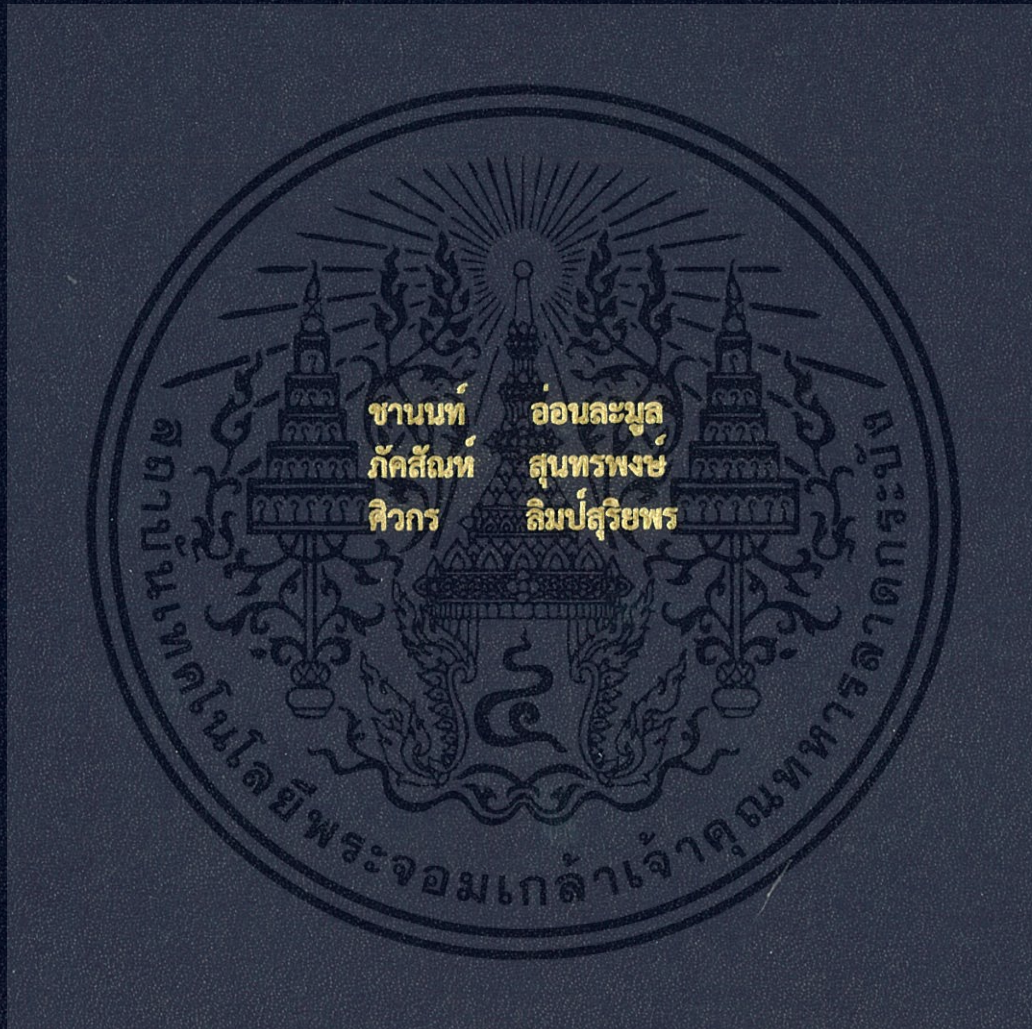


ระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น

LINEAR INDUCTION MOTOR CONTROLLER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

ระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น

LINEAR INDUCTION MOTOR CONTROLLER



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# LINEAR INDUCTION MOTOR CONTROLLER



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHATRONICS ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


# ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น

LINEAR INDUCTION MOTOR CONTROLLER

ผู้จัดทำ นายชานนท์ อ่อนละมุล 56010303  
นายภักดิ์สิทธิ์ สุนทรพงษ์ 56010910  
นายศิวกร ลิ้มปัสสุริยพร 56011221

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นนทวัฒน์ จุลเดชะ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น

โดย

นายชานนท์	อ่อนละมุล	56010303
นายภคัสสัณห์	สุนทรพงษ์	56010910
นายศิวกร	ลิมป์สุริยพร	56011221

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นนทวัฒน์ จุลเดชะ

ปีการศึกษา 2559

บทคัดย่อ

เนื่องจากปัจจุบันมนุษย์คิดค้นเทคโนโลยีใหม่ๆ ขึ้นมา เพื่ออำนวยความสะดวกสบาย และตอบสนองความต้องการที่ไม่สิ้นสุดของตัวเอง ซึ่งหนึ่งในเทคโนโลยีที่เป็นนวัตกรรมใหม่ในโลกของระบบขนส่ง ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา และประเทศไทยเริ่มมีความสนใจมากขึ้นก็คือ เทคโนโลยีรถไฟความเร็วสูง (Maglev, Magnetic Levitation Train) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ระบบการขับเคลื่อนด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อขับเคลื่อนด้วยความเร็วสูง ระบบนี้ได้ถูกสร้างขึ้นโดยใช้หลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น (Linear Induction Motor, LIM) ซึ่งหลักการของมอเตอร์ชนิดนี้ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานหลายด้าน ตั้งแต่งานที่ใช้ความเร็วไม่มาก อย่างเช่น ระบบประตูเลื่อน ระบบสายพานลำเลียง เครื่องมือจับและเก็บวัสดุ เครื่องกัด CNC และการทำงานที่ใช้ความเร็วสูงอย่างเช่นรถไฟความเร็วสูงดังกล่าว โครงการนี้มีวัตถุประสงค์จัดทำ Inverter ปรับความถี่เพื่อควบคุมความเร็วของรถไฟ Maglev แบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# LINEAR INDUCTION MOTOR CONTROLLER

By

Mr. Chanon Onramoon 56010303

Mr. Phakkasun Soontornphong 56010910

Mr. Sivakorn Limsuriyaporn 56011221

Advisor

Asst.Prof.Dr.Nontawat Chuladaycha

Academic Year 2016

## ABSTRACT

This project explores the construction process of a linear induction motor (LIM), the basic concepts behind key aspects of linear induction motor controller and the testing process of a working prototype. Making use of three phase systems, fundamental devices are used to produce a machine governed by means of electromechanical forces, based on varying magnetic fields and energy propagation all generated by three phased systems. Since the speed of LIM can be controlled by voltage and frequency variation, this project constructed a variable voltage variable frequency (VVF) controller that based on inverter. In addition, the boosted voltage/frequency ratio is suggested according to speed variation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงได้ดี เนื่องด้วยคำแนะนำ คำปรึกษา ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นนทวัฒน์ จุลเดชะ ซึ่งเป็นอาจารย์ควบคุมปริญญาานิพนธ์ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้ง และขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ความเข้าใจในเนื้อหาวิชาตั้งแต่เริ่มเข้ารับการศึกษา เพื่อนำความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณพี่ๆ ทุกท่านและเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษา ตลอดจนช่วยเหลือในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ของผู้จัดทำ ผู้มีพระคุณสูงสุด ผู้ให้โอกาสในการศึกษา ตลอดจนให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือด้านต่างๆ และเป็นกำลังใจในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สูงสุดต่อผู้ที่สนใจ และหากเกิดข้อผิดพลาดประการใด ทางคณะผู้จัดทำต้องขออภัยมา ณ โอกาสนี้

ผู้จัดทำ

ชานนท์

ภักดิ์สันต์

ศิวกกร

อ่อนละมุล

สุนทรพงษ์

ลิมป์สุริยพร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปริญญาโท	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น	3
2.1.1 พื้นฐานของแม่เหล็กไฟฟ้า	3
2.1.2 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuit)	3
2.1.3 แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive Force, mmf)	4
2.1.4 เส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux, $\phi$ )	4
2.2 หลักการทำงานเบื้องต้นของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น	4
2.3 แรงที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น	6
2.3.1 แรงผลัก (Thrust)	6
2.4 หลักการทำงานเบื้องต้นของอินเวอร์เตอร์	9
2.4.1 The Full-Bridge Converter	10
2.4.2 โมดูล Switching IPM	11

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 หลักการออกแบบและโครงสร้างของระบบ	15
3.1 อุปกรณ์สำหรับจำลองการทดลอง	15
3.1.1 โมดูลสวิตชิง	16
3.1.2 ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กทรอนิกส์	17
3.1.3 ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก	17
3.1.4 ซีเนอร์ไดโอด	18
3.1.5 ตัวต้านทาน	18
3.1.6 ตัวต้านทานปรับค่าได้	19
3.2 การออกแบบลายวงจรในโปรแกรม Altium Design	19
3.3 โครงสร้างทางกายภาพ	21
3.4 การประมวลผล	21
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	23
4.1 การทดลองสร้างสัญญาณ Six Step ในโปรแกรม Matlab	23
4.2 การทดลองสร้างสัญญาณ Six Step ผ่านโมดูลสวิตชิง IPM	24
4.3 การทดลองควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น	26
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	28
5.1 สรุปผลการทดลอง	28
5.2 ปัญหาที่พบและอุปสรรคที่พบ	28
5.3 แนวทางแก้ไข	29
เอกสารอ้างอิง	30
ภาคผนวก	31
ภาคผนวก ก เอกสารคู่มืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	เส้นทางเดินของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสเตเตอร์และโรเตอร์	5
2.2	กราฟลักษณะของสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น	6
2.3	แรงและทิศทางบนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น	7
2.4	วงจรเสมือน LIM	8
2.5	ขั้นตอนการทำงานของอินเวอร์เตอร์	9
2.6	วงจรไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์	10
2.7	ลักษณะวงจรคอนเวอร์เตอร์ ในการเปิด-ปิดสวิตชิง	10
2.8	กราฟแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในอินเวอร์เตอร์	11
2.9	วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส	12
2.10	กราฟการเปิดปิดของสวิตชิง	12
2.11	กราฟสัญญาณแรงดันแบบ Line-to-line Voltages	13
2.12	กราฟสัญญาณแรงดันแบบ Line-to-neutral Voltages	13
3.1	โมดูลสวิตชิงและอุปกรณ์ภายในวงจร	15
3.2	โมดูลสวิตชิง IPM รุ่น BM63364S	16
3.3	ขนาดของโมดูลสวิตชิง IPM	16
3.4	ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์	17
3.5	ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก	17
3.6	ซีเนอร์ไดโอด	18
3.7	ตัวต้านทาน	18
3.8	ตัวต้านทานปรับค่าได้	19
3.9	ลายวงจรของโมดูลสวิตชิงในโปรแกรม Altium Designer	20
3.10	ลายวงจรในโปรแกรม Altium Designer	20
3.11	โครงสร้างคำสั่งไมโครคอนโทรลเลอร์	22
4.1	ออกแบบระบบอินเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม Simulink	23

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (โวลต์) กับเวลา (วินาที)	24
4.3 สัญญาณควบคุมจาก Arduino	25
4.4 สัญญาณ Output จากโมดูลสวิตชิง IPM	25
4.5 การทดลองควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น	27
4.6 การทดลองควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น	27



# สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

4.1 ผลการทดลองความเร็วของมอเตอร์ที่ความถี่ของสัญญาณต่างๆ

26



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปริญญาโท

ปัจจุบันระบบการควบคุมเข้ามามีบทบาทต่อชีวิตประจำวัน และมีความสำคัญมากยิ่งขึ้น ดังจะเห็นได้จากการนำระบบการควบคุมไปใช้อุตสาหกรรม อีกทั้งยังมีส่วนในการพัฒนาเทคโนโลยีสมัยใหม่ในระบบอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งต่อมาระบบมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ดังนั้นในปัจจุบันจึงเกิดทฤษฎีการควบคุมขึ้นมากมายเพื่อให้สามารถควบคุมอุปกรณ์ดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น โดยคุณสมบัติของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้นที่มีการเคลื่อนที่อยู่นิ่งในแนวเส้นตรง แรงที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของเส้นแรงแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กที่อยู่บนส่วนที่อยู่กับสเตเตอร์ และส่วนที่เคลื่อนที่โรเตอร์ จึงอยู่ในรูปแรงผลักดัน ลักษณะเด่นประการหนึ่งของเครื่องจักรกลไฟฟ้าเชิงเส้นคือจะมีแรงอีกชุดหนึ่งเกิดขึ้นคือแรงในแนวตั้งฉาก ซึ่งจะไม่พบในเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบหมุนรอบ แรงในแนวตั้งฉากนี้มีประโยชน์ทำให้เกิดการยกตัวของรถแม่เหล็กไฟฟ้าความเร็วสูง สามารถนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้กับการทำงานของรถไฟฟ้าทำให้สามารถยกตัวขึ้นเหนือราง ลดการเสียดทานกับตัวราง และทำให้ตัวรถสามารถเคลื่อนที่ไปตามรางได้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท

1. เพื่อศึกษาการทำงานพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น 3 เฟส
2. เพื่อศึกษาการควบคุมความเร็วเชิงเส้น และควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น
3. เพื่อศึกษาการเบรกมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น 3 เฟสด้วยไฟฟ้ากระแสตรง
4. เพื่อศึกษาหลักการการทำงานของอินเวอร์เตอร์

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส
2. ศึกษาควบคุมตำแหน่ง และความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น
3. ออกแบบและสร้างชุดทดลองอินเวอร์เตอร์เพื่อควบคุมความเร็ว
4. ศึกษาการเบรคมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น 3 เฟสด้วยไฟฟ้ากระแสตรง
5. การทดลอง บันทึก และสรุปผล

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้เกี่ยวกับการทำงานพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น 3 เฟส
2. ได้แบบจำลองชุดอินเวอร์เตอร์
3. ได้รับความรู้เกี่ยวกับการเบรคมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น 3 เฟสด้วยกระแสไฟฟ้ากระแสตรง
4. สามารถนำโครงการนี้ไปประยุกต์ด้านอื่นๆ ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น

ในการศึกษาเรื่องของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นให้เข้าใจได้ง่ายนั้น ผู้ศึกษาจำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานทางด้านวงจรแม่เหล็กเป็นอย่างดีเสียก่อน ซึ่งหลักการของแม่เหล็กพื้นฐานพอจะกล่าวรายละเอียดได้ ดังนี้

#### 2.1.1 พื้นฐานของแม่เหล็กไฟฟ้า

กฎของการเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ Faraday ได้เป็นผู้ค้นพบใน ปี ค.ศ. 1831 ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ว่าด้วยการเกิดการเหนี่ยวนำของแรงเคลื่อนไฟฟ้า และต่อมาได้มีการพัฒนาต่อมาโดย Lenz ซึ่งพอจะสรุปกฎเหล่านี้ได้ คือ

กฎข้อที่ 1 กฎของเลนซ์ (Lenz's Law) กล่าวไว้ว่า ในวงจรปิดใดๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงของกระแสในวงจรย่อมทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นในวงจรมันๆ โดยแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับการไหลของกระแสในวงจรมันๆ

กฎข้อที่ 2 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) กล่าวไว้ว่า การเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างปลายขดลวดหรือลูปนั้นๆ จะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กที่ล้อมรอบขดลวดนั้นๆ หรือการเหนี่ยวนำของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างปลายของขดลวดตัวนำอันนั้น จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการที่ตัวนำตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็กต่อหนึ่งหน่วยเวลา

#### 2.1.2 วงจรแม่เหล็ก (Magnetic Circuit)

ในวงจรไฟฟ้าทั่วไป กฎของโอห์ม (Ohm's Law) จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กระแส และความต้านทาน ส่วนในเรื่องของวงจรแม่เหล็กนั้นก็จะมีลักษณะคล้ายกันแต่พารามิเตอร์ที่ใช้จะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม คือ

$$\Phi = \frac{mmf}{R} \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 แรงเคลื่อนแม่เหล็ก (Magnetomotive Force, mmf)

แรงเคลื่อนแม่เหล็กเป็นพลังงานรูปหนึ่ง ที่ใช้ในการเคลื่อนที่หนึ่งหน่วยขั้วแม่เหล็กให้วงจรแม่เหล็กวงครบบนหรืออาจจะพิจารณาว่าเป็นความสามารถในการทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กของขดลวดใดๆ ขดหนึ่ง แรงเคลื่อนแม่เหล็กในวงจรแม่เหล็กนั้นเป็นส่วนโดยตรงกับกระแสไหลผ่านขดลวดกับจำนวนรอบของขดลวดนั้น และมีหน่วยเป็น แอมป์-รอบ (Amp-Turns)

$$mmf = NI \quad (2.2)$$

เมื่อ  $N$  = จำนวนรอบของขดลวด (รอบ)

$I$  = กระแส (แอมแปร์)

### 2.1.4 เส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic Flux, $\phi$ )

เส้นแรงแม่เหล็กคือ เส้นแรงที่เกิดจากแม่เหล็กจะส่งอำนาจความเป็นแม่เหล็กออกมารอบตัวเองโดยมีทิศทางของเส้นแรงวิ่งออกจากขั้วเหนือ (N) ไปยังขั้วใต้ (S) ภายนอกแท่งแม่เหล็ก และวิ่งออกจากขั้วใต้ (S) ไปยังขั้วเหนือ (N) ภายในแท่งแม่เหล็ก

## 2.2 หลักการทำงานเบื้องต้นของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น

การเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นนั้นสามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีเดียวกันกับมอเตอร์หมุน กล่าวคือ เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้แก่ขดลวดด้านปฐมภูมิ (Primary) จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กทิศของมอเตอร์ขึ้นมา ( $F_2$ ) โดยแรงเคลื่อนแม่เหล็กนี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed :  $V_s$ )

$$V_s = 2pf \quad (\text{เมตรวินาที}) \quad (2.3)$$

$p$  = ความกว้าง Pole Pitch (เมตร)

$f$  = ความถี่ (เฮิร์ต)

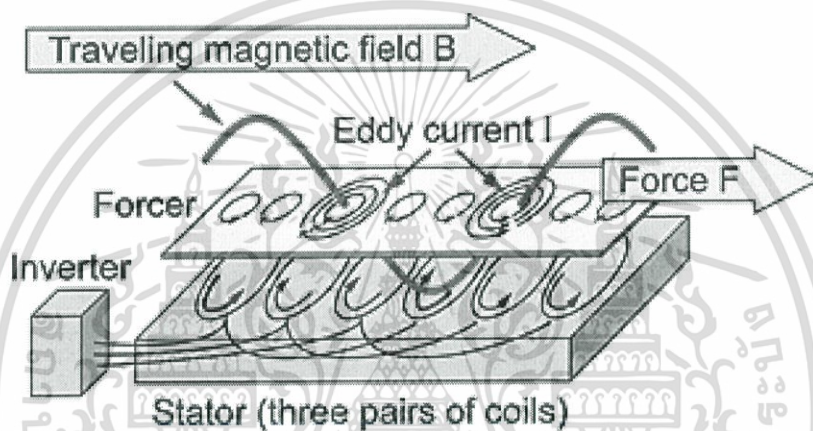
เมื่อสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดโรเตอร์ (Rotor) จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced emf) ที่โรเตอร์ และเกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กที่โรเตอร์ ( $F_2$ ) เมื่อแรง  $F_1$  และ  $F_2$  รวมกัน จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนแม่เหล็กลัพธ์ (Resultant mmf, R) มีค่าดังสมการที่ (2.4) ซึ่งแรงเคลื่อน

แม่เหล็กลัพธ์จะก่อให้เกิดเส้นแม่เหล็กในช่องอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = F_1 + F_2 \quad (2.4)$$

สำหรับแรงที่ทำให้โรเตอร์ (Rotor) เคลื่อนที่ได้ นั้นเกิดจากการเคลื่อนตัวของเส้นแรงแม่เหล็ก ด้านปฐม (Primary) ตัดแผ่นโลหะตัวนำ ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ด้านทุติยภูมิ (Secondary) และทำให้เกิดกระแสไหลวนตามกฎของเลนซ์คือ เมื่อมีแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านแผ่นตัวนำจะทำให้เกิดกระแสไหลเป็นวงปิดอยู่บนแผ่นโลหะตัวนำ โดยทิศทางของการไหลของกระแสที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางตรงข้ามกับเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งเข้ามาตัดกับแผ่นโลหะตัวนำ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เส้นทางเดินของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสเตเตอร์และโรเตอร์

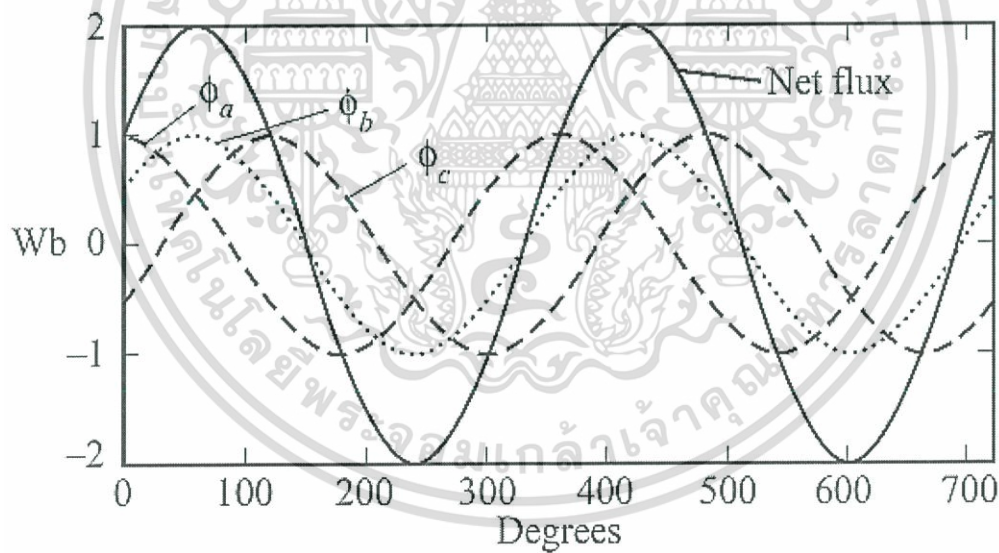
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของมอเตอร์ซิงโครนัส (Synchronous Machine) ที่ตัดแล้วคลี่ออกมา ขดลวดบนสเตเตอร์ นั้นพันในลักษณะที่มี 3 Slot/Pole/Phase ตำแหน่งของคลื่นมูลฐาน (Fundamental) แรงแเคลื่อนแม่เหล็กของทั้งสเตเตอร์ (Stator mmf) และโรเตอร์ (Rotor mmf) ในรูปนั้นจะแสดงขณะที่กระแสไฟฟ้าของ Phase a มีค่ามากที่สุด เมื่อเทียบกับ Phase b และ Phase c ซึ่งทำให้แรงแเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์ผ่านศูนย์กลางของกลุ่ม Phase a โดยเคลื่อนที่ด้วยความเร็วซิงโครนัส (Synchronous) และในรูปจะเห็นว่าแรงแเคลื่อนแม่เหล็กของโรเตอร์นำหน้าแรงแเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์ เป็นมุม  $\beta$  ซึ่งมุมนี้จะคงที่ในขณะ Steady State โดยได้แสดงลักษณะแรงแเคลื่อนแม่เหล็กของโรเตอร์ และแรงแเคลื่อนแม่เหล็กของสเตเตอร์ เมื่อนำแรงแเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf) ทั้งสองมาบวกกันแบบจุดต่อจุดตลอดช่วงความยาว Airgap จะทำให้สนามเกิดแม่เหล็กลัพธ์ (R) ออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากพิจารณาแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (mmf) จากสเตเตอร์ ( $F_1$ ) หากให้  $F_1$  เคลื่อนที่ไปในทิศทางขวาจะเสมือนว่าแผ่นตัวนำ หรือโรเตอร์ (Rotor) เคลื่อนไปทางซ้ายสัมพันธ์กับ  $F_1$  จากกฎมือขวาก็จะทำให้ได้ทิศทางของกระแสเหนี่ยวนำไหลผ่านตัวนำที่ไหลในแผ่นตัวนำ ดังนั้นกระแสเหนี่ยวนำที่อยู่ใต้ขั้วแม่เหล็กได้จะมีทิศทางพุ่งเข้าสู่กระดาษ จากที่รู้มาว่าเมื่อมีกระแสตัดสนามแม่เหล็กจะเกิดแรงกระทำต่อต้านทุติยภูมิ (Secondary) ซึ่งมีขนาดดังสมการที่ (2.5)

$$F = ILB \quad (2.5)$$

โดย F คือ แรงที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ  
 I คือ กระแสเหนี่ยวนำ  
 L คือ ความยาวของตัวนำ  
 B คือ ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก

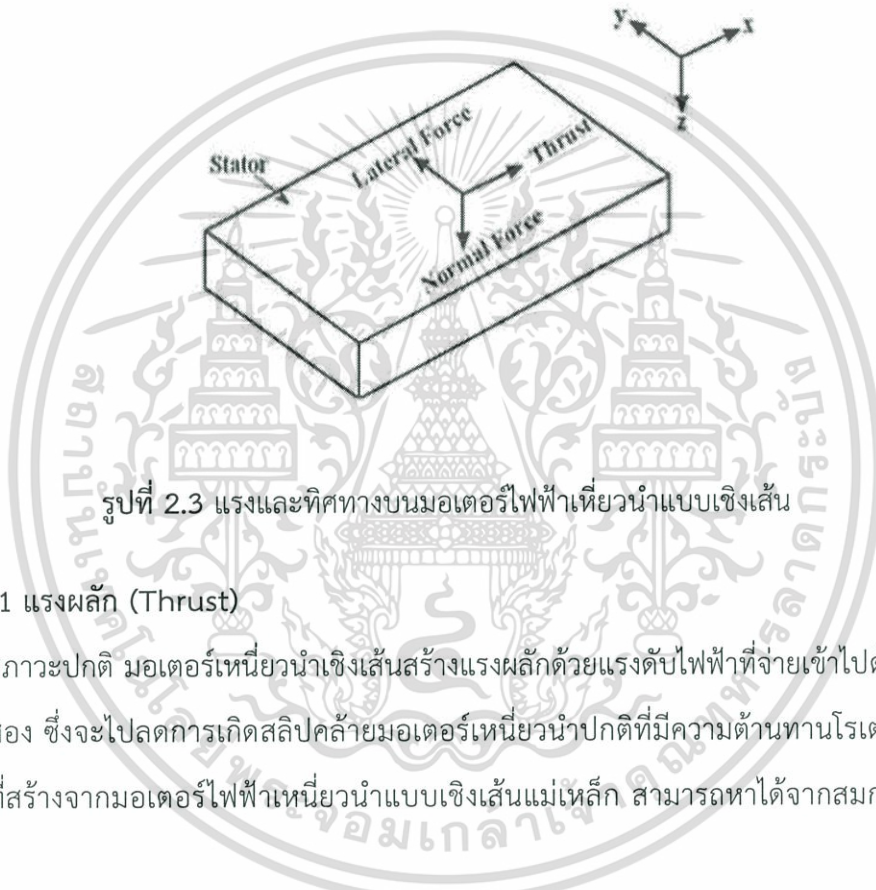


รูปที่ 2.2 กราฟแสดงลักษณะของสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 แรงที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น

แรงที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นโดยหลักประกอบด้วย แรงผลัก (Thrust), แรงตั้งฉาก (Normal Force) และแรงด้านข้าง (Lateral Force) ซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.3 โดยโครงการวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับแรงผลักและความสัมพันธ์ที่แปรผันกับแรงผลัก แรงตั้งฉากจะมีทิศทางตั้งฉากกับสเตเตอร์ในแนวแกน Z ส่วนแรงด้านข้างหรือแรงในแนวระนาบเป็นแรงที่ไม่ได้รับความสนใจในการพัฒนารถไฟฟ้าแม่เหล็กเนื่องจากรถไฟแม่เหล็กชุดนี้วิ่งเกาะขอบราง



รูปที่ 2.3 แรงและทิศทางบนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น

### 2.3.1 แรงผลัก (Thrust)

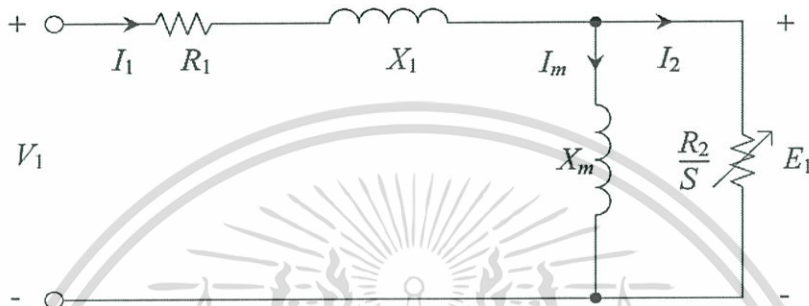
ในสภาวะปกติ มอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นสร้างแรงผลักด้วยแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปด้วยสัดส่วนยกกำลังสอง ซึ่งจะไปลดการเกิดสลลิปคล้ายมอเตอร์เหนี่ยวนำปกติที่มีความต้านทานโรเตอร์สูง โดยแรงผลักที่สร้างจากมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นแม่เหล็ก สามารถหาได้จากสมการที่ (2.6)

$$F_S = \frac{P_o}{V_C} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $P_o$  คือ พลังงานทางกลที่แปลงมาจากโรเตอร์ หรือพลังงานส่งออก

$V_C$  คือ ความเร็วเชิงเส้นของโรเตอร์

เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจึงใช้วงจรทางไฟฟ้าในการอธิบายสมการระหว่างแรงผลึกกับแรงทางไฟฟ้า จึงต้องสร้างวงจรเสมือนเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้า โดยทั่วไปรวมทั้งมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นโดยจำลองวงจรพื้นฐานต่อเฟสเดียว เนื่องจากค่าลิกเกจรีแอกแตนซ์ด้านทุติยภูมิมีค่าน้อยกว่าค่าลิกเกจรีแอกแตนซ์ด้านปฐมภูมิมาก จึงเกิดเสมือนมีค่าเป็น 0 ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรเสมือน LIM

จากวงจรเสมือนกำลังไฟฟ้าที่ป้อนเข้าจะสูญเสียจากความต้านทานทางฝั่งปฐมภูมิและทุติยภูมิ สามารถเขียนสมการของ  $P_o$  ดังนี้

$$P_o = mI_2^2 \frac{R_2}{s} - mI_2^2 R_2 = mI_2^2 R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right) \quad (2.7)$$

เมื่อเอาสมการ  $P_o$  และสมการความเร็วสลลิปแทนลงในสมการที่ (2.6) จะได้สมการใหม่เป็น

$$F_s = \frac{mI_2^2 R_2}{V_s s} \quad (2.8)$$

และจากวงจรเสมือนสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_1$  และ  $I_2$  โดยที่  $R_2 = \frac{X_m}{G}$

$$I_2 = \frac{X_m}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_m^2}} I_1 = \frac{I_1}{\sqrt{\left(\frac{1}{Gs}\right)^2 + 1}} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการที่ (2.9) ลงในสมการ  $F_S$

$$F_S = \frac{mI_1^2 R_2}{\left[\frac{1}{(SG)^2} + 1\right] V_S S} \quad (2.10)$$

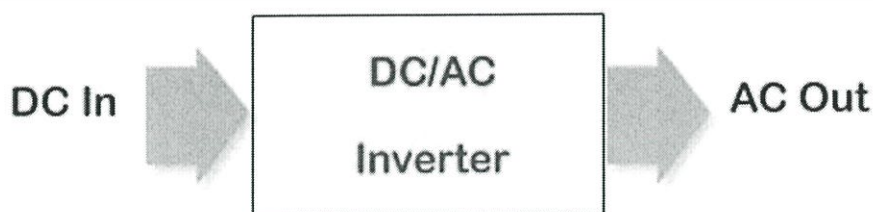
นอกจากนี้สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น ความเร็วต่ำ พฤติกรรมของแรงผลึก  $F_S$  สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.11)

$$F_S = \frac{3I_2^2 R_2}{S^2 \tau f_1} = \frac{3I_1^2 R_2}{S^2 \tau f_1 \left[\frac{1}{(SG_{ei})^2} + 1\right]} \quad (2.11)$$

## 2.4 หลักการทำงานเบื้องต้นของอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์คือ จะแปลงกระแสสลับ (AC) จากแหล่งจ่ายไฟทั่วไปที่มีแรงดันและความถี่คงที่ ให้เป็นกระแสตรง (DC) โดยวงจรคอนเวอร์เตอร์ (Converter Circuit) จากนั้นไฟกระแสตรงจะถูกแปลงเป็นกระแสไฟกระแสสลับที่สามารถปรับขนาดแรงดันและความถี่ได้ โดยวงจรอินเวอร์เตอร์ (Inverter Circuit) วงจรทั้งสองนี้จะเป็นวงจรหลักที่ทำหน้าที่แปลงรูปคลื่น และผ่านพลังงานของอินเวอร์เตอร์ การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นขึ้นอยู่กับค่าความถี่ของสัญญาณและแรงดันไฟฟ้า จึงใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมปัจจัยเหล่านี้

โดยทั่วไปแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับมีรูปคลื่นไซน์ แต่เอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะมีรูปคลื่นแตกต่างจากรูปไซน์ นอกจากนั้นยังมีชุดวงจรควบคุม (Control Circuit) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของวงจรคอนเวอร์เตอร์และวงจรอินเวอร์เตอร์ให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของ 3-phase Induction Motor ดังแสดงในรูปที่ 2.5

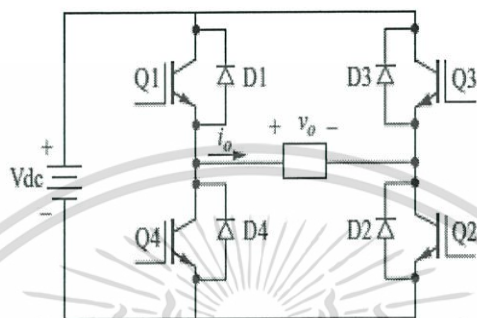


รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการทำงานของอินเวอร์เตอร์

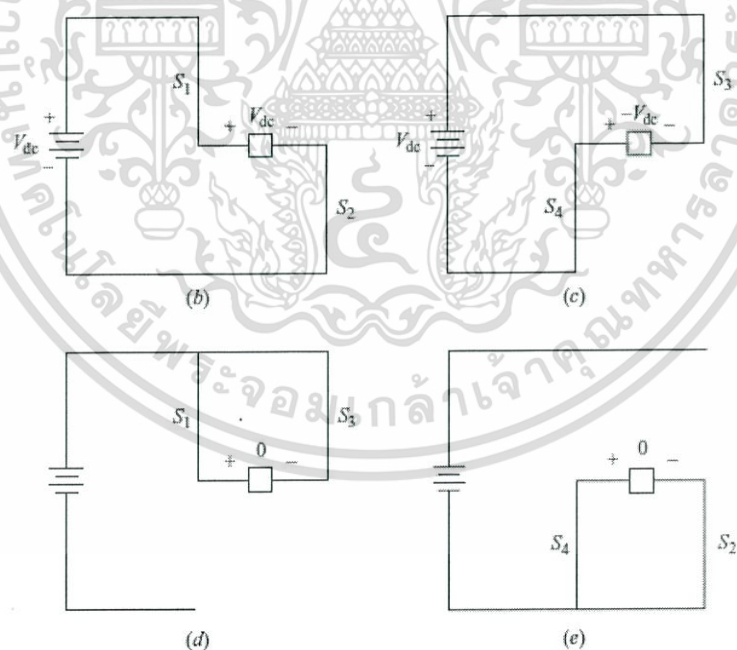
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.1 The Full-Bridge Converter

วงจรคอนเวอร์เตอร์แบบ Full Bridge เป็นวงจรพื้นฐานที่เปลี่ยนจากกระแสตรง (DC) ไปเป็นกระแสสลับ (AC) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ในการใช้งาน Full Bridge กระแสสลับ (AC) ที่ถูกป้อนออกมานั้นเกิดจากการที่ป้อนกระแสตรง (DC) เข้าไปโดยเปิดและปิดสวิตช์ซึ่งที่ความถี่ที่เหมาะสม โดยแรงดันที่ป้อนออกมานั้นอาจจะเป็น  $+V_{dc}$  ,  $-V_{dc}$  หรือศูนย์ก็ได้ขึ้นอยู่กับสวิตช์ซึ่งที่ปิด ดังแสดงในรูปที่ 2.7



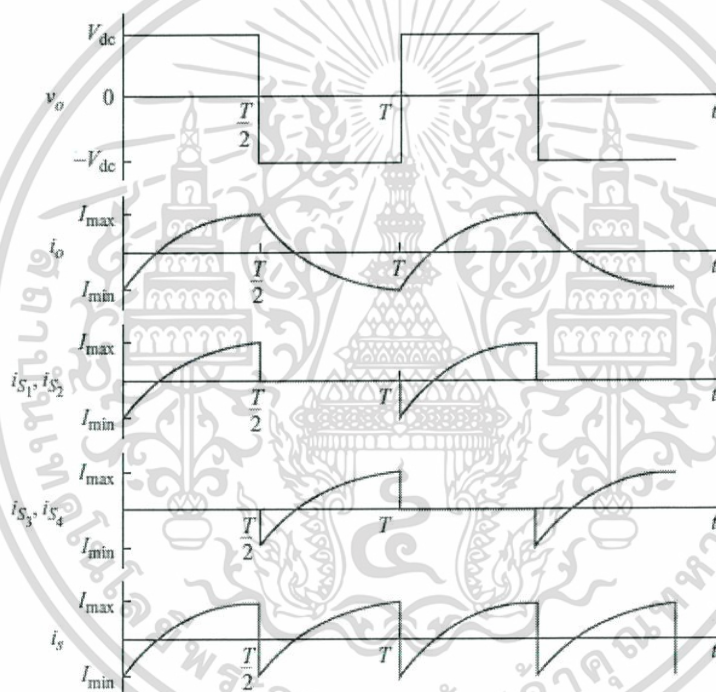
รูปที่ 2.6 วงจรไฟฟ้าอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.7 ลักษณะวงจรคอนเวอร์เตอร์ ในการเปิด-ปิดสวิตช์ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สวิตชิงในรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่าสวิตชิง ในวงจร Full-Bridge ควรจะสามารถรับได้ทั้งกระแสที่เป็นบวกและกระแสที่เป็นลบสำหรับ RL Loads แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จริงๆ อาจจะนำได้แค่กระแสทางเดียวเท่านั้น เพราะฉะนั้นปัญหานี้สามารถแก้ได้โดยวางไดโอดที่ขนานกับสวิตชิงแต่ละตัว โดยในช่วงระหว่างเวลาที่กระแสในสวิตชิงควรเป็นลบนั่น Feedback Diode จะทำหน้าที่รับกระแส และเมื่อกระแสเป็นบวกในสวิตชิงไดโอดจะทำหน้าที่เป็น Reverse-Biased ในรูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Full-Bridge โดยอุปกรณ์สวิตชิง คือ IGBTs กับ Feedback Diodes กระแสที่ได้จากทรานซิสเตอร์และไดโอดเป็นสัญญาณแรงดันสี่เหลี่ยม และไหลออกจาก RL

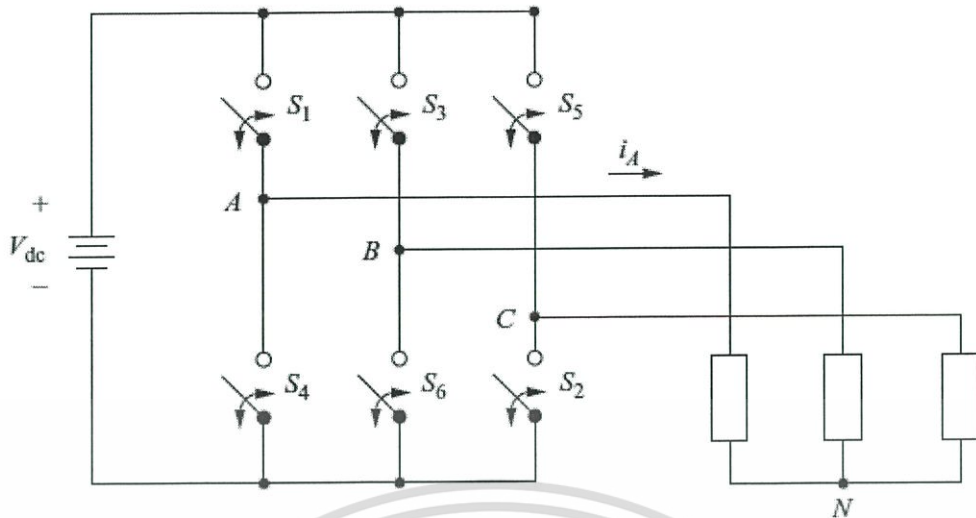


รูปที่ 2.8 กราฟแสดงแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในอินเวอร์เตอร์

#### 2.4.2 The Six-Step Inverter

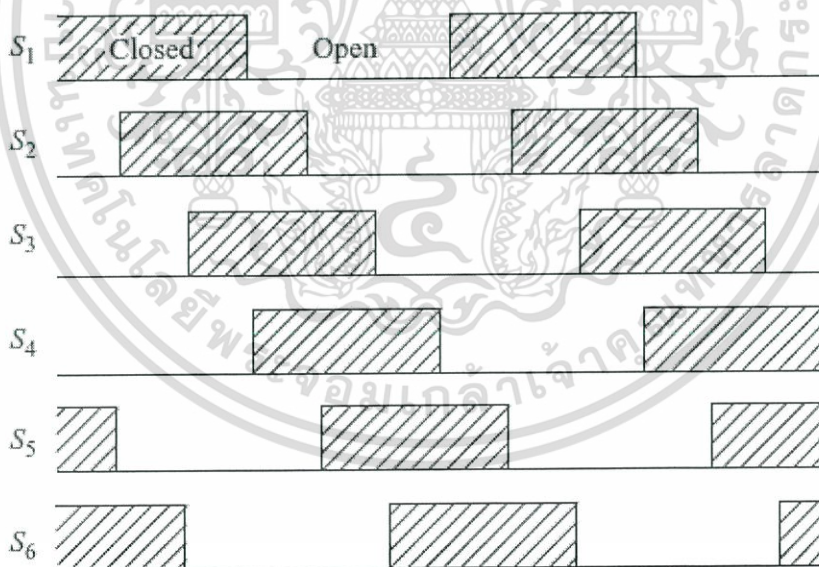
The Six-Step Inverter คือ วงจรสร้างสัญญาณแรงดันเอาต์พุตกระแสสลับแบบ 3 เฟสจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Supply) โดยวงจรนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบ 3 เฟสจากการปรับความถี่ของสัญญาณเอาต์พุต ดังแสดงในรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส

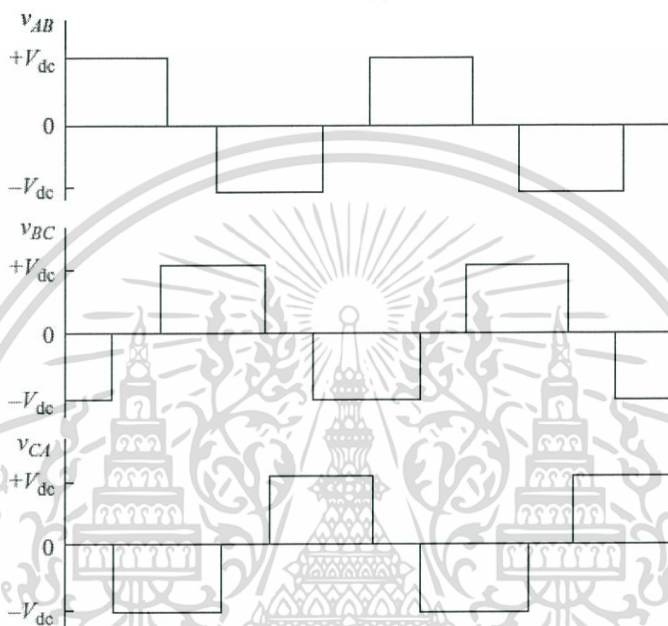
ภายในวงจรจะมีสวิตช์ทั้งหมด 6 ตัว ในการควบคุมสวิตช์ซึ่งแต่ละตัวจะมี Duty Cycle เท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ และมีคาบเท่ากับ  $T$  โดยทุกๆ ช่วงเวลา  $T/6$  สวิตช์ทั้ง 6 ตัวจะมีการสลับการเปิดปิด ดังรูปที่ 2.10



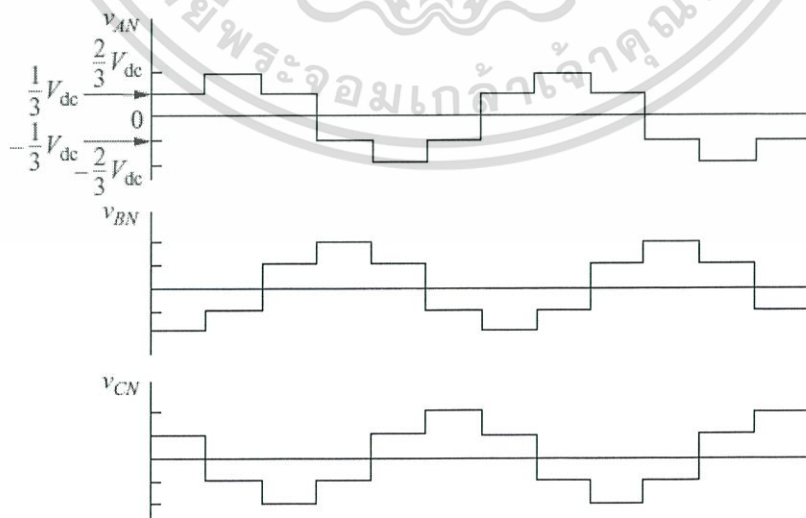
รูปที่ 2.10 กราฟแสดงการเปิดปิดของสวิตช์ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 2.9 วงจรอินเวอร์เตอร์ต่อกับโหลดแบบ wye-connected โดยมีนิวตรอนร่วมที่จุด N ซึ่งเป็นโหลดแบบเดียวกับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น โดยเมื่อทำการเปิดปิดสวิตช์ซึ่งตามรูปที่ 2.10 สามารถคำนวณสัญญาณเอาต์พุตแบบ Line-to-line Voltages ได้ดังรูปที่ 2.11 และสามารถคำนวณสัญญาณเอาต์พุตแบบ Line-to-neutral Voltages ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งสังเกตได้ว่าในหนึ่งคาบสัญญาณมีการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดัน 6 ระดับ ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกวางจรว่า The Six Step Inverter



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงสัญญาณแรงดันแบบ Line-to-line Voltages



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงสัญญาณแรงดันแบบ Line-to-neutral Voltages

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 โมดูล Switching IPM

เลือกใช้ โมดูล BM63364S IPM (Intelligent Power Module) เป็นชิปสำเร็จที่ประกอบด้วย Switching 6 ตัว คือ IGBT สามารถสลับการปิดเปิดใช้งานสวิตชิงในความถี่สูง ซึ่งจำเป็นในการสร้าง สัญญาณ 6step เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าแม่เหล็กเชิงเส้น

BM63364S เป็นไอซีที่ได้รับความนิยมแพร่หลายเป็นอย่างมากในการใช้งานด้าน Switching เนื่องจากมีขนาดเล็ก และราคาที่เหมาะสม ประกอบด้วย IGBTs, Bootstrap Diodes และ Fly Wheel Diodes สามารถใช้ความถี่ได้ถึง 6KHz

### 2.5.1 คุณสมบัติของชิป BM63364S

- 3 Phase DC/AC Inverter
- 600 V/15A
- Built-in Bootstrap Diode
- High Side IGBT Gate Driver (HVIC)
- Low Side IGBT Gate Driver (LVIC)
- Fault Signal (LVIC)
- Input Interface 3.3V, 5V Line
- Operating Conditions: Supply Voltage = 0 – 400 Volt  
Control Power Supply = 15 Volt  
Trip Voltage = 0.48 Volt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

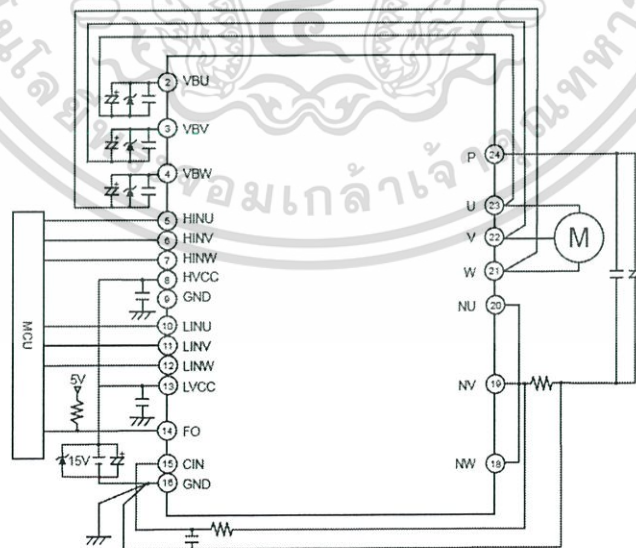
## บทที่ 3

# หลักการออกแบบและโครงสร้างของวงจรควบคุม

ในบทนี้จะนำเสนอการออกแบบแผงวงจรควบคุม และเลือกอุปกรณ์ภายในวงจร เพื่อให้สามารถทำงานได้ตรงตามวัตถุประสงค์ โดยหลักการออกแบบจะยึดตามคำแนะนำในเอกสารคู่มืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำการออกแบบวงจรในโปรแกรม Altium Designer จากนั้นเขียนคำสั่งควบคุมในไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านโปรแกรม Arduino ที่ใช้ควบคุมโมดูลสวิทช์ซึ่งโดยใช้ภาษา C++ และตรวจสอบสัญญาณ Output ที่ออกจากโมดูลสวิทช์ซึ่ง IPM สุดท้ายตรวจสอบความเรียบร้อยของแผงวงจรควบคุม

### 3.1 อุปกรณ์สำหรับจำลองการทดลอง

ทำการออกแบบวงจรควบคุมประกอบด้วยโมดูลสวิทช์ซึ่ง IPM รุ่น BM63364S ทำให้เป็นสวิทช์สร้างสัญญาณ Input ให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นตามคำสั่งของไมโครคอนโทรลเลอร์ และวงจรย่อยที่ทำงานร่วมกับโมดูลสวิทช์ ซึ่งประกอบไปด้วยวงจร Bootstrap ทำหน้าที่ดึงไฟฟ้ามาเลี้ยงวงจรจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง และวงจรป้องกันการลัดวงจร ดังแสดงในรูปที่ 3.1

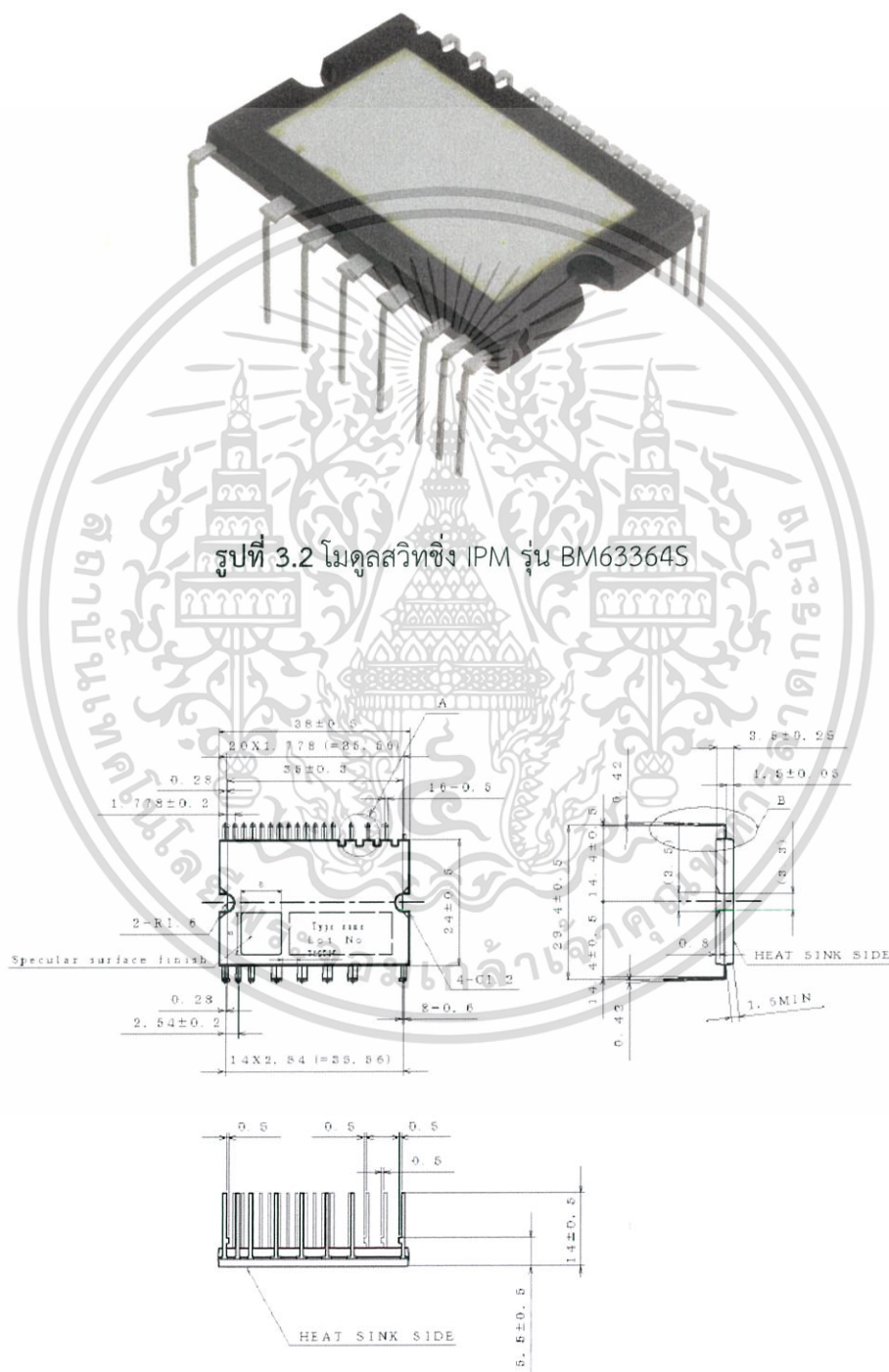


รูปที่ 3.1 โมดูลสวิทช์และอุปกรณ์ภายในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1 โมดูลสวิตชิง IGBT Intelligent Power Module รุ่น BM63364S

เลือกใช้โมดูลสวิตชิง IPM รุ่นนี้ในการทดลอง เนื่องจากสามารถใช้กับระบบไฟฟ้าสามเฟสได้ และสามารถทนกระแสไฟฟ้าได้สูงพอในการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3



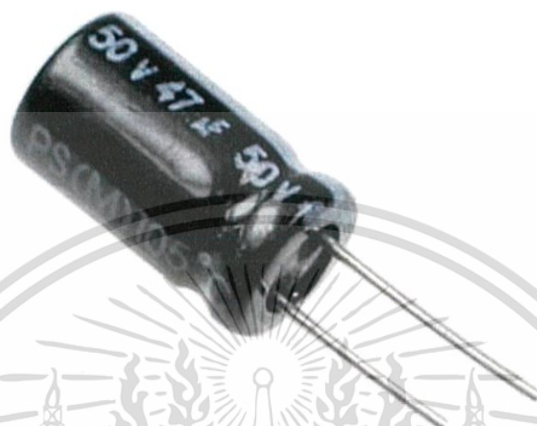
รูปที่ 3.2 โมดูลสวิตชิง IPM รุ่น BM63364S

รูปที่ 3.3 ขนาดของโมดูลสวิตชิง IPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์

เลือกตัวเก็บประจุขนาด 47 ไมโครฟารัด ตามเอกสารคู่มือของโมดูลสวิทซ์ และเลือกแรงดันสูงสุดที่ 50 โวลต์ เพื่อป้องกันการระเบิดของตัวเก็บประจุเมื่อแรงดันสูงเกินพิกัด ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลต์

### 3.1.3 ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก

เลือกค่าประจุขนาด 0.1 ไมโครฟารัด ตามเอกสารคู่มือของโมดูลสวิทซ์ โดยมีหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนของแรงดันที่จ่ายให้กับวงจร ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.4 ซีเนอร์ไดโอด

ในส่วนของวงจรย่อย Bootstrap จะเลือกขนาดของซีเนอร์ตามแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเท่ากับ 35 V และส่วนของแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงในโมดูลสวิทช์จะเลือกขนาด 15 V ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ซีเนอร์ไดโอด

### 3.1.5 ตัวต้านทาน

ในส่วนของวงจรย่อยป้องกันการลัดวงจรจะมีตัวต้านทาน 2 ตัว ตัวต้านทานที่ทำหน้าที่ R-C Filter จะใช้ขนาด 10 กิโลโอห์ม ส่วนตัวต้านทานที่ทำหน้าที่ดรอปรองแรงดันทางด้าน Output (Shunt Resistor) จะใช้ขนาด 50 มิลลิโอห์มต่อกันแบบขนานกันเพื่อลดความต้านทานทางรวม และทนกำลังไฟฟ้าได้ 2 วัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ตัวต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.6 ตัวต้านทานปรับค่าได้

ในส่วนของการรับค่า Input ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ในการปรับความถี่ของสัญญาณควบคุม โมดูลสวิทช์ ซึ่ง เพื่อปรับความถี่ของสัญญาณ Input ของมอเตอร์จะใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ในการปรับ โดยเลือกค่าความต้านทานเท่ากับ 0 ถึง 10 กิโลโอห์ม เนื่องจากมีความละเอียดสูง และสะดวกในการ ใช้กับ Arduino UNO ดังแสดงในรูปที่ 3.8

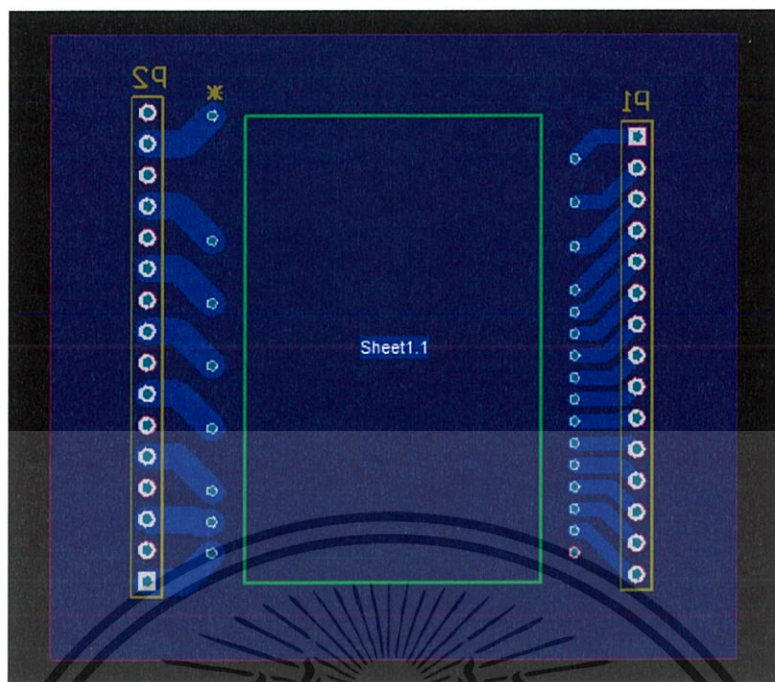


รูปที่ 3.8 ตัวต้านทานปรับค่าได้

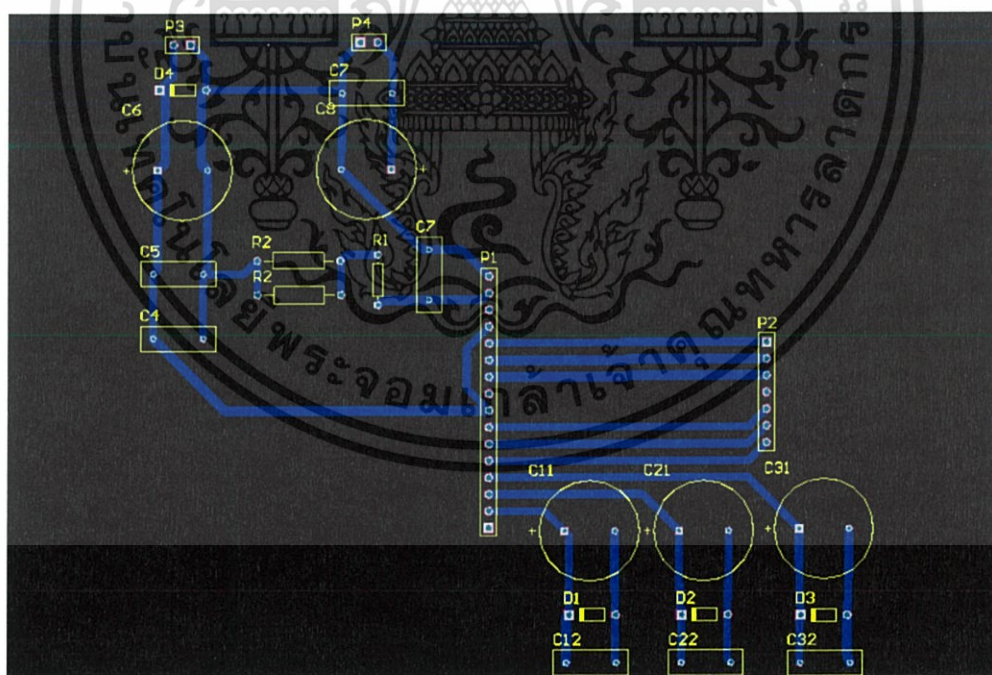
### 3.2 การออกแบบลายวงจรในโปรแกรม Altium Design

จากรูปที่ 3.1 จะเห็นว่าขาฝั่งขวาของโมดูลสวิทช์จะต่อกับมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น 3 เฟส ซึ่งใช้ กระแสไฟสูงมากในการขับเคลื่อน (6-10 แอมป์) ดังนั้นการออกแบบลายวงจรสำหรับโมดูลสวิทช์ซึ่งขา ฝั่งที่ต่อกับมอเตอร์ควรมีความกว้างของลายวงจรมากกว่าปกติ และควรต่อ Output ผ่าน Terminal Box แทน ในวงจรย่อยป้องกันการลัดวงจรตัวต้านทาน (Shunt Resistor) ควรต่อติดกับโมดูลสวิทช์ และลายวงจรที่เดินภายในวงจรย่อยควรสั้นที่สุด เพื่อลดความต้านทานและป้องกันไม่ให้อายุการใช้งาน การลัดวงจรทำงานผิดพลาด จากรูปที่ 3.9 จะเห็นได้ว่า R2 (Shunt Resistor) จะต่อสายสั้นที่สุด และ ติดกับขาของโมดูลสวิทช์ ดังแสดงในรูปที่ 3.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 ลายวงจรของโมดูลสวิทชิงในโปรแกรม Altium Designer



รูปที่ 3.10 ลายวงจรในโปรแกรม Altium Designer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 โครงสร้างทางกายภาพ

ในการต่อสัญญาณควบคุมโมดูลสวิทช์แบบ 3 เฟส ภายในโมดูลจะมี IGBT ทั้งหมด 6 ตัว ซึ่งในการควบคุมจะต้องต่อสัญญาณควบคุมแบบดิจิตอล +5 โวลต์ แยกกันทั้ง 6 ตัว จึงเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO ซึ่งเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นการเขียนโปรแกรมมีขนาดเล็ก และสามารถสวมบอร์ดเสริมเพื่อการต่อสายที่ง่ายขึ้นได้

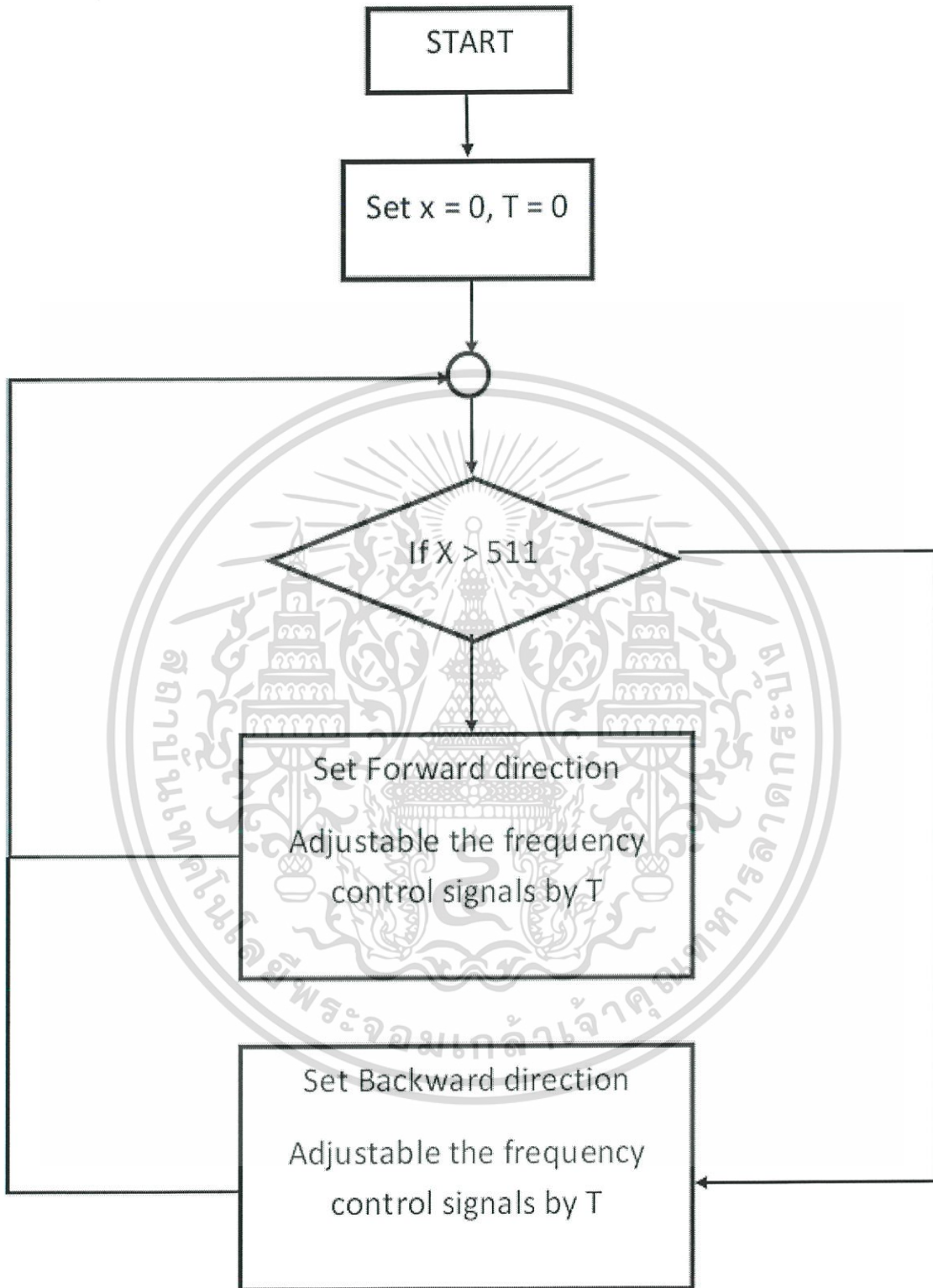
ตำแหน่งเชื่อมต่อระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO กับโมดูลสวิทช์ IPM รุ่น BM63364S

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO	โมดูลสวิทช์ IPM รุ่น BM63364S
D02	HINU
D03	LINW
D04	HINV
D05	LINU
D06	HINW
D07	LINV

โดยโมดูลสวิทช์ IPM รุ่น BM63364S จะมีจุดเชื่อมต่อขาเข้าสำหรับรับแรงดัน 15 โวลต์ และแรงดัน 35 โวลต์ ที่ใช้ในการขับมอเตอร์ และจุดเชื่อมต่อขาออกไปยังมอเตอร์สำหรับ 3 เฟส

### 3.4 การประมวลผล

ในส่วนของการประมวลผล จะเริ่มจากการเก็บค่าข้อมูลดิบจากตัวต้านทานปรับค่าได้ นำมาผ่านการคำนวณตัวเลขให้ได้ค่าความถี่ของสัญญาณควบคุมโมดูลสวิทช์ที่สามารถควบคุมมอเตอร์ได้ และสามารถสลับขาสัญญาณควบคุมโมดูล ทำให้เกิดการสลับเฟสของสัญญาณเข้าของมอเตอร์ส่งผลทำให้สามารถสลับทิศทางการวิ่งของมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 โครงสร้างคำสั่งไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

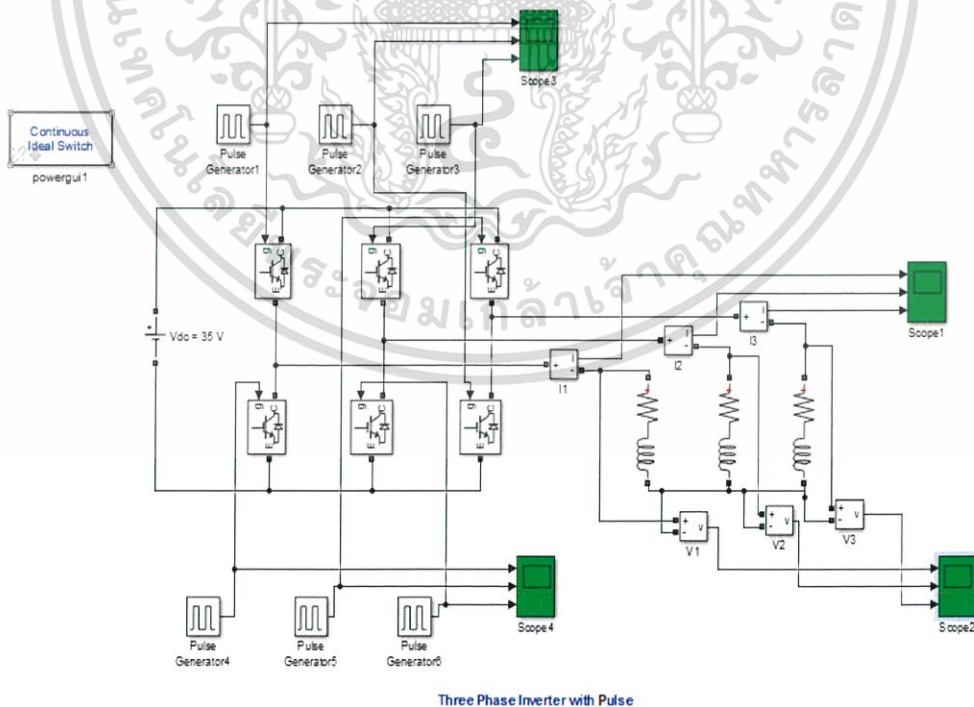
## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึง การทดลองสร้างสัญญาณ Six Step ในโปรแกรม Matlab โดยใช้สวิทชิงชนิด IGBT ที่ใส่สัญญาณควบคุมแบบ Pulse จากนั้นนำสัญญาณควบคุมนี้มาทำการทดลองควบคุมโมดูลสวิทชิง IPM และวัดสัญญาณเอาต์พุต สุดท้ายนำสัญญาณ Six Step ที่ได้นี้มาทดลองใช้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น โดยสามารถปรับความถี่ของสัญญาณนี้ได้ และบันทึกความเร็วของมอเตอร์ที่ความถี่ต่างๆ

#### 4.1 การทดลองสร้างสัญญาณ Six Step ในโปรแกรม Matlab

เริ่มต้นการทดลองด้วยการจำลองวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Six Step ในโปรแกรม Matlab เพราะโปรแกรมนี้สามารถสร้างวงจรทางไฟฟ้าได้สะดวกด้วยอุปกรณ์ที่สำเร็จรูปใน Simulink และสามารถกำหนดค่าต่างๆ ในอุปกรณ์ได้อย่างละเอียด อีกทั้งตัวโปรแกรมยังสามารถวิเคราะห์สมการทางคณิตศาสตร์ และแสดงสัญญาณในแต่ละส่วนของวงจรได้อย่างอิสระ ดังรูปที่ 4.1



Three Phase Inverter with Pulse

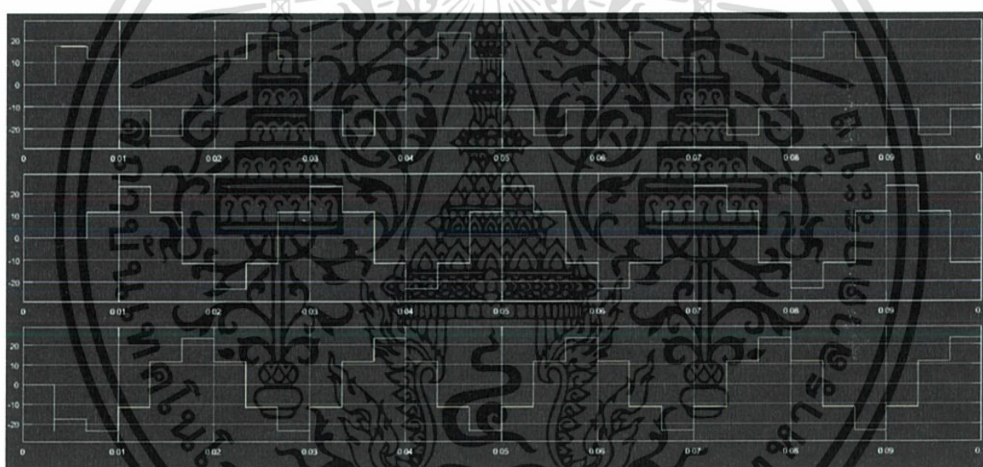
#### รูปที่ 4.1 ออกแบบระบบอินเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 ทำการทดลองโดยใช้โปรแกรม Simulink โดยสร้างสวิตชิงชนิด IGBT 6 ตัว และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายแรงดันเท่ากับ 35 โวลต์ และให้สัญญาณควบคุมแบบ Pulse กำหนดค่าแต่ละสัญญาณดังต่อไปนี้

- Ideal Switch
- Amplitude = 1
- Period = 0.02 sec
- Pulse Width = 50%
- Phase Delay Shift Per Signal = 0.00333 sec

จากนั้นตรวจสัญญาณ Output ผ่านทาง Scope จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (โวลต์) กับเวลา (วินาที) ดังรูปที่ 4.2

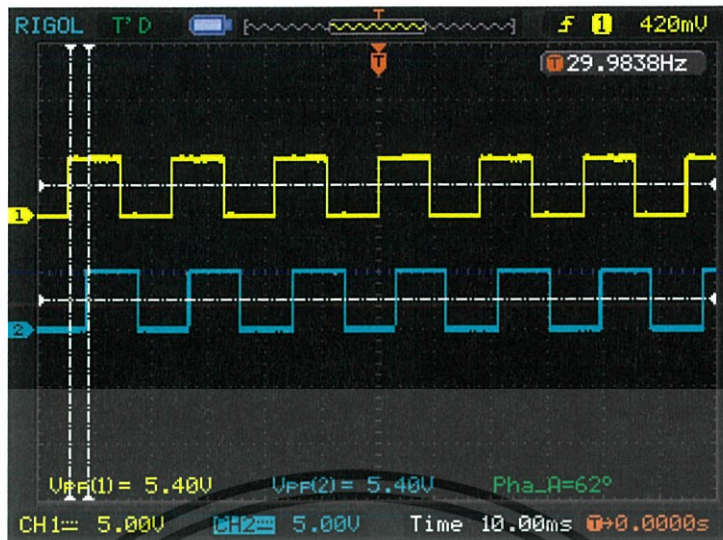


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า (โวลต์) กับเวลา (วินาที)

#### 4.2 การทดลองสร้างสัญญาณ Six Step ผ่านโมดูลสวิตชิง IPM

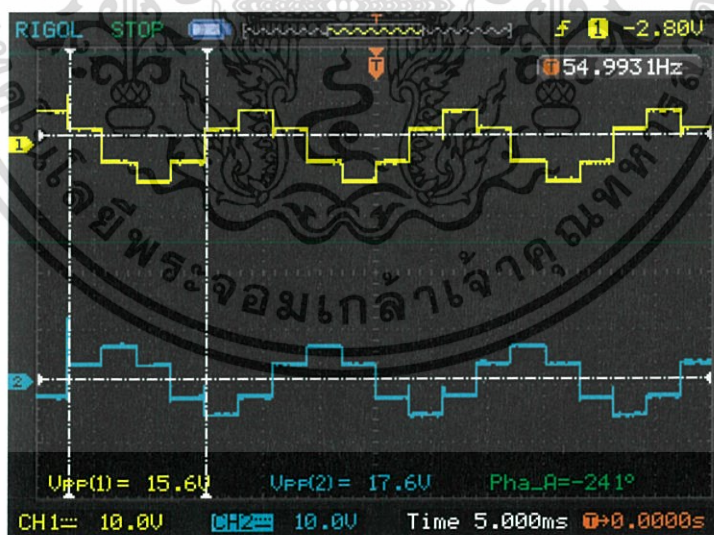
เริ่มต้นทำการเขียนโปรแกรม Arduino เพื่อสร้างสัญญาณแบบ Pulse มาควบคุมโมดูลสวิตชิง IPM ทั้งหมด 6 สัญญาณ เช่นเดียวกับการทดลองในโปรแกรม Simulink โดยลักษณะสัญญาณควบคุมเหมือนกับในโปรแกรมเช่นกัน ทดลองวัดสัญญาณควบคุมที่ได้จาก Arduino ดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 สัญญาณควบคุมจาก Arduino

จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ 1 (สีเหลือง) มีช่วงเวลาที่แตกต่างกันจากสัญญาณที่ 2 (สีฟ้า) เท่ากับ 3 มิลลิวินาทีตรงตามการทดลองในโปรแกรม Simulink ทดลองต่อสัญญาณควบคุมเข้าโมดูลสวิทซ์ IPM และทดลองวัดสัญญาณ Output ได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 สัญญาณ Output จากโมดูลสวิทซ์ IPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

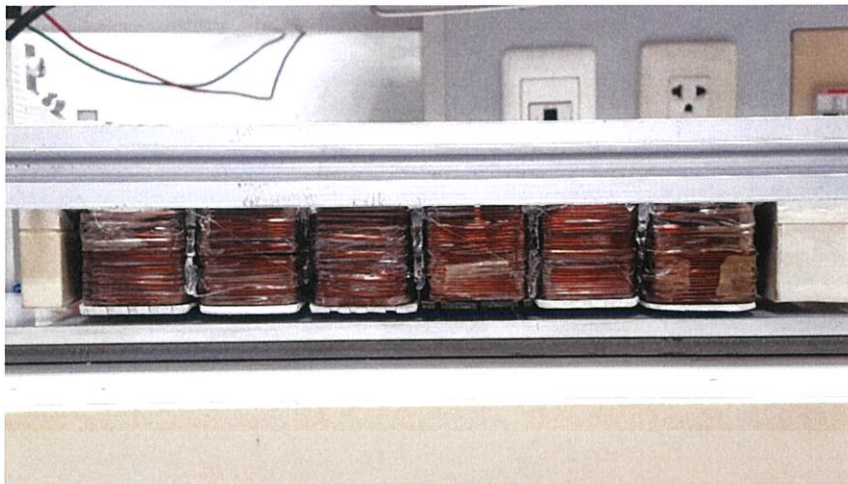
### 4.3 การทดลองควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น

ทดลองใส่สัญญาณ Output จากโมดูลสวิทซ์ IPM เข้ามอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำเชิงเส้น จากนั้นทดลองปรับความถี่ของสัญญาณ Output แล้วตรวจสอบความเร็วของมอเตอร์ โดยกำหนดค่าแรงดันแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงคงที่เท่ากับ 33 V ได้ผลดังตารางที่ 4.1 และขึ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6

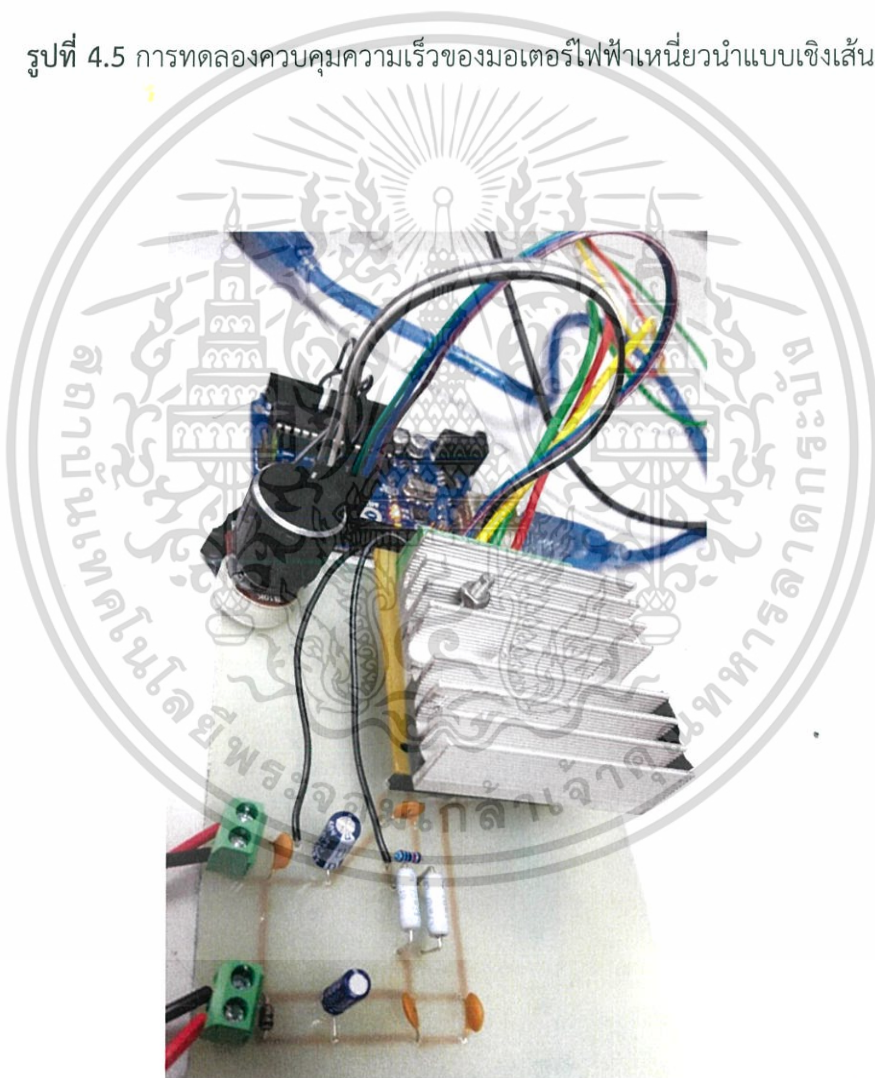
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองความเร็วของมอเตอร์ที่ความถี่ของสัญญาณต่างๆ

Voltage = 33 Volt							
Frequency (Hz)	Current (A)	Time (sec)			Average (sec)	Distance (m)	Velocity (m/s)
83.33	6.5	3.89	3.42	3.78	3.697	0.5	0.135
62.50	6.5	3.42	3.49	3.50	3.470	0.5	0.144
50	8.8	3.30	3.23	3.16	3.230	1	0.310
41.67	10	2.64	2.58	2.70	2.640	1	0.379

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 การทดลองควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น



รูปที่ 4.6 การทดลองควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# บทวิจารณ์และสรุป

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลอง การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น การปรับความถี่จะมีผลทำให้ความเร็วของซิงโครนัสเปลี่ยนแปลงด้วย แต่การลดลงของความถี่ฟลักซ์แม่เหล็กจะเพิ่มขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าของฟลักซ์เป็นสาเหตุทำให้เกิดการอ้อมตัวของโรเตอร์ และสเตเตอร์ ซึ่งเป็นผลให้กระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ไม่เพิ่มขึ้น ดังนั้นความสำคัญในการรักษาฟลักซ์ให้คงที่ จะทำได้เฉพาะเมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า โดยในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสสามารถทำได้โดยการใช้วิธีอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความถี่ ซึ่งทำให้สามารถปรับค่าแรงดันและความถี่ได้โดยใช้อินเวอร์เตอร์

### 5.2 ปัญหาและอุปสรรคที่พบ

1. ปัญหา เนื่องจากระบบควบคุมไม่เสถียรภาพ เพราะสัญญาณที่ใช้ขับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเชิงเส้นนั้นเป็นสัญญาณ Six-Step
2. ปัญหา เนื่องจากวงจรที่ใช้ควบคุมมีความอ่อนไหวต่อสิ่งรบกวน ทำให้สัญญาณที่ออกมาบางทีเกิดการผิดรูปไปจากที่คาดหวังไว้
3. ปัญหา เนื่องจากขดลวดทองแดงที่ใช้ในการพันขดลวดที่ฝั่งทุติยภูมิมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางสั้นจึงเกิดการสูญเสียพลังงานมากจนเกิดเป็นความร้อน ทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าแบบเชิงเส้นเกิดความเสียหายเล็กน้อย
4. ปัญหา เนื่องจากพื้นที่ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบเชิงเส้นมีความลาดเอียง และมีพื้นผิวขรุขระทำให้ต้องใช้พลังงานในการเคลื่อนที่มากกว่าปกติในการเคลื่อนที่มีผลทำให้ผลการทดลองไม่เสถียร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 แนวทางแก้ไข

1. ศึกษาการใช้ Space Vector ในการสร้างสัญญาณ PWM เพื่อให้สัญญาณที่ออกมาใกล้เคียงกับกรรพลาไซม์มากยิ่งขึ้น เพื่อให้การควบคุมมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น
2. ศึกษาการใช้ IPM จาก Data Sheet ให้ละเอียดมากยิ่งขึ้น เพื่อความละเอียดในการต่อวงจรว่าสิ่งไหนมีผลกระทบต่อวงจรเร็วที่สุด และเปลี่ยนจากบอร์ดโซลิดสเตตเป็นการ์ดปริ้นท์เพื่อให้วงจรแข็งแรงมากยิ่งขึ้น
3. ในการแก้ไขปัญหาคือการเกิดความร้อนที่ขดลวด ได้ทำการลดการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้เหมาะกับขนาดของขดลวด ซึ่งช่วยลดการเกิดความร้อนและความเสียหายที่เกิดขึ้น
4. ในการแก้ไขปัญหาคือความลาดเอียงของพื้นที่ในการวางราง ได้ใช้ตลับน้ำสำหรับหาพื้นที่ที่มีความราบเรียบมากที่สุดในการวางราง ส่วนพื้นที่ขรุขระใช้กระดาษทรายขัดให้เสมอกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] “Power System Analysis and Design”, Fifth Edition, J. Duncan Glover, M. V. Uzunoglu, S. S. Sastry, and Thomas J. Overbye, 2012
- [2] “SVM Space Vector Modulation”, Henk Muldere, GE Industrial Systems, July 2003
- [3] “Space Vector PWM Inverter”, Jin-Woo Jung, February 20, 2005
- [4] “Linear Induction Motor”, นายวัชรพล ล้อมถนนรงค์, นายวัชรระ บุษผาถาราม, ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์, สาขาวิชาาระบบควบคุม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง, ปีการศึกษา 2554
- [5] “IPM Intelligent Power Module” [Online.] Available: <http://www.es.co.th/Schematic/PDF/BM63363S-V.PDF>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## เอกสารคู่มืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ก.1 เอกสารคู่มือการใช้งาน 600V IGBT Intelligent Power Module (IPM) for Low Speed Switching Drive



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Inverter for motor control

# 600V IGBT Intelligent Power Module (IPM) for low speed switching drive

**BM63364S-VA BM63364S-VC**

**General Description**

BM63364S-VA/-VC is an Intelligent Power Module composed of gate drivers, bootstrap diodes, IGBTs, fly wheel diodes. Low saturation voltage IGBTs optimized for low speed switching drive (to 6kHz) such as a compressor is adopted. Please examine high speed switching series for high speed switching drive.

**Key Specifications**

- IGBT Collector-Emitter Voltage  $V_{CESAT}$ : 1.5V(Typ)
- FWD Forward Voltage  $V_F$ : 1.5V(Typ)
- FWD Reverse Recovery Time  $t_{rr}$ : 100ns(Typ)
- Module Case Temperature  $T_C$ : -25 to +100°C
- Junction Temperature  $T_{jmax}$ : 150°C

**Features**

- 3phase DC/AC Inverter
- 600V/15A
- Low Side IGBT Open Emitter
- Built -in Bootstrap Diode
- High Side IGBT Gate Driver(HVIC): SOI (Silicon On Insulator) Process, Drive Circuit, High Voltage Level Shifting, Current Limit for Bootstrap Diode, Control Supply Under-Voltage Locked Out (UVLO)
- Low Side IGBT Gate Driver(LVIC): Drive Circuit, Short Circuit Current Protection (SCP), Control Supply Under Voltage Locked Out (UVLO), Thermal Shutdown (TSD)
- Fault Signal(LVIC) Corresponding to SCP (Low Side IGBT), TSD, UVLO Fault
- Input Interface 3.3V, 5V Line

**Package**

HSDIP25  
HSDIP25VC

W(Typ) x D(Typ) x H(Typ)  
38.0mm x 24.0mm x 3.5mm  
38.0mm x 24.0mm x 3.5mm



**Application**

- Low Speed Switching Drive of AC100 to 240Vrms(DC Voltage: Less Than 400V) Class Motor
- Low Speed Switching Drive of Compressor Motor for Air Conditioner, Washing Machine, Refrigerator

**Typical Application Circuit**

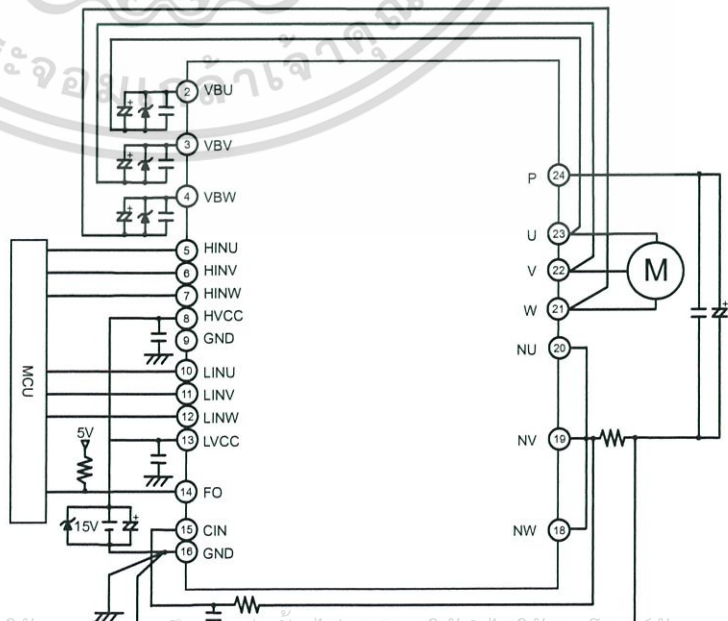


Figure 1. Example of Application Circuit

Pin Configuration

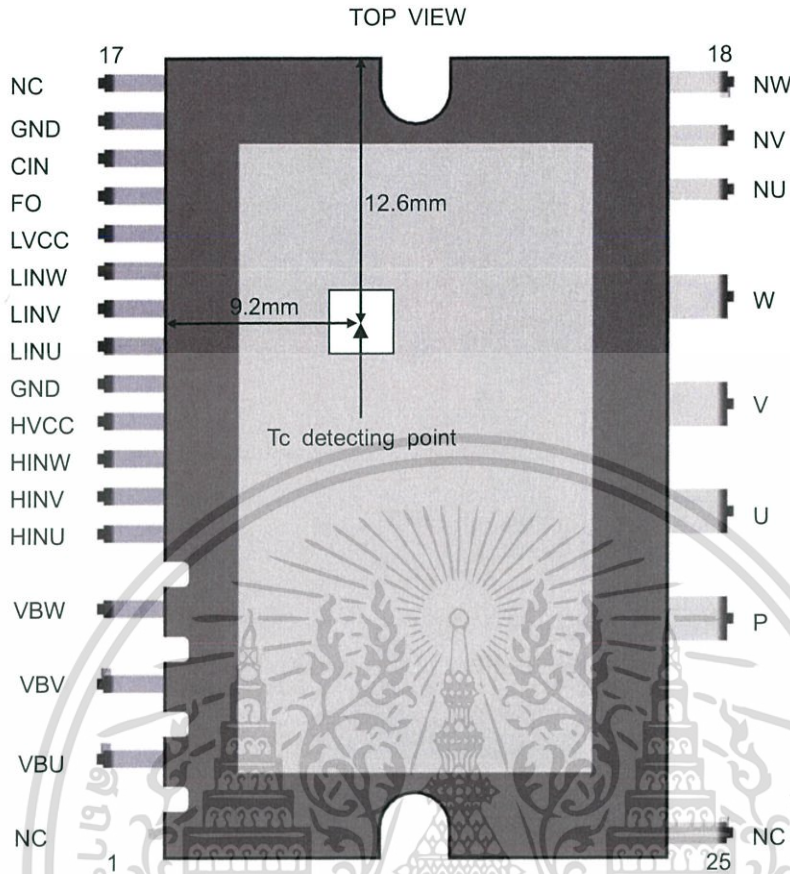


Figure 2. Pin Configuration and Tc Detecting Point

Pin Description

Pin No.	Pin Name	Function	Pin No.	Pin Name	Function
1	NC	No connection(GND potential)	14	FO	Alarm output
2	VBU	U phase floating control supply	15	CIN	Detecting of short circuit current trip voltage
3	VBV	V phase floating control supply	16	GND	Ground (Note 1)
4	VBW	W phase floating control supply	17	NC	No connection (Note 2)
5	HINU	U phase high side IGBT control	18	NW	W phase low side IGBT emitter
6	HINV	V phase high side IGBT control	19	NV	V phase low side IGBT emitter
7	HINW	W phase high side IGBT control	20	NU	U phase low side IGBT emitter
8	HVCC	Control supply for HVIC	21	W	W phase output
9	GND	Ground (Note 1)	22	V	V phase output
10	LINU	U phase low side IGBT control	23	U	U phase output
11	LINV	V phase low side IGBT control	24	P	Inverter supply
12	LINW	W phase low side IGBT control	25	NC	No connection (Note 2)
13	LVCC	Control supply for LVIC			

(Note 1) Two GND pins (9 & 16pin) are connected inside IPM, please connect one pin (16pin is recommended) to the 15V power supply GND outside and leave the other open.

(Note 2) NC pins (17 & 25pin) are not electrically connected to any other potential inside.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ขอรับผิดชอบ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Block Diagram

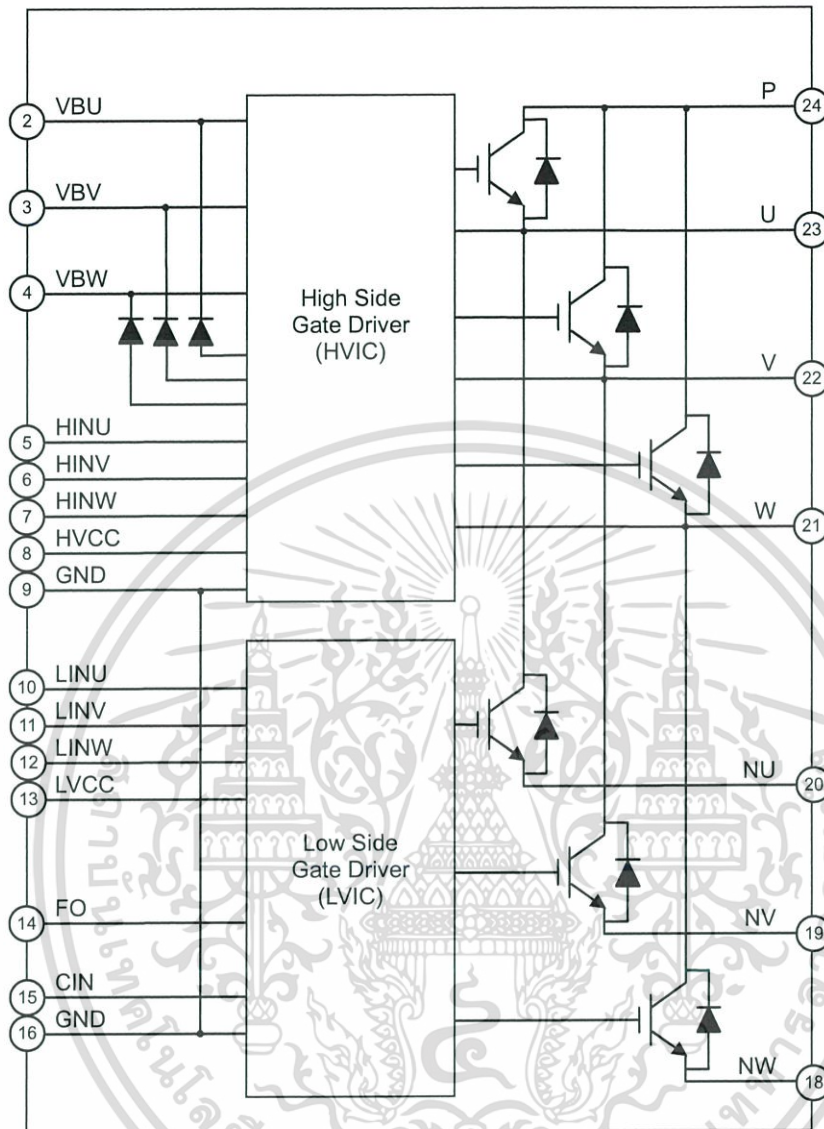


Figure 3. Block Diagram

Description of Block

1) High Side IGBT Drive (HVIC, Bootstrap Diode)

High voltage level shifting circuit drives high side IGBT.

Built-in bootstrap diode and current limit function for bootstrap diode enable HVIC to drive high side IGBT without external component (bootstrap diode, resistor). There is under-voltage-locked-out (UVLO) function for floating control power supply.

2) Low Side IGBT Drive (LVIC)

There is short circuit current protection (SCP), under-voltage locked out (UVLO) for control power supply LVCC, thermal shutdown (TSD) function. Alarm signal (FO) will output when these protection circuits work.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปใช้

**Absolute Maximum Ratings (Unless otherwise specified, T<sub>j</sub>=25°C)**

**Inverter Part**

Item	Symbol	Ratings	Unit	Conditions	
Supply Voltage	V <sub>P</sub>	450	V	Applied between P-NU,NV,NW	
Supply Voltage(Surge)	V <sub>P(surge)</sub>	500	V	Applied between P-NU,NV,NW	
Collector-Emitter Voltage	V <sub>CEs</sub>	600	V		
Collector Current	DC	I <sub>C</sub>	±15 (Note 1)	A	T <sub>C</sub> =25°C
	PEAK	I <sub>CP</sub>	±45 (Note 1)	A	T <sub>C</sub> =25°C, less than 1ms
Collector Power Dissipation	P <sub>C</sub>	41	W	T <sub>C</sub> =25°C, per 1 chip	
Junction Temperature	T <sub>jmax</sub>	150	°C		

(Note 1) Do not, however exceed P<sub>C</sub>, ASO.

**Control part**

Item	Symbol	Ratings	Unit	Conditions
Control Power Supply	V <sub>CC</sub>	20	V	Applied between HVCC-GND, LVCC-GND
Floating Control Power Supply	V <sub>BS</sub>	20	V	Applied between VBU-U, VBV-V, VBW-W
Control Input Voltage	V <sub>IN</sub>	-0.5 to V <sub>CC</sub> +0.5	V	Applied between HINX, LINX-GND (X=U,V,W)
Fault Output Supply Voltage	V <sub>FO</sub>	-0.5 to V <sub>CC</sub> +0.5	V	Applied between FO-GND
Fault Output Current	I <sub>FO</sub>	1	mA	Sink current at FO pin
Current Sensing Input Voltage	V <sub>CIN</sub>	-0.5 to +7.0	V	Applied between CIN-GND

**Bootstrap diode part**

Item	Symbol	Ratings	Unit	Conditions
Reverse Voltage	V <sub>RB</sub>	600	V	
Junction Temperature	T <sub>jmaxD</sub>	150	°C	

**Total system**

Item	Symbol	Ratings	Unit	Conditions
Self Protection Supply Voltage (SCP Capability)	V <sub>P(PROT)</sub>	400	V	V <sub>CC</sub> =13.5 to 16.5V, Inverter part T <sub>j</sub> =125°C, non-repetitive, less than 2μs
Module Case Temperature	T <sub>C</sub>	-25 to +100	°C	Measurement point of T <sub>C</sub> is provided in Figure 2
Storage Temperature	T <sub>stg</sub>	-40 to +125	°C	
Isolation Voltage	V <sub>iso</sub>	1500	V <sub>rms</sub>	Sinusoidal, 60Hz, AC 1minute, between connected all pins and heat sink plate

**Thermal resistance**

Item	Symbol	Limit			Unit	Conditions
		Min	Typ	Max		
Junction to Case Thermal Resistance (Note 2)	R <sub>th(j-c)_IGBT</sub>	-	-	3.0	°C /W	Inverter IGBT(1/6 module)
	R <sub>th(j-c)_FWD</sub>	-	-	3.9	°C /W	Inverter FWD(1/6 module)

(Note 2) Grease with good conductivity and high reliability should be applied evenly with +100 to +200μm on the contacting surface of IPM and heat sink. Use a torque wrench to fasten up to the specified torque rating. The contacting thermal resistance between IPM case and heat sink is determined by the thickness and the thermal conductivity of the applied grease.

**Caution:** Operating the IPM over the absolute maximum ratings may damage the IPM. The damage can either be a short circuit between pins or an open circuit between pins and the internal circuitry. Therefore, it is important to consider circuit protection measures, such as adding a fuse, in case the IPM is operated over the absolute maximum ratings.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ขอรับผิดชอบใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Recommended Operating Conditions

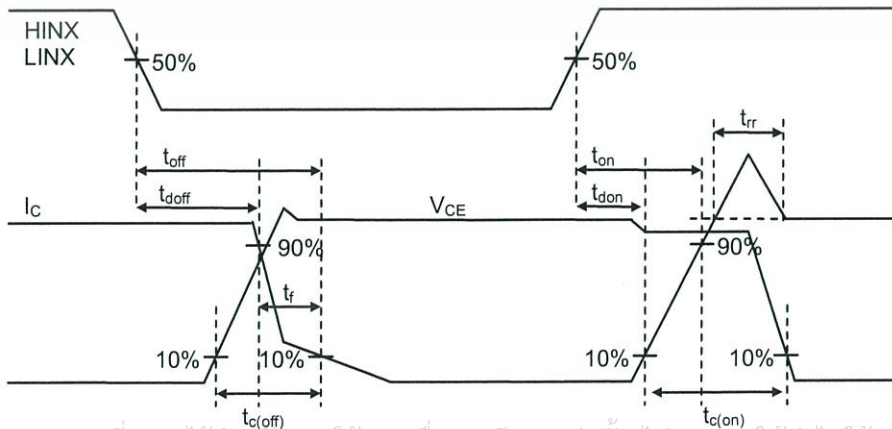
Item	Symbol	Limit			Unit	Conditions
		Min	Typ	Max		
Supply Voltage	$V_P$	0	300	400	V	Applied between P-NU,NV,NW
Control Power Supply	$V_{CC}$	13.5	15.0	16.5	V	Applied between HVCC-GND, LVCC-GND
Floating Control Power Supply	$V_{BS}$	13.0	15.0	18.5	V	Applied between VBU-U, VBV-V, VBW-W
Control Power Supply Variation	$\Delta V_{CC}$ $\Delta V_{BS}$	-1	-	+1	V/ $\mu$ s	
Control Input Voltage	$V_{IN}$	0	-	5.5	V	
Current Sensing Input Voltage	$V_{CIN}$	0	-	5.5	V	
Blanking Time for Preventing Arm-short	$t_{dead}$	1.5	-	-	$\mu$ s	For each input signal
PWM Input Frequency	$f_{PWM}$	-	-	6	kHz	$T_C \leq 100^\circ C, T_J \leq 125^\circ C$
High Side IGBT Minimum Input Pulse Width <sup>(Note1)</sup>	$PW_{ONH}$	0.8	-	-	$\mu$ s	
	$PW_{OFFH}$	0.8	-	-	$\mu$ s	
Low Side IGBT Minimum Input Pulse Width <sup>(Note1)</sup>	$PW_{ONL}$	2.5	-	-	$\mu$ s	
	$PW_{OFFL}$	0.8	-	-	$\mu$ s	
Voltage Variation Between GND- NU, NV, NW	$V_N$	-5	-	+5	V	Between GND-NU, NV, NW (Including surge voltage)
Junction Temperature	$T_J$	-25	-	+125	$^\circ C$	

(Note 1) IPM might not respond if the input signal pulse width is less than  $PW_{ON}$ ,  $PW_{OFF}$ .

Electrical Characteristics (Unless otherwise specified,  $T_J=25^\circ C, V_{CC}=V_{BS}=15V, V_P=300V$ )

Inverter Part

Item	Symbol	Limit			Unit	Conditions
		Min	Typ	Max		
Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CESAT}$	-	1.50	1.90	V	$I_C=15A$
		-	0.85	1.15	V	$I_C=1.5A$
Collector-Emitter Cut-off Current	$I_{CES}$	-	-	100	$\mu A$	$V_{CE}=V_{CES}$
FWD Forward Voltage	$V_F$	-	1.50	2.00	V	$I_F=15A$
FWD Reverse Recovery Time	$t_{rr}$	-	100	-	ns	Inductive Load, $I_C=15A$
High Side IGBT Turn on Delay Time	$t_{onH}$	0.50	0.90	1.40	$\mu$ s	Inductive Load, $I_C=15A$
High Side IGBT Turn on Switching Time	$t_{c(on)H}$	-	0.20	-	$\mu$ s	Inductive Load, $I_C=15A$
High Side IGBT Turn off Delay Time	$t_{offH}$	-	1.40	2.10	$\mu$ s	Inductive Load, $I_C=15A$
High Side IGBT Turn off Switching Time	$t_{c(off)H}$	-	0.45	-	$\mu$ s	Inductive Load, $I_C=15A$
Low Side IGBT Turn on Delay Time	$t_{onL}$	0.80	1.70	2.50	$\mu$ s	Inductive Load, $I_C=15A$
Low Side IGBT Turn on Switching Time	$t_{c(on)L}$	-	0.25	-	$\mu$ s	Inductive Load, $I_C=15A$
Low Side IGBT Turn off Delay Time	$t_{offL}$	-	1.00	1.50	$\mu$ s	Inductive Load, $I_C=15A$
Low Side IGBT Turn off Switching Time	$t_{c(off)L}$	-	0.45	-	$\mu$ s	Inductive Load, $I_C=15A$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 Figure 4. Switching Time Definition

Control part

Item	Symbol	Limit			Unit	Conditions
		Min	Typ	Max		
<b>Whole</b>						
VCC Circuit Current 1	I <sub>CC1</sub>	-	0.70	1.60	mA	V <sub>IN</sub> =0V
VCC Circuit Current 2	I <sub>CC2</sub>	-	0.90	2.00	mA	V <sub>IN</sub> =5V
VBS Circuit Current 1	I <sub>BS1</sub>	-	0.15	0.35	mA	V <sub>IN</sub> =0V
VBS Circuit Current 2	I <sub>BS2</sub>	-	0.15	0.35	mA	V <sub>IN</sub> =5V
<b>Control Input(HINU,HINV,HINW,LINU,LINV,LINW)</b>						
H Level Input Current	I <sub>INH</sub>	0.7	1.0	1.5	mA	V <sub>IN</sub> =5V
L Level Input Current	I <sub>INL</sub>	-10	-	-	μA	V <sub>IN</sub> =0V
H Level Input Threshold Voltage	V <sub>INH</sub>	-	-	2.6	V	
L Level Input Threshold Voltage	V <sub>INL</sub>	0.8	-	-	V	
Input Hysteresis Voltage	V <sub>HYS</sub>	-	0.25	-	V	
<b>Short Circuit Current Protection</b>						
CIN Input Bias Current	I <sub>CIN</sub>	-2	-	-	μA	CIN=0V
Trip Voltage	V <sub>SC</sub>	0.43	0.48	0.53	V	
<b>Under Voltage Locked Out</b>						
VCC Trip Voltage	V <sub>CCUVT</sub>	10.5	11.5	12.5	V	
VCC Release Voltage	V <sub>CCUVR</sub>	11	12	13	V	
VBS Trip Voltage	V <sub>BSUVT</sub>	10	11	12	V	
VBS Release Voltage	V <sub>BSUVR</sub>	10.5	11.5	12.5	V	
<b>Thermal Shutdown</b>						
Trip Temperature	T <sub>SdT</sub>	100	130	-	°C	Monitor LVIC temperature
Hysteresis Temperature	T <sub>SDHYS</sub>	-	20	-	°C	Monitor LVIC temperature
<b>Fault Output(FO)</b>						
Output low Voltage	V <sub>FO</sub>	-	-	0.95	V	I <sub>FO</sub> =1mA
Leak Current	I <sub>FOLEAK</sub>	-	-	10	μA	V <sub>FO</sub> =5V
Output Pulse Width	t <sub>FO</sub>	20	-	-	μs	

Bootstrap Diode Part

Item	Symbol	Limit			Unit	Conditions
		Min	Typ	Max		
Forward Voltage	V <sub>FB1</sub>	0.3	0.6	0.9	V	I <sub>FB</sub> =1mA Voltage drop between HVCC-VBX (X=U,V,W)
	V <sub>FB2</sub>	1.1	2.0	2.9	V	I <sub>FB</sub> =100mA Voltage drop between HVCC-VBX (X=U,V,W)
Reverse Current	I <sub>RB</sub>	-	-	10	μA	V <sub>RB</sub> =600V
Reverse Recovery Time	t <sub>rrB</sub>	-	80	-	ns	I <sub>FB</sub> =0.1A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

โดยไม่ขออนุญาตใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mechanical Characteristics And Ratings

Item	Limit			Unit	Following Standard	Conditions
	Min	Typ	Max			
Mounting Torque	0.59	0.69	0.78	N·m	-	Mounting Screw M3 <sup>(Note 1)</sup> Recommended 0.69N·m <sup>(Note 2)</sup>
Pin Pulling Strength	10	-	-	s	EIAJ-ED-4701/400	Load Control Pin:4.9N Power Pin:9.8N
Pin Bending Strength	2	-	-	times	EIAJ-ED-4701/400	Load Control Pin: 2.45N Power Pin:4.9N 90deg. Bend
Weight	-	10	-	g	-	
Heat Sink Flatness	0	-	+200	µm	-	Measurement point is provided in Figure 6.

(Note 1) Plain washers (ISO 7089 to 7094) are recommended.

(Note 2) When installing a module to a heat sink, excessive uneven fastening force might apply stress to inside chips or ceramic of heat sink plate, which will lead to a broken or cracked or degraded device. An example of recommended fastening sequence is shown in Figure 5. The temporary fastening torque is set to 20 to 30% of the maximum torque rating. Evenly apply thermally-conductive grease with 100µm to 200µm thickness over the contact surface between the module and the heat sink. Also, pay attention not to have any dirt left on the contact surface between the module and the heat sink.

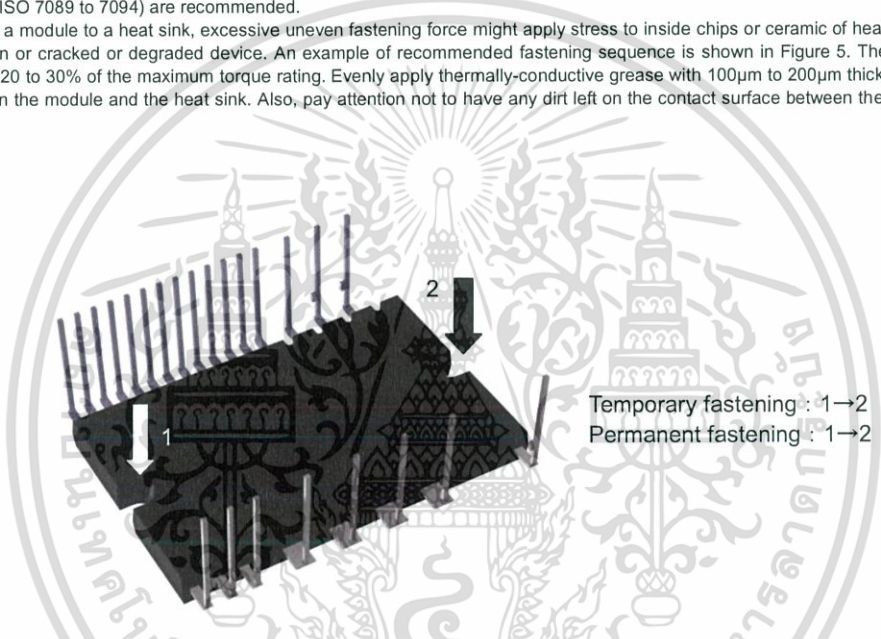


Figure 5. Example of Recommended Fastening Sequence

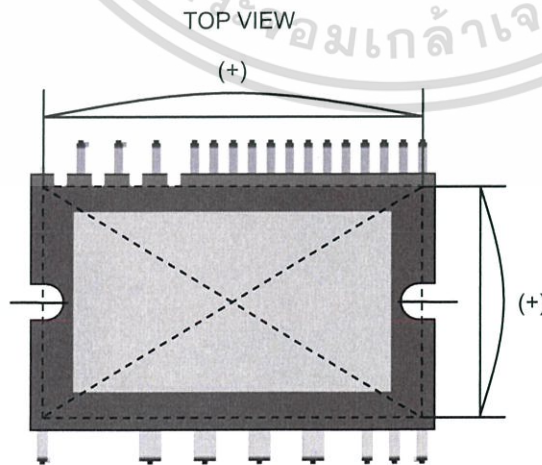


Figure 6. Measurement Point of Heat Sink Flatness

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ขอรับผิดชอบใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคนนำไปใช้

Typical Performance Curve

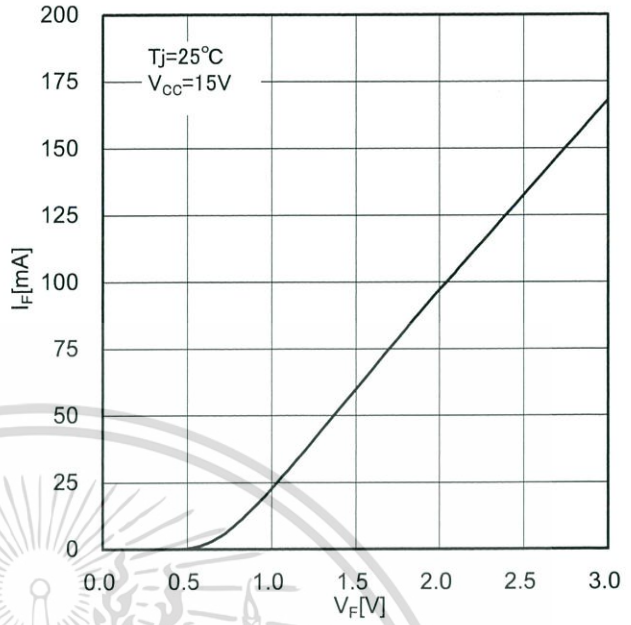
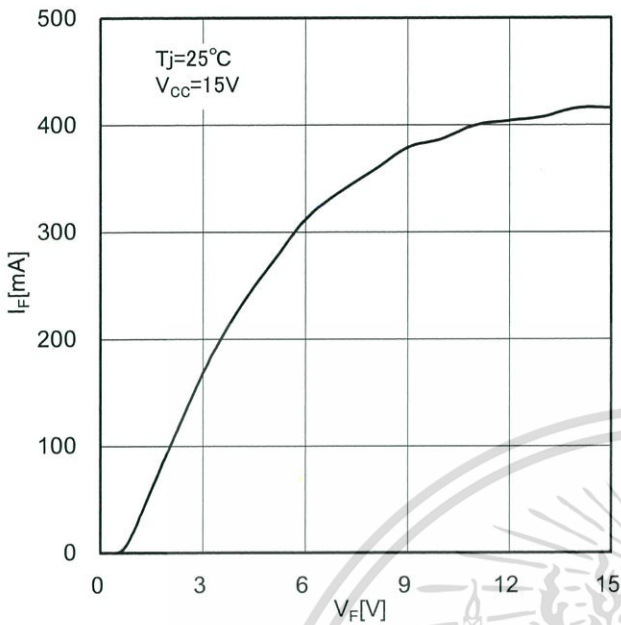


Figure 7. I<sub>F</sub> vs V<sub>F</sub>  
 (Characteristic of Bootstrap Diode I<sub>F</sub>-V<sub>F</sub> Curve  
 Between HVCC-VBX pin (X=U,V,W))

Figure 8. Magnification of Figure 7

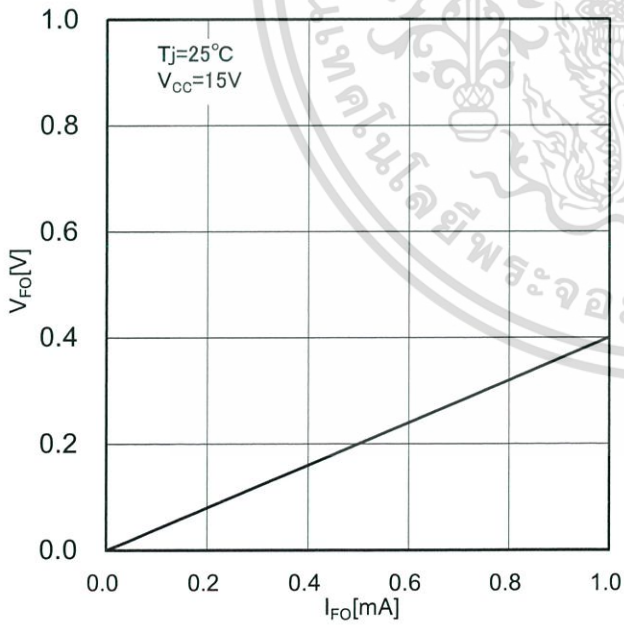


Figure 9. V<sub>FO</sub> vs I<sub>FO</sub>  
 (Characteristic of FO pin V<sub>FO</sub>-I<sub>FO</sub> Curve)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ก่อคดีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอให้อัปเดตเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Timing Chart**

1) Short Circuit Current Protection (protection with the external shunt resistor and RC filter)

a1. Normal operation: IGBT ON and outputs current  $I_c$ .

a2. Short circuit current detection (SCP trigger)

It is recommended to set RC time constant of 1.0 to 2.0 $\mu$ s so that IGBT shuts down within 2.0 $\mu$ s when SCP is triggered.

a3. All low side IGBT's gates are shut down (soft turn off).

a4. All low side IGBTs turn off.

a5. FO outputs for  $t_{FO}=20\mu$ s (Min).

a6. LIN=L

a7. LIN=H, but all IGBTs keep OFF during SCP=H.

a8. FO finishes output, but IGBTs don't turn on until inputting the next ON signal(LIN=L→H)

IGBT of each phase can return to normal state by inputting ON signal to each phase.

a9. Normal operation: IGBT ON and outputs current  $I_c$ .

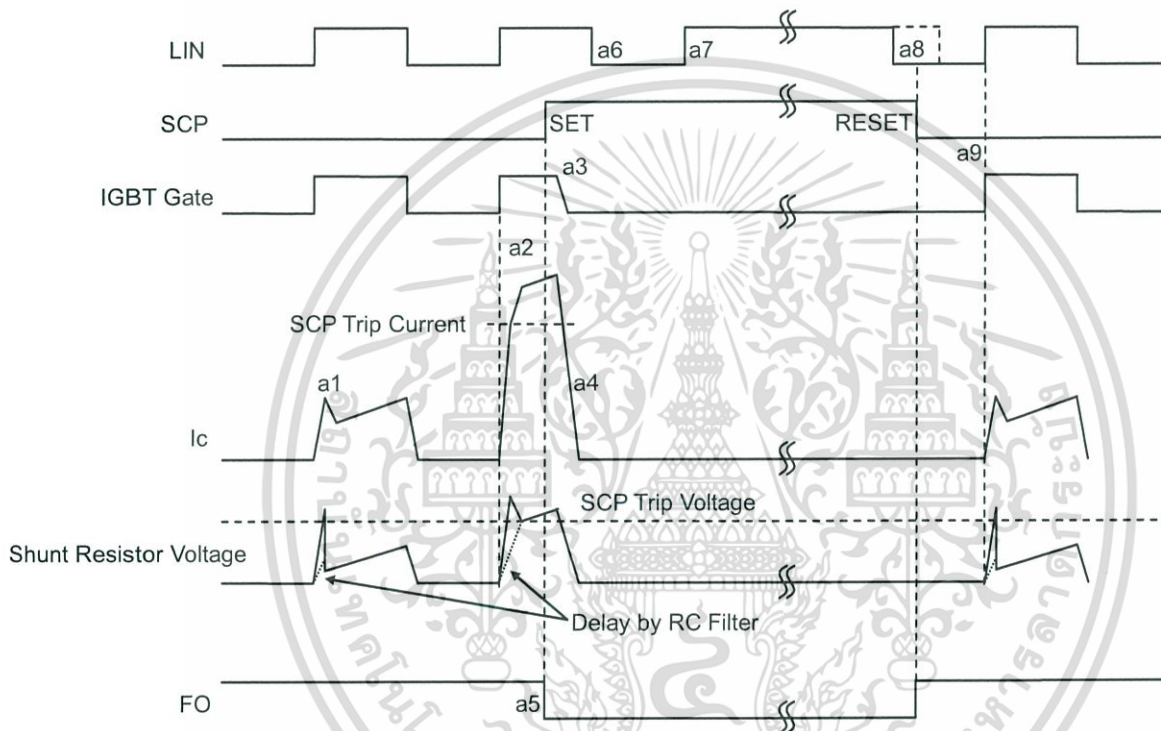


Figure 10. SCP Timing Chart

**Notice**

SCP works only for low side IGBT only.

In case of SCP trip and FO output, please stop controlling IPM quickly to avoid the abnormal state.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปใช้

2) Control Supply (LVCC) Under Voltage Locked Out (UVLO)

- b1 Control supply(LVCC) voltage exceeds UVLO release level ( $V_{CCUVR}$ ), but IGBT turns on by the next ON signal (LIN=L→H). IGBT of each phase can return to normal state by inputting ON signal to each phase.
- b2 Normal operation: IGBT ON and outputs current  $I_c$ .
- b3 LVCC drops to UVLO trip level ( $V_{CCUVT}$ ).
- b4 All low side IGBTs turn off in spite of control input condition.
- b5 FO outputs for  $t_{FO}$ =minimum 20 $\mu$ s, but output is extended while LVCC is below  $V_{CCUVR}$ .
- b6 LVCC reaches  $V_{CCUVR}$ .
- b7 Even if LVCC reaches  $V_{CCUVR}$  during LIN=H, IGBTs don't turn on until inputting the next ON signal (LIN=L→H).
- b8 Normal operation: IGBT ON and outputs current  $I_c$ .

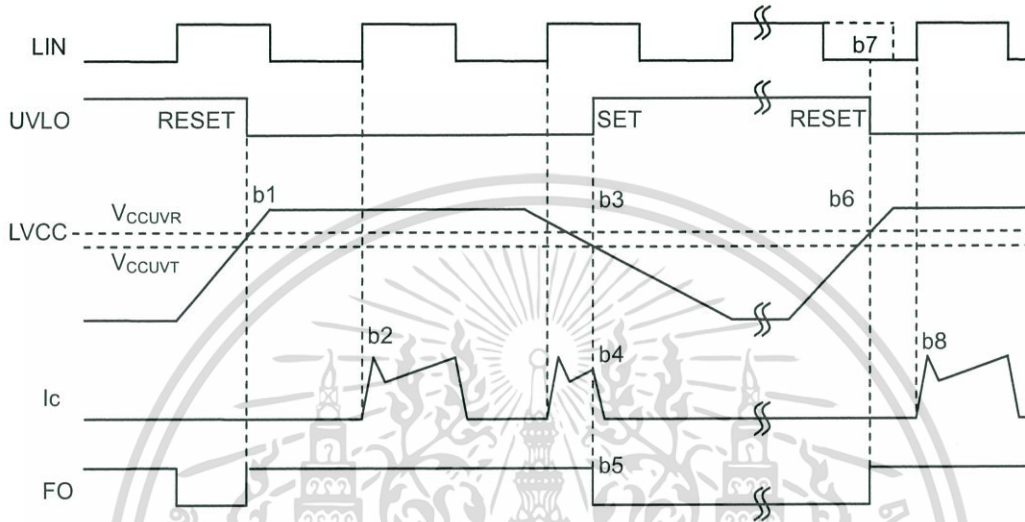


Figure 11. LVCC UVLO Timing Chart

3) Control supply (VBS) Under Voltage Locked Out (UVLO)

- c1 Control supply(VBS) voltage exceeds UVLO release level ( $V_{BSUVR}$ ), but IGBT turns on by the next ON signal (HIN=L→H).
- c2 Normal operation: IGBT ON and outputs current  $I_c$ .
- c3 VBS drops to UVLO trip level ( $V_{BSUVT}$ ).
- c4 Only IGBT of the corresponding phase turns off in spite of control input signal, there is no FO signal output.
- c5 VBS reaches  $V_{BSUVR}$ .
- c6 Even if VBS reaches  $V_{BSUVR}$  during HIN=H, IGBTs don't turn on until inputting the next ON signal (HIN=L→H).
- c7 Normal operation: IGBT ON and outputs current  $I_c$ .

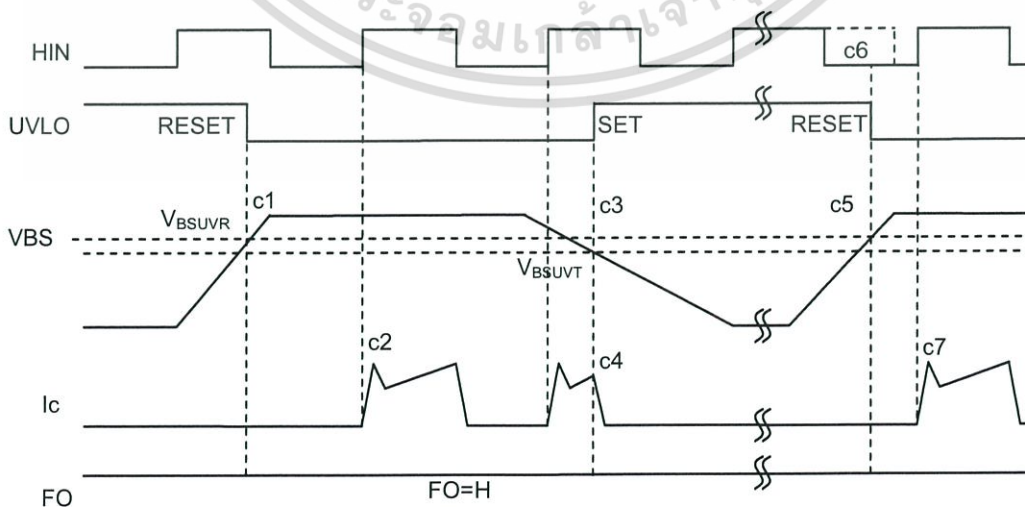


Figure 12. VBS UVLO Timing Chart

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

โปรดกรุณาแจ้งให้ทราบล่วงหน้าหากมีการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารหากมีการนำไปใช้

4) Thermal Shutdown (TSD), monitoring LVIC temperature

- d1 Normal operation: IGBT ON and outputs current  $I_c$ .
- d2 LVIC temperature ( $T_j$ ) exceeds thermal shutdown trip level ( $T_{SDT}$ ).
- d3 All low side IGBTs turn off in spite of control input condition.
- d4 FO outputs for  $t_{FO}=20\mu s$  (Min),  
but output is extended while  $T_j$  is above thermal shutdown release level ( $T_{SDT}-T_{SDHYS}$ ).
- d5  $T_j$  drops to  $T_{SDT}-T_{SDHYS}$
- d6 Even if  $T_j$  reaches  $T_{SDT}-T_{SDHYS}$  during  $LIN=H$ , IGBTs don't turn on until inputting the next ON signal ( $LIN=L\rightarrow H$ ).
- IGBT of each phase can return to normal state by inputting ON signal to each phase.
- d7 Normal operation: IGBT ON and outputs current  $I_c$ .

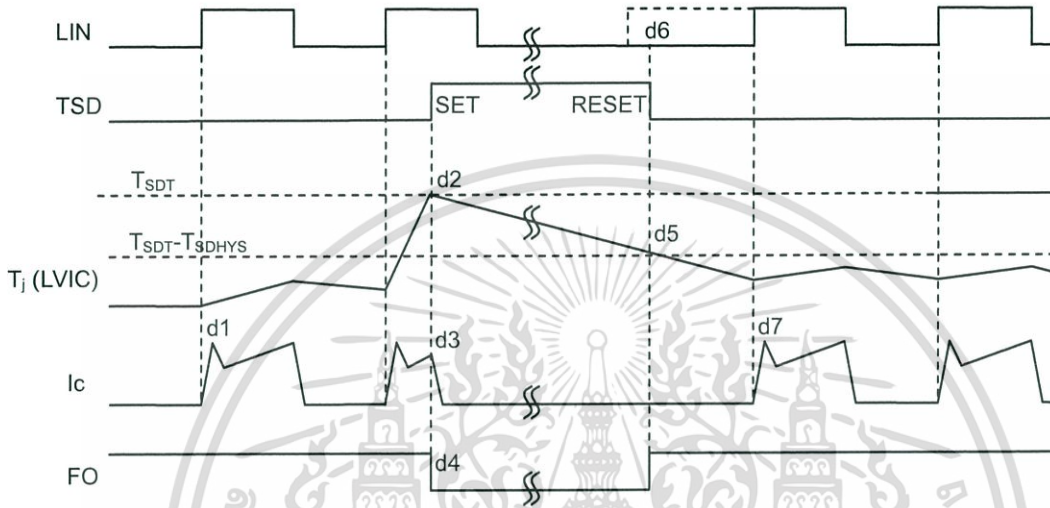


Figure 13. TSD Timing Chart

Notice

- 1) In case of TSD trip and FO output, please stop controlling IPM quickly to avoid the abnormal state.
- 2) If the cooling system is in abnormal state (e.g. heat sink comes off, fixed loosely, or cooling fan stops) when TSD trips, don't reuse IPM. This may cause the junction temperature of power chips to exceed its maximum rating of  $T_{jmax}$  ( $150^{\circ}C$ ).
- 3) TSD function detects LVIC temperature, so it cannot respond to rapid temperature rise of power chip. Therefore, TSD will not work properly in the case of rapid temperature rise like motor lock or over current.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Application Example( one shunt resistor drive)

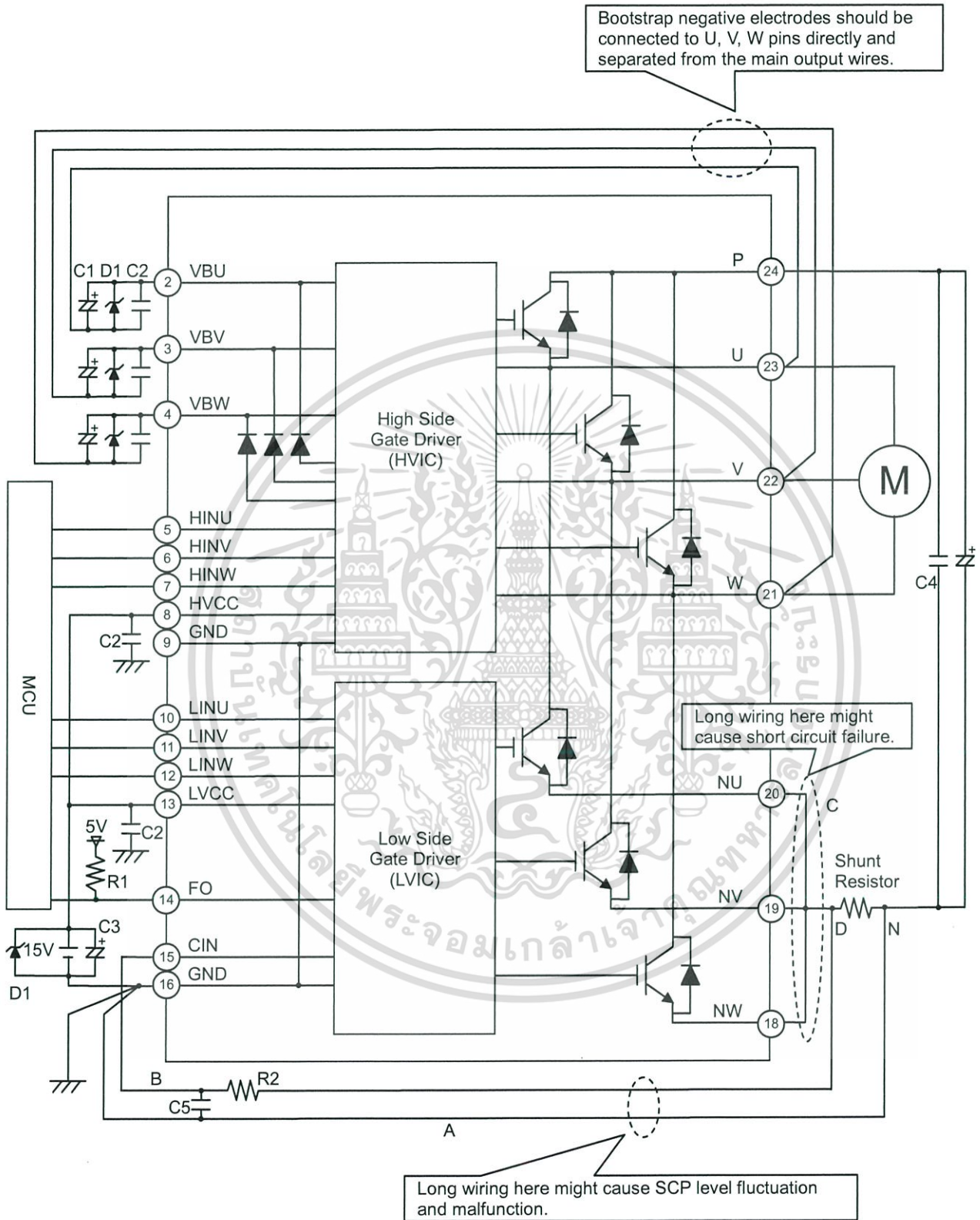


Figure 14. Example of Application Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไปด้วยการถือลิขสิทธิ์อื่น ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Selection of Components Externally Connected (Refer to Figure 14)

## 1) VBU, VBV, VBW pin

- The bypass capacitor(good temperature, frequency characteristic electrolytic type C1: 22 $\mu$ F to 100 $\mu$ F) should be mounted as close as possible to the pin in order to prevent malfunction or destruction due to switching noise and power supply ripple. In addition, for the purpose of reducing of the power supply's impedance in wide frequency bandwidth, ceramic capacitor (good temperature, frequency and DC bias characteristic ceramic type C2: 0.1 $\mu$ F to 0.22 $\mu$ F) should also be mounted.
- Zenner diode D1(1W) should be mounted between each pair of control supply pins to prevent surge destruction.
- Line ripple voltage should meet  $dV/dt \leq 1V/\mu s$ ,  $V_{ripple} \leq 2V_{p-p}$ .
- The wiring from U, V, W pin should be as thick and as short as possible. They should be connected directly and separated from the main output wires.

## 2) HVCC, LVCC pin

- The bypass capacitor(good temperature, frequency characteristic electrolytic type C3) should be mounted as close as possible to the pin in order to prevent malfunction or destruction due to switching noise and power supply ripple. In addition, for the purpose of reducing of the power supply's impedance in wide frequency bandwidth, ceramic capacitor (good temperature, frequency and DC bias characteristic ceramic type C2: 0.1 $\mu$ F to 0.22 $\mu$ F) should also be mounted.
- Zenner diode D1(1W) should be mounted between each pair of control supply pins to prevent surge destruction.
- Line ripple voltage should meet  $dV/dt \leq 1V/\mu s$ ,  $V_{ripple} \leq 2V_{p-p}$ .

## 3) P pin

- To prevent surge destruction, the wiring between the smoothing capacitor and P, N pins should be as short as possible.
- Snubber capacitor(C4: 0.1 $\mu$ F to 0.22 $\mu$ F) should be mounted between the P-N pin.

## 4) Control Input pin (HINU, HINV, HINW, LINU, LINV, LINW)

- The wiring should be as short as possible to prevent malfunction.
- Input drive is active-high type. There is a 3.3k $\Omega$ (Min) pull-down resistor in the input circuit of IPM. When using RC coupling circuit, make sure the input signal level meet the input threshold voltage.
- Dead time of input signal should be more than specified value.

## 5) FO pin

- FO output is open drain type. It should be pulled up to control power supply(e.g. 5V, 15V) by a resistor that makes  $I_{FO}$  up to 1mA.  $I_{FO}$  is estimated roughly by the formula of control power supply voltage divided by pull-up resistance(R1). In the case of pulled up to 5V, R1=10k $\Omega$  is recommended.

## 6) CIN pin

- RC filter(R2, C5) should be mounted as close as possible to the pin in order to prevent malfunction by recovery current or switching noise. It is recommended to select tight tolerance, temp-compensated type for RC filter (R2, C5). The time constant R2C5 (1.0 $\mu$ s to 2.0 $\mu$ s is recommended) should be set so that SCP current is shut down within 2 $\mu$ s. Please confirm operation on the actual application since SCP shutdown time changes depending on the PCB wiring pattern.
- The point D at which the wiring to CIN filter is divided should be near the pin of shunt resistor. NU, NV, NW pin should be connected at near NU, NV, NW pin.
- To prevent malfunction, the wiring of B should be as short as possible.

## 7) GND pin

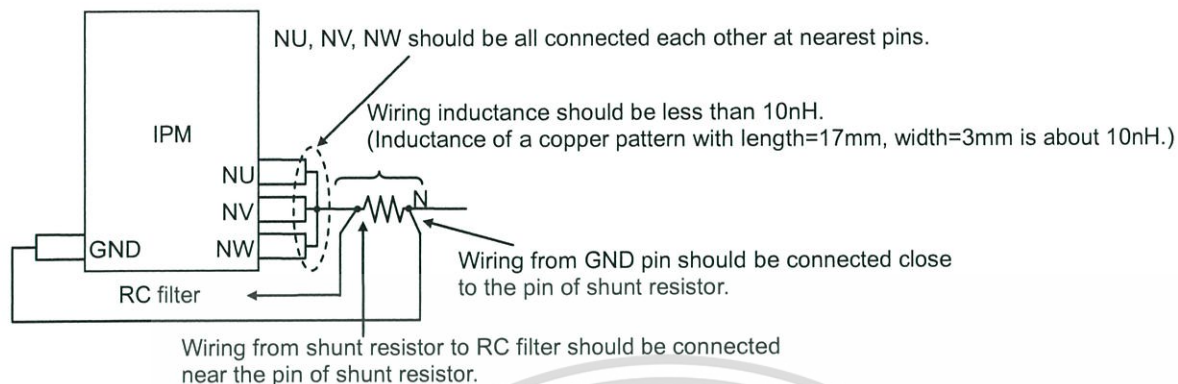
- Two GND pins (9 & 16 pin) are connected inside IPM. Please connect one pin (16 pin is recommended.) to the 15V power supply GND outside and leave the other open.
- If control GND is connected with power GND by common broad pattern, it may cause malfunction by power GND fluctuation. It is recommended to connect control GND and power GND at only a point N (near the pin of shunt resistor).
- To prevent malfunction, the wiring of A should be as short as possible.

## 8) NU, NV, NW pin

- When operating with one-shunt resistor, please short the three pins(NU, NV, NW). In addition, to prevent malfunction, the wiring of C should be as short as possible.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไปว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9) One-shunt Resistor Drive



Low inductance shunt resistor like surface mounted (SMD) type is recommended.

Figure 15. Wiring Pattern around the Shunt Resistor when Operating with One-shunt Resistor

10) Three-shunt Resistors Drive

- It is not recommended to input the voltage of each shunt resistor directly to the CIN pin when IPM is operated with three shunt resistor. In that case, it is necessary to use the external protection circuit as below.
- It is necessary to set the time constant  $R_f C_f$  ( $1.0\mu\text{s}$  to  $2.0\mu\text{s}$  is recommended) of external comparator input so that IGBT stops within  $2\mu\text{s}$  when short circuit occurs. Please confirm operation on the actual application since SCP shutdown time changes depending on the PCB wiring pattern.
- It is recommended for the threshold voltage  $V_{REF}$  to be set to the same rating of short circuit trip level ( $V_{SC}=0.48\text{V(Typ)}$ )
- To prevent malfunction, the wiring of A, B, C should be as short as possible.
- OR output high level when protection works should be  $0.53\text{V}$  (maximum  $V_{SC}$  rating) to  $7\text{V}$  (CIN absolute maximum rating).

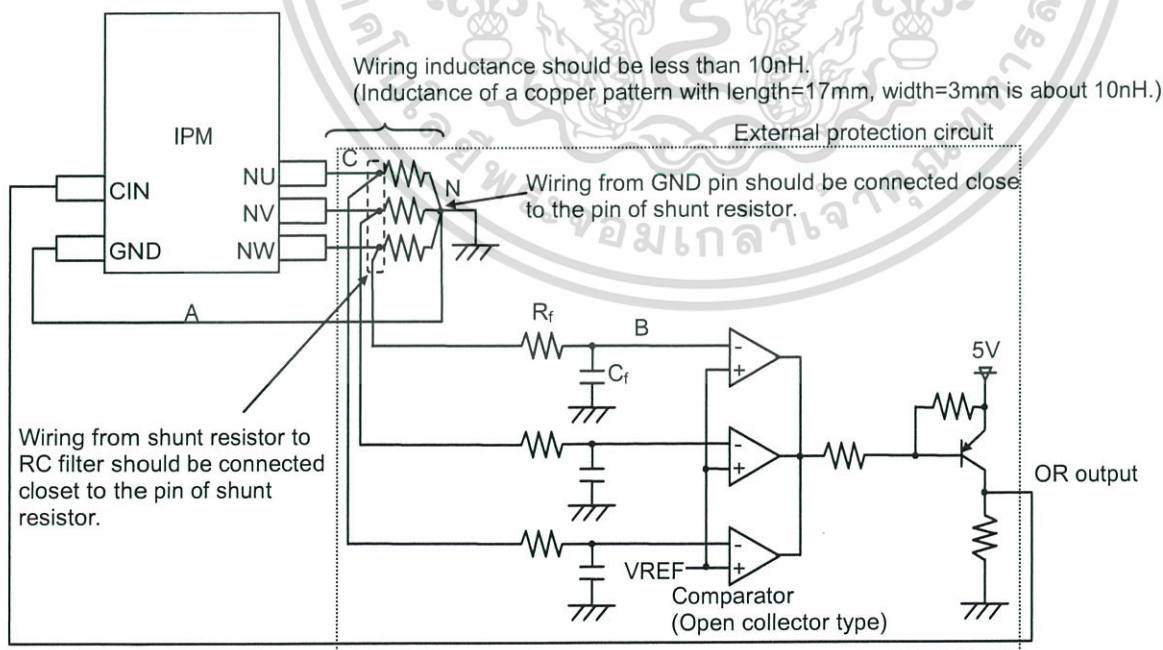


Figure 16. Wiring Pattern around the Shunt Resistor when operating with Three-shunt Resistors

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไปด้วยการใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I/O Equivalence Circuit

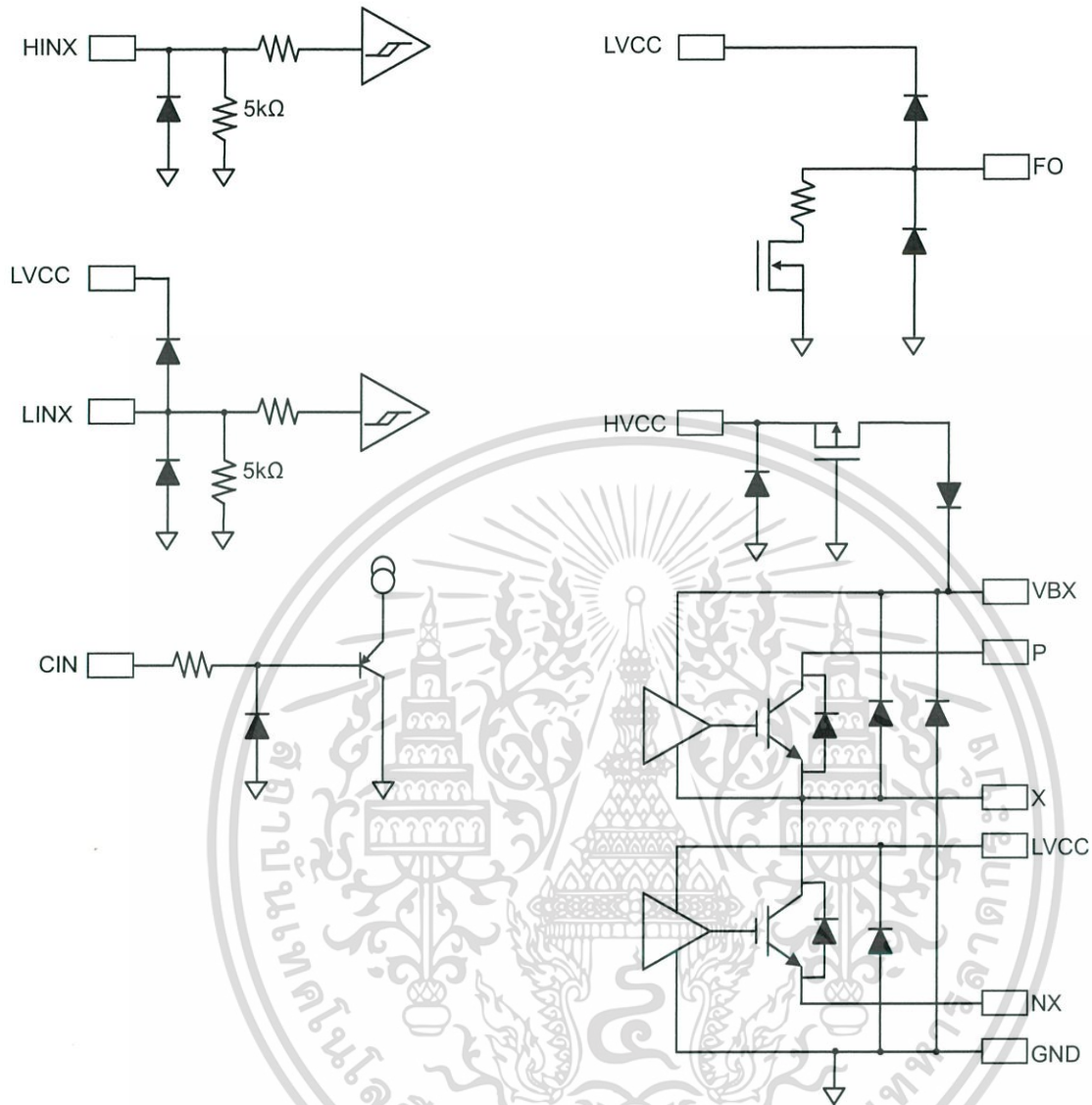


Figure 17. Input / Output Equivalent Circuit (X=U, V, W)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Operational Notes

**1. Reverse Connection of Power Supply**

Connecting the power supply in reverse polarity can damage the IPM. Take precautions against reverse polarity when connecting the power supply, such as mounting an external diode between the power supply and the IPM's power supply pins.

**2. Power Supply Lines**

Design the PCB layout pattern to provide low impedance supply lines. Separate the ground and supply lines of the digital and analog blocks to prevent noise in the ground and supply lines of the digital block from affecting the analog block. Furthermore, connect a capacitor to ground at all power supply pins. Consider the effect of temperature and aging on the capacitance value when using electrolytic capacitors.

**3. Ground Voltage**

Ensure that no pins are at a voltage below that of the ground pin at any time, even during transient condition.

**4. Ground Wiring Pattern**

When using both small-signal and large-current ground traces, the two ground traces should be routed separately but connected to a single ground at the reference point of the application board to avoid fluctuations in the small-signal ground caused by large currents. Also ensure that the ground traces of external components do not cause variations on the ground voltage. The ground lines must be as short and thick as possible to reduce line impedance.

**5. Thermal Consideration**

Should by any chance the power dissipation rating be exceeded the rise in temperature of the chip may result in deterioration of the properties of the chip.

**6. Recommended Operating Conditions**

These conditions represent a range within which the expected characteristics of the IPM can be approximately obtained. The electrical characteristics are guaranteed under the conditions of each parameter.

**7. Inrush Current**

When power is first supplied to the IPM, it is possible that the internal logic may be unstable and inrush current may flow instantaneously due to the internal powering sequence and delays, especially if the IPM has more than one power supply. Therefore, give special consideration to power coupling capacitance, power wiring, width of ground wiring, and routing of connections.

**8. Operation Under Strong Electromagnetic Field**

Operating the IPM in the presence of a strong electromagnetic field may cause the IPM to malfunction.

**9. Testing on Application Boards**

When testing the IPM on an application board, connecting a capacitor directly to a low-impedance output pin may subject the IPM to stress. Always discharge capacitors completely after each process or step. The IPM's power supply should always be turned off completely before connecting or removing it from the test setup during the inspection process. To prevent damage from static discharge, ground the IPM during assembly and use similar precautions during transport and storage.

**10. Inter-pin Short and Mounting Errors**

Ensure that the direction and position are correct when mounting the IPM on the PCB. Incorrect mounting may result in damaging the IPM. Avoid nearby pins being shorted to each other especially to ground, power supply and output pin. Inter-pin shorts could be due to many reasons such as metal particles, water droplets (in very humid environment) and unintentional solder bridge deposited in between pins during assembly to name a few.

**11. Unused Input Pins**

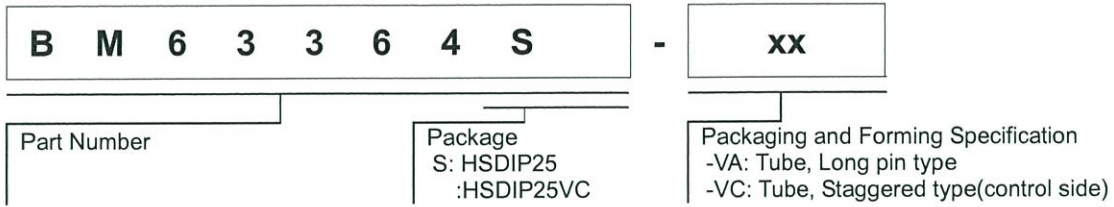
Input pins of an IPM are often connected to the gate of a MOS transistor. The gate has extremely high impedance and extremely low capacitance. If left unconnected, the electric field from the outside can easily charge it. The small charge acquired in this way is enough to produce a significant effect on the conduction through the transistor and cause unexpected operation of the IPM. So unless otherwise specified, unused input pins should be connected to the power supply or ground line.

**12. Area of Safe Operation (ASO)**

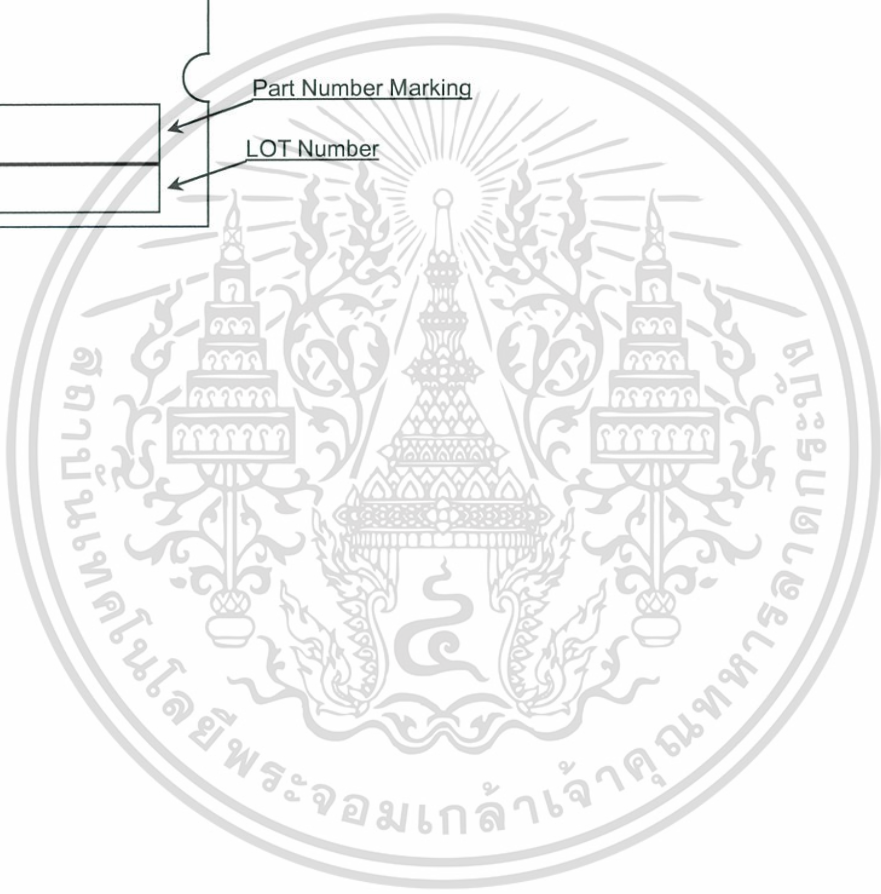
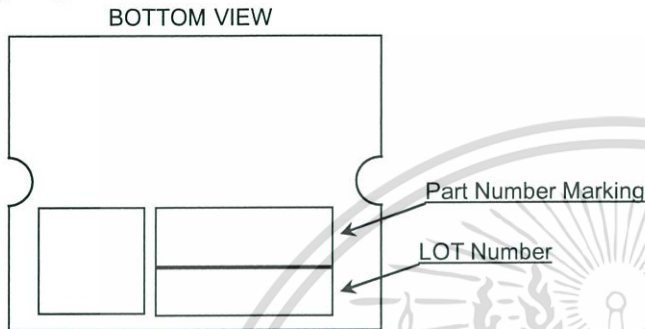
Operate the IPM such that the output voltage, output current, and power dissipation are all within the Area of Safe Operation (ASO).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ordering Information



Marking Diagram

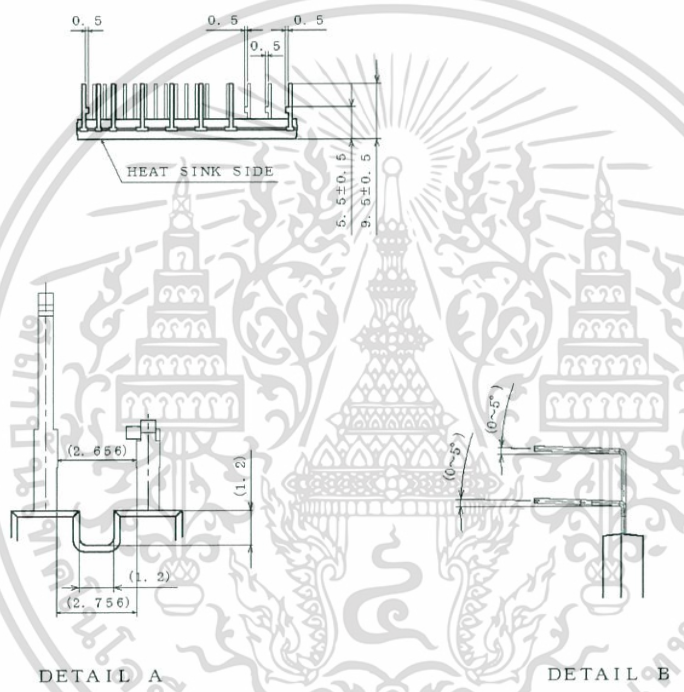
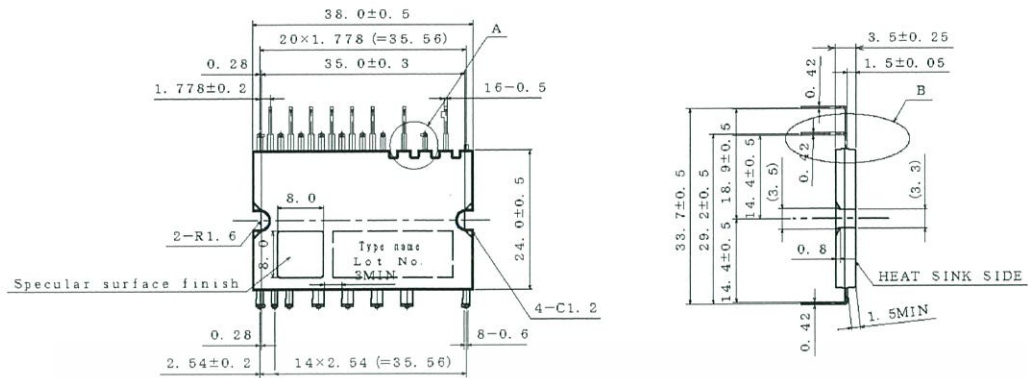


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ควรดัดแปลง หรือแก้ไขข้อมูลใดๆ ให้ผิดเพี้ยนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Physical Dimension, Tape and Reel Information – continued

<b>Package Name</b>	<b>HSDIP25VC</b>
---------------------	------------------



(UNIT : mm)

PRG : HSDIP25VC  
Drawing No. 641-5003

**<Tape and Reel information>**

Container	Tube
Quantity	60pcs
Direction of feed	Direction of products is fixed in a container tube

**\*When you order, please order in times the amount of package quantity.**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารหรือผู้ที่มีอำนาจไปใช้

Revision History

Date	Revision	Changes
05.Aug.2014	001	New Release
11.Nov.2014	002	BM63364S-VC added



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนำไปใช้

# Notice

## Precaution on using ROHM Products

- Our Products are designed and manufactured for application in ordinary electronic equipments (such as AV equipment, OA equipment, telecommunication equipment, home electronic appliances, amusement equipment, etc.). If you intend to use our Products in devices requiring extremely high reliability (such as medical equipment <sup>(Note 1)</sup>, transport equipment, traffic equipment, aircraft/spacecraft, nuclear power controllers, fuel controllers, car equipment including car accessories, safety devices, etc.) and whose malfunction or failure may cause loss of human life, bodily injury or serious damage to property ("Specific Applications"), please consult with the ROHM sales representative in advance. Unless otherwise agreed in writing by ROHM in advance, ROHM shall not be in any way responsible or liable for any damages, expenses or losses incurred by you or third parties arising from the use of any ROHM's Products for Specific Applications.

(Note1) Medical Equipment Classification of the Specific Applications

JAPAN	USA	EU	CHINA
CLASS III	CLASS III	CLASS II b	CLASS III
CLASS IV		CLASS III	

- ROHM designs and manufactures its Products subject to strict quality control system. However, semiconductor products can fail or malfunction at a certain rate. Please be sure to implement, at your own responsibilities, adequate safety measures including but not limited to fail-safe design against the physical injury, damage to any property, which a failure or malfunction of our Products may cause. The following are examples of safety measures:
  - Installation of protection circuits or other protective devices to improve system safety
  - Installation of redundant circuits to reduce the impact of single or multiple circuit failure
- Our Products are designed and manufactured for use under standard conditions and not under any special or extraordinary environments or conditions, as exemplified below. Accordingly, ROHM shall not be in any way responsible or liable for any damages, expenses or losses arising from the use of any ROHM's Products under any special or extraordinary environments or conditions. If you intend to use our Products under any special or extraordinary environments or conditions (as exemplified below), your independent verification and confirmation of product performance, reliability, etc. prior to use, must be necessary:
  - Use of our Products in any types of liquid, including water, oils, chemicals, and organic solvents
  - Use of our Products outdoors or in places where the Products are exposed to direct sunlight or dust
  - Use of our Products in places where the Products are exposed to sea wind or corrosive gases, including Cl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, and NO<sub>2</sub>
  - Use of our Products in places where the Products are exposed to static electricity or electromagnetic waves
  - Use of our Products in proximity to heat-producing components, plastic cords, or other flammable items
  - Sealing or coating our Products with resin or other coating materials
  - Use of our Products without cleaning residue of flux (even if you use no-clean type fluxes, cleaning residue of flux is recommended); or Washing our Products by using water or water-soluble cleaning agents for cleaning residue after soldering
  - Use of the Products in places subject to dew condensation
- The Products are not subject to radiation-proof design.
- Please verify and confirm characteristics of the final or mounted products in using the Products.
- In particular, if a transient load (a large amount of load applied in a short period of time, such as pulse. is applied, confirmation of performance characteristics after on-board mounting is strongly recommended. Avoid applying power exceeding normal rated power; exceeding the power rating under steady-state loading condition may negatively affect product performance and reliability.
- De-rate Power Dissipation (Pd) depending on Ambient temperature (Ta). When used in sealed area, confirm the actual ambient temperature.
- Confirm that operation temperature is within the specified range described in the product specification.
- ROHM shall not be in any way responsible or liable for failure induced under deviant condition from what is defined in this document.

## Precaution for Mounting / Circuit board design

- When a highly active halogenous (chlorine, bromine, etc.) flux is used, the residue of flux may negatively affect product performance and reliability.
- In principle, the reflow soldering method must be used on a surface-mount products, the flow soldering method must be used on a through hole mount products. If the flow soldering method is preferred on a surface-mount products, please consult with the ROHM representative in advance.

For details, please refer to ROHM Mounting specification

## Precautions Regarding Application Examples and External Circuits

1. If change is made to the constant of an external circuit, please allow a sufficient margin considering variations of the characteristics of the Products and external components, including transient characteristics, as well as static characteristics.
2. You agree that application notes, reference designs, and associated data and information contained in this document are presented only as guidance for Products use. Therefore, in case you use such information, you are solely responsible for it and you must exercise your own independent verification and judgment in the use of such information contained in this document. ROHM shall not be in any way responsible or liable for any damages, expenses or losses incurred by you or third parties arising from the use of such information.

## Precaution for Electrostatic

This Product is electrostatic sensitive product, which may be damaged due to electrostatic discharge. Please take proper caution in your manufacturing process and storage so that voltage exceeding the Products maximum rating will not be applied to Products. Please take special care under dry condition (e.g. Grounding of human body / equipment / solder iron, isolation from charged objects, setting of Ionizer, friction prevention and temperature / humidity control).

## Precaution for Storage / Transportation

1. Product performance and soldered connections may deteriorate if the Products are stored in the places where:
  - [a] the Products are exposed to sea winds or corrosive gases, including Cl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, and NO<sub>2</sub>
  - [b] the temperature or humidity exceeds those recommended by ROHM
  - [c] the Products are exposed to direct sunshine or condensation
  - [d] the Products are exposed to high Electrostatic
2. Even under ROHM recommended storage condition, solderability of products out of recommended storage time period may be degraded. It is strongly recommended to confirm solderability before using Products of which storage time is exceeding the recommended storage time period.
3. Store / transport cartons in the correct direction, which is indicated on a carton with a symbol. Otherwise bent leads may occur due to excessive stress applied when dropping of a carton.
4. Use Products within the specified time after opening a humidity barrier bag. Baking is required before using Products of which storage time is exceeding the recommended storage time period.

## Precaution for Product Label

QR code printed on ROHM Products label is for ROHM's internal use only.

## Precaution for Disposition

When disposing Products please dispose them properly using an authorized industry waste company.

## Precaution for Foreign Exchange and Foreign Trade act

Since concerned goods might be fallen under listed items of export control prescribed by Foreign exchange and Foreign trade act, please consult with ROHM in case of export.

## Precaution Regarding Intellectual Property Rights

1. All information and data including but not limited to application example contained in this document is for reference only. ROHM does not warrant that foregoing information or data will not infringe any intellectual property rights or any other rights of any third party regarding such information or data.
2. ROHM shall not have any obligations where the claims, actions or demands arising from the combination of the Products with other articles such as components, circuits, systems or external equipment (including software).
3. No license, expressly or implied, is granted hereby under any intellectual property rights or other rights of ROHM or any third parties with respect to the Products or the information contained in this document. Provided, however, that ROHM will not assert its intellectual property rights or other rights against you or your customers to the extent necessary to manufacture or sell products containing the Products, subject to the terms and conditions herein.

## Other Precaution

1. This document may not be reprinted or reproduced, in whole or in part, without prior written consent of ROHM.
2. The Products may not be disassembled, converted, modified, reproduced or otherwise changed without prior written consent of ROHM.
3. In no event shall you use in any way whatsoever the Products and the related technical information contained in the Products or this document for any military purposes, including but not limited to, the development of mass-destruction weapons.
4. The proper names of companies or products described in this document are trademarks or registered trademarks of ROHM, its affiliated companies or third parties.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอให้อัปเดตแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**General Precaution**

1. Before you use our Products, you are requested to carefully read this document and fully understand its contents. ROHM shall not be in any way responsible or liable for failure, malfunction or accident arising from the use of any ROHM's Products against warning, caution or note contained in this document.
2. All information contained in this document is current as of the issuing date and subject to change without any prior notice. Before purchasing or using ROHM's Products, please confirm the latest information with a ROHM sales representative.
3. The information contained in this document is provided on an "as is" basis and ROHM does not warrant that all information contained in this document is accurate and/or error-free. ROHM shall not be in any way responsible or liable for any damages, expenses or losses incurred by you or third parties resulting from inaccuracy or errors of or concerning such information.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้