเตอร์ริง (ควอแดรนท์ที่ 3)

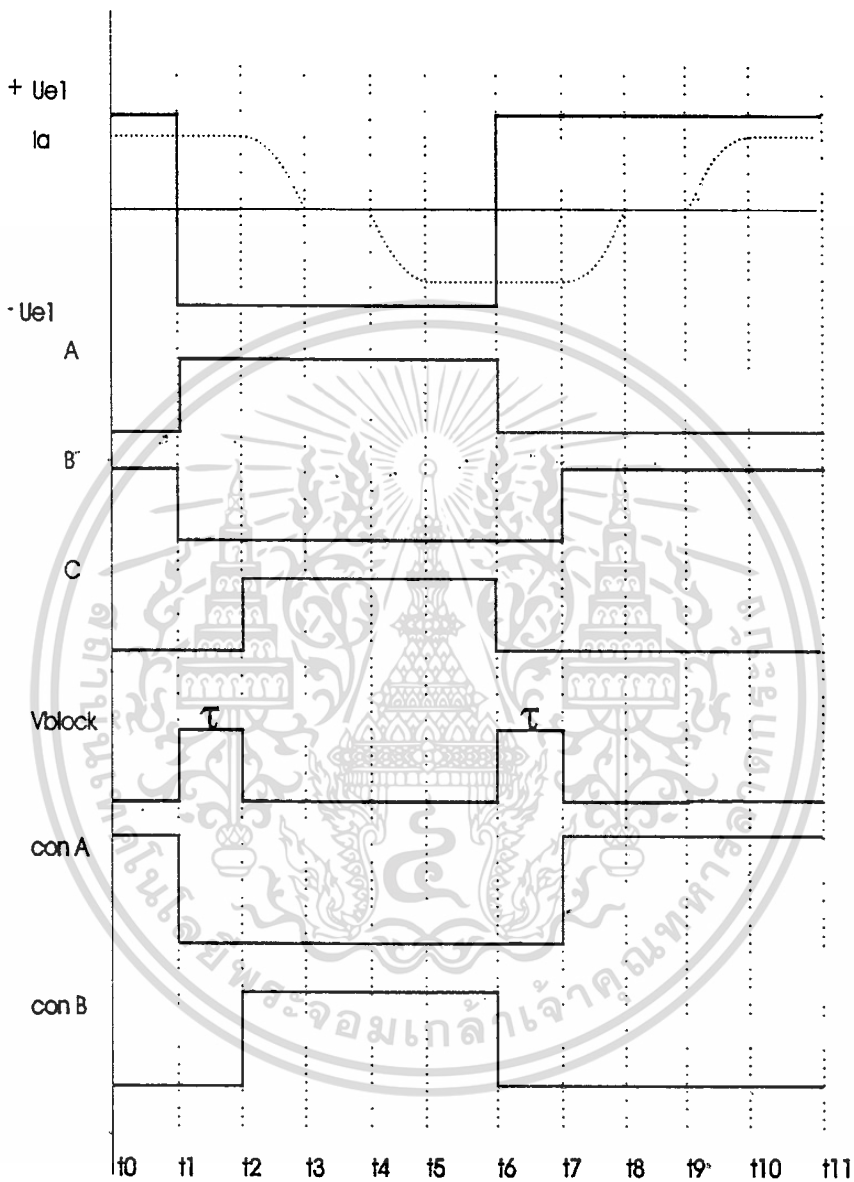
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. โหมด C การทำงานในสภาวะคงตัวของการขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์ในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ดูภาพที่ 25 การทำงานอยู่ในควอดแรนต์ที่ 3 โหมดมอเตอร์จริง ซึ่งคอนเวอร์เตอร์ชุด B ทำงานโดยมีมุมนำกระแส $\alpha_2 = \cos(\pi + \alpha_1) = -\alpha_1$ และจ่ายกระแสเมเจอร์มี ทิศทางการไหลเป็นลบ (-Ia) การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบบกระแสเมเจอร์ไหลกลับทิศ ไม่ต้องเปลี่ยนทิศทางกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก (if) ของขดลวดกระตุ้นแยกกลับจาก ทิศทางเดิมช่วงรีเจนเนอเรทีฟ พลังงานเกิดขึ้นที่โรเตอร์ขณะหมุนของทิศทางความเร็วรอบตามเข็มนาฬิกา กลับไปสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสกลับ

การทำงานของวงจร DC/AC(Digital control Analog inverter) ขณะกลับทิศทางความเร็วรอบ

1. t0-t1 คอนเวอร์เตอร์ชุด A ทำงานที่สภาวะคงตัวความเร็วรอบหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาควอดแรนต์ที่ 1
2. t1 ในช่วงเวลานี้เมื่อต้องการกลับทิศทางความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจาก ทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกาไปสู่ทิศทางความเร็วรอบตามเข็มนาฬิกา สัญญาณควบคุม U_{e1} ถูกทำให้กลับขั้วจากบวกเป็นลบทันทีทันใดที่เวลา t1 ช่วงเวลานี้ให้ ความเร็วรอบมอเตอร์คงที่ เพราะความเร็วรอบไม่สามารถเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดได้เนื่องจากผลทางกล ในช่วงเวลาทรานเซียนต์
3. t1-t2 สัญญาณบล็อก V_{block} เปลี่ยนสภาวะจากลอจิก 0 ไปสู่สภาวะลอจิก 1 ที่ t1 เพื่อปลดพัลส์ทริกไทรสเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์ชุด A ให้หยุดนำกระแสโดยเอซีไลเนอร์เวอร์ส
4. t2-t3 ในช่วงเวลานี้มอเตอร์จะเปลี่ยนสภาวะการทำงานจาก มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ไปสู่ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและคอนเวอร์เตอร์ชุด B เริ่มทำงานที่ t2 ในโหมดอินเวอร์ติง ทำให้แรงดันที่ ขั้วคอนเวอร์เตอร์ชุด B มีค่าเฉลี่ยเป็นลบทำให้ขั้วแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขั้วคงเดิม กระแสเมเจอร์จะไหลออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากลับสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้าสลับโดยผ่านคอนเวอร์เตอร์ชุด B ซึ่งทำหน้าที่รับ พลังงานรีเจนเนอเรทีฟและความเร็วรอบมอเตอร์ลดลงตามลำดับ

ภาพที่ 26



ไทม์มิงไดอแกรมของวงจร DCAI ขณะกลับทิศทางความเร็วรอบมอเตอร์จากทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกาไปสู่ทิศทางความเร็วรอบตามเข็มนาฬิกา

5. t_3 - t_4 เมื่อพลังงานที่เกิดขึ้นบน มอเตอร์ถูกรีเจนเนอเรทีฟให้หมดไปทำให้ ความเร็วรอบและกระแสแม่เหล็กลดลงเป็นศูนย์

6. t_4 - t_5 คอนเวอร์เตอร์ชุด B จะเริ่มทำงานในโหมดมอเตอร์ริงที่ t_4 คิวแดรนที่ 3 และความเร็วรอบมอเตอร์จะหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและเร่งความเร็วไปสู่ค่าที่ต้องการที่ t_5

7. t_5 - t_6 มอเตอร์ทำงานที่สภาวะคงตัว ความเร็วรอบหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

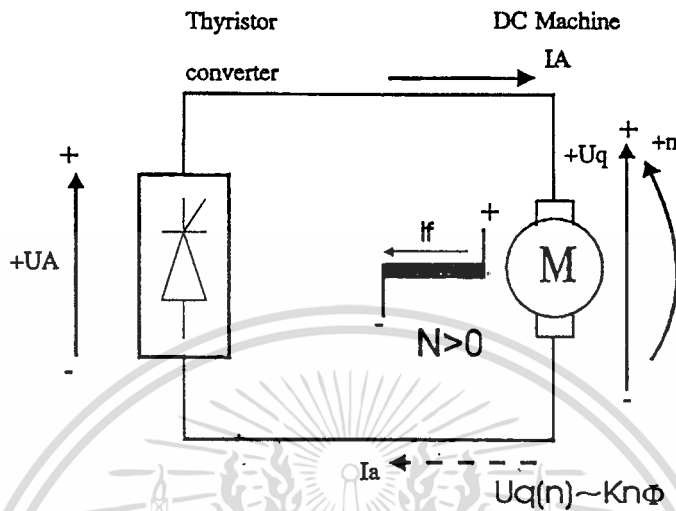
บทที่ 5

การวิเคราะห์กระแสเมเจอร์ในทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกา และตามเข็มนาฬิกา

การวิเคราะห์กระแสเมเจอร์ไหลต่อเนื่องในทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกาใหม่ต่อเมเจอร์ริง (ควอดแดรนต์ที่ 1)

คอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสฟูลคอนโทรล จ่ายกำลังให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ กระตุ้นแยกภาพที่ 27 วงจรเมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงถูกแทนโดยวงจรเทียบเคียง R_a และ L_a เป็นความต้านทานอเมเจอร์และอินดักแตนส์ของอเมเจอร์ตามลำดับ $U_q(n)$ เป็นแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์แสดงใน ภาพที่ 28 การทำงานของคอนเวอร์เตอร์แบบฟูลคอนโทรลที่ป้อนแหล่งจ่ายไฟสลับทงด้านอินพุท ภาพที่ 28 ช่วงไซเคิลบวกคู่ไทรสเตอร์ T1 และ T4 ถูกทำให้นำกระแสโดยพลัสทริกที่มุม α แรงดันที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์ $U_A > U_q(n)$ ทำให้กระแสเมเจอร์ไหลจากแหล่งจ่ายไฟสลัปไปสู่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและสร้างแรงบิดที่เพลลา มอเตอร์ในทิศทางความเร็วทวนเข็มนาฬิกา (T_d) แรงดันที่ขั้วเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์จะเท่ากับแหล่งจ่ายไฟสลัป $U_A = U_S$ และในช่วงไซเคิลลบ คู่ไทรสเตอร์ T2 และ T3 ถูกทำให้นำกระแสโดยพลัสทริกที่มุม $\alpha + \pi$ แรงดันที่ขั้วเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์จะเท่ากับแรงดันของแหล่งจ่ายไฟสลัปในช่วงไซเคิลลบ $U_A = -U_S$ เมื่อไทรสเตอร์คอนเวอร์เตอร์ไม่นำกระแสทำให้กระแสเมเจอร์ $I_a = 0$ และ แรงดันที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์เท่ากับแรงดันย้อนกลับ $U_A = U_q(n)$ แหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลัปและมุมนำกระแสไทรสเตอร์ตามที่แสดงในภาพที่ 29 คู่ไทรสเตอร์ T1 และ T4 ถูกทริกให้นำกระแสที่มุม α และคู่ไทรสเตอร์ T2 และ T4 ถูกทริกให้นำกระแสที่มุม $\alpha + \pi$ กรณีนี้ทำให้เกิดกระแสเมเจอร์ไหล

ภาพที่ 27



คอนเวอร์เตอร์ฟูลคอนโทรลจ่ายกำลังให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

ต่อเนื่อง โหมดมอเตอร์วิ่งและขับเคลื่อนมอเตอร์ หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาในสภาวะคงตัว โหมดกระแสเมเจอร์ไหลต่อเนื่องในทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกาเมื่อ $I_a > 0$ มุมทริกไทรสเตอร์ถูกจ่ายให้แก่ T1 และ T3 นำกระแสต้านแหล่งจ่ายแรงดันไฟสลับทางด้านอินพุตคอนเวอร์เตอร์เป็นบวกที่ชั่วแอนโด T1 เทียบกับชั่วคาโทดและที่ชั่วคาโทด T3 เป็นลบแรงดันแหล่งจ่ายไฟสลับมีค่ามากกว่าแรงดันย้อนกลับมอเตอร์ $U_q(n)$ กระแสเมเจอร์ไม่ไหลถ้ามีการทริกไทรสเตอร์ให้นำกระแสที่มุม α หรือ $\alpha + \pi$ เมื่อกระแสเมเจอร์ $I_a > 0$ ไหลอย่างต่อเนื่องกระแสเมเจอร์จะไม่ไหลผ่านไทรสเตอร์ T1 และ T3 เพราะไทรสเตอร์ T3 ไม่ได้รับสัญญาณทริกแต่จะไหลผ่านไทรสเตอร์ T1 และ T4 เพราะว่าแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ $U_q(n)$ มีค่ามากกว่าแรงดันแหล่งจ่ายไฟสลับแรงดันตกคร่อม T1 และ T3 เท่ากับ U_S เมื่อแรงดัน U_S มากกว่าแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ $U_q(n)$ คู่ไทรสเตอร์ T2 และ T3 จะนำกระแสต่อจากคู่ไทรสเตอร์ T1 และ T4

สมการแรงดันที่อธิบายขอบเขต การทำงานของคอนเวอร์เตอร์ที่จ่ายกำลังให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

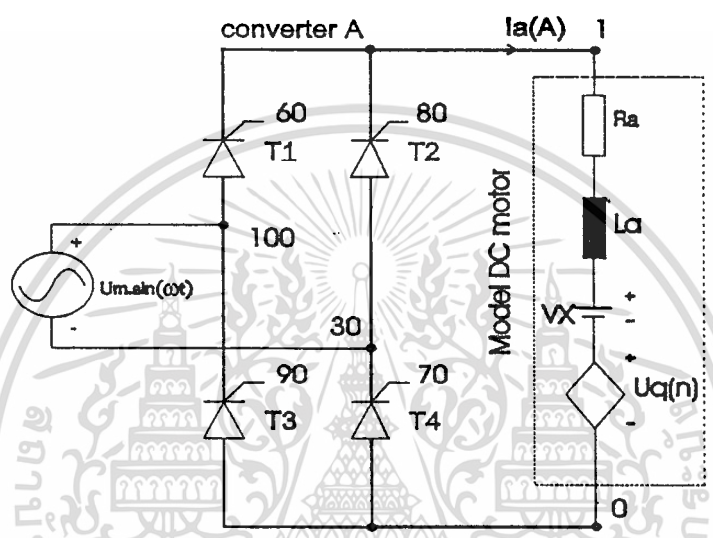
U_m = แรงดันสูงสุดของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ U_S มีหน่วยเป็น V

ω = ความถี่อินพุตแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับมีหน่วยเป็น rad/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้แบบเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 β = ค่าของมุมที่กระแสเมเจอร์ตกลงเป็นศูนย์มีหน่วยเป็น rad
 ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\gamma = \sin^{-1} \left(\frac{U_q(n)}{U_m} \right)$ มุมที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟสลับ U_s เท่ากับแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ไฟฟ้า
 กระแสตรง $U_q(n)$ มีหน่วยเป็น rad

ภาพที่ 28



คอนเวอร์เตอร์แบบฟูลคอนโทรลขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

เมื่อคู่ไทรสเตอร์ T1 และ T4 ถูกทำให้นำกระแสในช่วงไซเคิลบวกแรงดันที่ขั้วมอเตอร์คือ

$$U_A = U_m \sin(\omega t) = L_a \frac{dI_a}{dt} + R I_a + K \omega_m \dots\dots\dots(5.1)$$

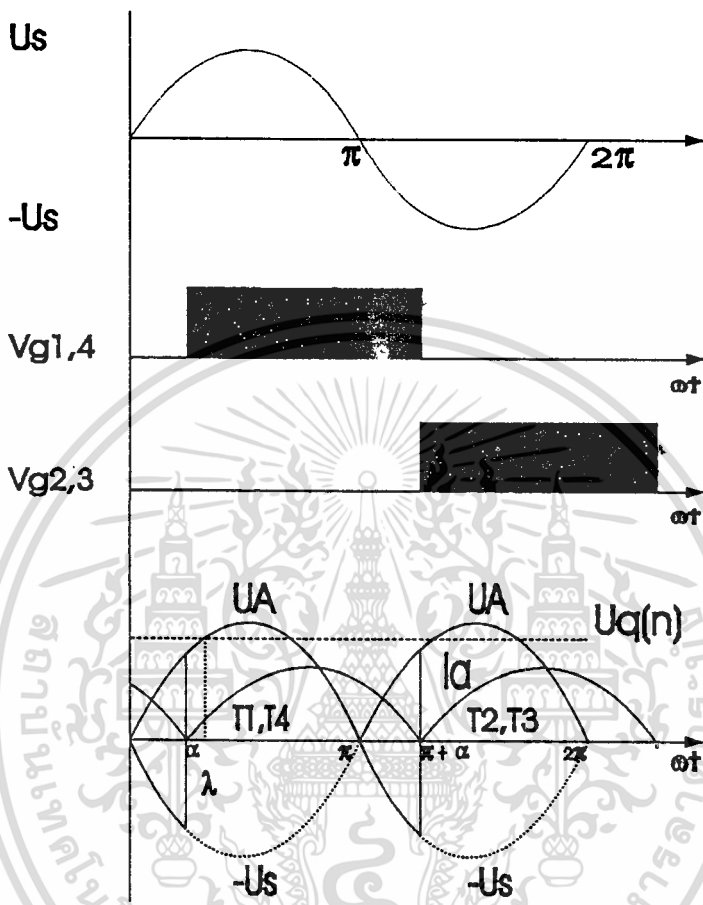
เมื่อคู่ไทรสเตอร์ T2 และ T3 ถูกทำให้นำกระแสในช่วงไซเคิลลบแรงดันที่ขั้วมอเตอร์คือ

$$U_A = -U_m \sin(\omega t) = L_a \frac{dI_a}{dt} + R I_a + K \omega_m \dots\dots\dots(5.2)$$

กระแสเมเจอร์หาได้จากสมการที่ (5.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 29



รูปคลื่นแรงดันและกระแสเมเจอร์เมื่อคอนเวอร์เตอร์ชุด A ทํานิคมอเตอร์ริงกระแสเมเจอร์ไหลต่อเนื่องที่สภาวะคงตัว

1

$$U_m \sin(\omega t) = L_a \frac{dI_a}{dt} + R I_a + K \omega_m \dots \dots \dots (5.3)$$

แก้สมการรูปแรงดันด้วยวิธีการไมโดเมน

$$I_a = e^{-\frac{R a t}{L_a}} \left[\int e^{\frac{R a t}{L_a}} \left(\frac{U_m}{L_a} \sin(\omega t) - \frac{K}{L_a} \omega_m \right) dt + K i_e \frac{R a t}{L_a} \right] \dots \dots \dots (5.4)$$

$$I_a = \frac{U_m (\omega L_a \cos(\omega t) + R_a \sin(\omega t))}{R_a^2 + (\omega L_a)^2} - \frac{K_m}{R_a} + K i_e \frac{R a t}{L_a} \dots \dots \dots (5.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต (5.5) การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_a = (R_a^2 + (\omega L_a)^2)$$

$$\tau_a = \frac{L_a}{R_a}$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L_a}{R_a} \right)$$

$$I_a(\omega t) = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t - \psi) - \frac{K\omega_m}{R_a} + K_1 e^{-\frac{t}{\tau}} \dots\dots\dots 5.6$$

การหาค่าคงที่ K1 ในช่วงเวลา $\alpha < \omega t < \pi + \alpha$ กระแสเมเจอร์ (Ia) ลดลงเท่ากับศูนย์ โดยแทนมุมนำกระแสจาก เงื่อนไขสมการ (5.7) ทั้งสองช่วงในสมการที่ (5.6)

$$I_a(\alpha) = I_a(\alpha + \pi) \dots\dots\dots (5.7)$$

$$I_a(\alpha) = \frac{U_m}{Z} \sin(\alpha - \psi) - \frac{K\omega_m}{R_a} + K_1 e^{-\frac{\alpha}{\omega\tau}} \dots\dots\dots (5.8)$$

$$I_a(\alpha + \pi) = \frac{U_m}{Z} \sin(\alpha + \pi - \psi) - \frac{K\omega_m}{R_a} + K_1 e^{-\frac{\alpha + \pi}{\omega\tau}} \dots\dots\dots (5.9)$$

ที่ K เป็นค่าคงที่ของแรงดันย้อนกลับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง $U_q(n)$

สำหรับ K1 เป็นค่าคงที่ในสภาวะคงตัวหาได้จากการให้สมการที่ (5.8) ให้เท่ากับสมการ (5.9)

$$\tan \psi = \frac{\omega L_a}{R_a} = \omega\tau$$

$$K_1 = \frac{2U_m}{Z} \frac{\sin(\alpha - \psi)}{e^{-\alpha/\omega\tau} - e^{-(\pi + \alpha)/\omega\tau}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_1 = \frac{2U_m \sin(\alpha - \psi)}{Z \frac{-\alpha}{e^{\tau a \omega}} \frac{-\pi}{(1 - e^{\tau a \omega})}}$$

$$K_1 = \frac{-2U_m \sin(\alpha - \psi) \cdot \exp(\frac{\alpha}{\tau a \omega})}{Z \cdot (1 - \exp(-\pi \cdot \cot(\psi)))}$$

นำ K1 แทนในสมการที่ (5.9)

$$I_a(\omega t) = \frac{U_m}{Z} \left[\sin(\omega t - \psi) - \frac{1}{1 - \exp(-\pi \cdot \cot(\psi))} 2 \cdot \sin(\alpha - \psi) \cdot \exp(\alpha - \omega t) \cdot \cot(\psi) \right] \quad (5.10)$$

เมื่อฟลักของสนามกระตุ้นคงที่แรงบิดเฉลี่ยของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขึ้นอยู่กับค่ากระแสอเมเจอร์ เฉลี่ยทางด้านทางด้านไฟตรงเท่านั้นแรงบิด Ta หาได้จากสมการ

$$T_a = K I_a \dots \dots \dots (5.11)$$

Ia สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$I_a = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} I_a \sin(\omega t) d\omega t \dots \dots \dots (5.12)$$

สมการ (5.10) เป็นการแสดงค่าของ Ia ที่มีความยาวและมีความซับซ้อนในช่วงทรานเซียนลแต่สามารถทำให้สมการอยู่ในรูปที่ง่ายในสภาวะคงตัวโดยใช้สมการต่อไปนี้

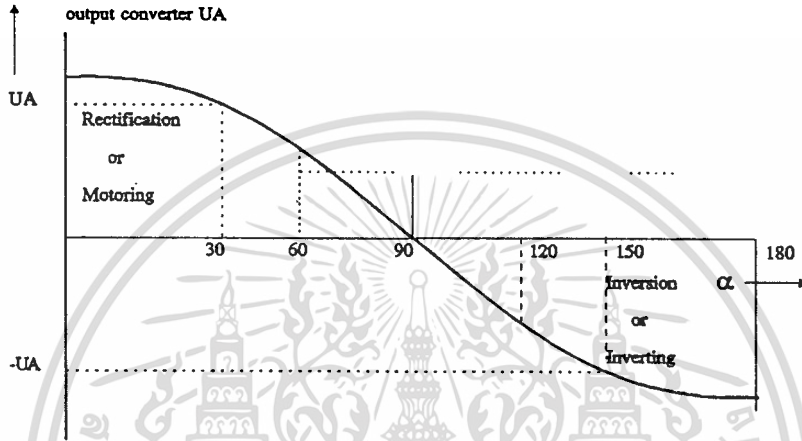
แรงดันเฉลี่ยที่ขั้วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง $U_A =$ แรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อมความต้านทานอเมเจอร์ $R_a +$ แรงดันเฉลี่ยที่ตกคร่อมอินดักแตนส์ $L_a +$ แรงดันย้อนกลับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง $U_q(n)$

$$\dots \dots \dots (5.13)$$

$$U_A = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} U_m \sin(\omega t) d\omega t = \frac{2 \cdot U_m}{\pi} \cdot \cos(\alpha) = U_{A0} \cdot \cos(\alpha) \dots \dots \dots (5.14)$$

จากสมการที่ (5.14) แรงดันไฟตรงเฉลี่ย U_A สามารถเปลี่ยนจาก 1 ไปสู่ -1 เนื่องจากมุมนำกระแส (α) เปลี่ยนจาก 0 ถึง π ดังใน ภาพที่ 30

ภาพที่ 30



แรงดันไฟตรงเฉลี่ยที่เอาท์พุทคอนเวอร์เตอร์เทียบกับมุมนำกระแส α

$$U_{AO} = \frac{2U_m}{\pi}$$

แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมความต้านทานอเมเจอร์

$$R_a = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} R_a I_a(\omega t) d(\omega t) = R_a I_a \dots (5.15)$$

แรงดันเฉลี่ยตกคร่อมอินดักเตอร์อเมเจอร์

$$L_a = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} L_a \frac{dI_a}{dt} d(\omega t)$$

$$L_a = \frac{\omega}{\pi} \int_{I_a(\alpha)}^{I_a(\pi+\alpha)} L_a dI_a$$

$$= \frac{\omega L_a}{\pi} [I_a(\pi + \alpha) - I_a(\alpha)] = 0 \quad \dots\dots\dots(5.16)$$

ที่สภาวะคงตัวแรงดันตกคร่อม L_a มีค่าเป็นศูนย์เสมอแทนค่าจากสมการ (5.15) และ (5.16) เข้าไปในสมการ (5.13) ได้สมการแรงดันที่ขั้วมอเตอร์ที่สภาวะคงตัว

$$U_A = R_a I_a + 0 + K \omega_m \quad \dots\dots\dots(5.17)$$

ในสมการ (5.17) ใช้ได้ในสภาวะคงตัวการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ถูกป้อนกำลังจากคอนเวอร์เตอร์แบบใด ๆ จากความสัมพันธ์สมการ (5.14) กับสมการ (5.17) กำหนดให้เท่ากันจะได้กระแสเฉลี่ย I_a ในสภาวะคงตัว

$$U_A = U_{Ao} \cos(\alpha) = R_a I_a + K \omega_m \quad \dots\dots\dots(5.18)$$

$$I_a = \frac{U_{Ao} \cos(\alpha) - K \omega_m}{R_a} \quad \dots\dots\dots(5.19)$$

แทนค่าจากสมการ (5.19) ในสมการ (5.11) และจัดรูปใหม่จะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงบิด

$$\omega_m = \frac{2U_m \cos(\alpha)}{K\pi} - \frac{R_a T_a}{K^2} \quad \dots\dots\dots 5.20$$

การวิเคราะห์กระแสเฉลี่ยไหลไม่ต่อเนื่องในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาโหมดมอเตอร์รีจ (ควอดแรนต์ที่ 1)

เมื่อกระแสเฉลี่ย I_a เท่ากับศูนย์ในช่วง β ถึง $\alpha + \pi$ ในภาพที่ 31 มีผลทำให้แรงบิดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเทียบกับ ความเร็วรอบมอเตอร์ไม่เป็นเชิงเส้นทำให้การควบคุม ความเร็วรอบทำได้ยากกว่าการหาข้อบกพร่องกระแสเฉลี่ยในช่วงไม่ต่อเนื่องจากความสัมพันธ์ในช่วงกระแสการคำนวณว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อเมเจอร์ไหลไม่ต่อเนื่องที่ได้แสดงไว้แล้วการหาค่าคงที่ K_1 ของสมการกระแสอเมเจอร์ไหลไม่ต่อเนื่องโดยให้จากสมการ (5.6)

$$I_a(\omega t) = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t - \psi) - \frac{K\omega_m}{R_a} + K_1 e^{\frac{-\alpha}{\omega \tau_a}} \dots\dots\dots(5.21)$$

จากเงื่อนไข $I_a(\alpha) = 0$ แทนในสมการ (5.21)

$$0 = \frac{U_m}{Z} \sin(\alpha - \psi) - \frac{K\omega_m}{R_a} + K_1 e^{\frac{-\alpha}{\omega \tau_a}} \dots\dots\dots(5.22)$$

$$K_1 = \left(-\frac{U_m}{Z} \sin(\alpha - \psi) + \frac{K\omega_m}{R_a} \right) e^{\alpha \cot \psi} \dots\dots\dots(5.23)$$

แทนค่า K_1 ในสมการ (5.21)

$$I_a(\omega t) = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t - \psi) - \frac{K\omega_m}{R_a} - \left(\frac{U_m}{Z} \sin(\alpha - \psi) - \frac{K\omega_m}{R_a} \right) e^{-\cot \psi + \alpha \cot \psi} \dots\dots(5.24)$$

$$I_a(\omega t) = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t - \psi - \sin(\alpha - \psi) e^{(\alpha - \omega t) \cot \psi}) - \frac{K\omega_m}{R_a} - \left(\frac{U_m}{Z} \sin(\alpha - \psi) - \frac{K\omega_m}{R_a} \right) (1 - e^{-(\alpha - \omega t) \cot \psi}) \dots\dots(5.25)$$

สำหรับ $\alpha < \omega t < \beta$

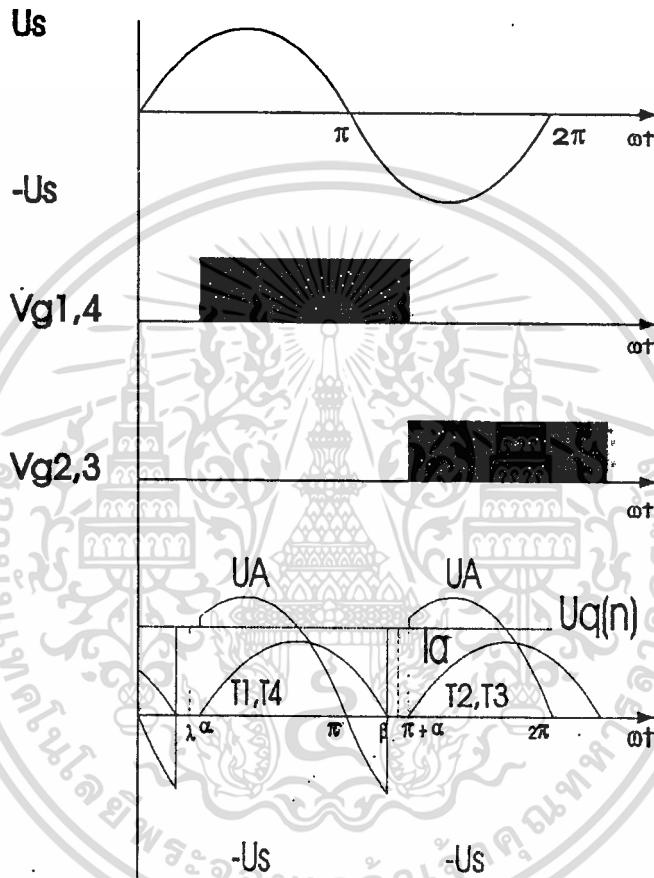
เมื่อ $I_a(\beta) = 0$ จากสมการ (5.24) แทนค่า $\omega t = \beta$ แก้สมการหาค่า β ที่ทำให้กระแสอเมเจอร์เป็นศูนย์

$$0 = \frac{U_m}{Z} \sin(\beta - \psi - \sin(\alpha - \psi) e^{(\alpha - \beta) \cot \psi}) - \frac{K\omega_m}{R_a} - \left(\frac{U_m}{Z} \sin(\alpha - \psi) - \frac{K\omega_m}{R_a} \right) (1 - e^{-(\alpha - \beta) \cot \psi}) \dots\dots\dots(5.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$0 = \frac{U}{Z} \sin(\beta - \psi) - \frac{K\omega_m}{R_a} + \left[\frac{K\omega_m}{R_a} - \frac{U_m}{Z} \sin(\alpha - \psi) \right] e^{(\alpha - \beta) \cot \psi} \dots\dots\dots(5.27)$$

ภาพที่ 31



แรงดันและกระแสเมเจอร์เมื่อคอนเวอร์เตอร์ชุด A ทำงานในควอดแรนต์ที่ 1 โหมด มอเตอร์วิ่งกระแสเมเจอร์ไหลไม่ต่อเนื่อง

β สามารถหาค่าได้โดยการประมาณด้วยวิธี transcendental ของสมการ (5.27)

แรงดันเฉลี่ยที่ขั้วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

$$U_A = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} U_m \sin(\omega t) d(\omega t) + \int_{\pi + \alpha}^{\pi + \beta} U_q(\omega t) \dots\dots\dots(5.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (5.19) และ (5.4)

$$I_a = \frac{U_m(\cos(\alpha) - \cos(\beta)) - (\beta - \alpha) \cdot K\omega_m}{\pi R_a} \dots\dots\dots(5.29)$$

กระแสเมเจอร์ I_a และแรงบิดที่เพลามอเตอร์ T_a ได้จากสมการ (5.29) และ (5.31) ตามลำดับ

$$\text{จากสมการที่ (5.11) } T_a = KI_a \dots\dots\dots(5.30)$$

แทนค่าสมการ (5.29) เข้าไปในสมการ (5.30) จะได้ความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโหมดกระแสเมเจอร์ไหลไม่ต่อเนื่อง

$$\omega_m = \frac{U_m \cdot \cos(\alpha) - \cos(\beta)}{\pi R_a} \frac{\pi R_a T_a}{K^2(\beta - \alpha)} \dots\dots\dots(5.31)$$

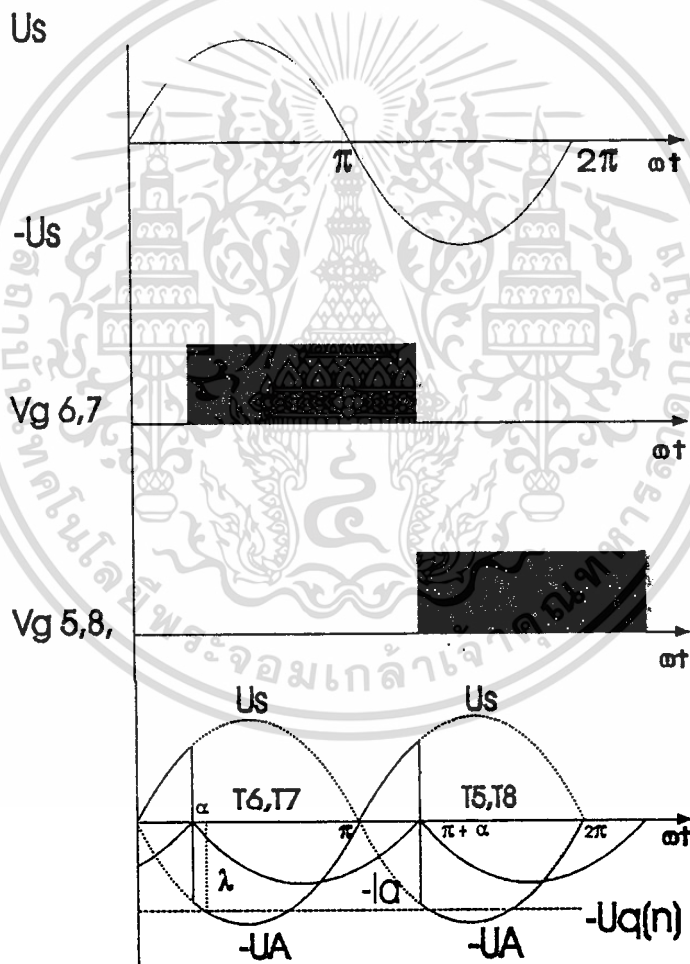
การวิเคราะห์กระแสเมเจอร์ไหลต่อเนื่องในทิศทางความเร็วรอบตามเข็มนาฬิกาโหมดมอเตอร์รีจ (ควอดแรนต์ที่ 3)

กระแสเมเจอร์ไหลอย่างต่อเนื่อง ทิศทางสวนกับทิศทางเดิมหมายถึงกระแสเมเจอร์มีค่าติดลบ (- I_a) แสดงใน ภาพที่ 32 เกิดจากการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ชุด B ที่ป้อนแหล่งจ่ายไฟสลับทางด้านอินพุท คอนเวอร์เตอร์ช่วงไซเคิลบวกคู่ไตรสเตอร์ T6 และ T7 ถูกทำให้นำกระแสโดยพลัสทริกที่มุม α ทำให้กระแสไหลจากแหล่งจ่ายไฟสลับไปสู่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในทิศทางตามเข็มนาฬิกาแรงดันที่ขั้วเอาต์พุทคอนเวอร์เตอร์จะเท่ากับแหล่งจ่ายไฟสลับ $U_A=U_S$ และในช่วงไซเคิลลบคู่ไตรสเตอร์ T5 และ T8 ถูกทำให้นำกระแสโดยพลัสทริกที่มุม $\alpha+\pi$ ดังใน ภาพที่ 32 แรงดันขั้วเอาต์พุท คอนเวอร์เตอร์จะเท่ากับ แรงดันแหล่งจ่ายไฟสลับ $U_A=-U_S$ เมื่อไตรสเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์ไม่นำกระแสทำให้กระแสเมเจอร์ $I_a=0$ และแรงดันที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์เท่ากับ

แรงดันย้อนกลับ $U_A=-U_d(n)$ เมื่อ $-I_a>0$ มุมทริกไตรสเตอร์ถูกจ่ายให้ T6 และ T7 นำกระแสถ้า

แหล่งจ่ายแรงดันไฟสลับทางด้านอินพุตคอนเวอร์เตอร์เป็นวงที่ขั้วโหนด T6 เทียบกับขั้วแคโทด T1 เป็นลบทำให้แรงดันแหล่งจ่ายไฟสลับมีค่ามากกว่าแรงดันย้อนกลับของมอดูเลเตอร์ $U_q(n)$ ถ้ามีการทริกไทรสเตอร์ให้นำกระแสที่มุม α หรือ $\alpha + \pi$ เมื่อกระแสเมเจอร์ $-I_a > 0$ ไหลอย่างต่อเนื่องเนื่องกระแสเมเจอร์จะไม่ไหลผ่านไทรสเตอร์ T6 และ T5 แต่จะไหลผ่าน T6 และ T7 แทนเพราะว่า

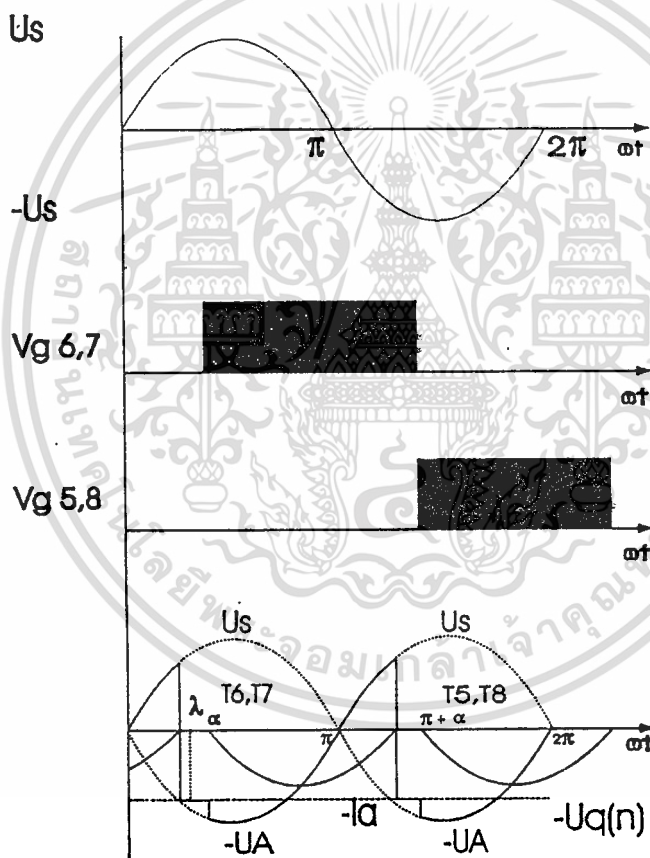
ภาพที่ 32



รูปคลื่นแรงดันและกระแสของอเมเจอร์เมื่อคอนเวอร์เตอร์ชุด B ทำงานในควอดแรนต์ที่ 3 โหมคมอดูเลตริงกระแสเมเจอร์ไหลต่อเนื่อง

แรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ $U_q(n)$ มีค่ามากกว่าแรงดันแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ (U_s) เมื่อแรงดัน U_s มากกว่าแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ $U_q(n)$ คู่ทรานซิสเตอร์ T5 และ T8 จะนำกระแส แทนคู่ทรานซิสเตอร์ T6 และ T7 การหาค่ากระแสอเมเจอร์ในทิศทางตามเข็มนาฬิกาใหม่กระแสอเมเจอร์ไหลต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องมีเงื่อนไขของตัวแปรต่างๆ เหมือนกับทิศทางการไหลของกระแสอเมเจอร์ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาแต่มีเครื่องหมายติดลบเท่านั้น ดังในภาพที่ 33

ภาพที่ 33



รูปคลื่นแรงดันและกระแสของอเมเจอร์เมื่อคอนเวอร์เตอร์ชุด B ทำงานในควอดแรนต์ที่ 3 ใหม่มอเตอร์เรียงกระแสอเมเจอร์ไหลไม่ต่อเนื่อง

เปรียบเทียบผลการซิมูเลชันทิศทางการไหลกระแสเมเจอร์ โหมดกระแสไหลต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ที่สภาวะคงตัวด้วยโปรแกรม Pspice กับผลการทดลองจากรวงจรที่ได้ออกแบบไว้

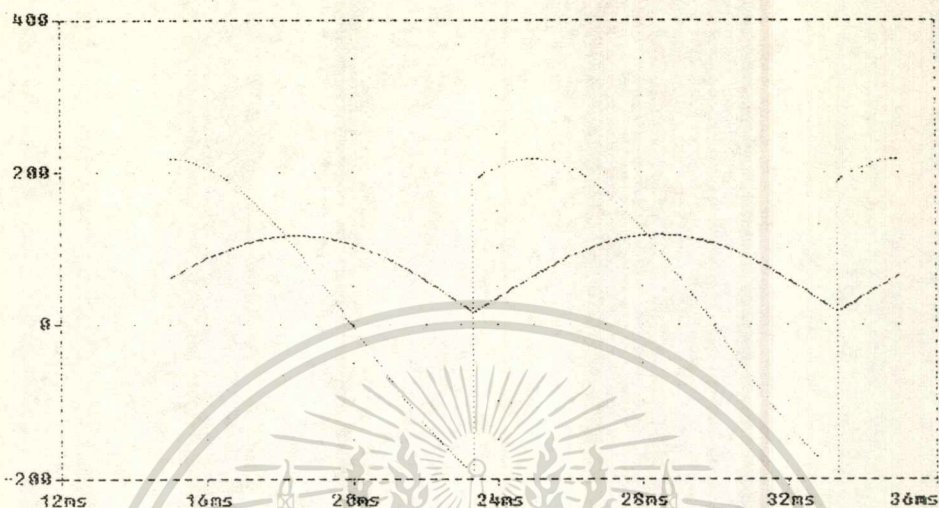
ตัวแปรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกขนาด 3.3Kw กระแสเมเจอร์ 16A แรงดันไฟตรง 200V ความเร็วรอบ 1500 รอบ/นาที ที่ใช้ในการซิมูเลชัน จากภาคผนวกมีดังต่อไปนี้

$$R_f = 10 \Omega \quad U_f = 197.87 \text{ V} \quad \gamma = \sin^{-1}(U_q(n)/U_m) = 32.68 \text{ deg} \quad \psi = 69.46 \text{ deg} \quad R_a = 1.8 \Omega$$

$$L_a = 17 \text{ mH} \quad \omega_m = 1500 \text{ rpm} \quad T_a = 17 \text{ mS} \quad J = 0.104 \text{ Kg-m}^2 \quad B = 0.01 \text{ N-m/(rad/sec)} \quad Z_a = 5.7 \Omega$$

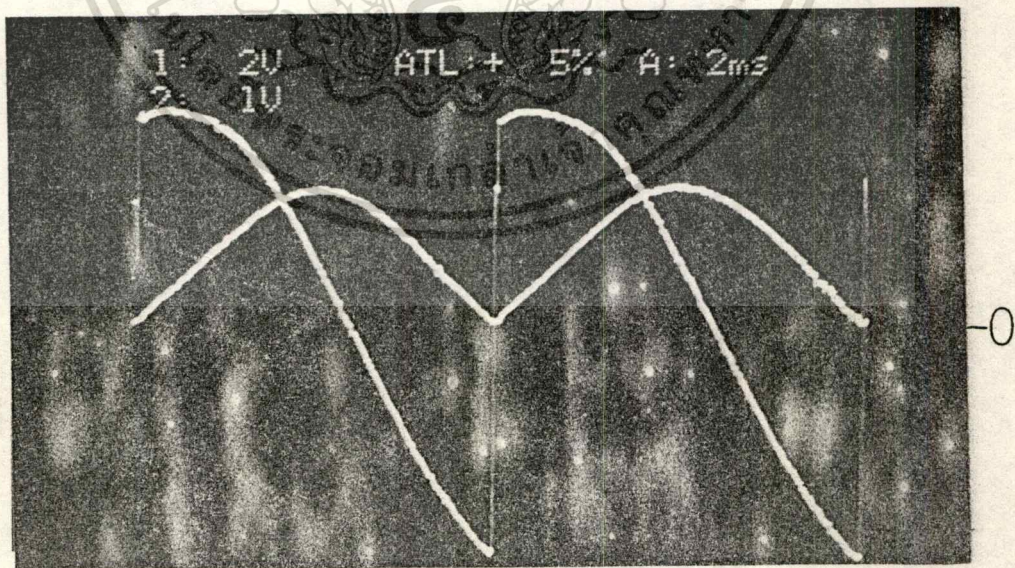
$$T_m = 91.64 \text{ mS} \quad U_A = I_a R_a + U_q(n) \quad K = U_q(n)/\omega_m = 1.07$$

ภาพที่ 34



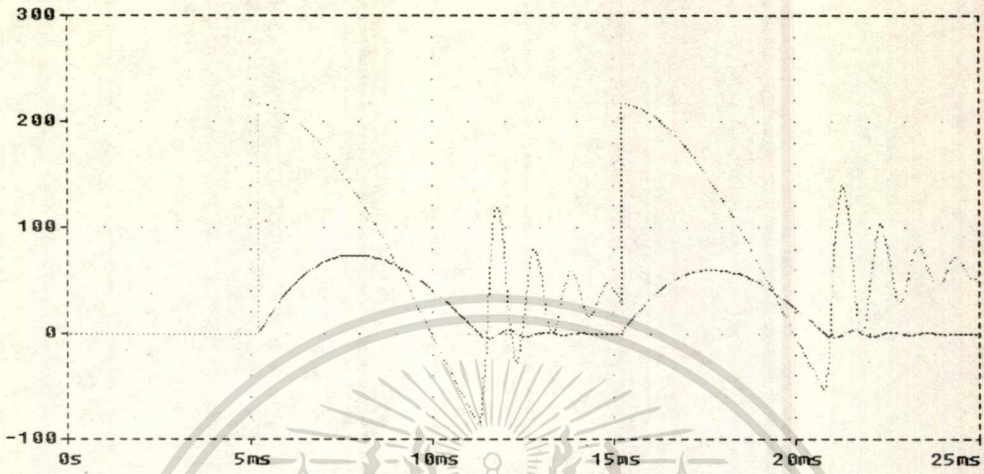
ผลการซิมมูลชันกระแสเมเจอร์ไหลต่อเนื่อง โหมดมอเตอร์ริง (ควอแดรนต์ที่ 1) ที่มุนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ $\alpha=30$ แรงบิดโหลด $T_L=5\text{kg}$ ความเร็วรอบในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

ภาพที่ 35



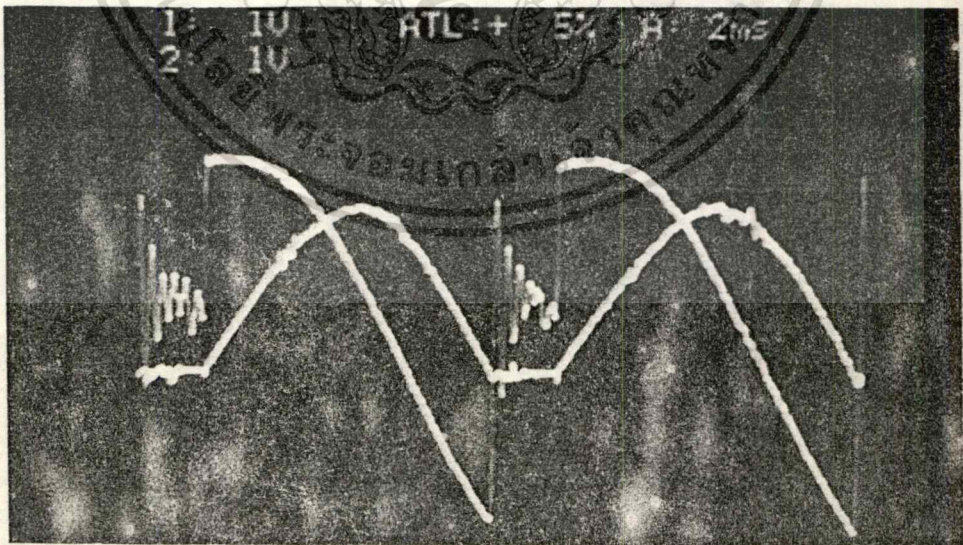
ผลการวัดกระแสเมเจอร์ไหลต่อเนื่อง โหมดมอเตอร์ริง (ควอแดรนต์ที่ 1) ที่มุนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ $\alpha=30$ แรงบิดโหลด $T_L=5\text{kg}$ ที่ได้จากการทดลองสเกลการวัด 1 ช่องเท่ากับ 10A เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 36



ผลการซิมมูลชันกระแสแม่เจอร์ไหลไม่ต่อเนื่อง โหมดมอเตอร์ริง (ควอแดรนต์ที่1) ที่ มุมนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ $\alpha=60$ แรงบิดโหลด $T_L= 1.5\text{kg}$ ความเร็วรอบในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

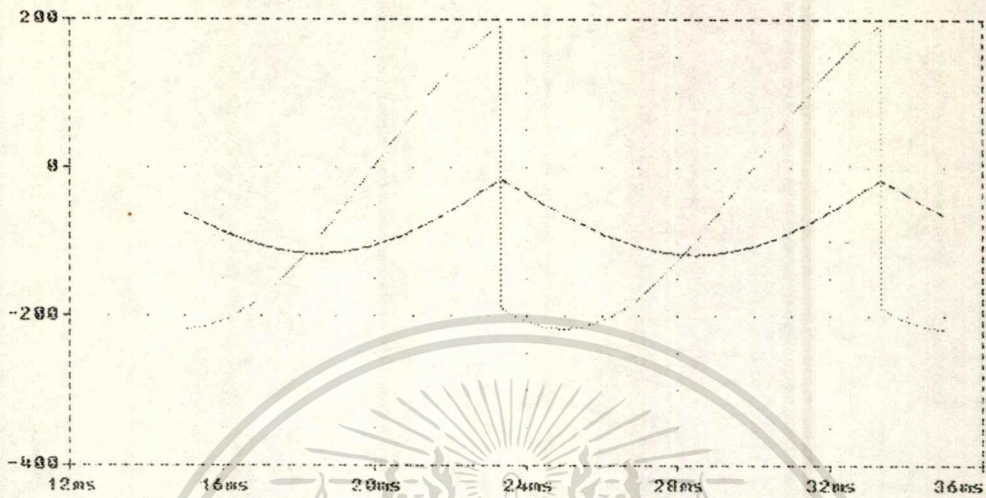
ภาพที่ 37



ผลการวัดกระแสแม่เจอร์ไหลไม่ต่อเนื่อง โหมดมอเตอร์ริง (ควอแดรนต์ที่ 1) ที่มุมนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ $\alpha=60$ แรงบิดโหลด $T_L= 1.5\text{kg}$ ความเร็วรอบหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา จากกรวดลอง สเกลการวัด 1 ช่องเท่ากับ 10A

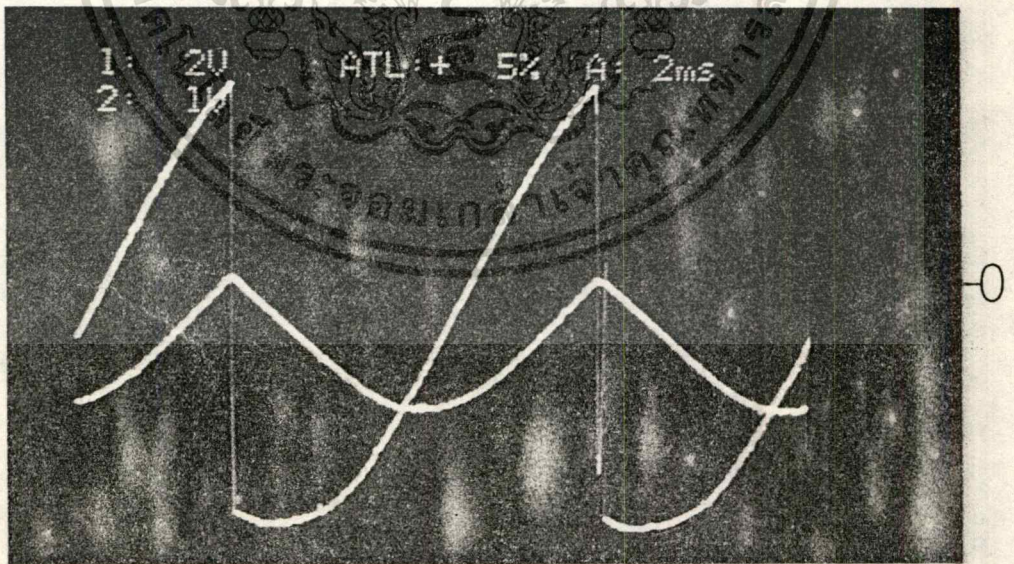
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่แล้วหรือมีการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 38



ผลการซิมูเลชันกระแสเมเจอร์ไหลต่อเนื่อง โหมดมอเตอร์ริง (ควอดแดรนต์ที่ 3) ที่มุม นำกระแสคอนเวอร์เตอร์ $\alpha=30$ แรงบิดโหลด $T_L=5\text{kg}$ ความเร็วรอบในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

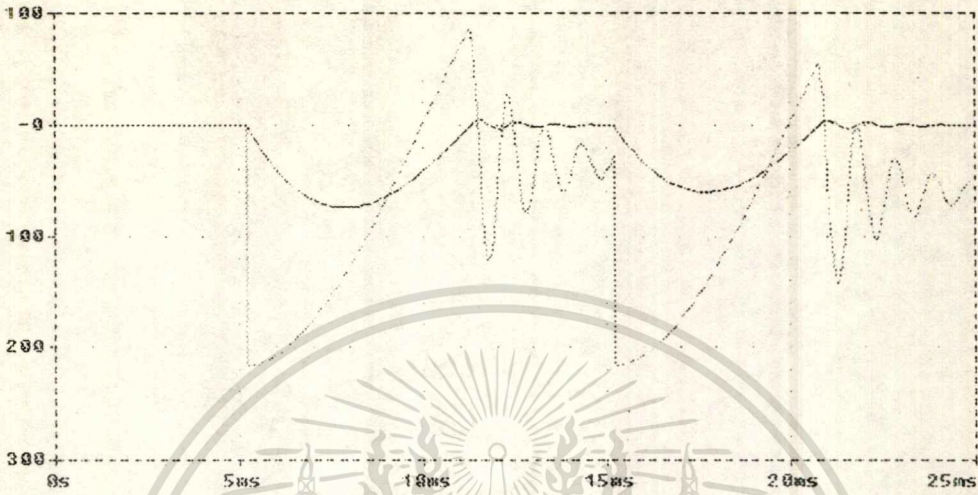
ภาพที่ 39



ผลการวัดกระแสเมเจอร์ไหลต่อเนื่อง โหมดมอเตอร์ริง (ควอดแดรนต์ที่ 3) ที่มุมนำกระแส คอนเวอร์เตอร์ $\alpha=30$ แรงบิดโหลด $T_L=5\text{kg}$ ความเร็วรอบหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

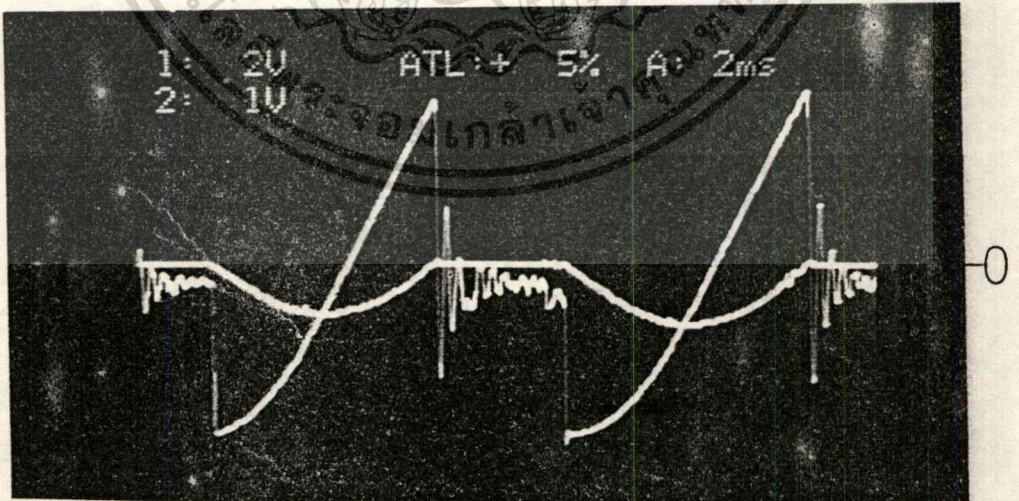
จากการทดลอง สเกลการวัด 1 ช่องเท่ากับ 10A เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 40



ผลการซิมมูล์ชันกระแสเมเจอร์ไหลไม่ต่อเนื่อง โหมดมอเตอรริง (ควอแดรนต์ที่ 3) ที่ มุมนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ $\alpha = -60$ แรงบิดโหลด $T_L = 1.5\text{kg}$ ความเร็วรอบหมุนในทิศทางตาม เข็มนาฬิกา

ภาพที่ 41



ผลการวัดกระแสเมเจอร์ไหลไม่ต่อเนื่อง โหมดมอเตอรริง (ควอแดรนต์ที่ 3) ที่มุมนำ กระแสคอนเวอร์เตอร์ $\alpha = -60$ แรงบิดโหลด $T_L = 1.5\text{kg}$ ความเร็วรอบหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจากการทดลอง สเกลการวัด 1 ช่องเท่ากับ 10A

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงนโสภาหรงการใชงานเพอการศกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใชประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดจรงทั้งสิ้น อีกรทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตองอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การซิมมูลชันเปรียบเทียบกับผลการทดลอง เมื่อเบรกความเร็วรอบ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบบรีเจนเนอเรทีฟ กระแสอเมเจอร์ไหล กลับทิศไหลดมอเตอร์รีงและไหลดอินเวอร์ตึง

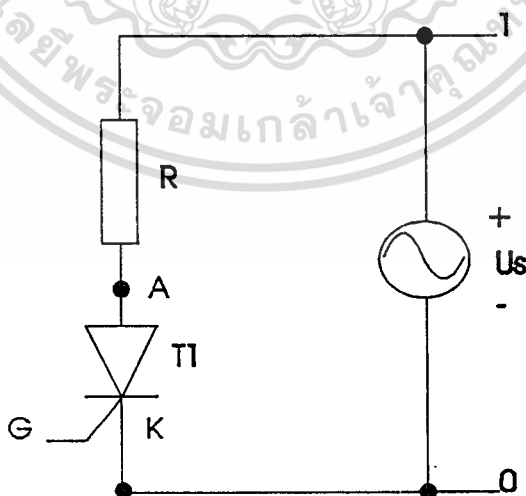
การซิมมูลชันทิศทางการไหลของกระแสอเมเจอร์โดยใช้โปรแกรม Pspice ก่อนอื่นจะต้องสร้างโมเดล ไทริสเตอร์กระแสลัดดังใน ภาพที่ 42 และ โมเดลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ กระตุ่นแยก ดังในภาพที่ 43 ด้วยวงจรทางไฟฟ้าที่มีอยู่ในโปรแกรม PSPICE เพื่อเลียนแบบการทำงานให้มี คุณสมบัติเหมือนกับการทำงานจากวงจรจริง การซิมมูลชันวงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ พูลคอนโทรลที่เป็นแหล่ง จ่ายแรงดันให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง วงจรอเมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ่นแยก ประกอบด้วย ความต้านทานอเมเจอร์ รีแอกแตนส์อเมเจอร์และ แรงดันย้อนกลับ $U_q(n)$ ปกติแล้วจะใช้ แรงดันไฟตรงแทน แรงดันย้อนกลับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในการซิมมูลชัน แรงดันนี้ไม่สามารถเปลี่ยนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วมอเตอร์ ได้การซิมมูลชันในลักษณะนี้ทราบเพียงค่ากระแสอเมเจอร์ที่ แรงดันย้อนกลับค่าหนึ่งเท่านั้นและไม่เห็นผลการเปลี่ยนแปลง แรงดันย้อนกลับและกระแส เมื่อความเร็วรอบเปลี่ยนไป การซิมมูลชันแบบนี้ใช้ได้กับการทำงานเพียงควอดแรนต์เดียวเท่านั้นที่ความเร็วค่าหนึ่ง ไม่สามารถใช้กับการขับเคลื่อน ความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4 ควอดแรนต์ ดังนั้นการสร้างโมเดลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ่นแยก ภาพที่ 45 ให้แรงดันย้อนกลับ $U_q(n)$ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วมอเตอร์และสามารถเปลี่ยน ขั้วแรงดันย้อนกลับได้ตามแรงดันที่ขั้วมอเตอร์เปลี่ยนไป เมื่อขดลวดสร้างสนามไฟฟ้ากระตุ่นแยกมีค่าคงที่ ดูภาพที่ 44 เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยั้งที่จะต้องมีโมเดลให้มี คุณสมบัติเหมือนกับการทำงานจริงของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจึงได้ ผลการซิมมูลชันที่ถูกต้องเมื่อมีการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบ 4 ควอดแรนต์และ 2 ควอดแรนต์

การกำหนดโมเดลไทรสเตอร์กระแสลับที่ใช้วิเคราะห์กับโปรแกรม Pspice

ไทรสเตอร์สามารถนำกระแสได้เอง โดยให้สัญญาณพัลส์ทริกที่ขาเกตในช่วงเวลาสั้นๆ หลังจากไทรสเตอร์นำกระแส สัญญาณพัลส์ทริกปรากฏอยู่หรือไม่ปรากฏอยู่ไทรสเตอร์ยังคงนำกระแสอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งกระแสลดลงเป็นศูนย์ ไทรสเตอร์ก็จะหยุดนำกระแสเอง ไทรสเตอร์แบบไฟฟ้ากระแสสลับ (AC thyristor model) ในภาพที่ 42 ทำงานกับแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ และสร้างรูปแบบ การทำงานของไทรสเตอร์ด้วยวงจรทางไฟฟ้า ในภาพที่ 43 ให้มีคุณสมบัติเหมือนการทำงานของไทรสเตอร์ดังต่อไปนี้

1. ไทรสเตอร์นำกระแสได้โดยป้อนสัญญาณแรงดันทริกที่ขาเกตไทรสเตอร์เมื่อชั่วแอนโดเทียบกับคาโทดมีค่าเป็นบวก
2. ไทรสเตอร์ยังคงนำกระแสได้อย่างต่อเนื่องเมื่อกระแสไหลเกินค่ากระแสโวลต์ดิ่งผ่านชั่วแอนโดไปยังชั่วคาโทด

ภาพที่ 42



วงจรไทรสเตอร์ที่ใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ

3. ไทริสเตอร์หยุดนำกระแส เมื่อกระแสที่ไหลผ่านแอนโนดมีค่าต่ำกว่ากระแสโวลติจจนเป็นศูนย์การสวิตช์ของไทริสเตอร์สามารถทำให้อยู่ในรูปแบบ แรงดันควบคุมสวิตช์ (Voltage-control-switch) ในภาพที่ 43 และแหล่งจ่ายกระแสแบบโพลีโนเมียล

การนำกระแสของไทริสเตอร์สามารถกล่าวถึงตามขั้นตอนต่อไปนี้

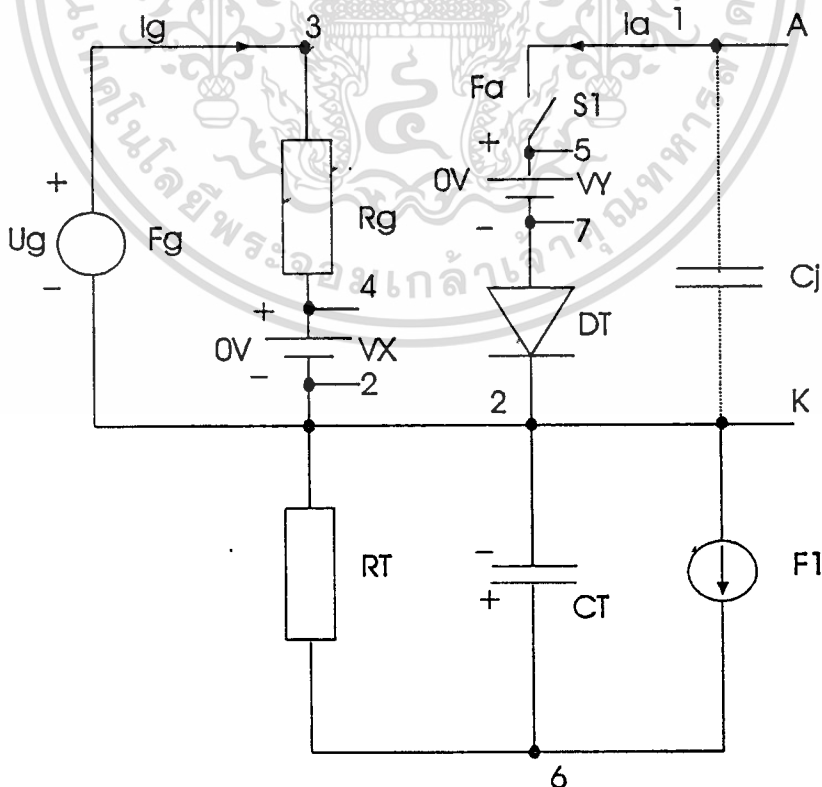
1. สัญญาณทริกที่ขาเกตไทริสเตอร์เป็นบวก ($+V_g$) ระหว่างโหนด 3 และ 2 และวัดกระแสเกตโดย V_x ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายแรงดันศูนย์ $I_g = I(V_x) = V_g/R_g$.
2. กระแสเกต I_g กระตุ้นให้ตัวควบคุมกระแสที่ควบคุมแหล่งจ่ายกระแส F_1 และสร้างกระแส $F_g = P1I_g = P_1I(VX)$ ทำให้ $F_1 = F_g + F_a$.
3. แหล่งจ่ายกระแส F_g จะสร้างแรงดัน U_r ตกคร่อม R_r ให้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว
4. เมื่อแรงดัน U_r เพิ่มขึ้นจากแรงดันศูนย์โวลต์ความต้านทาน R_s ของแรงดันควบคุมสวิตช์ (Voltage control switch, R_s) ลดลงจากสภาวะ R_{off} ไปสู่สภาวะ R_{on} .
5. ความต้านทาน R_s ลดลงและกระแสแอนโนด $I_a = I(V_y)$ ไหลเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันแอนโนดเทียบกับคาโทดมีค่าเป็นบวกการเพิ่มขึ้นของกระแสแอนโนด I_a เพื่อสร้างกระแส $F_a = P2I_a = P2I(V_y)$ ทำให้มีการเพิ่มแรงดัน U_r เพื่อควบคุมสวิตช์ S_1 .
6. ขั้นตอนที่ผ่านมาเป็นการสร้างให้เกิด เงื่อนไขรีเจนเนอเรทีฟสำหรับ ชับสวิตช์ให้มีความต้านทานต่ำและสวิตช์ยังคงนำกระแสต่อไปได้ถึงแม้ว่า สัญญาณแรงดัน V_g ถูกปลดออกจากขาเกตไทริสเตอร์
7. กระแสแอนโนด I_a ไหลต่อเนื่องตลอดไป เมื่อแรงดันแอนโนดเทียบกับคาโทดมีค่าเป็นบวกและสวิตช์ยังคงอยู่ในสภาวะนำกระแสที่แหล่งจ่ายกระแส $F1$ เป็นผลรวมของกระแสเกต I_g กับกระแสแอนโนด I_a ดังนั้น $F1 = F_g + F_a$ ระหว่างไทริสเตอร์หยุดนำกระแสและกระแสเกตมีค่าเท่ากับศูนย์นั่นคือ $I_g = 0$ และ $F_g = 0$

การหยุดนำกระแสของไทริสเตอร์สามารถอธิบายโดยขั้นตอนดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. กระแสแอมแปร์ I_g ลดลงไปสู่ค่าลบแหล่งจ่ายกระแส F1 ถูกรีเวอร์สเพื่อให้แรงดันสัญญาณเกิด V_g ปรากฏอยู่ในช่วงสั้นๆ
 2. เมื่อแหล่งจ่ายกระแส F1 มีค่าเป็นลบคาปาซิเตอร์ CT คายประจุผ่านความต้านทาน RT และแหล่งจ่ายกระแส F1
 3. เมื่อแรงดัน U_g ลดลงไปยังระดับแรงดันต่ำความต้านทานของสวิทช์ S1 เพิ่มขึ้นจากความต้านทานค่าต่ำ R_{on} ไปสู่ความต้านทานค่าสูง R_{off}
 4. ขั้นตอนที่ผ่านมาจะสร้างเงื่อนไข การรีเจนเนอเรทีฟขึ้นอีกครั้งหนึ่งสำหรับการบังคับให้ความต้านทานลดไปยังค่า R_{off} อย่างรวดเร็วตามแรงดัน U_g ลดลงเป็นศูนย์โวลต์
- การทำงานในโหมดนี้ของไทรสเตอร์ที่ใช้กับไฟสลับเหมาะ สำหรับใช้กับวงจรคอนเวอร์เตอร์ ไดโอด DT ทำหน้าที่ป้องกันการกลับทิศทางกระแสผ่านไทรสเตอร์ที่เป็นผลมาจากการทริกไทรสเตอร์ตัวอื่นในวงจรเดียวกันให้นำกระแส

ภาพที่ 43



การพิจารณาตัวแปรของไทรสเตอร์ที่มีอยู่ใน data sheet ถูกเลือกจาก ค่าที่เหมาะสมเพื่อกำหนดให้มีคุณสมบัติเหมือนกับสภาวะการทำงานจริงของไทรสเตอร์

1. แรงดันควบคุมสวิตช์คือ V_{on} และ V_{off} กำหนดให้ $V_{on}=1V$ และ $V_{poff}=0V$ (กำหนดจากผู้ออกแบบ)
2. เลือก R_T ให้เท่ากับ 1Ω
3. เลือก R_{on} จากสภาวะไทรสเตอร์นำกระแส $R_{on}=V_{Tm}/I_{Tm}$ ที่ 25c จากคุณสมบัติไทรสเตอร์นำกระแสใน datasheet $V_{Tm}=1.4V$ $I_{Tm}=70A$ ดังนั้น $R_{on}=1.4/70=0.02\Omega$
4. ความต้านทาน R_{off} เลือกจากสภาวะไทรสเตอร์หยุดกระแส $R_{off}=V_{Tm}/I_{Tm}$ ที่ 25c จาก data sheet U_{DRM} ที่ $I_{DRM}=15mA$ ดังนั้น $R_{off}=800/15*10^3=53K\Omega$

ความต้านทานสวิตช์ R_s หาได้จากสมการที่ (6.1)

$$R_s = R_{on} \frac{R_{off}}{R_{on}} \left[0.5 + 2 \left(\frac{U_{on} + U_{off}}{U_{on} - U_{off}} \right)^3 \right] - 1.5 \left(U_R - 0.5 \left(\frac{U_{on} + U_{off}}{U_{on} - U_{off}} \right) \right) \dots \dots \dots (6.1)$$

เมื่อ $U_R=0$ และ $R_s=R_{off}$ เมื่อ $U_R=1$, $R_s=R_{on}$ ดังนั้น U_R เปลี่ยนจากแรงดัน 0 ไปสู่แรงดัน 1 โวลต์ความต้านทาน R_s เปลี่ยนจาก R_{off} ไปยัง R_{on}

5. ค่าของ P_2 เป็นสัมประสิทธิ์การหยุดนำกระแสสำหรับแรงดันเกิดเป็นศูนย์ $I_c=0$ ที่ค่าแรงดันสูงสุดเทียบกับแรงดันคาโทดให้ U_{R1} เป็น 20% ของ U_R นั่นคือ $U_{R1}=0.2$ และ U_R สวิตช์จะหยุดนำกระแสแรงดัน U_{R1} และกระแสแอนโอดหาได้เพียงกรณีเดียวจาก สมการที่ (6.2)

$$U_{R1} = P_2 I_a = P_2 \frac{U_{DRM}}{R_{s1}} \dots \dots \dots (6.2)$$

$$P_2 > U_R R_{s1} / U_{DRM}$$

กระแสแลตซิง I_L ทำให้สวิตช์ S1 นำกระแสสูงสุดที่ $U_R=1V$ นั่นคือ $P_2 > U_{R1} / I_L$ ค่าของ P_2 จะต้องกำหนดจากเงื่อนไขในสมการที่ (6.3)

$$\frac{U_R}{I_L} < P_2 < \frac{U_{R1} R_{S1}}{U_{DRM}} \dots \dots \dots (6.3)$$

จาก data sheet กระแสแลตซิง $I_L=100mA$

$$\frac{1}{100mA} < P_2 < 0.2 * 53k\Omega / 800V \text{ หรือ } 10 < P_2 < 13.25 \text{ เลือกค่า } P_2=12$$

6. ถ้าคาปาซิเตอร์ C_T มีค่าน้อยมากๆ ไทริสเตอร์จะหยุดนำกระแสก่อนกระแสแอโนดกลายเป็นศูนย์ถ้า C_T มีค่าใหญ่เพียงพอที่ทำให้ไทริสเตอร์นำกระแสอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับเป็นศูนย์และเลือกค่า $C_T R_T$ ให้มีค่าใหญ่เพียงพอในการหยุดนำกระแส (turnoff time) ของไทริสเตอร์และเวลาคงที่ $C_T R_T$ ควรจะน้อยกว่าคาบเวลา T ของแหล่งจ่ายแรงดันและเป็นเงื่อนไขทั่วไปโดยมีความสัมพันธ์ $C_T R_T \leq 0.01T$ และเลือก $C_T=10\mu F$

7. ค่าความต้านทานเกต R_g เลือกจาก datasheet $V_g=3V$ ที่ $I_g=70mA$ จะได้ $R_g=V_g/I_g=3V/70mA=42\Omega$

8. จากค่า R_g ที่หาได้คูณด้วย P_1 และกำหนดจาก $U_{on}=R_T P_1 I_g$ ให้โดย

$$P_1 = \frac{U_{on}}{R_g I_g} = \frac{U_{on}}{R_T U_{g(peak)} / R_g} = \frac{U_{on} R_g}{R_T U_{g(peak)}} = \frac{1 * 42}{1 * 3} = 14 \dots \dots \dots (6.4)$$

ที่ $V_{g(peak)}$ เป็นค่าแรงดันสูงสุดของพัลส์ทริกไทริสเตอร์ กระแสจากแหล่งจ่ายกระแส F1 ไหลผ่าน C_T สัญญาณเกตจะต้องมีช่วงเวลาเพียงพอที่จะให้เกิดสภาวะการนำกระแสของไทริสเตอร์แรงดัน U_{R2} เกิดขึ้นขณะให้สัญญาณทริกเกตเพียงอย่างเดียวสำหรับกระแสเป็นศูนย์ให้โดย

$$U_{R2} = R_T P_1 I_g (1 - e^{-t / R_T C_T}) \dots \dots \dots (6.5)$$

เวลา $t=t_a$ ที่ $U_{R2}=U_{on}$ ให้เกิดเวลาหน่วงเมื่อไทรสเตอร์นำกระแสผลที่เกิดจาก C_T และแรงดัน U_{R2} ถูกหน่วงชั่วขณะทำให้ไม่เท่ากับ $U_{on}=R_T P_1 I_0$ และ P_1 ต้องมีค่ามากเพื่อให้ไทรสเตอร์นำกระแสมีค่าเป็น 5 เท่าของค่า P_1 ที่ให้โดยสมการ $P_1=60$

โมเดลไทรสเตอร์ที่เขียนอยู่ในรูป subcircuit

โมเดลไทรสเตอร์สามารถเขียนให้อยู่ใน subcircuit สวิตช์ S1 ถูกควบคุมโดยแรงดันควบคุม UR และต่ออยู่กับโนด 6 และ 2 ดังในภาพที่ 43 ตัวแปรสวิตช์สามารถที่จะปรับได้ตามต้องการและแยกอิสระจากตัวแปรไทรสเตอร์

Subcircuit for ac thyristor model

```
.SUBCKT SCR 1 2 3 2
*
* model anode cathode +control -control
* name voltage voltage
S1 1 5 6 2 SMODE;Switch
RG 3 4 50
VX 4 2 DC 0V
VY 5 7 DC 0V
DT 7 2 DMODE
RT 6 2 1
CT 6 2 10UF
F1 2 6 POLY(2) VX VY 0 60 12
.MODEL SMODE VSWITCH (RON=0.02 ROFF=53E+3 VON=1V VOFF=0V)
.MODEL DMODE D(IS=2.2E-15 BV=800V TT=0 CJO=0)
.ENDS SCR ;END SUBCIRCUIT OF SCR
```

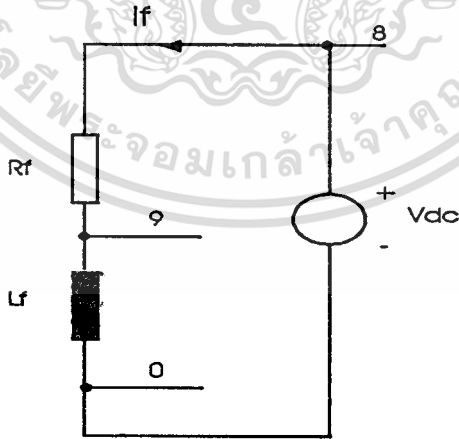
การกำหนดโมเดลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ที่ใช้วิเคราะห์กับโปรแกรม Pspice

คุณสมบัติมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก เมื่อขับเคลื่อนให้มอเตอร์เริ่มหมุนจนถึงค่าพิกัดความเร็วรอบและมอเตอร์จะสร้างแรงดันย้อนกลับที่โรเตอร์ขณะหมุนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วรอบและเป็นไปตามสมการที่ 6.5

$$U_q(n) = K\omega I_f \dots \dots \dots (6.5)$$

แรงบิดที่เพลามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสเมเจอร์ที่ไหลเข้ามอเตอร์เพียงอย่างเดียวเพราะว่า กระแสขดลวดกระตุ้นแยกมีค่าคงที่ดังใน ภาพที่ 44 แรงบิดที่เพลามอเตอร์เป็นไปตามสมการที่ (6.6)

ภาพที่ 44



วงจรถดลวดกระตุ้นแยกของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

$$T_d = K I_a I_f \dots \dots \dots (6.6)$$

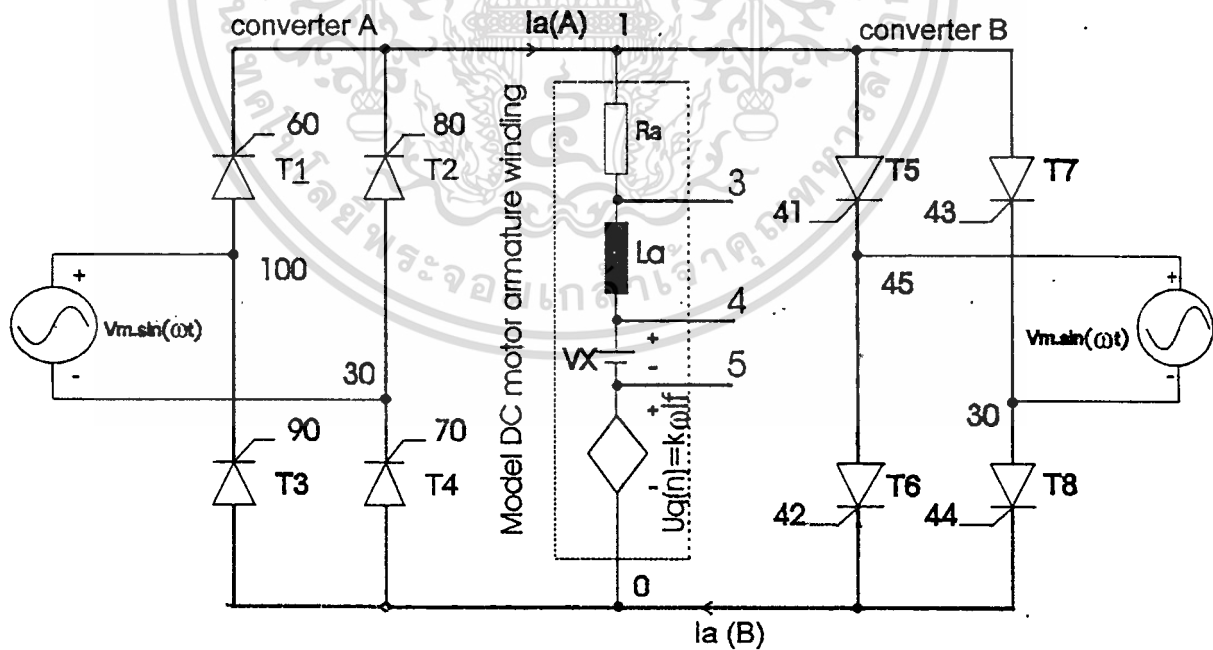
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์การไหลกระแสเมเจอร์ในช่วง การตอบสนองทรานเซียนัล จากสมการที่ได้กล่าวมาแล้วไม่เพียงพอในการวิเคราะห์จึงกำหนดความสัมพันธ์ของ สมการไดนามิกขึ้นมาอีกสมการหนึ่งที่อยู่ในรูป ความสัมพันธ์ความเร็วรอบมอเตอร์และแรงบิดที่เพลามอเตอร์ในสมการที่ 6.7

$$T_d = j d\omega/dt + B\omega + TL \dots\dots\dots(6.7)$$

ความสัมพันธ์สมการไดนามิกจากสมการที่ 6.7 เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงถูกขับเคลื่อนในสภาวะคงตัวทอมอัตราเร่งของ $d\omega/dt = 0$ แรงบิดที่เพลามอเตอร์เกือบเท่ากับ แรงบิดที่โหลด ถ้าทอม B ω มีค่าน้อย จากสมการ (6.7) นำมาสร้างโมเดลโดยใช้ วงจรไฟฟ้าที่มีอยู่ในโปรแกรม Pspice เพื่อเลียนแบบการทำงานของมอเตอร์ให้เป็นไปตามทฤษฎี คุณสมบัติมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกที่จะได้กล่าวดังต่อไปนี้

ภาพที่ 45



คู่อัลคอนเวอร์เตอร์แบบฟูลคอนโทรลไม่มีวงจรระแสชนิด 1 เฟส

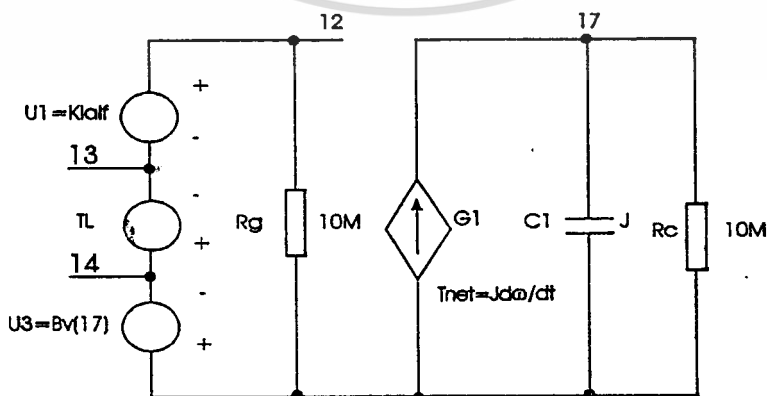
วงจรอเมเจอร์ของมอเตอร์ประกอบด้วยความต้านทานอเมเจอร์ R_a อินดักเตอร์อเมเจอร์ L_a และแรงดันย้อนกลับ $U_q(n)$ ดังภาพที่ 45 ในส่วนของ Model DC motor armature winding ความเร็วรอบมอเตอร์หาได้จากการอินทิเกรตสมการที่ 6.7 คือ

$$\omega = \frac{1}{J} \int (T_d - T_L - B\omega) dt \dots\dots\dots (6.8)$$

$$T_{net} = T_d - T_L - B\omega \dots\dots\dots (6.9)$$

จากสมการที่ (6.8) ในหนึ่งสมการมีค่าตัวแปรอยู่สองตัว การวิเคราะห์จะต้องใช้วิธี นิวเมอริคอลทางคณิตศาสตร์ขั้นสูงแต่ในโปรแกรม Pspice สามารถซิมูเลชัน คุณสมบัติมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าใกล้เคียงมากกับผลการทดลอง การหาค่าความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้จากวงจร ในภาพที่ 46 โดยสร้างจากวงจรไฟฟ้าในโปรแกรม Pspice แรงดันที่โหนด 12 ในวงจรโครงข่ายที่เกิดจากการหักล้างกันระหว่างแรงบิดที่เพลามอเตอร์กับแรงบิดไหลรวมกับแรงเฉื่อยอยู่ในรูปแรงดันใช้ ควบคุมแหล่งจ่ายกระแส $G1$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันแรงบิดสุทธิและมีอัตราขยายเท่ากับ 1 โดยใช้หลักการแรงดันควบคุมกระแส เมื่อแหล่งจ่ายกระแส $G1$ จ่ายกระแสให้โครงข่ายคาปาซิเตอร์เพื่อทำการ อินทิเกรตแรงบิดสุทธิจากสมการที่ (6.8) ก็จะได้ความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและนำค่านี้แทนกลับไปในสมการที่ (6.5) ก็จะได้ความสัมพันธ์แรงดันย้อนกลับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง $U_q(n)$ ที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วรอบมอเตอร์

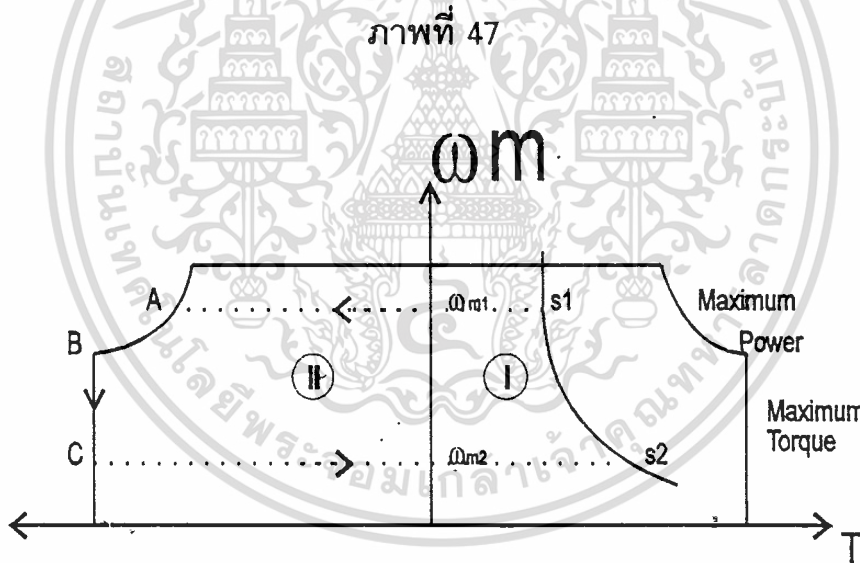
ภาพที่ 46



โครงข่ายอินทิเกรตแรงบิดสุทธิของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

การขี้มมูลักษณ์ทิศทางการไหลกระแสเมเจอร์ เมื่อเบรคความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกในทิศทางความเร็วทวนเข็มนาฬิกา

การขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ที่สภาวะคงตัวในทิศทาง-ทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกา เมื่อต้องการลดความเร็วรอบมอเตอร์โดยการเบรคความเร็วรอบมอเตอร์ทางไฟฟ้าโดยใช้ตุ้ลคอนเวอร์เตอร์ (คอนเวอร์เตอร์แบบฟูลคอนโทรลสองชุดต่อขนานแบบกลับขั้ว) ภาพที่ 45 เพื่อทำหน้าที่รับพลังงานรีเจนเนอเรทีฟที่โรเตอร์ขณะหมุนป้อนกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟสลับมีทิศทางการไหลของกระแสเมเจอร์แบบกลับทิศ ดังในภาพที่ 47 และเบรคความเร็วรอบลดลงจาก 200 เหลือ 150 รอบ/นาที

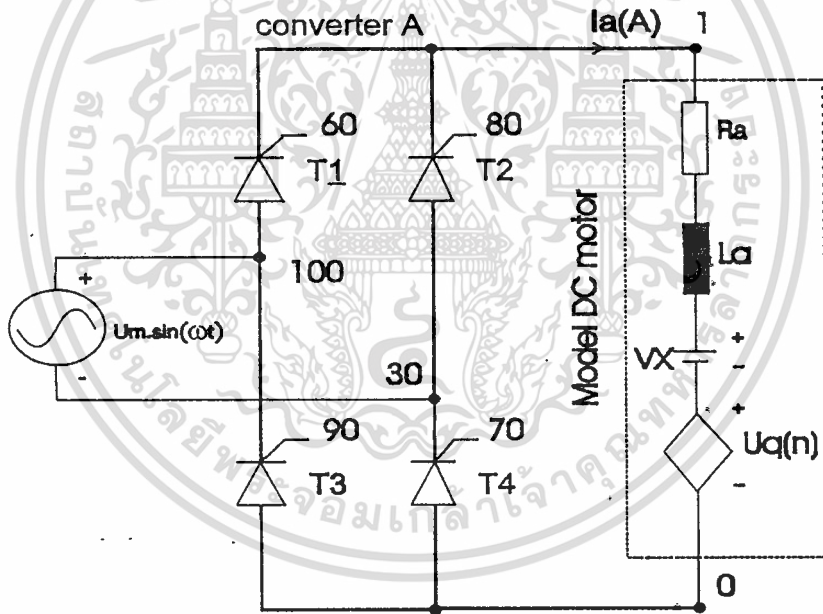


การเบรคความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกา จากควอแดรนต์ที่ 1 ไปสู่ควอแดรนต์ที่ 2

- 1.คอนเวอร์เตอร์ชุด A ขับเคลื่อนความเร็วรอบในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา (ควอแดรนต์ที่ 1) ดังในภาพที่ 48 แรงบิดที่เพลามอเตอร์สร้างขึ้นมีค่าเป็นบวกและแรงดันย้อนกลับเป็นบวกด้วยในสภาวะคงตัวที่จุด S1 สำหรับความเร็วรอบ ω_{m1} สภาวะนี้แรงบิดที่เพลามอเตอร์เท่ากับแรงบิดโหลด เมื่อต้องการลดความเร็วรอบมอเตอร์ให้ไปสู่ค่าใหม่ที่ ω_{m2} ตัวควบคุมการขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์สั่งให้มีการโอนย้ายการทำงานจากคอนเวอร์เตอร์ชุด A ไปสู่คอนเวอร์เตอร์

จุด B ทำงานในควอดแรนต์ที่ 2 การเคลื่อนที่จากตำแหน่ง S1 ไปสู่ตำแหน่ง A ให้อธิบายความ-
 เร็วรอบมอเตอร์จะมีค่าคงที่เนื่องจากส่วนทางกลไม่สามารถเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดได้ซึ่ง
 เป็นช่วงเวลาสั้นๆ แรงบิดมอเตอร์จะมีค่าลบสูงสุด -T ในควอดแรนต์ที่ 2 แต่ไม่เกินค่าลิมิตของ
 กระแสเมเจอร์ในรูปควบคุมกระแสไม่ให้เกิดค่าสูงสุดของมอเตอร์ที่ยอมได้ เมื่อกระแสเม-
 เจอร์ถูกป้อนกลับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความเร็วรอบมอเตอร์จะลดลงจากสมการกำลังไฟฟ้า
 มอเตอร์ $PD = T_c \omega_m$ แรงบิดที่เพลามอเตอร์ก็จะลดลงด้วยเพื่อรักษาให้ PD ให้มีค่าคงที่ตามเส้น
 ทาง AB ส่วนเส้นทางในช่วง BC เป็นช่วงแรงบิดมอเตอร์คงที่ การลดความเร็วรอบมอเตอร์จึง
 ด้วยหลักการเบรกความเร็วรอบทางไฟฟ้าเพื่อรีเจนเนอเรทีฟพลังงานที่โรเตอร์ขณะหมุนกลับไปสู่

ภาพที่ 48

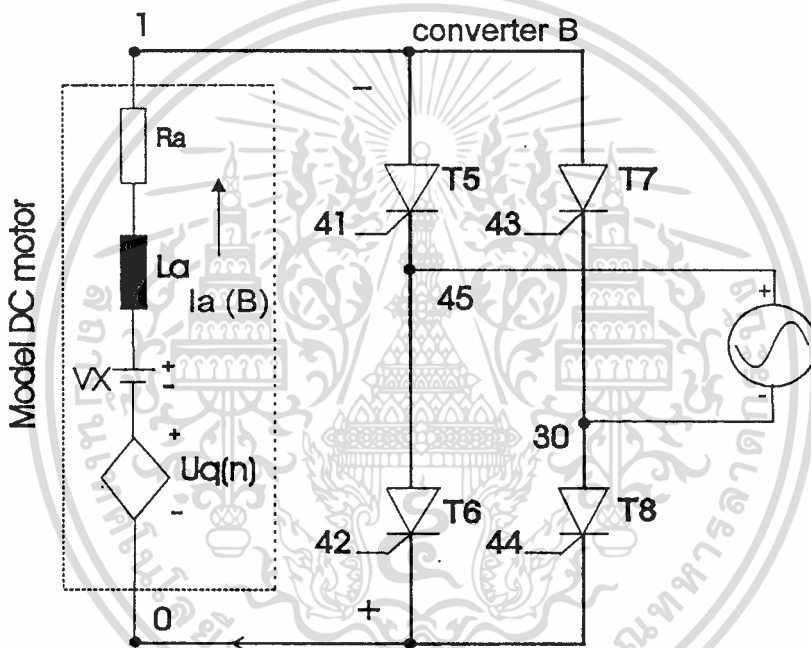


คอนเวอร์เตอร์จุด A นำกระแสใน โหมดมอเตอร์ริงควอดแรนต์ที่ 1 ขับเคลื่อนความเร็ว-
 รอบในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา มุมนำกระแส $\alpha=60$ แรงบิดโหลด $T_d=1\text{Kg}$ ก่อนเกิดการเบรก
 ความเร็วรอบ

แหล่งจ่ายไฟสลับกระแสเมเจอร์ไหลออกจากมอเตอร์มีทิศทางกระแสไหลเป็นลบ (-Ia) แรงดันที่
 ขั้วมอเตอร์ในควอดแรนต์ที่ 2 ดังในภาพที่ 49 มีขั้วเป็นลบทำให้ขั้วแรงดันย้อนกลับมอเตอร์ไม่
 เปลี่ยนแปลงและความเร็วรอบมอเตอร์ลดลงไปที่จุด C ซึ่งเท่ากับความเร็วรอบที่ ω_2 ดังนั้นตัว

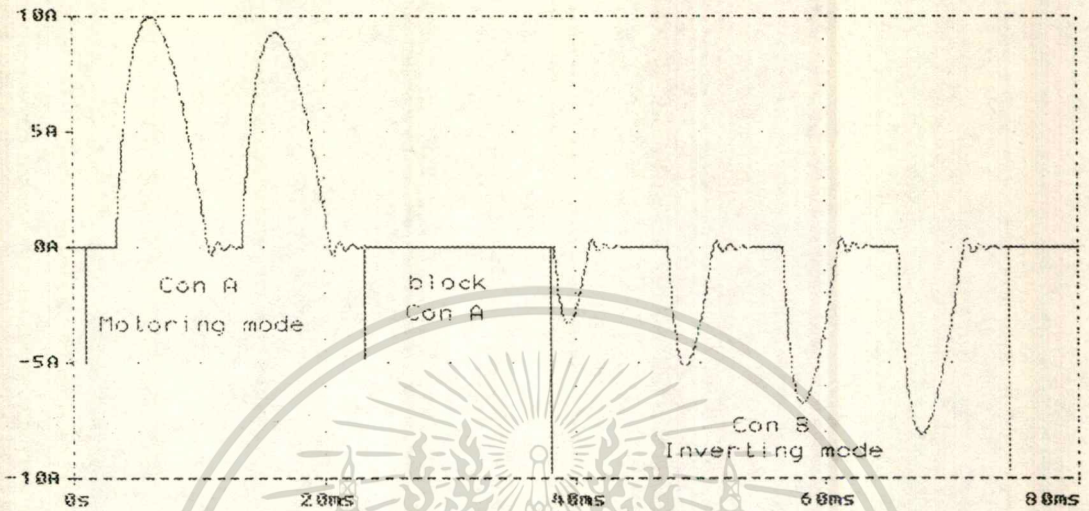
ควบคุมสั่งให้โอนย้ายการทำงานจากคอนเวอร์เตอร์ชุด B กลับไปสู่คอนเวอร์เตอร์ชุด A ที่ค่าความเร็วรอบใหม่จุด S2 เป็นการทำงานในสภาวะคงตัว ผลการซิมูเลชันทิศทางการไหลกระแส อเมเจอร์ ดูภาพที่ 50 และแรงดันที่ขั้วมอเตอร์ ดูในภาพที่ 52 และผลจากการวัดกระแสและแรงดัน ดูในภาพที่ 51 และ 53

ภาพที่ 49



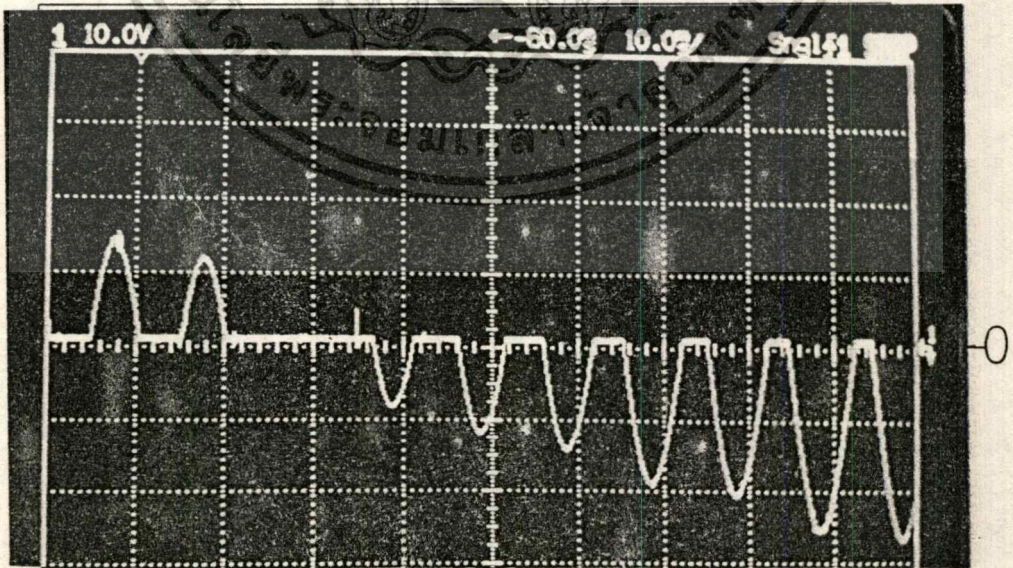
คอนเวอร์เตอร์ชุด B นำกระแส ในโหมดอินเวอร์ตึงควอดแรนต์ที่ 2 ขับเคลื่อนความเร็วรอบใน ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา มุมนำกระแส $\alpha = -150$ แรงบิดไหลด $T_d = 1\text{Kg}$ หลังเกิดการเบรกความเร็วรอบ

ภาพที่ 50



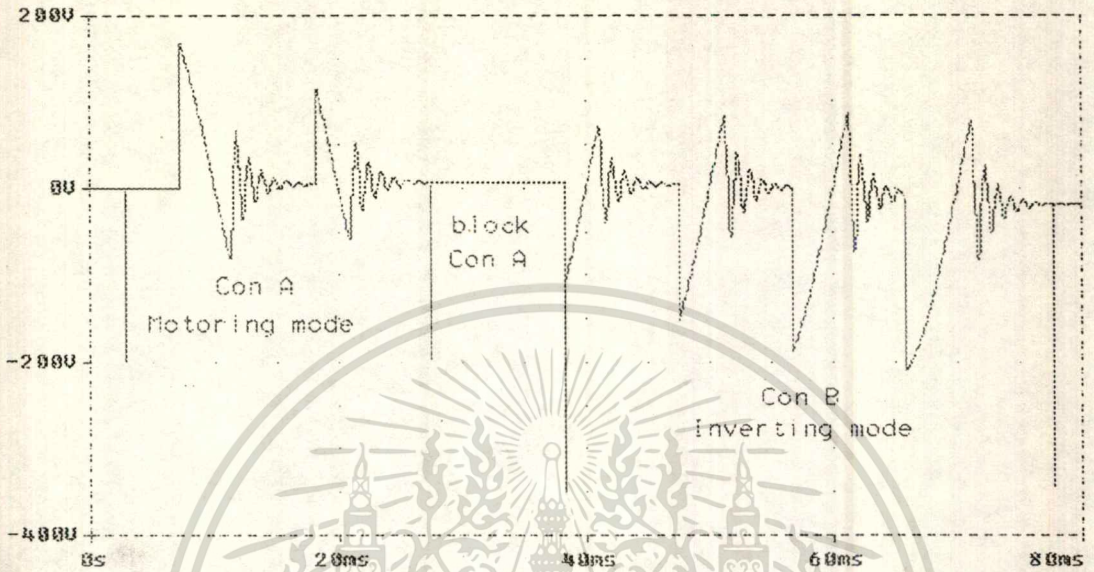
ผลการชิมมูละชั้นกระแสเมเจอร์โหมดมอเตอร์วิ่ง (ควอแดรนต์ที่ 1) และโหมดอินเวอร์ตติ้ง (ควอแดรนต์ที่ 2)

ภาพที่ 51



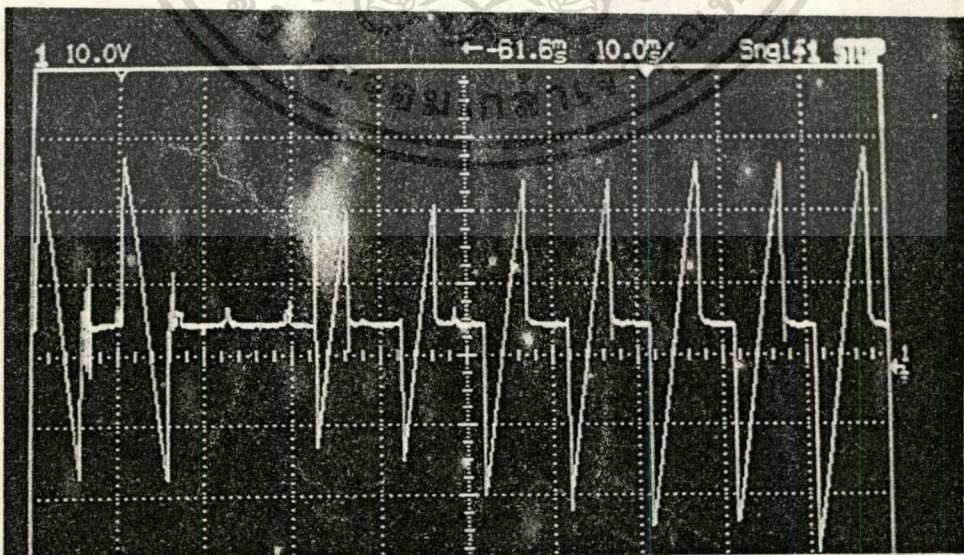
ผลการวัดกระแสเมเจอร์โหมดมอเตอร์วิ่ง (ควอแดรนต์ที่ 1) และโหมดอินเวอร์ตติ้ง (ควอ-
 เอกสาแตรนต์ที่ 2) ที่ได้จากกักรทดลองรใช้ของเท่ากับ 10A ษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 52



ผลการชิมมูละชั้นแรงดันที่ข้ามมอเตอร์จากโหมดมอเตอร์วิ่ง (ควอดแรนต์ที่ 1) ไปสู่โหมดอินเวอร์ตติ้ง (ควอดแรนต์ที่ 2)

ภาพที่ 53

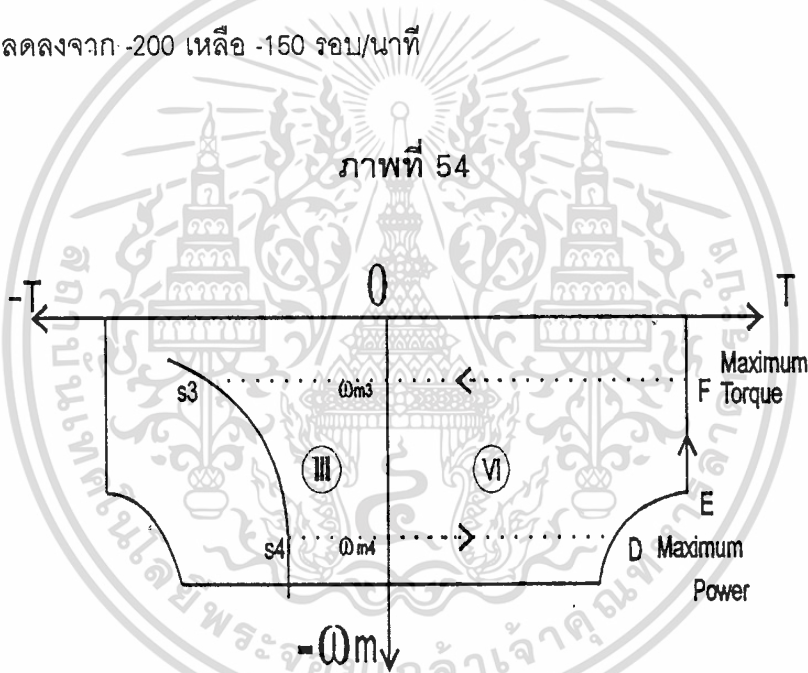


ผลการวัดแรงดันที่ข้ามมอเตอร์จากโหมดมอเตอร์วิ่ง (ควอดแรนต์ที่ 1) ไปสู่โหมดอินเวอร์ตติ้ง (ควอดแรนต์ที่ 2) ที่ได้จากการทดลอง 1 ช่องเท่ากับ 100V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขมูเลชั่นทิศทางการไหลกระแสเมเจอร์เมื่อเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกในทิศทางความเร็วรอบตามเข็มนาฬิกา

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก ที่สภาวะคงตัวในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกา เมื่อต้องการลดความเร็วรอบมอเตอร์โดยการเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ทางไฟฟ้าโดยใช้คู่อัลคอนเวอร์เตอร์ (คอนเวอร์เตอร์แบบฟูลคอนโทรลสองชุดต่อขนานแบบกลับขั้ว) ภาพที่ 45 เพื่อทำหน้าที่รับพลังงานรีเจนเนอเรทีฟที่โรเตอร์ขณะหมุนป้อนกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟสลับมีทิศทางการไหลของกระแสเมเจอร์แบบกลับทิศ ดังในภาพที่ 54 และเบรกความเร็วรอบลดลงจาก -200 เหลือ -150 รอบ/นาที

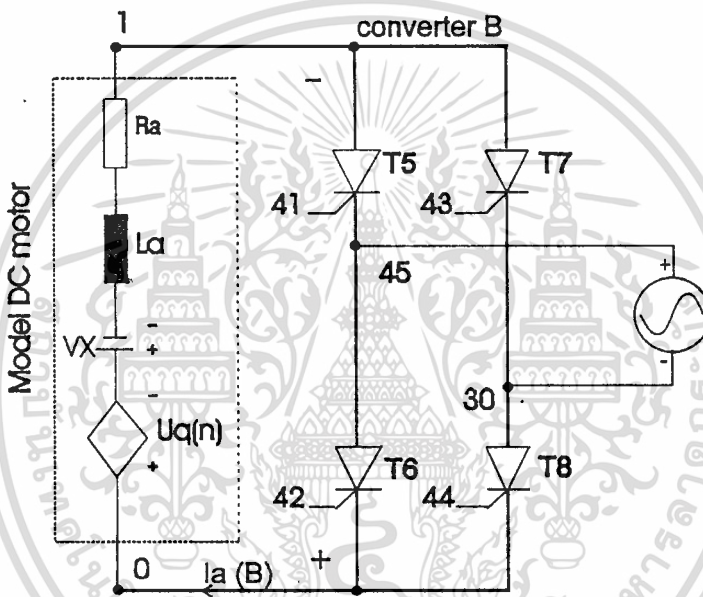


การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในทิศทางความเร็วรอบตามเข็มนาฬิกา จากควอดแรนท์ที่ 3 ไปสู่ควอดแรนท์ที่ 4

คอนเวอร์เตอร์ชุด B ขับเคลื่อนความเร็วรอบในทิศทางตามเข็มนาฬิกา (ควอดแรนท์ที่ 3) การเคลื่อนที่ตามเส้นทางเดินในระนาบ แรงบิด-ความเร็วรอบ จากควอดแรนท์ที่ 4 ไปสู่ควอดแรนท์ที่ 3 เหมือนกับการเคลื่อนที่เมื่อ เบรกความเร็วรอบในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาแต่จะขอกกล่าว

เพียงสั้นๆ ดังในภาพที่ 54 แรงบิดที่เพลามอเตอร์สร้างขึ้นมีค่าเป็นลบและแรงดันย้อนกลับเป็นลบด้วยในสภาวะคงตัวที่จุด S4 สำหรับความเร็วรอบ ω_{m4} สภาวะนี้แรงบิดที่เพลามอเตอร์เท่ากับแรงบิดโหลด เมื่อต้องการลดความเร็วรอบมอเตอร์ให้ไปสู่ค่าใหม่ ตัวควบคุมการขับเคลื่อนความเร็วรอบมอเตอร์สั่งให้มีการโอนย้ายการทำงานจากคอนเวอร์เตอร์ชุด B ไปสู่คอนเวอร์เตอร์-

ภาพที่ 55

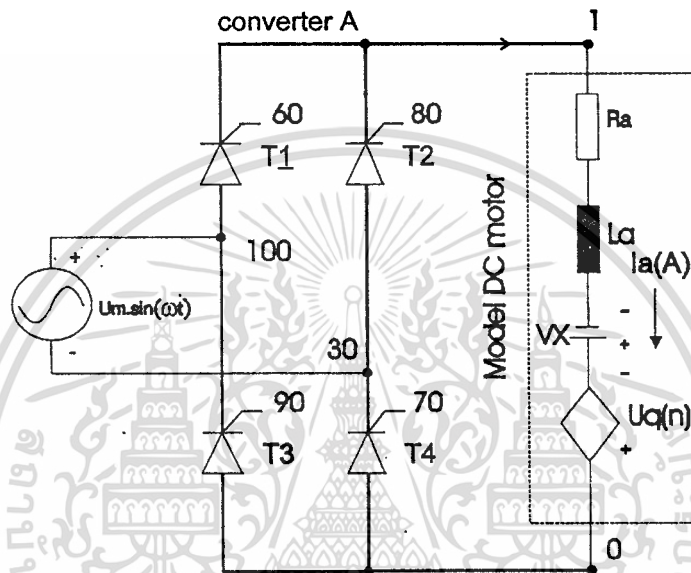


คอนเวอร์เตอร์ชุด B นำกระแสใน โหมดมอเตอร์ริงควอเตอร์ที่ 3 ขับเคลื่อนความเร็วรอบในทิศทางตามเข็มนาฬิกา มุมนำกระแส $\alpha = -60$ แรงบิดโหลด $T_d = -1\text{Kg}$ ก่อนเกิดการเบรกความเร็วรอบ

ชุด A ทำงานในควอเตอร์ที่ 4 เป็นการลดความเร็วรอบมอเตอร์ลงด้วยหลักการ เบรกความเร็วรอบทางไฟฟ้า เพื่อรีเจนเนอเรทีฟพลังงาน ที่โรเตอร์ขณะหมุนกลับไปสู่แหล่งจ่ายไฟสลับกระแส อเมเจอร์ไหลออกจาก มอเตอร์มีทิศทางกระแสไหลเป็นบวก (I_a) แรงดันที่ขั้วมอเตอร์ในควอเตอร์ที่ 4 ดังในภาพที่ 55 มีขั้วเป็นบวกทำให้ ขั้วแรงดันย้อนกลับมอเตอร์ไม่เปลี่ยนแปลงและความเร็วรอบมอเตอร์ลดลงไปที่จุด F ซึ่งเท่ากับความเร็วรอบที่ ω_3 ดังนั้นตัวควบคุมสั่งให้โอนย้ายการทำงานจากคอนเวอร์เตอร์ชุด A กลับไปสู่คอนเวอร์เตอร์ชุด B ที่ค่าความเร็วรอบใหม่จุด S3 เป็นการทำงานในสภาวะคงตัว ผลการซิมูเลชันทิศทางการไหลกระแสอเมเจอร์ ดังในภาพที่

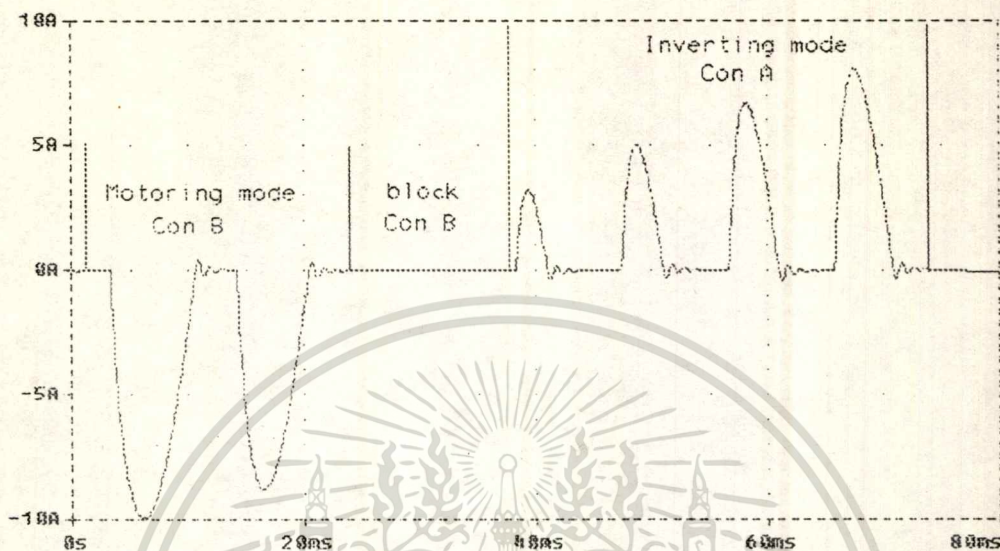
57 และ แรงดันที่ขั้วมอเตอร์ ดูในภาพที่ 59 และผลจากการวัดกระแสและแรงดันที่ขั้วมอเตอร์ ดูได้ในภาพที่ 58 และ ภาพที่ 60

ภาพที่ 56



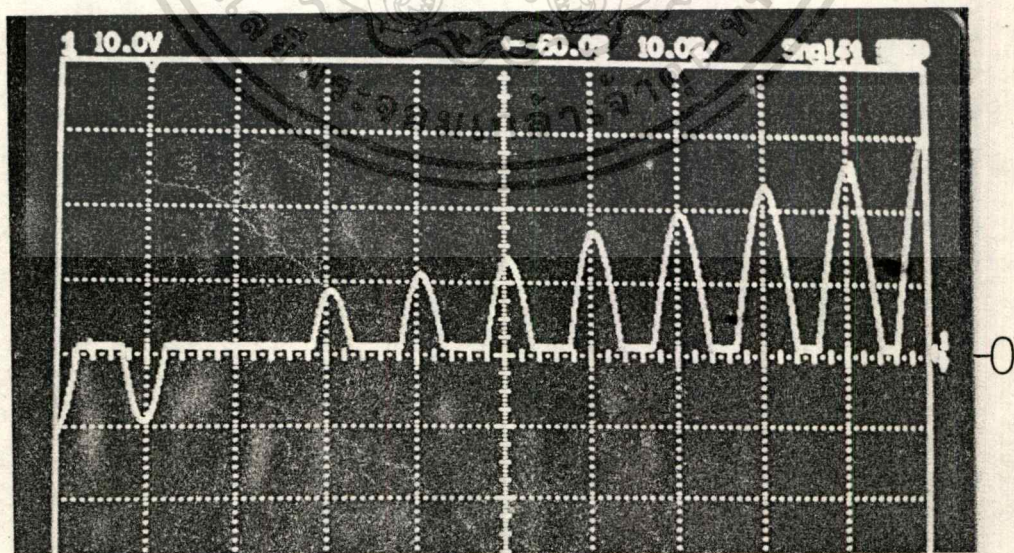
คอนเวอร์เตอร์ชุด A นำกระแสใน โหมดอินเวอร์ตถึงควอดแรนต์ที่ 4 ขับเคลื่อนความเร็วรอบในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา มุมนำกระแส $\alpha=150$ แรงบิดโหลด $T_d=-1\text{Kg}$ หลังเกิดการเบรกความเร็วรอบ

ภาพที่ 57



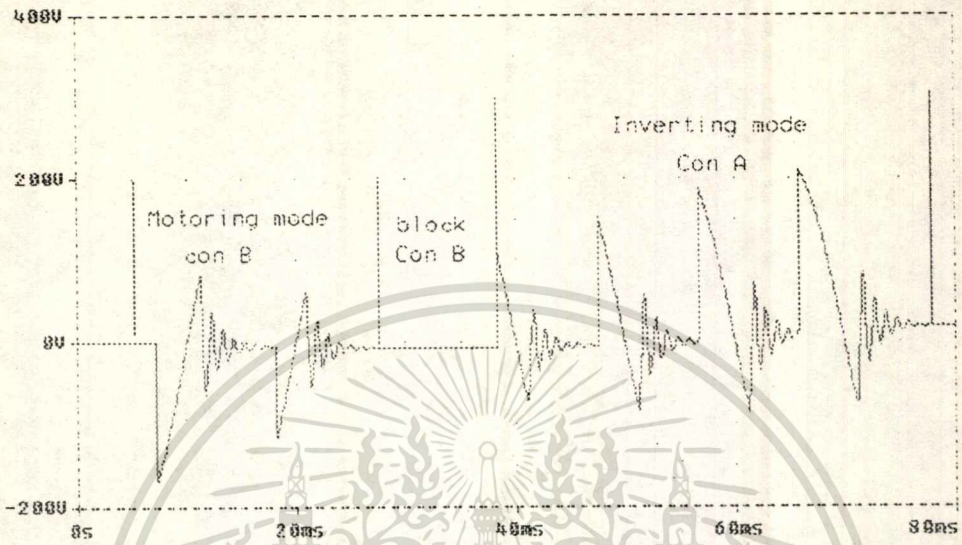
ผลการชิมมูลักษณ์กระแสเมเจอร์จาก โหมดมอเตอร์ริง (ควอแดรนต์ที่ 3) ไปสู่มอเตอร์
อินเวอร์ตริง (ควอแดรนต์ที่ 4)

ภาพที่ 58



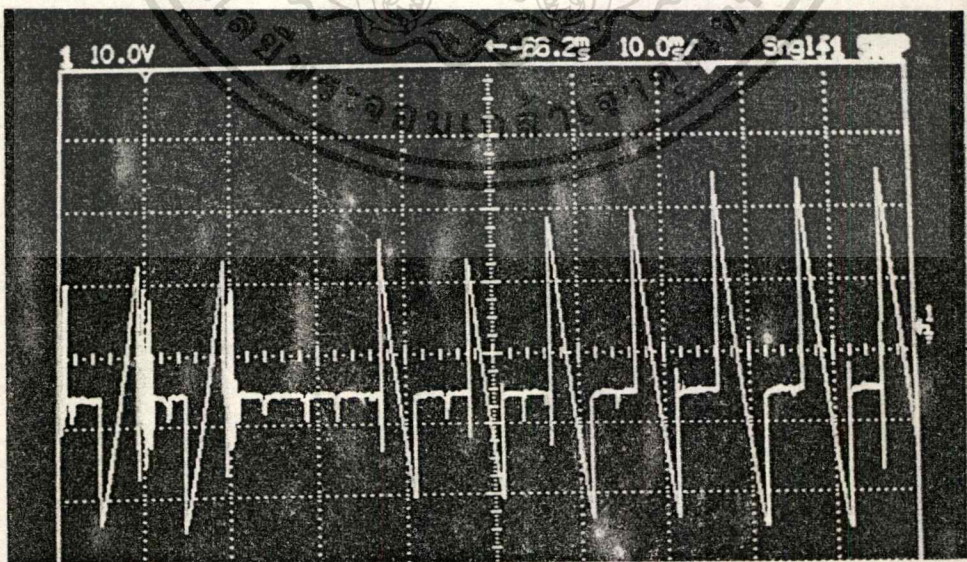
ผลการวัดกระแสเมเจอร์จาก โหมดมอเตอร์ริง (ควอแดรนต์ที่ 3) ไปสู่มอเตอร์อินเวอร์ตริง
เอกส (ควอแดรนต์ที่ 4) ที่ได้จากการทดลอง 1 ช่องเท่ากับ 10A นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 59



ผลการขิมมูละชั้นแรงดันที่ข้ามมอเตอร์จาก โหมดมอเตอร์วิ่ง (ควอแดรนท์ที่ 3) ไปสู่ โหมดอินเวอร์ตติ้ง (ควอแดรนท์ที่ 4)

ภาพที่ 60



ผลการวัดแรงดันที่ข้ามมอเตอร์จาก โหมดมอเตอร์วิ่ง (ควอแดรนท์ที่ 3) ไปสู่โหมดอินเวอร์ตติ้ง (ควอแดรนท์ที่ 4) ที่ได้ผลจากการทดลอง 1 ซึ่งเท่ากับ 100V อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

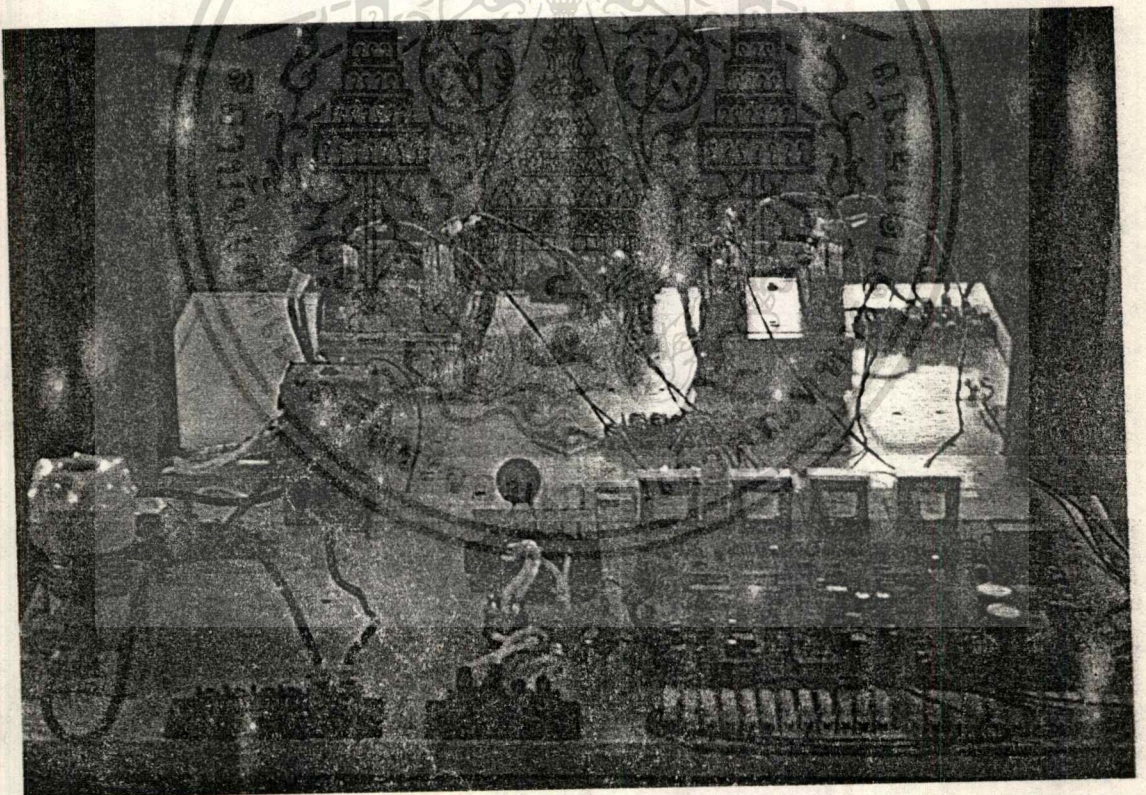
การออกแบบ สร้างและพัฒนาระบบควบคุมการรีเจนเนอเรทีฟพลังงานเกิดขึ้นที่โรเตอร์ ขณะหมุนแบบกระแสเมเจอร์ไหลกลับทิศจากแหล่งจ่ายไฟตรงกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟสลับโดยใช้ คู่อัลคอนเวอร์เตอร์ไม่มีวงจรถะแสประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์แบบฟูลคอนโทรลสองชุดต่อขนานแบบกลับขั้ว (Antiparallel connection) สามารถรับพลังงานรีเจนเนอเรทีฟที่โรเตอร์ขณะหมุนได้ และไม่เกิดการสูญเสียพลังงานแต่อย่างใดยังสามารถนำพลังงานนี้จ่ายให้แก่โหลดตัวอื่นที่ต่ออยู่ในไลน์แรงดันเดียวกันได้ เมื่อเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกาควอดแรนต์ที่ 1 ไปสู่ควอดแรนต์ที่ 2 หรือในทิศทางความเร็วรอบตามเข็มนาฬิกาควอดแรนต์ที่ 3 ไปสู่ควอดแรนต์ที่ 4 เป็นการเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ในทิศทางเดิม การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ขณะกลับทิศทางความเร็วรอบ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจากทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกาควอดแรนต์ที่ 1 ไปสู่ทิศทางความเร็วรอบตามเข็มนาฬิกาควอดแรนต์ที่ 3 หรือ จากทิศทางความเร็วรอบตามเข็มนาฬิกาควอดแรนต์ที่ 3 ไปสู่ทิศทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกาควอดแรนต์ที่ 1 การขับเคลื่อนมอเตอร์ในลักษณะนี้สามารถทำงานได้ทั้ง 4 ควอดแรนต์ในระนาบ กระแส-แรงดัน การเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟนี้ไม่ต้องมีส่วนการเบรกทางกลต่อเพิ่มในระบบขับเคลื่อน การบำรุงรักษาต่ำและระบบก็จะมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับ ระบบการเบรกแบบไดนามิก ผลตอบสนองทางด้านไดนามิกของการเบรกความเร็วรอบทำให้ดีขึ้นและมีประสิทธิภาพการเบรกสูง การสูญเสียที่ชุดคอนเวอร์เตอร์แบบฟูลคอนโทรล เมื่อรับพลังงานรีเจนเนอเรทีฟกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟสลับมีการสูญเสียต่ำมากอาจไม่นำมาคิดก็ได้ เมื่อเปรียบเทียบการเบรกแบบไดนามิกจะต้องมีความต้านทานต่อคร่อมกับบอเมเจอร์ เพื่อรับพลังงานที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ขณะหมุนทำให้เกิดการสูญเสียในรูปพลังงานความร้อนและประสิทธิภาพการเบรกต่ำ การใช้การเบรกแบบ รีเจนเนอเรทีฟเบรกไม่สามารถใช้ได้กับ การคืนพลังงานให้กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ไม่สามารถรับพลังงานจากภายนอกได้ เพราะจะทำให้เกิดการเสียหายแก่แหล่งจ่ายไฟฟ้า พุทธิกรรม

การไหลของกระแสเมเจอร์ เมื่อมอเตอร์ย้ายการทำงานในแต่ละ โหมดได้มีการขิมมุเลชั่นดู ทิศ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางการไหลของกระแสเมเจอร์เปรียบเทียบกับ ผลการทดลองจากวงจรจริงที่ได้ออกแบบ ตามภาพที่ 61 มีความใกล้เคียงกันมาก เวลาขณะเบรกความเร็วรอบแบบไดนามิกใช้เวลาถึง 7 วินาที เมื่อลดความเร็วรอบจาก 700 รอบ/นาที ไปสู่ 0 รอบ/นาที โดยใช้ความต้านทาน 5Ω ขนาด 1000W เป็นตัวรับพลังงานจากโรเตอร์ขณะหมุน การเบรกแบบรีเจนเนอเรทีฟที่ ความเร็วรอบเดียวกับ การเบรกแบบไดนามิกจะใช้เวลาเพียง 2 วินาที จากผลการทดลองทราบได้ว่า การเบรกแบบ รีเจนเนอเรทีฟสามารถทำได้เร็วกว่าการเบรกแบบไดนามิก

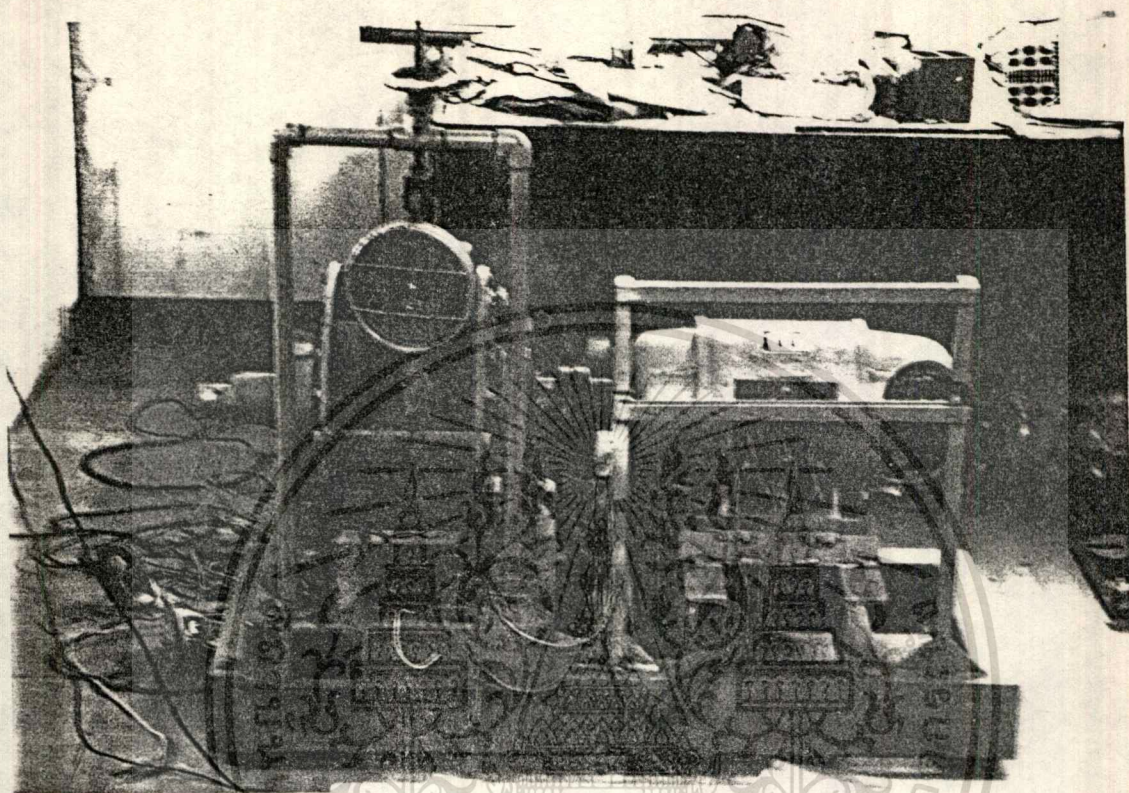
ภาพที่ 61



วงจรอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมการ รีเจนเนอเรทีฟพลังงาน ที่โรเตอร์ขณะหมุนกลับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับขณะลดความเร็วรอบ แบบ 4 ควอดแรนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 62



มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยกขนาด กำลังเอาต์พุต 3.3KW กระแสเมเจอร์ 16A ความเร็วรอบ 1500 รอบ/นาที ที่ใช้ในการทำวิจัย

บรรณานุกรม

1. B.H Khan K.Dubey. and Seshagiri R.Doradla,Senior Mmeber.IEEE: An Economic Four-Quadrant GTO converter and Its Application to DC Drives. IEEE Transactions on Power Electronic Vol 8 No1 January 1993.PP-62-67.
2. T.Kirshnan and B.Ramaswmi. Speed control of DC Motor using Thyristor dual Converter. IEEE Transsactions on Industrial Electronic and Control Instrumentation,Vol IEC-123,NO4,November 1976.
3. Badrul H. Khan,Seshagiri Rao Doradla,Senior Member,IEEE,and Gopal K.Dubey,Senior Member: IEEE. A New Simultaneous Gating GTO Dual Converter-fed dc Motor Drive Without Circulating Current. IEEE Transaction on Industrial Applicatìons, Vol.27.NO.3. MAY/JUNE 1991.
4. GUY SEGUIRE: Universite des. Power Electronic Converter AC-DC Converter.
5. Gopal Dubey: Power Semiconductor Controlled Drives.
6. Muhammed H.Rashid. PSPICE for Power Electronics and Electric Power. PH.D.,Fellow IEE Professor of Electrical Engineering Purdue University at Fort Wayne.
8. Friedrich Frohr and Fritz Orttenburger. Introduction to Electronic control Engineering. Siemens Aktienesellschaft Heyden& Ltd.
9. ศุภวีร์ บัณฑุกุล, ร.ศ ดร. วิริยะ พิเชฐจำเริญ. การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงแบบ 4 ควอดแรนต์. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 18 พ.ศ 2538 หน้า 1-7 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์สมการไดนามิกกับการหาค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชันของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

พิกัดมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 3 Kw แรงดัน 200V ความเร็วรอบ 1500 รอบ/นาทีที่มอเตอร์ต่ออยู่กับโหลด Eddy current brake การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์โดยการควบคุมกระแสเมเจอร์และมีสมการแรงดันที่ขั้วมอเตอร์คือ

$$V = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K \omega_m \dots\dots\dots(1)$$

สมการไดนามิกเมื่อมอเตอร์ต่ออยู่กับโหลด

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_d - T_m - B \omega_m \dots\dots\dots(2)$$

$$T_d = K i_a \dots\dots\dots(3)$$

แทนค่าสมการ (2) ในสมการ (3)

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = K i_a - T_m - B \omega_m \dots\dots\dots(4)$$

ให้สมการ (1) และสมการ (4) อยู่ในรูปขอบเขตความถี่และให้ค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์

$$sL_a I_a(s) + R_a I_a(s) + K \omega_m(s) = V(s) \dots\dots\dots(5)$$

$$sL_a I_a(s) + B \omega(s) + T_m(s) = K I_a(s) \dots\dots\dots(6)$$

จากสมการ (5) ทำให้อยู่ในรูปของสมการกระแส

$$\begin{aligned} I_a(s) &= \frac{V(s)}{R_a(1+s\tau_a)} - \frac{K}{R_a} \frac{\omega_m(s)}{(1+s\tau_a)} \\ &= \frac{V(s) - K \omega_m(s)}{R_a(1+s\tau_a)} \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

τ_a เป็นเวลาคงที่ทางไฟฟ้าของอเมเจอร์หาได้โดยการป้อนสเตปอินพุทและวัดเวลาตอบสนองด้วย storage oscilloscope ที่เวลาผ่านไป 5T มีค่าเท่ากับ 17ms

$$\tau_a = \frac{L_a}{R_a} \dots\dots\dots(8)$$

จากสมการ (6) ทำให้อยู่ในรูปสมการความเร็วรอบ $\omega_m(s)$

$$\begin{aligned} \omega_m(s) &= \frac{(K/B)I_a(s)}{(1+s\tau_m)} - \frac{1}{B} \frac{T_m(s)}{(1+s\tau_m)} \\ &= \frac{1}{B} \frac{T(s) - T_m(s)}{(1+s\tau_m)} \dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

τ_m เป็นเวลาคงที่ทางกลของมอเตอร์

$$\tau_m = \frac{J}{B} \dots\dots\dots(10)$$

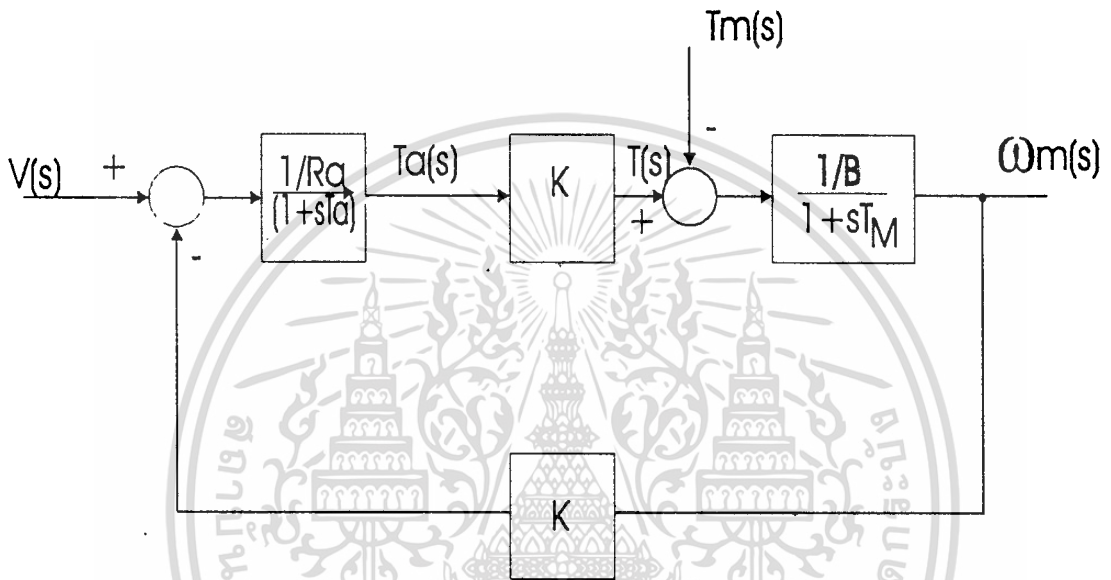
จากสมการ (7) และสมการที่ (9) สามารถเขียนให้อยู่ในระบบลูปปิดที่มีการป้อนกลับ

สัญญาณความเร็วและความสัมพันธ์ของ $V(s)$ กับ $\omega_m(s)$ ขนาดของ $\frac{T_m}{B}$ และ $\frac{1}{B}$ หาได้จากการ

ทดสอบทำให้ $\frac{T_m}{T_a} \gg 1$ และ $\frac{1}{B} \gg 1$ ดังนั้นค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชันระหว่างความเร็ว (ω_m) และ
ไม่ว่าการณีโดยทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

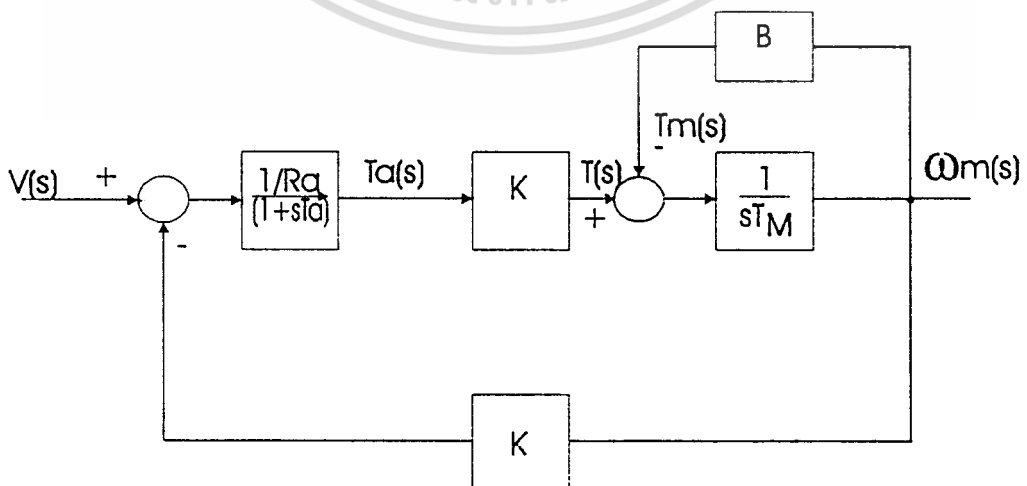
กระแสเมเจอร์ (la) อยู่ในรูปของอินทรีเกตเวลาคงที่และมีรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจากทรานเฟอร์ฟังก์ชัน ภาพที่ 63 กลายเป็นทรานเฟอร์ฟังก์ชันใน ภาพที่ 64

ภาพที่ 63



บล็อกไดโอดแกรมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

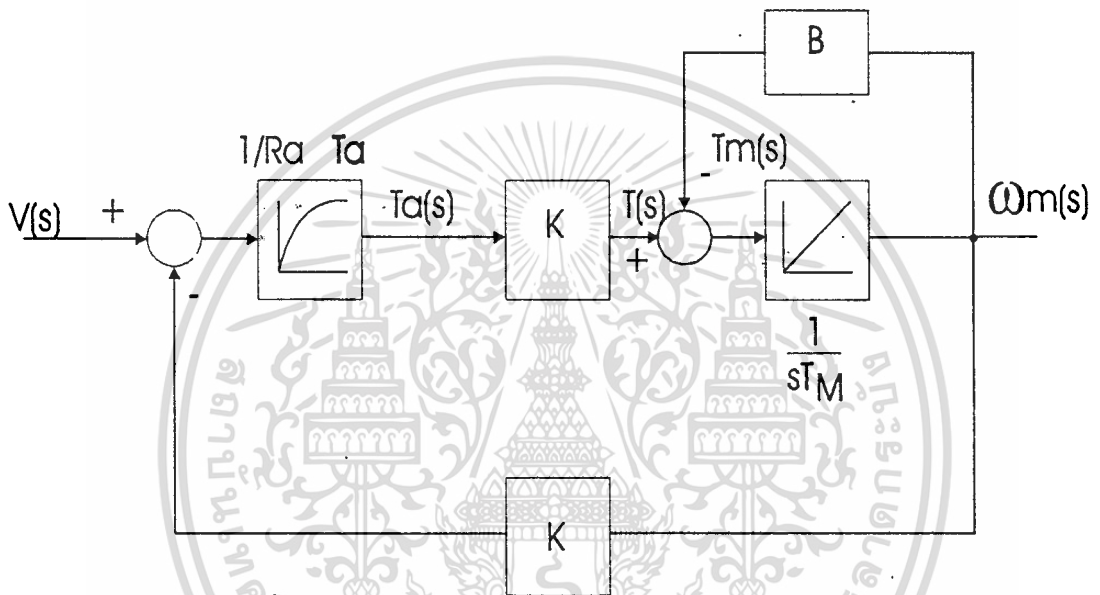
ภาพที่ 64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่ในอินเทอร์เน็ตเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปแบบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเขียนให้อยู่ในบล็อกควบคุมซึ่งแทนโดย
 สัญลักษณ์เทอมของ $\frac{1}{(1+sT_a)}$ เป็นระบบหน่วงลำดับที่หนึ่งและเทอมของ $\frac{1}{sT_m}$ เป็นการอิน-
 ทริเกตเวลาคงที่ดังใน ภาพที่ 65

ภาพที่ 65



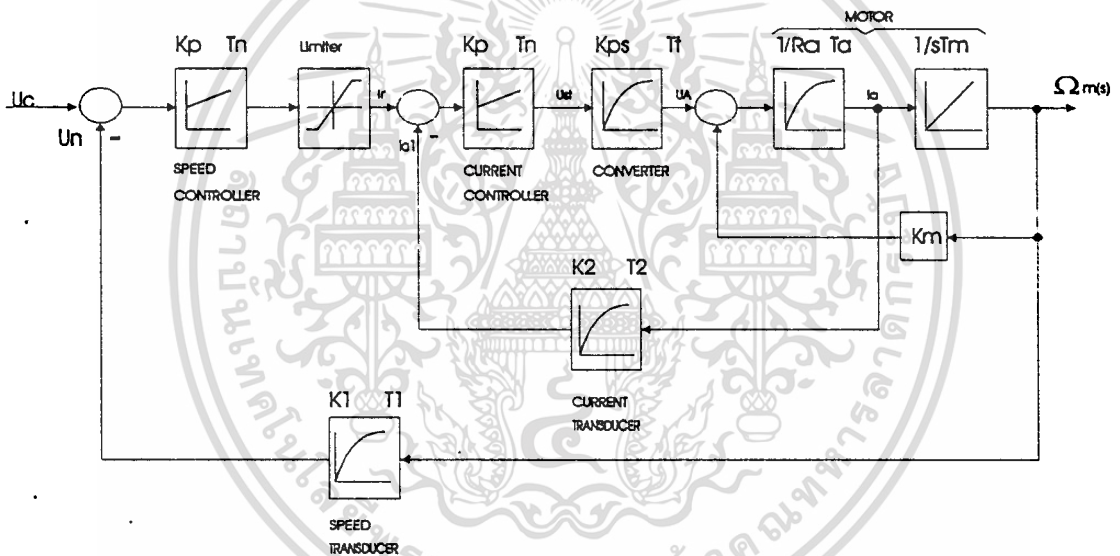
บล็อกไดอแกรมทรานเฟอร์ฟังก์ชันมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแทนโดยสัญลักษณ์

เมื่อทราบถึงลักษณะรูปแบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเราสามารถเขียนระบบควบคุมความเร็วแบบ
 ลูปปิดได้ การควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงใช้ตัวควบคุมอนาล็อกแบบ PI ในลูปควบคุม
 ความเร็วซึ่งเป็นลูปควบคุมภายนอกและลูปควบคุมกระแสเป็นลูปควบคุมภายใน

**ระบบควบคุมแบบลูปปิดควบคุมการรีเจนเนอเรทีฟพลังงานที่โรเตอร์ขณะหมุน
 กลับแหล่งจ่ายไฟสลับ**

ระบบควบคุมการรีเจนเนอเรทีฟพลังงานที่มอเตอร์กำเนิดขึ้นเมื่อเบรกความเร็วรอบหรือกลับทิศทางการหมุนความเร็วรอบมอเตอร์ทำงานแบบ 4 ควอดแรนต์ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบระบบควบคุมแบบลูปปิด เพื่อควบคุมพลังงานรีเจนเนอเรทีฟให้ไหลกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟสลับขณะลด ความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาหรือในควอดแรนต์ที่ 1 โหมดมอเตอร์วิ่ง ไปสู่ควอดแรนต์ที่ 2 โหมดอินเวอร์ตติง หรือ จากควอดแรนต์ที่ 3 โหมดมอเตอร์วิ่ง ไปสู่ควอดแรนต์ที่ 4 โหมดอินเวอร์ตติง และสามารถกลับทิศทางการหมุนได้

ภาพที่ 66

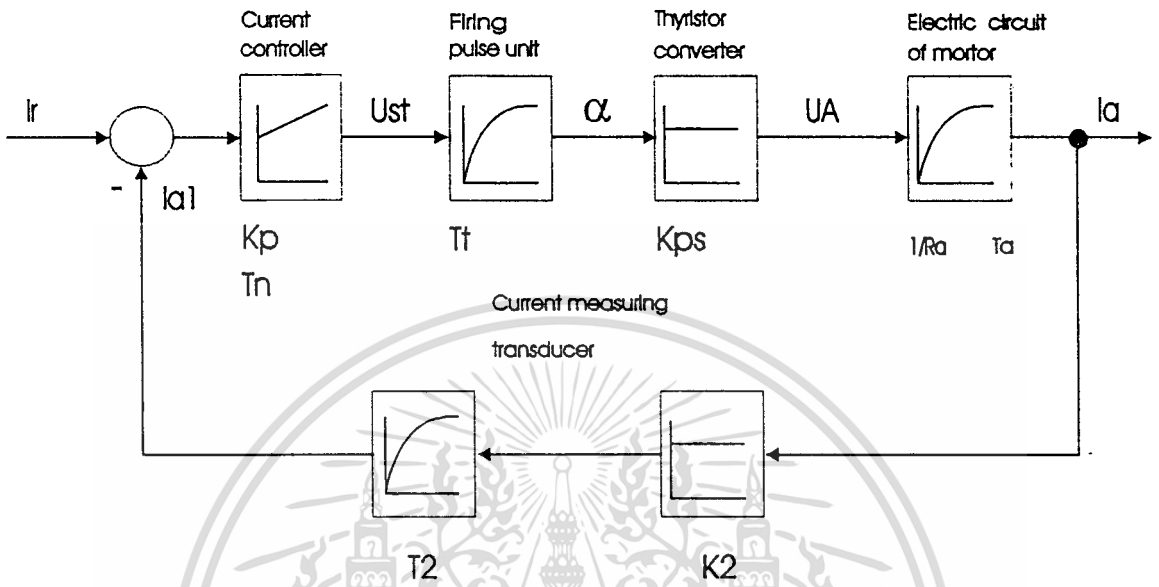


การควบคุมแบบลูปปิดที่ประกอบด้วยลูปควบคุมกระแสและลูปควบคุมความเร็วรอบ พร้อมทั้งโมเดลมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก

อย่างต่อเนื่องจากควอดแรนต์ที่ 1 โหมดมอเตอร์วิ่ง ไปทำการเบรกความเร็วรอบในควอดแรนต์ที่ 2 โหมดอินเวอร์ตติง และเข้าสู่ความเร็วรอบในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ควอดแรนต์ที่ 3 โหมดมอเตอร์วิ่ง ตามลำดับ โดยใช้ดักอินเวอร์เตอร์แบบฟูลคอนโทรลสองชุดต่อขนานแบบกลับขั้วที่สามารถจ่ายกระแสเมเจอร์ได้ใน ทิศทางทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกาเพื่อสร้างแรงบิดที่เป็นบวกหรือลบ ทำให้มอเตอร์ทำงานได้ สี่ควอดแรนต์ของระนาบ กระแส-แรงดัน ลูปการควบคุมประกอบไปด้วยลูปควบคุม 2 ลูป โดยมีลูปการควบคุมกระแสเมเจอร์และลูปควบคุมความเร็วรอบและลูปติดตามแรงดันย้อนกลับเพื่อปรับมุมนำกระแสในช่วงเริ่มเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ค่าไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้อยู่ในโหมดอินเวอร์ติง รูปควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์และรูปควบคุมกระแสใช้ตัวควบคุมอนาล็อกแบบ PI (Proportional plus integral) เพื่อให้ผลตอบสนองทางด้านไดนามิกของมอเตอร์ดีขึ้น ส่วนรูปติดตามแรงดันย้อนกลับใช้ วงจรขยายความแตกต่างเป็นตัวตรวจจับสัญญาณกล่าวถึง รูปควบคุมความเร็วมีการป้อนกลับสัญญาณแรงดัน (U_n) ที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วรอบมอเตอร์และสัญญาณแรงดัน (U_n) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสเมเจอร์ที่ใช้สร้างแรงบิดให้แก่มอเตอร์ เพื่อเป็นสัญญาณเปรียบเทียบกับสัญญาณความเร็วที่ต้องการ (U_c) (และชุดขยาย แรงบิดมอเตอร์ที่ความเร็วใด ๆ) กับสัญญาณความเร็วจริง (U_n) จากเทคโนโลยีเนอเรียเตอร์ที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วรอบมอเตอร์ทำให้การตอบสนองต่อการกลับขั้ว สัญญาณเป็นบวกหรือเป็นลบของรูปควบคุมความเร็วได้ดีขึ้น เมื่อต้องการเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ทำให้เกิดขบวนการโอนย้ายคอนเวอร์เตอร์ระหว่างชุด A กับชุด B จากควอดแรนต์ที่ 1 ไปสู่ ควอดแรนต์ที่ 2 ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาหรือควอดแรนต์ที่ 3 ไปสู่ควอดแรนต์ที่ 4 ในทิศทางความเร็วรอบตามเข็มนาฬิกาและกลับไปควอดแรนต์เดิมเมื่อสิ้นสุด การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์หรือกลับทิศทางหมุนของมอเตอร์ การตรวจจับสัญญาณกระแสป้อนไปสู่รูปควบคุมความเร็วและรูปกระแสโดย วัดสัญญาณทางแหล่งจ่ายไฟสลับที่จ่ายกระแสให้คอนเวอร์เตอร์โดยผ่าน วงจรเรกติไฟร์เออร์ เพื่อให้ขั้วสัญญาณที่ถูกตรวจจับจากตัวทรานสดิวเซอร์ไม่ขึ้นอยู่กับ ทิศทางการไหลของกระแสจากแหล่งจ่ายไฟสลับไปสู่มอเตอร์โหมดมอเตอร์ริงหรือจากมอเตอร์ไปสู่แหล่งจ่ายไฟสลับโหมดอินเวอร์ติงโดยผ่านคู่อัลคอนเวอร์เตอร์ และสัญญาณที่วัดได้จะมี ขั้วคงเดิมเสมอและ สัญญาณที่วัดได้จะเป็นตัวบอกกระแสไหลผ่านมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นศูนย์ในแต่ละควอดแรนต์ของระนาบ กระแส-แรงดัน การออกแบบระบบควบคุมในรูปกระแสและรูปความเร็วจะใช้ หลักการซิมเมตริกอลอปปติมัม ส่วนรูปควบคุมความเร็วกำหนดให้ U_r เท่ากับ ศูนย์เพื่อง่ายต่อการออกแบบ ซึ่งเป็นการออกแบบระบบควบคุมอย่างง่ายตาม บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบรูปปิดแสดงใน ภาพที่ 66 ประกอบด้วยรูปควบคุมกระแสเป็นรูปควบคุมภายในและ รูปควบคุมความเร็วเป็นรูปควบคุมภายนอกโดยจะพิจารณา การออกแบบรูปควบคุมกระแสก่อนดังใน ภาพที่ 67 และรูปควบคุมความเร็วใน ภาพที่ 68 เป็นลำดับสุดท้าย

ภาพที่ 67



ลูปควบคุมกระแสเมเจอร์เป็นลูปควบคุมภายใน

การออกแบบลูปควบคุมกระแสมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

การออกแบบลูปควบคุมกระแสนี้จะต้องออกแบบก่อนซึ่งเป็นลูปควบคุมภายในจากภาพที่ 67 จะได้ความสัมพันธ์ทรานเฟอ์ฟังก์ชันต่อไปนี้

ทรานเฟอ์ฟังก์ชันของตัวควบคุมแบบ PI $K_p \frac{1 + sT_n}{sT_n}$ (10)

ทรานเฟอ์ฟังก์ชันของคอนเวอร์เตอร์ $\frac{K_{ps}}{1 + sT_t}$ (11)

ทรานเฟอ์ฟังก์ชันของมอเตอร์ $\frac{1/R_a}{1 + sT_a}$ (12)

ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของทรานดิวเซอร์กระแส $\frac{K_2}{1 + sT_2}$ (13)

ทรานเฟอร์ฟังก์ชันทั้งหมดของระบบลูปปิดคือ

$$\frac{I_r(s)}{I_a(s)} = \frac{K_p K_{ps} 1 / R_a (1 + sT_n)(1 + sT_2)}{sT_n(1 + sT_i)(1 + sT_a)(1 + sT_2) + K_p K_2 K_i 1 / R_a (1 + sT_n)} \dots\dots\dots(14)$$

$$= \frac{[s^2 T_n T_2 + s(T_2 + T_n) + 1] K_p K_{ps} 1 / R_a}{s^3 T_n T_a T_i T_2 + s^2 T_n (T_a T_2 + T_i T_2 + T_a T_i) + s T_n (T_2 + T_a + T_i) + s T_n K_p K_{ps} 1 / R_a + K_p K_{ps} 1 / R_a}$$

จากสมการที่ (10) เทอม S^4 สามารถที่จะตัดทิ้งได้เพราะไม่มีผลตอบสนองที่ความถี่ต่ำ

$$= \frac{[s^2 T_n T_2 + s(T_2 + T_n) + 1] K_p K_{ps} 1 / R_a}{s^3 T_n (T_a T_2 + T_i T_2 + T_a T_i) + s^2 T_n (T_2 + T_a + T_i) + s T_n K_p K_{ps} 1 / R_a + K_p K_{ps} 1 / R_a} \dots\dots(15)$$

สมการทรานเฟอร์ฟังก์ชันทั่วไปที่อยู่ในเทอมการตอบสนองทางความถี่

$$F_w(\omega) = \frac{X(j\omega)}{W(j\omega)} = \frac{b_0 + j\omega b_1}{a_0 + j\omega a_1 + (j\omega)^2 a_2 + (j\omega)^3 a_3} \dots\dots\dots(16)$$

สมการที่ (16) จะให้ความสัมพันธ์ค่าคงที่

$b_0 = a_0$

$b_1 = a_1$

ส่วนจริงและส่วนจินตภาพหาได้จากสมการที่ (16) และโมดูลัสที่ได้คือ

$$|F_w(\omega)| = \sqrt{\frac{a_0^2}{a_0^2 + \omega^2 (a_1^2 - 2a_0 a_2) + \omega^4 a_2^2}} \dots\dots\dots(17)$$

สำหรับโมดูลัส Hugging เทอมของส่วนในวงเล็บจะต้องมีค่าเป็นศูนย์ทำให้ระบบควบคุมมีอัตรา
การขยายเป็นหนึ่ง ในย่านความถี่ต้องการจากสมการที่ (17) ทำให้ได้สมการที่ (18)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} a_1^2 &= 2a_0a_2 \\ a_2^2 &= 2a_1a_3 \end{aligned} \dots\dots\dots(18)$$

สมการที่ (18) จะใช้ออกแบบตัวควบคุมของลูประแสดแบบดีที่สุด

การเทียบสัมประสิทธิ์สมการที่ (16) กับทราานเฟอ์ฟังก์ชันของลูควบคุมระแสดสมการที่(15)

$$a_0 = K_p K_2 K_i 1 / R_a \dots\dots\dots(19)$$

$$a_1 = T_n K_p K_p s K_2 1 / R_a \dots\dots\dots(20)$$

เทอมของค่าคงที่ a_2, a_3 สามารถลดทอนลงได้เนื่องจาก $T_a > T_i$ และ $T_a > T_2$

$$a_2 = T_n T_a \dots\dots\dots(21)$$

$$a_3 = T_n T_a (T_2 + T_i) \dots\dots\dots(22)$$

$$a_2^2 = 2a_1a_3$$

$$T_n^2 T_a^2 = 2T_n K_p K_p s K_2 (1 / R_a) T_n T_a T_i \dots\dots\dots(23)$$

$$K_p = \frac{T_n}{2K_p s K_2 (1 / R_a) (T_i)} \dots\dots\dots(24)$$

$$T_i = T_2 + T_i$$

อินทริกัลแอดชันใหม่ T_n ถูกปรับให้เท่ากับเวลาหน่วงลำดับที่หนึ่งของเวลาที่มีขนาดใหญ่ ในส่วนของระบบควบคุมในที่นี้คือเวลาหน่วงลำดับที่หนึ่งของวงจรวมเมเจอร์ T_a ทำให้ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอ้างอิงที่เป็นสเต็ปเป็นไปอย่างรวดเร็วขึ้น

เมื่อมีการปรับให้ชดเชยระบบแล้วควรที่จะต้องรวมเวลาหน่วงลำดับที่หนึ่งที่มืขนาดเล็ก เข้าด้วยกันในระบบควบคุมที่ได้ทำการออกแบบนี้มีเวลาหน่วงลำดับที่หนึ่งของคอนเวอร์เตอร์และ ทราานดิเวเซอร์ระแสดคือ $T_i = T_2 + T_i$ ผลรวมของเวลาคงที่ขนาดเล็กมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยู่ยาดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คงที่ขนาดใหญ่ลูบควบคุมกระแสไม่มีส่วนของอินทิกรัลและ $T_e < 4 T_\sigma$ การออกแบบตัวควบคุม จะอยู่บนฐานของแอมพลิจูดที่ดีที่สุดนำค่าตัวแปรแทนในสมการที่ (16)

$T_a = T_n$ เวลาคงที่ของวงจรรอเมเจอร์ T_a หาได้โดยการป้อนสัญญาณอินพุตเต็มแล้ววัดค่าเวลาได้เท่ากับ 17ms

$$K_p = \frac{17 * 10^{-3}}{2 * 20.975 * (1/3) * (5 * 10^{-3} + 0.235 * 10^{-3})} \dots\dots\dots(25)$$

$$= 0.232$$

การออกแบบลูบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เวลาคงที่ในลูบควบคุมกระแสสามารถหาได้โดยการประมาณจากทรานเฟอร์ฟังก์ชันระหว่าง $I_r(s)$ กับ $I_a(s)$ ให้มีค่าเท่ากับ T_e และมีค่าเป็น 2 เท่าของผลบวกเวลาหน่วงขนาดเล็กลำดับที่หนึ่งที่อยู่ในลูบควบคุมกระแส

$$T_e = 2T_\sigma \dots\dots\dots(26)$$

ลูบควบคุมซึ่งมีส่วนประกอบของอินทิกรัลและระบบหน่วงลำดับที่หนึ่งจำนวนหนึ่งหรือสองสามตัวอินทิกรัลแอดชันไทม์ T_n ของตัวควบคุม PI ถูกกำหนดขึ้นจากหลักการ $4T_\sigma$ ซึ่งเรียกว่าหลักการดีที่สุดดังนั้นเวลา T_n จะเท่ากับ

$$T_n = 4T_\sigma \dots\dots\dots(27)$$

$$T_\sigma = T_e + T_i \dots\dots\dots(28)$$

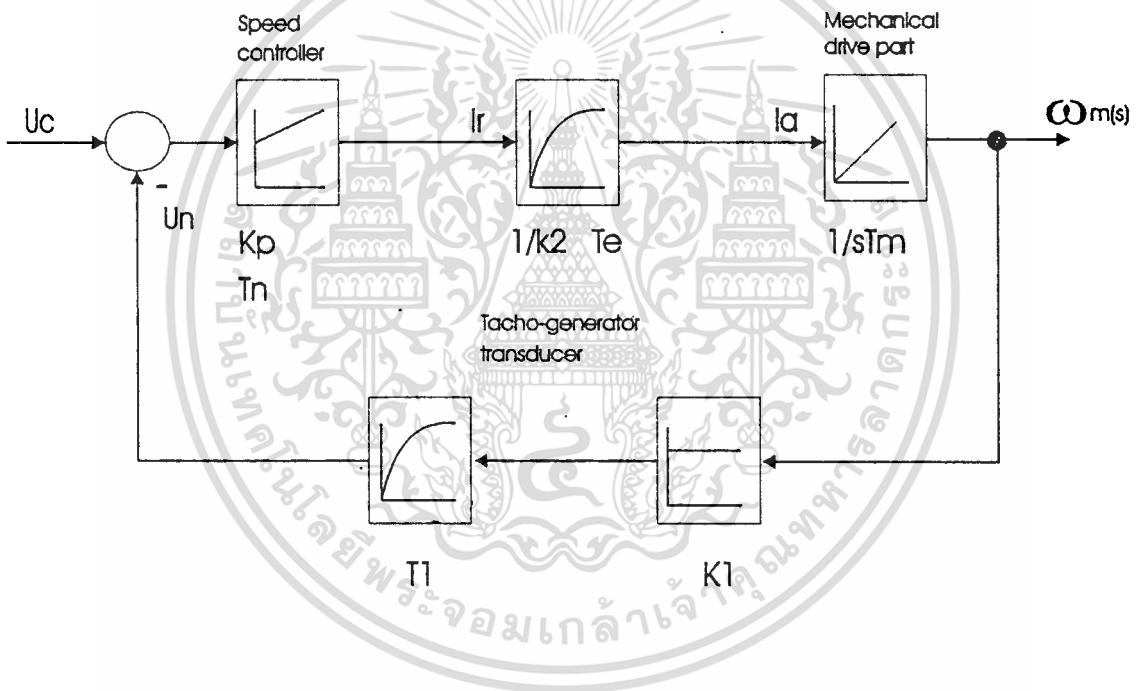
ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของตัวควบคุมความเร็วแบบ PI $K_p \frac{1 + sT_n}{sT_n} \dots\dots\dots(29)$

ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของตัวตรวจจับกระแส $\frac{1/k_2}{1+sT_c}$ (30)

ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของระบบทางกล $\frac{1}{sT_m}$ (31)

ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของตัวตรวจจับความเร็วรอบ (Tacho generator) $\frac{K_1}{1+sT_1}$ (32)

ภาพที่ 68



ลูบควบคุมความเร็วรอบเป็นลูบควบคุมภายนอก

ทรานเฟอร์ฟังก์ชันของระบบทั้งหมดระหว่างความเร็วที่ต้องการกับความเร็วจริงของมอเตอร์

$$\frac{U_c(s)}{\omega_m(s)} = \frac{K_p 1/K_2(1+sT_n)(1+sT_1)}{s^2T_nT_m(1+sT_c)(1+sT_1) + K_pK_11/K_2(1+sT_n)}$$

$$= \frac{K_p 1/K_2(1+sT_n)(1+sT_1)}{s^4T_nT_mT_cT_1 + s^3T_nT_m(T_1+T_c) + s^2T_nT_m + sK_pK_11/K_2T_n + K_pK_1 1/K_2}$$

.....(33)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a_0 = K_p K_i I / K_2 \dots\dots\dots (34)$$

$$a_1 = T_n K_p K_i I / K_2 \dots\dots\dots (35)$$

$$a_2 = T_n T_m \dots\dots\dots (36)$$

$$a_3 = T_n T_m (T_1 + T_e) \dots\dots\dots (37)$$

$$a_2^2 = 2a_1 a_3 \dots\dots\dots (38)$$

$$K_p = \frac{T_m K_2}{2K_i T_s} = \frac{91.64 * 1 * 10^{-3}}{2 * 0.064 * 34.26 * 10^{-3}} = 20.89 \dots\dots\dots (39)$$

$$T_s = T_e + T_1 = 34.26 \text{mS} \dots\dots\dots (40)$$

การหาอัตราขยายของคอนเวอร์เตอร์ Kps

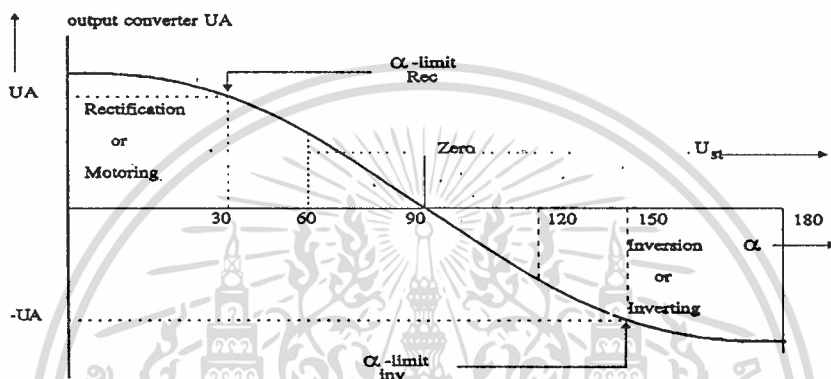
แรงดันเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ถูกเลือกให้เท่ากับ พิกัดแรงดันของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและมุมนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ถูกจำกัดไว้ที่ $\pi/6$ ในโหมดมอเตอร์ริงเพราะการทำงานในช่วงเชิงเส้นถ้ามุมนำกระแสคอนเวอร์เตอร์อยู่ในช่วง $0 \leq \alpha \leq \pi/6$ การทำงานจะไม่ใช่เชิงเส้นและมุมนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ถูกจำกัดไว้ที่ $5\pi/6$ ในโหมดอินเวอร์ติงเพราะเป็นการทำงานในช่วงเชิงเส้น ถ้ามุมนำกระแสคอนเวอร์เตอร์อยู่ในช่วง $5\pi/6 \leq \alpha \leq \pi$ การทำงานจะไม่ใช่เชิงเส้นดังใน ภาพที่ 69 การออกแบบมุมนำกระแสคอนเวอร์เตอร์ควรหลีกเลี่ยงในช่วงที่ไม่เป็นเชิงเส้น แรงดันควบคุม U_{st} จะเปลี่ยนจาก -8.2 ถึง 0V แรงดันเฉลี่ยไฟตรงที่เข้าเอาต์พุตคอนเวอร์เตอร์ U_a ในรูปที่ ภาพที่ 70 เมื่อมุม $\alpha = \pi/6$ เท่ากับ

$$U_a = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_s \cos(\pi/6) \dots\dots\dots (41)$$

ไม่ว่าการนี้ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 U_a &= 0.78 * U_s \\
 &= 0.78 * 220 \text{ V} \dots\dots\dots(42) \\
 &= 171.6 \cong 172 \text{ V}
 \end{aligned}$$

ภาพที่ 69

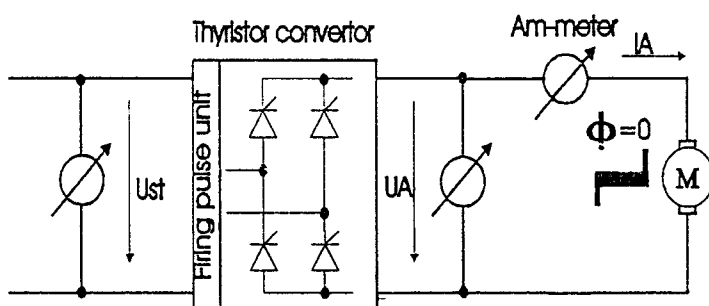


แรงดันเอาต์พุตที่หัวคอนเวอร์เตอร์ช่วงเป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นต่อมุมนำกระแส α

อัตราการขยายของคอนเวอร์เตอร์คือ

$$\begin{aligned}
 K_{ps} &= \frac{U_a}{U_{st}} \\
 &= \frac{172}{8.2} \dots\dots\dots(43) \\
 K_{ps} &= 20.975
 \end{aligned}$$

ภาพที่ 70



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การหาอัตราขยายของคอนเวอร์เตอร์แบบฟูลคอนโทรลชนิด 1 เฟส ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อผู้อื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าทรานเฟอร์ฟังก์ชันและเวลาคงที่ของคอนเวอร์เตอร์ Tt

เวลาหนึ่งวงคองที่ลำดับที่หนึ่งของคอนเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่ 50 Hz สำหรับอินพุทแบบ 1 เฟส

$$\begin{aligned}
 T_t &= \frac{1 \text{ Period duration}}{2 \text{ Number of pulses per cycle}} \\
 &= \frac{20 \text{ ms}}{4} \dots\dots\dots(44) \\
 &= 5\text{ms}
 \end{aligned}$$

ทรานเฟอร์ฟังก์ชันระบบหนึ่งวงคองลำดับที่หนึ่งของคอนเวอร์เตอร์สามารถเขียนได้คือ

$$\frac{U_a(s)}{U_{st}(s)} = \frac{K_{ps}}{1+sT_t} = \frac{20.975}{1+S*5*10^{-3}} \dots\dots\dots(45)$$

การหทรานเฟอร์ฟังก์ชันและเวลาคงที่ของทรานดิเวอร์กระแส T2

สัญญาณเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสเมเจอร์ได้รับโดยใช้หม้อแปลงกระแสอัตราส่วน 1:1000 เป็นตัวตรวจจับสัญญาณกระแสในไลน์เอซีและต่อคร่อมเอาท์พุทหม้อแปลงกระแสด้วยความต้านทาน 1 KΩ อัตราขยายของทรานดิเวอร์กระแส (K2) เท่ากับ 1 V/A เมื่อกระแสสลับไหล 1A จะได้แรงดันไฟตรง 1V และใช้วงจร RC โวลท์พาสฟิลเตอร์แบบที่เป็นตัวกรองริบเบิลออกจากสัญญาณกระแสที่วัดได้เพื่อลดโอเวอร์ชูคคอมแพคิมพีแดนส์ของวงจรกรองสัญญาณ โวลท์พาสฟิลเตอร์แบบที่คือ

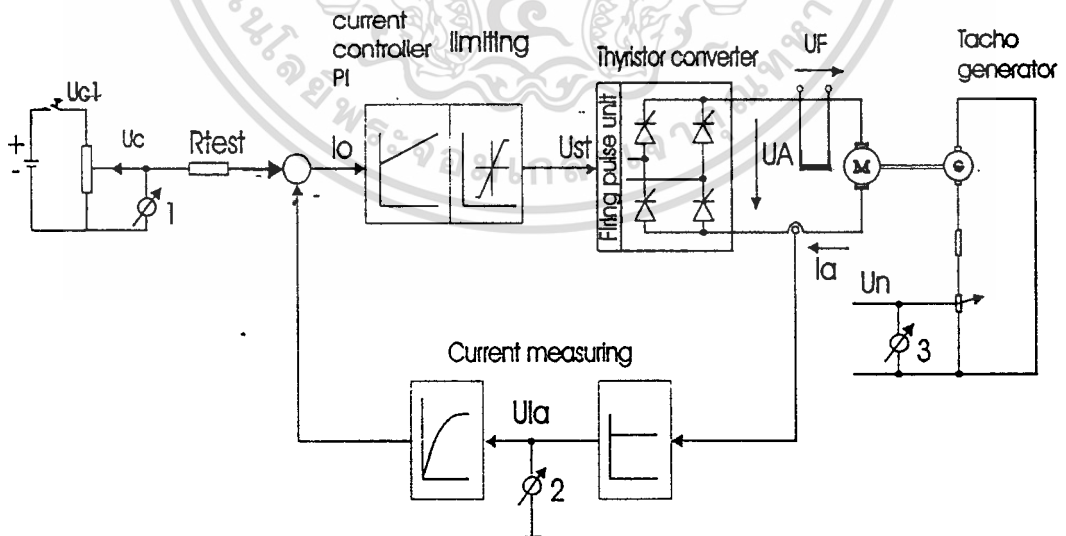
$$Z(s) = (R_1 + R_2)(1 + s \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} * C) \dots\dots\dots(46)$$

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของวิศวกรรมศาสตราจารย์ ดร.สุวิทย์ วัฒนศิริกุล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จรแทคโคเจนเนอเรเตอร์ปรับความต้านทานให้ได้แรงดันเอาต์พุต 10V เมื่อมอเตอร์หมุนที่พิกัดความเร็วรอบเพื่อให้เท่ากับแรงดันอ้างอิง $U_{c1} = 10V$ ที่ป้อนให้อินพุตตัวควบคุมกระแส แรงดันไฟตรงถูกต่อเข้ากับโพเทนชิโอมิเตอร์โดยผ่านสวิตช์ ปิด-เปิด เพื่อเป็นอินพุตตัวควบคุมกระแส ดังในภาพที่ 71 และวัดค่าแรงดันโดยโวลต์มิเตอร์ตัวที่ 1 สวิตช์ที่ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟตรงนี้เพื่อทำให้เกิดแรงดันอินพุตอ้างอิงที่เป็นสแตป

2. โวลต์มิเตอร์ตัวที่ 3 ใช้วัดแรงดันที่เกิดขึ้นจากทาคโคเจนเนอเรเตอร์ การเปลี่ยนแรงดัน U_{c1} แบบสแตปให้แก่อินพุตของ ตัวควบคุมกระแสและเอาต์พุตให้แก่ อินพุตตัวควบคุมกระแส และสร้างแรงดันควบคุม U_{st} ที่เอาต์พุตตัวควบคุมกระแสที่เป็นองค์ประกอบของแรงดันที่ ขั้วเมเจอร์ของมอเตอร์ความแตกต่าง แรงดันที่ขั้วมอเตอร์บังคับให้กระแสไหลเข้า วงจรอเมเจอร์และสร้างแรงบิดที่เพลามอเตอร์ให้มากกว่า แรงบิดโหลดและแรงฝืด เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนแรงดันย้อนกลับมอเตอร์ถูกสร้างขึ้นเป็นสัดส่วนกับความเร็วรอบขณะที่ความเร่งแรงบิดรักษาให้คงที่จะได้ความสัมพันธ์ของกราฟ ความเร็ว-เวลา เป็นฟังก์ชันของแรมใน ภาพที่ 72 เมื่อแรงดัน U_{st} ของตัวควบคุมกระแสเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าลิมิตมุมนำกระแสที่ถูกกำหนดจากแรงดัน U_C

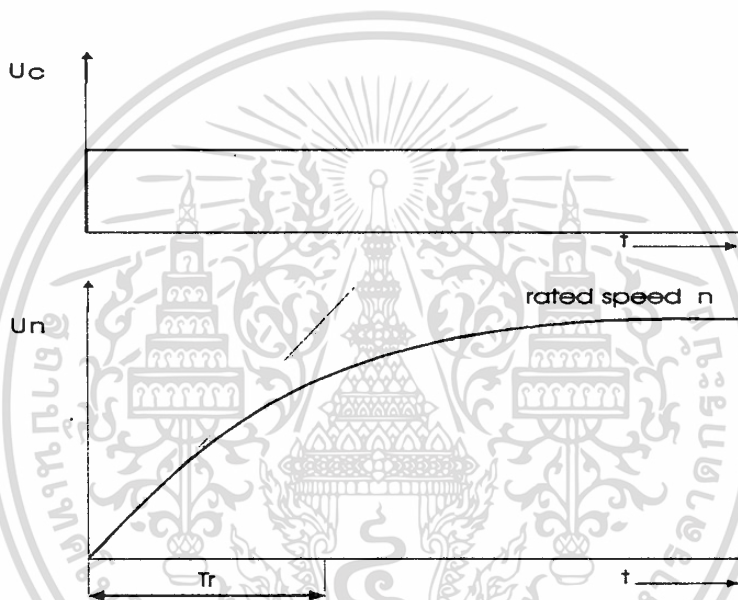
ภาพที่ 71



การหาเวลาคงที่ทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยการทดสอบ

การกำหนดค่าเวลาคงที่ทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแสดงในรูป ภาพที่ 71 ให้ สตาร์ทตัวขับเคลื่อน สองครั้งในแต่ละครั้งจะได้ความแตกต่างกระแสเมเจอร์ 2 ค่าเป็นสัดส่วนกับ ฟังก์ชันความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แรงดันอ้างอิงที่ถูกป้อนจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง คือ U_{d1} และ U_{d2} และวัดโดยโวลต์มิเตอร์ตัวที่ 1 การกำหนดแรงดันเอาต์พุตทาโคเจนเนอเรเตอร์ โดยการปรับค่าความต้านทานของโพเทนชิโอที่ต่ออยู่กับ เอาท์พุตทาโคเจนเนอเรเตอร์ให้ได้ 10V

ภาพที่ 72



การตอบสนองต่อสแต็ปอินพุตที่เอาต์พุต ทาโคเจนเนอเรเตอร์

เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงหมุนอยู่ที่ พิกัดความเร็วรอบ 1500 รอบ/นาที การเริ่มสตาร์ทตัวขับเคลื่อนแต่ละครั้งเป็นจำนวน 2 ครั้งและบันทึกผลตอบสนองทรานเซียนท์ที่ เอาท์พุตทาโคเจนเนอเรเตอร์ด้วย Storage oscilloscope และนำค่าต่างๆ ที่วัดได้นำไปเขียนกราฟรูปที่ ภาพที่ 631 ทำให้ได้ผลตอบสนองของความเร็วรอบมอเตอร์ 2 ค่าให้ลากเส้นตรงระหว่างจุดสองจุดให้ตัดกับเส้นความเร็วที่เป็นศูนย์จะได้ค่า U_{dL} ส่วนนี้จะ ตอบสนองต่อแรงบิดและแรงบิดไหลจากการทดสอบ ครั้งแรกจะได้ค่า U_{c1} ขนาดแรงดันไฟตรงอินพุตอ้างอิงโดยการปรับค่าแรงดันก่อนมีการลีสวิตซ์ และ T_{r1} คือค่าเวลาตอบสนองครั้งที่ 1 ที่เอาท์พุตทาโคเจนเนอเรเตอร์หาได้โดยการลากเส้นจาก แกนแรงดันอ้างอิงไปตัดกับแกนเวลาตอบสนองที่ค่าสุดท้ายในการทดสอบครั้งที่ 1 การทดสอบ

ครั้งที่ 2 ได้ค่า U_{c2} และ T_{r2} จะได้ความสัมพันธ์ซึ่งกันและกันให้ลากเส้นจากจุดแต่ละจุดตัดกับเส้น U_c ซึ่งได้ค่าที่ต้องการเพื่อกำหนดค่าคงที่ทางกล T_m คือ

การกำหนดเวลาคงที่ทางกลที่จุด U_{c1}

$$U_{x1} = U_{c1} - U_{cL} \dots\dots\dots(50)$$

$$T_{m1} = T_{r1} \frac{U_{x1}}{U_n} \dots\dots\dots(51)$$

จากการกำหนดค่า U_n เท่ากับ 10V การหาค่า T_{m2} ทำเหมือนกับขั้นตอนแรก

$$T_{m2} = T_{r2} \frac{U_{x2}}{U_n} \dots\dots\dots(52)$$

ค่าเวลาคงที่ทางกล T_m โดยการหาค่าเฉลี่ยเวลาคงที่จากการทดสอบ 2 ครั้งคือ

$$T_m = \frac{1}{2}(T_{m1} + T_{m2}) \dots\dots\dots(53)$$

ผลการทดลองที่ได้จากการวัดผลตอบสนองแรงดันเอาต์พุต ทาโคเจนเนอเรเตอร์เมื่อป้อนแรงดันที่เป็นสเตร็ปให้ ตัวควบคุมกระแสมีอยู่สองค่าคือ

$$U_{c1} = 3 \text{ V} \text{ และ } U_{c2} = 6 \text{ V} \dots\dots\dots(54)$$

ค่าเวลาที่ได้โดยการวัดจากทฤษฎีของ Run-up time มี 2 ค่าคือ

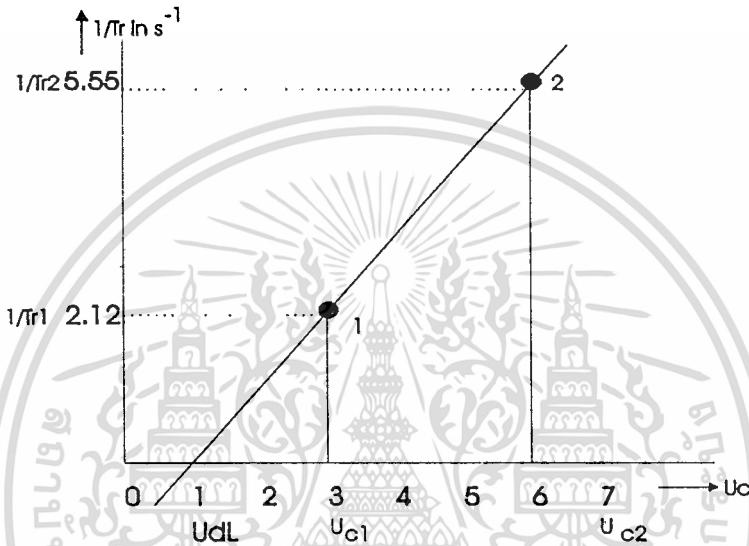
$$T_{r1} = 0.47 \text{ s} \text{ และ } T_{r2} = 0.18 \text{ s} \dots\dots\dots(55)$$

$$\frac{1}{T_{r1}} = 2.12 \text{ s}^{-1} \text{ และ } \frac{1}{T_{r2}} = 5.55 \text{ s}^{-1} \dots\dots\dots(56)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่าที่ได้จากการทดสอบและพล็อตความสัมพันธ์การตอบสนองของเวลาที่เอาท์พุทกับแรงดันสแต็ปอ้างอิง ภาพที่ 73

ภาพที่ 73



กราฟความสัมพันธ์แรงดันสแต็ปอินพุทอ้างอิงต่อเวลาตอบสนองที่เอาท์พุท ทาโคเจน-เนอเรเตอร์ จากการทดสอบ

เวลาคงที่ T_r มีความสัมพันธ์กับการต่อจุดบนกราฟในรูปที่ 11 $\frac{1}{T_{r1}} - U_{d1}$ และ $\frac{1}{T_{r2}} - U_{d2}$ จะมีส่วนประกอบสำหรับแรงบิดโหลด M_{dL}

$$U_{dL} = 1 \text{ V} \dots (57)$$

การใช้ค่า U_{dL} ลบออกจากค่าแรงดันอินพุทอ้างอิง U_{c1} และ U_{c2} จะได้ค่าเวลาคงที่ทางกล T_m ตามความสัมพันธ์ต่อไปน

$$U_{x1} = U_{c1} - U_{dL} = 3 - 1 = 2 \text{ V} \dots (58)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสาร Uxi ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 $T_{m1} = T_{r1} \frac{U_{x1}}{U_n} = 94 \text{ ms} \dots (59)$
 ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งนี้ U_n อื่นทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกฎของแรงนิวตัน (newton law) ได้

$$F=ma.....(61)$$

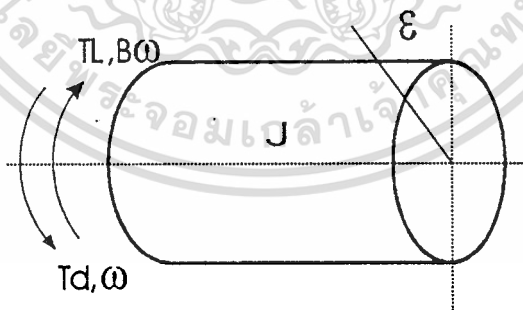
$$F=mdV/dt.....(62)$$

สภาวะแรงสมดุลสามารถเขียนสมการได้คือ

$$f_d-f_c-f_o=mdV/dt..(63)$$

การเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงเราสามารถแปลงให้เป็นการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีทรงกระบอกของมวล ในภาพที่ 75 ถ้ามีการเคลื่อนที่แบบการหมุนรอบแกนซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้กับระบบการขับเคลื่อนทางไฟฟ้าและมีรูปแบบสมการที่เทียบกับ สมการการเคลื่อนที่ในแนวราบ

ภาพที่ 75



การเคลื่อนที่ของวัตถุรอบแกนหมุนระนาบรัศมี

T_d =แรงบิดที่เฟลตามอเตอร์และขับเคลื่อนให้หมุนตามแนวรัศมี N-m

T_L =แรงบิดโหลด N-m

ω =ความเร็วรอบเชิงมุมของมอเตอร์ rad/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเทียบตัวแปรการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงกับการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีรอบแกนหมุนจะได้ว่า

$$T_L = f_L \dots \dots \dots (64)$$

$$T_G = f_G \dots \dots \dots (65)$$

$$J = m \dots \dots \dots (66)$$

$$\omega = v \dots \dots \dots (67)$$

$$\epsilon = S \dots \dots \dots (68)$$

$$B\omega = f_c \dots \dots \dots (69)$$

ดังนั้นสามารถแทนค่าตัวแปรตามแนวรัศมีแกนหมุนในสมการ (61) ได้

$$F = ma \dots \dots \dots (70)$$

$$F = Ja \dots \dots \dots (71)$$

$$= Jdv/dt \dots \dots \dots (72)$$

$$= Jd\omega/dt \dots \dots \dots (73)$$

สมการสมดุลงของแรงในแนวรัศมีรอบแกนหมุนคือ

$$Td - TL - B\omega = Jd\omega/dt \dots \dots \dots (74)$$

หลักการกำหนดโมเมนต์อินเนอเทีย (Moment of inertia) ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีหาได้ จากสมการที่ (74) โดยการทดสอบด้วยวิธี รีตาร์ดเดชั่น (Retardation test) เป็นวิธีการหาค่าแรงบิดสูญเสียที่เกิดจากการหมุนของมอเตอร์ขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงต่อประกับกับโหลดของระบบวิธีการทดสอบทำได้โดยป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้มอเตอร์หมุนที่พิกัดความเร็วรอบที่ 1500 รอบ/นาที แล้วทำการปลดแรงดันที่ขั้วมอเตอร์ออกทำการในลักษณะนี้ 2 ครั้ง มีวิธีการดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงหมุนที่พิสัยความเร็วรอบ 1500 รอบ/นาที กระแสไหลเข้ามอเตอร์ขณะไม่มีโหลด $I_1=0.4A$ เมื่อปลดแรงดันที่ขั้วมอเตอร์ความเร็วรอบมอเตอร์ลดลงเหลือ 1400 ใช้ เวลาประมาณ 2.5 นาที

2. ทำเหมือนข้อที่ 1 เมื่อปลดแรงดันที่ขั้วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแล้วต่อความต้านทานขนาด 300ohm ทำให้ความเร็วรอบมอเตอร์ลดลงจาก 1500 ไปสู่ 1400 รอบ/นาที ใช้เวลาประมาณ 1.5 วินาที แรงดันที่ขั้วมอเตอร์ก่อนจ่ายกระแสให้โหลดความต้านทาน $V_1=200V$ หลังจากจ่ายโหลดแรงดันลดลงเหลือ $V_2=180V$ และกระแสหลังจากจ่ายโหลด $I_2=0.8A$ เวลาที่ใช้เมื่อความเร็วรอบลดลงจาก 1500 ไปสู่ 1400 รอบ/นาที 1.7 นาที กำลังที่จ่ายโหลดเป็นค่าเฉลี่ยหาได้จาก กระแสและแรงดัน

I_1 =กระแสก่อนจ่ายโหลด

I_2 =กระแสหลังจ่ายโหลด

V_1 =แรงดันก่อนจ่ายโหลด

V_2 =แรงดันหลังจากจ่ายโหลด

N =ความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่พิสัย

$$I_{av} = \frac{I_1 + I_2}{2} = \frac{0.4 + 0.8}{2} = 0.6 \dots\dots\dots(75)$$

$$V_{av} = \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{200 + 180}{2} = 190 \dots\dots\dots(76)$$

กำลังสูญเสียเมื่อจ่ายโหลด $P_{av} = V_{av} I_{av} = 190 * 0.6 = 114W \dots\dots\dots(77)$

กำลังการสูญเสียขณะหมุน $P_{rot} = [\frac{2\pi}{60}]^2 J N (\frac{\Delta n}{\Delta t}) \dots\dots\dots(78)$

ค่า J หาได้โดยให้กำลังการสูญเสียเมื่อมอเตอร์จ่ายโหลดเท่ากับกำลังสูญเสียจากการหมุนคือ

$$P_{av} = V_{av} I_{av} = 190 * 0.6 = 114W = P_{rot} = [\frac{2\pi}{60}]^2 J N (\frac{\Delta n}{\Delta t}) \dots\dots\dots(79)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta n = 100 \text{ รอบ/นาที}$$

$$\Delta t = 1.5 \text{ S}$$

ค่า J หาได้จากสมการที่ (79)

$$\begin{aligned} J &= \frac{P_{av}}{(2\pi/60)^2 * N * (\Delta n / \Delta t)} \\ &= \frac{114}{(2\pi/60)^2 * 1500 * (100/1.5)} \dots\dots\dots(80) \\ &= 0.104 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$





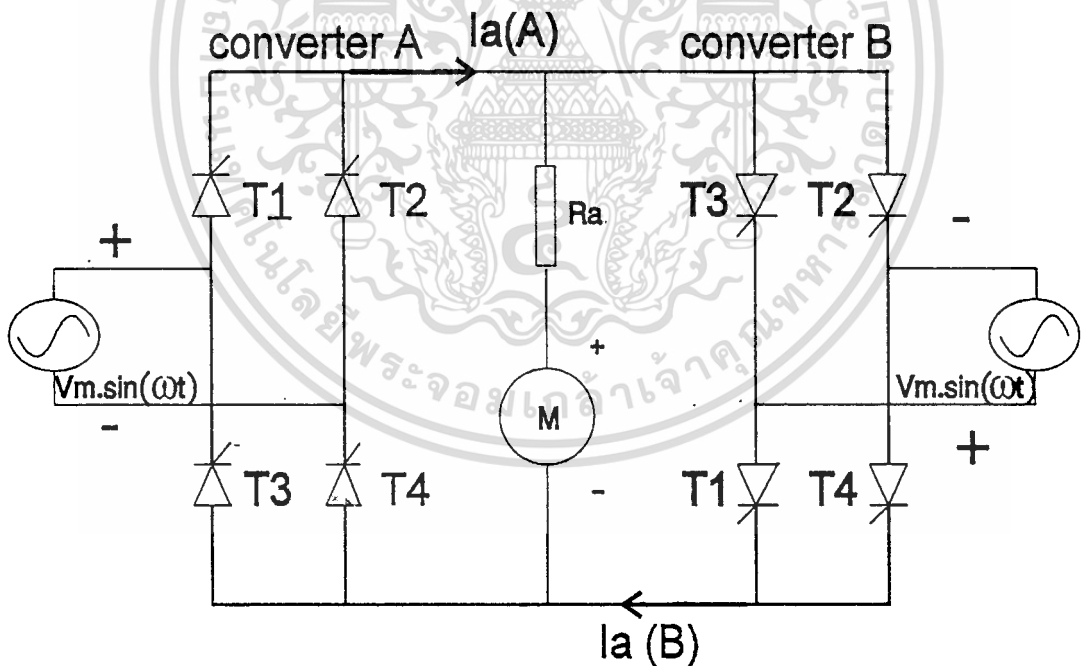
ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหยุดนำกระแสของคู่อัลคอนเวอร์เตอร์เมื่อได้รับแรงดันเอซีไลน์รีเวอร์สจากแหล่งจ่ายแรงดันอินพุทเป็นชนิด 1 เฟส

คอนเวอร์เตอร์ชุดที่หนึ่งหรือชุดที่สองถูกทำให้หยุดนำกระแส โดยปลดสัญญาณทริกออก จากไทรสเตอร์ชุดคอนเวอร์เตอร์จะไม่หยุดนำกระแสอย่างทันทีทันใดต้องมีเวลาหน่วงให้ไทรสเตอร์ถูก รีเวอร์สโดยเอซีไลน์รีเวอร์สก่อนที่จะให้คอนเวอร์เตอร์อีกชุดนำกระแสเพราะคอนเวอร์เตอร์สองชุด

ภาพที่ 76



การบล็อกคอนเวอร์เตอร์หยุดนำกระแสโดยแรงดันเอซีไลน์รีเวอร์ส

ต่อขนานแบบกลับขั้วถ้าชุดหนึ่งชุดใดไม่หยุดนำกระแสก่อนอีกชุดหนึ่งนำกระแสขึ้นมาทำให้เกิด ลัดวงจรระหว่างเฟสกับนิวทรัล ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นอีกกรณีหนึ่ง เมื่อตัวจับกระแสตรวจพบว่า กระแสในขณะนั้นเป็นศูนย์แต่กระแสไม่เป็นศูนย์ซึ่งอยู่ในช่วงกระแสไม่ต่อเนื่องและได้ส่งผลการ

ตรวจจับสัญญาณกระแสไปยังวงจรถบคุมซึ่งวงจรถบคุมได้เข้าใจว่ากระแสเป็นศูนย์จึงสั่งให้คอนเวอร์เตอร์อีกชุดหนึ่ง นำกระแสเป็นเหตุให้เกิดการลัดวงจรโดยผ่าน ไทริสเตอร์ทำให้ได้รับอันตรายถึงขั้นเสียหายได้ การพิจารณาเวลาหน่วงชุดคอนเวอร์เตอร์ให้หยุดนำกระแสประมาณ $1/2$ ไซเคิลของคลื่นไฟฟ้ากระแสลับ 50 Hz ในกรณีซิงเกิลเฟสมีดังต่อไปนี้

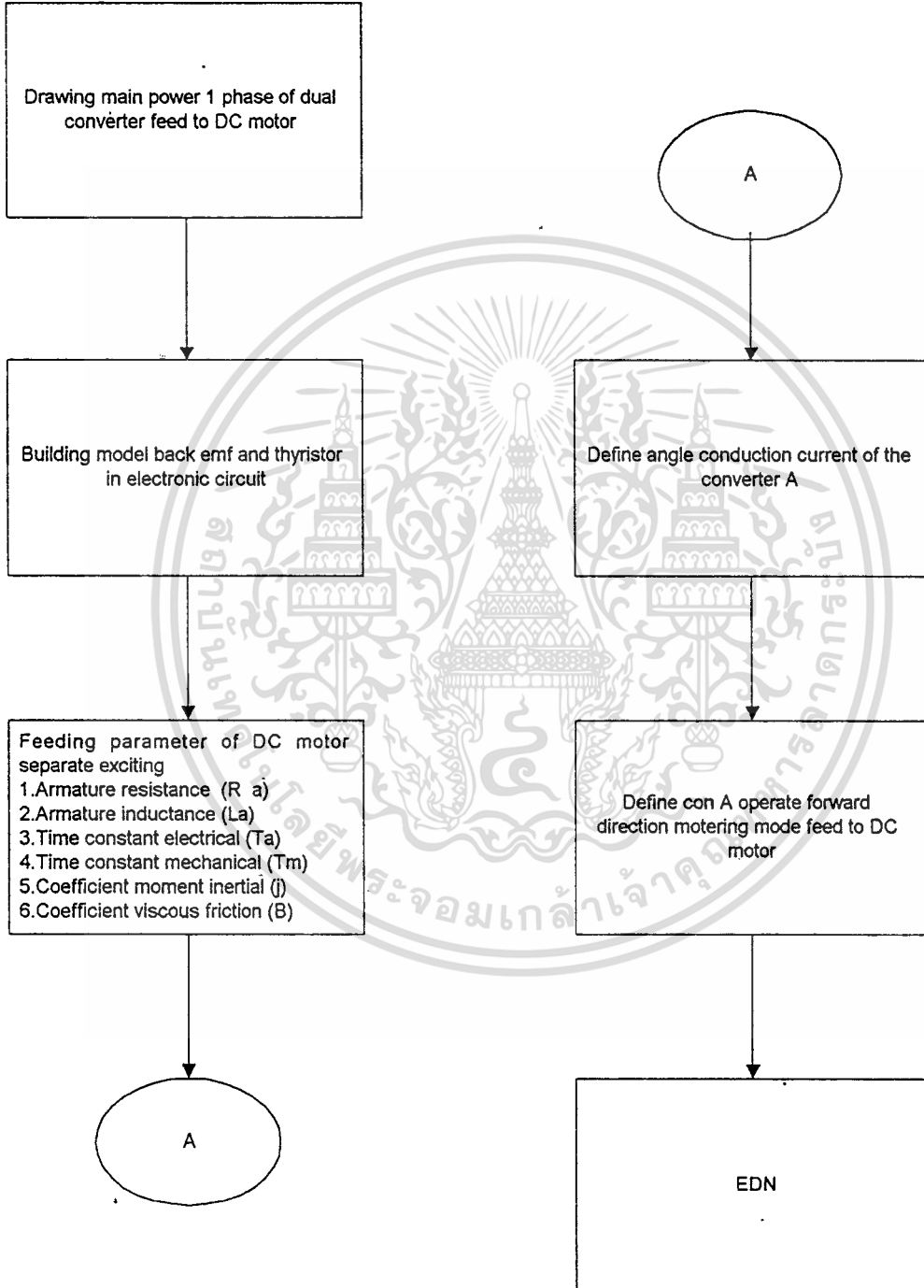
T1A,T4A	ในช่วง $(0-\pi)$	แรงดัน A เทียบกับ K เป็น +
T2A,T3A	ในช่วง $(0-\pi)$	แรงดัน A เทียบกับ K เป็น -
T1A,T4A	ในช่วง $(\pi-2\pi)$	แรงดัน A เทียบกับ K เป็น -
T2A,T3A	ในช่วง $(\pi-2\pi)$	แรงดัน A เทียบกับ K เป็น +
T1B,T4B	ในช่วง $(0-\pi)$	แรงดัน A เทียบกับ K เป็น -
T2B,T3B	ในช่วง $(0-\pi)$	แรงดัน A เทียบกับ K เป็น +
T1B,T4B	ในช่วง $(\pi-2\pi)$	แรงดัน A เทียบกับ K เป็น +
T2B,T3B	ในช่วง $(\pi-2\pi)$	แรงดัน A เทียบกับ K เป็น -

ในช่วงเวลา $(0-\pi)$ ถ้าคู่ของไทริสเตอร์ T1A,T4A ของคอนเวอร์ชุด A ไม่หยุดนำกระแสก่อนที่คู่ไทริสเตอร์ T2B,T3B นำกระแสจะเกิดลัดวงจรขึ้นระหว่างไลน์กับนิวทรอน ส่วนในช่วงเวลา $(\pi-2\pi)$ ถ้าคู่ของคอนเวอร์ชุด A ไม่หยุดนำกระแสก่อนที่คู่ไทริสเตอร์ T1B,T4B นำกระแสจะเกิดลัดวงจรขึ้นระหว่างไลน์กับนิวทรอนเวลาหน่วงจะต้องมีประมาณ 10mS เพื่อให้คู่ไทริสเตอร์หยุดนำกระแสโดยแรงดันเอซีไลน์รีเวอร์ส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

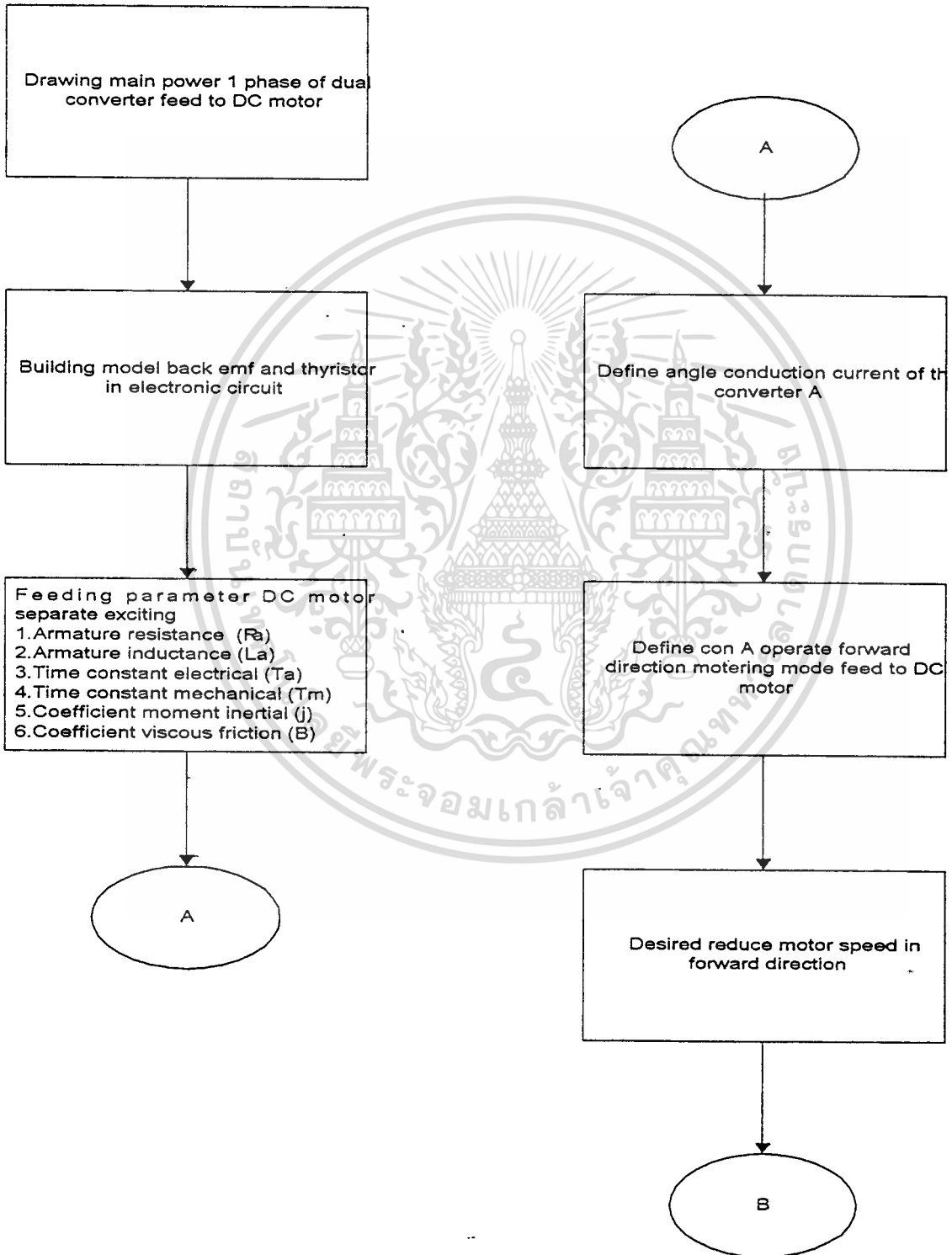
ขั้นตอนการซิมมูลชัน กระแสเมเจอร์ไหลต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องในทิศ ทางความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกา

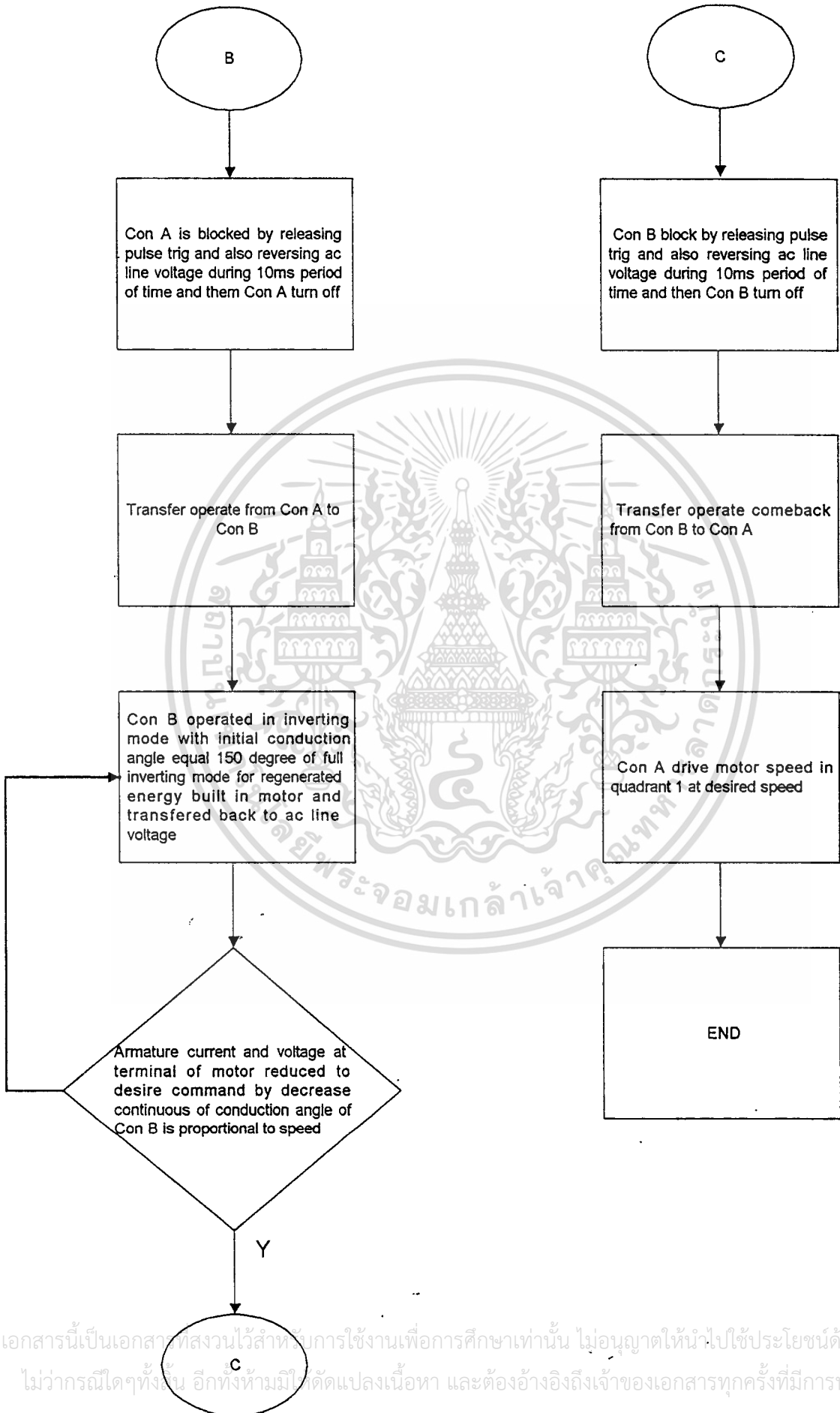




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการซิมูเลชัน ทิศทางการไหลของกระแสเมเจอร์ขณะกลับทิศ
ทางความเร็วรอบมอเตอร์จากความเร็วรอบทวนเข็มนาฬิกาไปสู่ความเร็วรอบ
ตามเข็มนาฬิกา







เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

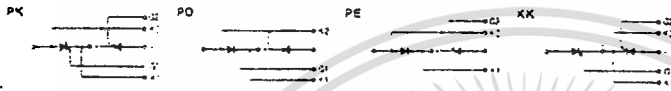
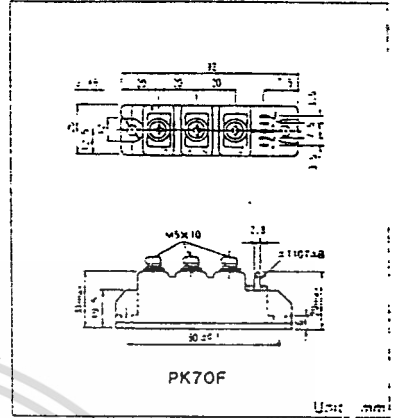
THYRISTOR MODULE PK(PD,PE,KK)70F

Power Thyristor/Diode Module PK70F series are designed for various rectifier circuits and power controls. For your circuit application, following internal connections and wide voltage ratings up to 1,600 V are available. High precision 25 mm (1inch) width package and electrically isolated mounting base make your mechanical design easy.

- I_{T(AV)} 70A, I_{T(RMS)} 110A, I_{TSM} 1950A
- di/dt 150 A/μs
- dv/dt 500 V/μs

- (Applications)
- Various rectifiers
 - AC/DC motor drives
 - Heater controls
 - Light dimmers
 - Static switches

UL:E76102(M)



Maximum Ratings

Symbol	Item	PK70F-40	PK70F-80	PK70F-120	PK70F-160	Unit
V _{RRM}	* Repetitive Peak Reverse Voltage	400	800	1200	1600	V
V _{RSM}	* Non-Repetitive Peak Reverse Voltage	480	960	1300	1700	V
V _{ORM}	Repetitive Peak Off-State Voltage	400	800	1200	1600	V

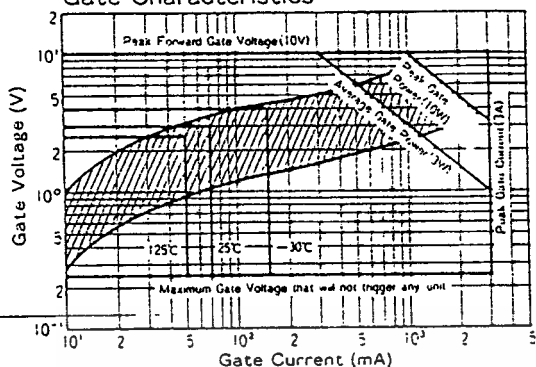
Symbol	Item	Conditions	Ratings	Unit
I _{T(AV)}	* Average On-State Current	Single phase, half wave, 180° conduction, T _c : 94°C	70	A
I _{T(RMS)}	* R.M.S On-State Current	Single phase, half wave, 180° conduction, T _c : 94°C	110	A
I _{TSM}	* Surge On-State Current	1/2 cycle, 50/60Hz, peak value, non-repetitive	1800/1950	A
I ² t	* I ² t	Value for one cycle of surge current	16200	A ² S
P _{GM}	Peak Gate Power Dissipation		10	W
P _{SAV}	Average Gate Power Dissipation		3	W
I _{FGM}	Peak Gate Current		3	A
V _{FGM}	Peak Gate Voltage(Forward)		10	V
V _{RCM}	Peak Gate Voltage(Reverse)		5	V
di/dt	Critical Rate of Rise of On-State Current	I _g = 100mA, T _j = 25°C, V _g = 1/2 V _{DRM} , di _g /dt = 0.1A/μs	150	A/μs
V _{ISO}	* Isolation Breakdown Voltage(R.M.S)	A.C. 1minute	2500	V
T _j	* Operating Junction Temperature		-40~+125	°C
T _{stg}	* Storage Temperature		-40~+125	°C
Mounting Torque	(M5)	Recommended Value 25kgf·cm	22~28	kgf·cm
	Terminal (M5)	Recommended Value 25kgf·cm	22~28	
Mass			170	g

Electrical Characteristics

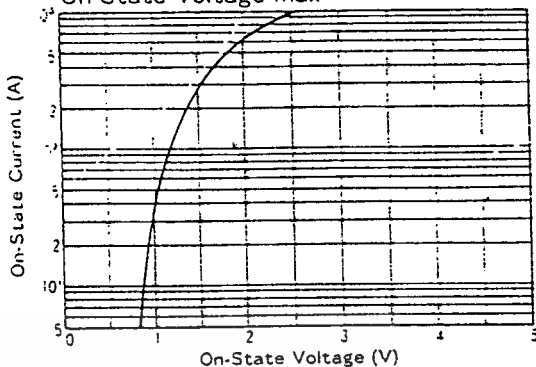
Symbol	Item	Conditions	Ratings	Unit
I _{ORM}	Repetitive Peak Off-State Current, max.	at V _{ORM} , single phase, half wave, T _j = 125°C	15	mA
I _{RRM}	* Repetitive Peak Reverse Current, max.	at V _{ORM} , single phase, half wave, T _j = 125°C	15	mA
V _{TM}	* Peak On-State Voltage, max.	On-State Current 220A, T _j = 25°C inst. measurement	1.40	V
I _{GT} /V _{GT}	Gate Trigger Current/Voltage, max.	T _j = 25°C, I _T = 1A, V ₀ = 6V	70/3	mA/V
V _{GO}	Non-Trigger Gate, Voltage, min.	T _j = 125°C, V ₀ = 1/2 V _{DRM}	0.25	V
t _{ST}	Turn On Time, max	I _T = 70A, I _g = 100mA, T _j = 25°C, V ₀ = 1/2 V _{DRM} , di _g /dt = 0.1A/μs	10	μs
dv/dt	Critical Rate of Rise of On-State Voltage, min.	T _j = 125°C, V ₀ = 2/3 V _{DRM} , Exponential wave.	500	V/μs
I _H	Holding Current, typ.	T _j = 25°C	50	mA
I _L	Latching Current, typ.	T _j = 25°C	100	mA
R _{th(j-c)}	* Thermal Impedance: max.	Junction to case	0.33	°C/W

* mark : Thyristor and Diode part. No mark : Thyristor part

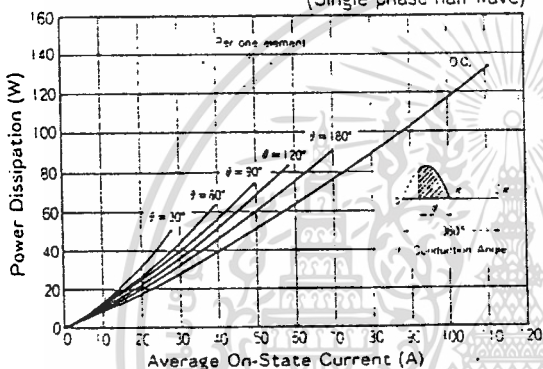
Gate Characteristics



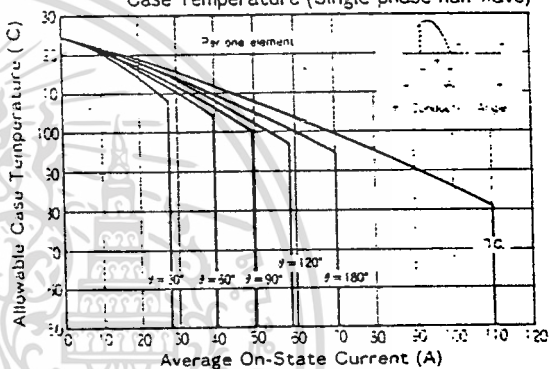
On-State Voltage max



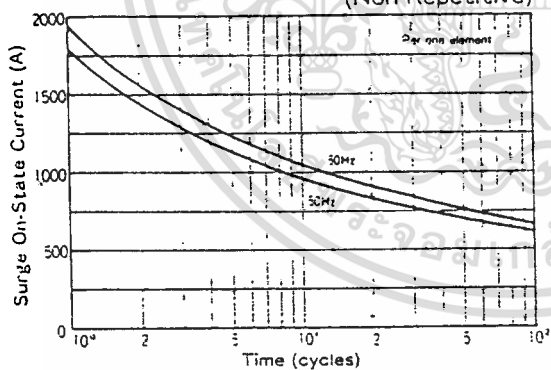
Average On-State Current Vs Power Dissipation (Single phase half wave)



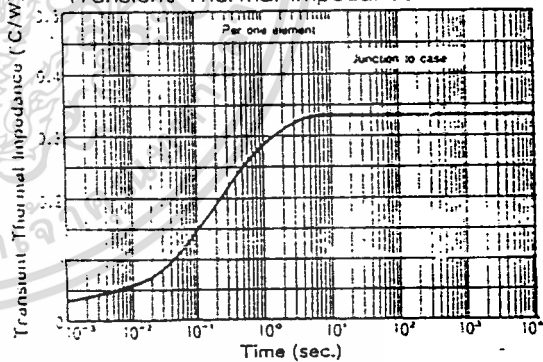
Average On-State Current Vs Maximum Allowable Case Temperature (Single phase half wave)



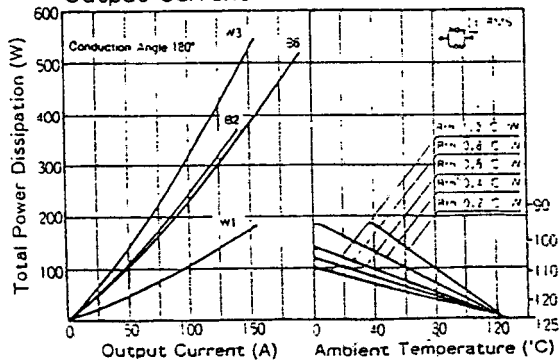
Surge On-State Current Rating (Non-Repetitive)



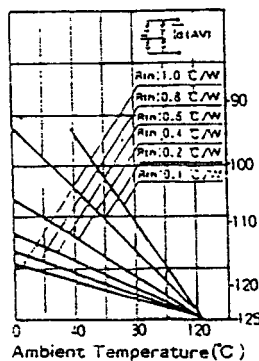
Transient Thermal Impedance



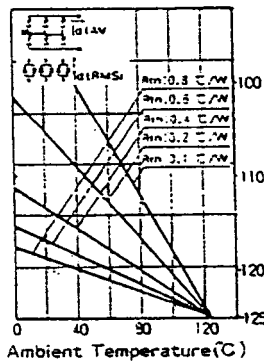
Output Current W1: Bidirectional connection



W2: Two pulse bridge connection



W3: Six pulse bridge connection W3: Three phase bidirectional connection





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงแบบ 4 ควอดแรนท์

4-QUADRANT DC MOTOR DRIVE

ศุรวีร์ บัณฑุกุล *

ร.ศ. ดร. วิริยะ พิเชษฐจำริญ **

บทคัดย่อ

บทความนี้จะกล่าวถึงการออกแบบสร้างและพัฒนา คู่อัตขนเวอร์เตอร์ชนิดต่อกลับทิศทางกัน (Anti-parallel) เพื่อใช้ในงานควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ดีซีให้สามารถทำงานได้ทั้งสี่ควอดแรนท์ของแรงดันและกระแส วงจรจะประกอบด้วยคอนเวอร์เตอร์แบบฟูลลีสวิตชิ่งสองชุดต่อกันกลับทิศทางกัน ขณะที่มอเตอร์ชุดหนึ่งกำลังขับโหลดในทิศทางฟอร์เวิร์ดหรือรีเวอร์สจะสามารถลดความเร็วรอบได้อย่างทันทีทันใดโดยอาศัยการควบคุมให้ทำงานในโหมดรีเจนเนอเรทีฟ หรือโหมดอินเวอร์เตอร์ซึ่งในโหมดนี้พลังงานที่เพลาของมอเตอร์จะถูกป้อนกลับผ่านคอนเวอร์เตอร์ ชุดที่สองในทิศทางรีเวอร์สให้กลับเข้าไปในแหล่งจ่ายไฟสลับหลังจากที่คอนเวอร์เตอร์ชุดฟอร์เวิร์ดถูกทำให้หยุดการทำงานด้วยรีเวอร์สโวลต์ของเอซีไลน์ จากหลักการดังกล่าวทำให้สามารถลดความเร็วรอบมอเตอร์ลงได้อย่างทันทีทันใด โดยไม่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานแต่อย่างใดนอกจากนี้ยังทำให้ผลตอบสนองในการลดความเร็วรอบเป็นไปอย่างรวดเร็วและระบบสามารถทำงานอย่างมีประสิทธิภาพสูง

ABSTRACT

This paper present the design and construction of an anti-parallel connected dual converter used to control the speed of a dc motor capable of operating in four quadrants of voltage and current parameters. The circuit configuration is compose of two main units of fully-controlled converter conneted in anti-parallel to

** รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรม ไฟฟ้า

* นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรม ไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า
คุณทหารลาดกระบัง

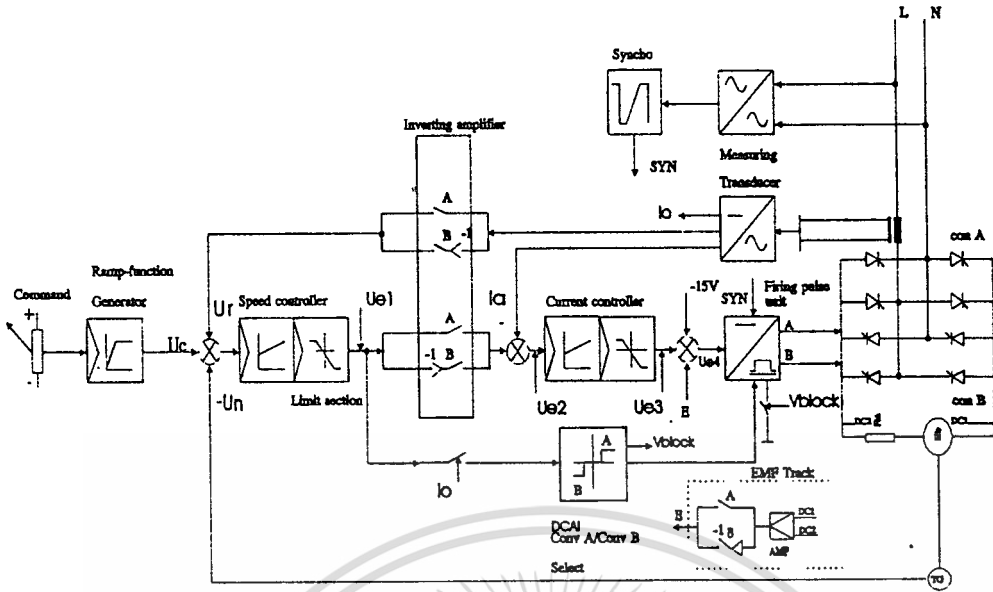
each other. The speed of the motor while delivering torque either in forward or reverse direction can be reduce by operating in a regenerative mode by which the mechanical energy is fedback through the other converter to the ac supply after the forward converter is switch off by the reverse voltage of ac supply. By this method, the response of speed reduction can be obtained within a short period and the machine can operate in this mode with high efficiency.

1. บทนำ

การเบรกความเร็วรอบมอเตอร์เพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ให้ไปสู่ค่าความเร็วรอบที่ต้องการและรวมไปถึงการทำให้มอเตอร์หยุดเดินบ่อยๆ ที่ใช้ในขบวนการผลิตที่ซับซ้อนจะต้องนำพลังงานที่มอเตอร์กักเก็บขึ้นออกจากมอเตอร์ในสมัยที่เพาเวอร์เซมิคอนดักเตอร์และอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ยังไม่มีการพัฒนามากนักการเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ ต้องอาศัยหลักการเบรกแบบไดนามิกเบรก โดยใช้ความต้านทานเป็นตัวรับพลังงานที่จ่ายออกจากมอเตอร์ ซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อนและความเร็วเป็นผลให้การเบรกช้าเพราะว่าความต้านทานที่เป็น โหลดให้แก่มอเตอร์ จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การเบรกแบบไดนามิกจะใช้กับมอเตอร์ที่มีขนาดไม่ใหญ่มากนักถ้ามอเตอร์มีขนาดใหญ่ต้องใช้ความต้านทานที่มีกำลังที่สามารถทนความร้อนได้สูง ซึ่งเป็นการยากที่จะหาได้ในท้องตลาดทั่วไปต่อมาได้มีการพัฒนามาใช้หลักการของ วาร์ด เลียนาร์ด (Ward Leonard) ซึ่งควบคุมการเบรกความเร็วรอบมอเตอร์แบบรีเจนเนอเรทีฟ หลักการนี้ประกอบไปด้วยแมชชีนถึงสามตัวทำให้มีขนาดใหญ่และผลตอบสนองทางด้าน ไดนามิกช้าและสิ้นเปลืองพลังงานมาก แมชชีนตัวแรกจะรับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ขั้วคีมแมชชีนตัวที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



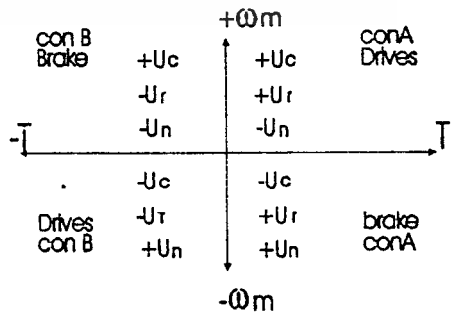
รูปที่ 1 บล็อก โดอะแกรมวงจรถ้าตั้งและวงจรถควบคุม

สอง เพื่อต้องการทำเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็น ไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายให้กับ แมชชีนตัวที่สาม ให้เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อต้องการเบรกความเร็วรอบมอเตอร์โดยวิธีเงินเนอเรทิฟพลังงานที่เกิดขึ้นที่เพลลาของมอเตอร์จะต้องไหลจากมอเตอร์กลับไปสู่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อเป็นเช่นนั้นแล้วความเร็วรอบของมอเตอร์จะลดลงทำกับความเร็วที่ต้องการ การทำงานจะเปลี่ยนกลับสู่สภาพเดิมการรีเงินเนอเรทิฟในลักษณะนี้ ไม่สามารถคืนพลังงานกลับแหล่งจ่ายไฟฟ้าสลับได้ทำให้ไม่เป็นการประหยัดพลังงาน

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาทางด้านเพาเวอร์เซมิคอนดักเตอร์และอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ โดยการพัฒนาระบบควบคุมและเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ด้วยวิธีรีเงินเนอเรทิฟ โดยใช้คู่อัลตราคอนเวอร์เตอร์ต่อกลับทิศทางกันทำให้สามารถรับพลังงานรีเงินเนอเรทิฟได้และเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ในทิศทางฟอร์เวิร์ดหรือรีเวอร์สเพื่อให้พลังงานที่เกิดจากมอเตอร์ไหลกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟสลับทำให้ไม่เกิดการสูญเสียในตัวแมชชีน เวลาที่ใช้เบรกความเร็วรอบมอเตอร์น้อยลงจึงเหมาะสมกับงานที่ต้องการลดหรือเร่งความเร็วรอบมอเตอร์แม้กระทั่งหยุดเดินบ่อยๆและสามารถกลับทิศทางการหมุนมอเตอร์ได้ทันทีทันใด ดังนั้นมอเตอร์สามารถทำงานได้ทั้งสี่ควอดรันทของระบบ กระแส-แรงดัน

บล็อกการควบคุมประกอบด้วยลูบควบคุมความเร็ว ซึ่งเป็นลูบควบคุมภายนอกและได้รับสัญญาณป้อนกลับแบบลบจากแทค โดเจนเนอเรเตอร์ (-Un) สัญญาณแรงดันที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสแอมเพอร์ (Ue) เพื่อเช็คเซแรงบิดของมอเตอร์ทำให้แรงบิดคงที่เมื่อมีการเปลี่ยนความเร็ว ลูบควบคุมกระแสเป็นลูบควบคุมภายในซึ่งได้รับสัญญาณป้อนกลับจากหม้อแปลงกระแสซึ่งต่อทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อให้ไม่มีผลกับทิศทางการไหลของกระแสแอม-เพอร์ผ่านคอนเวอร์เตอร์ (โหมคอินเวอร์ติง) ไปสู่แหล่งจ่ายไฟสลับหรือจากแหล่งจ่ายไฟสลับผ่านคอนเวอร์เตอร์ไปสู่มอเตอร์ (โหมคคอมเพอเรติง) การเปลี่ยนการทำงานแต่ละควอดรันทที่มีตัวตรวจจับกระแสเป็นศูนย์เพื่อป้องกันไม่ให้คอนเวอร์เตอร์นำกระแสพร้อมกันทั้งสองขูด สัญญาณควบคุมแต่ละควอดรันทมีความสัมพันธ์



รูปที่ 2 สัญญาณควบคุมในแต่ละควอดรันท

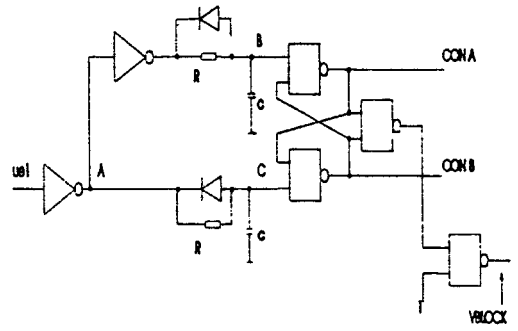
2. บล็อก โดอะแกรมของวงจรถ้าตั้งและวงจรถควบคุม

ตามบล็อกควบคุมในรูปที่ 1 ระบบควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบอนาล็อกประกอบด้วย PI (Proportional plus integral) และใช้หลักการออกแบบด้วยวิธีซิมเมตริกอล ทำให้ผลตอบสนองทางด้าน ไดนามิกดีขึ้นและลู่ติดตามแรมคันย้อนกลับ $U_q(n)$ เพื่อบังคับให้แรงดันที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์เท่ากับแรงดันที่ขั้วมอเตอร์ในช่วงเริ่มเบรกความเร็วรอบมอเตอร์ (โหมคอินเวอร์ต) เพื่อลิมิตกระแสไม่ให้ไหลเกินค่าสูงสุดที่ยอมได้ทำให้เกิดความเสียหายกับคอนเวอร์เตอร์

วงจรกำลังประกอบด้วยคู่ลิตคอนเวอร์เตอร์แบบฟูลคอนโทรลชนิด Non-Circulating Current สองชุดซ้อนกันกลับทิศทางกันคอนเวอร์เตอร์แต่ละชุดจะทำงานสลับกันเมื่อคอนเวอร์เตอร์ชุด A ทำงานคอนเวอร์เตอร์ชุด B จะหยุดทำงานเมื่อต้องการเบรกความเร็วรอบหรือกลับทิศทางความเร็วรอบคอนเวอร์เตอร์ชุด A จะถูกทำให้หยุดนำกระแสโดย แรงดันเอชิลอนรีเวอร์ส หลังจากนั้นคอนเวอร์เตอร์ชุด B จะทำหน้าที่รับพลังงานรีเจนเนอเรทีฟ (โหมคอินเวอร์ต) ส่งพลังงานกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟสลับเมื่อถึงความเร็วที่กำหนดคอนเวอร์เตอร์ชุด B จะหยุดทำงานและเปลี่ยนให้คอนเวอร์เตอร์ชุด A ทำงานต่อ โหมคมอเตอร์จึง สภาวะจะเปลี่ยนจากการเบรกไปสู่สภาวะขับเคลื่อนในทิศทางฟอร์เวิร์ดอีกครั้งหนึ่งการกลับทิศทางความเร็วรอบมอเตอร์ คอนเวอร์เตอร์ชุด B จะทำงานต่อในโหมคมอเตอร์จึงสภาวะจะเปลี่ยนจากการเบรกไปสู่สภาวะการขับเคลื่อนความเร็วในทิศทางรีเวอร์ส

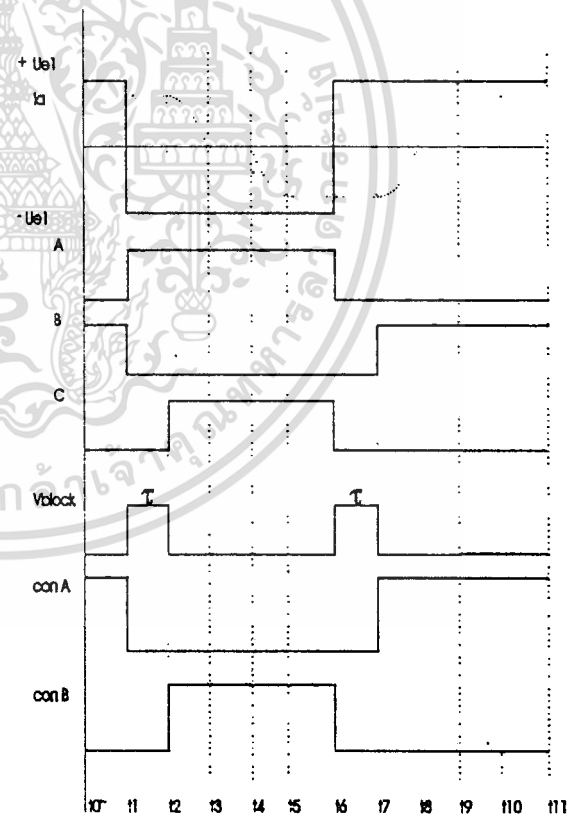
การกลับทิศทางความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกำหนดให้ความเร็วรอบมอเตอร์หมุนในสภาวะคงตัว ความเร็วที่ต้องการ (U_c) และแรงบิดขดลวด (U_t) มีเครื่องหมายเป็นบวก ความเร็วจริงที่ป้อนกลับมีค่าเป็นลบ ($-U_n$) ในทิศทางความเร็วรอบฟอร์เวิร์ด กระแสเอมเจอร์ IA ถูกจ่ายโดยคอนเวอร์เตอร์ชุด A โหลดเข้ามอเตอร์เพื่อสร้างแรงบิดที่เพลามอเตอร์ให้เป็นบวก เมื่อต้องการกลับทิศทางความเร็วรอบมอเตอร์จากทิศทางฟอร์เวิร์ด ไปสู่ทิศทางความเร็วรอบความเร็วรอบในทิศทางรีเวอร์ส สัญญาณความเร็วที่ต้องการ (U_c) ถูกทำให้เป็นลบในช่วงทรานเซียนต์นี้ตัวขับเคลื่อนคอนเวอร์เตอร์ชุด A ถอนมุนำกระแสจากโหมคมอเตอร์จึง ไปสู่โหมคอินเวอร์ตที่ต้องการให้กระแสเอมเจอร์ไหลต่ำกว่า IA และตัวตรวจ จับกระแสเอมเจอร์ IA เป็นศูนย์ได้รับสัญญาณแรงดันจากหม้อแปลงกระแสทำการเปรียบเทียบระดับสัญญาณนี้กับสัญญาณอ้างอิง ถ้ากระแส IA ในช่วงสภาวะทรานเซียนต์หรือสภาวะคงตัวต่ำกว่า 1 A ตัวตรวจจับกระแสจะส่งสัญญาณ I_o บังคับให้อนาล็อก

ตัวตรวจจับวงจรจะทำให้สัญญาณ U_{e1} ป้อนให้วงจร DCAI ได้ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรเลือกและบล็อกคอนเวอร์เตอร์ (DCAI)

และเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกของกระแสเอมเจอร์ IA ให้เป็นสัญญาณดิจิทัลระดับลอจิก Q และ 1 เพื่อเลือกคอนเวอร์เตอร์และมีการทำงานตามไทม์มิงโคเดแกรมของวงจร DCAI ในรูปที่ 4 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4 ไทม์มิงการไอน์ย้ายการทำงานของคอนเวอร์เตอร์

Ue-1 คอนเวอร์เตอร์ชุด A ทำงานที่สภาวะคงตัวความเร็ว

รอบในทิศทางฟอร์เวิร์ด ควอแดรนต์ที่ 1 เมื่อต้องการกลับทิศทางความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สัญญาณ U_{e1} ถูกทำให้กลับขั้วจาก บวกเป็นลบในช่วงนี้ความเร็วรอบคงที่

e1-e2 สัญญาณบล็อก (V_{block}) มีลอจิก 1 เพื่อปลดล๊อค ทริกไทรสเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์ชุด A ให้หยุดนำกระแสโดยแรงดันเอซีไลน์รีเวอร์ส $\tau=10ms$ ถ้าลอจิกของสัญญาณ (V_{block}) เป็นศูนย์ 0 จะให้ล๊อคทริกไทรสเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์

e2-e3 คอนเวอร์เตอร์ชุด B ทำงานในโหมดอินเวอร์ต ควอแดรนต์ที่ 2 เพื่อรับพลังงานรีเจนเนอเรทีฟที่เกิดขึ้นบนมอเตอร์ไหลกลับแหล่งจ่ายไฟสลับ กระแสแอมเพอร์จะไหลกลับทิศทางความเร็วรอบมอเตอร์ลดลง

e3-e4 ความเร็วรอบมอเตอร์มีค่าเท่ากับศูนย์

e4-e5 คอนเวอร์เตอร์ชุด B ทำงานในโหมดมอเตอร์รีจ ควอแดรนต์ที่ 3 หมุนในทิศทางรีเวอร์สและเร่งความเร็วไปสู่ค่าที่ต้องการ

e5-e6 มอเตอร์ทำงานที่สภาวะคงตัวความเร็วรอบในทิศทางรีเวอร์ส

e6-e11 การกลับทิศทางความเร็วรอบจากรีเวอร์สไปสู่ฟอร์เวิร์ดมีขั้นตอนการทำงานเหมือนกับช่วงเวลา e0-e6

ขบวนการกลับทิศทางความเร็วรอบจากฟอร์เวิร์ดไปสู่ความเร็วรอบในทิศทางรีเวอร์สจะเสร็จสิ้นที่เวลา e6

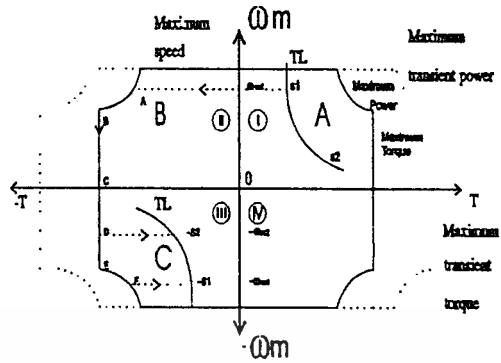
3. การทำงานในแต่ละโหมดการกลับทิศทางความเร็วรอบมอเตอร์แบบกระแสไหลกลับทิศทาง

• โหมด A ความเร็วรอบมอเตอร์ (ω_{m1}) หมุนในทิศทางฟอร์เวิร์ด โหมดมอเตอร์รีจ (ควอแดรนต์ที่ 1) ที่จุด S1 ทำงานที่สภาวะคงตัว มุมนำกระแสคอนเวอร์เตอร์อยู่ระหว่าง $0 < \alpha < \pi/2$ สมการแรงดันเฉลี่ยดีซีที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์ชุด A ในสมการที่ (1) เพื่อสร้างแรงบิดทาง

$$U_a = [2U_m/\pi] \cos(\alpha_a) \dots\dots\dots(1)$$

ด้านเอาท์พุทมอเตอร์ที่เป็นบวก (+Md) และจ่ายกระแสจากแหล่งจ่ายไฟหลักเอซีไปสู่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในสมการที่ (2) โดยผ่านคอนเวอร์เตอร์ชุด A แรงดันที่มอเตอร์เป็นความแตกต่างระหว่างแรงดันที่ขั้วมอเตอร์กับแรงดันย้อนกลับ $U_{q(n)}$ มีค่าเป็นบวกทำให้แรงดันคอนเวอร์เตอร์มีค่ามากกว่าแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ดังสมการที่ (3)

$$(+I_a) = [(2U_m/\pi \cos(\alpha_a) - U_{q(n)})/R_a] \dots\dots\dots(2)$$



..... เส้นแสดงขอบเขตสูงสุดในช่วงทรานเซียนลของแรงบิด-ความเร็วและกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

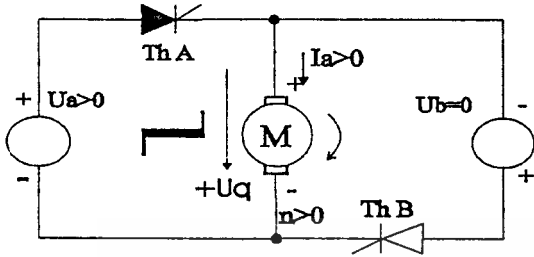
..... เส้นแสดงขอบเขตสูงสุดในช่วงสภาวะคงตัวของแรงบิด-ความเร็วและกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

รูปที่ 5 กราฟการทำงานในแต่ละควอแดรนต์ของโหมดการเปลี่ยนความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจาก คอนเวอร์เตอร์ชุด A ไปสู่คอนเวอร์เตอร์ชุด B (Change-over logic)แบบกระแสแอมเพอร์ไหลกลับทิศทาง

$$U_a > U_{q(n)} \therefore (U_a) - (+U_{q(n)}) = +\Delta U_a \dots\dots\dots(3)$$

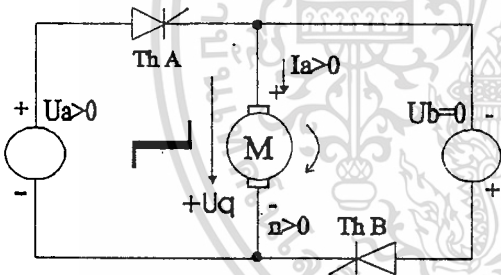
กระแสแอมเพอร์ (+Ia) จะไหลจากแหล่งจ่ายไฟหลักเอซีไปสู่มอเตอร์สัญญาณแรงดัน U_r ที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสแอมเพอร์โดยการวัดจากหม้อแปลงกระแสที่ติดตั้งอยู่ทางด้านไฟสลับเพื่อไม่ให้มีผลกับทิศทางกระแสแอมเพอร์มีอัตราส่วนจำนวนรอบ 1:1000 ผ่านวงจรเรียงกระแสทำให้เอาท์พุท U_r มีค่าเป็นบวกหรือลบขึ้นอยู่กับ คอนเวอร์เตอร์ชุด A หรือชุด B นำกระแสโดยผ่านอินเวอร์ตดิ้งแอมพลิไฟเออร์และสัญญาณความเร็วที่ต้องการมีค่าเป็นบวก U_c ความเร็วจริงที่ป้อนกลับจากแทคโคโนเนอเรเตอร์มีค่าเป็นลบ $-U_m$ ดังในรูปที่ 2 เมื่อวงจรควบคุมได้รับคำสั่งให้กลับทิศทางความเร็วรอบของมอเตอร์สัญญาณความเร็วที่ต้องการ (U_c) ถูกทำให้มีค่าเป็นลบและส่งสัญญาณไปให้วงจร DCAI (Digital control Analog Inverter) เพื่อเลือกคอนเวอร์เตอร์ชุด B นำกระแสในโหมดอินเวอร์ตดิ้ง (ควอแดรนต์ที่ 2) ก่อนการโอนย้ายการทำงานจากคอนเวอร์เตอร์ชุด A ไปสู่คอนเวอร์เตอร์ชุด B ในช่วง

ทรานเซียนวจร DC/AC จะส่งสัญญาณปลด พัลส์ทริกไทรส-เตอร์ (Vbolck) เพื่อ บล็อกคอนเวอร์เตอร์ชุด A ให้หยุดกระแส โดยแรงดัน เอชอีไลน์รีเวอร์ส ในช่วงเวลา 10ms สำหรับ จึงเกิดเฟส



รูปที่ 6 คอนเวอร์เตอร์ชุด A นำกระแสไหลย้อนมอเตอร์รีจ (ควอ-แดรนท์ที่ 1) ความเร็วรอบในทิศทางฟอร์เวิร์ด

ดังใน รูปที่ 7 จากนั้นตัวตรวจจับกระแสเป็นศูนย์(Io) เป็นตัว ผ่านสัญญาณจากควบคุมความเร็วให้ วงจรเลือกคอนเวอร์-เตอร์ (DC/AC) และป้อนสัญญาณพัลส์ทริกไทรสเตอร์ให้แก่คอน เวอร์เตอร์ชุด B



รูปที่ 7 บล็อกคอนเวอร์เตอร์ A หยุดนำกระแสโดย เอชอีไลน์รีเวอร์ส

●โหมด B เมื่อคอนเวอร์เตอร์ชุด B ได้รับสัญญาณทริกไทรส-เตอร์จะนำกระแสในโหมดอินเวอร์ตติ้ง (ควอแดรนท์ที่ 2) มุมนำ กระแสอยู่ในช่วง $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$ ที่จุด A ดังในรูปที่ 3 เพื่อรีเจนเนอเรทีฟพลังงานที่เกิดขึ้นบน โรเตอร์กลับไปยังแหล่ง จ่ายไฟสลับดังในรูปที่ 8 และสร้างแรงบิดที่เป็นลบ (-MD) ที่ เกิดจากกระแสย้อนกลับที่ไหลกลับทิศทางเดิม (-Ia) โดย ไหลผ่านคอนเวอร์เตอร์ชุด B ทำหน้าที่รับพลังงานรีเจนเนเร ทีฟโหมดอินเวอร์ตติ้ง แรงดันที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์ชุด B มีขั้ว เหมือนกับแรงดันที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์ชุด A (ก่อนหยุดนำ กระแส) จากความสัมพันธ์แรงดันในสมการที่ (4) ทำให้ขั้ว แรงดันย้อนกลับ $Uq(n)$ ยังขั้ว

คงเดิมและขนาดแรงดันที่ขั้วคอนเวอร์เตอร์เท่ากับแรงดันย้อน กลับในช่วงเริ่มการรีเจนเนอเรทีฟ แรงดันคอนเวอร์เตอร์ชุด B ซึ่งมีค่าเป็นบวกและลดลงอย่างต่อเนื่องตามสัญญาณควบคุม $Ue4$ ซึ่งถูกติดตามโดยรูปติดตามแรงดันย้อนกลับตามสภาวะ จริง (Back emf Tracking) เพื่อให้กระแสที่เกิดจากโรเตอร์ ขณะหมุนไหลกลับแหล่งจ่ายไฟสลับได้ในรูปที่ 15 ซึ่งเป็นภาพ แสดงขณะคลื่น โวลต์และกระแสที่ป้อนให้มอเตอร์ในขณะของ การเปลี่ยนโหมดจากอินเวอร์ตติ้งไปสู่มอเตอร์รีจ โดยที่มุมนำ กระแสเริ่มต้นที่ $\alpha = 5\pi/6$ และวิ่งเข้าสู่มุม $\alpha = \pi/2$ และมอเตอร์มีความเร็วรอบลดลงโดยจะเห็นกระแสมีขนาดสูง ขึ้นเรื่อยๆ อันเนื่องจากคลื่น โวลต์จากคอนเวอร์เตอร์ลดลง ความ แตกต่างระหว่างแรงดันที่ขั้วมอเตอร์กับแรงดันย้อนกลับเป็นลบ เพราะแรงดันย้อนกลับที่ถูกกำเนิดขึ้นจากการกลับขั้วของ โหลด ทำให้มีค่ามากกว่าแรงดันมอเตอร์ที่จ่ายให้โดยคอนเวอร์เตอร์ชุด A ดังสมการ (5)

$$U_a < +U_q(n) \therefore (-U_a) - (U_q(n)) = -\Delta U_a \dots\dots\dots (5)$$

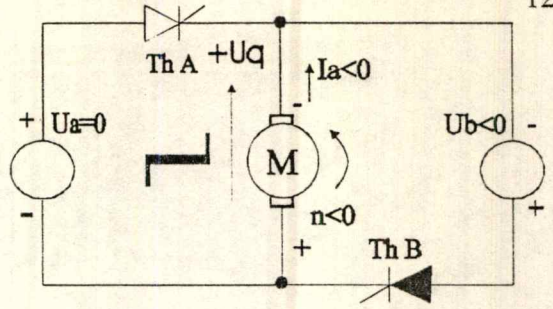
การทำงาน ในโหมดนี้เป็นการเบรกความเร็วรอบ มอเตอร์ด้วยหลักการทาง ไฟฟ้าเมื่อกระแสแอมแปร์จอร์เจินเน-เรทีฟกลับไปแหล่งจ่ายไฟสลับความเร็วรอบมอเตอร์จะลดลง อย่างต่อเนื่องตามเส้นทาง A,B,Cจนกระทั่งความเร็วเป็นศูนย์ดัง ใน รูปที่ 5

●โหมด C เมื่อความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและแรง ดันย้อนกลับในช่วงเริ่มต้นเป็นศูนย์ในรูปที่ 7 มุมนำกระแส ไทรสเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์ชุด B จะถูกเลื่อนโหมดการ ทำงานจากโหมดอินเวอร์ตติ้ง $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$ เข้าสู่โหมด มอเตอร์รีจ (ควอแดรนท์ที่ 3) $0 \leq \alpha \leq \pi/2$ ดังในรูปที่ 10 เพื่อสร้างแรงบิดค่าที่ทุก (Md) และ แรงดันย้อนกลับ $Uq(n)$ ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่เป็นลบจากความสัมพันธ์ ของแรงดันในสมการที่ (6)

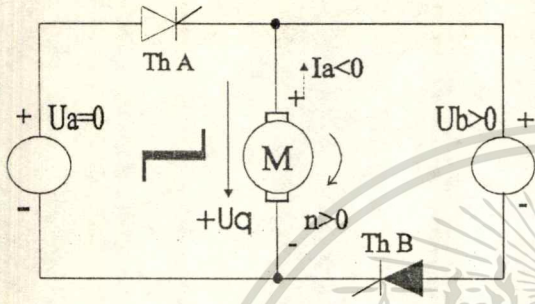
$$U_b = [2 U_m/\pi] \cos(\pi - \alpha) \dots\dots\dots (6)$$

กระแสแอมแปร์ไหลจากแหล่งจ่ายไฟสลับไปสู่มอเตอร์และแรง ความเร็วไปสู่ค่าที่ต้องการแต่มีทิศทางสวนกับทิศทางเดิมซึ่ง หมายถึงมอเตอร์หมุนในทิศทางรีเวอร์สตามเส้นทาง C,D,E,F และเข้าสู่จุดความเร็วที่ต้องการที่ตำแหน่ง -S1 ดังในรูปที่ 5

ความสามารถของการขับเคลื่อนแบบ 4 ควอเตอร์ในระนาบกระแส-แรงดัน สามารถเบรกความเร็วรอบได้อย่างทันทีทันใดโดยการเปลี่ยนโหมดการทำงานในแต่ละควอเตอร์เพื่อรีเจนเนอเรทีฟพลังงานที่เกิดขึ้นที่มอเตอร์ไฟตรงกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟสลับการตอบสนองกระแสเมื่อเบรกความเร็วรอบในทิศทางฟอร์เวิร์ดจากความเร็วรอบ +300 รอบ/นาที ไปสู่ความเร็วรอบ +50 รอบ/นาที ในรูปที่ 11 และ

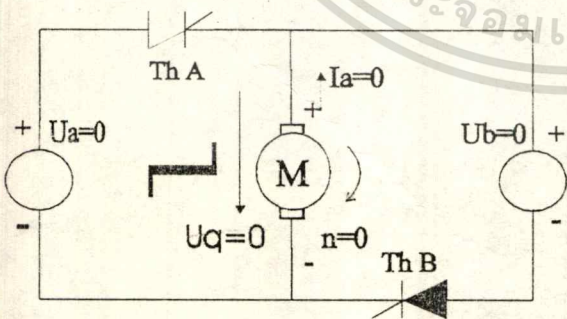


รูปที่ 10 คอนเวอร์เตอร์ชุด B นำกระแสในโหมดมอเตอร์รีจ (ควอเตอร์ที่ 3) ความเร็วรอบในทิศทางรีเวอร์ส



รูปที่ 8 คอนเวอร์เตอร์ชุด B นำกระแสในโหมดอินเวอร์ต (ควอเตอร์ที่ 2) ความเร็วรอบในทิศทางฟอร์เวิร์ด

ความเร็วรอบในทิศทางรีเวอร์สจากความเร็วรอบ -300 รอบ/นาที ไปสู่ความเร็วรอบ -50 รอบ/นาที รูปที่ 12 การตอบสนองกระแสเมื่อกลับทิศทางความเร็วรอบมอเตอร์จากทิศทางฟอร์เวิร์ด +300 รอบ/นาที ไปสู่ความเร็วรอบในทิศทางรีเวอร์ส -300 รอบ/นาที ในรูปที่ 13 และความเร็วรอบมอเตอร์จากทิศทางรีเวอร์ส -300 รอบ/นาที ไปสู่ความเร็วรอบในทิศทางฟอร์เวิร์ด +300 รอบ/นาที รูปที่ 14



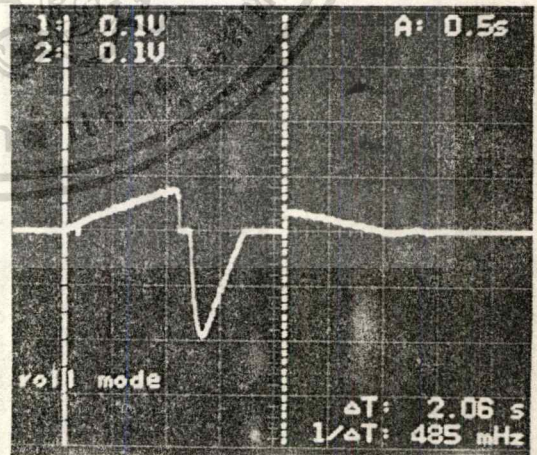
รูปที่ 9 คอนเวอร์เตอร์ชุด B เริ่มนำกระแสใน โหมดมอเตอร์รีจ ทิศทางความเร็วรอบเป็นศูนย์

ดังรูปที่ 14 เมื่อมอเตอร์รีเจนเนอเรทีฟกระแสเมื่อกลับ ไปสู่แหล่งจ่ายไฟสลับสามารถที่จะหมุนกลับสู่ทิศทางเดิมได้

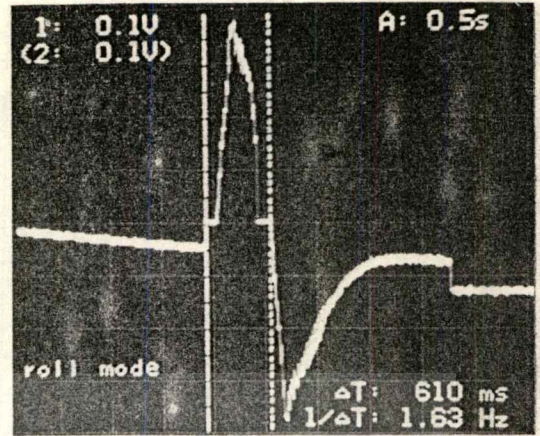
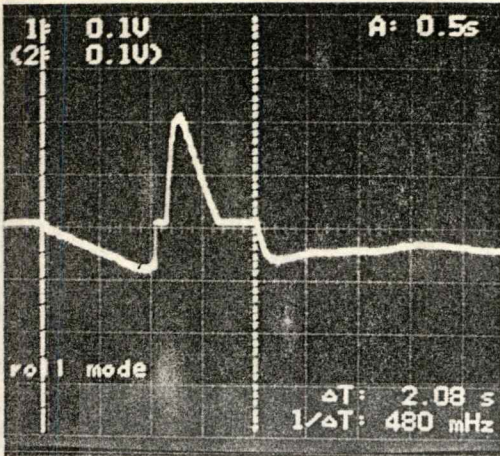
อย่างรวดเร็วดังกล่าวข้างต้น สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นว่าเว็บไซต์นี้จะเป็นประโยชน์แก่ท่านการดำเนินงานครั้งนี้ได้รับความช่วยเหลือจาก... ไม่ว่ากรรมใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.ผลการทดลอง

การทดสอบด้วยการวัดรูปคลื่นกระแสในแต่ละ โหมดการทำงานจากโหมดมอเตอร์รีจ (ควอเตอร์ที่ 1) ไปสู่ การเบรกโหมดอินเวอร์ต (ควอเตอร์ที่ 2) หรือโหมด มอเตอร์รีจ (ควอเตอร์ที่ 1) ไปสู่โหมดมอเตอร์รีจ (ควอเตอร์ที่ 3) มอเตอร์ไฟตรงขนาด 3.3 กิโลวัตต์แรงดัน 220 V กระแส 16 A ความเร็วรอบ 1500 รอบ/นาทีซึ่งปรากฏผลการ ทดสอบที่แสดงไว้ในรูปที่ 11 ถึงรูปที่ 15 การทดสอบการ เบรกแบบไดนามิกโดยต่อโหลดความต้านทาน 50 โอห์ม 500 วัตต์ ขนานกับบ่อเมเจอร์ เมื่อปลดแหล่งจ่ายไฟดีซีออกและจับ เวลาที่มอเตอร์หยุดหมุนจากความเร็วรอบ 700 ไปสู่ความเร็ว รอบ 0 รอบ/นาที ตามลำดับ

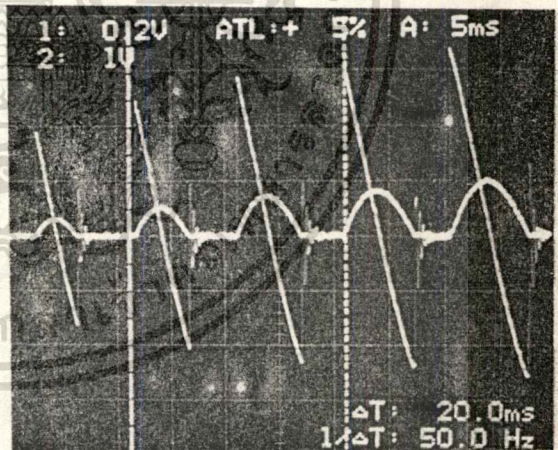
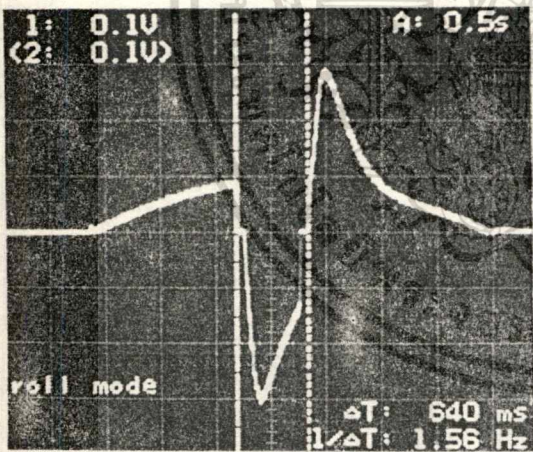


รูปที่ 11 กระแสเมื่อเบรกความเร็วรอบ คอนเวอร์เตอร์ชุด A ทำงาน (ควอเตอร์ที่ 1) นำกระแสในโหมดมอเตอร์รีจและรีเจนเนอเรทีฟพลังงานโดยคอนเวอร์เตอร์ชุด B ทำงาน (ควอเตอร์ที่ 2) ความเร็วลดจาก +300 รอบ/นาที ไปที่ +50 รอบ/นาที 1 ช่องเท่ากับ 10A



รูปที่ 12 กระแสเมเจอร์ถูกรีเจนเนอเรทีฟกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟสลับเมื่อเบรกความเร็วรอบคอนเวอร์เตอร์ชุด B ทำงาน (ควอแดรนต์ที่ 3) นำกระแสโหมคโมเตอร์รีจและรีเจนเนอเรทีฟพลังงานโดยคอนเวอร์เตอร์ชุด A ทำงาน (ควอแดรนต์ที่ 4) ความเร็วลดลงจาก -300 รอบ/นาทีไปที่ -50 รอบ/นาที 1 ช่องเท่ากับ 10A

รูปที่ 14 กระแสเมเจอร์ถูกรีเจนเนอเรทีฟกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟสลับเมื่อกลับทิศทางความเร็วรอบจากทิศทางรีเวอร์สไปสู่ฟอร์เวิร์ดและกลับไปสู่ทิศทางเดิมโดย คอนเวอร์เตอร์ชุด A ทำงานที่ (ควอแดรนต์ที่ 1) นำกระแสโหมคโมเตอร์รีจและรีเจนเนอเรทีฟพลังงานโดยคอนเวอร์เตอร์ชุด B ทำงาน (ควอแดรนต์ที่ 2) ความเร็วเปลี่ยนจาก -300 ไปที่ +300 รอบ/นาที และกลับไป -300 รอบ/นาที



รูปที่ 13 กระแสเมเจอร์ถูกรีเจนเนอเรทีฟกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟสลับ เมื่อกลับทิศทางความเร็วรอบจากทิศทางฟอร์เวิร์ดไปสู่รีเวอร์สและกลับไปสู่ทิศทางเดิมโดย คอนเวอร์เตอร์ชุด A ทำงานที่ (ควอแดรนต์ที่ 1) นำกระแสโหมคโมเตอร์รีจและรีเจนเนอเรทีฟพลังงานโดยคอนเวอร์เตอร์ชุด B ทำงาน(ควอแดรนต์ที่ 2) ความเร็วเปลี่ยนจาก +300 ไปที่ -300 รอบ/นาที และกลับไป +300 รอบ/นาที 1 ช่องเท่ากับ 10A

รูปที่ 15 กระแสเมเจอร์ในช่วงการรีเจนเนอเรทีฟอินโหมคโมเตอร์ดึงไป สูโหมคโมเตอร์รีจจากความเร็วรอบ 300ไปสู่ -300 รอบ/นาที

5.สรุปผลการทดลอง

1. คู่อัลคอนเวอร์เตอร์ชนิดต่อกลับทิศทางกัน (Anti-parallel)

โดยใช้วงจรถิเล็กทรอนิกส์แบบ ที ไอ เป็นชุดควบคุมทำให้ผลตอบสนองทางด้านไดนามิกเร็ว สามารถเบรคความเร็วรอบมอเตอร์ได้ทั้งสี่ควอเตอร์ของระนาบกระแส-แรงดัน ได้เร็วกว่าการเบรคแบบไดนามิกโดยการวัดเวลาจากความเร็วยุทธศาสตร์ ความเร็วลดลงจาก 700 รอบไปสู่อัตราความเร็ว 0 รอบได้ 2 วินาที และ 7 วินาที ตามลำดับ

2. คู่อัลตรอนเวอริเตอร์สามารถรีเจนเนอเรทีฟพลังงานที่โรเตอร์ขณะหมุนกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟสลับ ซึ่งจะไม่มีการสูญเสียของพลังงานภายในรูปความร้อนแต่อย่างใด ทำให้ประสิทธิภาพการเบรคความเร็วรอบสูง

3. การคำนวณหาค่ากระแสและโวลต์ ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ทั้งใน โหมดมอเตอร์รีจและอินเวอร์ติง โดยอาศัยโปรแกรม SPICE ช่วยในการคำนวณในเชิงทฤษฎี เพื่อนำผลที่ได้ เปรียบเทียบกับค่าจากการ ทดลองของเครื่องต้นแบบ

6.เอกสารอ้างอิง

1. B.H Khan K.Dubey, and Seshagiri R.Doradla, Senior Mmember.IEEE: AN Economic Four-Quadrant GTO converter and Its Application to DC Drives, IEEE Transactions on Power Electronic. vol8. no.1 January 1993. pp 62-67
2. T.KIRSHNAN and B.Ramaswmi: Speed control of DC Motor using Thyristor dual Converter, IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, Vol. Iect-23, no4, November, 1976
3. GUY SEGUIRE: Universite des Power Electronic Converter AC-DC Converter
4. Gopal Dubey:Power Semiconductor Controlled Drives

ประวัติผู้เขียน

นายศรวิร์ บัณชกุล เกิดวันที่ 25 มีนาคม 2508 ที่จังหวัดปัตตานี สำเร็จการศึกษาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2533 และเข้าทำงานที่ บริษัท ชินวัตรคอมพิวเตอรฺ์ ในปี พ.ศ. 2533-2535 ตำแหน่งวิศวกร และในปี พ.ศ.2535 จนถึงปัจจุบัน ทำงานที่ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ในตำแหน่งอาจารย์

