

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรสำหรับการประยุกต์ใช้งานใน
รถยนต์แบบไฮบริดจ์

PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DRIVES FOR HYBRID VEHICLE



T104011



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 104011
วัน,เดือน,ปี.....



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2551

การขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรสำหรับการประยุกต์ใช้งานใน
รถยนต์แบบไฮบริดจ์

PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DRIVES FOR HYBRID VEHICLE



อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. สุรินทร์ คำฝอย

รศ. ประภาพร ไพรสุวรรณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2551

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรสำหรับการประยุกต์ใช้งานใน
รถยนต์แบบไฮบริดจ์

ผู้จัดทำ



- 1. นาย ธีรัฐภูมิ สุรเกียรติชัย
- 2. นาย ภาคภูมิ สุดแสง
- 3. นาย อนันต์ แตรพันธ์

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร. สุรินทร์ คำฝอย)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ประภาพร ไพโรสุวรรณ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรสำหรับการประยุกต์ใช้งาน
ในรถยนต์แบบไฮบริดจ์

นายณัฐวุฒิ สุรเกียรติชัย

นายภาคภูมิ สุดแสง

นายอนันต์ แตรพันธ์

รศ.ประภาษ ไพโรสุวรรณา อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.สุรินทร์ คำฝอย อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้ได้เสนอถึงการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet Synchronous Machine) ให้สามารถทำงานได้ด้วยความเร็วเหนือความเร็วมูลฐาน (Base speed) สูงๆ ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้ในรถยนต์แบบไฮบริดจ์ จึงได้มีการนำเสนอเทคนิคการขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร โดยวิธีการของ Dual Mode Inverter Control (DMIC) ซึ่งมีการต่อเอสซีอาร์ (SCR) แบบขนานกลับทิศกัน (Back to back) เพื่อทำการควบคุมกระแสให้ไหลไปยังมอเตอร์ เนื่องจากที่ความเร็วสูง จะเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้าย้อนกลับ (Back-emf) ที่สูงกว่าแรงดันดีซีลิงค์ (dc link) อย่างไรก็ตามในที่นี้จะมุ่งเน้นการควบคุมมุมจุดชนวนของ SCR โดยมีอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันที่มีขนาดพิกัด 1.5 กิโลวัตต์ อินพุตเป็น 2 แอมป์ 3 เฟส, 50 เฮิร์ต, 380 โวลต์ ส่วนมอเตอร์จะใช้วงจรสมมูลย์ในการทดลอง ซึ่งจะทำการควบคุมเพียงเฟสเดียวโดยมีตัวเหนี่ยวนำขนาด 280 มิลลิเฮนรี่ ตัวต้านทานขนาด 0.1 โอห์ม และมีแหล่งจ่ายแรงดันเพื่อเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับขนาด 46.5 โวลต์ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าการเสนอเทคนิคนี้สามารถถูกเป็นตัวเลือกสำหรับการประยุกต์ใช้ในการขับเคลื่อนรถยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DRIVES FOR HYBRID VEHICLE

Nattawut Suragiattchai

Pakpum Sudsang

Anan Thrairpan

Assoc.Prof. Prapart Praisuwanna Advisor

Dr. Surin Khomfoi Advisor

2008

ABSTRACT

This thesis is to study the speed control, particularly at above based speed, of permanent magnet synchronous machine (PMSM) for hybrid vehicle applications. The dual mode inverter control (DMIC) technique is utilized for the current control during high back emf voltage because the back emf voltage will increase if the speed increases: this means the back emf is depended upon the PMSM speed. This DMIC technique consists of SCRs connected in parallel with the conventional inverter (six switches). The study only focuses on the generating of SCR triggering signals for the current control by using the PMSM equivalent circuit as the model instead of PMSM. The 1.5 kW 3 phase 50 Hz 380 V inverter is used to prove the control notion. The PMSM equivalent circuit has a 280 mH and 0.1 ohm per phase incorporating with idea voltage source acting as the back emf. This equivalent circuit is for the 46.5 V back emf PMSM at based speed. The results show that this proposed technique could be an alternative technique for traction drive applications.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงการอนุรักษ์ซึ่งต่อความกรุณาที่ รศ.ประภาส ไพโรสุวรรณ และ ดร.สุรินทร์ คำฝอย อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำ ตลอดจนอาจารย์ในภาควิชาที่ประสิทธิประสาทความรู้ให้กับผู้จัดทำในครั้งนี้ ถ้าปราศจากท่านโครงการนี้ก็คงไม่สำเร็จล่วงไปได้

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ คุณฉัตรชัย เอมสะอาด ที่ได้ให้คำแนะนำในการเขียนโปรแกรมต่างๆ และ คุณบุญมี คุณนครศักดิ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่ให้เบิกใช้เครื่องมือ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องธุรการที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการเบิกใบเสร็จของโครงการ และผู้จัดทำต้องขอบคุณเพื่อนร่วมห้องปฏิบัติการ (lab) ที่คอยเอาใจใส่คอยถามไถ่ตลอดเวลา

และขอขอบคุณสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ที่ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยของผู้จัดทำมาโดยตลอด

ท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยส่งเสียเงินทอง ให้ผู้จัดทำเรียนหนังสือจนจบในครั้งนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อ..... | I |
| ABSTRACT..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญภาพ..... | VII |
| สารบัญตาราง..... | X |
| | |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่ทำการวิจัย..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ..... | 3 |
| 1.4 แผนการดำเนินโครงการ..... | 3 |
| 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ..... | 3 |
| 1.6 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญญาพันธ..... | 3 |
| | |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... | 5 |
| 2.1 มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร (PM motor)..... | 5 |
| 2.2 วัสดุแม่เหล็กถาวร..... | 5 |
| 2.3 คุณสมบัติของมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร (PM MOTOR)..... | 8 |
| 2.4 ข้อดีของมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร..... | 11 |
| 2.5 มอเตอร์แม่เหล็กชนิดที่ผิวแบบรูปไซน์ (SPM)..... | 11 |
| 2.6 มอเตอร์แม่เหล็กชนิดที่อยู่ภายในแบบรูปไซน์ (IPM)..... | 12 |
| 2.7 โมเดล (Model) มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร..... | 13 |
| 2.8 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์..... | 16 |
| 2.9 อินเวอร์เตอร์และสเปซเวกเตอร์แรงดัน (Inverter and Voltage space Vector)..... | 17 |
| 2.10 ระบบแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟสทั่วไป..... | 17 |
| 2.11 ระบบแหล่งจ่ายไฟแบบอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส..... | 19 |
| 2.12 เวกเตอร์แรงดันในกรอบอ้างอิงสเตเตอร์..... | 23 |
| 2.13 วิธีการจุดชนวนของมุมแบบ DMIC..... | 24 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

| | |
|---|----|
| 2.14 การวิเคราะห์สมการของกระแสอาร์มาเจอร์ของ PMSM..... | 25 |
| 2.15 ขอบเขตของ CPOR ของ PMSM การที่ถูกขับโดย DMIC..... | 31 |
| 2.16 เอสซีอาร์ (Silicon control rectifier, SCR)..... | 35 |
| 2.16.1 โครงสร้างของเอสซีอาร์..... | 35 |
| 2.16.2 การจุดชนวนเอสซีอาร์..... | 36 |
| 2.16.2.1 ใช้แรงดันค่าบวกป้อนเข้าที่ขาเกต..... | 36 |
| 2.16.2.2 ใช้แสงช่วยจุดชนวน..... | 36 |
| 2.16.2.3 ใช้แรงดันพียงข้ามให้เอสซีอาร์เปิดกระแส..... | 37 |
| 2.16.2.4 ใช้การเปลี่ยนแปลงแรงดันต่อเวลาในอัตราสูง เข้าจุดชนวน..... | 37 |
| 2.16.2.5 ใช้อุณหภูมิสูงเข้าจุดชนวน..... | 37 |
| 2.16.3 หลักการทำงานของเอสซีอาร์..... | 37 |
| บทที่ 3 การออกแบบและสร้าง..... | 39 |
| 3.1 การออกแบบและสร้างชุดทดลอง..... | 39 |
| 3.2.1 วงจรทริกเกอร์ (Trigger circuit) สัญญาณ..... | 39 |
| 3.2.2 การควบคุมแรงดันกระแสสลับเฟสเดียว..... | 43 |
| 3.2.3 การออกแบบอินเวอร์เตอร์..... | 50 |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง..... | 51 |
| 4.1 ผลของเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์..... | 51 |
| 4.2 กรณีใช้โหลดเป็นตัวต้านทาน (โหลดไฟ)..... | 53 |
| 4.2.1 กรณีที่มุมจุดชนวนของ SCR ที่ 90° | 53 |
| 4.2.2 กรณีที่มุมจุดชนวนของ SCR ที่ 0° | 55 |
| 4.3 กรณีใช้โหลดเป็นตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ..... | 57 |
| 4.3.1 กรณีที่มุมจุดชนวนของ SCR เป็น 90° ที่แรงดันดีซีลิงค์ 30 โวลต์..... | 57 |
| 4.3.2 กรณีที่มุมจุดชนวนของ SCR เป็น 0° ที่แรงดันดีซีลิงค์ 30 โวลต์..... | 59 |
| 4.3.3 กรณีที่มุมจุดชนวนของ SCR เป็น 90° ที่แรงดันดีซีลิงค์ 60 โวลต์..... | 61 |
| 4.3.4 กรณีที่มุมจุดชนวนของ SCR เป็น 0° ที่แรงดันดีซีลิงค์ 60 โวลต์..... | 63 |
| บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ..... | 65 |
| 5.1 สรุป..... | 65 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญ(ต่อ)

| | |
|--------------------------|----|
| 5.2 ปัญหาและอุปสรรค..... | 65 |
| 5.3 ข้อเสนอแนะ..... | 66 |
| บรรณานุกรม..... | 67 |
| ภาคผนวก..... | 68 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 96 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| ภาพที่ 1.1 แสดงถึงการทำงานของPMSM ในย่าน Constant Power ที่ความเร็วสูง (High speed)..... | 2 |
| ภาพที่ 2.1 แสดงจุดการทำงานของมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรบนกราฟเส้นโค้งB-H... | 6 |
| ภาพที่ 2.2 แสดงสัมประสิทธิ์แม่เหล็กถาวร..... | 7 |
| ภาพที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความเร็วและแรงบิด..... | 8 |
| ภาพที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว และแรงบิดของมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร..... | 9 |
| ภาพที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์แบบขนาน..... | 9 |
| ภาพที่ 2.6 การเลื่อนตำแหน่งที่ขั้วแม่เหล็ก..... | 10 |
| ภาพที่ 2.7 แสดงภาพตัดตามขวางของมอเตอร์แม่เหล็กชนิดที่ผิวแบบรูปไซน์(SPM).. | 12 |
| ภาพที่ 2.8 แสดงภาพตัดตามขวางของมอเตอร์แม่เหล็กชนิดที่อยู่ภายในแบบรูปไซน์(IPM)..... | 13 |
| ภาพที่ 2.9 โมเดลสำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร 3 เฟส..... | 14 |
| ภาพที่ 2.10 แสดงแผนภาพเฟสเซอร์ (Phasor) ของกรอบอ้างอิง abc และ dq..... | 15 |
| ภาพที่ 2.11 แสดงวงจรสมมูลย์ของแกน d-q ในกรอบการหมุนแบบซิงโครนัส..... | 15 |
| ภาพที่ 2.12 แสดงโครงสร้างอินเวอร์เตอร์สำหรับวิธีแบบ DMIC ของ PMSM | 16 |
| ภาพที่ 2.13 ระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่สมมาตร..... | 17 |
| ภาพที่ 2.14 แหล่งจ่ายไฟแบบอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส..... | 18 |
| ภาพที่ 2.15 สถานะอินเวอร์เตอร์ขณะสวิตช์ U3..... | 19 |
| ภาพที่ 2.16 ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันเฟส U_{AN} , U_{BN} และ U_{CN} | 21 |
| ภาพที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไลน์ U_{AB} , U_{BC} และ U_{CA} | 22 |
| ภาพที่ 2.18 แสดงเกี่ยวกับวิธีการจุดชนวนสำหรับโหมดการทำงานแบบมอเตอร์ของ DMIC ที่ขับ PMSM | 24 |
| ภาพที่ 2.19 แสดงDMIC ในการขับเคลื่อน PMSM..... | 25 |
| ภาพที่ 2.20 แสดงDMICในการขับเคลื่อน PMSMในช่วงเวลาการสับเปลี่ยนกระแส...26 | |
| ภาพที่ 2.21แสดงรูปคลื่นของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนกลับไลน์ของระบบ DMIC/PMSM..... | 27 |
| ภาพที่ 2.22 แสดงDMIC ในการขับเคลื่อน PMSM หลังจากช่วงเวลาการสับเปลี่ยนกระแส..... | 30 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

| | |
|---|----|
| ภาพที่ 2.23 รัศมีต่ำสุดของวงกลมขอบเขตจำกัดแรงดันสำหรับPMSM เพื่อขยายพิกัดกำลังไฟฟ้า..... | 32 |
| ภาพที่ 2.24 แสดงรัศมีแรงดันที่จัดเตรียมโดย DMIC, VCFW และรัศมีที่มีค่าน้อยที่สุด..... | 33 |
| ภาพที่ 2.25 แสดงฟังก์ชันที่มีอยู่และเหมาะสมของรัศมีขอบเขตจำกัดแรงดันที่จัดเตรียมโดยDMIC | 35 |
| ภาพที่ 2.26 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของเอสซีอาร์..... | 36 |
| ภาพที่ 2.27 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของเอสซีอาร์..... | 38 |
| ภาพที่ 3.1 แสดงวงจรเบื้องต้นของการควบคุมเฟสเอซีแบบเต็มคลื่นโดยใช้เอสซีอาร์..... | 40 |
| ภาพที่ 3.2 วงจรควบคุมของ TCA 785..... | 41 |
| ภาพที่ 3.3 วงจรควบคุมของ TCA 785 ของจริง..... | 41 |
| ภาพที่ 3.4 วงจรควบคุมของ R2R (Digital to Analog)..... | 42 |
| ภาพที่ 3.5 วงจรควบคุมของ R2R ของจริง..... | 42 |
| ภาพที่ 3.6 วงจรควบคุมของ MOC 3062..... | 43 |
| ภาพที่ 3.7 วงจรควบคุมของ MOC 3062 ของจริง..... | 44 |
| ภาพที่ 3.8 วงจร ซีโร่ครอสซิง (Zero-crossing)..... | 44 |
| ภาพที่ 3.9 วงจร ซีโร่ครอสซิง (Zero-crossing) ของจริง..... | 45 |
| ภาพที่ 3.10 วงจรเซ็นเซอร์แรงดัน (Voltage sensor)..... | 46 |
| ภาพที่ 3.11 วงจรเซ็นเซอร์แรงดัน (Voltage sensor) ของจริง..... | 46 |
| ภาพที่ 3.12 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง 15 โวลต์..... | 47 |
| ภาพที่ 3.13 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง 5 โวลต์..... | 47 |
| ภาพที่ 3.14 L ที่ได้ทำการออกแบบมาแล้ว..... | 49 |
| ภาพที่ 3.15 ภาพวงจรของอินเวอร์เตอร์..... | 50 |
| ภาพที่ 3.16 เป็นอินเวอร์ที่ใช้ในการทดลองจริง..... | 50 |
| ภาพที่ 4.1 รูปคลื่นแรงดันเฟสเอชท์พุทของอินเวอร์เตอร์..... | 51 |
| ภาพที่ 4.2 รูปคลื่นแรงดันไลน์เอชท์พุทของอินเวอร์เตอร์..... | 52 |
| ภาพที่ 4.3 รูปคลื่นแรงดันของโพลดกรณิที่เป็นตัวต้านทาน..... | 53 |
| ภาพที่ 4.4 รูปคลื่นกระแสของโพลดกรณิที่เป็นตัวต้านทาน..... | 54 |
| ภาพที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันของโพลดกรณิที่เป็นตัวต้านทาน..... | 55 |
| ภาพที่ 4.6 รูปคลื่นกระแสของโพลดกรณิที่เป็นตัวต้านทาน..... | 56 |
| ภาพที่ 4.7 รูปคลื่นแรงดันของโพลดความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ..... | 57 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

| | |
|--|----|
| ภาพที่ 4.8 รูปคลื่นกระแสนของไหลลดความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ..... | 58 |
| ภาพที่ 4.9 รูปคลื่นแรงดันของไหลลดความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ..... | 59 |
| ภาพที่ 4.10 รูปคลื่นกระแสนของไหลลดความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ..... | 60 |
| ภาพที่ 4.11 รูปคลื่นแรงดันของไหลลดความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ..... | 61 |
| ภาพที่ 4.12 รูปคลื่นกระแสนของไหลลดความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ..... | 62 |
| ภาพที่ 4.13 รูปคลื่นแรงดันของไหลลดความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ..... | 63 |
| ภาพที่ 4.14 รูปคลื่นกระแสนของไหลลดความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ..... | 64 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 2.1 รูปแบบสวิสซ์และค่าแรงดันเทียบจุดสะเทินเหมือนของอินเวอร์เตอร์..... | 19 |
| ตารางที่ 2.2 รูปแบบสวิสซ์และค่าแรงดันเทียบจุดนิวทริลของอินเวอร์เตอร์..... | 20 |
| ตารางที่ 2.3 รูปแบบสวิสซ์และค่าแรงดันของอินเวอร์เตอร์ในกรอบอ้างอิงสเตเตอร์ | 23 |



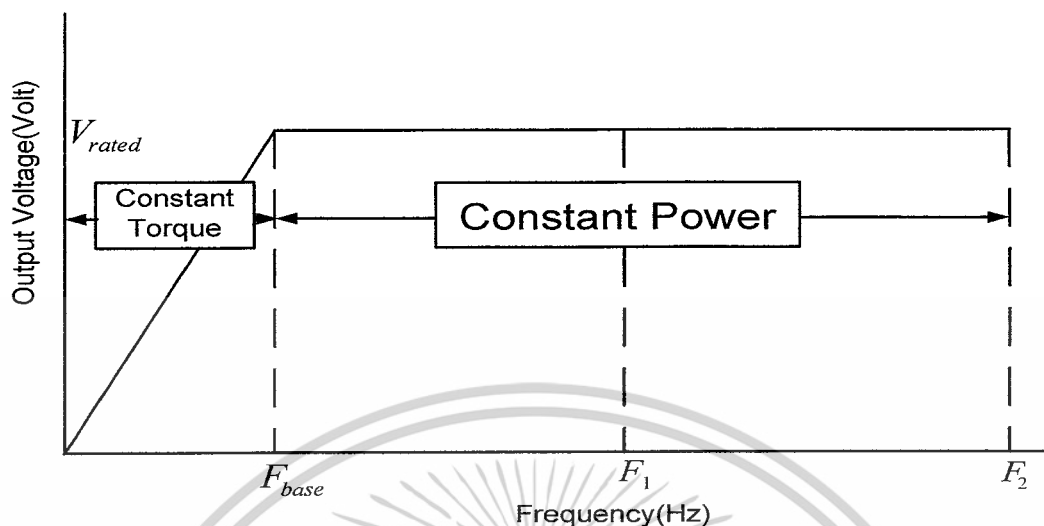
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในปัจจุบันจากจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้น จึงมีแนวโน้มในการใช้รถยนต์ยานพาหนะเพิ่มมากขึ้น โดยพบว่า ได้เริ่มมีการใช้รถยนต์แบบไฮบริดจ์ทดแทนรถยนต์แบบที่ใช้น้ำมัน ดังนั้นเราจึงทำการวิจัยเกี่ยวกับการขับเคลื่อนมอเตอร์ซิงโครนัส (Synchronous) ชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSM) ซึ่งใช้ในการขับเคลื่อนรถยนต์แบบไฮบริดจ์ รวมไปถึงรถไฟฟ้าอีกด้วย โดยมีค่ารถยนต์ 2 ค่า คือ โตโยต้า และฮอนด้า ผลิตรถยนต์แบบไฮบริดจ์ออกมาให้ประหยัดพลังงานและไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ยังคงพบว่ามีประสิทธิภาพ PMSM ที่ใช้ในรถยนต์แบบไฮบริดจ์นั้นมีค่า CPSR (Constant Power Speed Ratio) เท่ากับ 6 เมื่อค่า CPSR เพิ่มขึ้นกว่านี้ รถยนต์แบบไฮบริดจ์ก็ยังคงต้องใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงในการขับเคลื่อนอยู่นั้นหมายความว่า เมื่อเราต้องเร่งความเร็วแล้วทำให้ความเร็วนั้นคงที่ในย่านกำลังไฟฟ้าคงที่ รถยนต์แบบไฮบริดจ์ก็ยังคงต้องใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงในการขับเคลื่อนอยู่ ตัวอย่างเช่นถ้าเราต้องการแซงรถคันที่อยู่ข้างหน้า ความเร็วที่ใช้ในการแซงรถคันหน้าก็ยังคงใช้น้ำมันอยู่ ดังนั้นเราจึงใช้วิธีการควบคุมการขับเคลื่อน PMSM ในรถยนต์ไฮบริดจ์ แบบ DMIC (Dual Mode Inverter Control) เพื่อควบคุมความเร็วในขณะที่เราขับรถแซง ซึ่งจะทำให้ไม่ต้องใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงในขณะนั้น มีผลทำให้เราใช้น้ำมันลดน้อยลง โดยจะใช้วิธีการควบคุมในการขับเคลื่อน PMSM แบบ DMIC เพื่อควบคุมกระแสให้ไหล ในขณะที่ความเร็วสามารถถูกปรับให้มากกว่าความเร็วมูลฐาน โดยจะทำงานในย่านกำลังไฟฟ้าคงที่



ภาพที่ 1.1 แสดงถึงการทำงานของPMSM ในย่าน Constant Power ที่ความเร็วสูง (High speed)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับวิธีแบบDMIC ในการควบคุม PMSM ในรถยนต์แบบไฮบริดจ์ ในย่านกำลังไฟฟ้าคงที่ ที่ความเร็วสูง (High speed)
- 2) เพื่อศึกษาและวิจัยในการใช้เอสซีอาร์ (SCR) ในการควบคุม PMSM ที่ใช้กับรถยนต์แบบไฮบริดจ์ในย่านกำลังไฟฟ้าคงที่ ให้มีช่วงการรักษาความเร็วที่ถูกเร่งขึ้นให้มีค่ามากและยาวนานที่สุด โดยที่ไม่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง เช่น ความเร็วในขณะที่ต้องขับรถแข่ง เป็นต้น
- 3) เพื่อศึกษาและวิจัยในการใช้เอสซีอาร์ ในการควบคุม PMSM ที่ใช้กับรถยนต์แบบไฮบริดจ์ ในย่านกำลังไฟฟ้าคงที่ ให้มีการทำงานมีประสิทธิภาพสูงสุดและประหยัดพลังงานมากที่สุด
- 4) เพื่อศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic) ในการควบคุม PMSM ที่ใช้กับรถยนต์แบบไฮบริดจ์ ให้ประหยัดพลังงานและไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

โครงการนี้เป็นศึกษาการใช้เอสซีอาร์ในการต่อแบบขนานกลับทิศทางกันซึ่งต่ออยู่ระหว่างอินเวอร์เตอร์ (Inverter) สามเฟสกับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรที่ความเร็วสูง โดยที่อินเวอร์เตอร์สามเฟสใช้สัญญาณขับเคลื่อนแบบสี่เหลี่ยม (Square wave) มีพิกัดเป็น 1.5 กิโลวัตต์ 380 โวลต์ 2 แอมแปร์ ส่วนพิกัดของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร เราจะใช้เป็น วงจรสมมุติที่มีค่าความต้านทานเท่ากับ 0.7 โอห์ม ค่าความเหนี่ยวนำเท่ากับ 280 มิลลิเฮนรี่ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำป้อนกลับเท่ากับ 46.5 โวลต์

1.4 แผนการดำเนินโครงการ

1. ศึกษาการทำงานของ การควบคุมเฟส (Phase control) ของเอสซีอาร์ โดยใช้โปรแกรม Matlab Simulink ในการจำลองบนคอมพิวเตอร์
2. ศึกษาการควบคุมเอสซีอาร์โดยใช้ IC เบอร์ TCA 785 ในการสร้างสัญญาณขับเคลื่อน เอสซีอาร์
3. ออกแบบสร้างวงจรควบคุมเอสซีอาร์โดยใช้ IC เบอร์ TCA 785 และทำการทดลองแบบ Real-Time พร้อมทั้งปรับปรุงวงจร

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการโครงการ

1. เข้าใจทฤษฎีเกี่ยวกับมอเตอร์ซิงโครนัส (Synchronous) ชนิดแม่เหล็กถาวร เอสซีอาร์ และวงจรขับเคลื่อนของเอสซีอาร์
2. มีประสบการณ์การทำงานในด้านเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ (Power Electronic)
3. รู้จักความสามัคคีในการทำงานเป็นกลุ่ม

1.6 การจัดโครงสร้างของเนื้อหาภายในปฏิญานิพนธ์

- บทที่ 1 เป็นบทนำ จะกล่าวถึงวัตถุประสงค์ ขอบเขตของโครงการแผนการดำเนินงาน
- บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ซิงโครนัส (Synchronous) ชนิดแม่เหล็กถาวรของเอสซีอาร์
- บทที่ 3 เป็นการออกแบบและสร้างวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- บทที่ 5 จะเป็นสรุปและข้อเสนอแนะ
- ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

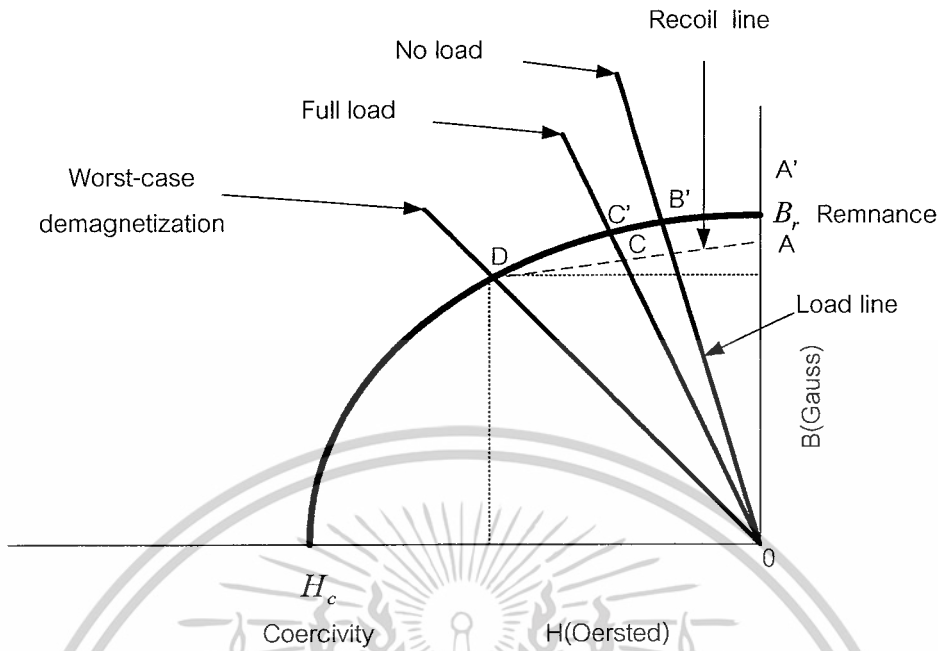
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง (Related Theories)

2.1 มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร (PM motor)

ในมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร, ขดฟิลด์ (Field) ที่เป็นกระแสดตรงของโรเตอร์ (Rotor) ถูกแทนที่ด้วยแม่เหล็กถาวร ข้อดีคือการกำจัดคอปเปอร์ลอส (Copper loss) ของขดฟิลด์, ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูง, ความเฉื่อยของโรเตอร์ต่ำและโครงสร้างที่แข็งแรงมากของโรเตอร์ข้อเสียคือค่าความสูญเสียของการยัดหย่นของการควบคุมฟลักซ์ (Flux) ที่ฟิลด์และความเป็นไปได้ของผลกระทบการขจัดแม่เหล็กออก มอเตอร์จะมีประสิทธิภาพสูงกว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ แต่โดยทั่วไปราคาจะสูงกว่ามอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรโดยเฉพาะที่ขอบเขตกำลังไฟฟ้าต่ำถูกใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เมื่อเร็ว ๆ นี้ความสนใจในการประยุกต์ใช้งานของพวกมันกำลังเติบโต โดยเฉพาะการเพิ่มขนาดถึง 100 กิโลวัตต์

2.2 วัสดุแม่เหล็กถาวร

คุณสมบัติของแม่เหล็กถาวรและการเลือกของวัสดุที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากในการออกแบบของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร รูปที่ 2.1 แสดงส่วนการขจัดแม่เหล็กออกของกราฟเส้นโค้ง B-H ที่ซึ่งแม่เหล็กถาวรถูกออกแบบให้ทำงานแบบปกติ ความหนาแน่น ฟลักซ์ B_r สูงสุดตรงกับที่จุด A' จะมีค่าเริ่มต้นถ้าแม่เหล็กถูกลัดวงจรด้วยเหล็ก (ไม่มีช่องว่างอากาศ) เมื่อแม่เหล็กถูกติดตั้งในมอเตอร์ ช่องว่างอากาศจะมีผลกระทบของการขจัดแม่เหล็กออกและจุดการทำงาน B' จะตรงกับเส้นไร้ภาระ (no-load) ที่แสดงในรูป ความชันของเส้นไร้ภาระจะมีค่าน้อยด้วยช่องว่างอากาศที่มาก การไหลของกระแสที่ขดสเตเตอร์ (stator) ผลกระทบจากการกระทำแกนแม่เหล็ก (d^2) ที่อาร์เมเจอร์ (Armature) สามารถมีผลกระทบเพิ่มขึ้นจากการขจัดแม่เหล็กออก สิ่งซึ่งการลดลงของฟลักซ์ในช่องว่างอากาศจะเพิ่มมากขึ้น เส้นไหลจะตรงกับการขจัดแม่เหล็กออกกรณีนี้ที่เลวร้าย สิ่งซึ่งอาจเนื่องจากการสตาร์ท (Start), สภาวะชั่วคราวหรือเงื่อนไขพอลท์ (Fault) ของมอเตอร์ถูกแสดงไว้ ทันทีที่จุดการทำงานใกล้จุด D และผลกระทบจากการขจัดแม่เหล็กออกถูกกำจัด แม่เหล็กจะคืนสภาพไปตามเส้นรีคอยล์ (Recoil) สิ่งซึ่งมีค่าความชันเหมือนเดิมเนื่องจากจุดเริ่มต้นของกราฟเส้นโค้ง B-H ใกล้ H=0



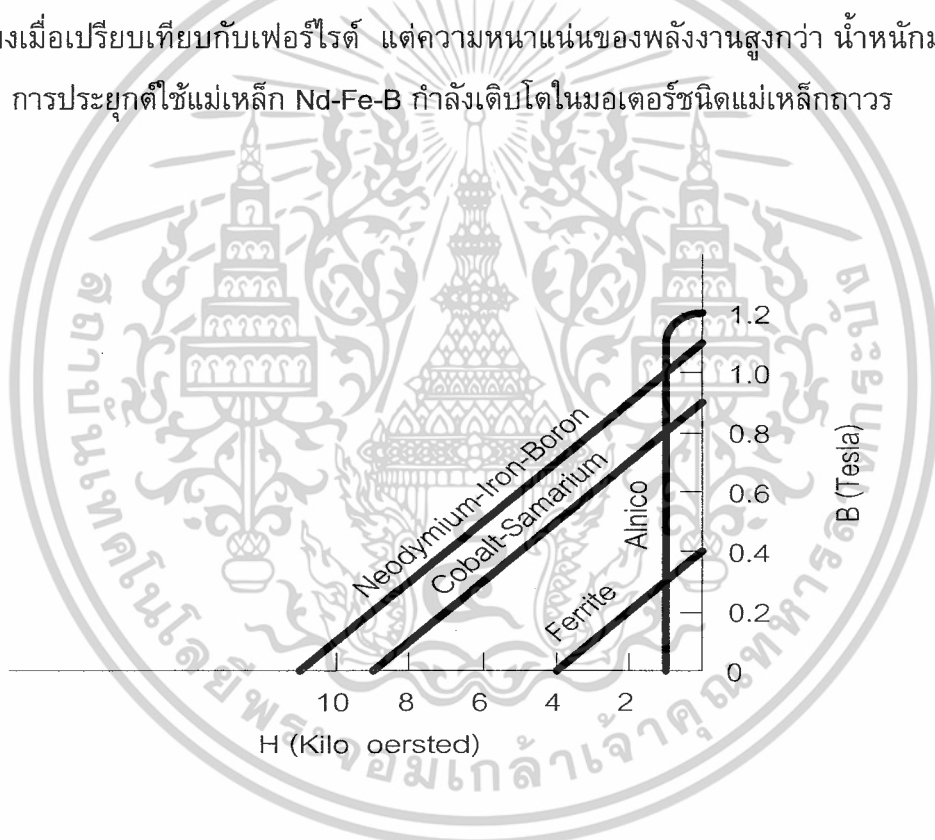
ภาพที่ 2.1 แสดงจุดการทำงานของมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรบนกราฟเส้นโค้ง B-H

ในการทำงานต่อมา, จุดการทำงานที่มีความเสถียรจะถูกกำหนดโดยการตัดกันของเส้นโหลดกับเส้นรีคอยล์ แม่เหล็กถาวรจัดแม่เหล็กออกอย่างถาวรที่การทำงานไร้ภาระ (No-load) ตรงกับระยะทางในแนวตั้งระหว่าง A' และ A

จุดการจัดแม่เหล็กออกกรณีที่เราเรียกว่าเป็นสิ่งสำคัญที่ขาดไม่ได้สำหรับมอเตอร์ และควรควบคุมอย่างใกล้ชิด ในทางเลือกถ้าวัสดุของแม่เหล็กถาวรถูกเลือกให้มีกราฟเส้นโค้งในการจัดแม่เหล็กออกที่เป็นเส้นตรง เส้นรีคอยล์ จะทับกับเส้นขจัดแม่เหล็กออกของจุดจัดแม่เหล็กในกรณีที่เราเรียก แอลไนโค(Alnico) มีอุณหภูมิที่ทำงานสูง เสถียรภาพทางความร้อน และความหนาแน่นพลังสูง แต่ข้อเสียคือแรงบังคับที่เชื่อมต่อกับลักษณะพิเศษ B-H ต่ำ สิ่งซึ่งทำให้การจัดแม่เหล็กถาวรที่มาก ดังนั้นมันเป็นความไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติสำหรับมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร แบเรียม(Barium) และ สตรอนเชียมเฟอร์ไรต์ (Strontium ferrites) ถูกใช้เป็นแม่เหล็กถาวรอย่างกว้างขวาง เฟอร์ไรต์(Ferrite) มีข้อดีคือ ราคาถูกและวัสดุที่ใช้ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการ พวกมันจึงง่ายในกระบวนการผลิต และกระบวนการของพวกมันจะเหมาะสมสำหรับปริมาณที่มาก และอุณหภูมิที่ทำงานสูง (400 องศาเซลเซียส) แม่เหล็กจะมีกราฟเส้นโค้งที่จัดแม่เหล็กออกจะเป็นเชิงเส้นในทางปฏิบัติ แต่ค่า B_r ต่ำ ดังนั้นปริมาณและน้ำหนักของมอเตอร์จะมาก แม่เหล็กแบบโคบอลต์-ซามาเรียม (CoSm) ถูกทำมาจากเหล็ก, นิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิล (Nickel), โคบอลต์ (Cobalt) และซามาเรียม(Samarium) มันมีข้อดีคือค่า B_r สูง, ความหนาแน่นพลังงานสูงนิยามโดย (BH_{max}) และสัมประสิทธิ์การขจัดแม่เหล็กออกเป็นเชิงเส้น อุณหภูมิที่ทำงานสามารถถูกทำให้สูงมากกว่า 300 องศาเซลเซียสและเสถียรภาพของอุณหภูมิ (เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงใน B ต่อองศาเซลเซียส) ต่ำมาก (-0.03 เปอร์เซ็นต์) แต่ราคาของวัสดุจะแพงมากเพราะว่าความไม่เพียงพอของซามาเรียม (Samarium) แม่เหล็กชนิดดีโอดีเมียม-ไอรอน-โบรอน(Neodymium-iron-boron) Nd-Fe-B มีความหนาแน่นพลังงานสูงสุด, ค่า B_r สูงสุด, และค่า H_c ต่ำมาก ข้อเสียคืออุณหภูมิที่ทำงานต่ำ (150 องศาเซลเซียส) และอัตราการเป็นแม่เหล็กจะออกซิเดชัน (oxidation) นอกจากนี้จะป้องกันโดยชั้นบางๆที่ใช้ปกคลุม นอกจากนี้เสถียรภาพของอุณหภูมิ (-0.13 เปอร์เซ็นต์) มีค่าต่ำกว่าแม่เหล็ก CoSm วัสดุราคาแพงเมื่อเปรียบเทียบกับเฟอร์ไรต์ แต่ความหนาแน่นของพลังงานสูงกว่า น้ำหนักมอเตอร์จึงลดลง การประยุกต์ใช้แม่เหล็ก Nd-Fe-B กำลังเติบโตในมอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวร

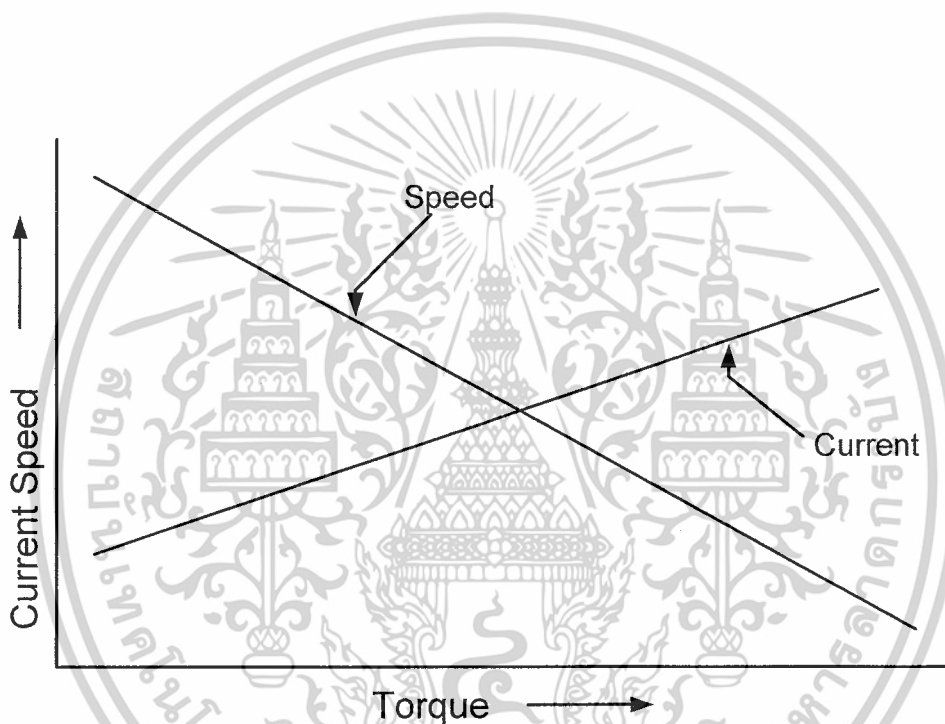


ภาพที่ 2.2 แสดงสัมประสิทธิ์แม่เหล็กถาวร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

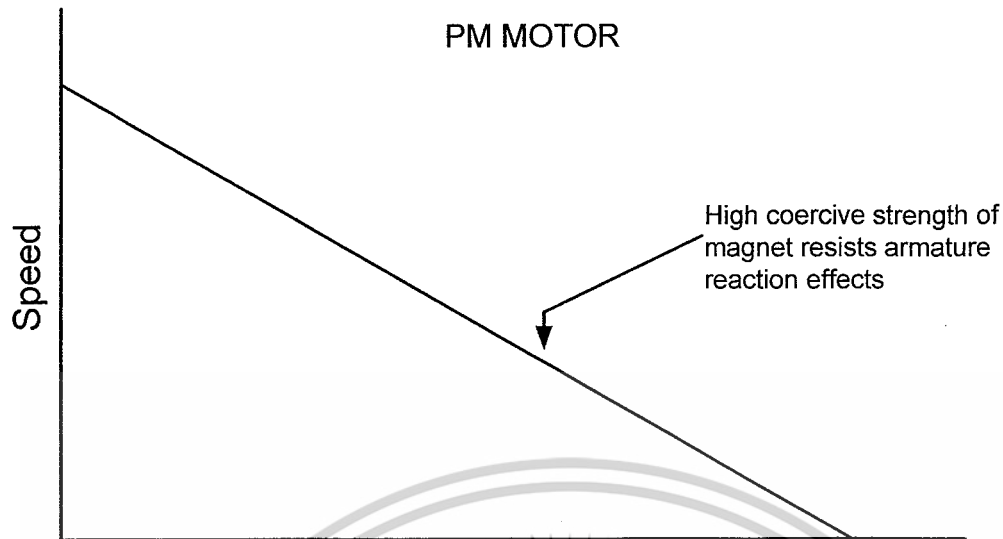
2.3 คุณสมบัติของมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร (PM MOTOR)

โดยทั่วไปแล้วมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรจะมีสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กถาวร ดังนั้นจึงไม่ต้องใช้พลังงานในการสร้างสนามแม่เหล็กในฟิลด์คอลลี และค่าสนามแม่เหล็กที่สเตเตอร์ (Stator) จะมีค่าคงที่ตลอด จึงทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงบิด มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นคงที่ตลอดทุกช่วงการทำงาน ดังในภาพที่ 2.3 และความเป็นเชิงเส้นที่แรงบิดสูงๆของมอเตอร์แม่เหล็กถาวรจะดีกว่ามอเตอร์ขั้วนวดังในภาพที่ 2.4 และ 2.5

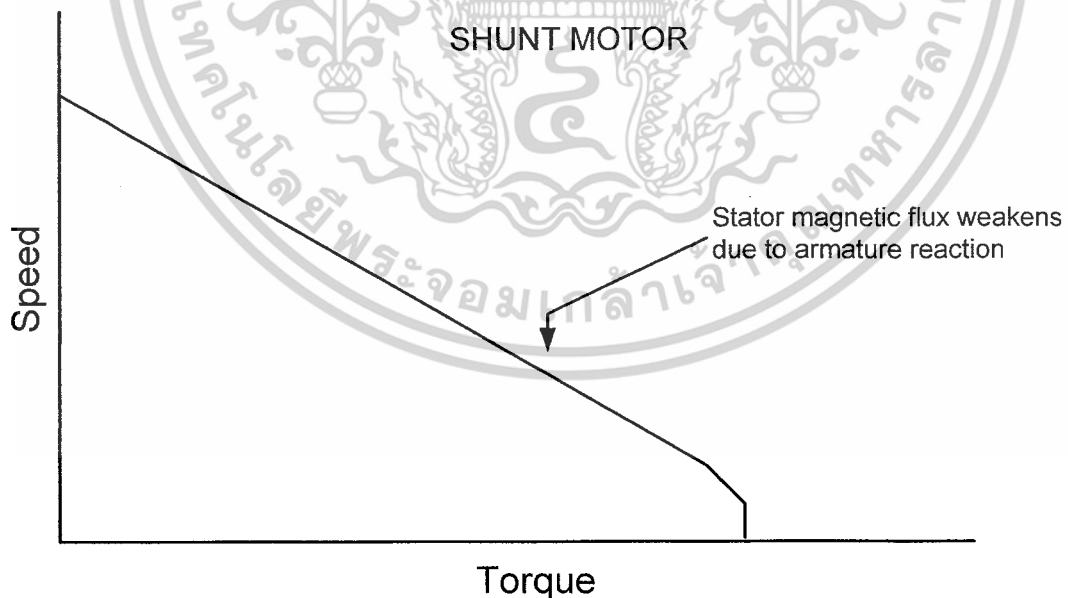


ภาพที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-ความเร็วและแรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



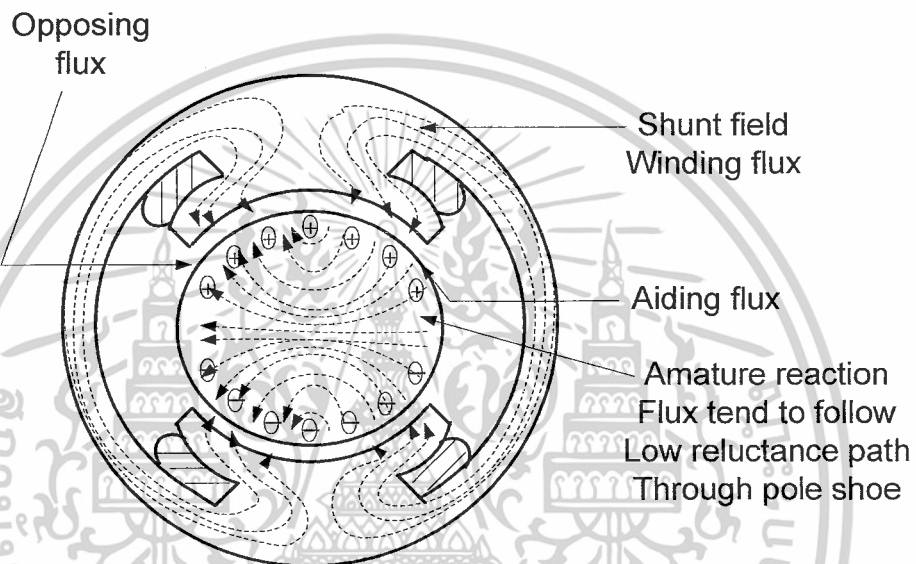
ภาพที่ 2.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร



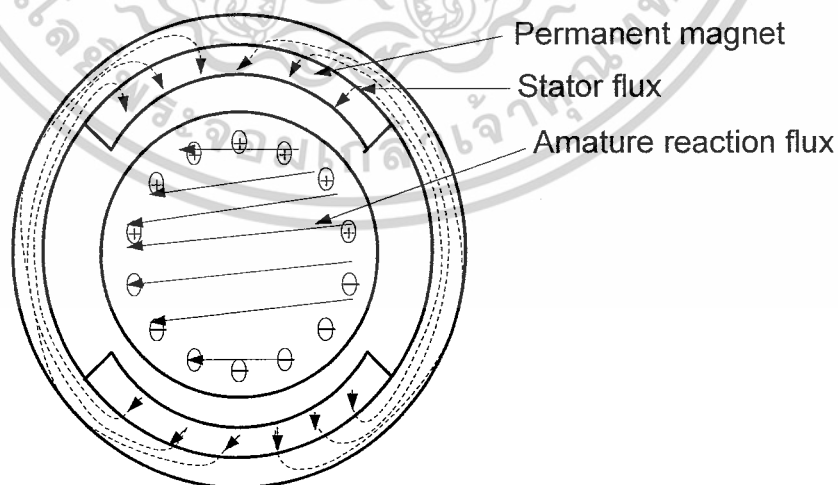
ภาพที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์แบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟคุณสมบัติของมอเตอร์ชานาน จะมีลักษณะมีความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นที่แรงบิดที่มีค่าสูงๆ สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากฟลักซ์แม่เหล็กของอาร์มาเจอร์รีแอ็คชัน (Armature Reaction) ซึ่งจะวิ่งไปตามทิศทางที่มีค่าความต้านทานต่ำไปยังฐานของขั้วแม่เหล็ก และที่ระดับกระแสสูงๆ จะเป็นสาเหตุให้เกิดการเลื่อนของมุมของตำแหน่งที่ขั้วแม่เหล็กติดตั้งอยู่ และทำให้ระดับของฟลักซ์แม่เหล็ก มีค่าลดลง ตามภาพที่ 2.6



ก) มอเตอร์แบบชานาน



ข) มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร

ภาพที่ 2.6 การเลื่อนตำแหน่งที่ขั้วแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ถ้าเปรียบเทียบกับมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร ตามภาพที่ 2.6 เพราะค่าเพอร์มิอะบิลิตี้ (Permeability (μ)) ของวัสดุที่เป็นแม่เหล็กถาวร มีค่าต่ำมาก (เกือบเท่ากับอากาศ) ซึ่งในกรณีนี้จะเกิดแรงโคเออร์ซีฟ (Coercive) สูงๆ มาต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก เมื่อเกิดสนามแม่เหล็กอาร์มาเจอร์รีแอ็คชั่น ซึ่งเป็นผลให้คุณสมบัติของแรงบิด กับความเร็วมีความสัมพันธ์เชิงเส้น

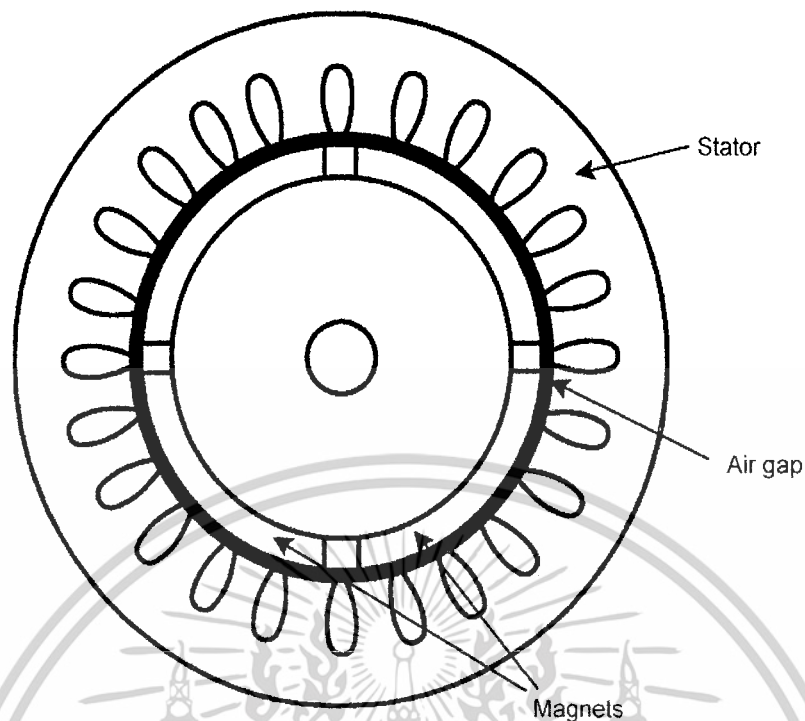
2.4 ข้อดีของมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรพอสรู๊ปได้ดังนี้

1. คุณสมบัติของแรงบิดกับความเร็วจะเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น
2. การประยุกต์ใช้งานเหมาะกับระบบที่ต้องการแรงบิดของโหลดสูง (เพราะให้ค่าของกระแสอาร์มาเจอร์ ที่สูงกว่ามอเตอร์กระแสตรงแบบฟิลด์เป็นขดลวด)
3. ไม่มีกำลังสูญเสียในฟิลด์ (ทำให้เกิดความร้อนเนื่องจากกระแสฟิลด์คอยล์)
4. มีประสิทธิภาพสูงกว่าและมีขนาดเล็กกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ ที่มีขนาดแรงม้าเท่ากัน

2.5 มอเตอร์แม่เหล็กชนิดที่ผิวแบบรูปไซน์ (SPM)

ในมอเตอร์ชนิดนี้ แสดงไว้ในภาพที่ 2.7 สเตเตอร์มีขดลวดสามเฟส สิ่งซึ่งสร้างฟลักซ์ ในช่องว่างอากาศ แม่เหล็กถาวรติดอยู่บนผิวของโรเตอร์ โดยการใช้อีพอกซี (Epoxy) โรเตอร์มีแกนเหล็ก สิ่งซึ่งอาจเป็นของแข็งหรือทำมาจากแผ่นบางๆซ้อนกันสำหรับการผลิตแบบเรียบง่าย ไลน์-สตาร์ท (Line-start) 50 เอิร์ต มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรอาจมีขดกรงกระรอกเพื่อสตาร์ทเหมือนมอเตอร์เหนี่ยวนำ สำหรับการทำงานในการเปลี่ยนแปลงความเร็ว มอเตอร์ชนิดแม่เหล็กถาวรอาจมีหรือไม่มีขดแดมเปอร์ (Damper) สิ่งซึ่งเป็นการเพิ่มความสูญเสียเนื่องจากฮาร์โมนิกส์ (Harmonic) ถ้ามอเตอร์ถูกหมุนโดยไพรมูฟเวอร์ (Prime mover)

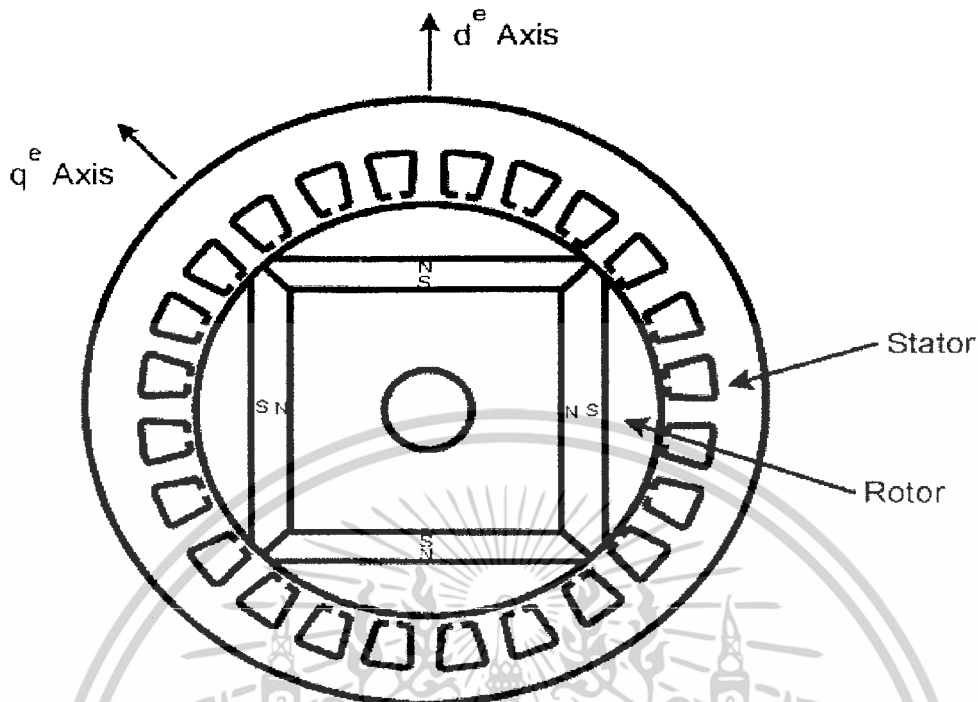
ขดสเตเตอร์สร้างแรงดันสมดุลงสามเฟสรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal) ดังนั้นค่าซิมชาบแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรใกล้เคียงกับ $1 (\mu_r > 1)$ และแม่เหล็กถูกติดไว้บนผิวโรเตอร์ ผลกระทบช่องว่างอากาศของมอเตอร์ที่มาก และมอเตอร์ที่ไม่มีขั้วอื่น $L_{dm} = L_{qm}$ นี่เป็นการทำให้ผลกระทบการกระทำของอาร์เมเจอร์ต่ำ เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำในการทำให้เป็นแม่เหล็กต่ำ



ภาพที่ 2.7 แสดงภาพตัดตามขวางของมอเตอร์แม่เหล็กชนิดที่ผิวแบบรูปไซน์ (SPM)

2.6 มอเตอร์แม่เหล็กชนิดที่อยู่ภายในแบบรูปไซน์ (IPM)

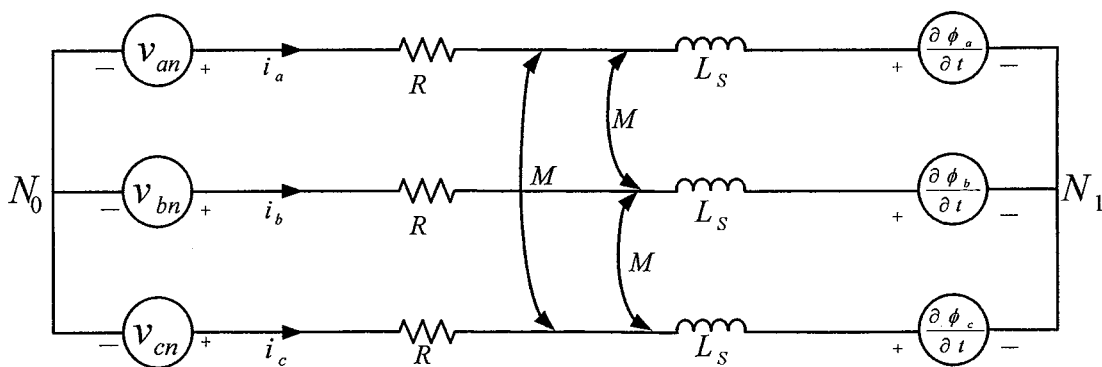
สิ่งที่แตกต่างจาก SPM มอเตอร์ซิงโครนัสที่มีแม่เหล็กอยู่ภายใน (IPM) แม่เหล็กถูกติดตั้งภายในโรเตอร์ โดยโครงสร้างถูกแสดงไว้ในภาพที่ 2.8 สเตเตอร์ มีขดลวดสามเฟสตามปกติ ความแตกต่างกันในรูปร่างถูกกำหนดให้เป็นดังนี้ (1) มอเตอร์มีความแข็งแรงมากกว่า การยอมให้ทำงานที่ความเร็วสูงกว่า (2) ผลกระทบช่องว่างอากาศในแกน d^i มากกว่าในแกน d^o สิ่งซึ่งทำให้ขั้วยื่นของมอเตอร์ด้วย $L_{dm} < L_{qm}$ และ (3) เกี่ยวกับผลกระทบช่องว่างอากาศน้อยผลกระทบการกระทำกลับของอาร์เมเจอร์กลายเป็นบทบาทแทน



ภาพที่ 2.8 แสดงภาพตัดตามขวางของมอเตอร์แม่เหล็กชนิดที่อยู่ภายในแบบรูปไซน์ (IPM)

2.7 โมเดล (Model) มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร

มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม นั่นก็คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำป้อนกลับแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal back-emf) (BDCM) และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำป้อนกลับแบบไซน์ (Sinusoidal back-emf) (PMSM) สิ่งที่แตกต่างกันในรูปคลื่นของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำป้อนกลับ (Back-emf) ก็คือวิธีการควบคุมที่แตกต่างกันสำหรับในแต่ละมอเตอร์ สำหรับในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเกี่ยวกับการควบคุมมอเตอร์แบบรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal) ในย่านการทำงานที่กำลังไฟฟ้างที่ ดังนั้นจุดประสงค์ในหัวข้อนี้ก็คือ การแสดงโมเดล 2 โมเดลสำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบ SPM 3 เฟสซึ่งแสดงเกี่ยวกับทฤษฎีที่สนับสนุนสำหรับการเสนอวิธีควบคุม โมเดลแรกเป็นโมเดลสำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร 3 เฟส (a, b, c) ในกรอบอ้างอิงที่อยู่กับที่ ถัดจากนั้นจะเปลี่ยนจากโมเดลสำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร 3 เฟส (a, b, c) ไปเป็นโมเดลสำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร 2 เฟสในกรอบอ้างอิงที่หมุนซึ่งเป็นโมเดล



ภาพที่ 2.9 โมเดลสำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร 3 เฟส

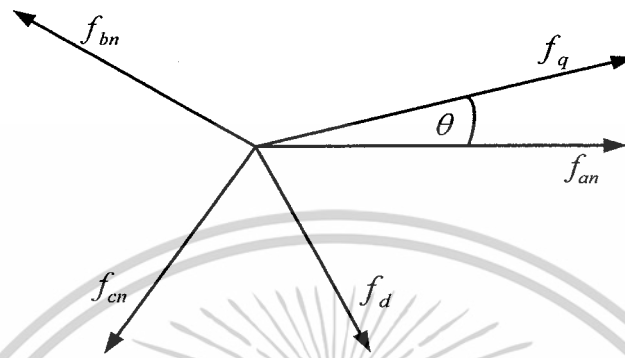
แบบที่ 2 โดยความสำคัญของ 2 โมเดลนี้ก็คือ โมเดลสำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร 3 เฟสแสดงให้เห็นถึงทฤษฎี DMIC จากตำแหน่งคอนเวอร์เตอร์ (Converter) ในขณะที่โมเดลสำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร 2 เฟสแสดงให้เห็นถึงทฤษฎี DMIC จากตำแหน่งมอเตอร์

สำหรับโมเดลสำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร 2 เฟสในกรอบอ้างอิงที่หมุนได้ได้ถูกบรรจุโดยใช้พาร์กทรานส์ฟอร์ม (Park Transformation) [15] แปลงมาจากโมเดล 3 เฟสของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร การแปลงแบบนี้เป็นเครื่องมือเกี่ยวกับทางคณิตศาสตร์ที่ทำเป็นตัวแปร 3 เฟสในกรอบอ้างอิงสเตเตอร์ไปเป็น 3 ตัวแปรในกรอบอ้างอิงอื่น ในบางกรณี สำหรับตัวอย่างการแยกการเชื่อมต่อแบบสตาร์ของ PMSM หนึ่งในสามของสามส่วนประกอบกลายเป็นศูนย์ ดังนั้นการเปลี่ยนกลายเป็นสามเฟสไปเป็นสองเฟส มันเป็นความเหมาะสมที่จะเลือกเหมือนกรอบอ้างอิงอันใหม่ เพราะว่าตัวแปรสามเฟสแบบรูปคลื่นไซน์ของกรอบที่อยู่กับที่จะกลายเป็นปริมาณดีซีและจะทำให้วิเคราะห์ได้ง่ายกว่าแบบธรรมดา

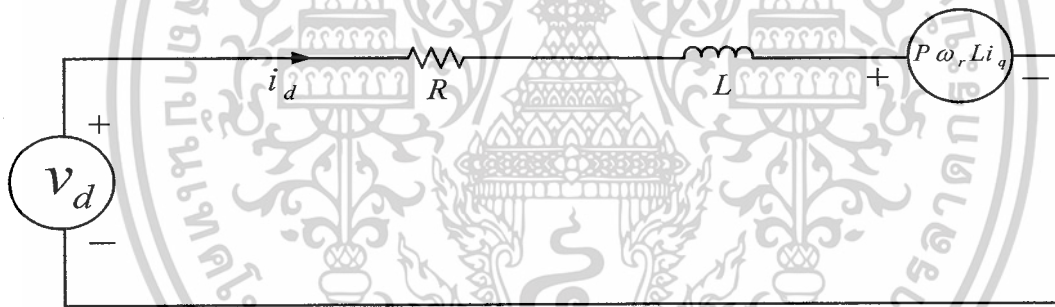
ในการแปลงแบบนี้, f เป็นตัวแปรที่ผ่านการแปลงมาแล้ว ตัวแปร f_{an}, f_{bn} และ f_{cn} เป็นตัวแปรของแต่ละเฟสในกรอบหยุดนิ่ง ตัวแปร f_d, f_q และ f_0 เป็นตัวแปรในกรอบอ้างอิงอันใหม่ ภาพที่ 2.10 แสดงเฟสไดอะแกรมกรอบอ้างอิงของ abc และ dq โดยที่สามแกนอันใหม่คือ ควอดราเจอร์ (Quadrature) (q) , ไดร็ก (Direct) (d) และ ซีโร่ซีควเอนซ์ (Zero sequence) (0) ซึ่งแกน q และแกน d อยู่ในระนาบเดียวเหมือนกับแกน an, bn และ cn ขณะที่แกนศูนย์จะตั้งฉากกับระนาบนี้ ถ้าผลรวมของ f_{an}, f_{bn} และ f_{cn} เป็นศูนย์ ต่อจากนั้นส่วนประกอบแกนศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

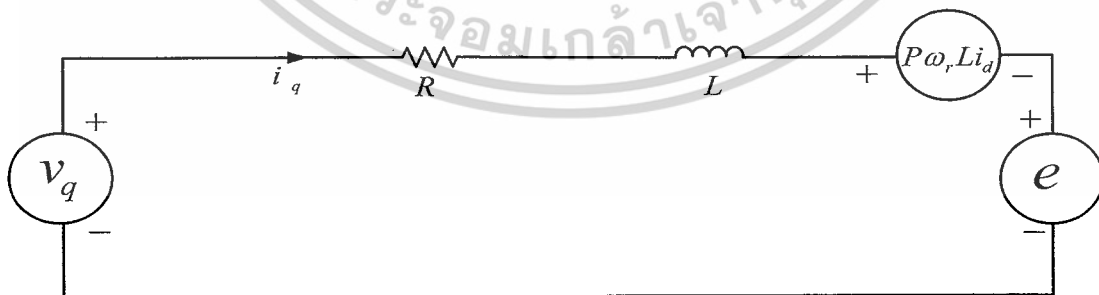
เป็นศูนย์และการแปลงกลายเป็นการแปลงสามเฟสไปเป็นสองเฟส โมเดล 2 เฟสของมอเตอร์ อยู่ในกรอบการหมุนแบบซิงโครนัส



ภาพที่ 2.10 แสดงแผนภาพเฟสเซอร์ (Phasor) ของกรอบอ้างอิง abc และ dq



(a) วงจรสมมูลย์ของแกน d



(b) วงจรสมมูลย์ของแกน q

ภาพที่ 2.11 แสดงวงจรสมมูลย์ของแกน d-q ในกรอบการหมุนแบบซิงโครนัส

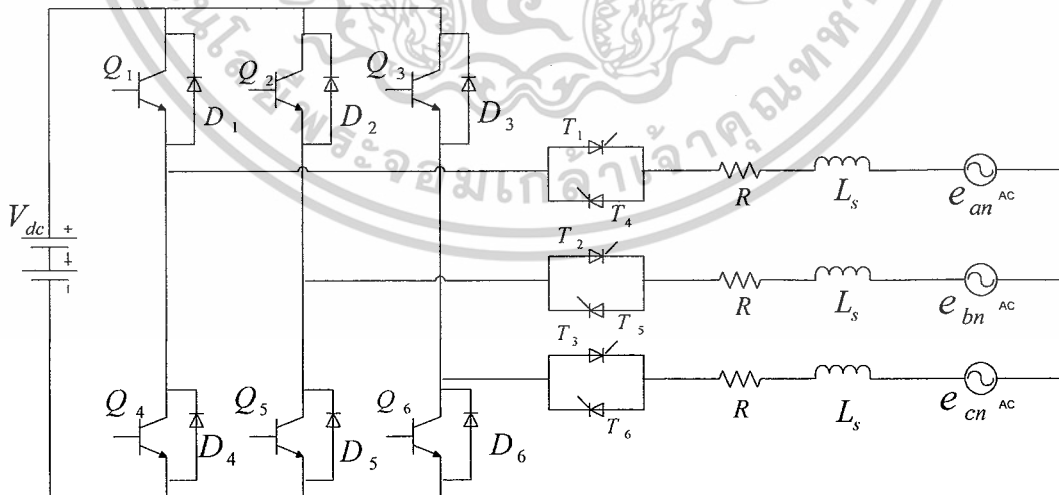
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อสังเกตที่มีโมเดลสำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแบบ SPM ค่าความเหนี่ยวนำแกน d และค่าความเหนี่ยวนำแกน q จะเท่ากัน รวมทั้งค่าเหล่านั้นจะต้องเท่ากับผลรวมของค่าเหนี่ยวนำด้วยตัวเองต่อเฟส L_s และค่าเหนี่ยวนำร่วมกัน

2.8 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์

จากการบรรยายในก่อนหน้า ปัญหาในการขับ PMSM เกินความเร็วมูลฐานก็คือ การเพิ่มขึ้นของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำป้อนกลับที่มากกว่าแรงดันบัสกระแสตรงและไม่มีกระแสที่สามารถไปขับมอเตอร์ PMSM ถ้าไม่มีกระแสไปขับมอเตอร์ PMSM การเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าไปเป็นกำลังทางกลก็ไม่สามารถจะเป็นไปได้ ดังนั้นเป้าหมายในการขับมอเตอร์ PMSM เกินความเร็วมูลฐานก็คือ หาวิธีการควบคุมที่จะทำให้กระแสไหลไปขับมอเตอร์ PMSM เพื่อให้การเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าไปเป็นกำลังทางกลเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีการควบคุมที่เรียกว่า DMIC

ภาพที่ 2.12 แสดงโครงสร้างอินเวอร์เตอร์สำหรับ DMIC และโมเดลของมอเตอร์ PMSM รูปร่างของคอนเวอร์เตอร์ในวิธีการควบคุมแบบ DMIC คือ คอนเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดันเชื่อมต่อกับเอสซีอาร์ต่อขนานกันสองตัวแบบกลับทิศทาง (Back-to-back) และเอาต์พุต (Output) จะถูกเชื่อมต่อกับมอเตอร์ PMSM



ภาพที่ 2.12 แสดงโครงสร้างอินเวอร์เตอร์สำหรับวิธีแบบ DMIC ของ PMSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 อินเวอร์เตอร์และสเปซเวกเตอร์แรงดัน (Inverter and Voltage space Vector)

สเปซเวกเตอร์ใช้สำหรับกำเนิดแรงดันที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟสทำได้ โดยการสวิตช์อินเวอร์เตอร์สามเฟส ซึ่งอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการสวิตช์เป็นอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์กำลังรูปแบบการสวิตช์อินเวอร์เตอร์ขึ้นอยู่กับค่าที่คำนวณเพื่อได้ค่าที่เหมาะสม

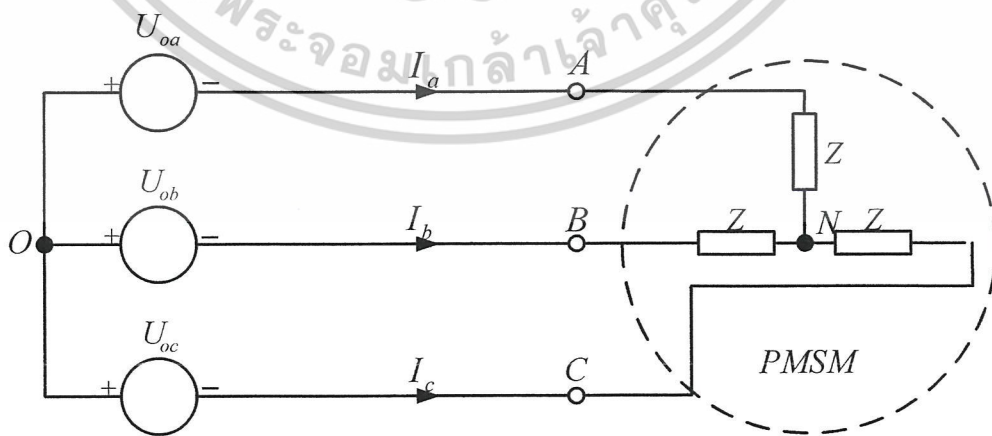
2.10 ระบบแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟสทั่วไป

วิธีกำเนิดสนามแม่เหล็กหมุนโดยใช้แหล่งจ่ายแรงดันสามแหล่งที่มีลักษณะที่เป็นอิสระต่อกันมีมุมห่างกัน 120 องศาจ่ายให้กับมอเตอร์แสดงดังภาพที่ 2.13

ในมาตรฐานระบบไฟสามเฟส แรงดันไซน์ถูกจ่ายให้กับมอเตอร์กำเนิดกระแสที่เป็นไซน์ มีแรงดันเฟสแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u_{oa} &= \sqrt{2}U \cos(\omega t) \\ u_{ob} &= \sqrt{2}U \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_{oc} &= \sqrt{2}U \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \tag{2.1}$$

คำนวณค่าแรงดันเฟสเทียบนิวทรัล (u_{an}, u_{bn}, u_{cn} ตามลำดับ) จากแหล่งจ่ายแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ (u_{oa}, u_{ob}, u_{oc} ตามลำดับ) ถ้าระบบสมการได้สมการดังนี้



ภาพที่ 2.13 ระบบไฟฟ้า 3 เฟสที่สมมาตร

$$\begin{aligned} u_{on} &= u_{oa} + ZI_a \\ u_{on} &= u_{ob} + ZI_b \\ u_{on} &= u_{oc} + ZI_c \end{aligned} \quad (2.2)$$

ดังนั้น

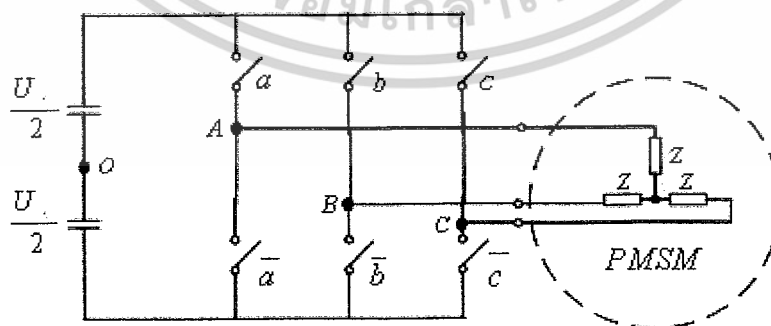
$$\begin{aligned} 3u_{on} &= u_{oa} + u_{ob} + Z(I_a + I_b + I_c) \\ \therefore u_{on} &= \frac{1}{3}(u_{oa} + u_{ob} + u_{oc}) \end{aligned} \quad (2.3)$$

แรงดันเฟส A เทียบกับนิวทรัลสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u_{on} &= u_{an} + u_{oa} \\ \therefore u_{an} &= u_{on} - u_{oa} = \left(\frac{1}{3}\right)(u_{oa} + u_{ob} + u_{oc}) - u_{oa} \\ &= -\frac{2}{3}u_{oa} + \frac{1}{3}u_{ob} + \frac{1}{3}u_{oc} \\ &= \frac{2}{3}u_{ao} - \frac{1}{3}u_{bo} - \frac{1}{3}u_{co} \end{aligned} \quad (2.4)$$

คำนวณแรงดันเฟสอื่นได้เช่นเดียวกันคือ

$$\begin{aligned} u_{an} &= \frac{1}{3}(2u_{ao} - u_{bo} - u_{co}) \\ u_{bn} &= \frac{1}{3}(2u_{bo} - u_{ao} - u_{co}) \\ u_{cn} &= \frac{1}{3}(2u_{co} - u_{ao} - u_{bo}) \end{aligned} \quad (2.5)$$



ภาพที่ 2.14 แหล่งจ่ายไฟแบบอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11. ระบบแหล่งจ่ายไฟแบบอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

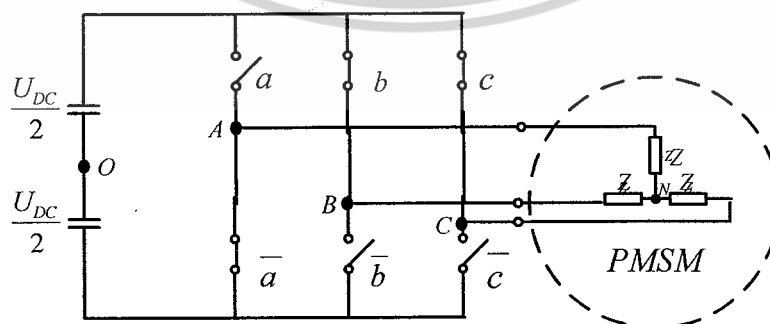
อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส เป็นตัวทำหน้าที่จ่ายแรงดันให้กับมอเตอร์ ประกอบด้วยสวิสช์อิเล็กทรอนิกส์ 6 ตัวทำหน้าที่เปิด/ปิดวงจรดังแสดงในภาพที่ 2.14 โดยแหล่งจ่ายแรงดันเป็นไฟตรงอินพุตมาจากวงจรเรกติไฟเออร์ สวิสช์ตัวที่อยู่ในกิ่งเดียวกันต้องไปมีปิดวงจรพร้อมกันเพื่อป้องกันการลัดวงจรไฟตรง ดังนั้นสวิสช์ทรานซิสเตอร์ 2 ตัวในกิ่งเดียวกันจะทำให้เกิดสองสถานะคือสถานะ '0' เมื่อสวิสช์ตัวบนเปิดวงจร ตัวล่างปิดวงจร และสถานะ '1' เมื่อสวิสช์ตัวบนปิดวงจร ตัวล่างเปิดวงจร การเปิดปิดสวิสช์ทั้ง 3 ตัวทำให้เกิดสถานะแตกต่างกัน 8 สถานะ ซึ่งอาจเรียกชื่อได้เป็น U0 ถึง U7 ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 รูปแบบสวิสช์และค่าแรงดันเทียบจุดสะเทินเหมือนของอินเวอร์เตอร์

| ชื่อ | a | b | c | U_{AO} | U_{Bo} | U_{Co} |
|------|---|---|---|-------------|-------------|-------------|
| U0 | 0 | 0 | 0 | $-U_{DC}/2$ | $-U_{DC}/2$ | $-U_{DC}/2$ |
| U1 | 0 | 0 | 1 | $-U_{DC}/2$ | $-U_{DC}/2$ | $+U_{DC}/2$ |
| U2 | 0 | 1 | 0 | $-U_{DC}/2$ | $+U_{DC}/2$ | $-U_{DC}/2$ |
| U3 | 0 | 1 | 1 | $-U_{DC}/2$ | $-U_{DC}/2$ | $+U_{DC}/2$ |
| U4 | 1 | 0 | 0 | $+U_{DC}/2$ | $-U_{DC}/2$ | $-U_{DC}/2$ |
| U5 | 1 | 0 | 1 | $+U_{DC}/2$ | $-U_{DC}/2$ | $+U_{DC}/2$ |
| U6 | 1 | 1 | 0 | $+U_{DC}/2$ | $+U_{DC}/2$ | $-U_{DC}/2$ |
| U7 | 1 | 1 | 1 | $+U_{DC}/2$ | $+U_{DC}/2$ | $+U_{DC}/2$ |

0 = สวิสช์ตัวบนเปิด, 1 = สวิสช์ตัวบนปิด(สวิสช์ตัวล่างมีสถานะตรงข้ามกับตัวบน)

ตัวอย่างสถานการณ์สวิสช์ U3 แสดงได้ดังภาพที่ 2.15



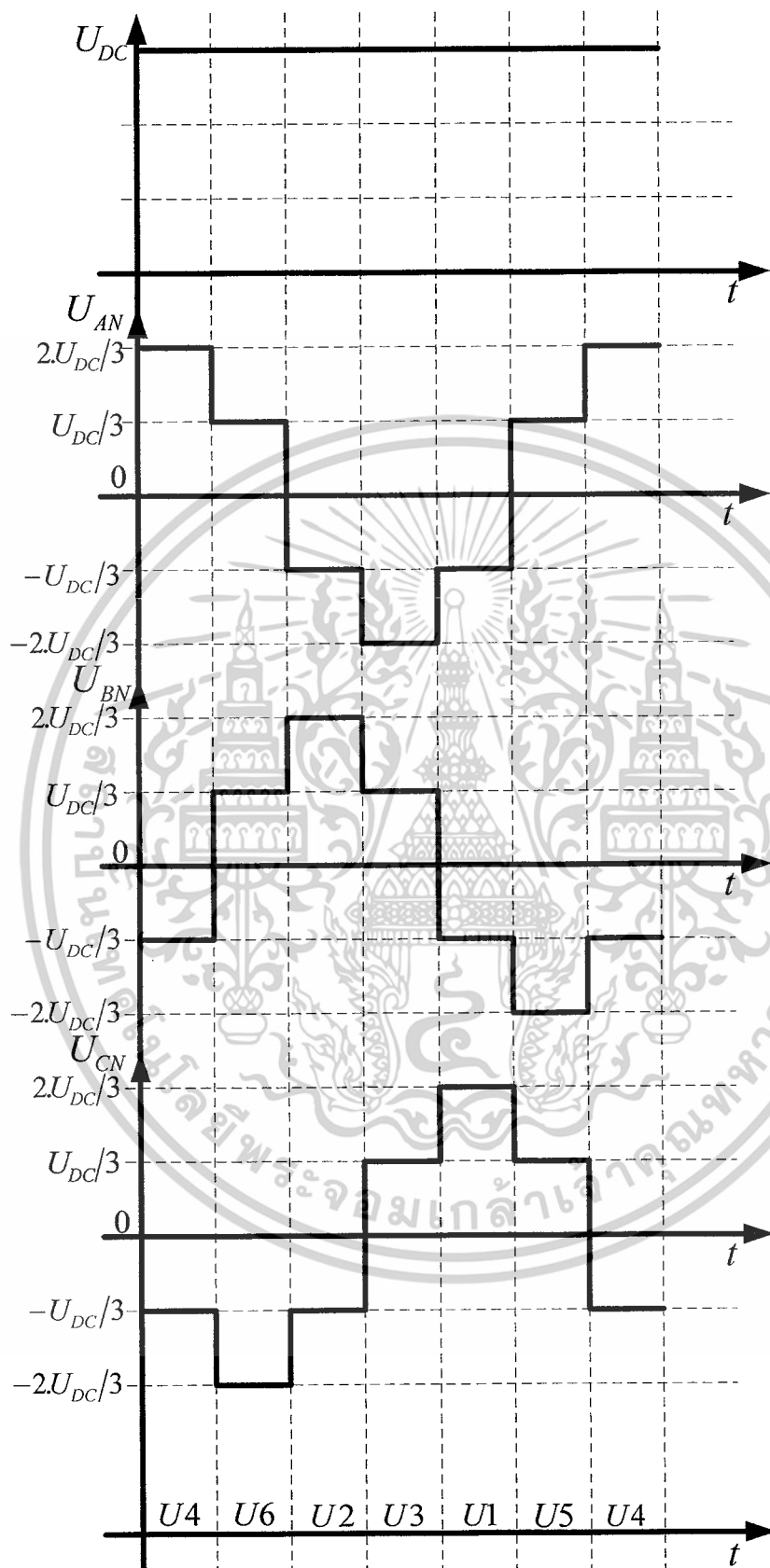
ภาพที่ 2.15 สถานะอินเวอร์เตอร์ขณะสวิสช์ U3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 รูปแบบสวิตช์และค่าแรงดันเทียบจุดนิวทรัลของอินเวอร์เตอร์

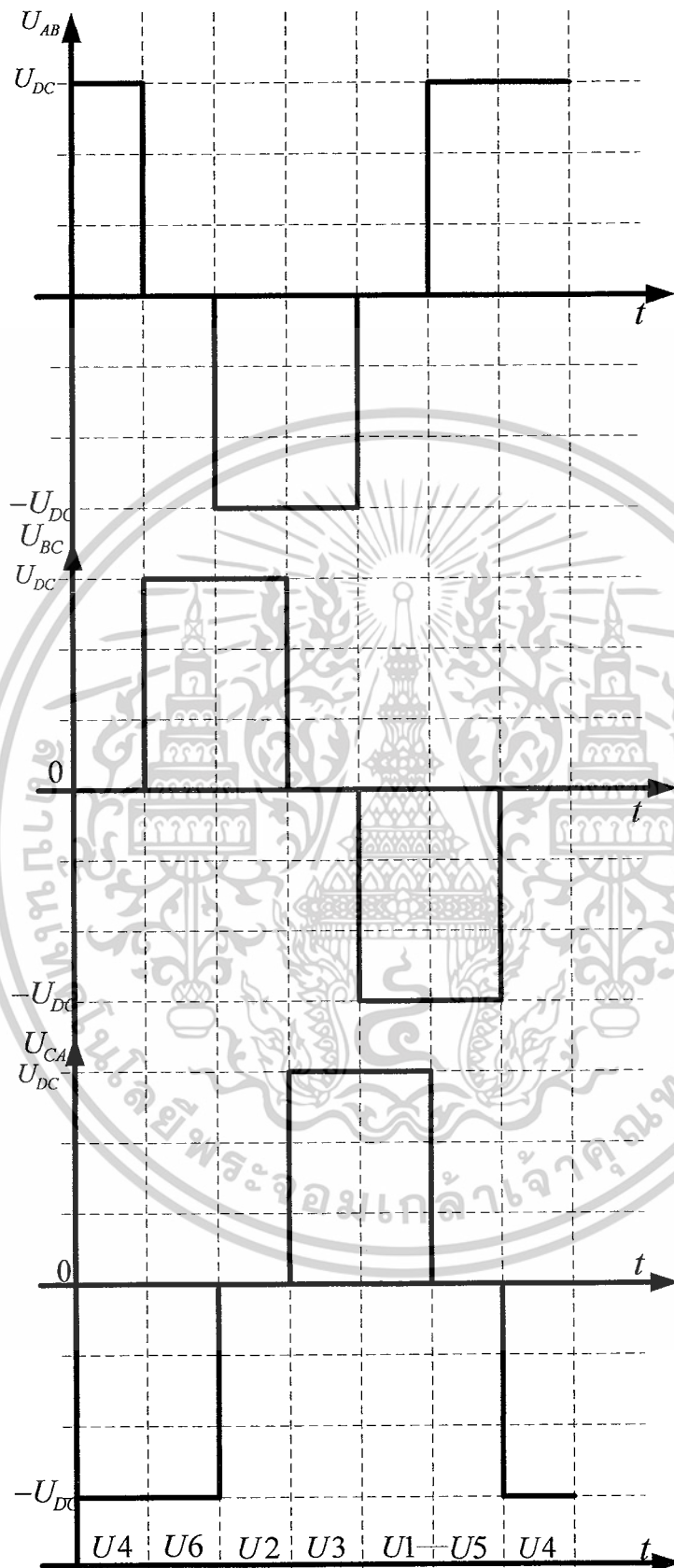
| ชื่อ | a | b | c | U_{AN} | U_{BN} | U_{CN} |
|------|---|---|---|--------------|--------------|--------------|
| U0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| U1 | 0 | 0 | 1 | $-U_{DC}/3$ | $-U_{DC}/3$ | $+2U_{DC}/3$ |
| U2 | 0 | 1 | 0 | $-U_{DC}/3$ | $+2U_{DC}/3$ | $-U_{DC}/3$ |
| U3 | 0 | 1 | 1 | $-2U_{DC}/3$ | $+U_{DC}/3$ | $+U_{DC}/3$ |
| U4 | 1 | 0 | 0 | $+2U_{DC}/3$ | $-U_{DC}/3$ | $-U_{DC}/3$ |
| U5 | 1 | 0 | 1 | $+U_{DC}/3$ | $-2U_{DC}/3$ | $+U_{DC}/3$ |
| U6 | 1 | 1 | 0 | $+U_{DC}/3$ | $+U_{DC}/3$ | $-2U_{DC}/3$ |
| U7 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |

จากค่าในตารางที่ 2.2 ถ้าต้องการให้เกิดแรงดันสามเฟสรูปกึ่งสี่เหลี่ยม (quasi square) ที่มีเฟสต่างกัน 120 องศา เราสามารถเขียนได้จากไดอะแกรมความสัมพันธ์ของแรงดันเฟสและแรงดันไลน์โดยให้มีลำดับการสวิตช์ $U4 \rightarrow U6 \rightarrow U2 \rightarrow U3 \rightarrow U1 \rightarrow U5 \rightarrow U4$ แสดงได้ดังภาพที่ 2.16 และภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.16 ไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันเฟส U_{AN} , U_{BN} และ U_{CN}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไลน์ U_{AB} , U_{BC} และ U_{CA}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12. เวกเตอร์แรงดันในกรอบอ้างอิงสเตเตอร์ (α, β)

อะกอลิซึมของการควบคุมแรงบิดโดยตรงทำได้โดยการเลือกเวกเตอร์แรงดันที่เหมาะสม ดังนั้นก่อนอธิบายถึงการควบคุมแรงบิดโดยตรงจะพิจารณาเวกเตอร์แรงดันก่อน จากแรงดัน 3 เฟสถูกแปลงเป็น 2 เฟสในกรอบอ้างอิงสเตเตอร์ (α, β) วิธีแปลงนี้เรียกว่าการแปลงของคลาร์ก (Clark Transformation) จากแรงดัน 3 เฟส (U_{an}, U_{bn} และ U_{cn}) รวมเป็นเวกเตอร์แรงดันจากเวกเตอร์แรงดันแตกเป็น 2 แกน (α, β) คือ

$$\vec{U}_s^{(s)} = \frac{2}{3}(u_{an} + au_{bn} + a^2u_{cn}) \quad (2.6)$$

$$\vec{U}_s^{(s)} = u_\alpha + ju_\beta$$

$$\therefore \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{an} \\ u_{bn} \\ u_{cn} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

จากตารางที่ 2.2 เขียนใหม่ได้ดังตารางที่ 2.3 คือ

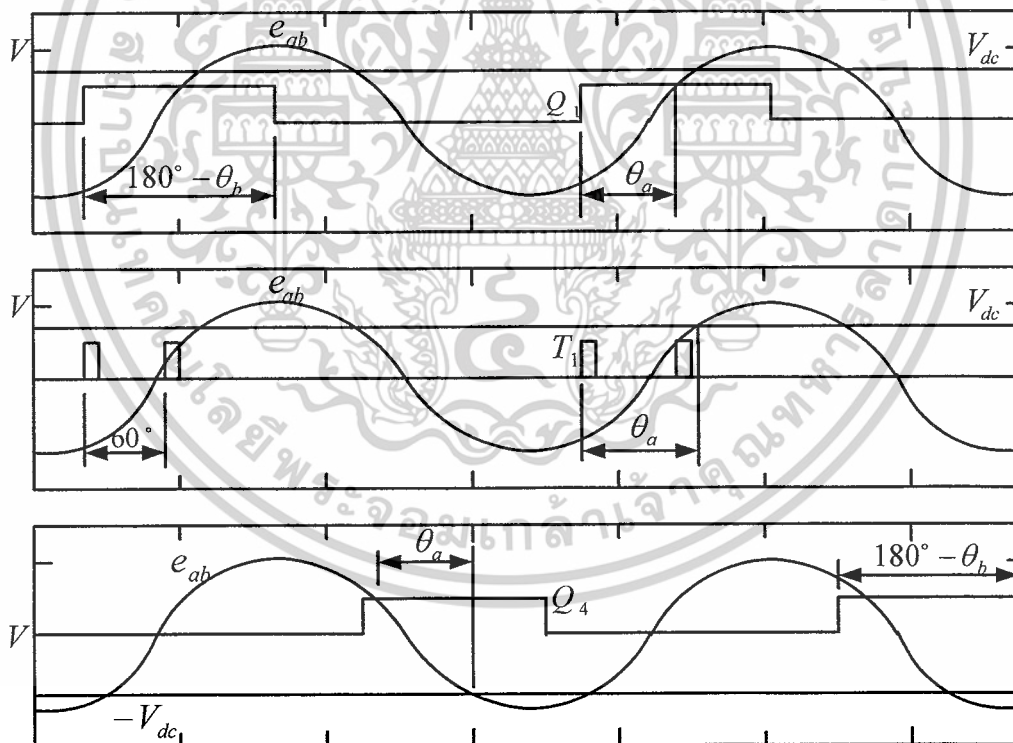
ตารางที่ 2.3 รูปแบบสวิตช์และค่าแรงดันของอินเวอร์เตอร์ในกรอบอ้างอิงสเตเตอร์ (α, β)

| ชื่อ | a | b | c | U_α | U_β | $\vec{u}_s^{(s)}$ |
|------|---|---|---|--------------|---------------------|-------------------|
| U0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | \vec{U}_0 |
| U1 | 0 | 0 | 1 | $-U_{DC}/3$ | $-U_{DC}/\sqrt{3}$ | \vec{U}_1 |
| U2 | 0 | 1 | 0 | $-U_{DC}/3$ | $+2U_{DC}/\sqrt{3}$ | \vec{U}_2 |
| U3 | 0 | 1 | 1 | $-2U_{DC}/3$ | 0 | \vec{U}_3 |
| U4 | 1 | 0 | 0 | $+2U_{DC}/3$ | 0 | \vec{U}_4 |
| U5 | 1 | 0 | 1 | $+U_{DC}/3$ | $-2U_{DC}/\sqrt{3}$ | \vec{U}_5 |
| U6 | 1 | 1 | 0 | $+U_{DC}/3$ | $+U_{DC}/\sqrt{3}$ | \vec{U}_6 |
| U7 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | \vec{U}_7 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13 วิธีการจุดชนวนของมุมแบบ DMIC

วิธีการจุดชนวนสำหรับ DMIC ในการขับมอเตอร์ PMSM ถูกแสดงไว้ดังภาพที่ 2.18 สัญญาณเกตที่จุดชนวนสวิตช์ (Switch) ในทรานซิสเตอร์ (Transistor) Q_1 และ Q_4 และ เอสซีอาร์ T_1 และ T_4 ได้ถูกแสดงไว้ด้วย ในวิธีการนี้ มุมแอดวานซ์ (Advance angle) θ_a มีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวของกับจุดที่ตัดกันของค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำป้อนกลับและค่าแรงดัน บัสกระแสตรงมุมที่เริ่มนำกระแส (Conduction angle) ที่ความเร็วมูลฐาน และลดลงอย่างช้าๆ ไป ยัง 120 องศาในทางการทำงานแบบเฟสเดียวถูกทำให้ไปถึงและการคอมมิวเตชันที่ล้มเหลวจะ ถูกหลีกเลี่ยง การควบคุมแบบนี้ถูกทำให้เป็นไปได้โดยการควบคุม มุมแบลิ่งกิ้ง (Blanking angle) θ_b ดังนั้นการหยุดทำงานเมื่อกระแสเป็นศูนย์ เอสซีอาร์จะหลีกเลี่ยงกระแสที่ไหล ย้อนกลับและผลจากการรีเจนเนอเรชัน (Regeneration) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเริ่มนำกระแส ของบายพาสไดโอด(bypass diode)



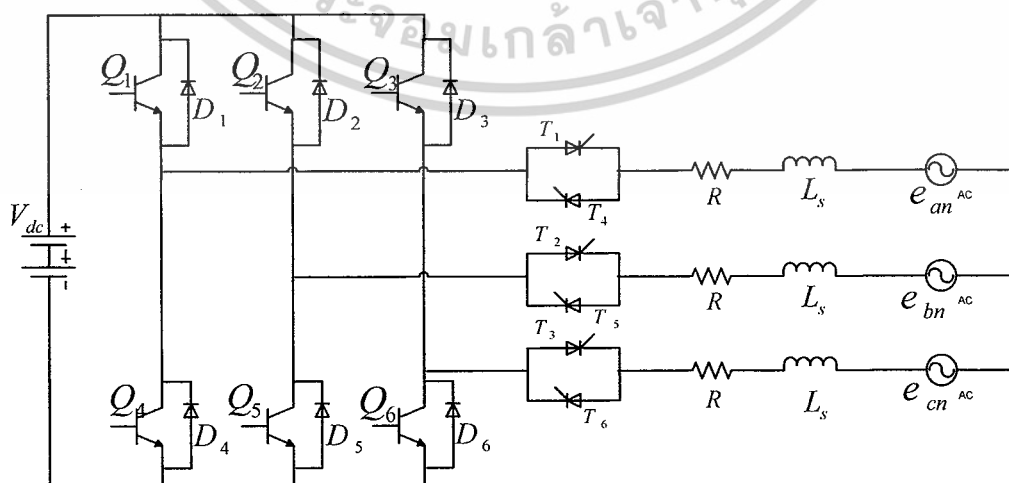
ภาพที่ 2.18 แสดงเกี่ยวกับวิธีการจุดชนวนสำหรับโหมดการทำงาน
แบบมอเตอร์ของ DMIC ที่ขับ PMSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14 การวิเคราะห์สัณการของกระแสอาร์มาเจอร์ของ PMSM

ภาพที่ 2.18 แสดง DMIC ที่ขับ PMSM ที่ได้จากการวิเคราะห์ที่แสดงกระแสเฟสสำหรับช่วง 60 องศาแรก พิจารณาที่ก่อนช่วงที่ 60 องศา ของสวิตช์ Q_5 , T_5 , Q_6 และ T_6 นั้น ออน (ON) ดังนั้นมอเตอร์จะทำงาน 2 เฟส คือ เฟส b และ เฟส c จะเชื่อมต่อกับเทอร์มินอลลบ (Negative terminal) ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง และเฟส c จะเชื่อมต่อกับเทอร์มินอลบวก (Positive terminal) ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง พิจารณาที่ช่วงสุดท้ายของกระแสในเฟส a จะเป็นศูนย์, กระแสในเฟส b จะเป็น $-i_c$ และกระแสในเฟส c เป็น i_c ซึ่งนั่นเป็นเงื่อนไขเริ่มต้น สำหรับช่วง 60 องศา ที่ทำการวิเคราะห์ และที่อ้างอิงองศาที่จะกำหนดให้ นั่นคือ $t = 0$ ($\theta = 0$)

ในช่วงที่ทำการวิเคราะห์, มอเตอร์จะหยุดการทำงานในเฟส c และ b และจะเริ่มทำงานในเฟส a และ b ซึ่งพูดในอีกทำนองหนึ่งคือ ในช่วงเฟส c จะเป็นเฟสที่ตัดออกไป และเฟส a จะเป็นเฟสที่เข้ามา โดยเริ่มต้น เมื่อ $t = 0$ ($\theta = 0$) สวิตช์ Q_1 และ T_1 จะออนกระแสในเฟส c จะสับเปลี่ยนกระแส (Commutate) ไปยังเฟส a สวิตช์ Q_5 นั้นนอกจากการออน แต่การไหลในเฟส c จะหยุดเมื่อกระแสเข้าใกล้ศูนย์ เนื่องจากไทรสเตอร์ T_5 เพื่อจะทำการปิด เฟส c หลังจากที่ถูกแยกออกจากแหล่งจ่ายและการสับเปลี่ยนกระแสอย่างสมบูรณ์ ในช่วงคาบของการสับเปลี่ยนกระแส เครื่องจักรจะทำงานในโหมด 3 เฟส คาบของการสับเปลี่ยนจะเริ่มที่ $\theta = 0$ และจบที่ $\theta = \theta_c$ คือ มุมการสับเปลี่ยนกระแส ภาพที่ 2.18 แสดงถึงวงจรของ DMIC ที่ใช้ขับ PMSM ในช่วงการสับเปลี่ยนกระแส เส้นต่อเนื่องสีดำจะเกี่ยวข้องกับส่วนประกอบของวงจรในช่วงนี้ ซึ่งเส้นสีเทาจะไม่เกี่ยวข้องกับส่วนของวงจร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนภาพที่ 2.19 แสดง DMIC ในการขับเคลื่อน PMSM นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเดลอนุพันธ์อันดับสองของ PMSM คือ

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & 0 \\ 0 & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} + \frac{1}{3L} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ab}(t) - e_{ab}(t) \\ v_{cb}(t) - e_{cb}(t) \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

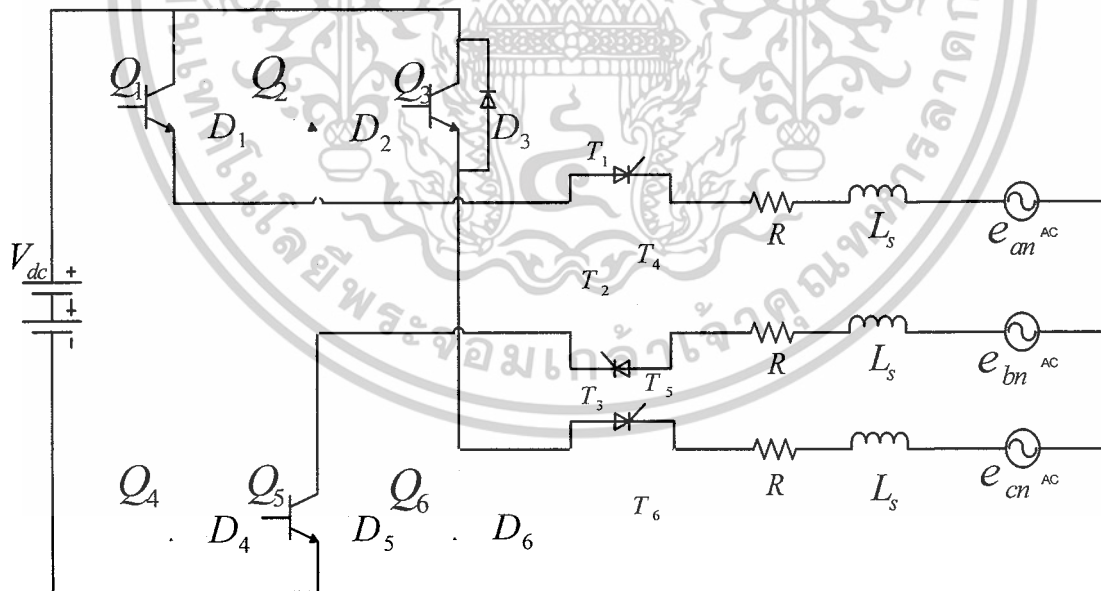
$$\theta = n\omega_b t \quad (2.9)$$

ω_b = ความเร็วมูลฐาน

n = อัตราส่วนความเร็วโรเตอร์ ω_r ต่อความเร็วมูลฐาน ω_b

แทนค่าสมการที่ 2.8 ในสมการที่ 2.9

$$\frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} i_a(\theta) \\ i_c(\theta) \end{bmatrix} = \frac{1}{n\omega_b} \begin{bmatrix} -R/L & 0 \\ 0 & -R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(\theta) \\ i_c(\theta) \end{bmatrix} + \frac{1}{3n\omega_b L} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ab}(\theta) - e_{ab}(\theta) \\ v_{cb}(\theta) - e_{cb}(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$



ภาพที่ 2.20 แสดง DMIC ในการขับเคลื่อน PMSM ในช่วงเวลาการสับเปลี่ยนกระแส

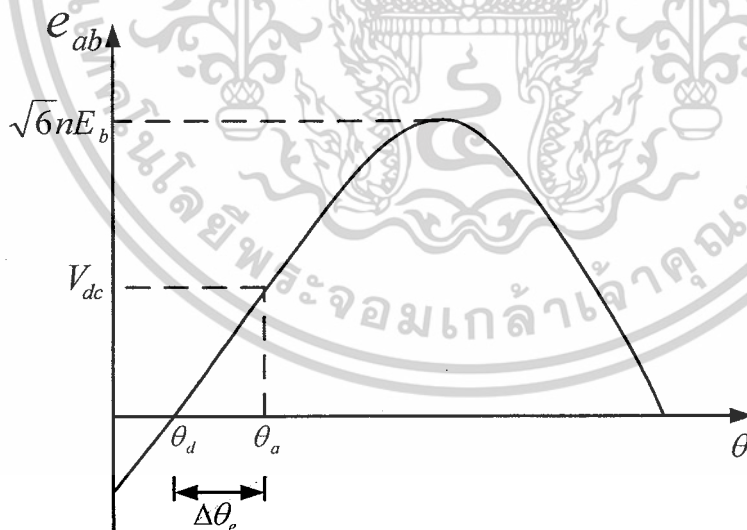
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากที่ได้ทำการอธิบาย DMIC ในการขับ PMSM, สวิตช์ Q_1 และ T_1 จะอนด้วยมุม θ_a ก่อนที่ แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้าป้อนกลับไลน์ (e_{ab}) จะข้ามค่าแรงดันดีซีลิงค์ (DC link) ถ้าจุดอ้างอิงที่ $t = 0$ กำหนดให้เป็นครั้งที่ ซึ่ง Q_1 และ T_1 นั้นอน, ภาพที่ 2.19 แสดงรูปคลื่นแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้าป้อนกลับไลน์ (e_{ab}) เมื่อกล่าวถึงตัวอ้างอิง

จากภาพที่ 2.20 แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้าป้อนกลับไลน์ (e_{ab}) และ $e_{cb}(\theta)$ สามารถอธิบายได้จากสมการ 2.11

$$\begin{aligned} e_{ab}(\theta) &= \sqrt{6n}E_b \sin(\theta - \theta_d) \\ e_{cb}(\theta) &= \sqrt{6}E_b \sin(\theta - \theta_d + \pi/3) \end{aligned} \quad (2.11)$$

ในภาพที่ 2.21 θ_a คือมุมแอดวานซ์ของการคงที่ของ e_{ab} จะเท่ากับ V_{dc} ขณะที่ Q_1 และ T_1 ถูกจุดชนวน มุม θ_d คือมุมดีเลย์ (Delay angle), θ_d เป็นมุมหลังจากการจุดชนวน Q_1 และ T_1 ซึ่ง e_{ab} ข้ามค่า 0 มุม $\Delta\theta_e$ คือ ความแตกต่างระหว่าง θ_a และ θ_d ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.12



ภาพที่ 2.21 แสดงรูปคลื่นของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบป้อนกลับไลน์ของระบบ

DMIC/PMSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta\theta_c = \theta_a - \theta_d = \sin^{-1}\left(\frac{V_{dc}}{\sqrt{6nE_b}}\right) \quad (2.12)$$

จากการอธิบาย เราจะพิจารณาเฉพาะการสับเปลี่ยนในทางเลือก 1 และใช้แรงดันอาร์มีเจอร์ของมอเตอร์ V_{ab} และ V_{cb} ในช่วงการสับเปลี่ยนกระแส คือ

$$V_{ab} = V_{cb} = V_{dc} \quad (2.13)$$

ดังนั้น สำหรับ $0 \leq \theta \leq \theta_c$, ไม่สนใจค่าความต้านทานขดลวด R, สถานะรูปแบบของวงจรในภาพที่ 2.21 คือ

$$\frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} i_a(\theta) \\ i_c(\theta) \end{bmatrix} = \frac{1}{3n\omega_b L} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{dc} - e_{ab}(\theta) \\ V_{dc} - e_{cb}(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

สมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งข้างบนสามารถพิสูจน์ได้ด้วยค่าขอบเขตดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} i_a(0) &= 0 & i_a(\theta_c) &= I_1 \\ i_b(0) &= -I_0 & i_b(\theta_c) &= -I_1 \\ i_c(0) &= I_0 & i_c(\theta_c) &= 0 \end{aligned} \quad (2.15)$$

การแสดงการวิเคราะห์ของกระแสเฟสระหว่างช่วงการสับเปลี่ยนกระแส คือ

$$\begin{aligned} i_a(\theta) &= \frac{1}{3n\omega_b L} \left(V_{dc}\theta - 3\sqrt{2nE_b} \sin\left(\theta - \theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) - 3\sqrt{2nE_b} \sin\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \\ i_b(\theta) &= -\frac{1}{3n\omega_b L} \left(\begin{aligned} &2V_{dc}\theta - 3\sqrt{2nE_b} \sin\left(\theta - \theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) - 3\sqrt{2nE_b} \sin(\theta - \theta_d) \\ &- 3\sqrt{2nE_b} \sin\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) - 3\sqrt{2nE_b} \sin(\theta_d) \end{aligned} \right) - I_0 \quad (2.16) \\ i_c(\theta) &= \frac{1}{3n\omega_b L} \left(V_{dc}\theta - 3\sqrt{2nE_b} \sin(\theta - \theta_d) - 3\sqrt{2nE_b} \sin(\theta_d) \right) + I_0 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ I_0 และ I_1 หาได้จาก

$$I_0 = -\frac{1}{3n\omega_b L} (V_{dc}\theta_c - 3\sqrt{2}nE_b \sin(\theta_c - \theta_d) - 3\sqrt{2}nE_b \sin(\theta_d))$$

$$I_1 = \frac{1}{3n\omega_b L} \left(V_{dc}\theta_c - 3\sqrt{2}nE_b \sin\left(\theta_c - \theta_d - \frac{2\pi}{3}\right) - 3\sqrt{2}nE_b \sin\left(\theta_d + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \quad (2.17)$$

หลังจากคาบของการสับเปลี่ยนกระแสจบลง, กระแสในเฟส c จะเข้าใกล้ศูนย์ และไทรสเตอร์ T_5 นั้นปิด จากจุดที่เราสนใจเครื่องจักรจะเริ่มทำงานในเฟสเดียวกันนั่นคือ เฟส a และ b รูปที่ 2.22 แสดงการทำงานของวงจรระหว่างช่วงการสับเปลี่ยนกระแสที่จบลง และช่วง 60 องศา สุดท้าย ดังนั้นวงจรที่เป็นผลสำหรับ θ ระหว่าง θ_c และ $\pi/3$

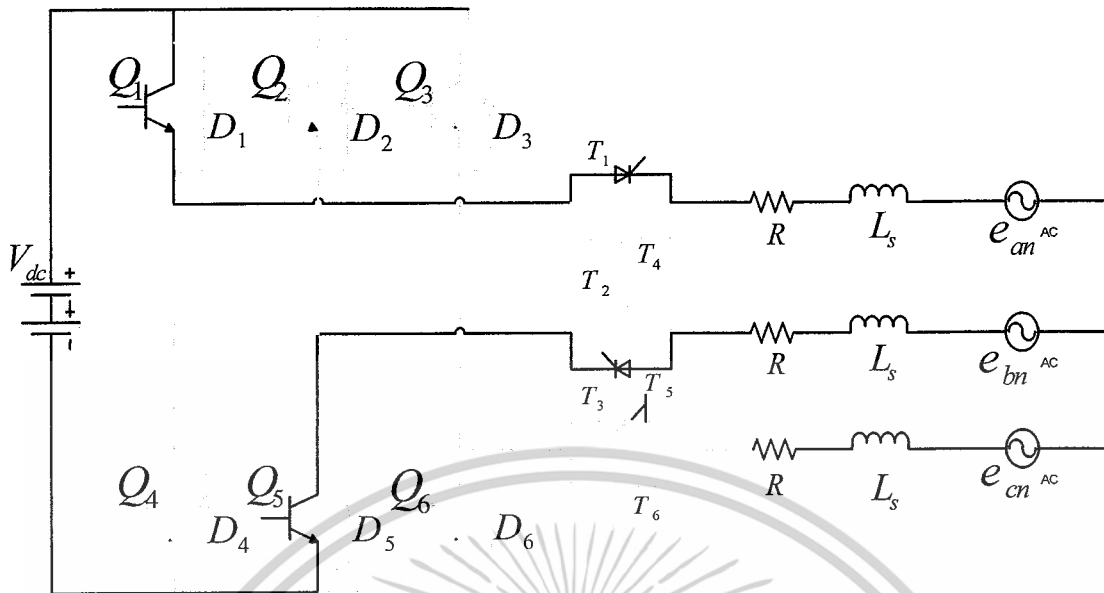
สมการ 2.18 จะแสดงรูปแบบของอนุพันธ์อันดับหนึ่งของวงจรในการทำงาน 2 เฟส

$$\frac{di_a(t)}{dt} = \frac{1}{2L} (v_{ab}(t) - e_{ab}(t)) \quad (2.18)$$

ค่าขอบเขตสำหรับสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งข้างบน คือ

$$\begin{aligned} i_a(\theta_c) &= I_1 & i_a(\pi/3) &= I_0 \\ i_a(\theta_c) &= I_1 & i_b(\pi/3) &= I_0 \\ i_c(\theta_c) &= 0 & i_c(\pi/3) &= 0 \end{aligned} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.22 แสดง DMIC ในการขับเคลื่อน PMSM หลังจากช่วงเวลาการสับเปลี่ยนกระแส

สมการ 2.20 จะแสดงกระแสเฟสที่ยังคงพิสูจน์จากสมการ 2.118 ภายใต้ขอบเขตที่ได้จากสมการ 2.19

$$\begin{aligned}
 i_b(\theta) &= \frac{1}{2n\omega_b L} \left(V_{dc}(\theta - \theta_c) - \sqrt{6}nE_b \sin\left(\theta - \theta_d - \frac{\pi}{2}\right) + \sqrt{6}nE_b \sin\left(\theta_c - \theta_d - \frac{\pi}{2}\right) \right) + I_1 \\
 i_b(\theta) &= -\frac{1}{2n\omega_b L} \left(V_{dc}(\theta - \theta_c) - \sqrt{6}nE_b \sin\left(\theta - \theta_d - \frac{\pi}{2}\right) + \sqrt{6}nE_b \sin\left(\theta_c - \theta_d - \frac{\pi}{2}\right) \right) - I_1 \\
 i_c(\theta) &= 0
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

สมการ 2.18, 2.19 และ 2.20 ที่สมบูรณ์จะอธิบายกระแสเฟสในช่วง 60 องศา ภายใต้การพิจารณาฟังก์ชัน (Function) ของปัจจัยระบบ และมุมการสับเปลี่ยน θ_c สามารถหาได้จากสมการ 2.21

$$\frac{\pi V_{dc}}{3nE_b} + \sqrt{2} \sin\left(\theta_d - \frac{\pi}{3}\right) + \frac{V_{dc}}{3nE_b} \theta_c - \sqrt{2} \sin(\theta_c - \theta_d) = 0 \tag{2.21}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ 2.21 คือสมการที่แน่นอนของ θ_c และปัจจัยของระบบ เพราะฉะนั้นสมการของกระแสเฟส ไม่สามารถหาได้จากฟังก์ชันของปัจจัยระบบที่แน่นอน การประมาณสมการ 2.21 ที่สามารถหาได้, แต่มันจะมีค่าความผิดพลาดในผลลัพธ์ ทางเลือกต่อไป คือจะทำการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์ของสมการ 2.21 เพื่อที่จะหา θ_c และเพื่อที่จะใช้ค่าของ θ_c ในสมการ 2.18, 2.19 และ 2.20 ดังนั้น กระแสเฟสในสมการจะเป็นฟังก์ชันของปัจจัยระบบ

2.15 ขอบเขตของ CPOR ของ PMSM การที่ถูกขับโดย DMIC

ความแตกต่างระหว่าง VCFW และ DMIC จากจุดที่เราสงสัยของมอเตอร์ที่ชี้ให้เห็นและได้ทำการวิเคราะห์ ข้อดีที่เหนือของ DMIC ต่อ VCFW หลังจากมอเตอร์ได้มีการขยายพิกัดกำลังไฟฟ้าที่ความเร็วสูง อย่างไรก็ตาม คำถามที่เกี่ยวกับขอบเขตของความเร็วซึ่ง DMIC สามารถขับ PMSM ในการขยายพิกัดกำลังไฟฟ้ายังคงไม่ทราบคำตอบ ในส่วนนี้ว่าไม่มีทฤษฎีของขอบเขต CPOR เมื่อ PMSM ถูกขับเคลื่อนโดย DMIC

จากที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ สำหรับมอเตอร์ในการขยายพิกัดแรงบิดที่ n เท่าของความเร็วมูลฐาน กระแส I_{qn} ที่ความเร็วนี้จะต้องควบคุมไปตามสมการ 2.22

$$I_{qn} = \frac{\omega_{rb} I_{\max}}{\omega_r} = \frac{I_{\max}}{n} \quad (2.22)$$

เพื่อที่จะรักษาผลรวมของกระแสให้เท่ากับขอบเขตกระแส I_{\max} , I_{dn} ที่ต้องการทำการควบคุมไปตามสมการ 2.23

$$I_{dn} = \sqrt{I_{\max}^2 - \left(\frac{I_{\max}}{n}\right)^2} = \frac{I_{\max}}{n} \sqrt{n^2 - 1} \quad (2.23)$$

รัศมีของวงกลมขอบเขตจำกัดแรงดัน (Voltage limit circle) ที่ n เท่าของความเร็วมูลฐาน ซึ่งหาได้จาก

$$V_{r_n} = \frac{V_{a_n}}{n\omega_b L} \quad (2.24)$$

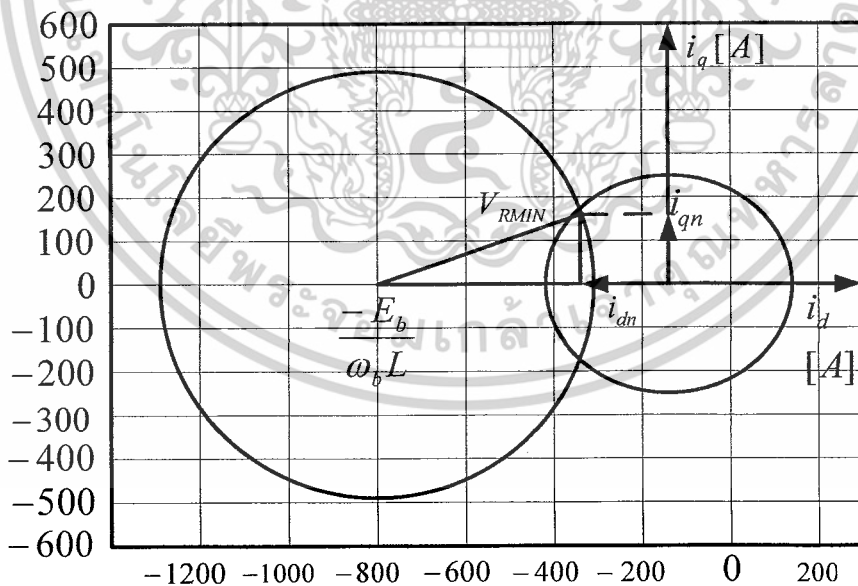
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ V_{an} คือ ขนาดของแรงดันอาร์มาเจอร์ของเครื่องทั้งแรงดันและกระแส และ เพื่อที่จะขยายพิกัดแรงดัน สมการ 2.18 จะทำให้เข้าใจง่าย คือ

$$V_{r_n} \geq \sqrt{\left(\frac{E_b}{\omega_b L} - |I_{dn}|\right)^2 - I_{qn}^2} \quad (2.25)$$

การสร้างเงื่อนไขของการสร้างโดยสมการ 2.18 ซึ่งสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนกว่าจากภาพที่ 2.23 ซึ่งค่าต่ำสุดของรัศมีของวงกลมขอบเขตจำกัดแรงดัน ซึ่งคือ V_{an} คือด้านที่อยู่ตรงข้ามมุมฉากของสามเหลี่ยมมุมฉากซึ่งมีรูปแบบโดย I_{qn} , $E_b/\omega_b L - |I_{dn}|$ และ V_{rn} สังเกตในเทอมของ $E_b/\omega_b L$ คือระยะทางจากศูนย์กลางของวงกลมขอบเขตจำกัดแรงดันไปจุดกำเนิด การแสดงค่าต่ำสุดของรัศมีของวงกลมขอบเขตจำกัดแรงดัน ซึ่งคือ V_{rn} ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเร็ว โดยสามารถหาได้จากสมการ 2.23, 2.24, 2.25 และ 2.26 จะแสดงค่าในส่วนนี้

$$V_{r_n}(n) = \sqrt{\left(\frac{E_b}{\omega_b L} - \frac{I_{\max}}{n} \sqrt{n^2 - 1}\right)^2 + \left(\frac{I_{\max}}{n}\right)^2} \quad (2.26)$$

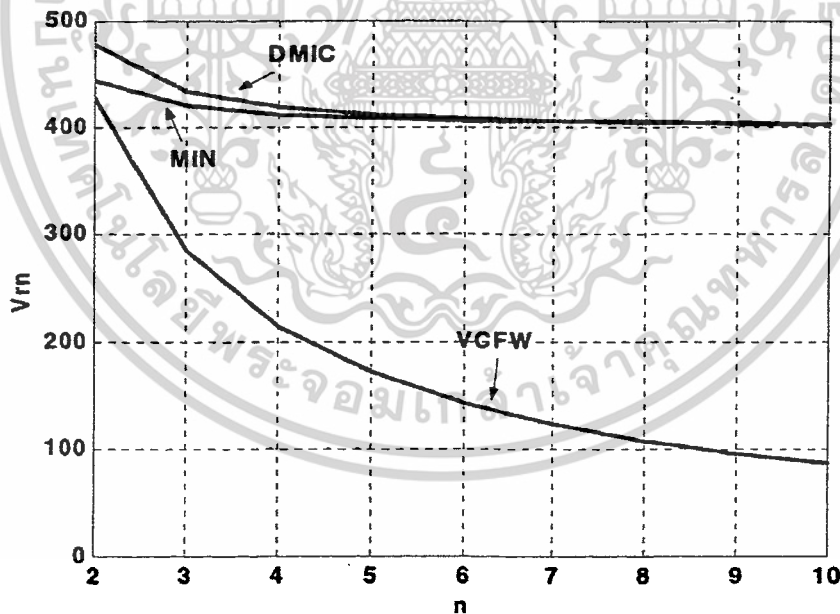


ภาพที่ 2.23 รัศมีต่ำสุดของวงกลมขอบเขตจำกัดแรงดันสำหรับPMSM เพื่อขยายพิกัดกำลังไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ค่าต่ำสุดของรัศมีของวงกลมขอบเขตจำกัดแรงดัน ณ ความเร็วที่แน่นอนสามารถคำนวณโดยใช้สมการ 2.26 ภาพที่ 2.24 ได้ทำการพล็อตเพื่อที่จะเปรียบเทียบรัศมีของแรงดันที่ได้จาก DMIC, จากภาพแสดงถึง DMIC ที่มีรัศมีทางแรงดันที่เกินหรือเท่ากับค่าต่ำสุดที่ต้องการ ในความเป็นจริงสำหรับความเร็วภายใต้ 5 เท่าของความเร็วมูลฐาน รัศมีจะใหญ่กว่าความต้องการต่ำสุด ซึ่งหมายความว่า ที่สูงกว่า 5 เท่าของความเร็วมูลฐาน เครื่องจักรสามารถขยายพิกัดกำลังไฟฟ้าให้มากกว่าเดิม โดยไม่มีการเพิ่มขึ้นขอบเขตกระแส ในทางตรงกันข้ามรัศมีที่ได้จาก VCFW จะต่ำกว่าความต้องการต่ำสุดสำหรับทุก ๆ ความเร็วที่สูงกว่า 2 เท่าของความเร็วมูลฐาน นี่เป็นสิ่งที่เกี่ยวข้องกับสถานะในวิธี VCFW พิกัดกำลังไฟฟ้าสามารถขยายได้ถึงแค่ 1.23 เท่าของความเร็วมูลฐาน จากภาพที่ 2.24 นี้ สามารถเห็นรัศมีต่ำสุดที่ต้องการและรัศมีที่ได้จาก DMIC ซึ่งเป็นการนำไปสู่ผลสรุปว่าทฤษฎีขอบเขตของ CPOR สำหรับ DMIC ในการขับ PMSM นั้นมีค่าไม่สิ้นสุด

การที่จะวิเคราะห์เพื่อแสดงขอบเขตของ CPOR สำหรับ PMSM ที่ถูกขับโดย DMIC นั้นมีค่าไม่สิ้นสุด ฟังก์ชันที่จะประมาณขอบเขตของรัศมีแรงดันของ DMIC, V_{R-DMIC}



ภาพที่ 2.24 แสดงรัศมีแรงดันที่จัดเตรียมโดย DMIC, VCFW และรัศมีที่มีค่าน้อยที่สุด

จะเป็นฟังก์ชันสำหรับอัตราส่วนของความเร็ว (n) ซึ่งสามารถใช้ข้อมูลได้จาก ตาราง เป็น เพราะค่า V_{R-DMIC} จะเหมือนกันกับค่าต่ำสุดของความถี่ของรังสีที่ได้จากสมการ 2.26 ฟังก์ชันซึ่งสามารถหาได้ สำหรับ V_{R-DMIC} นั้นจะเหมือนกัน ยกเว้นที่ค่าคงที่ การแสดง V_{R-DMIC} ที่เป็นฟังก์ชันและอัตราส่วนความเร็วจะสามารถหาได้จาก

$$V_{r-DMIC_n}(n) = \sqrt{\left(\frac{E_b}{\omega_b L} - I_{\max} \sqrt{\frac{n^2-1}{n^2}}\right)^2 + \left(\frac{2I_{\max}}{n}\right)^2} \quad (2.27)$$

การเปรียบเทียบของค่า V_{R-DMIC} จริงด้วยฟังก์ชันที่เหมาะสม ค่าของมันจะทำให้ การพล็อตและคำนวณ ค่าผิดพลาดสูงสุด ภาพที่ 2.25 แสดงการพล็อตของฟังก์ชันต่อค่า V_{R-DMIC} จริง จากรูปแสดงถึงฟังก์ชันและจุดที่เกิดจริง (Actual point) คือ 1.10 เปอร์เซ็นต์

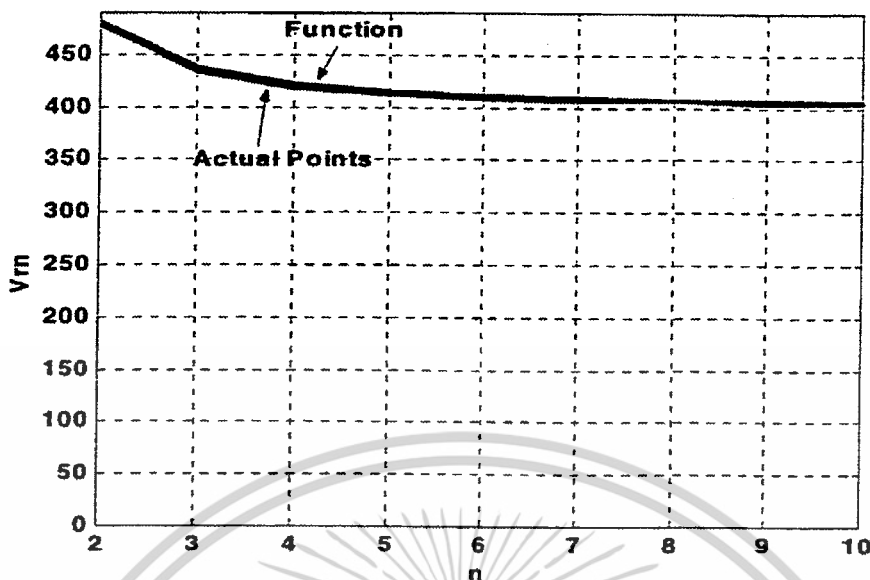
ขณะนี้ จะทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีแรงดันต่ำสุดและขอบเขตของ รังสีแรงดันที่ได้จาก DMIC ขอบเขตของสมการ 2.26 และ 2.27 สามารถหาได้ สมการ 2.28 ได้ ค่าขอบเขตของ V_{rn} (n) ที่ความเร็วที่ไม่มีสิ้นสุด

$$\lim_{n \rightarrow \infty} V_{r_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\left(\frac{E_b}{\omega_b L} - I_{\max} \sqrt{\frac{n^2-1}{n^2}}\right)^2 + \left(\frac{2I_{\max}}{n}\right)^2} = \frac{E_b}{\omega_b L} - I_{\max} \quad (2.28)$$

ค่าขอบเขตของ V_{R-DMIC} ที่ความเร็วที่ไม่มีสิ้นสุดจะหาได้จาก

$$\lim_{n \rightarrow \infty} V_{r-DMIC_n}(n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\left(\frac{E_b}{\omega_b L} - I_{\max} \sqrt{\frac{n^2-1}{n^2}}\right)^2 + \left(\frac{2I_{\max}}{n}\right)^2} = \frac{E_b}{\omega_b L} - I_{\max} \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.25 แสดงฟังก์ชันที่มีอยู่และเหมาะสมของรัศมีขอบเขตจำกัดแรงดันที่จัดเตรียม โดย DMIC

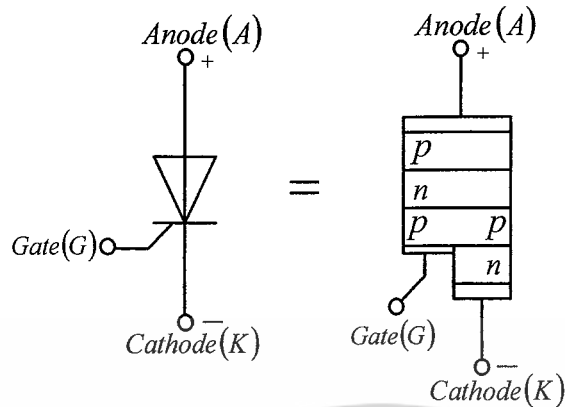
สมการ 2.28 และ 2.29 จะแสดงทั้ง $V_{R-DMI}(n)$ และ $V_m(n)$ ที่มีค่าเหมือนกันที่ความเร็วของโรเตอร์มีค่าไม่มีที่สิ้นสุด ดังนี้ คือ $E_b/W_bL - I_{max}$ ดังนั้นที่เป็นการยืนยันสิ่งที่เกี่ยวข้องกับสถานะก่อนในส่วนนี้ ซึ่งเป็นทฤษฎีของการไม่มีขอบเขตของ CPOR เมื่อ PMSM ถูกขับโดย DMIC ที่เป็นสิ่งสำคัญเพื่อที่จะเน้นความสัมพันธ์ของผลลัพธ์ที่ได้จากสมการ 2.28 และ 2.29 นั่นคือ ทฤษฎีของ PMSM ที่สามารถขับได้ที่ทุกๆ ความเร็วและยังคงขยายพิกัดกำลังไฟฟ้า นี่ทำให้เป็นไปได้ที่ใช้แบบนี้ของมอเตอร์สำหรับประยุกต์ใช้การทำงานที่ต้องการความเร็วสูงยกตัวอย่างเช่น รถไฟฟ้า

2.16 เอสซีอาร์ (Silicon control rectifier, SCR)

เอสซีอาร์เป็นอุปกรณ์สวิตช์ ที่สามารถเปิดสวิตช์เพื่อทำให้มีกระแสไหลในวงจรและปิดสวิตช์เพื่อทำให้ไม่มีกระแสไหลผ่าน เอสซีอาร์ไม่มีส่วนที่มีการเคลื่อนไหว เนื่องจากสร้างจากสารกึ่งตัวนำ เอสซีอาร์ อยู่ในตระกูลของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Device)

2.16.1 โครงสร้างของเอสซีอาร์

เอสซีอาร์มีสามขา ประกอบไปด้วยขาแอโนด (Anode), แคโทด (Cathod) และเกต (Gate) จะมี 3 จุดเชื่อมต่อต่อ 4 ชั้นดังภาพที่ 2.26 เอสซีอาร์สามารถอธิบายในรูปแบบที่เข้าใจง่าย ๆ ได้ สองแบบ คือ เอสซีอาร์คล้ายไดโอดสามตัวต่อกันแบบอนุกรม เมื่อไม่มีเกตจะไม่มีการเกิดขึ้น แม้ว่าขั้วของเอสซีอาร์จะเป็นอย่างไรก็ตามจะต้องมีอย่างน้อยหนึ่งจุดเชื่อมต่อที่เอกสทริกต์กร ไบอัสย้อนกลับ เพื่อต่อต้านการนำไฟฟ้า ถ้าแคโทดถูกทำให้มีศักย์ลบและเกต ถูกไบอัสการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.26 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของเอสซีอาร์

ให้เป็นบวก เมื่อเทียบกับแคโทดแล้วชั้นพี จะเต็มไปด้วยอิเล็กตรอน (Electron) จากแคโทด ทำให้สูญเสียสภาพการเป็นชั้นพีไป เอสซีอาร์จะกลายเป็นไดโอดธรรมดา ส่วนรูปแบบที่สองคือ เอสซีอาร์คล้ายกับทรานซิสเตอร์ (Transistor) สองตัวต่อกันในการที่จะทำให้เอสซีอาร์เปิด จะต้องให้กระแสเกตที่ทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็น ทำให้ขาคอลเลคเตอร์ของทรานซิสเตอร์พีเอ็นพีมีศักย์เป็นบวก เมื่อเทียบกับไบอัสของตัวเองทำให้ทรานซิสเตอร์พีเอ็นพีเปิด และเมื่อทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นได้กระแสที่ไบอัส ทำทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นเปิด และ ทรานซิสเตอร์ทั้งสองจะยังคงเปิดอยู่ จนกระทั่งไม่มีกระแสแอโนดเข้ามาจึงจะปิด

2.16.2 การจุดชนวนเอสซีอาร์

วิธีการใดๆที่ทำให้กระแสอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นมีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลทำให้ เอสซีอาร์เปิดกระแสได้ วิธีการเหล่านี้คือ

2.16.2.1 ใช้แรงดันค่าบวกป้อนเข้าที่ขาเกต

การป้อนแรงดันค่าบวกป้อนเข้าที่ขาเกตของเอสซีอาร์ จะมีกระแสพุ่งเข้าขาเบสของทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นเป็นผลให้มีกระแสเกตเพิ่มค่าสูงขึ้น และเกิดมีกระบวนการป้อนกลับค่าบวก เอสซีอาร์ก็จะเปิดนำกระแสได้ วิธีการนี้เป็นวิธีที่เรานิยมใช้จุดชนวนให้เอสซีอาร์เปิดนำกระแสต่างๆไป

2.16.2.2 ใช้แสงช่วยจุดชนวน

เอสซีอาร์แบบที่ใช้แสงจุดชนวนนี้เป็นแบบที่เรียกว่า (Light Activated SCR, LASCR) สร้างขึ้นโดยให้มีช่องโปร่งแสง เพื่อให้แสงลอดไปถึงสารพีที่เป็นขั้วเบสของทรานซิสเตอร์เอ็นพีเอ็นด้วยคุณสมบัติรอยต่อพีเอ็น ที่สามารถเกิดคู่ของอิเล็กตรอนและโฮล (Hold) ขึ้นได้ เมื่อมีรังสีพลังงานตกกระทบบนคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลเกิดขึ้นจำนวนมาก ก็จะเกิดกระบวนการป้อนกลับค่าบวกและเปิดให้ทรานซิสเตอร์ นำกระแส

2.16.2.3 ใช้แรงดันพังข้ามให้เอสซีอาร์เปิดกระแส

สามารถทำได้โดยการป้อนแรงดันสูงเข้าระหว่างขั้วแอโนดกับขั้วแคโทดของเอสซีอาร์ ในทิศไปข้างหน้า จะทำให้ชั้นปลดลอคโลหะที่รอยต่อที่ 2 กว้างออก และแรงดันจะไปทำให้พาหะข้างน้อยมีอัตราเร่งสูงขึ้น ริงข้ามรอยต่อที่ 2 เข้าชนกับอะตอมของสารกึ่งตัวนำ เป็นผลให้พาหะข้างน้อยหลุดเพิ่มออกมา เมื่อแรงดันแอโนดถึงค่าแรงดันพังข้าม (Break-over Threshold Voltage, bov) ก็จะทำให้รอยต่อที่ 2 เกิดพัง ทำให้รอยต่อที่ 2 ถูก ไบอัสไปข้างหน้า ทำให้กระแสแอโนดไหลผ่านเอสซีอาร์ได้มากมาย และเอสซีอาร์จึงเข้าอยู่ในสภาวะเปิดกระแส

2.16.2.4 ใช้การเปลี่ยนแปลงแรงดันต่อเวลาในอัตราสูงเข้าจุดชนวน

เมื่อแรงดันที่ต่อระหว่างแอโนดกับแคโทดของเอสซีอาร์ในทิศไปข้างหน้า เปลี่ยนแปลงค่าด้วยอัตราเร่งสูง จะทำให้เกิดกระแสเกตซ์ชั่วคราว ซึ่งกระแสนี้เกิดขึ้นจากค่าความจุของตัวเก็บประจุระหว่างแอโนดกับเกต และระหว่างเกตกับแคโทดด้วยค่าตามสมการ (2.23) กระแสเกตซ์นี้จะไปทำให้เกิดกระบวนการป้อนกลับค่าบวกขึ้น และเอสซีอาร์ก็เข้าอยู่ในสภาวะเปิดกระแส

$$I = c \frac{dv}{dt} \quad (2.30)$$

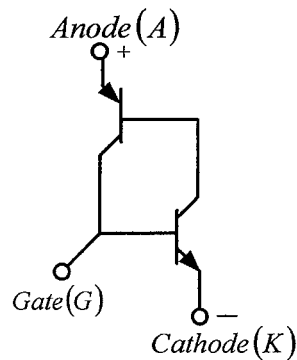
2.16.2.5 ใช้อุณหภูมิสูงเข้าจุดชนวน

ที่อุณหภูมิสูงรอยต่อที่ 2 ซึ่งตามปกติถูกไบแอสกลับ จะมีพาหะข้างน้อยทำให้กลายเป็นกระแสรั่ว มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าทุก ๆ ครั้ง que อุณหภูมิสูงขึ้น 80 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงมากพอก็จะมีพาหะข้างน้อยจำนวนมาก จนทำให้เกิดกระแสที่มีขนาดสูงพอที่จะไปทำให้เกิดกระบวนการป้อนกลับค่าบวก และทำให้ไทรสเตอร์สามารถเข้าสู่สภาวะเปิดกระแสได้

2.16.3 หลักการทำงานของเอสซีอาร์

โดยส่วนใหญ่จะนำมาใช้ในวงจรสวิตช์หรืองานควบคุมกำลังไฟกระแสสลับ ในสภาวะหยุดทำงานเอสซีอาร์จะไม่มีกระแสไหล และเมื่ออยู่ในสภาวะทำงานเอสซีอาร์จะมีความต้านทานต่ำ ทำให้มีกระแส ไฟฟ้าไหลผ่านได้มาก จากข้อดีอันนี้เอสซีอาร์จึงมีการสูญเสียกำลังน้อยมากในการนำไปใช้งานควบคุมแหล่งจ่ายกำลังไฟ เมื่อทำให้เอสซีอาร์อยู่ในสภาวะนำไฟฟ้า เอสซีอาร์จะนำไฟฟ้าอยู่จนกระทั่งกระแสที่ไหลผ่านตัวมันต่ำกว่ากระแสโฮลดิ้ง การนำเอสซีอาร์ไปใช้งานกับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง จะต้องรีเซ็ตทุกครั้งเมื่อต้องการให้เอสซีอาร์หยุดนำกระแส โดยการทำให้ศักย์ไฟฟ้าขั้วแอโนดและแคโทดมีค่าเท่ากัน หรือตัดแหล่งจ่ายไฟออกไป สำหรับการใช้งานกับแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ เอสซีอาร์จะรีเซ็ต (Reset) ตัวมันเองโดยอัตโนมัติ ถ้าจะให้เอสซีอาร์นำไฟฟ้าทุก ๆ ไชเกิลก็จะต้องมีการทริกเกตทุก ๆ ไชเกิล สัญลักษณ์และรูปแบบตัวถังของเอสซีอาร์จะเป็นดังรูปที่ 2.27 การจะทำให้เอสซีอาร์นำไฟฟ้าได้นั้น จะต้องทริกเกตอย่างถูกต้อง โดยศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจะต้องเป็นบวกมากกว่าเมื่อเทียบกับขาแคโทด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.27 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของเอสซีอาร์

เอสซีอาร์เป็นอุปกรณ์ในกลุ่มไทรสเตอร์ ที่สามารถประยุกต์ใช้งานได้กว้างขวางมาก ปกติมักจะใช้เอสซีอาร์ เป็นสวิตช์ปิด-เปิดกำลังไฟฟ้าเพื่อจ่ายไปยังโหลด วงจรที่ใช้จึงต้องมีส่วนประกอบของวงจรอย่างน้อย 3 ส่วน คือ แหล่งจ่ายไฟ วงจรจุดชนวนและโหลด

วงจรจุดชนวนจะเป็นเรื่องที่ยุ่งยากมากที่สุด เพราะในบางครั้งเราอาจต้องการจังหวะของการจุดชนวนที่เหมาะสม หรืออาจจะต้องมีการจุดชนวนในทุกรอบของการเปลี่ยนแปลงแรงดัน และเวลาของการจุดชนวนที่สามารถควบคุมได้อีกด้วย

ในการใช้งานเอสซีอาร์ ในวงจร ต้องรู้ถึงความสัมพันธ์และขีดจำกัดต่างๆของแหล่งจ่ายไฟ โหลดและวงจรจุดชนวน และต่อคำนึงถึงขีดจำกัดในการใช้งานของเอสซีอาร์เป็นหลัก เพื่อให้สามารถทำงานได้โดยปลอดภัย

บทที่ 3

การออกแบบและสร้าง

3.1 การออกแบบและสร้างชุดทดลอง

3.2.1 วงจรทรiggerเกอร์ (Trigger circuit) สัญญาณ

วงจรทรiggerเกอร์มีความสำคัญมากเพราะจะควบคุมการทำงานของเอสซีอาร์ทุกตัวในวงจรทางด้าน ชุดกำลังเป็นไปตามลำดับขั้นตอนที่การทำงานของมันจะผิดพลาดไม่ได้ เพราะถ้าเกิดการผิดพลาดแล้ว นอกจากวงจรหลักจะไม่ได้เอาที่พูดเป็นไปตามต้องการแล้ว ยังอาจเกิดการลัดวงจรอย่างรุนแรงขึ้น ทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ต่างๆ โดยเฉพาะเอสซีอาร์, ไอซี, และไดโอด ดังนั้นวงจรทรiggerเกอร์จะต้องมีการทำงานที่แน่นอน เชื่อถือได้สูง วงจรทรiggerเกอร์ควบคุมการทำงานของเอสซีอาร์ได้ โดยการป้อนสัญญาณกระตุ้น ที่มีลักษณะเป็นพัลส์ (Pulse) เข้าที่ขาเกตของเอสซีอาร์ ตัวที่ต้องการให้นำกระแส ซึ่งวงจรสามารถควบคุมให้เอสซีอาร์เปิดกระแสแปรค่าจากมุม 0 องศา (คือเปิดให้นำกระแสเต็มคลื่นเต็ม 100 เปอร์เซ็นต์) ถึงมุม 180 องศา (คือปิดการนำกระแสเต็มคลื่น) เราจึงขอแนะนำให้ใช้ในการควบคุมกระแสที่เรียกว่า วิธีควบคุมเฟส (Phase control)

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบวงจรจุดชนวน คือ

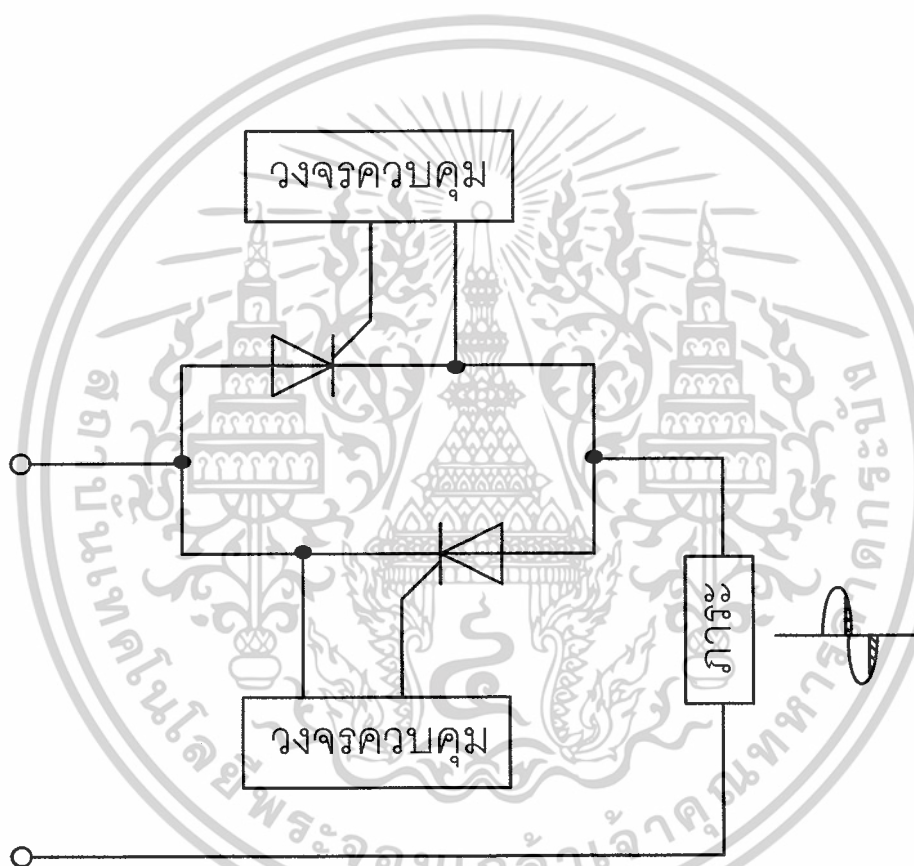
1. ต้องสามารถจุดชนวนได้ แม้ว่าจะเปลี่ยนเอสซีอาร์เป็นตัวอื่น แต่ยังเป็นเบอร์เดียวกันอยู่
2. ต้องมีแรงดันและกำลังไม่สูงเกินกว่าจะทนทานได้
3. ต้องแน่ใจได้ว่าการจุดชนวนจะต้องไม่เกิดจากสัญญาณรบกวนอื่นๆ

สำหรับชุดทดลองนี้จะใช้ การควบคุมการนำกระแสได้ด้วยวิธีควบคุมเฟส ซึ่งเป็นวิธีการทำให้มีการเรียงกระแสในช่วงมุมต่างๆ ของวัฏจักรกำลัง (Power cycle) หรือเป็นกระบวนการที่ทำให้ปิดเปิดไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายไปสู่ภาระ ด้วยกระแสที่แปรค่าตามแต่จะต้องการ โดยบังคับให้มีการนำกระแสเพียงแค่ส่วนหนึ่งของวัฏจักร วิธีการนี้เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสูง ในการควบคุมกำลังเฉลี่ยป้อนเข้าสู่ภาระ เช่น หลอดไฟฟ้า ขดลวดความร้อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ ไฟฟ้ากระแสสลับ ฯลฯ การควบคุมจะทำได้ด้วยการควบคุมมุมเฟสของคลื่น

กระแสสลับที่เอสซีอาร์เปิดกระแสให้ไหลผ่านในช่วงที่เหลืออยู่ของ วัฏจักร และ อาจปิดกระแส
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

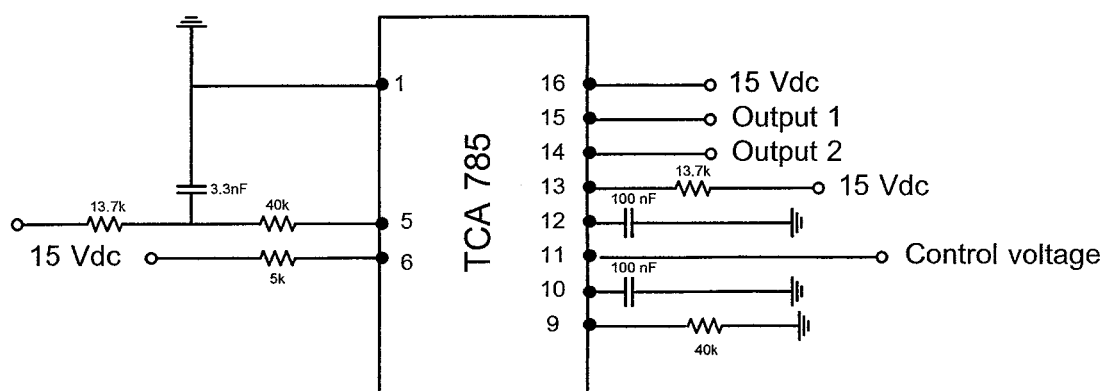
เมื่อเครื่องจักรกลับได้มาถึงซึ่งเป็นวิธีการหยุดไหลตามธรรมชาติที่เรียกว่า “การทำให้กระแสหยุดไหลด้วยเฟส” หรือ “การทำให้กระแสหยุดไหลด้วยแรงดันของสายไฟฟ้า”การทำให้กระแสหยุดไหลด้วยแรงดันของกระแสไฟฟ้า”

สำหรับวิธีการควบคุมเฟสมีวิธีการเบื้องต้นหลายรูปแบบ แต่การทดลองนี้จะเลือกใช้การควบคุมในช่วงเต็มคลื่น (Controlled full wave) โดยใช้เอสซีอาร์ ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ และมีภาระเป็นตัวต้านทานซึ่งวิธีการนี้เป็นการควบคุมเอสซีอาร์สลับการทำงานในแต่ละไซเคิล โดยเอสซีอาร์จะต่อกันแบบขนานกันแต่กลับขั้วกัน

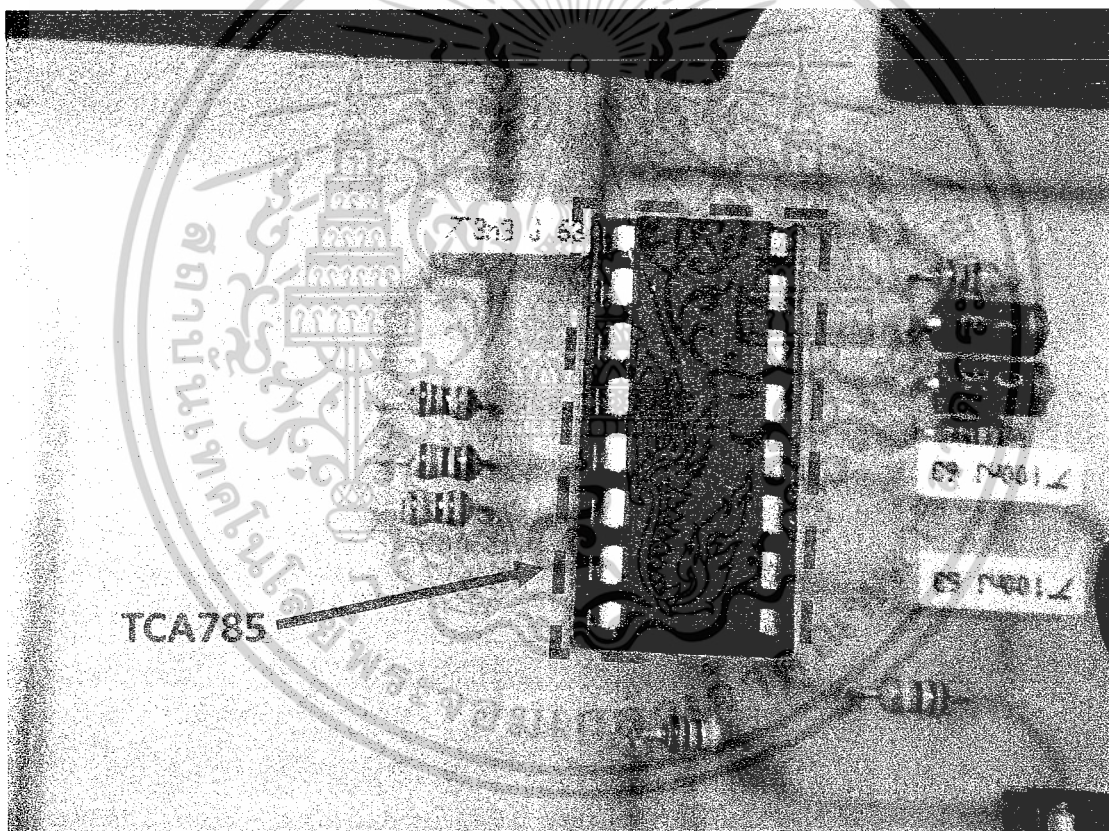


ภาพที่ 3.1 แสดงวงจรเบื้องต้นของการควบคุมเฟสเอชไอแบบเต็มคลื่นโดยใช้เอสซีอาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

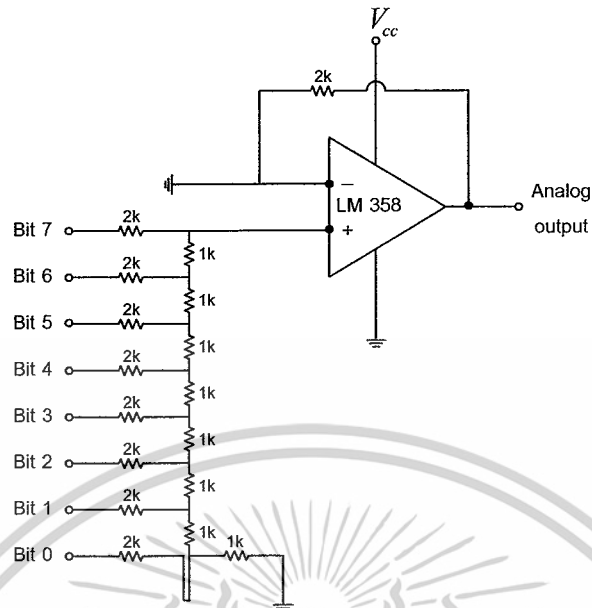


ภาพที่ 3.2 วงจรควบคุมของ TCA 785

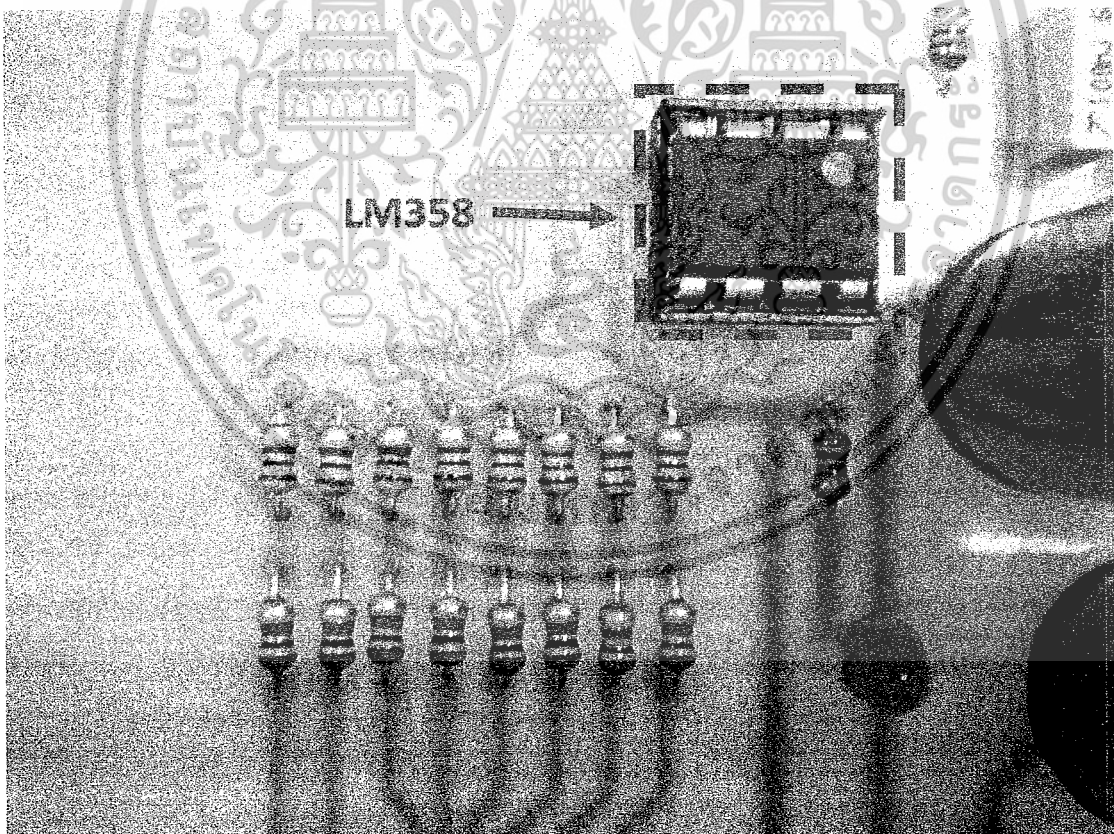


ภาพที่ 3.3 วงจรควบคุมของ TCA 785 ของจริง

ภาพที่ 3.2 เป็นโครงสร้างของวงจร TCA785 ว่าขาใดมีหน้าที่ทำอะไรบ้าง ส่วนภาพที่ 3.3 ภาพภาพจริงของ TCA785 ที่นำไปใช้กับวงจร โดยวงจรควบคุม TCA785 ใช้ในงานควบคุมเฟส ใช้ได้กับระบบไฟฟ้า 1 เฟส และ 3 เฟส สามารถปรับมุมจุดชนวนเกตได้ตั้งแต่ 0 - 180 องศา และสามารถสร้างลักษณะพัลส์ได้หลายรูปแบบ ตามลักษณะของโหลด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.4 วงจรควบคุมของ R2R (Digital to Analog)



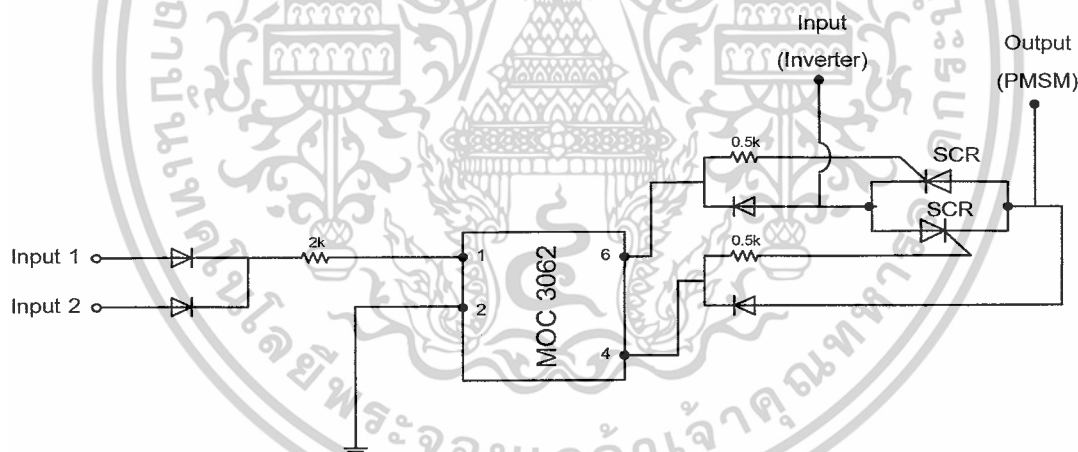
ภาพที่ 3.5 วงจรควบคุมของ R2R ของจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 3.4 เป็นวงจรควบคุมของ R2R ส่วนภาพที่ 3.5 เป็นวงจรจริงของ R2R ที่ได้สร้างขึ้นมา ซึ่งวงจร R2R จะแปลงดิจิตอลเป็นแอนาลอก และจำเป็นต้องใช้แรงดันที่มีค่าตั้งแต่ 0 - 5 โวลต์ โดยค่าของแรงดันเอาต์พุตนี้ขึ้นอยู่กับข้อมูลดิจิตอลที่เข้ามาทางอินพุตทั้ง 8 บิต ในวงจรจะมีไอซีออปแอมป์ เบอร์ LM358 ทำหน้าที่เป็นตัวตรวจกระแสและแสดงผล

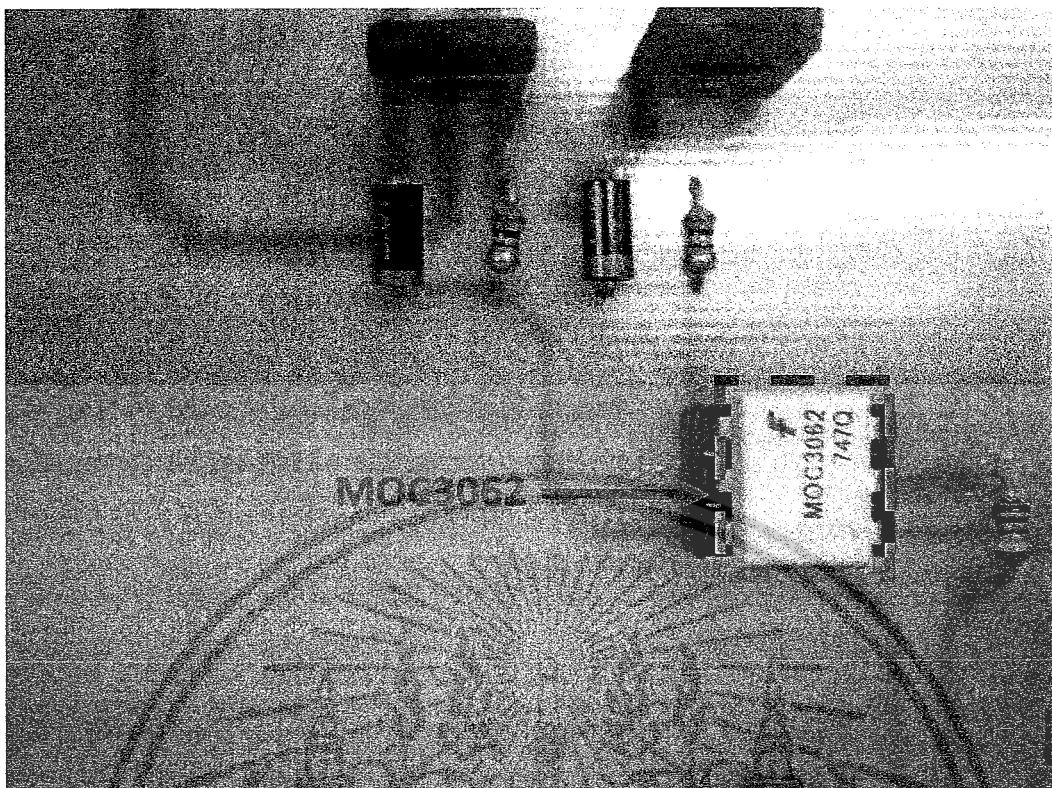
3.2.2 การควบคุมแรงดันกระแสสลับเฟสเดียว

เนื่องจากในชุดของวงจรควบคุมเป็นในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กระแสไฟน้อย แต่เราจะนำไปควบคุมอุปกรณ์ด้านกำลัง ซึ่งใช้กระแสที่สูงดังนั้นจึงจำเป็นต้องแยกอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ออกจากอุปกรณ์ด้านกำลัง เพื่อป้องกันอุปกรณ์ด้านอิเล็กทรอนิกส์ไม่ให้เกิดความเสียหายเนื่องจากกระแสที่สูงจากด้านกำลัง สำหรับอุปกรณ์ที่จะใช้แยกอุปกรณ์ด้านอิเล็กทรอนิกส์ออกจากอุปกรณ์ด้านกำลัง จะใช้ออปโตคัปเปอเรอร์ (Opto-coupler) เบอร์ MOC3062 ซึ่งเป็นตัวเชื่อมการทำงานของวงจรทั้งสอง เมื่อเกิดการลัดวงจรหรือกระแสเกินด้านกำลัง ด้านอิเล็กทรอนิกส์จะไม่ได้รับผลกระทบจนถึงกับเสียหายได้ สำหรับวงจรควบคุมไฟ 1 เฟส จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.9



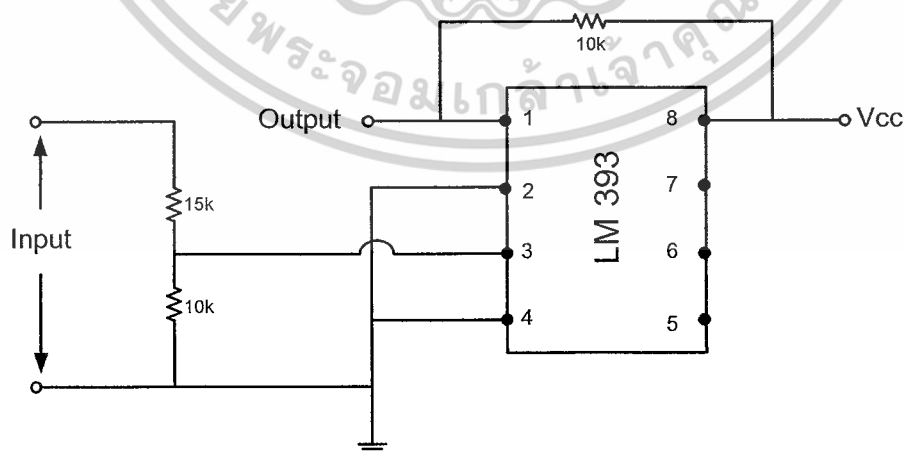
ภาพที่ 3.6 วงจรควบคุมของ MOC 3062

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



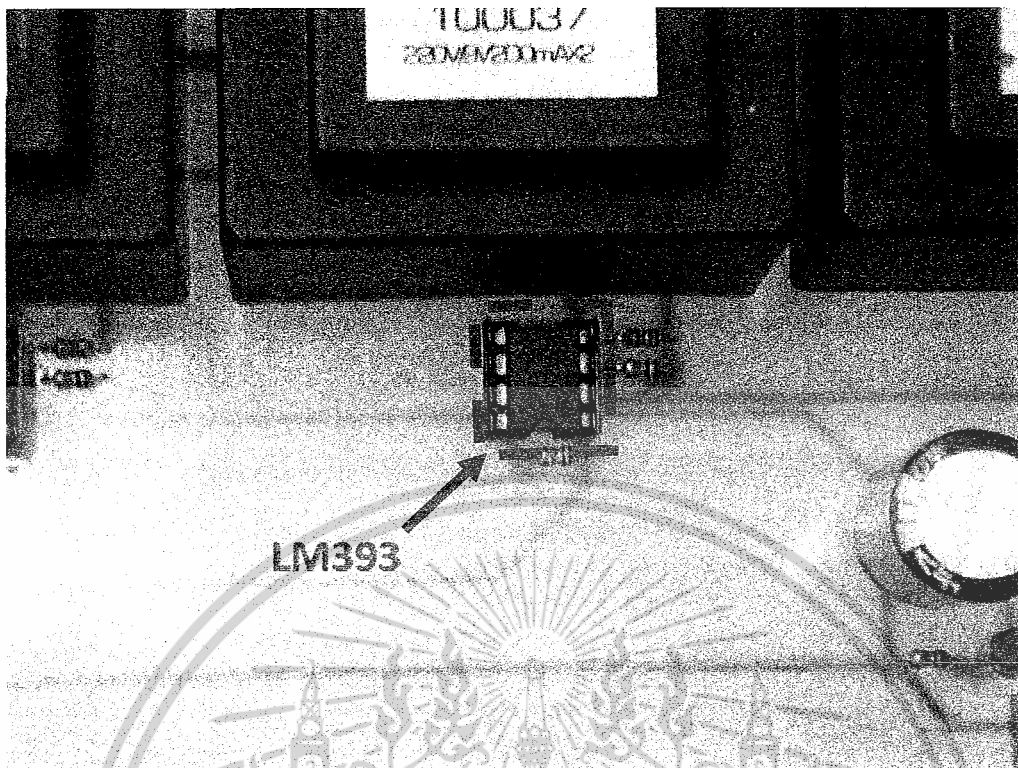
ภาพที่ 3.7 วงจรควบคุมของ MOC 3062 ของจริง

ภาพที่ 3.6 เป็นวงจรควบคุมของ MOC3062 และภาพที่ 3.7 เป็นวงจรที่สร้างขึ้นจริงของ MOC3062 ซึ่ง MOC3062 ก็คือ ออปโตคัปเปอเรอร์ โดยออปโตคัปเปอเรอร์ มีหน้าที่ใช้สำหรับการเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างสองวงจรที่ต้องการแยกทางไฟฟ้าอย่างเด็ดขาดเพื่อป้องกันการรบกวนกันทางไฟฟ้า



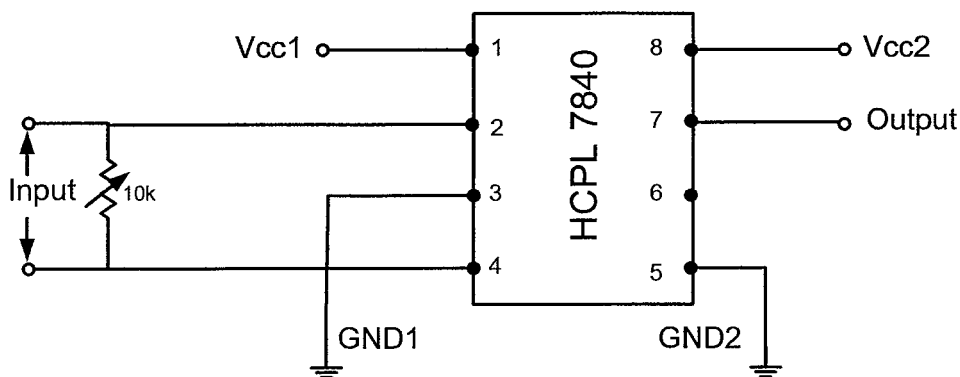
ภาพที่ 3.8 วงจร ซีโรครอสซิง (Zero-crossing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

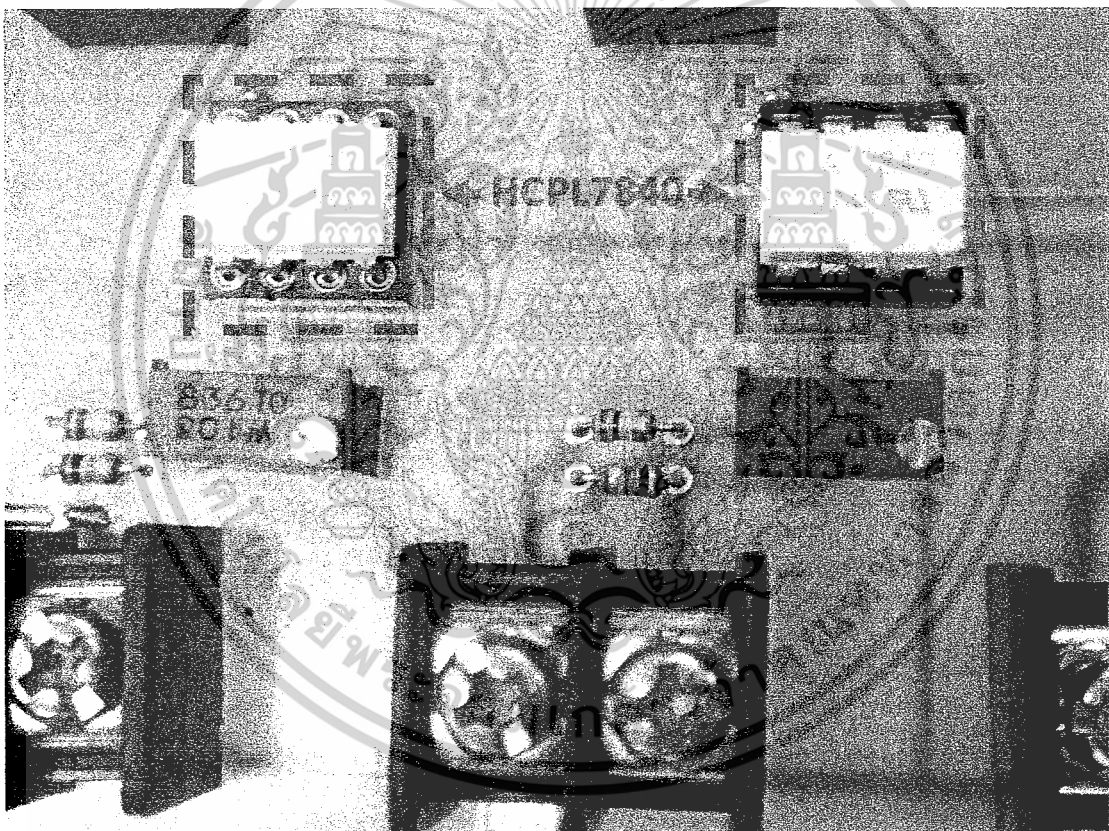


ภาพที่ 3.9 วงจร ซีโรครอสซิง (Zero-crossing) ของจริง

ภาพที่ 3.8 เป็นภาพวงจรของซีโรครอสซิง ซึ่งวงจรจริงจะแสดงได้ดังภาพที่ 3.9 โดยวงจรของซีโรครอสซิงทำหน้าที่ตรวจจับแรงดันตัดผ่านศูนย์ตามชื่อของมัน ใช้ในงานเฟส (phase control) เพื่อควบคุม SCR หรือ TRIAC ให้เริ่มนำกระแสที่มุมศูนย์องศาทางเฟสมีประโยชน์คือ เป็น Soft Start และลดสัญญาณรบกวน ส่วน LM393 เป็น dual voltage comparator ซึ่งเป็นออปแอมป์ชนิดหนึ่ง ข้อดีของมันคือมี gain (อัตราขยาย) ที่สูงกว่า ออปแอมป์ปกติ เพราะว่ามันไม่ถูก compensated ทว่าอย่างไรก็ดี ที่ความถี่ของสัญญาณหนึ่ง มันจะเกิดการออสซิลเลต



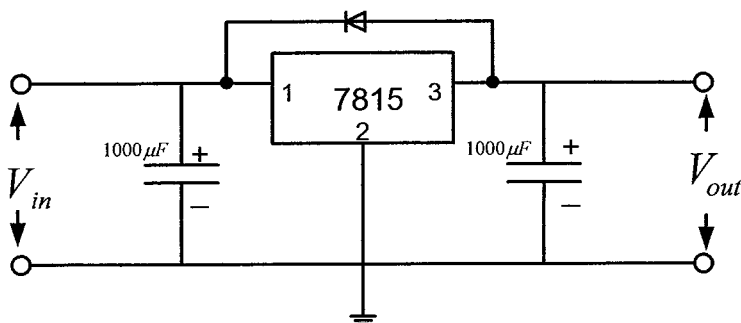
ภาพที่ 3.10 วงจรเซ็นเซอร์แรงดัน (Voltage sensor)



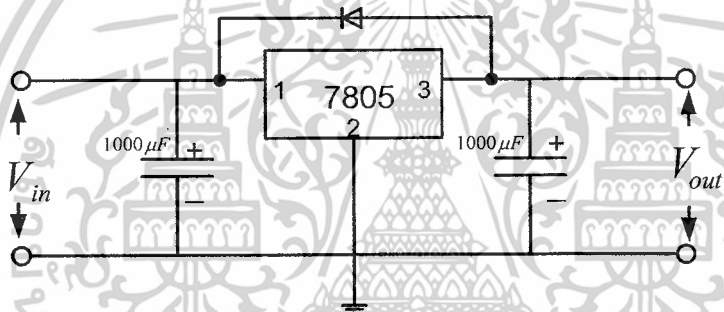
ภาพที่ 3.11 วงจรเซ็นเซอร์แรงดัน (Voltage sensor) ของจริง

ภาพที่ 3.10 เป็นภาพของ HCPL7840 ซึ่งเป็นการบอกว่าขาต่างๆมีหน้าที่ทำอะไรบ้าง ส่วนภาพที่ 3.11 เป็นภาพที่เมื่อนำ HCPL7840 มาต่อจริงในวงจรเซ็นเซอร์แรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.12 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง 15 โวลต์



ภาพที่ 3.13 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันกระแสตรง 5 โวลต์

คำนวณหาขนาดของ L ที่ใช้งานจริง

$$L = 764 \mu F, I = 2 A, B = 1 T, J = 2 A / mm^2$$

$$\text{ขนาดของขดลวด} = \frac{2A}{2A / mm^2} = 1 mm^2$$

หา rated power

$$\begin{aligned} S &= 2\pi fLI^2 \\ &= 2\pi \times 50 \times 764 \times 10^{-6} \times 2^2 \\ &= 0.96 VA \end{aligned}$$

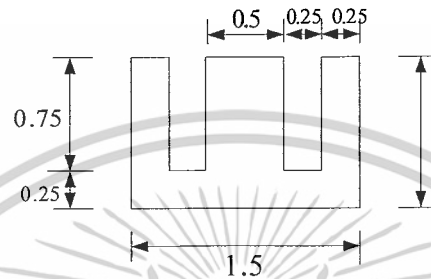
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาขนาดของแกนเหล็ก $A = \frac{\sqrt{VA}}{5.58} \text{ inch}^2 = \frac{\sqrt{0.96}}{5.58} = 0.176 \text{ inch}^2$

$$A \approx 0.5(0.176) = 0.088 \text{ inch}^2$$

$$\sqrt{A} = 0.297" \times 0.297"$$

ลองใช้แกน $0.5" \times 0.5"$



หา window $(0.75" \times 0.25") \times (25.4)^2 = 120.9675 \text{ mm}^2$ ----- 1

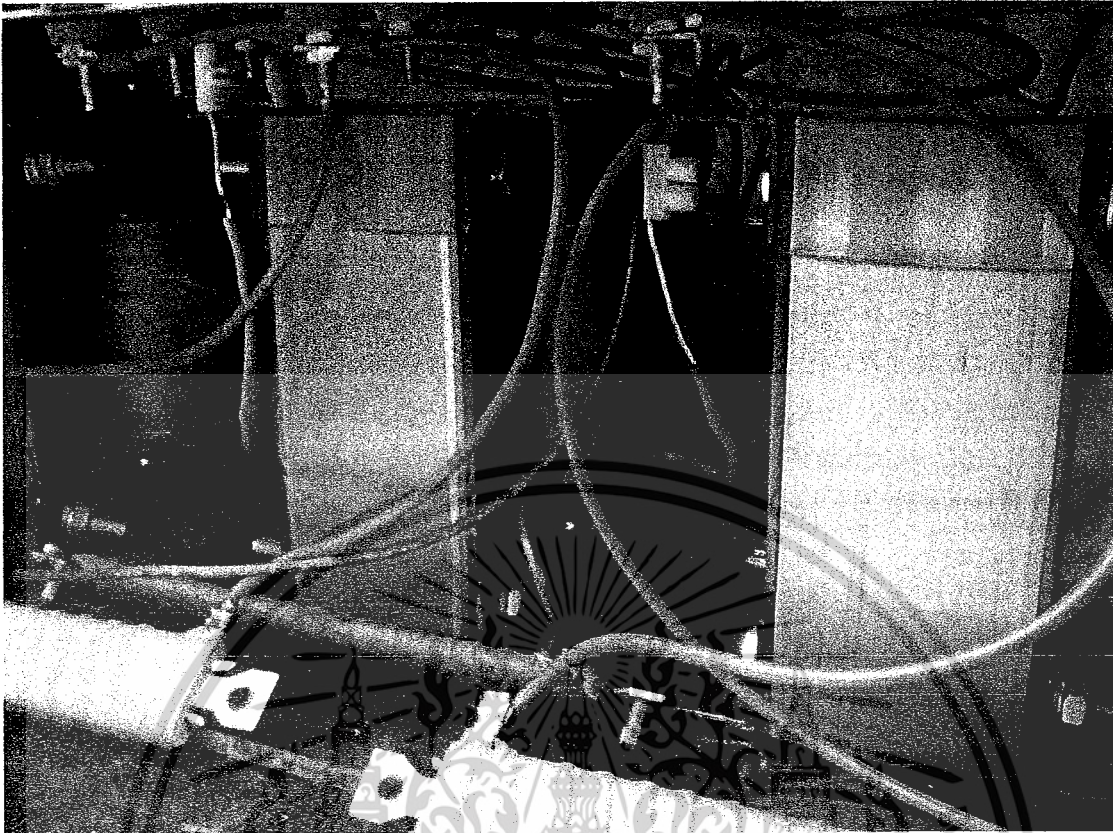
$$N = \frac{2\pi LI}{4.44BA} = \frac{2\pi \times 764 \times 10^{-6} \times 2}{4.44 \times 1 \times (0.5 \times 2.54 \times 10^{-2})^2} = 14 \text{ turn}$$

$$\text{พื้นที่ขดลวด} = \frac{13.4}{0.5} \text{ ----- 2}$$

1 > 2 ใช้ได้

$$L = \frac{N^2 \mu_0 A}{2g} = \frac{14^2 \times 4\pi \times 10^{-7} \times (0.5 \times 2.54 \times 10^{-2})^2}{2 \times 764 \times 10^{-6}} = 0.0259 \times 10^{-3} \text{ m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

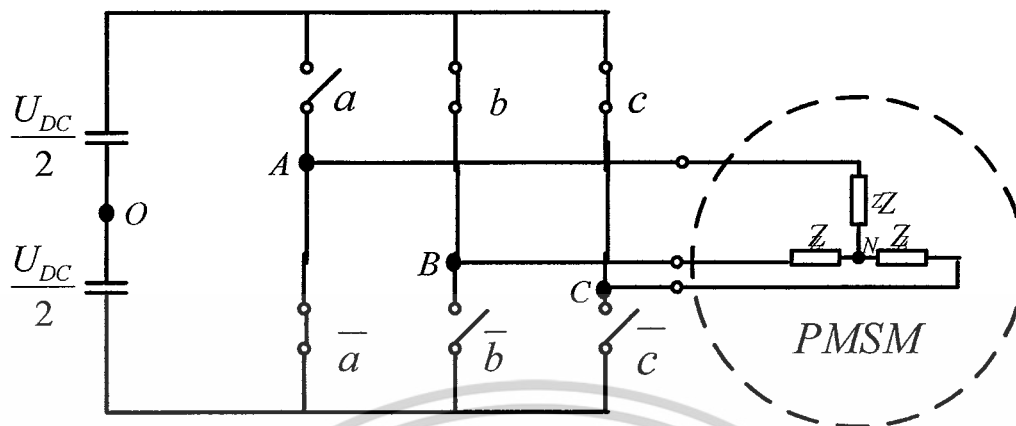


ภาพที่ 3.14 L ที่ได้ทำการออกแบบมาแล้ว

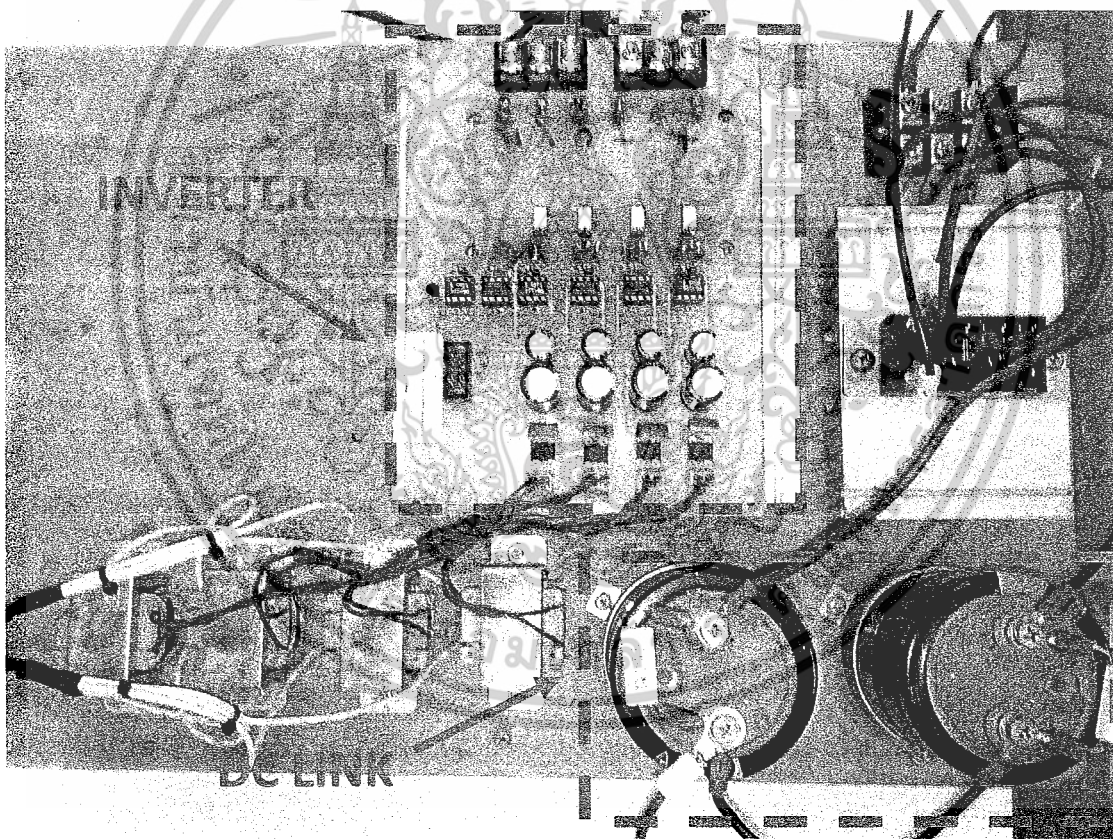
ภาพที่ 3.16 เป็นภาพของโหลด R และ L ที่ใช้ในการทดลองจริง โดย L เป็นค่าที่ได้ออกแบบดังที่ได้คำนวณไว้ข้างบนแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การออกแบบอินเวอร์เตอร์



ภาพที่ 3.15 ภาพวงจรของอินเวอร์เตอร์



ภาพที่ 3.16 เป็นอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดลองจริง

จากภาพที่ 3.17 และ ภาพที่ 3.18 เป็นภาพของอินเวอร์เตอร์ทั้งที่เป็นวงจรและที่ใช้ในการทดลองจริง ซึ่งรายละเอียดและค่าพิกัดต่างๆของอินเวอร์เตอร์ตัวนี้สามารถดูได้จาก

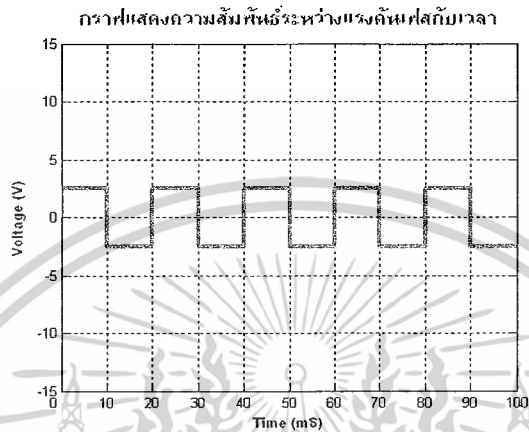
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

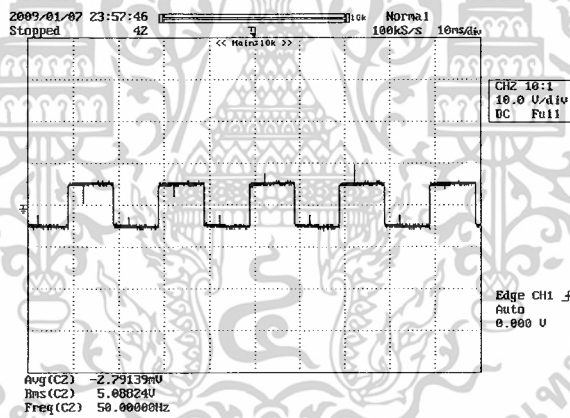
บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลของเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์



ก)



ข)

ภาพที่ 4.1 รูปคลื่นแรงดันเฟสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์

ก) เป็นแรงดันเฟสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มาจากแบบจำลอง

ข) เป็นแรงดันเฟสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ที่มาจากการทดลองจริง

จากภาพที่ 4.1 เป็นภาพของแรงดันเฟสเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์ โดยภาพ ก)

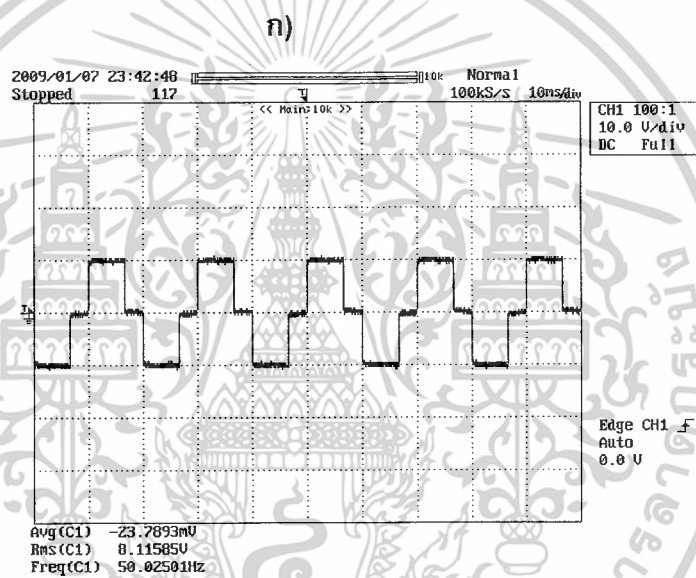
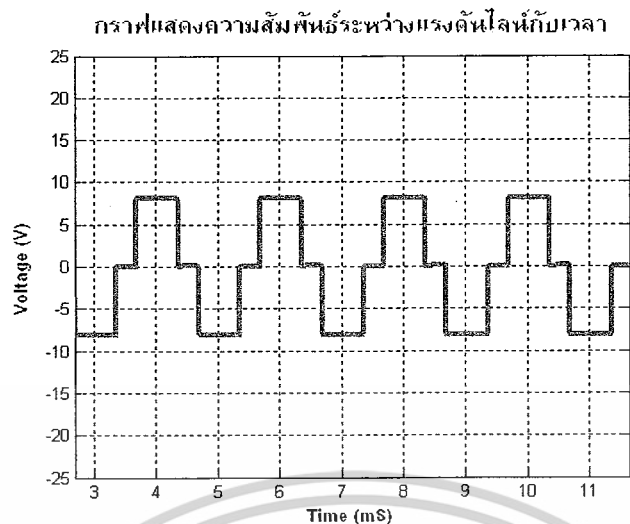
เป็นภาพของแรงดันเฟสเอาต์พุตที่นำมาจากแบบจำลอง และภาพ ข) เป็นภาพแรงดันเฟส

เอาต์พุตที่ได้มาจากการทดลองจริง จะเห็นได้ว่าทั้งสองภาพ มีผลการทดลองที่เหมือนกันไม่ว่า

จะเป็นการทดลองในคอมพิวเตอร์กับการทดลองจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข)

ภาพที่ 4.2 รูปคลื่นแรงดันโวลต์ของอินเวอร์เตอร์

ก) เป็นแรงดันโวลต์ของอินเวอร์เตอร์ที่มาจากแบบจำลอง

ข) เป็นแรงดันโวลต์ของอินเวอร์เตอร์ที่มาจากผลการทดลองจริง

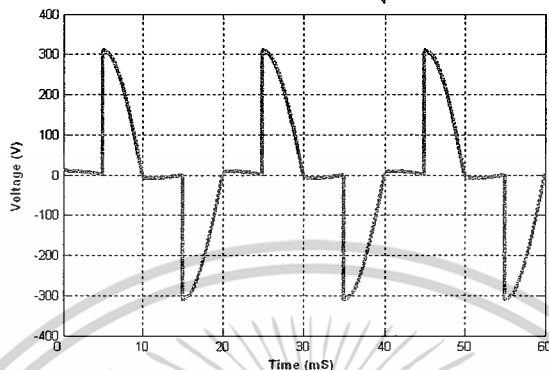
จากภาพที่ 4.2 เป็นภาพของแรงดันโวลต์ของอินเวอร์เตอร์ โดยภาพ ก) เป็นภาพของแรงดันโวลต์ที่นำมาจากแบบจำลอง และภาพ ข) เป็นภาพแรงดันโวลต์ของอินเวอร์เตอร์ที่ได้มาจากการทดลองจริง จะเห็นได้ว่าทั้งสองภาพ มีผลการทดลองที่เหมือนกันไม่ว่าจะเป็นการทดลองในคอมพิวเตอร์กับการทดลองจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

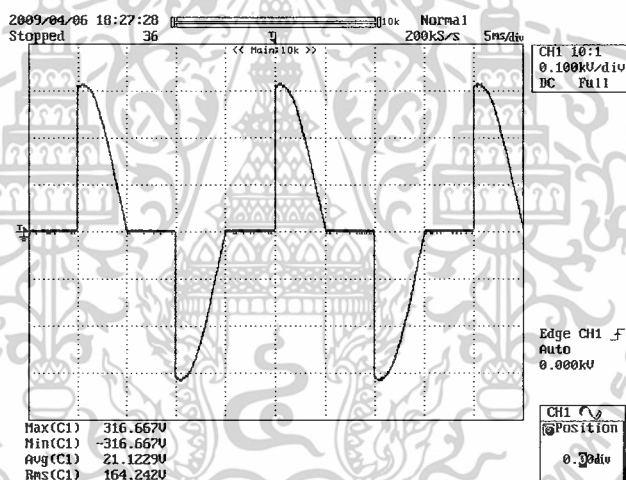
4.2 กรณีใช้โหลดเป็นตัวต้านทาน (โหลดไฟ)

4.2.1 กรณีที่มุมจุดชนวนของ SCR ที่ 90°

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาที่จุดชนวนของ SCR ที่ 90 องศา



ก)



ข)

ภาพที่ 4.3 รูปคลื่นแรงดันของโหลดกรณีที่เป็นตัวต้านทาน

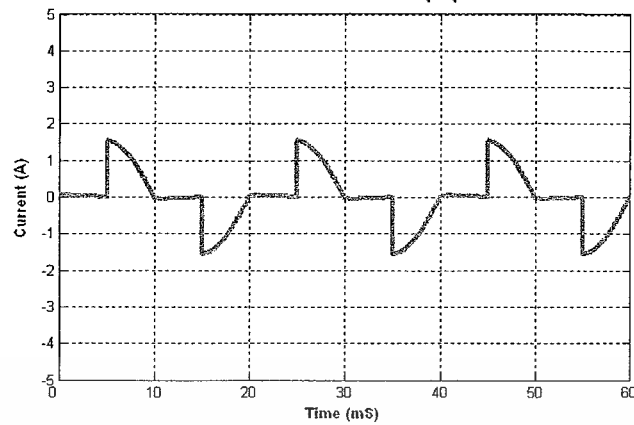
ก) แรงดันของโหลดที่จุดชนวนของ SCR ที่ 90° ที่ได้จากแบบจำลอง

ข) แรงดันของโหลดที่จุดชนวนของ SCR ที่ 90° ที่ได้จากการทดลองจริง

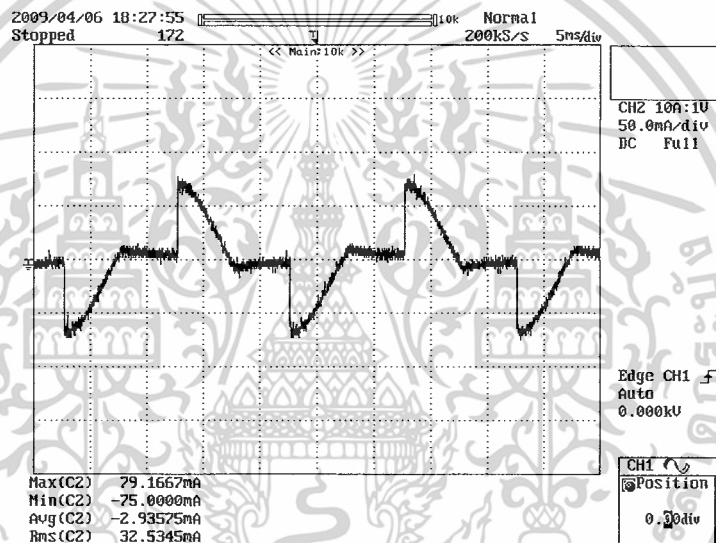
จากภาพที่ 4.3 เป็นภาพของแรงดันโหลดที่เป็นตัวต้านทานในกรณีที่มุมจุดชนวนของ SCR มีค่า 90° ซึ่งจากภาพ ก) เป็นกรณีของการใช้แบบจำลอง และภาพ ข) เป็นกรณีของการทดลองจริงผลที่ออกมามีค่าเหมือนกัน ตรงตามที่ได้ทดลองโดยใช้คอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาที่มุมจุดชนวนของ SCR ที่ 90 องศา



ก)



ข)

ภาพที่ 4.4 รูปคลื่นกระแสของโหลดกรณีที่เป็นตัวต้านทาน

ก) กระแสของโหลดที่จุดชนวนของ SCR ที่ 90° ที่ได้จากแบบจำลอง

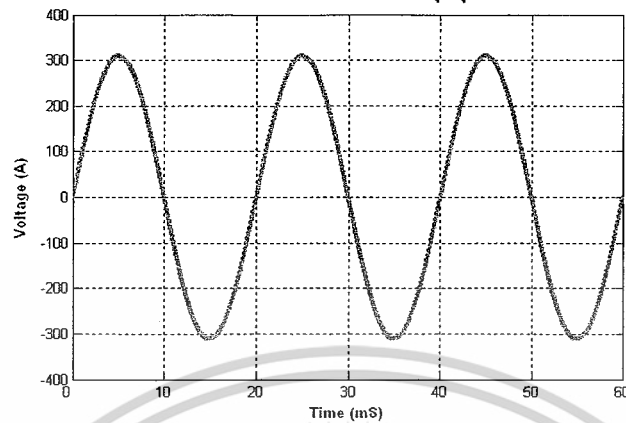
ข) กระแสของโหลดที่จุดชนวนของ SCR ที่ 90° ที่ได้จากการทดลองจริง

จากภาพที่ 4.4 เป็นภาพของกระแสโหลดที่เป็นตัวต้านทานในกรณีที่มีมุมจุดชนวนของ SCR มีค่า 90° ซึ่งจากภาพ ก) เป็นกรณีของการใช้แบบจำลอง และภาพ ข) เป็นกรณีของการทดลองจริงผลที่ออกมามีค่าเหมือนกัน ตรงตามที่ได้ทดลองโดยใช้คอมพิวเตอร์

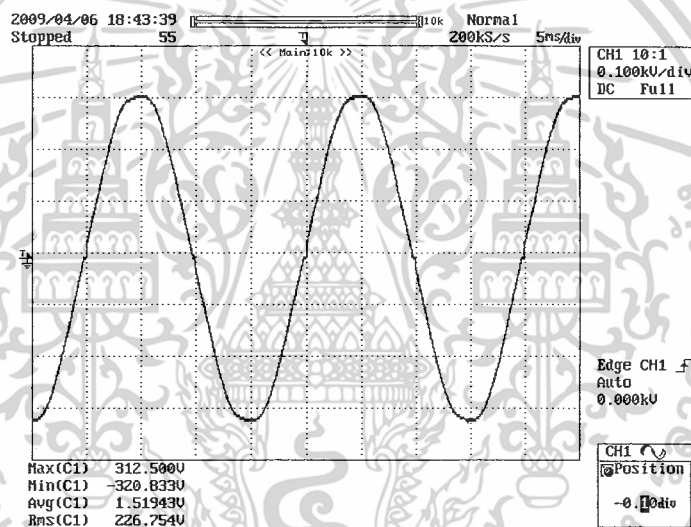
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 กรณีที่มุมจุดชนวนของ SCR ที่ 0°

กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาที่มุมจุดชนวนของ SCR ที่ 0° องศา



ก)



ข)

ภาพที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันของโหลดกรณีที่เป็นตัวต้านทาน

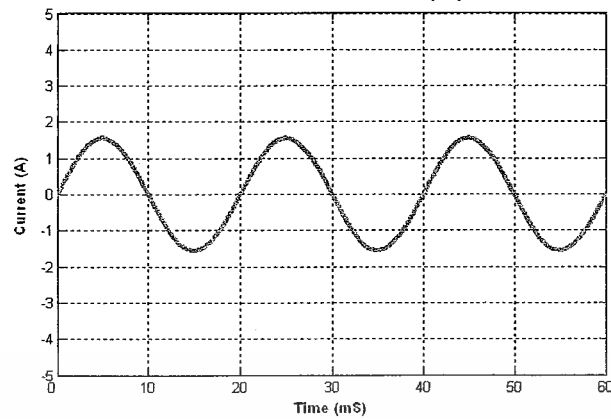
ก) แรงดันของโหลดที่จุดชนวนของ SCR ที่ 0° ที่ได้จากแบบจำลอง

ข) แรงดันของโหลดที่จุดชนวนของ SCR ที่ 0° ที่ได้จากการทดลองจริง

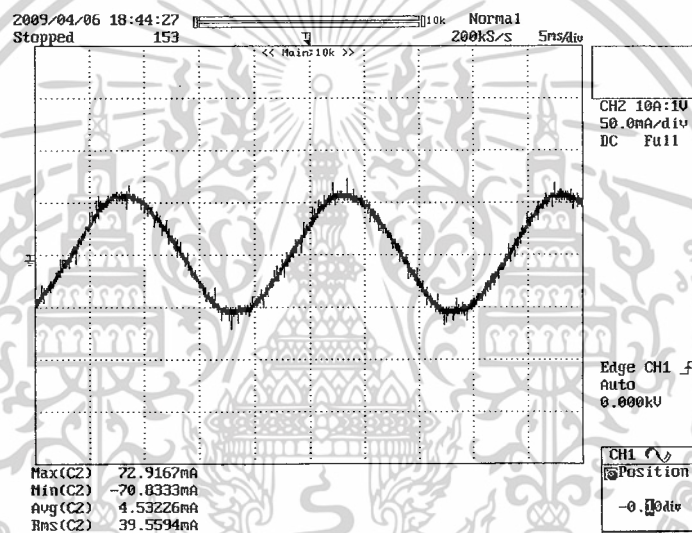
จากภาพที่ 4.5 เป็นภาพของแรงดันโหลดที่เป็นตัวต้านทานในกรณีที่มุมจุดชนวนของ SCR มีค่า 0° ซึ่งจากภาพ ก) เป็นกรณีของการใช้แบบจำลอง และภาพ ข) เป็นกรณีของการทดลองจริงผลที่ออกมามีค่าเหมือนกัน ตรงตามที่ได้ทดลองโดยใช้คอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาที่มุมจุดชนของ SCR ที่ 0 องศา



ก)



ข)

ภาพที่ 4.6 รูปคลื่นกระแสของโหลดกรณีที่เป็นตัวต้านทาน

ก) กระแสของโหลดที่จุดชนวนของ SCR ที่ 0° ที่ได้จากแบบจำลอง

ข) กระแสของโหลดที่จุดชนวนของ SCR ที่ 0° ที่ได้จากการทดลองจริง

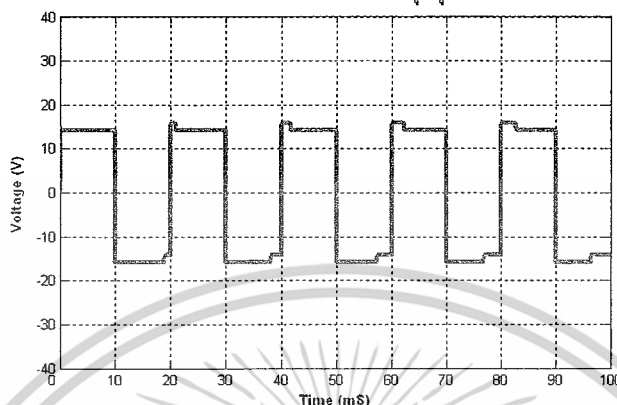
จากภาพที่ 4.6 เป็นภาพของกระแสโหลดที่เป็นตัวต้านทานในกรณีที่มุมจุดชนวนของ SCR มีค่า 0° ซึ่งจากภาพ ก) เป็นกรณีของการใช้แบบจำลอง และภาพ ข) เป็นกรณีของการทดลองจริงผลที่ออกมามีค่าเหมือนกัน ตรงตามที่ได้ทดลองโดยใช้คอมพิวเตอร์แต่อาจจะมียุทธยานรบกวนอยู่บ้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

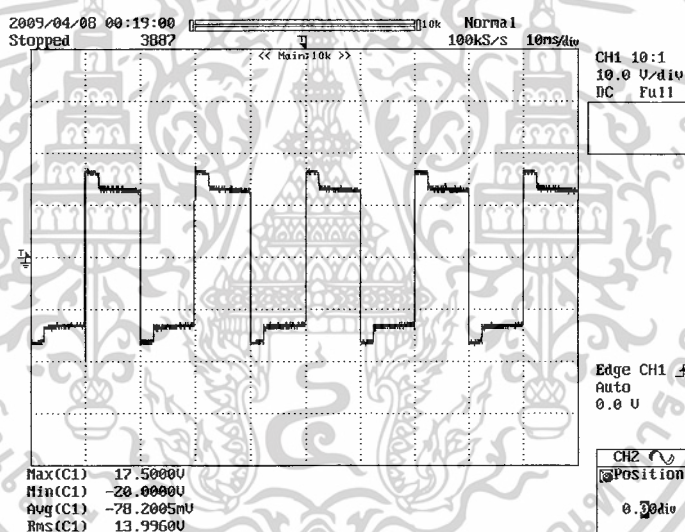
4.3 กรณีใช้โหลดเป็นตัวต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ

4.3.1 กรณีที่มุมจุดชนวนของ SCR เป็น 90° ที่แรงดันดีซีลิงค์ 30 โวลต์

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาที่มุมจุดชนวนของ SCR ที่ 90° จงศา



ก)



ข)

ภาพที่ 4.7 รูปคลื่นแรงดันของโหลดความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ

ก) แรงดันของโหลดที่มุมจุดชนวนของ SCR ที่ 90° ที่ได้จากแบบจำลอง

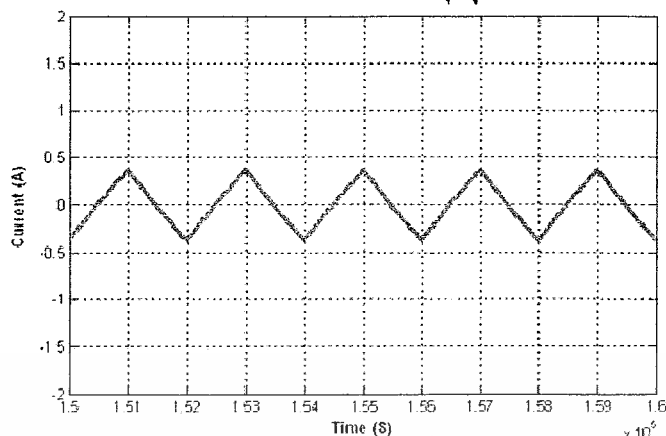
ข) แรงดันของโหลดที่มุมจุดชนวนของ SCR ที่ 90° ที่ได้จากการทดลองจริง

จากภาพที่ 4.7 เป็นภาพของแรงดันโหลดเมื่อทำการจ่ายแรงดันดีซีลิงค์ 30 โวลต์ ที่มุมจุดชนวนของ SCR 90° โดยแบ่งเป็นภาพ ก) เป็นภาพที่ได้จากการใช้การแบบจำลองใน

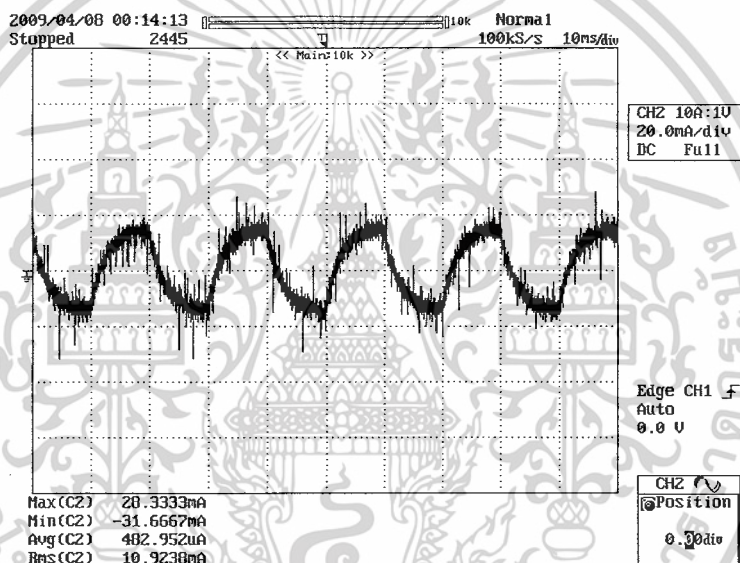
คอมพิวเตอร์ ซึ่งจะได้รูปคลื่นที่ตรงกับการทดลองจริงดังแสดงให้เห็นในภาพ ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนเว็บไซต์การดำเนินงานใดๆ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับเวลาที่มุมจุดชนวนของSCRที่ 90 องศา



ก)



ข)

ภาพที่ 4.8 รูปคลื่นกระแสของโหลดความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ

ก) กระแสของโหลดที่มุมจุดชนวนของSCR ที่ 90° ที่ได้จากแบบจำลอง

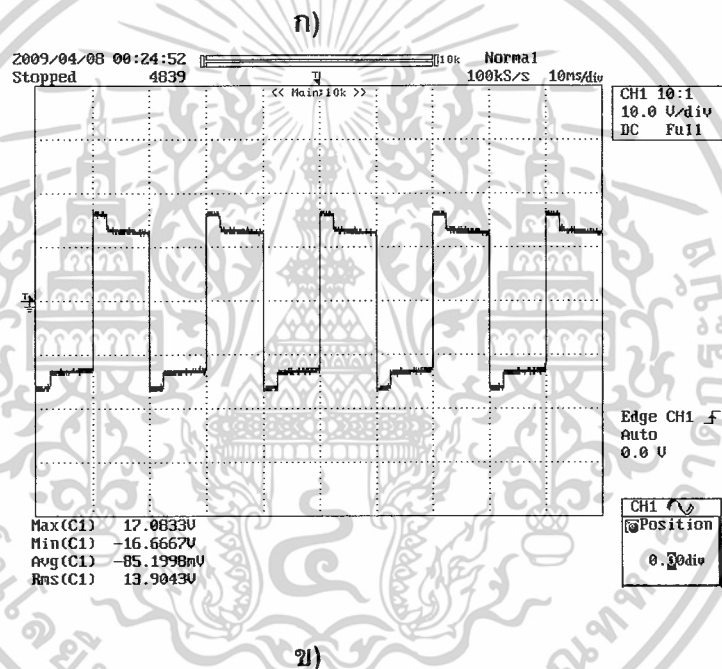
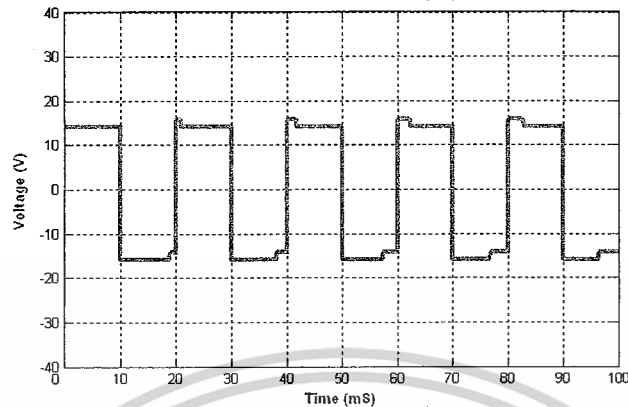
ข) กระแสของโหลดที่มุมจุดชนวนของSCR ที่ 90° ที่ได้จากการทดลองจริง

จากภาพที่ 4.8 เป็นภาพของกระแสโหลดเมื่อทำการจ่ายแรงดันดีซีลิงค์ 30 โวลต์ ที่มุมจุดชนวนของ SCR 90° โดยแบ่งเป็นภาพ ก) เป็นภาพที่ได้จากการใช้แบบจำลองในคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะได้รูปคลื่นมีความคล้ายคลึงกับการทดลองจริงดังแสดงให้เห็นในภาพ ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 กรณีที่มุมจุดชนวนของ SCR เป็น 0° ที่แรงดันดีซีลิงค์ 30 โวลต์

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาที่มีมุมจุดชนวนของ SCR ที่ 0° องศา



ภาพที่ 4.9 รูปคลื่นแรงดันของโหลดความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ

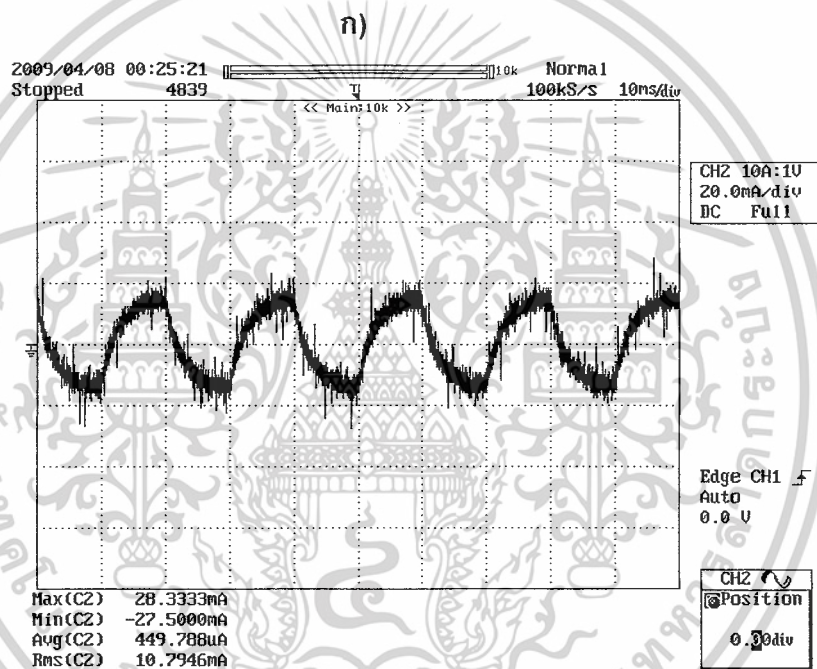
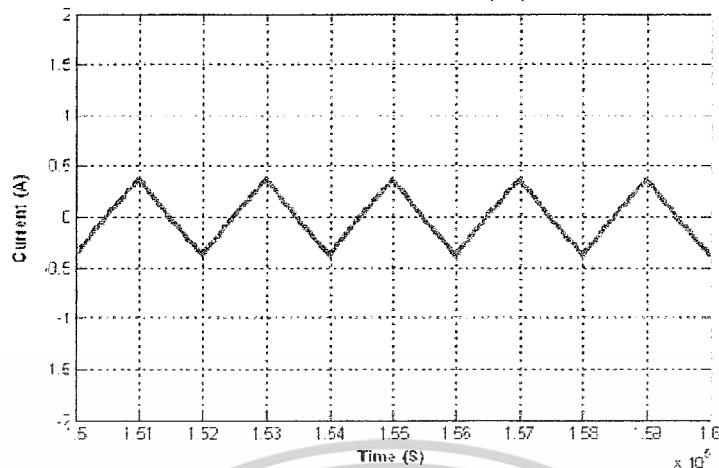
ก) แรงดันของโหลดที่มีมุมจุดชนวนของ SCR ที่ 0° ที่ได้จากแบบจำลอง

ข) แรงดันของโหลดที่มีมุมจุดชนวนของ SCR ที่ 0° ที่ได้จากการทดลองจริง

จากภาพที่ 4.9 เป็นภาพของแรงดันโหลดเมื่อทำการจ่ายแรงดันดีซีลิงค์ 30 โวลต์ ที่มีมุมจุดชนวนของ SCR 0° โดยแบ่งเป็นภาพ ก) เป็นภาพที่ได้จากการทำการใช้แบบจำลองในคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะได้รูปคลื่นที่ตรงกับการทดลองจริงดังแสดงให้เห็นในภาพ ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงการสลับกระแสระหว่างกระแสกับเวลาที่มุมจุดชนวนของSCR ที่ 0° ของค่า



ภาพที่ 4.10 รูปคลื่นกระแสของโหลดความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ

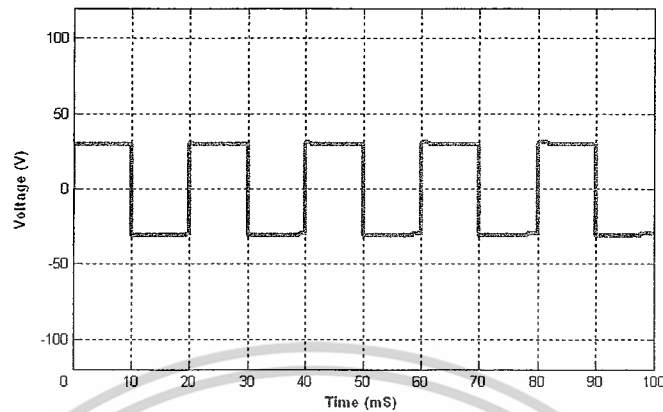
ก) กระแสของโหลดที่มุมจุดชนวนของSCR ที่ 0° ที่ได้จากแบบจำลอง

ข) กระแสของโหลดที่มุมจุดชนวนของSCR ที่ 0° ที่ได้จากการทดลองจริง

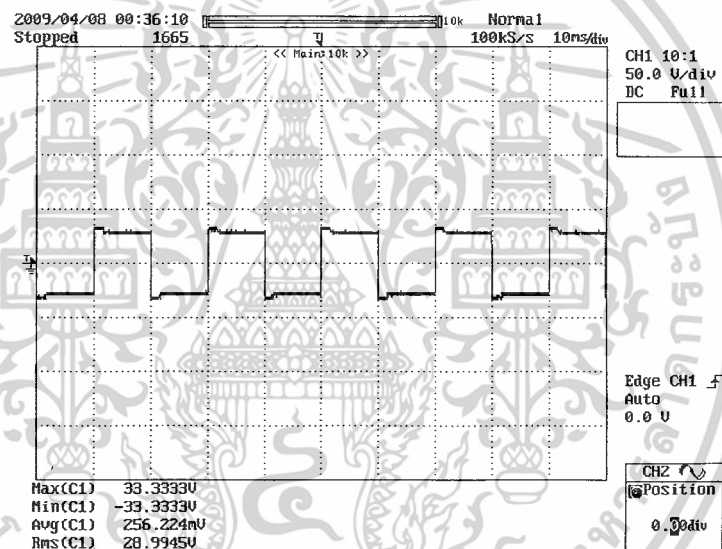
จากภาพที่ 4.10 เป็นภาพของกระแสโหลดเมื่อทำการจ่ายแรงดันดีซีลิงค์ 30 โวลต์ ที่มุมจุดชนวนของ SCR 0° โดยแบ่งเป็นภาพ ก) เป็นภาพที่ได้จากการทำการใช้แบบจำลองในคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะได้รูปคลื่นมีความคล้ายคลึงกับการทดลองจริงดังแสดงให้เห็นในภาพ ข) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 กรณีที่มุมจุดชนวนของ SCR เป็น 90° ที่แรงดันดีซีลิงค์ 60 โวลต์

กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาเมื่อมุมจุดชนวนของ SCR ที่มุม 90 องศา



ก)



ข)

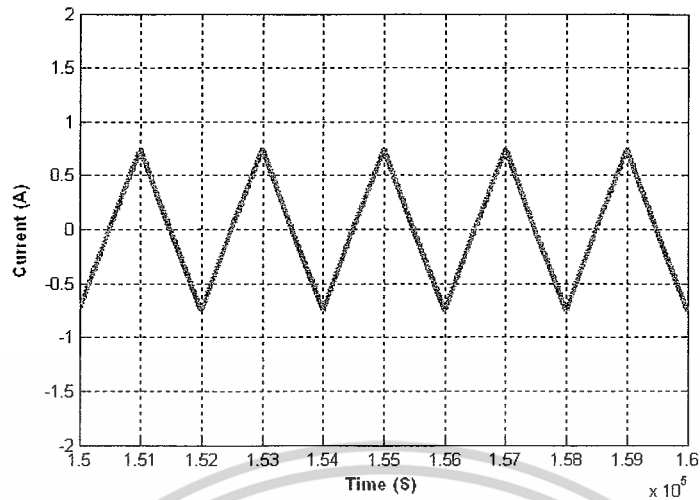
ภาพที่ 4.11 รูปคลื่นแรงดันของโหลดความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ

ก) แรงดันของโหลดที่มุมจุดชนวนของ SCR ที่ 90° ที่ได้จากแบบจำลอง

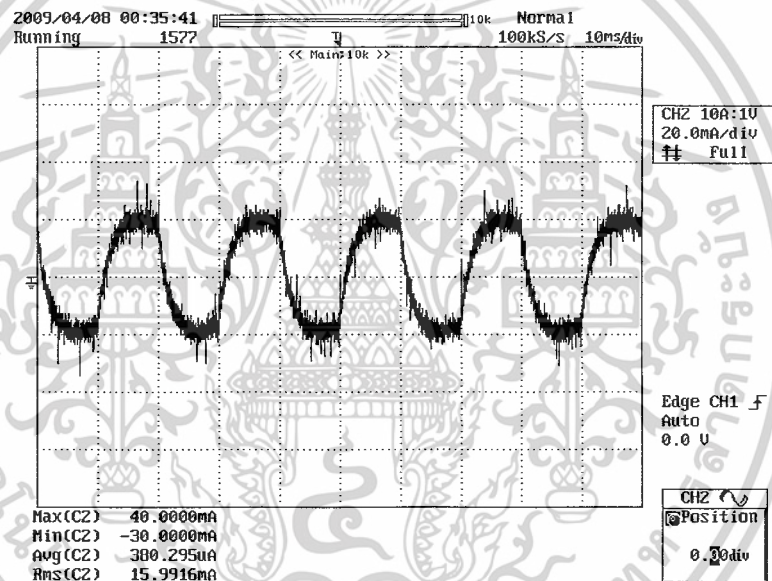
ข) แรงดันของโหลดที่มุมจุดชนวนของ SCR ที่ 90° ที่ได้จากการทดลองจริง

จากภาพที่ 4.11 เป็นภาพของแรงดันโหลดเมื่อทำการจ่ายแรงดันดีซีลิงค์ 60 โวลต์ ที่มุมจุดชนวนของ SCR 90° โดยแบ่งเป็นภาพ ก) เป็นภาพที่ได้จากการทำการใช้แบบจำลองในคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะได้รูปคลื่นที่ตรงกับการทดลองจริงดังแสดงให้เห็นในภาพ ข) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับมุมจุดชนวนของSCR ที่ 90 องศา



ก)



ข)

ภาพที่ 4.12 รูปคลื่นกระแสของโหลดความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ

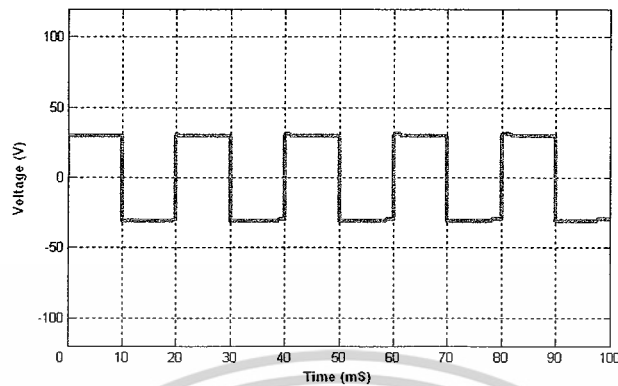
ก) กระแสของโหลดที่มุมจุดชนวนของSCR ที่ 90° ที่ได้จากแบบจำลอง

ข) กระแสของโหลดที่มุมจุดชนวนของSCR ที่ 90° ที่ได้จากการทดลองจริง

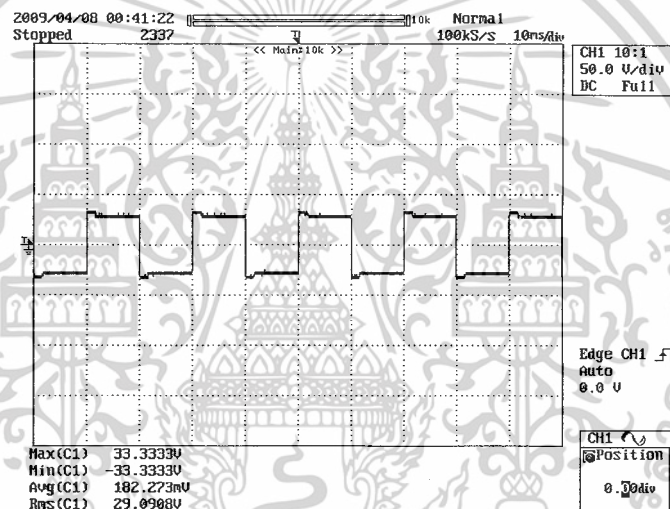
จากภาพที่ 4.12 เป็นภาพของกระแสโหลดเมื่อทำการจ่ายแรงดันดีซีลิงค์ 60 โวลต์ ที่มุมจุดชนวนของ SCR 90° โดยแบ่งเป็นภาพ ก) เป็นภาพที่ได้จากการทำการใช้แบบจำลองในคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะได้รูปคลื่นมีความคล้ายคลึงกับการทดลองจริงดังแสดงให้เห็นในภาพ ข) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่ในวงกว้างโดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูงและต้องอภัยถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 กรณีที่มุมจุดชนวนของ SCR เป็น 0° ที่แรงดันดีซีลิงค์ 60 โวลต์

ภาพที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับเวลาที่มุมจุดชนวนของ SCR ที่มุม 0 องศา



ก)



ข)

ภาพที่ 4.13 รูปคลื่นแรงดันของโหลดความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ

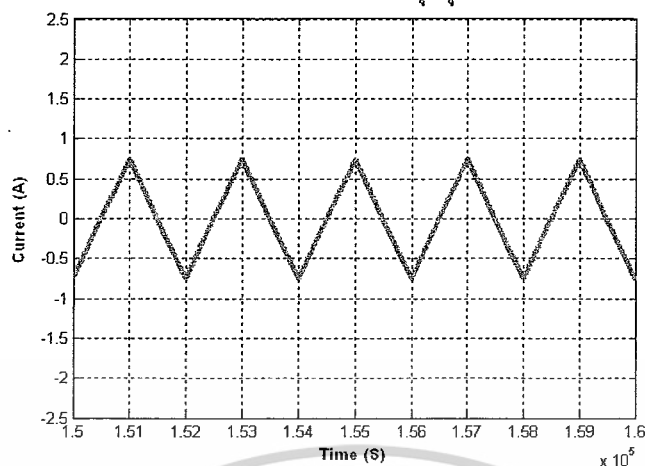
ก) แรงดันของโหลดที่มุมจุดชนวนของ SCR ที่ 0° ที่ได้จากแบบจำลอง

ข) แรงดันของโหลดที่มุมจุดชนวนของ SCR ที่ 0° ที่ได้จากการทดลองจริง

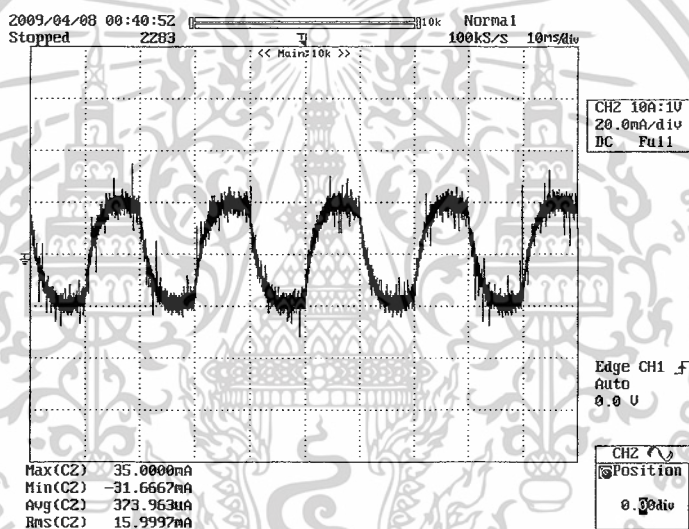
จากภาพที่ 4.13 เป็นภาพของแรงดันโหลดเมื่อทำการจ่ายแรงดันดีซีลิงค์ 60 โวลต์ ที่มุมจุดชนวนของ SCR 0° โดยแบ่งเป็นภาพ ก) เป็นภาพที่ได้จากการใช้แบบจำลองในคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะได้รูปคลื่นที่ตรงกับการทดลองจริงดังแสดงให้เห็นในภาพ ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.14 รูปคลื่นกระแสของโหลดความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ



ก)



ข)

ภาพที่ 4.14 รูปคลื่นกระแสของโหลดความต้านทาน และตัวเหนี่ยวนำ

ก) กระแสของโหลดที่มุมจุดชนวนของSCR ที่ 0° ที่ได้จากแบบจำลอง

ข) กระแสของโหลดที่มุมจุดชนวนของSCR ที่ 0° ที่ได้จากการทดลองจริง

จากภาพที่ 4.14 เป็นภาพของกระแสโหลดเมื่อทำการจ่ายแรงดันดีซีลิงค์ 60 โวลต์ ที่มุมจุดชนวนของ SCR 90° โดยแบ่งเป็นภาพ ก) เป็นภาพที่ได้จากการทำการใช้แบบจำลองในคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะได้รูปคลื่นมีความคล้ายคลึงกับการทดลองจริงดังแสดงให้เห็นในภาพ ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากการศึกษาทฤษฎีของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร (PMSM) พบว่า พฤติกรรมของแรงดันเหนี่ยวนำป้อนกลับ (Back-emf) จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเร็วมากขึ้นที่ยานการทำงานแบบกำลังไฟฟ้าคงที่ (Constant power) จนกระทั่งเมื่อความเร็วมีค่าถึงค่าหนึ่งที่ทำให้แรงดันเหนี่ยวนำป้อนกลับมีค่ามากกว่าแรงดันดีซีลิงค์ (dc link) จะทำให้มีกระแสไหลย้อนกลับสู่อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ดังนั้นจึงได้มีการนำเอสซีอาร์ (SCR) มาต่อขนานกลับทิศทางกัน (back to back) เพื่อหยุดการนำกระแสของไดโอดในอินเวอร์เตอร์ ซึ่งจะเรียกวิธีการควบคุมแบบนี้ว่า Dual mode inverter control (DMIC) โดยจะทำให้ PMSM มีการทำงานแบบ 3 เฟส เปลี่ยนมาเป็นการทำงานแบบเฟสเดียว เพื่อหลีกเลี่ยงการไหลย้อนกลับของกระแสผ่านไดโอดในยานการทำงานแบบกำลังไฟฟ้าคงที่

การทดลองกรณีแรกได้ทำงานทดลองต่อชุดเอสซีอาร์ที่ต่อขนานกลับทิศทางกันนำมาต่อเข้ากับโหลดแบบความต้านทานนั่นคือ หลอดไฟ พบว่าเมื่อปรับมุมจุดชนวนของเอสซีอาร์ให้ มีค่าเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้หลอดไฟมีความสว่างลดน้อยลงจนดับสนิทเมื่อเอสซีอาร์ถูกสั่งจะออฟ (Off) ลง นั่นหมายความว่าเราสามารถควบคุมกระแสที่จะไหลไปยังหลอดไฟ โดยการควบคุมมุมจุดชนวนของเอสซีอาร์

การทดลองในกรณีที่สองได้ทำการทดลอง โดยการใช้อินเวอร์เตอร์แบบสามเฟสที่มี สัญญาณขับเกิดแบบสี่เหลี่ยม (Square wave) ซึ่งในกรณีนี้จะใช้เป็นแหล่งจ่ายแรงดันเฟสเดียวให้กับโหลดแบบตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทาน (แทนพารามิเตอร์ของมอเตอร์) และมีชุดเอสซีอาร์ที่ต่อขนานกลับทิศทางกันมาเชื่อมต่ออยู่ระหว่างอินเวอร์เตอร์กับโหลด จะพบว่า จะได้ผลการทดลองในลักษณะเดียวกันกับโหลดแบบตัวต้านทาน (หลอดไฟ)

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

1. การเขียนโปรแกรมให้สัญญาณขับเกิดแบบรูปคลื่นสี่เหลี่ยมของอินเวอร์เตอร์สามเฟสทำงานชิฟเฟส(Shift phase) กันและให้อินเฟสกับแรงดันเหนี่ยวนำป้อนกลับนั้น ไม่สามารถทำได้ จึงไม่สามารถทดลองเป็นวงจรสมมุทธ์แบบสามเฟสได้
2. การทดลองโดยใช้การจำลองเป็นวงจรสมมุทธ์แบบเฟสเดียว ในตอนทำการอนนั้น ไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากมีแรงดันและกระแสของแรงดันเหนี่ยวนำป้อนกลับเข้าไปชาร์จที่ดีซีลิงค์ จึงไม่สามารถทดลองเป็นวงจรสมมุทธ์แบบเฟสเดียวได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ข้อเสนอแนะ

ควรจะทำการศึกษาทดลองโดยใช้มอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวรแทนการใช้การทดลองเป็นแบบวงจรสมมูลย์ของพารามิเตอร์ในมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร อีกทั้งยังควรเปลี่ยนขนาดฟลักซ์ของอินเวอร์เตอร์และเอสซีอาร์ให้เหมาะสมกับขนาดฟลักซ์ของมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดแม่เหล็กถาวร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] João Onofre P. Pinto, Jack S. Lawler, Nicolau Pereira Filho, "Extended Constant Power Speed Range of the Permanent Magnet Synchronous Machine Driven by Dual Mode Inverter Control" ,IEEE ,pp.1247-1252 ,2005
- [2] J. S. Lawler, John Bailey, and John McKeever, "Minimum Current Magnitude Control of Surface PM Synchronous Machines During Constant Power Operation", IEEE Power Electronics Letters, Vol. 3, No. 2, pp.53-56, June 2005
- [3] J. S. Lawler, J. Milton Bailey, John W. McKeever, Joao Pinto, "Extending the Constant Power Speed Range of the Brushless DC Motor Through Dual-Mode Inverter Control", IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 19, No. 3, pp.783-793, May 2004, pp.1-6
- [4] Inez R. Recalde Lino J. S. Lawler, Joao O. P. Pinto, Luciana C. Leite, Jack S. Lawler, "Pulsating Torque Analysis of PMSM Driven by Dual Mode Inverter Control in Wide Constant Power Speed Range", IEEE
- [5] João Onofre Pereira Pinto, Nicolau Pereira Filho, Jack S. Lawler, "Analysis Of Limit Of The Constant Power Speed Range Of The Permanent Magnet Synchronous Machine Driven By Dual Mode Inverter", IEEE, pp.2540-2545, 2005
- [6] Pragasam Pillay, R. Krishnan, "Modeling of Permanent Magnet Motor Drives", IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 35, No. 4, pp.537-541, November 1988
- [7] J. M. Bailey, B. Ozpineci, G. W. Ott, D. S. Daniel, "Back EMF Calculations For axial-gap Permanent Magnet Synchronous Motors (AGPMSM) With Disc Magnets", IEEE, pp.1-7
- [8] E. Hall M, J. C. Balda, "Permanent Magnet Synchronous Motor Drive for HEV Propulsion: Optimum Speed Ratio and Parameter Determination", IEEE, pp.1-5, 2002
- [9] Mouhoub Mekhiche, Stephen Nichols, James L. Kirtley, John Young, Donald Boudreau, Robert Jodoin, "High-Speed, High-Power Density PMSM Drive For Fuel Cell Powered HEV Applications", IEEE, pp.658-663, 2001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [10] Jianghua Feng¹, Weihua Gui, Junfeng Xu, Jian Wang, “Compare of Permanent Magnet Synchronous Motor Applied to Railway Vehicle Traction System”, IEEE, pp.1-7, 2007
- [11] A. B. Dehkordi, A. M. Gole, T. L. Maguire, “Permanent Magnet Synchronous Machine Model for Real- Time Simulation”, IEEE, pp.1-6, June 19-23
- [12] Y.K. Chin, J. Soulard, “A Permanent Magnet Synchronous Motor for Traction Applications of Electric Vehicles”, IEEE, pp.1-9
- [13] B.K.Bose, Modern Power Electronics and AC Drives, Prentice-Hall, Inc.,2002.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

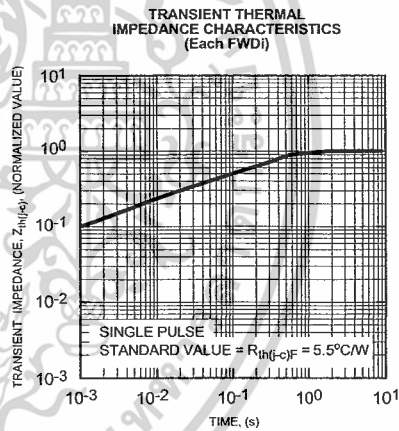
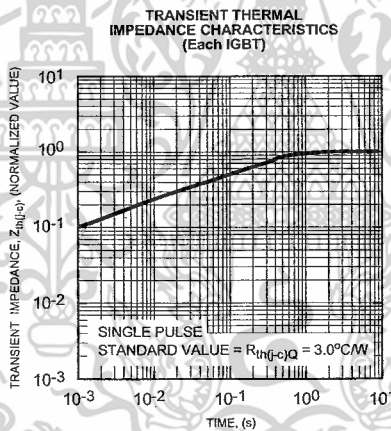
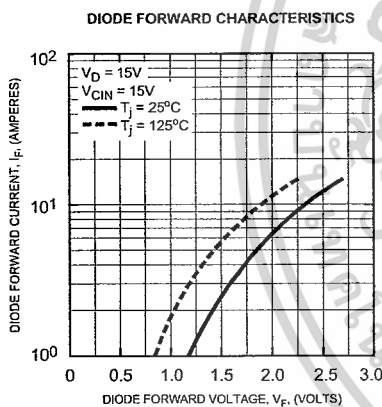
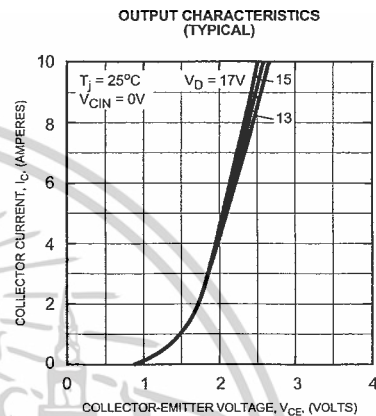
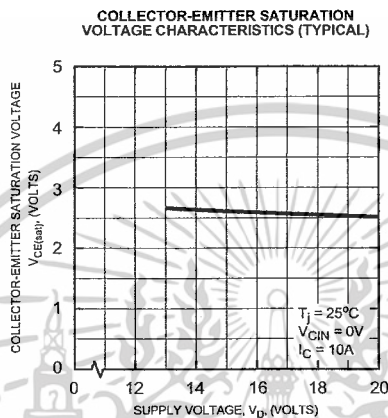
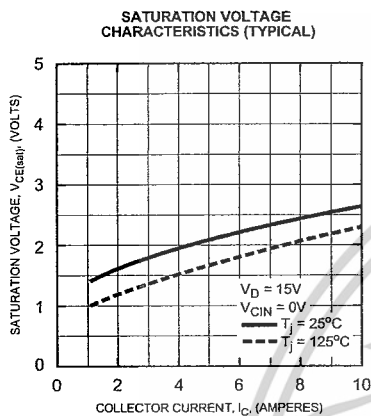


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PM15RSH120

FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE

Brake Part

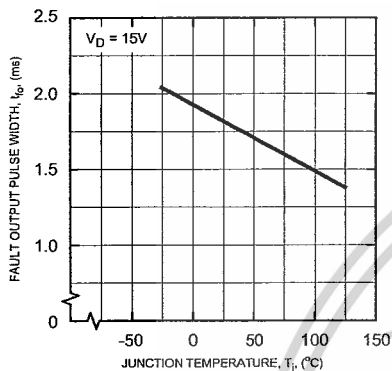


PM15RSH120

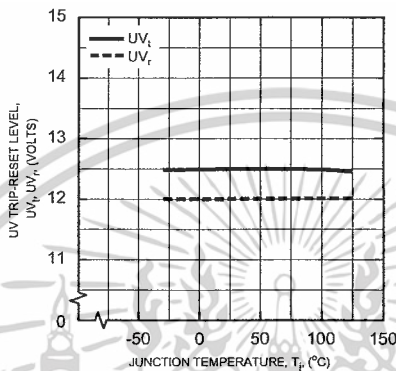
FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE

Inverter Part

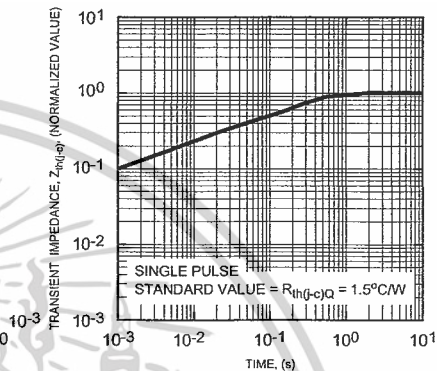
FAULT OUTPUT PULSE WIDTH VS. TEMPERATURE (TYPICAL)



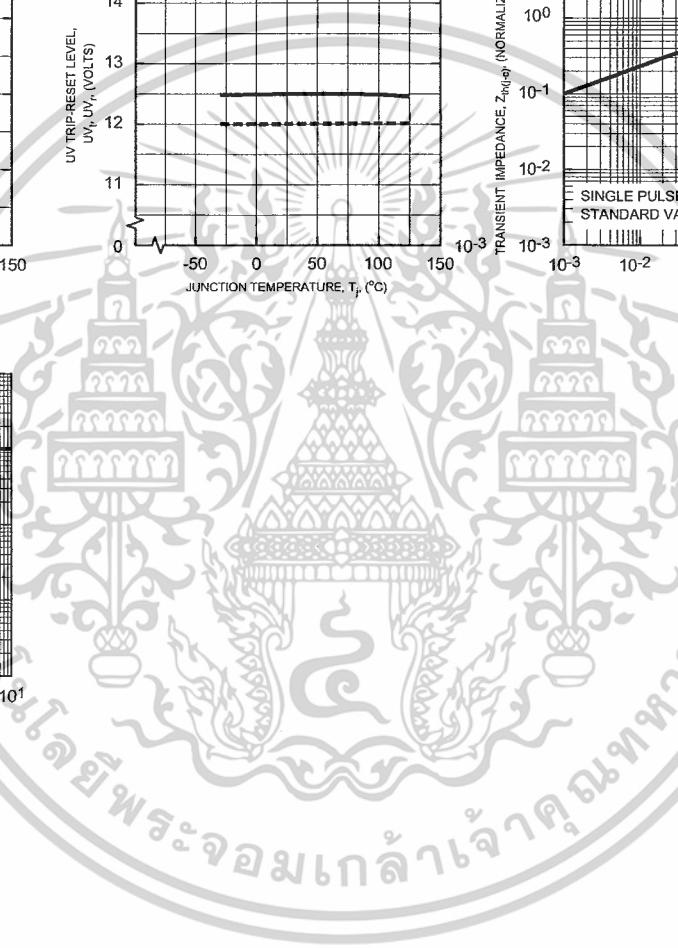
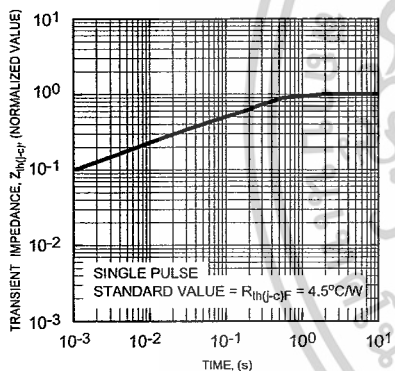
CONTROL SUPPLY VOLTAGE TRIP-RESET LEVEL TEMPERATURE DEPENDENCY (TYPICAL)



TRANSIENT THERMAL IMPEDANCE CHARACTERISTICS (Each IGBT)



TRANSIENT THERMAL IMPEDANCE CHARACTERISTICS (Each FWD)



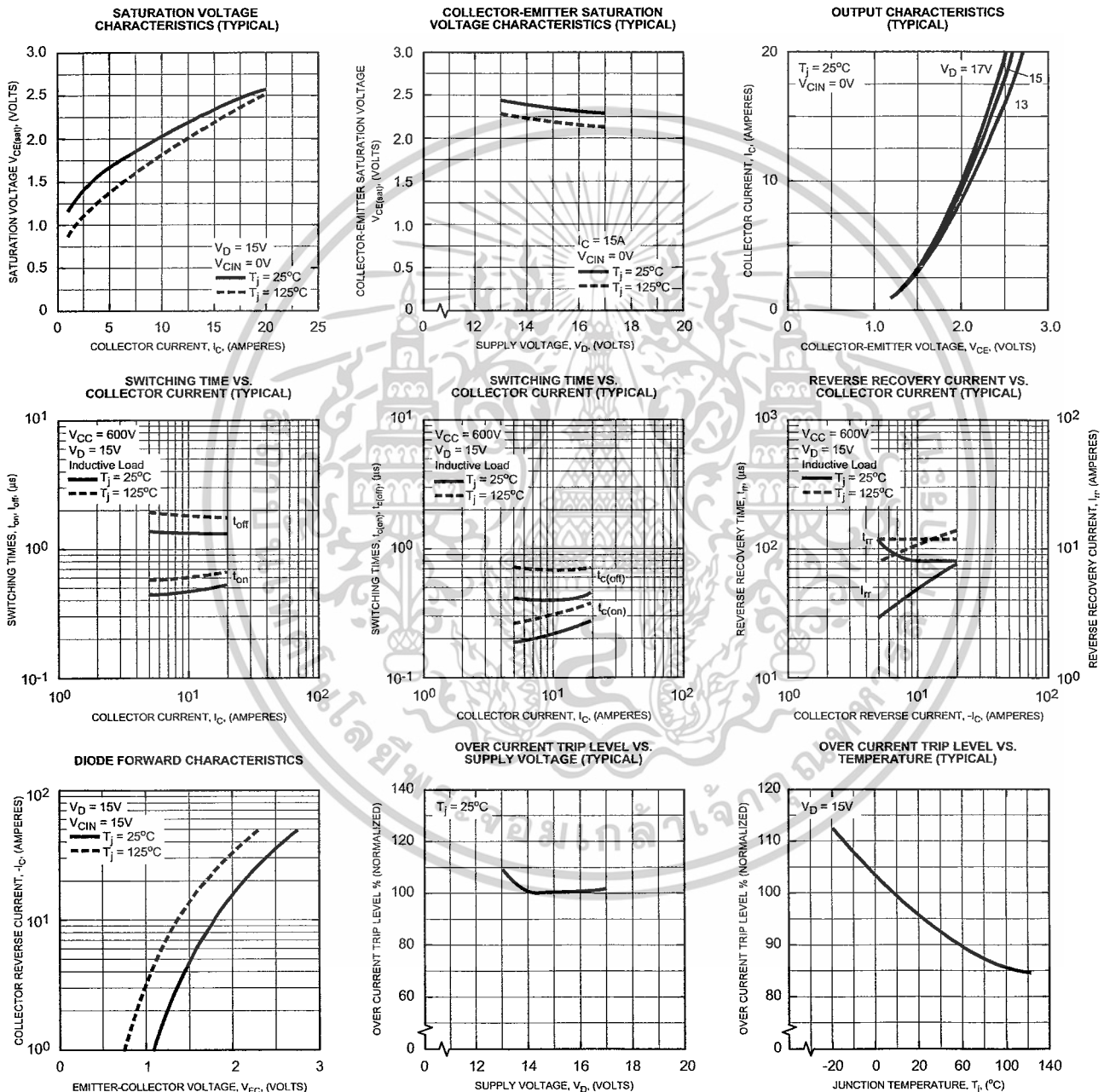
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PM15RSH120

FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE

Inverter Part



Sep.2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MITSUBISHI
ELECTRIC

PM15RSH120

FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE

Thermal Characteristics

| Characteristic | Symbol | Condition | Min. | Typ. | Max. | Units |
|-------------------------------------|----------------|---|------|------|-------|---------|
| Junction to Case Thermal Resistance | $R_{th(j-c)Q}$ | Each Inverter IGBT | — | — | 1.5 | °C/Watt |
| | $R_{th(j-c)F}$ | Each Inverter FWDi | — | — | 4.5 | °C/Watt |
| | $R_{th(c-f)Q}$ | Each Brake IGBT | — | — | 3.0 | °C/Watt |
| | $R_{th(c-f)F}$ | Each Brake FWDi | — | — | 5.5 | °C/Watt |
| Contact Thermal Resistance | $R_{th(c-f)}$ | Case to Fin Per Module, Thermal Grease Applied | — | — | 0.044 | °C/Watt |

Recommended Conditions for Use

| Characteristic | Symbol | Condition | Value | Units |
|---------------------|----------------|--|----------------|---------|
| Supply Voltage | V_{CC} | Applied across P-N Terminals | 0 ~ 800 | Volts |
| | V_D | Applied between V_{UP1} - V_{UPC} , V_{N1} - V_{NC} , V_{VP1} - V_{VPC} , V_{WP1} - V_{WPC} | 15 ± 1.5 | Volts |
| Input ON Voltage | $V_{CIN(on)}$ | Applied between | 0 ~ 0.8 | Volts |
| Input OFF Voltage | $V_{CIN(off)}$ | $U_P, V_P, W_P, U_N, V_N, W_N, B_r$ | $4.0 \sim V_D$ | Volts |
| PWM Input Frequency | f_{PWM} | Using Application Circuit | 5 ~ 20 | kHz |
| Minimum Dead Time | t_{dead} | Input Signal | ≥ 2.5 | μs |

Sep.2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PM15RSH120**FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE****Electrical and Mechanical Characteristics, $T_j = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified**

| Characteristics | Symbol | Test Conditions | Min. | Typ. | Max. | Units |
|--------------------------------------|---------------|---|------|------|------|---------------|
| IGBT Inverter Sector | | | | | | |
| Collector Cutoff Current | I_{CES} | $V_{CE} = V_{CES}, T_j = 25^\circ\text{C}$ | — | — | 1.0 | mA |
| | | $V_{CE} = V_{CES}, T_j = 125^\circ\text{C}$ | — | — | 10 | mA |
| Emitter-Collector Voltage | V_{EC} | $-I_C = 15\text{A}, V_D = 15\text{V}, V_{CIN} = 5\text{V}$ | — | 2.5 | 3.5 | Volts |
| Collector-Emitter Saturation Voltage | $V_{CE(sat)}$ | $V_D = 15\text{V}, V_{CIN} = 0\text{V}, I_C = 15\text{A}$ | — | 2.3 | 3.3 | Volts |
| | | $V_D = 15\text{V}, V_{CIN} = 0\text{V}, I_C = 15\text{A},$ $T_j = 125^\circ\text{C}$ | — | 2.1 | 3.1 | Volts |
| Inductive Load Switching Times | t_{on} | | 0.4 | 0.7 | 1.5 | μs |
| | t_{rr} | $V_D = 15\text{V}, V_{CIN} = 0 \leftrightarrow 15\text{V}$ | — | 0.15 | 0.3 | μs |
| | $t_{C(on)}$ | $V_{CC} = 600\text{V}, I_C = 15\text{A}$ | — | 0.3 | 1.0 | μs |
| | t_{off} | $T_j = 125^\circ\text{C}$ | — | 1.7 | 2.9 | μs |
| | $t_{C(off)}$ | | — | 0.7 | 1.3 | μs |
| Brake Sector | | | | | | |
| Collector-Emitter Saturation Voltage | $V_{CE(sat)}$ | $V_D = 15\text{V}, V_{CIN} = 0\text{V}, I_C = 10\text{A},$ $T_j = 25^\circ\text{C}$ | — | 2.8 | 3.8 | Volts |
| | | $V_D = 15\text{V}, V_{CIN} = 0\text{V}, I_C = 10\text{A},$ $T_j = 125^\circ\text{C}$ | — | 2.5 | 3.5 | Volts |
| Diode Forward Voltage | V_{FM} | $I_F = 10\text{A}, V_D = 15\text{V}, V_{CIN} = 5\text{V}$ | — | 2.5 | 3.5 | Volts |
| Collector Cutoff Current | I_{CES} | $V_{CE} = V_{CES}, T_j = 25^\circ\text{C}$ | — | — | 1 | mA |
| | | $V_{CE} = V_{CES}, T_j = 125^\circ\text{C}$ | — | — | 10 | mA |

Sep.2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PM15RSH120

FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGEElectrical and Mechanical Characteristics, $T_j = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

| Characteristics | Symbol | Test Conditions | Min. | Typ. | Max. | Units |
|---|----------------------|--|------|------|------|------------------|
| Control Sector | | | | | | |
| Over Current Trip Level Inverter Part | OC | $-20^\circ\text{C} \leq T \leq 125^\circ\text{C}$, $V_D = 15\text{V}$ | 22 | 37 | — | Amperes |
| Over Current Trip Level Brake Part | | | 15 | 27 | — | Amperes |
| Short Circuit Trip Level Inverter Part | SC | $-20^\circ\text{C} \leq T \leq 125^\circ\text{C}$, $V_D = 15\text{V}$ | — | 56 | — | Amperes |
| Short Circuit Trip Level Brake Part | | | — | 41 | — | Amperes |
| Over Current Delay Time | $t_{\text{off(OC)}}$ | $V_D = 15\text{V}$ | — | 10 | — | μs |
| Over Temperature Protection | OT | Trip Level | 100 | 110 | 120 | $^\circ\text{C}$ |
| | OT_r | Reset Level | — | 90 | — | $^\circ\text{C}$ |
| Supply Circuit Under Voltage Protection | UV | Trip Level | 11.5 | 12.0 | 12.5 | Volts |
| | UV_r | Reset Level | — | 12.5 | — | Volts |
| Supply Voltage | V_D | Applied between $V_{UP1}-V_{UPC}$, $V_{VP1}-V_{VPC}$, $V_{WP1}-V_{WPC}$, $V_{N1}-V_{NC}$ | 13.5 | 15 | 16.5 | Volts |
| Circuit Current | I_D | $V_D = 15\text{V}$, $V_{CIN} = 15\text{V}$, $V_{N1}-V_{NC}$ | — | 25 | 35 | mA |
| | | $V_D = 15\text{V}$, $V_{CIN} = 15\text{V}$, $V_{XP1}-V_{XPC}$ | — | 7 | 10 | mA |
| Input ON Threshold Voltage | $V_{\text{th(on)}}$ | Applied between | 1.2 | 1.5 | 1.8 | Volts |
| Input OFF Threshold Voltage | $V_{\text{th(off)}}$ | U_P-V_{UPC} , V_P-V_{VPC} , W_P-V_{WPC} , $U_N \cdot V_N \cdot W_N \cdot B_r-V_{NC}$ | 1.7 | 2.0 | 2.3 | Volts |
| PWM Input Frequency | f_{PWM} | 3- ϕ Sinusoidal | — | 15 | 20 | kHz |
| Fault Output Current | $I_{\text{FO(H)}}$ | $V_D = 15\text{V}$, $V_{\text{FO}} = 15\text{V}$ | — | — | 0.01 | mA |
| | $I_{\text{FO(L)}}$ | $V_D = 15\text{V}$, $V_{\text{FO}} = 15\text{V}$ | — | 10 | 15 | mA |
| Minimum Fault Output Pulse Width | t_{FO} | $V_D = 15\text{V}$ | 1.0 | 1.8 | — | ms |

Sep.2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PM15RSH120

FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGEAbsolute Maximum Ratings, $T_j = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified

| | Symbol | Ratings | Units |
|--|------------------------|-------------|------------------|
| Power Device Junction Temperature | T_j | -20 to 150 | $^\circ\text{C}$ |
| Storage Temperature | T_{stg} | -40 to 125 | $^\circ\text{C}$ |
| Case Operating Temperature | T_C | -20 to 100 | $^\circ\text{C}$ |
| Mounting Torque, M4 Mounting Screws | — | 0.98 ~ 1.47 | N · m |
| Module Weight (Typical) | — | 100 | Grams |
| Supply Voltage Protected by OC and SC ($V_D = 13.5 - 16.5\text{V}$, Inverter Part, $T_j = 125^\circ\text{C}$) | $V_{\text{CC(prot.)}}$ | 800 | Volts |
| Isolation Voltage (Main Terminal to Baseplate, AC 1 min.) | V_{iso} | 2500 | V_{rms} |

Control Sector

| | | | |
|--|------------------|----|-------|
| Supply Voltage (Applied between $V_{\text{UP1}}-V_{\text{UPC}}$, $V_{\text{VP1}}-V_{\text{VPC}}$, $V_{\text{WP1}}-V_{\text{WPC}}$, $V_{\text{N1}}-V_{\text{NC}}$) | V_D | 20 | Volts |
| Input Voltage (Applied between U_P-V_{UPC} , V_P-V_{VPC} , W_P-V_{WPC} , $U_N \cdot V_N \cdot W_N \cdot B_r-V_{\text{NC}}$) | V_{CIN} | 20 | Volts |
| Fault Output Supply Voltage Applied between ($U_{\text{FO}}-V_{\text{UPC}}$, $V_{\text{FO}}-V_{\text{VPC}}$, $W_{\text{FO}}-V_{\text{WPC}}$, F_O-V_{NC}) | V_{FO} | 20 | Volts |
| Fault Output Current (Sink Current at U_{FO} , V_{FO} , W_{FO} and F_O Terminal) | I_{FO} | 20 | mA |

IGBT Inverter Sector

| | | | |
|--|------------------------|------|---------|
| Collector-Emitter Voltage ($V_D = 15\text{V}$, $V_{\text{CIN}} = 15\text{V}$) | V_{CES} | 1200 | Volts |
| Collector Current, ($T_C = 25^\circ\text{C}$) | I_C | 15 | Amperes |
| Peak Collector Current, ($T_C = 25^\circ\text{C}$) | I_{CP} | 30 | Amperes |
| Supply Voltage (Applied between P - N) | V_{CC} | 900 | Volts |
| Supply Voltage, Surge (Applied between P - N) | $V_{\text{CC(surge)}}$ | 1000 | Volts |
| Collector Dissipation | P_C | 83 | Watts |

Brake Sector

| | | | |
|--|------------------------|------|---------|
| Collector-Emitter Voltage | V_{CES} | 1200 | Volts |
| Collector Current, ($T_C = 25^\circ\text{C}$) | I_C | 10 | Amperes |
| Peak Collector Current, ($T_C = 25^\circ\text{C}$) | I_{CP} | 20 | Amperes |
| Supply Voltage (Applied between P - N) | V_{CC} | 900 | Volts |
| Supply Voltage, Surge (Applied between P - N) | $V_{\text{CC(surge)}}$ | 1000 | Volts |
| Collector Dissipation | P_C | 41 | Watts |
| Diode Forward Current | I_F | 10 | Amperes |
| Diode DC Reverse Voltage | $V_{\text{R(DC)}}$ | 1200 | Volts |

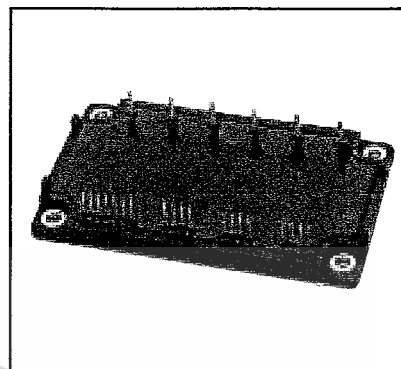
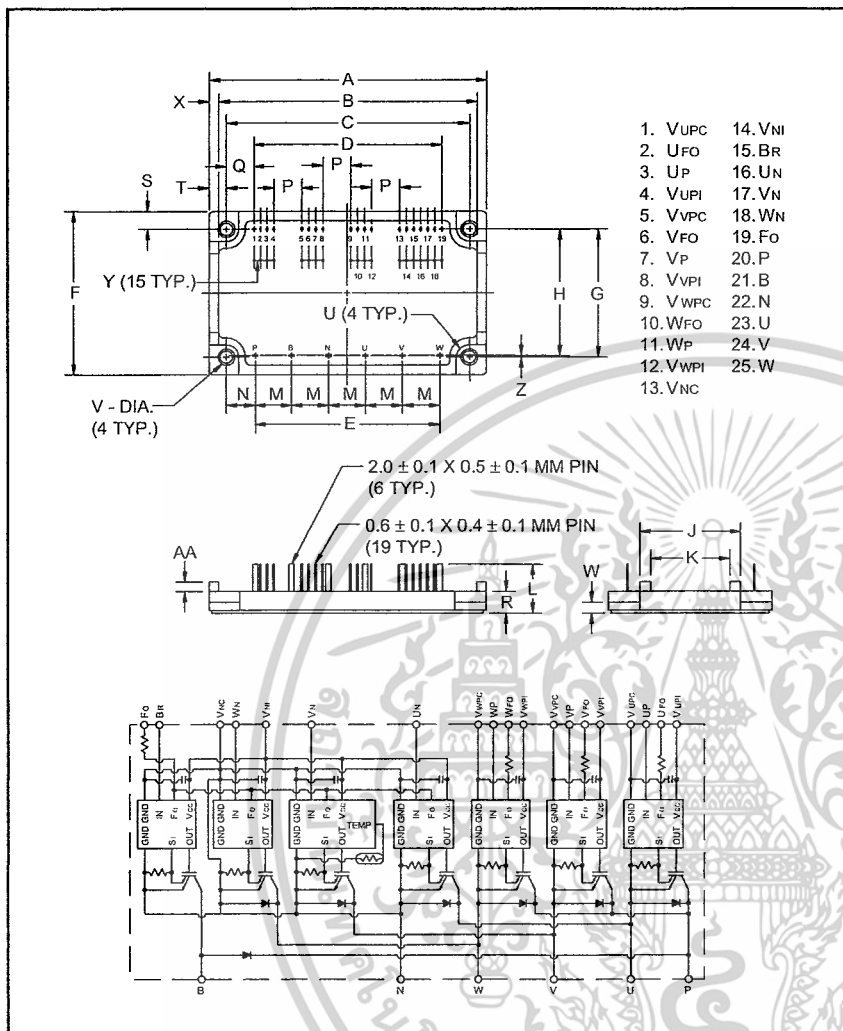
Sep.2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



PM15RSH120

FLAT-BASE TYPE
INSULATED PACKAGE



Description:

Mitsubishi Intelligent Power Modules are isolated base modules designed for power switching applications operating at frequencies to 20kHz. Built-in control circuits provide optimum gate drive and protection for the IGBT and free-wheel diode power devices.

Features:

- Complete Output Power Circuit
- Gate Drive Circuit
- Protection Logic
 - Short Circuit
 - Over Current
 - Over Temperature
 - Under Voltage

Applications:

- Inverters
- UPS
- Motion/Servo Control
- Power Supplies

Ordering Information:

Example: Select the complete part number from the table below -i.e. PM15RSH120 is a 1200V, 15 Ampere Intelligent Power Module.

| Type | Current Rating Amperes | V _{CES} Volts (x 10) |
|------|---------------------------|----------------------------------|
| PM | 15 | 120 |

Outline Drawing and Circuit Diagram

| Dimensions | Inches | Millimeters |
|------------|------------|-------------|
| A | 3.98±0.04 | 101.0±1.0 |
| B | 3.78 | 96.0 |
| C | 3.48±0.03 | 88.5±0.8 |
| D | 2.700±0.03 | 68.58±0.8 |
| E | 2.66±0.02 | 67.5±0.5 |
| F | 2.36±0.04 | 60.0±1.0 |
| G | 1.85±0.02 | 47.0±0.5 |
| H | 1.83±0.03 | 46.5±0.8 |
| J | 1.28 | 32.6 |
| K | 0.97 | 24.6 |
| L | 0.71±0.04 | 18.0±1.0 |
| M | 0.53±0.01 | 13.5±0.3 |

| Dimensions | Inches | Millimeters |
|------------|------------|-------------|
| N | 0.41 | 10.5 |
| P | 0.400 | 10.16 |
| Q | 0.392 | 9.96 |
| R | 0.31 | 8.0 |
| S | 0.26 | 6.5 |
| T | 0.246 | 6.25 |
| U | 0.18 Rad. | Rad. 4.5 |
| V | 0.18 Dia. | Dia. 4.5 |
| W | 0.17±0.02 | 4.4±0.5 |
| X | 0.10 | 2.5 |
| Y | 0.100±0.01 | 2.54±0.25 |
| Z | 0.02 | 0.5 |
| AA | 0.14 | 3.5 |





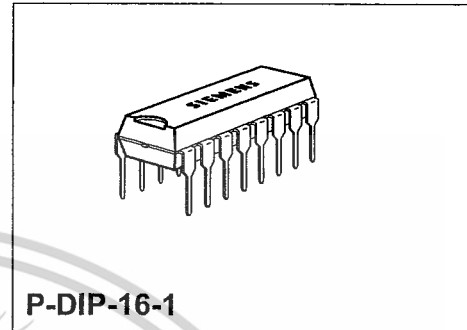
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Phase Control IC

TCA 785
Bipolar IC

Features

- Reliable recognition of zero passage
- Large application scope
- May be used as zero point switch
- LSL compatible
- Three-phase operation possible (3 ICs)
- Output current 250 mA
- Large ramp current range
- Wide temperature range

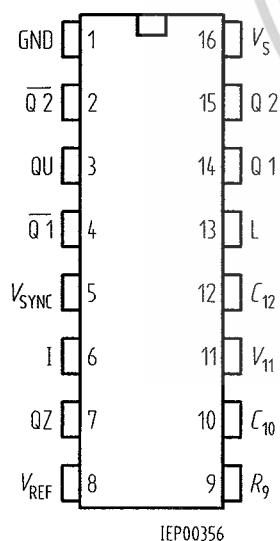

P-DIP-16-1

| Type | Ordering Code | Package |
|---------|---------------|------------|
| TCA 785 | Q67000-A2321 | P-DIP-16-1 |

This phase control IC is intended to control thyristors, triacs, and transistors. The trigger pulses can be shifted within a phase angle between 0 ° and 180 °. Typical applications include converter circuits, AC controllers and three-phase current controllers.

This IC replaces the previous types TCA 780 and TCA 780 D.

Pin Definitions and Functions



| Pin | Symbol | Function |
|-----|-------------------|---------------------|
| 1 | GND | Ground |
| 2 | Q2 | Output 2 inverted |
| 3 | QU | Output U |
| 4 | $\overline{Q2}$ | Output 1 inverted |
| 5 | V_{SYNC} | Synchronous voltage |
| 6 | I | Inhibit |
| 7 | QZ | Output Z |
| 8 | V_{REF} | Stabilized voltage |
| 9 | R_9 | Ramp resistance |
| 10 | C_{10} | Ramp capacitance |
| 11 | V_{11} | Control voltage |
| 12 | C_{12} | Pulse extension |
| 13 | L | Long pulse |
| 14 | Q 1 | Output 1 |
| 15 | Q 2 | Output 2 |
| 16 | V_s | Supply voltage |

Pin Configuration (top view)

Functional Description

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

This synchronization register controls a ramp generator, the capacitor C_{10} of which is charged by a constant current (determined by R_9). If the ramp voltage V_{10} exceeds the control voltage V_{11} (triggering angle φ), a signal is processed to the logic. Dependent on the magnitude of the control voltage V_{11} , the triggering angle φ can be shifted within a phase angle of 0° to 180° .

For every half wave, a positive pulse of approx. $30 \mu s$ duration appears at the outputs Q 1 and Q 2. The pulse duration can be prolonged up to 180° via a capacitor C_{12} . If pin 12 is connected to ground, pulses with a duration between φ and 180° will result.

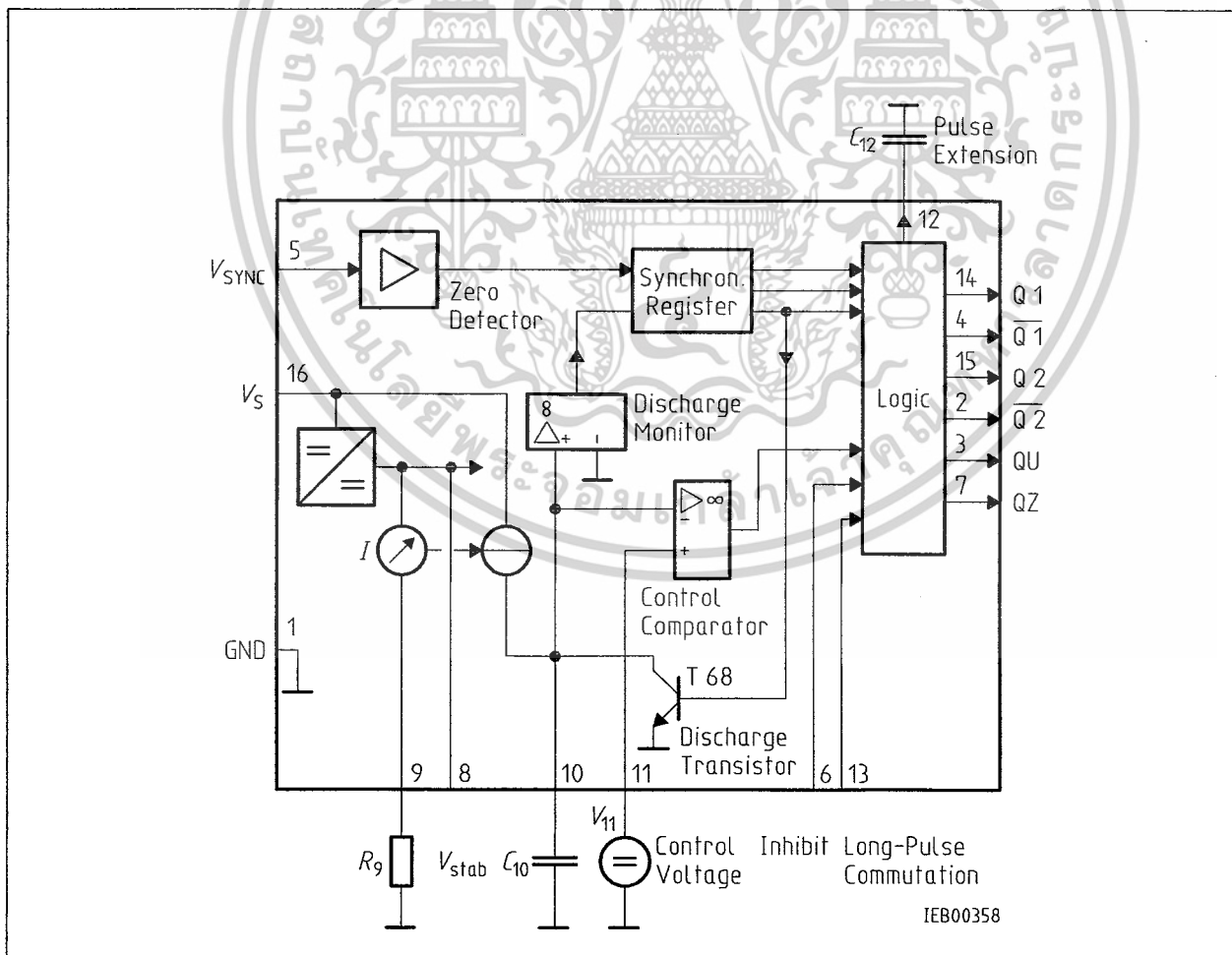
Outputs $\overline{Q}1$ and $\overline{Q}2$ supply the inverse signals of Q 1 and Q 2.

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

A signal which corresponds to the NOR link of Q 1 and Q 2 is available at output Q Z (pin 7).

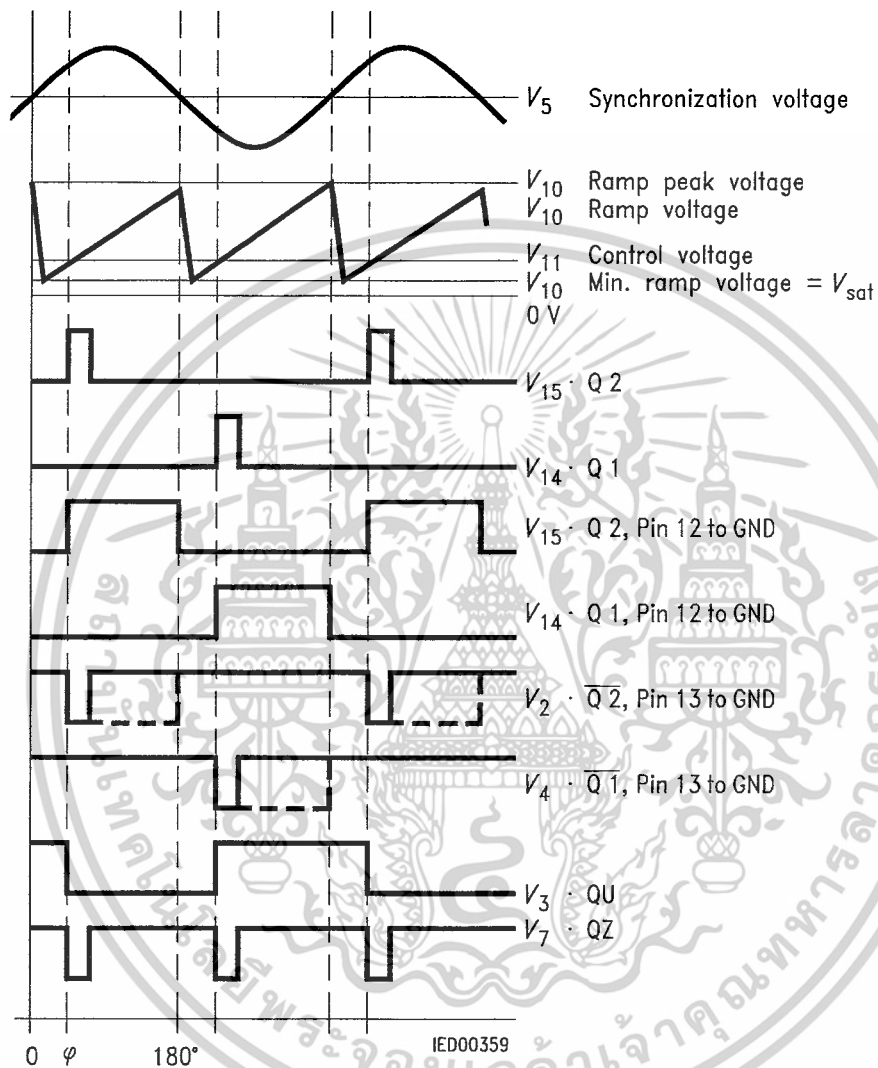
The inhibit input can be used to disable outputs Q1, Q2 and $\overline{Q}1$, $\overline{Q}2$.

Pin 13 can be used to extend the outputs $\overline{Q}1$ and $\overline{Q}2$ to full pulse length ($180^\circ - \varphi$).



Block Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
Semiconductor Group อื่นๆที่มีให้ที่อื่น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Pulse Diagram

Absolute Maximum Ratings

| Parameter | Symbol | Limit Values | | Unit |
|----------------------------------|-------------|--------------|-----------|-------------|
| | | min. | max. | |
| Supply voltage | V_S | - 0.5 | 18 | V |
| Output current at pin 14, 15 | I_Q | - 10 | 400 | mA |
| Inhibit voltage | V_6 | - 0.5 | V_S | V |
| Control voltage | V_{11} | - 0.5 | V_S | V |
| Voltage short-pulse circuit | V_{13} | - 0.5 | V_S | V |
| Synchronization input current | V_5 | - 200 | ± 200 | μA |
| Output voltage at pin 14, 15 | V_Q | | V_S | V |
| Output current at pin 2, 3, 4, 7 | I_Q | | 10 | mA |
| Output voltage at pin 2, 3, 4, 7 | V_Q | | V_S | V |
| Junction temperature | T_J | | 150 | $^{\circ}C$ |
| Storage temperature | T_{stg} | - 55 | 125 | $^{\circ}C$ |
| Thermal resistance system - air | $R_{th SA}$ | | 80 | K/W |

Operating Range

| | | | | |
|---------------------|-------|------|-----|-------------|
| Supply voltage | V_S | 8 | 18 | V |
| Operating frequency | f | 10 | 500 | Hz |
| Ambient temperature | T_A | - 25 | 85 | $^{\circ}C$ |

Characteristics

$8 \leq V_S \leq 18 \text{ V}; -25 \text{ }^{\circ}C \leq T_A \leq 85 \text{ }^{\circ}C; f = 50 \text{ Hz}$

| Parameter | Symbol | Limit Values | | | Unit | Test Circuit |
|---|--------------|--------------|------|---------------|------------|--------------|
| | | min. | typ. | max. | | |
| Supply current consumption S1 ... S6 open $V_{11} = 0 \text{ V}$ $C_{10} = 47 \text{ nF}; R_9 = 100 \text{ k}\Omega$ | I_S | 4.5 | 6.5 | 10 | mA | 1 |
| Synchronization pin 5 Input current | $I_{5 rms}$ | 30 | | 200 | μA | 1 |
| Offset voltage | ΔV_5 | | 30 | 75 | mV | 4 |
| Control input pin 11 Control voltage range | V_{11} | 0.2 | | $V_{10 peak}$ | V | 1 |
| Input resistance | R_{11} | | 15 | | k Ω | 5 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Characteristics (cont'd)
 $8 \leq V_s \leq 18 \text{ V}; -25 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_A \leq 85 \text{ }^\circ\text{C}; f = 50 \text{ Hz}$

| Parameter | Symbol | Limit Values | | | Unit | Test Circuit |
|---|-----------------------------|--------------|---------|-----------|------------------|--------------|
| | | min. | typ. | max. | | |
| Ramp generator | | | | | | |
| Charge current | I_{10} | 10 | | 1000 | μA | |
| Max. ramp voltage | V_{10} | | | $V_2 - 2$ | V | 1 |
| Saturation voltage at capacitor | V_{10} | 100 | 225 | 350 | mV | 1.6 |
| Ramp resistance | R_9 | 3 | | 300 | $\text{k}\Omega$ | 1 |
| Sawtooth return time | t_f | | 80 | | μs | 1 |
| Inhibit pin 6 | | | | | | |
| switch-over of pin 7 | | | | | | |
| Outputs disabled | V_{6L} | | 3.3 | 2.5 | V | 1 |
| Outputs enabled | V_{6H} | 4 | 3.3 | | V | 1 |
| Signal transition time | t_r | 1 | | 5 | μs | 1 |
| Input current | I_{6H} | | 500 | 800 | μA | 1 |
| $V_6 = 8 \text{ V}$ | | | | | | |
| Input current | $-I_{6L}$ | 80 | 150 | 200 | μA | 1 |
| $V_6 = 1.7 \text{ V}$ | | | | | | |
| Deviation of I_{10} | I_{10} | -5 | | 5 | % | 1 |
| $R_9 = \text{const.}$ | | | | | | |
| $V_s = 12 \text{ V}; C_{10} = 47 \text{ nF}$ | | | | | | |
| Deviation of I_{10} | I_{10} | -20 | | 20 | % | 1 |
| $R_9 = \text{const.}$ | | | | | | |
| $V_s = 8 \text{ V to } 18 \text{ V}$ | | | | | | |
| Deviation of the ramp voltage between 2 following half-waves, $V_s = \text{const.}$ | $\Delta V_{10 \text{ max}}$ | | ± 1 | | % | |
| Long pulse switch-over pin 13 | | | | | | |
| switch-over of S8 | | | | | | |
| Short pulse at output | V_{13H} | 3.5 | 2.5 | | V | 1 |
| Long pulse at output | V_{13L} | | 2.5 | 2 | V | 1 |
| Input current | I_{13H} | | | 10 | μA | 1 |
| $V_{13} = 8 \text{ V}$ | | | | | | |
| Input current | $-I_{13L}$ | 45 | 65 | 100 | μA | 1 |
| $V_{13} = 1.7 \text{ V}$ | | | | | | |
| Outputs pin 2, 3, 4, 7 | | | | | | |
| Reverse current | I_{CEO} | | | 10 | μA | 2.6 |
| $V_Q = V_s$ | | | | | | |
| Saturation voltage | V_{sat} | 0.1 | 0.4 | 2 | V | 2.6 |
| $I_Q = 2 \text{ mA}$ | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Semiconductor Group อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Characteristics (cont'd)
 $8 \leq V_S \leq 18 \text{ V}; -25 \text{ }^\circ\text{C} \leq T_A \leq 85 \text{ }^\circ\text{C}; f = 50 \text{ Hz}$

| Parameter | Symbol | Limit Values | | | Unit | Test Circuit |
|--|----------------|--------------|--------------------|--------------------|-------------------------|--------------|
| | | min. | typ. | max. | | |
| Outputs pin 14, 15 H-output voltage $-I_Q = 250 \text{ mA}$ | $V_{14/15H}$ | $V_S - 3$ | $V_S - 2.5$ | $V_S - 1.0$ | V | 3.6 |
| L-output voltage $I_Q = 2 \text{ mA}$ | $V_{14/15L}$ | 0.3 | 0.8 | 2 | V | 2.6 |
| Pulse width (short pulse) S9 open | t_p | 20 | 30 | 40 | μs | 1 |
| Pulse width (short pulse) with C_{12} | t_p | 530 | 620 | 760 | $\mu\text{s}/\text{nF}$ | 1 |
| Internal voltage control Reference voltage Parallel connection of 10 ICs possible | V_{REF} | 2.8 | 3.1 | 3.4 | V | 1 |
| TC of reference voltage | α_{REF} | | 2×10^{-4} | 5×10^{-4} | 1/K | 1 |

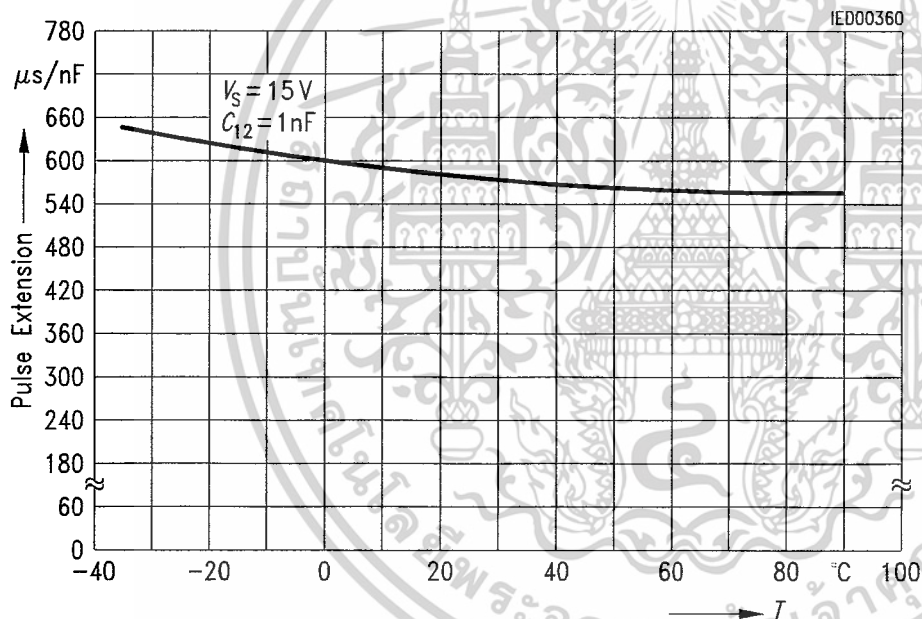
Application Hints for External Components

Ramp capacitance C_{10} min max
 500 pF 1 μF ¹⁾ The minimum and maximum values of I_{10} are to be observed

Triggering point $t_{Tr} = \frac{V_{11} \times R_9 \times C_{10}}{V_{REF} \times K}$ 2)

Charge current $I_{10} = \frac{V_{REF} \times K}{R_9}$ 2) Ramp voltage
 $V_{10 \max} = V_S - 2 \text{ V}$ $V_{10} = \frac{V_{REF} \times K \times t}{R_9 \times C_{10}}$ 2)

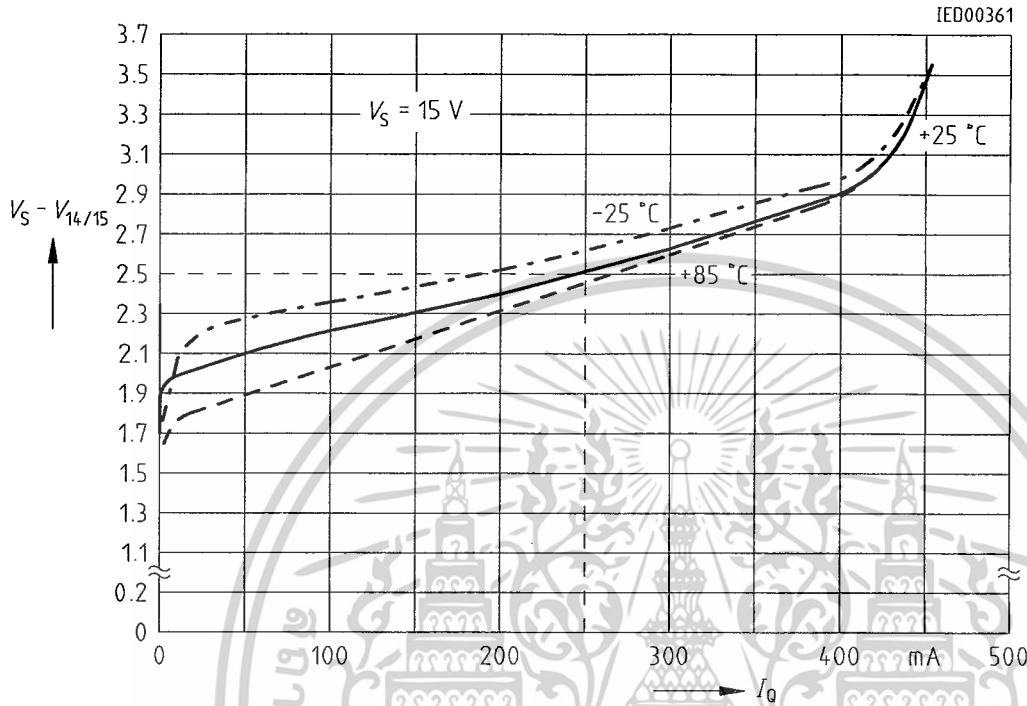
Pulse Extension versus Temperature



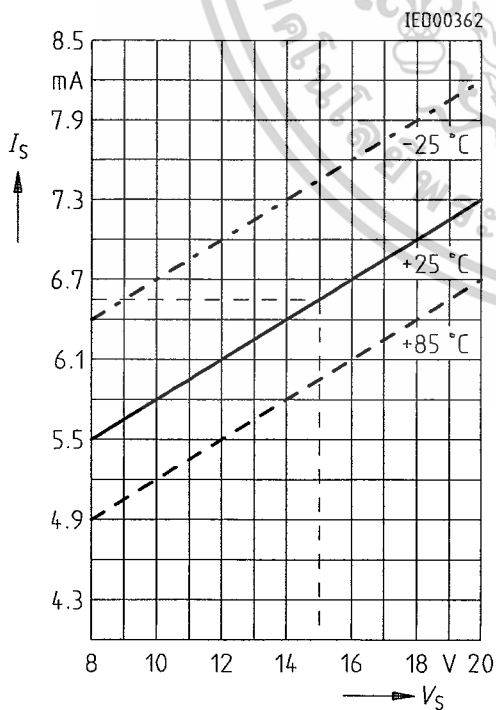
1) Attention to flyback times

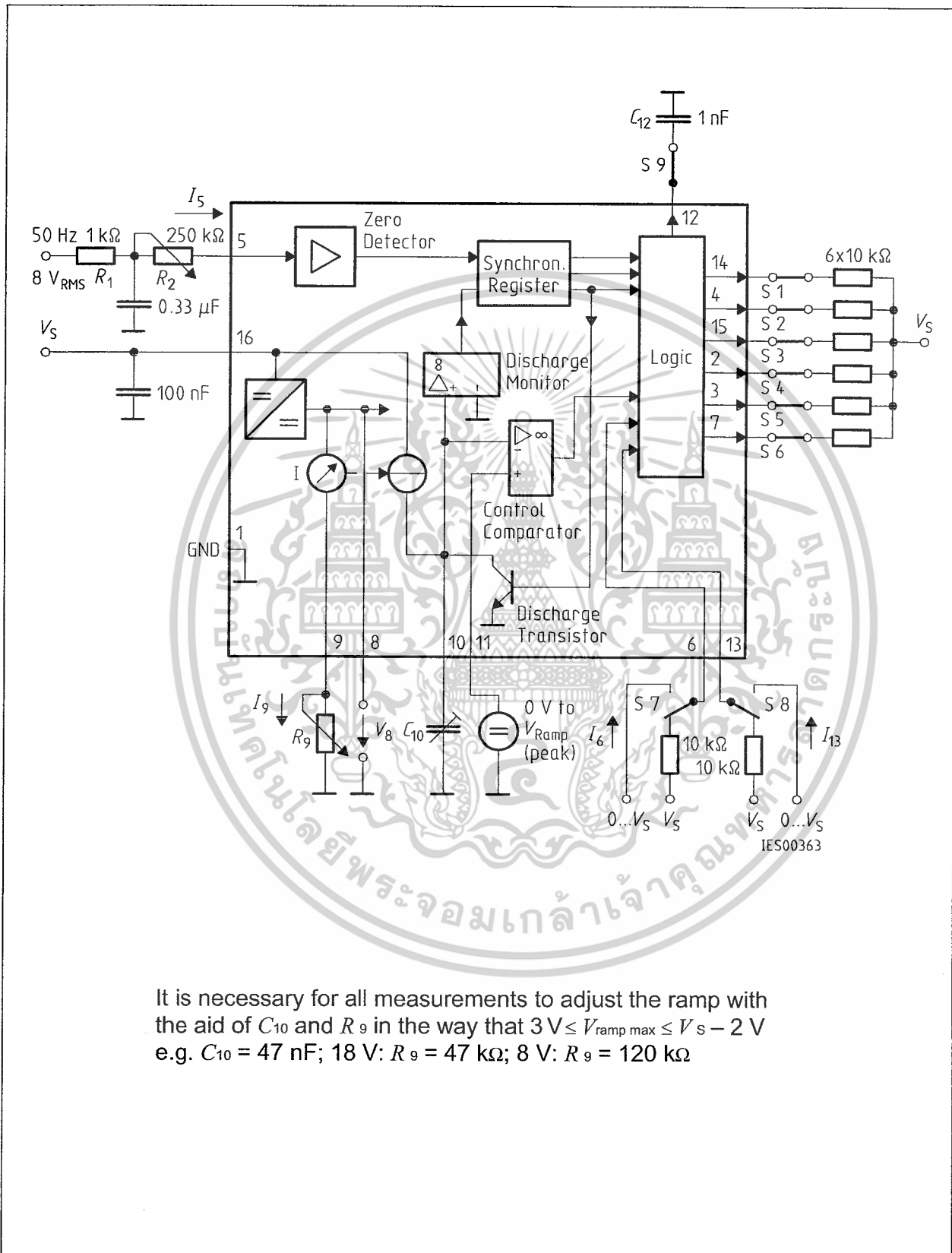
2) $K = 1.10 \pm 20 \%$

Output Voltage measured to + V_S



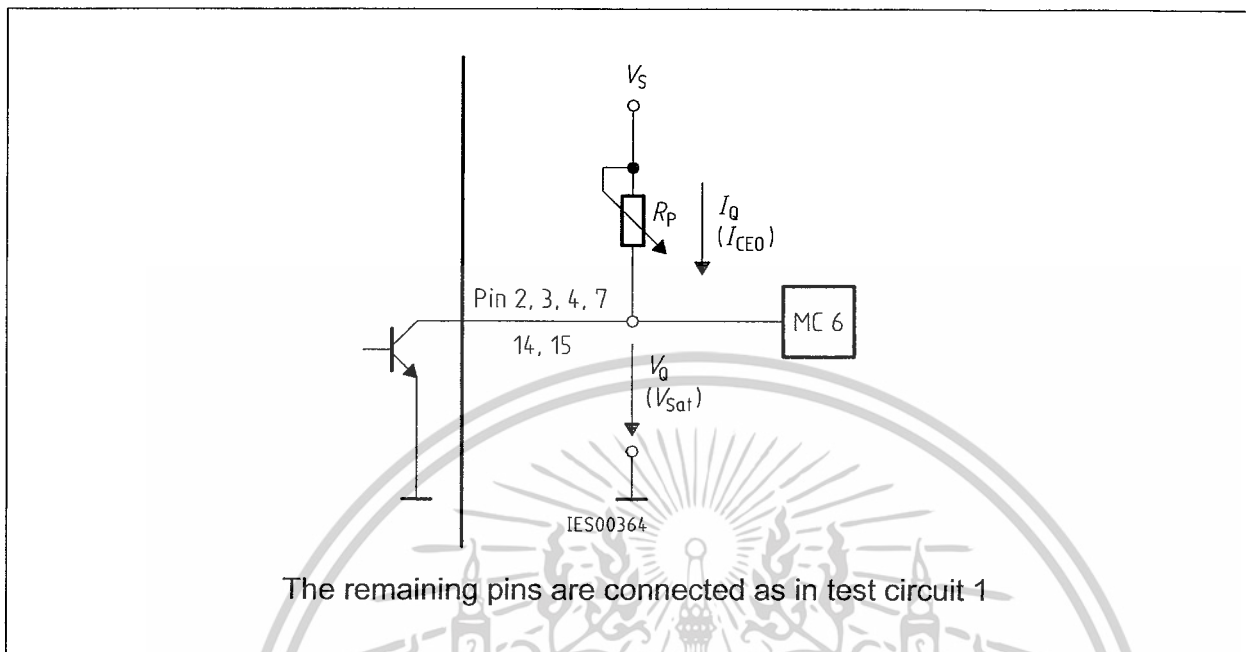
Supply Current versus Supply Voltage



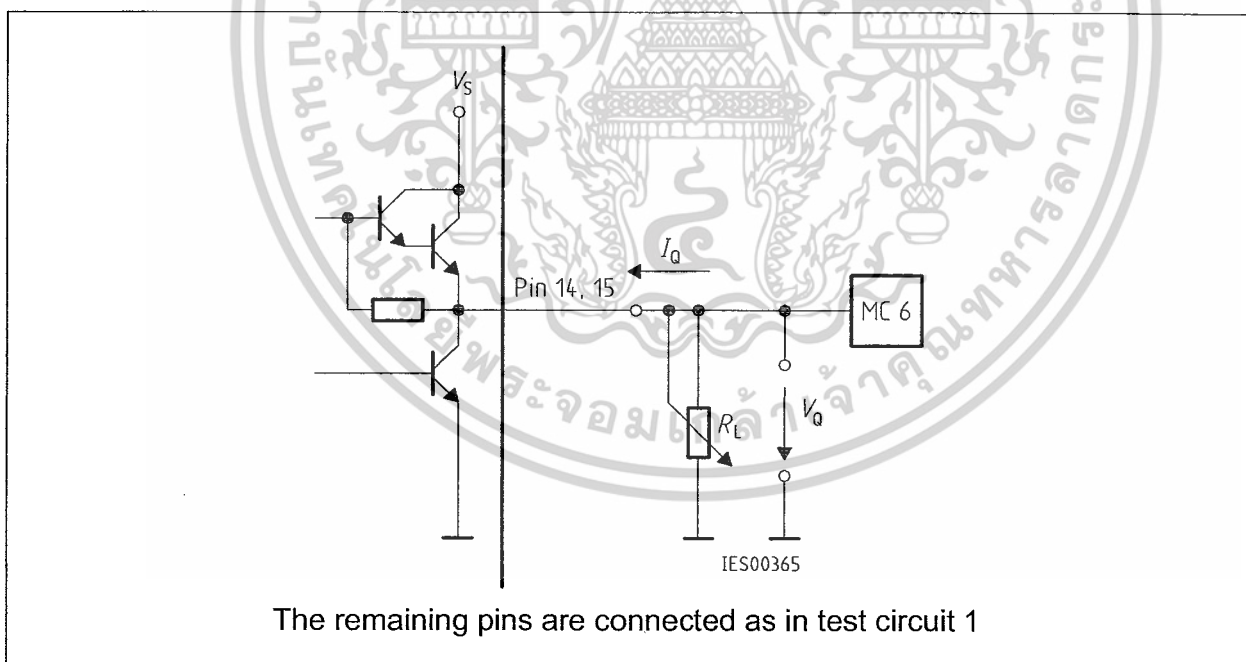


Test Circuit 1

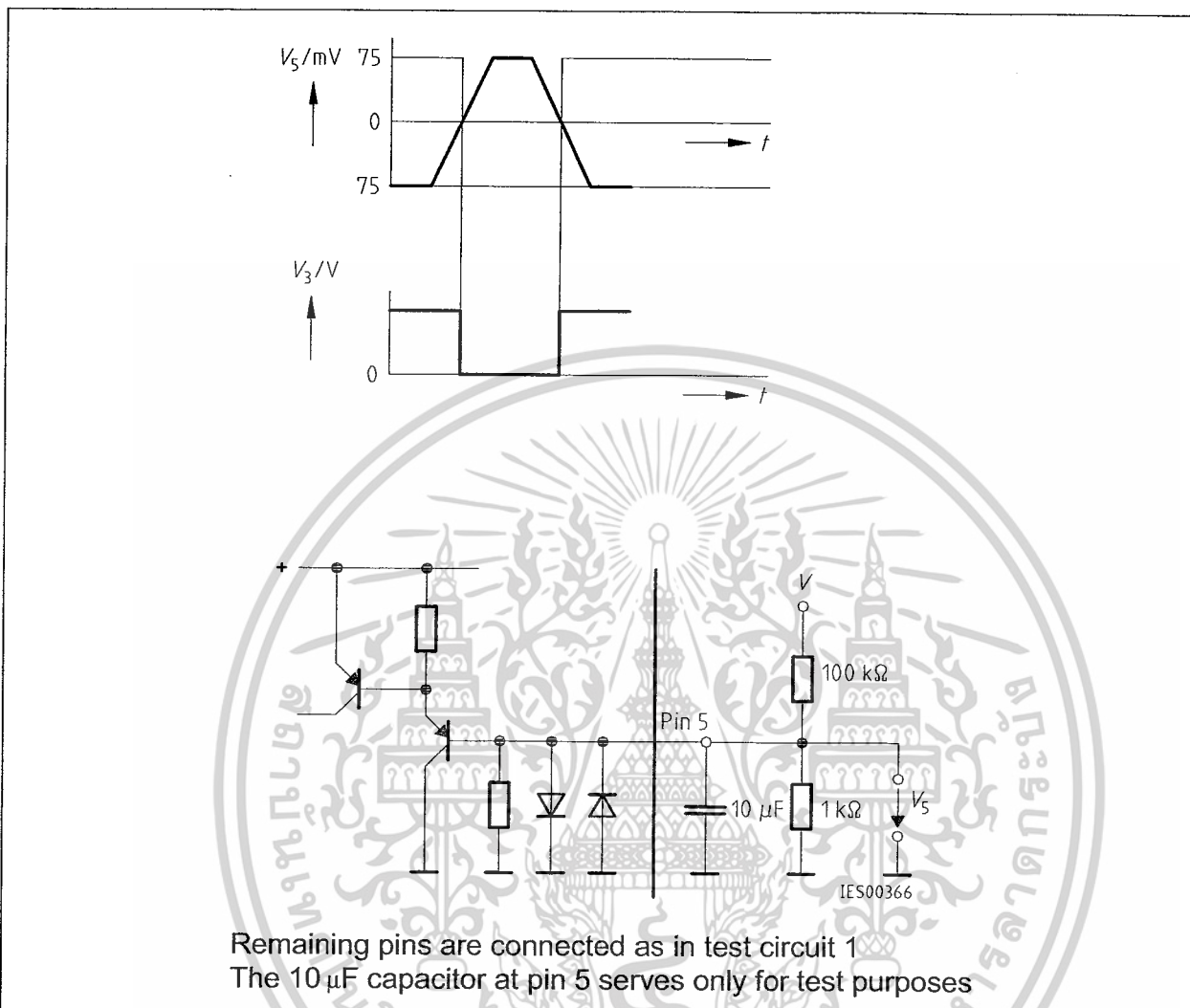
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 Semiconducter Group 9
 ณาการแต่ละที่สินค้า อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



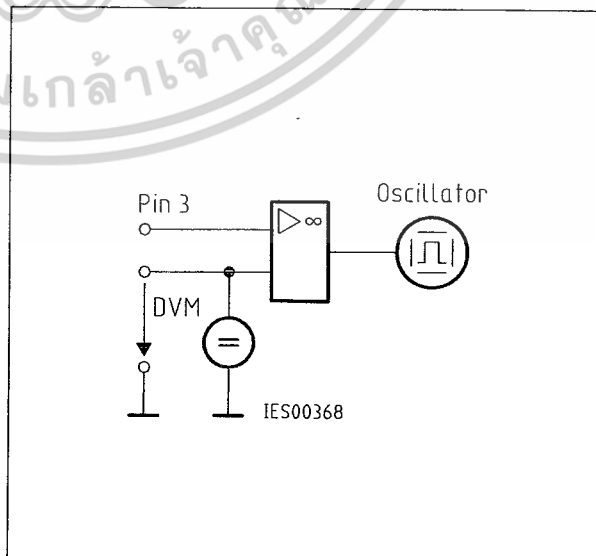
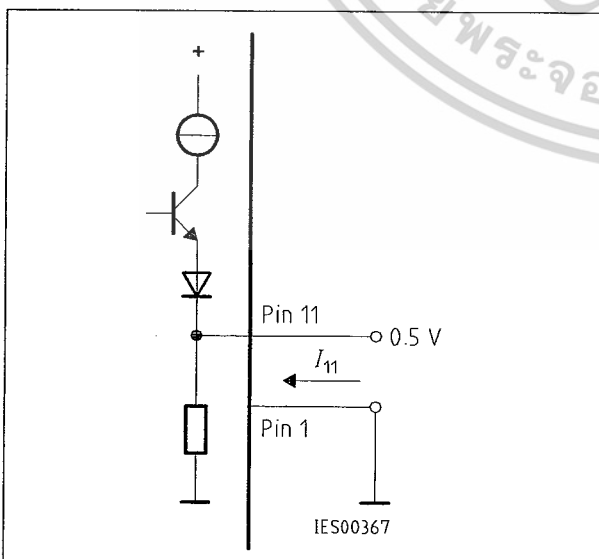
Test Circuit 2



Test Circuit 3



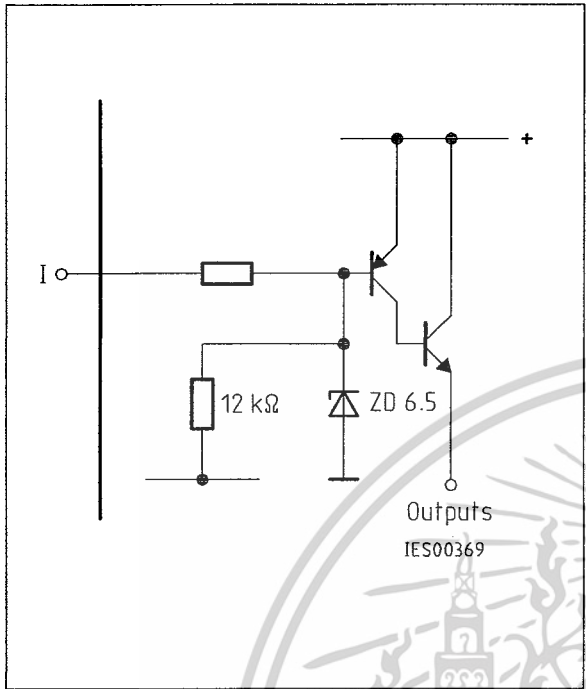
Test Circuit 4



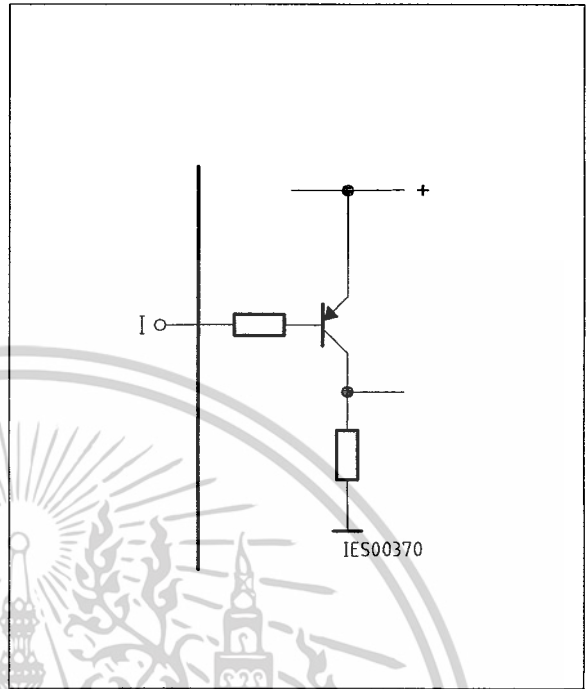
Test Circuit 5

Test Circuit 6

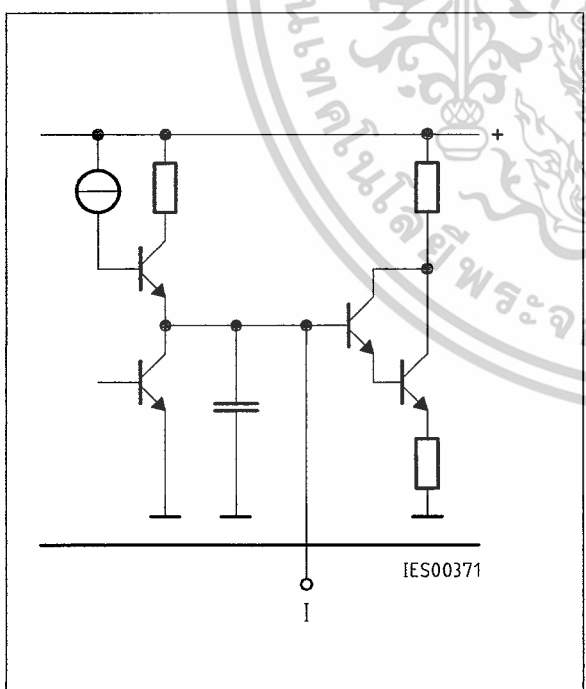
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
Semiconductor Group 11
แม้ว่ากรรมสิทธิ์ในลิขสิทธิ์อื่น ๆ อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



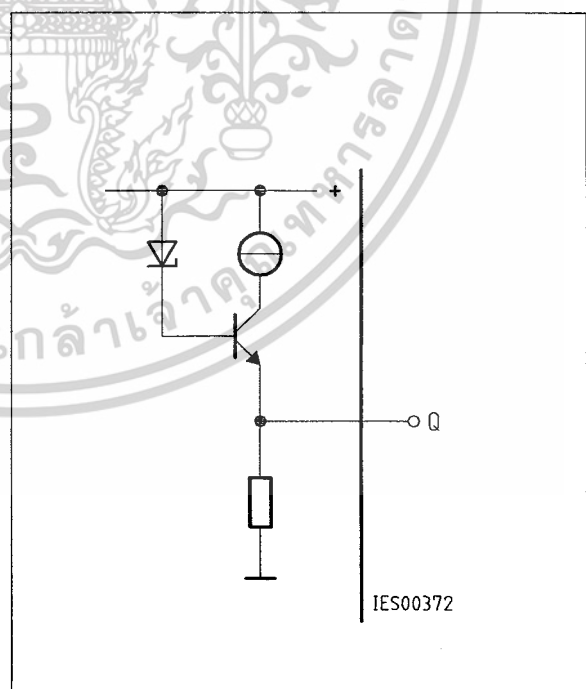
Inhibit 6



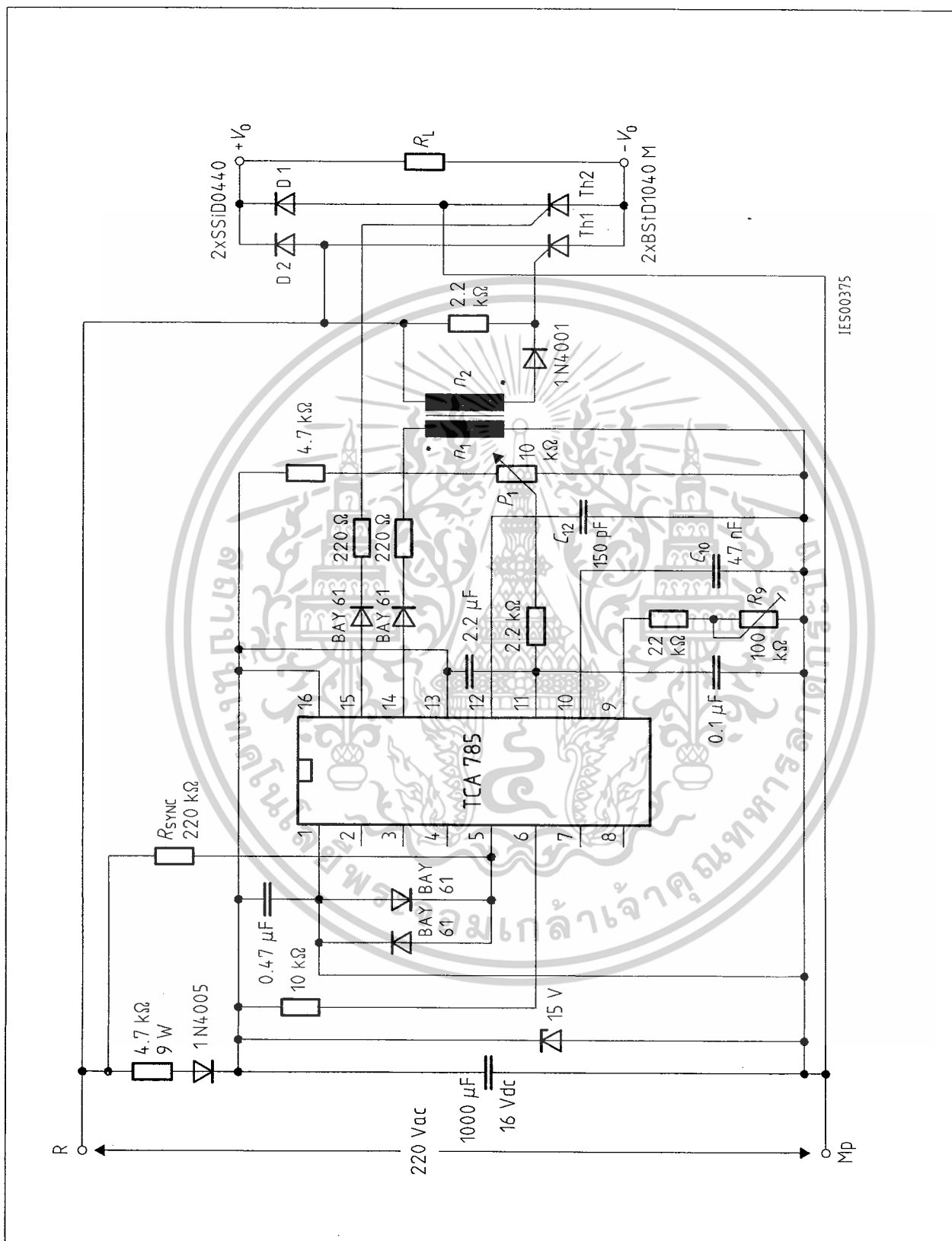
Long Pulse 13



Pulse Extension 12

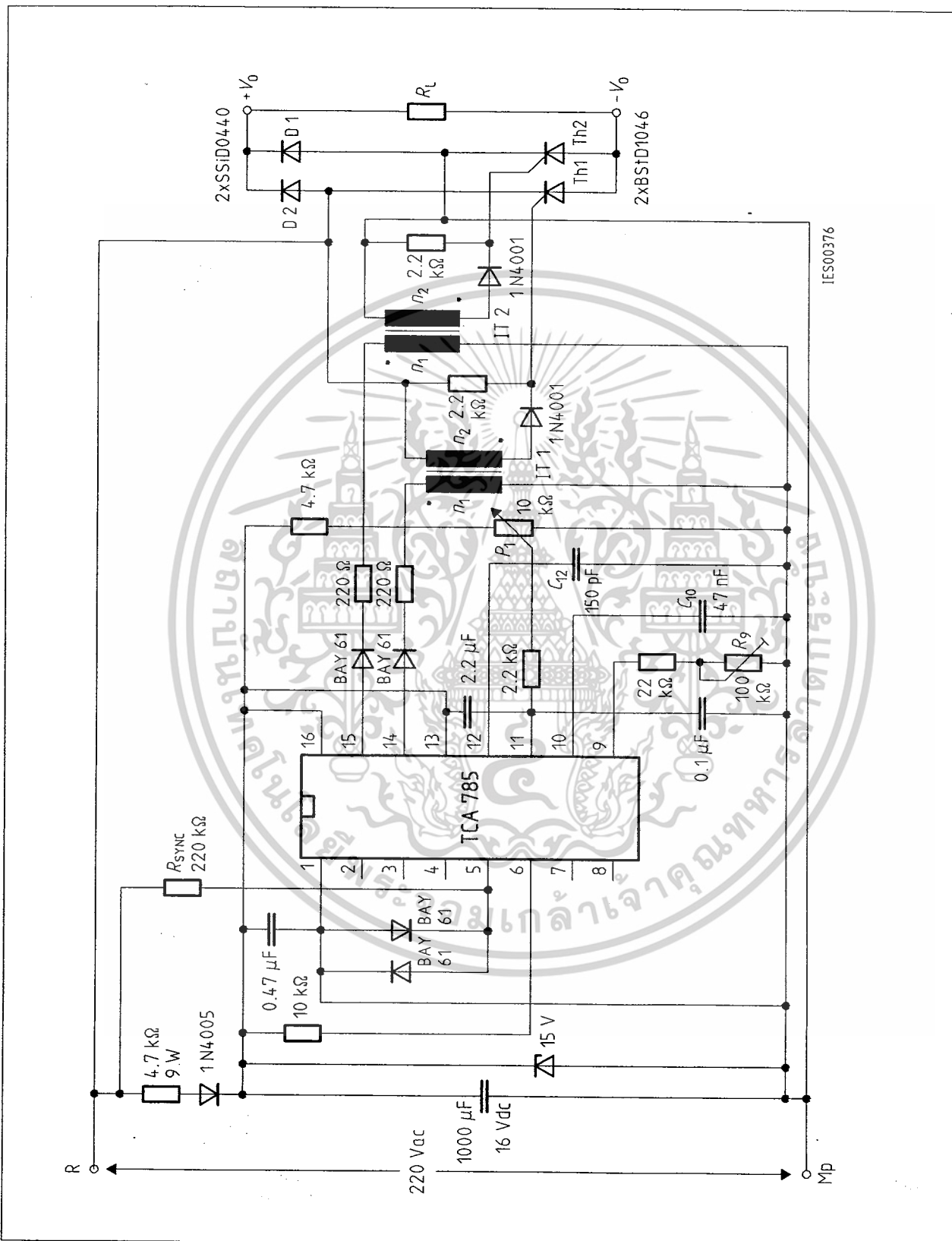


Reference Voltage 8



Half-Controlled Single-Phase Bridge Circuit with Trigger Pulse Transformer and Direct Control for Low-Power Thyristors

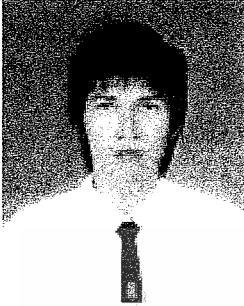
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
Semiconductor Group 15
เมื่อมีการแก้ไขใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Half-Controlled Single-Phase Bridge Circuit with Two Trigger Pulse Transformers for Low-Power Thyristors

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
Semiconductor Group 16
แม้ว่ากรรมสิทธิ์ในเอกสารนี้ยังคงเป็นของ Siemens อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



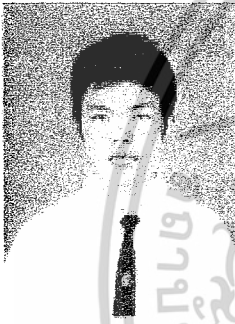
ชื่อ : นายณัฐวุฒิ สุรเกียรติชัย (ไ้ต) รหัส 48010282

วัน/เดือน/เกิด : 29/4/2530

ที่อยู่ : 3/56 หมู่ 3 ต.ท่ามะกา อ.ท่ามะกา จ.กาญจนบุรี 71120

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยม : โรงเรียนสารสิทธิ์พิทยาลัย จังหวัด ราชบุรี

e-mail : ottkung@hotmail.com



ชื่อ : นายภาคภูมิ สุดแสง (ต้า) รหัส 48010663

วัน/เดือน/เกิด : 17/1/2530

ที่อยู่ : 299/5 หมู่ 9 ต.บึงกาฬ อ.บึงกาฬ จ.หนองคาย 43140

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยม : โรงเรียนคณะราษฎรบำรุง จังหวัดยะลา

e-mail : magician_blackcaos@hotmail.com



ชื่อ : นายอนันต์ แตรพันธ์ (โหนก) รหัส 48011051

วัน/เดือน/เกิด : 1/6/2529

ที่อยู่ : 53/166 ถ.สุขยางค์ ต.สะเตง อ.เมืองยะลา จ.ยะลา 95000

สำเร็จการศึกษาระดับมัธยม : โรงเรียนคณะราษฎรบำรุง จังหวัดยะลา

e-mail : anan_baros@hotmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้