

การวิเคราะห์และป้องกันแรงดันเกินของมอเตอร์เหนี่ยวนำ
ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์พีดับบลิวเอ็ม

ANALYSIS AND PROTECTION OF OVERVOLTAGE IN PWM
INVERTER FED INDUCTION MOTORS

อุดมศักดิ์ อยู่สนอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การวิเคราะห์และป้องกันแรงดันเกินของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อน
ด้วยอินเวอร์เตอร์พีดับบลิวเอ็ม

อุดมศักดิ์ อยู่สนอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์และป้องกันแรงดันเกินของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์พีดับบลิวเอ็ม
ชื่อ – นามสกุล	นายอุดมศักดิ์ อยู่สนอง
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

กระบวนการทำงานในโรงงานอุตสาหกรรมอินเวอร์เตอร์ถูกนำมาใช้ควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำอย่างกว้างขวาง ซึ่งในกรณีที่อินเวอร์เตอร์ถูกติดตั้งให้มีระยะห่างกับมอเตอร์จะส่งผลกระทบต่อโดยการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะขึ้นที่ขั้วของมอเตอร์ อาจเป็นผลให้ขดลวดของมอเตอร์ได้รับความเสียหายได้

วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์และป้องกันการเกิดปัญหาแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะที่ขั้วของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยการจำลองการเกิดปัญหาด้วย MATLAB และเปรียบเทียบกับอุปกรณ์จริงโดยใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 3 เฟส 220 โวลต์ 400 วัตต์ และอินเวอร์เตอร์อุตสาหกรรมขนาดเดียวกันมีความยาว โดยการเปรียบเทียบและจำลองจะถูกแบ่งตามความยาวของสายเคเบิลเป็น 5-10 เมตร และ 15 เมตร ตามลำดับ จากนั้นได้ทำการออกแบบวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์เพื่อลดทอนปัญหาแรงดันเกินที่เกิดขึ้น

จากการจำลองปัญหาพบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของมอเตอร์มีแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะเกิดขึ้นตามความยาวของสายเคเบิลที่เพิ่มขึ้น โดยในระยะ 15 เมตร จะเกิดแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะประมาณ 570 โวลต์ 10 เมตร และ 5 เมตร ประมาณ 410 โวลต์ และ 380 โวลต์ ตามลำดับจากผลดังกล่าวได้นำมาทำการออกแบบวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์เพื่อช่วยลดทอนแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะซึ่ง ได้ค่าอินดักเตอร์เท่ากับ 0.056 มิลลิเฮนรี และคาปาซิเตอร์เท่ากับ 4.7 นาโนฟารัด โดยแรงดันไฟฟ้าหลังจากติดตั้งอุปกรณ์ฟิลเตอร์มีค่าแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะลดลงโดยแรงดันเกินชั่วขณะเมื่อสายเคเบิลยาว 15 เมตร เหลือประมาณ 385 โวลต์ ที่ความยาวสายเคเบิล 10 เมตร และ 5 เมตร จะมีค่าประมาณ 350 โวลต์ และ 330 โวลต์ ตามลำดับ

คำสำคัญ: มอเตอร์เหนี่ยวนำ แรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะ พาสซีฟฟิลเตอร์

Thesis Title	Analysis and Protection of Overvoltage in PWM Inverter Fed Induction Motors
Name - Surname	Mr. Udomsak Yoosanong
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Krischonme Bhumkittipich, Ph.D.
Academic Year	2012

ABSTRACT

The industrial operation processes are necessary to use the inverter to control speed of the induction motor and it has been widely used in many applications. If the inverter is installed at long distance from induction motor, the system generated the over voltage which directly effect to motor. The transient voltage that appears at the terminal of motor. It can cause of damage to the motor winding.

This thesis proposes an analysis and protection of overvoltage problem at the terminal of the induction motor. This study is modeled the PWM inverter and induction motor using MATLAB environment to ensure the inverter behavior and compared the simulation results using 3 phase 220 V 400 W industrial inverter. To show the effect of overvoltage, the power cable is divided into 3 groups of length: 5, 10 and 15 meters, respectively. Finally, the protection method is proposed using passive filter to reduce the overvoltage.

The experimental results show that terminal motor voltage are increased when the cable length increased. The cable length at 15, 10 and 5 meters are generated the surge voltage about 570 V, 410 V and 380 V respectively. The passive filter is designed including as inductor 0.056 mH and capacitor 4.7 nF. The over voltages are measured to 385 V, 350 V and 330 V in 3 cable length.

Keywords: induction motor, overvoltage surge, passive filter

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ดร. สุรินทร์ แห่งมงาม กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธนะ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงานภาควิชาไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ได้ให้สถานที่ในการวิจัยและทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขอบคุณเพื่อนนักศึกษาและสมาชิกศูนย์วิจัยทุกท่านที่คอยแลกเปลี่ยนความรู้ช่วยเหลือเกื้อกูลกันมาตลอด โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณ อมรเทพ แพทยานันท์ ที่คอยเตือนให้ข้อคิดทางด้านการศึกษาและการปฏิบัติตนให้เดินสู่เป้าหมายจนสำเร็จ และคุณ อุไรวรรณ แพทยานันท์ ที่ช่วยให้คำปรึกษางานทางด้านเอกสารและให้กำลังใจในการทำงาน

ขอขอบคุณบริษัท ไฮทรอน-ตรีศักดิ์ จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือในการยืมอุปกรณ์ในการทำงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขอขอบคุณทีมช่างโดยมีคุณ รุ่งเพชร บัวจะมะ และคุณ ธรรมมา คำมหาชัย ที่คอยช่วยเหลือและแนะนำการใช้งานอุปกรณ์ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ สุดท้ายขอขอบพระคุณของบิดา มารดา น้องชาย และญาติสนิททุกท่านที่คอยเป็นกำลังใจให้ตลอดมาเป็นแรงผลักดันในการฝ่าฟันอุปสรรคต่างๆให้ผ่านไปได้ด้วยดี

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่มากก็น้อยหากจะช่วยให้เกิดประโยชน์ต่อนักศึกษาหรือบุคคลทั่วไปซึ่งสนใจทางด้านนี้ จึงขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณตลอดจนเพื่อนมนุษย์ผู้ซึ่งคิดดี ปฏิบัติดีดีมั่นในจริยธรรมอันพึงจะมีบนโลกใบนี้ทุกท่าน

อุดมศักดิ์ อยู่สนอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนการวิจัย.....	2
1.6 ข้อยกเว้นของการวิจัย.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.8 ลักษณะรายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (Three Phase Induction Motor).....	8
2.4 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส.....	15
2.5 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของสายไฟฟ้า.....	25
2.6 สรุปผลทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	29
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	29
3.2 แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำความถี่สูงด้วยวงจรสมมูล.....	32

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3 การออกแบบวงจรกรองพาสซีฟชนิด LC	34
3.4 การทดลองทางโปรแกรม	36
3.5 การจำลองผลทางฮาร์ดแวร์	37
3.6 สรุปขั้นตอนการดำเนินงาน	40
4 การจำลองระบบและผลการวิเคราะห์ข้อมูล	41
4.1 โครงสร้างระบบ	41
4.2 ผลการจำลองแรงดันที่อินเวอร์เตอร์	42
4.3 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ก่อนติดตั้งวงจรถูกตัว	44
4.4 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์หลังติดตั้งวงจรถูกตัว	48
4.5 สรุปผลการจำลอง	51
5 สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	52
5.1 สรุปผลการวิจัย	52
5.2 ข้อเสนอแนะ	53
รายการอ้างอิง	55
ภาคผนวก	57
ภาคผนวก ก ข้อมูลอุปกรณ์การทดลอง	58
ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	94
ประวัติผู้เขียน	115

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 อัตราส่วนระหว่างค่า RMS ของฮาร์โมนิกกับ V_s ของแรงดันสายของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	18



สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การต่อความต้านทานจากภายนอกเข้ากับ โรเตอร์แบบพันขดลวด	11
2.2 การจ่ายแรงดัน ไฟฟ้า 3 เฟส ให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส	12
2.3 คลื่นไซน์ของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยกระแสไฟฟ้า 3 เฟส	12
2.4 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้ว	13
2.5 วงจรและรูปคลื่นสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ PWM	17
2.6 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแสดงช่วงกำลังงานไม่ไหลสู่ โหลด	19
2.7 การใช้เทคนิค PWM กับวงจรทอนระดับ	21
2.8 โครงสร้างของวงจรกรองแบบพาสซีฟที่มีความถี่ตัดต่ำกว่าความถี่การสวิตช์	22
2.9 อินดักแตนซ์ของเคเบิล 3 แกนที่วางตัวเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า	25
2.10 แรงดันไฟฟ้าและคาปาซิแตนซ์ของเคเบิล 3 แกนที่วางตัวเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า	26
3.1 แบบจำลองสายเคเบิลที่ความถี่สูงด้วยวงจรสมมูลรวมกลุ่ม	29
3.2 แบบจำลองสายเคเบิลที่ความถี่สูงด้วยวงจรเทวินิน	30
3.3 แบบจำลองสายเคเบิลที่ความถี่สูงที่ใช้ในการจำลอง	31
3.4 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเทียบกับนิวทริล	32
3.5 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเทียบกับกราวด์	33
3.6 แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำความถี่สูงที่ใช้ในการจำลอง	33
3.7 วงจรสมมูลของวงจรกรองที่ใช้ในการออกแบบ	34
3.8 แผนภูมิการออกแบบวงจรกรองพาสซีฟแบบ LC	35
3.9 วงจรการจำลองด้วยวงจรสมมูลความถี่สูง	36
3.10 แบบจำลองเมื่อใช้เป็นระบบสามเฟส	37
3.11 อุปกรณ์การจำลองผลทางฮาร์ดแวร์	38
3.12 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์	38
3.13 การใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ	39
3.14 วงจรพาสซีฟฟิลเตอร์	39
3.15 การใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมมอเตอร์ในการจำลองและวัดผล	40
4.1 แบบจำลองของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีสายเคเบิลยาว	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.2	แรงดันไฟฟ้าที่ DC Link ของอินเวอร์เตอร์ในแบบจำลอง.....	42
4.3	แรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์จาก โปรแกรม	43
4.4	แรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์จากฮาร์ดแวร์	43
4.5	แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 5 เมตรจาก โปรแกรม MATLAB	44
4.6	แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 5 เมตรจากฮาร์ดแวร์	45
4.7	แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 10 เมตรจาก โปรแกรม MATLAB	46
4.8	แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 10 เมตรจากฮาร์ดแวร์.....	46
4.9	แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 15 เมตรจาก โปรแกรม MATLAB	47
4.10	แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 15 เมตรจากฮาร์ดแวร์.....	47
4.11	แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 5 เมตรจาก โปรแกรม MATLAB	48
4.12	แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 5 เมตรจากฮาร์ดแวร์.....	49
4.13	แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 10 เมตรจาก โปรแกรม MATLAB	49
4.14	แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 10 เมตรจากฮาร์ดแวร์.....	50
4.15	แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 15 เมตรจาก โปรแกรม MATLAB	50
4.16	แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 15 เมตรจากฮาร์ดแวร์.....	51

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
IGBT	การพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจำพวกเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์
VSD	ระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ
PWM	เทคนิคการควบคุมด้วยการขับแบบพีดับบลิวเอ็ม
N_s	ความเร็วเชิงโรตอร์
f	ความถี่หลักมูลของไฟฟ้ากระแสสลับ
P	จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์
S_N	ความเร็วเชิงโรตอร์
N	ความเร็วรอบของโรเตอร์ขณะใช้งาน
G	สายลบบของแหล่งแรงดันไฟตรง
V_o	ค่าเฉลี่ยจริงซึ่งเป็นค่าคงตัว
m_a	amplitude modulation
ω_a	frequency modulation
m_f	อัตราการมอดคูเลตความถี่
f	ความถี่การสวิตซ์
f_a	ความถี่การมอดคูเลต
$Z_o = \sqrt{(Z_{oc} Z_{sc})}$	ค่าอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล
Z_{oc}	ค่าอิมพีแดนซ์เปิดวงจรของสายเคเบิล
Z_{sc}	ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของสายเคเบิล
R_s, L_s	ค่ารีซิสแตนซ์และอินดักแตนซ์ขณะลัดวงจรของสายเคเบิล
R_{p1}, R_{p2}	ค่ารีซิสแตนซ์ขณะเปิดวงจรของสายเคเบิล
C_{p1}, C_{p2}	ค่าคาปาซิแตนซ์ขณะเปิดวงจรของสายเคเบิล
C_g	คาปาซิแตนซ์ของมอเตอร์เทียบกับกราวด์
R_e	ความต้านทานกระแสเอ็ดดีในขดลวดสนามแม่เหล็กและเฟรม
L_d	ค่าอินดักแตนซ์รั่วไหล

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการใช้ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ กำลังมีการใช้งานมากขึ้นอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม ด้วยเหตุผลที่ง่ายต่อการควบคุม มอเตอร์เหนี่ยวนำ เพื่อสร้างประสิทธิภาพให้เครื่องจักรได้อย่างเหมาะสมและเพื่อประหยัด พลังงานไฟฟ้าของเครื่องจักร เกือบ 30 ปี ในการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจำพวก เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ หรือ Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBT) [1] ให้มีความสามารถในการทำงานในย่านความถี่สวิตซ์ซึ่งและแรงดันกับกระแสไฟฟ้าที่สูงได้ จึงได้มีการนำเอาความสามารถของ IGBT มาพัฒนาระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Variable Speed Drives, VSD) ด้วยเทคนิคการควบคุมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน แบบพีดับบลิวเอ็ม (Pulse-Width Modulation, PWM) [1]

จากคุณสมบัติของ IGBT ที่มีย่านของความถี่สวิตซ์ซึ่งสูงสุดถึง 20 กิโลเฮิร์ตซ์ จึงทำให้เกิดการควบคุมมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพทางด้านการทำงานสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามย่อมมีผลกระทบด้านข้อเสียดังกล่าวด้วยเช่น ผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดจากความถี่สวิตซ์ซึ่ง (Noise) ผลของแรงดันกับกระแสฮาร์มอนิก ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า และสร้างปัญหากับอุปกรณ์ที่มีความไวต่อการผิดเพี้ยนของสัญญาณควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ และปัญหาทางด้านการสร้างความเสียหายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำที่เกิดจากการขับด้วย อินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็ม ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเกินที่ขั้วของมอเตอร์แปรผันตามความถี่สวิตซ์ซึ่งและความยาวของสายตัวนำ ซึ่งปัญหาดังกล่าวถูกพบมากในภาคอุตสาหกรรมที่มีห้องควบคุม (Control Room) ที่มีระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ แบบพีดับบลิวเอ็มควบคุมเครื่องจักรที่มีมอเตอร์เหนี่ยวนำจากระยะไกล จากปัญหาที่เกิดขึ้นจากความยาวของสายตัวนำนี้ จึงเป็นมูลเหตุให้เกิดการวิจัยเรื่อง การวิเคราะห์ และป้องกันแรงดันเกินในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็ม

ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาการเกิดแรงดันเกิน ในมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็ม ที่มีความยาวของสายตัวนำที่ไกล เพื่อนำผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบ ที่ทำให้เกิดปัญหาดังกล่าวออกมาออกแบบการป้องกัน เพื่อลดทอนแรงดันเกินในขั้วของมอเตอร์ ที่จะส่งผลให้ฉนวนของมอเตอร์เกิดการเสียหาย ด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการเกิดปัญหาและผลกระทบจากการเกิดแรงดันเกินของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็ม

1.2.2 เพื่อศึกษาและจำลองพฤติกรรมของการเกิดแรงดันเกินของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็ม

1.2.3 เพื่อวิเคราะห์และออกแบบวิธีการป้องกันของการเกิดแรงดันเกินของ มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็ม

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

การเกิดแรงดัน ไฟฟ้าเกินชั่วขณะในช่วงของมอเตอร์เหนี่ยวนำมีสาเหตุจากสายเคเบิลที่มีระยะยาวที่ขยับ เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ในสายได้ทำการคอมมอน โหมดกับตัวอินเวอร์เตอร์ทำให้เกิดการแกว่งของแรงดันขึ้นที่ขั้วของมอเตอร์เป็นผลให้ขดลวดของมอเตอร์เสียหายได้

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาปัญหาและผลกระทบของการเกิดแรงดันเกินในมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็ม

1.4.2 ออกแบบแบบจำลองผลกระทบที่เกิดจากแรงดันเกินในมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็มในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.4.3 ออกแบบระบบป้องกันแรงดันเกินในมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ขนาด 3 เฟส 200 โวลต์ 400 วัตต์แบบพีดับบลิวเอ็มในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาและวิเคราะห์การเกิดแรงดันเกินในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็ม อันเนื่องมาจากสายตัวนำระหว่างอินเวอร์เตอร์ และมอเตอร์ มีระยะทางที่ห่างกันแล้วนำมาสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์แล้วออกแบบระบบ ป้องกันด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1.5.1 ศึกษาระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็ม

1.5.2 ศึกษาผลของความยาวสายตัวนำที่มีผลกระทบเป็นองค์ประกอบของการเกิดแรงดันเกินของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็ม

1.5.3 ศึกษาองค์ประกอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ก่อให้เกิดแรงดันเกินจากผลของสายตัวนำที่ยาว และถูกขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็ม

1.5.4 วิเคราะห์และสร้างแบบจำลองการเกิดแรงดันเกินของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็มบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.5.5 วิเคราะห์ออกแบบระบบป้องกัน การเกิดแรงดันเกินของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็มบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.5.7 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

1.6 ข้อยกเว้นของการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์และออกแบบระบบป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบ 3 เฟส ที่มีผลมาจากการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ที่มีระยะของสายตัวนำที่ยาว

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 เข้าใจถึงปัญหาในการเกิดแรงดันเกินของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีสายตัวนำ จากอินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็มที่ยาว

1.7.2 เข้าใจถึงหลักการวิเคราะห์และการแก้ปัญหาด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อจำลองปัญหาและวิธีการป้องกัน

1.7.3 เข้าใจถึงหลักการวิเคราะห์เทคนิคในการป้องกันแรงดันเกินของมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่มีสายตัวนำจากอินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็มที่ยาว

1.7.4 เป็นแนวทางในการวิเคราะห์และพัฒนาเทคนิคในการป้องกันแรงดันเกินของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีสายตัวนำจากอินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็มที่ยาว

1.8 ลักษณะรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

การนำเสนอวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีองค์ประกอบที่สำคัญ 5 บท คือ บทที่ 1 จะกล่าวถึง ความ เป็นมา ความสำคัญของปัญหา และแนวทางในการแก้ปัญหา โดยมุ่งเน้นไปที่การศึกษาปัญหาและ แนวทางแก้ไขของแรงดันเกินที่ขั้วของมอเตอร์เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของของสายไฟฟ้า ต่อมาจะ กล่าวถึงความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมุติฐาน ขอบเขต ขั้นตอนในการดำเนินงาน ข้อยกเว้น ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับตามลำดับ บทที่ 2 ศึกษาวรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องระบบจำหน่าย

กำลังไฟฟ้า ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (Three Phase Induction Motor) อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส และการประมาณค่าพารามิเตอร์ ของสายไฟฟ้า เพื่อเป็นแนวทางนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ บทที่ 3 วิธีดำเนินวิทยานิพนธ์ประกอบ ไปด้วยการหาจรรยาบรรณ สมมุติความถี่สูงของสายเคเบิลและวงจรสมมุติความถี่สูงของมอเตอร์ เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบ วงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ โดยจะนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลอง เพื่อทดสอบปัญหาและการแก้ปัญหาที่ สนใจศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ บทที่ 4 แสดงถึง ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของแบบจำลองในบทที่ 3 และบทที่ 5 จะเป็นการสรุปผลเชิงอภิปราย รวมถึงข้อเสนอแนะ และแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ต่อไป



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

จากการศึกษาทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องจากปัญหาการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจำพวกเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ หรือ Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBT) ให้มีความสามารถในการทำงานในย่านความถี่สวิตซ์และแรงดันกับกระแสไฟฟ้าที่สูงได้ จึงได้มีการนำเอาความสามารถของ IGBT มาพัฒนาระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำ (Variable Speed Drives, VSD) ด้วยเทคนิคการควบคุมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันแบบ พัลส์บวลิเอ็ม (Pulse-Width Modulation, PWM) ซึ่งจากคุณสมบัติของ IGBT ที่มีย่านของความถี่ สวิตซ์ซึ่งสูงสุดถึง 20 กิโลเฮิร์ตซ์ จึงทำให้เกิดการควบคุมมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพทางด้าน การทำงานสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามย่อมมีผลกระทบด้านข้อเสียดังกล่าวด้วยเช่น ผลของสัญญาณ รบกวนที่เกิดจากความถี่สวิตซ์ซึ่ง (Noise) ผลของแรงดันกับกระแสฮาร์มอนิกส์ ที่จะส่งผลกระทบต่อ ระบบไฟฟ้า และสร้างปัญหาให้กับอุปกรณ์ที่มีความไวต่อการผิดเพี้ยนของสัญญาณควบคุม อุปกรณ์ต่างๆ และปัญหาทางด้าน การสร้างความเสียหายให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่เกิดจากการขับด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพัลส์บวลิเอ็ม ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเกินที่ขั้วของมอเตอร์แปรผันตาม ความถี่สวิตซ์ซึ่งและความยาวของสายตัวนำ ซึ่งปัญหาดังกล่าวถูกพบมากในภาคอุตสาหกรรม ที่มีห้องควบคุม (Control Room) ที่มีระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบพัลส์บวลิเอ็ม ควบคุมเครื่องจักรที่มีมอเตอร์เหนี่ยวนำจากระยะไกล จากปัญหาที่เกิดขึ้นจากความยาวของ สายตัวนำนี้ จึงเป็นสาเหตุให้เกิดการวิจัยเรื่อง การวิเคราะห์และป้องกันแรงดันเกิน ใน มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพัลส์บวลิเอ็ม

ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาการเกิดแรงดันเกิน ในมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพัลส์บวลิเอ็ม ที่มีความยาวของสายตัวนำที่ไกล เพื่อนำผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบที่ทำให้เกิดปัญหาดังกล่าว มาออกแบบการป้องกัน เพื่อลดทอนแรงดันเกินในขั้วของมอเตอร์ ที่จะส่งผลให้ฉนวนของมอเตอร์เกิดการเสียหาย โดยใช้วิธีพาสซีฟฟิลเตอร์ (Passive Filter) ในการวิเคราะห์แบบจำลอง และแก้ปัญหาจะกระทำด้วยโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink

โดยมีองค์ประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการงานวิจัยในส่วนของทฤษฎีมีลำดับการกล่าวถึงดังต่อไปนี้ การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส การจับด้วยอินเวอร์เตอร์ แบบพีดับบลิวเอ็ม สายไฟฟ้า และวิธีพาสซีฟฟิลเตอร์ (Passive Filter) ตามลำดับ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Marir และ K. Al-Haddad [3] ได้นำเสนอเกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองโดยการใส่ ลาปาซทรานฟอร์ม เข้ามาช่วยวิเคราะห์ในโดเมนของความถี่และในโดเมนของเวลา เพื่อหาแรงดันไฟฟ้าเกินที่ขั้วของมอเตอร์ โดยถอดพารามิเตอร์ของสายตัวนำและมอเตอร์นำ มาสร้าง วงจรสมมูลในรูปของ RLC ก่อน จึงทำการใช้ลาปาซทรานฟอร์มเข้ามาช่วย และทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดจริง เทคนิคในการวิเคราะห์ปัญหานี้ เพื่อสร้างแบบจำลองพบว่ามีความใกล้เคียง กับของจริงที่มีการเก็บข้อมูลไว้แต่เทคนิคนี้มีความยุ่งยากทางสมการทางคณิตศาสตร์

M. Satio, T. Shimizu และ M. Nakamura [3] ได้นำเสนอวิธีการออกแบบการป้องกัน หรือลดแรงดันไฟฟ้าเกินที่ขั้วของมอเตอร์สายตัวนำที่ยาวจากอินเวอร์เตอร์ที่ดับบลิวเอ็ม ด้วยวิธีการนำแรงดันไฟฟ้าที่เกินกลับมาจ่ายให้กับภาควงจร DC Link ใหม่ ผลที่ได้จากการทดสอบ ว่าแรงดันไฟฟ้าที่เกินนั้นมีปริมาณลดลง แต่ก็ยังมีส่วนที่เกินอยู่บ้าง แต่ก็กล่าวได้ว่าลดลงได้มาก เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มีระบบป้องกัน

Shimizu, M. Saito และ M. Nakamura [6] ได้นำเสนอวิธีการคิดคำนวณแรงดันไฟฟ้าเกิน ที่ขั้วของมอเตอร์ โดยทำการคำนวณเปรียบเทียบกันระหว่างสายตัวนำที่มีฉนวนหุ้มป้องกัน แรงดันเกิน (Surge Suppression Cable) กับสายตัวนำที่ไม่มีฉนวนป้องกัน ผลที่ได้สามารถช่วย ลดแรงดันที่เกินได้ แต่ยังมีช่วงพีคที่สูงอยู่ เมื่อเทียบกับการใช้ฟิลเตอร์ที่ได้จากงานวิจัยอื่น

N. Aoki, K. Satoh และ A. Nabae [7] ได้นำเสนอการออกแบบวิธีการป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินที่ขั้วมอเตอร์ที่จับโดยอินเวอร์เตอร์พีดับบลิวเอ็ม โดยใช้วิธีการสร้างวงจร RC Damping และ RL Damping ผลที่ได้สามารถช่วยลดแรงดันเกินได้โดยที่วงจร RC Damping สามารถ ลดผลกระทบได้มากกว่าวงจร RL โดยอาศัยหลักการคุณสมบัติของอุปกรณ์ดังกล่าวในทางปฏิบัติแล้วในภาคอุตสาหกรรมจะเรียกวงจรเหล่านี้ว่า dv/dt Reactor จะถูกนำมาใช้ เมื่อสายยาวโดยจะมีส่วนประกอบที่วงจร RC

B. Basavaraja และ D.V.S.S.Siva Sarma [8] ได้เสนอการออกแบบอุปกรณ์ป้องกัน แรงดันเกินที่ขั้วของมอเตอร์ โดยการลดผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเทียบกับ เวลา 0-400 V ในช่วงเวลาน้อยกว่า $0.1 \mu\text{s}$ โดยการออกแบบในลักษณะอุปกรณ์ที่เป็นวงจร RLC ต่อเข้าร่วมลงไป

ในแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้น ผลของการวิจัยที่ได้สามารถลดแรงดันไฟฟ้าที่เกินได้โดยการหักล้างกันเชิงคุณสมบัติของอุปกรณ์

A.V. Jouanne, D.A. Rendusara, P.N. Enjeti และ J.W. Gray [9] ได้เสนอการออกแบบฟิลเตอร์ป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกินที่ขั้วของมอเตอร์ โดยใช้การออกแบบ RLC ฟิลเตอร์ เพื่อลดค่าของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าเทียบกับเวลา (dv/dt) ช่วยลดแรงดันที่เกินเวลาสวิตซ์ซึ่งของไอจีบีที ทำให้ปริมาณแรงดันเกินลดลง ในงานวิจัยนี้ได้แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าของแบบจำลอง และค่าของจริงที่ได้มีการนำเสนอในการออกแบบในงานวิจัยนี้ ผลที่ได้ออกมานี้มีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน

J.Lui, P.Pillay และ H. Douglas [11] ได้นำเสนอหลักการเทคนิคในการหาสถานะ แรงดันเกินที่ขั้วของมอเตอร์ที่ขับโดยอินเวอร์เตอร์พีดับบลิวเอ็ม โดยอาศัย Wavelet Transform เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ โดยการสร้างแบบจำลองของ Wavelet ในรูปของวงจร RLC ที่จำลองพารามิเตอร์ของสายส่งและตัวมอเตอร์เหนี่ยวนำ ผลการจำลองสามารถใช้การจำลอง ดังกล่าวมาวิเคราะห์ใกล้เคียงกับค่าจริง

เพ็ญภา ไพโรจน์อมรชัย [12] ได้เสนอการศึกษาปัญหาที่เกิดจากแรงดันโหมคร่วม ที่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ และเสนอวงจรกรองชนิดใหม่สำหรับแก้ปัญหาดังกล่าวด้วย ในด้านปัญหาของแรงดันโหมคร่วมนั้น โดยได้เสนอการวิเคราะห์ปรากฏการณ์การอัด ประจุบัสไฟตรง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ใหม่ที่ยังไม่มีการอธิบายเกี่ยวกับกลไกการเกิดปรากฏการณ์ มาก่อน ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ด้วยการวิเคราะห์หาวงจรสมมูลโหมคร่วม และ โหมคผลต่างที่แม่นยำของอินเวอร์เตอร์ โดยพิจารณาพฤติกรรมการนำกระแสของ วงจรเรียงกระแสและวงจรอินเวอร์เตอร์ ด้านหลังพร้อมกัน วงจรสมมูลที่วิเคราะห์ได้ นอกจาก จะสามารถใช้อธิบายการเกิดปรากฏการณ์ของการอัดประจุบัสไฟตรงได้แล้ว ยังแสดงให้เห็นว่า การสวิตซ์ของวงจรเรียงกระแสและอินเวอร์เตอร์ ด้านหลัง ทำให้เกิดการเชื่อมร่วมกันระหว่าง สัญญาณโหมคร่วมและ โหมคผลต่างในระบบ และยังพบว่ากระแสโหมคร่วมและการอัดประจุบัสไฟตรงจะมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันตามย่านการทำงานของวงจรเรียงกระแส ในด้านการแก้ปัญหา ที่เกิดจากแรงดันโหมคร่วมนั้น วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอ วงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่ ที่มีขนาดเล็ก และมีแบนด์วิดท์การลดทอนแรงดันโหมคร่วมที่กว้าง วงจรกรองที่เสนอมีองค์ประกอบ 3 ส่วน ได้แก่ 1) วงจรกรองแอกทีฟที่เป็นอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา 2) หม้อแปลงเชื่อมต่อ แบบโหมคร่วม และ 3) วงจรกรองพาสซีฟขนาดเล็ก วงจรกรองแอกทีฟที่เป็นอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ สามารถสร้างแรงดันชดเชยแรงดันโหมคร่วมได้ดี อีกทั้งยังสามารถใช้ได้กับ ระบบขับเคลื่อนที่มีพิกัดแรงดันสูงได้ ซึ่งได้ยังเสนอแนวคิดใหม่ในการกำจัดแรงดันโหมคร่วม โดยแยกพิจารณาองค์ประกอบของแรงดันโหมคร่วม และเลือกชดเชยเฉพาะองค์ประกอบ

ที่ความถี่สูงกว่าความถี่การสวิตช์ขึ้นไปที่เป็นสาเหตุของปัญหาต่างๆ ทำให้หม้อแปลงเชื่อมร่วมมีขนาดเล็กลง ถึง 1/10 เท่า เมื่อเทียบกับกรณีวงจรกรองแอกทีฟแบบเดิมที่ชดเชยองค์ประกอบของแรงดัน โหมคร่วมทั้งหมด นอกจากนี้วงจรกรองพาสซีฟขนาดเล็กที่เพิ่มขึ้นจะช่วยลดทอนแรงดันโหมคร่วมในย่านความถี่ที่สูงเกินกว่าแบนด์วิดท์ของวงจรแอกทีฟ โดยผลการจำลองและผลการทดลองยืนยันความถูกต้องของการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเกี่ยวกับปรากฏการณ์การอัดประจุสัฟไฟตรง และประสิทธิภาพของวงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดในการแก้ปัญหาจากแรงดันโหมคร่วม

จากงานวิจัยที่ได้ศึกษาในข้างต้นนั้น ผู้วิจัยได้สังเกตเห็นปัญหาระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยเทคนิคการควบคุมที่ใช้ด้วยเทคนิคการควบคุมด้วยการขับแบบพัลส์บวลิเอ็ม (Pulse-Width Modulation, PWM) ซึ่งทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเกินที่ขั้วของมอเตอร์แปรผันตามความถี่สวิตช์และความยาวของสายตัวนำ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาการเกิดแรงดันเกินในมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพัลส์บวลิเอ็ม ที่มีความยาวของสายตัวนำที่ไกล เพื่อนำผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบที่ทำให้เกิดปัญหาดังกล่าวมาออกแบบการป้องกัน เพื่อลดทอนแรงดันเกินในขั้วของมอเตอร์ที่จะมีผลให้จำนวนของมอเตอร์เกิดการเสียหาย โดยใช้วิธีพาสซีฟฟิลเตอร์ (Passive Filter) เพื่อนำไปใช้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

2.3 มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (Three Phase Induction Motor)

2.3.1 บทนำ

มอเตอร์เหนี่ยวนำเป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้มากที่สุด และมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ในภาคอุตสาหกรรมด้วยเหตุผลที่ง่ายต่อการควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อสร้างประสิทธิภาพ ให้เครื่องจักรได้อย่างเหมาะสมและเพื่อประหยัดพลังงาน ไฟฟ้าของเครื่องจักร

วิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาการเกิดแรงดันเกิน ในมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพัลส์บวลิเอ็ม ที่มีความยาวของสายตัวนำที่ไกล ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำความเข้าใจถึงโครงสร้างและหลักการพื้นฐานของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เสียก่อน ซึ่งโดยมากแล้วจะเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ซึ่งมีข้อดีและข้อด้อย แตกต่างกันดังนี้ คือ [13]

ข้อดี (Advantage)

- 1) เป็นมอเตอร์ชนิดที่สร้างขึ้นได้ง่ายและทนทาน โดยเฉพาะชนิดกรงกระรอก (Squirrel-Cage Type)
- 2) ราคาไม่แพงและไม่เสีง่าย

3) มีประสิทธิภาพที่สูงพอในสภาวะที่มอเตอร์หมุนปกติไม่มีแปรงถ่าน ดังนั้นการสูญเสียเนื่องจากความฝืดจึงลดลงหรือมีค่าน้อยมากและมีเพาเวอร์แฟกเตอร์ดี

4) ต้องการการดูแลและบำรุงรักษาต่ำ

5) สามารถที่จะเริ่มหมุน (Start) ได้ง่าย โดยเฉพาะชนิดกรงกระรอก

ข้อด้อย (Disadvantage)

1) ความเร็วรอบของมอเตอร์ไม่สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้ อันเนื่องมาจากความถี่หลักมูลของแรงดันไฟฟ้าสลับที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้

2) มีคุณสมบัติเหมือนกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบซันต์ ความเร็วรอบจะลดลงหรือเพิ่มขึ้นจะขึ้นอยู่กับโหลด

3) แรงบิดในขณะเริ่มหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำค่อนข้างต่ำกว่าแรงบิดขณะเริ่มหมุน ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบซันต์

2.3.2 โครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 ส่วนด้วยกันคือ

1) สเตเตอร์หรือส่วนที่อยู่กับที่ (Stator)

2) โรเตอร์หรือส่วนที่หมุน (Rotor)

สเตเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟสใช้หลักการเดียวกันกับของซิงโครนัสมอเตอร์ หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ โดยทำมาจากแผ่นเหล็กบางๆ อัดซ้อนเข้าด้วยกัน และทำเป็นช่องสลีตไว้บรรจุขดลวด และจำนวนขั้วแม่เหล็กจะเป็นตัวกำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ เมื่อเราจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับขดลวดที่สเตเตอร์ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่คงที่ค่าหนึ่ง และสนามแม่เหล็กนี้จะหมุน (Revolves or Rotate) ด้วยความเร็วที่เรียกว่าความเร็วซิงโครนัส และหาได้โดย

$$N_s = \frac{120f}{P} \quad (2.1)$$

N_s = ความเร็วซิงโครนัส rpm

f = ความถี่หลักมูลของไฟฟ้ากระแสสลับ Hz

P = จำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์

สนามแม่เหล็กที่หมุนจะเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าขึ้นในโรเตอร์ ซึ่งเป็นไปตามกฎของการเหนี่ยวนำ

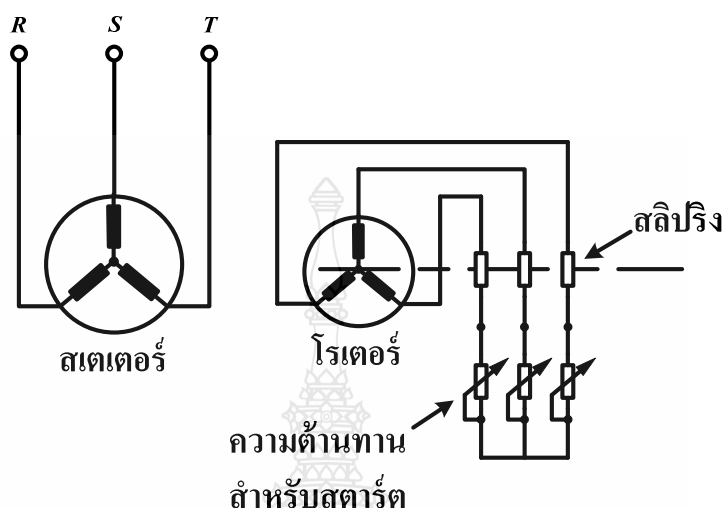
1) โรเตอร์หรือส่วนที่หมุนโรเตอร์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ โรเตอร์แบบกรงกระรอก มอเตอร์ที่ใช้โรเตอร์ชนิดนี้เราเรียกว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก โดยประมาณ 90% ของมอเตอร์เหนี่ยวนำจะใช้โรเตอร์เป็นแบบกรงกระรอก ทั้งนี้เป็นเพราะว่าโรเตอร์ชนิดนี้เป็นชนิดที่ทำได้ง่ายและทนทานที่สุด โรเตอร์ชนิดนี้ประกอบด้วยแผ่นเหล็กบางๆ อัดซ้อนกันเป็นรูปทรงกระบอกและถูกทำให้เป็นช่องตลอดให้ขนานกันเพื่อสำหรับฝังหรือบรรจุตัวนำโรเตอร์ (Rotor Conductor) ลงในช่อง สลotted นั้น ตัวนำที่ฝังนี้จะไม่มีลักษณะเป็นเส้นหรือเป็นสาย แต่จะเป็นแท่งทองแดงหรืออลูมิเนียม หรืออัลลอย (Copper Bar or Aluminum Bar or Alloy) โดยในหนึ่งสลอตจะบรรจุแท่งทองแดงหรืออลูมิเนียมเพียง 1 แท่ง เท่านั้น และที่ปลายสุดของแท่งตัวนำทั้งสองด้านนั้นในแต่ละด้านจะถูกต่อปลายลัดวงจรเข้าด้วยกันโดยการบัดกรี (Brazed) หรือเชื่อมด้วยไฟฟ้าโรเตอร์ของมอเตอร์แบบกรงกระรอกนี้แท่งตัวนำจะถูกลัดวงจรไว้อย่างถาวร ดังนั้นจึงไม่สามารถที่จะนำ ความต้านทานจากภายนอกมาต่ออนุกรมเข้ากับวงจรโรเตอร์เพื่อช่วยในการเริ่มหมุนได้ สลอตของโรเตอร์จะไม่อยู่ในลักษณะที่ขนานกับเพลลา แต่จะวางให้มีลักษณะเฉียงเล็กน้อย เพื่อให้เกิดประโยชน์ได้ 2 ทาง

- จะช่วยให้มอเตอร์หมุนได้อย่างเร็ว โดยการลดการเกิดเส้นแรงแม่เหล็กฮัม (Magnetic Hum)
- จะช่วยในการลดการเกิดขีด หรือล๊อคของโรเตอร์อันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กที่ตกค้างอยู่ที่ฟัน (Teeth) ของสเตเตอร์กับโรเตอร์ทั้งสอง

ส่วนแบบอื่นๆ ของโรเตอร์ที่มีลักษณะคล้ายกันกับโรเตอร์แบบกรงกระรอกนั้น ประกอบด้วยโซลิดไซลินเดอร์ (Solid Cylinder) ของแท่งเหล็ก (Steel) ซึ่งปราศจากสลอตสำหรับบรรจุตัวนำทั้งหมดมอเตอร์จะหมุนได้ขึ้นอยู่กับผลของการเกิดกระแสไหลวนในเหล็กของโรเตอร์

2) โรเตอร์แบบพันขดลวดหรือเฟสวาวด์โรเตอร์ (Wound Rotor or Phase Wound Rotor) มอเตอร์ที่ใช้โรเตอร์ชนิดนี้เรียกว่า มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบโรเตอร์พันขดลวด หรือเฟสวาวด์มอเตอร์ หรือสลลิปริงมอเตอร์ (Wound Rotor or Phase Wound Rotor or Slip-Ring Motor) โรเตอร์ ชนิดนี้จะพบมากในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส และมีการพันแบบขดลวดสองชั้นเหมือนกับ ขดลวดที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ในโรเตอร์ชนิดนี้ภายในจะต่อแบบสตาร์ และมีปลายสายออกมา 3 ปลายต่อเข้ากับสลลิปริงที่ติดกับเพลลาของโรเตอร์นั้นและโรเตอร์แบบโรเตอร์พันขดลวดสามารถที่จะนำความต้านทานที่ต่อแบบสตาร์ต่อเข้ากับสลลิปริงของโรเตอร์ เพื่อช่วยในการเริ่มหมุนของมอเตอร์เป็นการเพิ่มแรงบิดขณะเริ่มหมุนของมอเตอร์นั้น ความต้านทานที่นำมาต่อเข้าไปนี้มีลักษณะการต่อ

ดังแสดงในภาพที่ 2.1 แต่เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนไปแล้ว และหมุนด้วยความเร็วปกติแล้วสปริงจะถูก ลัดวงจรกลายเป็นโรเตอร์แบบกรงกระรอก



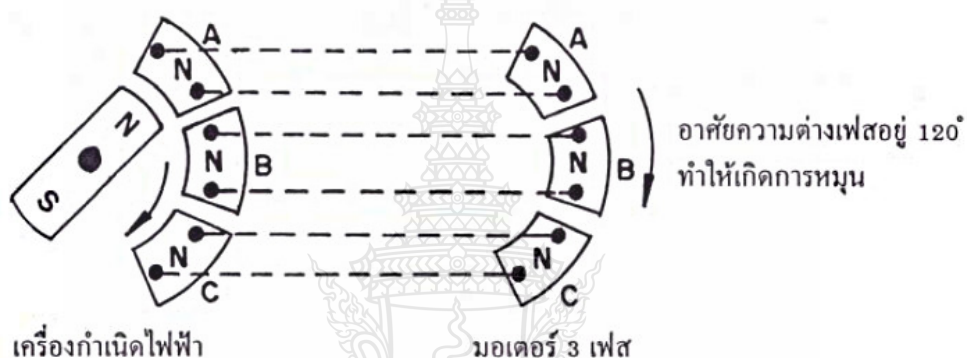
ภาพที่ 2.1 การต่อความต้านทานจากภายนอกเข้ากับโรเตอร์แบบพันขดลวด

2.3.3 สนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส

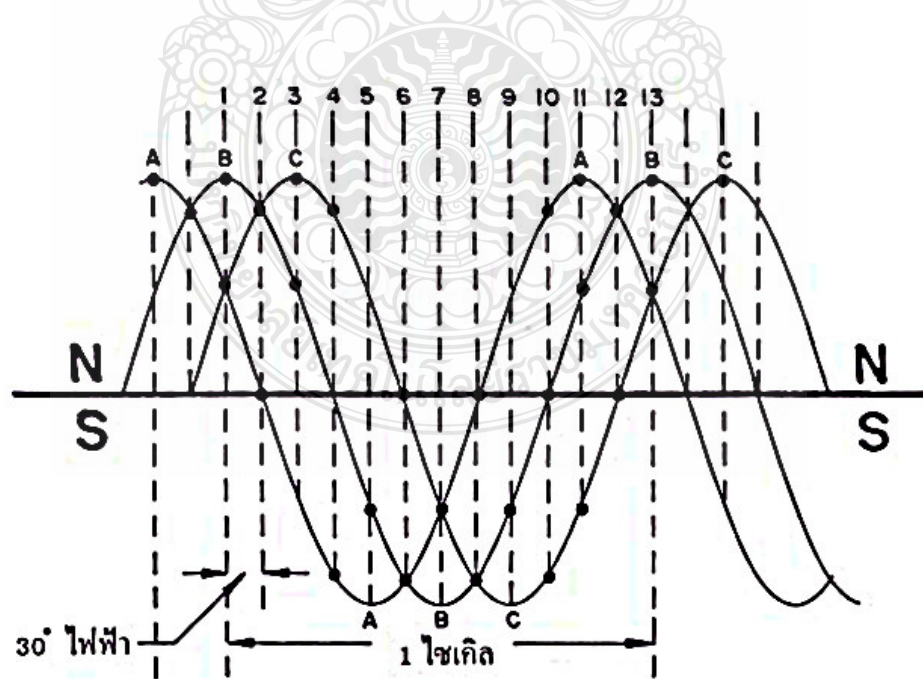
สนามแม่เหล็กของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส เมื่อมีกระแสไฟฟ้าในระบบ 3 เฟส จ่ายให้กับ ขดลวด 3 เฟส เป็นผลทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์นั้น สนามแม่เหล็กหมุนจะตัดกับตัวนำ ในโรเตอร์นั้น ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นในตัวนำที่ฝังอยู่ในโรเตอร์และจะเกิด สนามแม่เหล็กขึ้นในโรเตอร์ เพราะที่โรเตอร์มีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำไหลอยู่ ซึ่งจะทำให้เกิด สนามแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือและขั้วใต้ เช่นเดียวกับที่สเตเตอร์และสนามแม่เหล็ก ที่หมุนที่สเตเตอร์นั้น จะเกิดการผลัก และดูดกับขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่โรเตอร์ในทิศทางของสนามแม่เหล็กหมุนผลที่ได้ของ การดูดและผลักระหว่างขั้วแม่เหล็กบนสเตเตอร์และโรเตอร์ทำให้เกิดแรงบิดขึ้น

หลักการหมุนของสนามแม่เหล็กโดยกระแสไฟฟ้า 3 เฟส จากภาพที่ 2.2 เป็นการแสดงให้เห็นว่าถ้าเราจ่ายกระแสไฟฟ้าในระบบ 3 เฟส ให้กับขดลวดในสเตเตอร์ในช่วงขณะหนึ่ง สมมติให้ เป็นครึ่งไซเคิลบวกดังแสดงในภาพที่ 2.2 ด้านขวามือ โดยการต่อไฟฟ้า เฟส A เข้าการเฟส A ของ มอเตอร์และเฟส B เฟส C เข้ากับมอเตอร์ในเฟสถัดไป เมื่อกระแสไฟฟ้าในครึ่งไซเคิลบวกเฟส A ไหลเข้าไปในขดลวดของเฟส A มอเตอร์ จะทำให้เกิดมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดใน เฟส A ของ มอเตอร์นั้นทำให้เกิดขั้ว N ขึ้น และเมื่อแรงดันไฟฟ้าในเฟส A ที่จ่ายให้กับเฟส A มอเตอร์ค่อยๆ

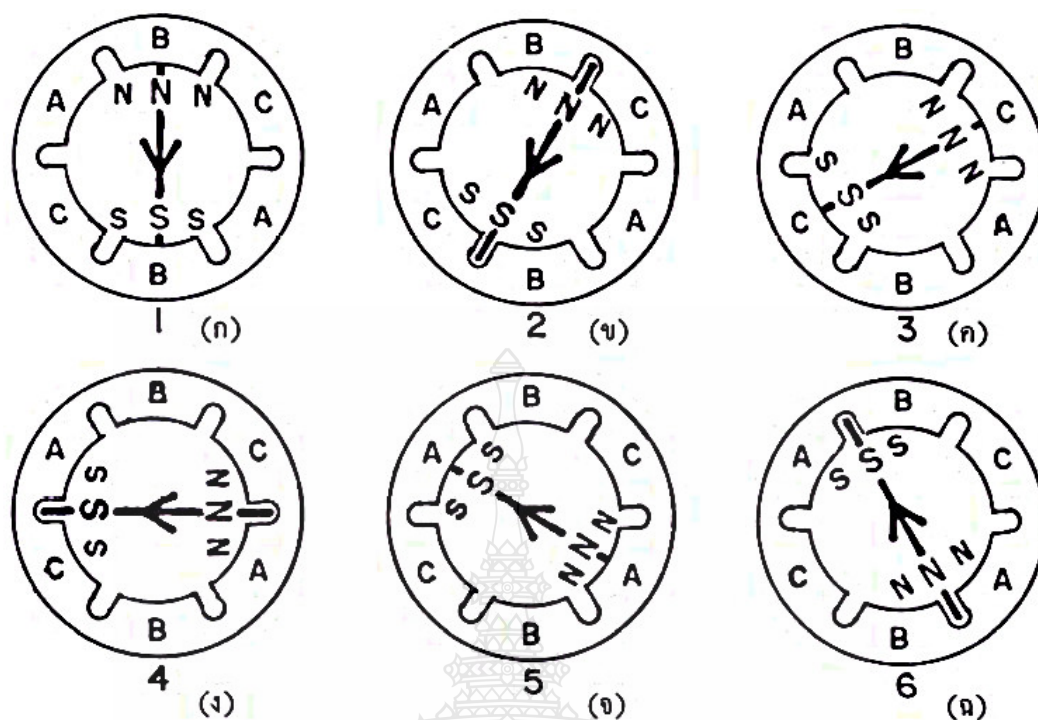
ลดลงอำนาจแม่เหล็กขั้ว N ก็จะค่อยๆ ลดอำนาจหรือความเข้มลง และในขณะที่เดียวกันที่เฟสถัดไปก็จะมีอำนาจแม่เหล็กคล้ายๆ กับเฟส A แต่ในเวลาถัดไปจนครบ 3 เฟส ในหนึ่งขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์ (คือเฟส A เฟส B และเฟส C) และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในครึ่งไซเคิลครบถ้วนแล้ว ในครึ่งไซเคิลถัดไปที่ขั้วแม่เหล็กดังกล่าวข้างต้นก็จะเปลี่ยนสถานะจากขั้ว N ไปเป็นขั้ว S และในอีกหนึ่งขั้วแม่เหล็กถัดไป ก็มีลักษณะเช่นเดียวกันกับขั้วแม่เหล็กแรกที่กล่าวถึง ซึ่งลักษณะเช่นนี้เหมือนกับว่าสนามแม่เหล็กหมุน ไปรอบๆ สเตเตอร์ ซึ่งสนามแม่เหล็กที่เหมือนกับหมุนไปรอบๆ นี้เรียกสั้นๆ ว่าสนามแม่เหล็กหมุน (Rotating Magnetic Field)



ภาพที่ 2.2 การจ่ายแรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ให้กับมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส [13]



ภาพที่ 2.3 คลื่นไซน์ของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยกระแสไฟฟ้า 3 เฟส [13]



ภาพที่ 2.4 การเกิดสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้ว [13]

จากภาพที่ 2.3 และภาพที่ 2.4 เป็นการแสดงถึงการเกิดสนามแม่เหล็กหมุนของมอเตอร์ 3 เฟส 2 ขั้ว ที่สามารถพิจารณาทีละขั้นได้ คือ

ที่จุดที่ 1 บนรูปไซเคิลไซน์จะเห็นว่าเฟส B อยู่ที่ตำแหน่งความเข้มสูงสุด ของขั้วเหนือ เฟส A ก็เป็นขั้วเหนือ แต่ลดลงจากจุดสูงสุดและเฟส C เป็นขั้วเหนือและกำลังเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.4 (ก) ของสเตเตอร์คือเฟส B เป็นขั้วเหนือมาก เฟส A และเฟส C เป็นขั้วเหนือน้อย

ที่จุดที่ 2 บนรูปคลื่นไซน์ เฟส A เป็น 0 (Zero) เฟส B เป็นขั้วเหนือแต่กำลังลดลง ส่วนเฟส C เป็นขั้วเหนือแต่กำลังเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2.4 (ข) ของสเตเตอร์ เฟส A เป็น 0 เฟส B และเฟส C เป็นขั้วเหนือและมีความเข้มเท่ากัน ซึ่งจะเกิดขึ้นระหว่าง 2 เฟส คือ เฟส B กับเฟส C ดังนั้นจากจุดที่ 1 ไปจุดที่ 2 ขั้วเหนือจะเคลื่อนที่ไป 30 องศาไฟฟ้า ในทิศทางตาม เข็มนาฬิกา (30 Electrical Degree Clockwise)

ที่จุดที่ 3 บนรูปคลื่นไซน์ เฟส C จะมีความเข้มสูงสุดของขั้วเหนือ เฟส B ลดลง จากสูงสุด และเฟส A เพิ่มขึ้นแต่ เฟส A เป็นขั้วใต้ ดังแสดงในภาพที่ 2.4 (ค) ของสเตเตอร์เฟส C จะเป็นขั้วเหนือ และมีความเข้มมาก ส่วนเฟส B มีความเข้มของขั้วเหนือ น้อย และเฟส A เป็นขั้วใต้น้อย ดังนั้นจากจุดที่ 2 ไปจุดที่ 3 ขั้วเหนือจะเคลื่อนที่ไป 30 องศาไฟฟ้าในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

บนรูปคลื่นไซน์ที่จุดต่างๆ ในไซเคิลก็จะเกิดหมุนเวียนกันไปเช่นเดียวกับที่ กล่าวมาแล้ว ตัวอย่างเช่น ที่จุดที่ 6 ในภาพที่ 2.3 บนรูปคลื่นไซน์ เฟส A และ เฟส B จะเป็นขั้วใต้ ส่วนเฟส C จะเป็น 0 ดังแสดงในภาพที่ 2.4 (จ) ของสเตเตอร์ขั้วเหนือจะเคลื่อนที่ไป 150 องศา ไฟฟ้าในทิศทางตาม เข็มนาฬิกาจากจุดที่ 1 เป็นอันว่าครบไซเคิลของขั้วเหนือ หรือหมุน ครบ 1 รอบ 360 องศา

2.3.4 สลิป (Slip, S)

ในทางปฏิบัตินั้น โรเตอร์ไม่สามารถหมุนได้เท่ากับความเร็วของสนามแม่เหล็ก หมุนที่ สเตเตอร์ โดยปกติแล้วความเร็วของโรเตอร์จะมีความเร็วน้อยกว่าความเร็วของสนามแม่เหล็ก ที่หมุน ที่สเตเตอร์ ความแตกต่างของความเร็วนั้นจะขึ้นอยู่กับโหลดที่ต่ออยู่กับมอเตอร์นั้น

ความแตกต่างระหว่างความเร็วของสนามแม่เหล็กที่หมุนอยู่ที่สเตเตอร์ หรือความเร็ว ซิงโครนัส (N_s) และความเร็วรอบของโรเตอร์ขณะใช้งาน (Actual Speed : N) ของโรเตอร์ เรียกว่า สลิป สลิปของมอเตอร์โดยปกติเป็นเปอร์เซ็นต์ ซึ่งเปอร์เซ็นต์สลิปสามารถหาได้จากสมการ ดังนี้คือ

$$S = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (2.2)$$

$$Slip = \frac{N_s - N}{N_s} \times 100$$

แต่ในบางครั้ง $N_s - N$ ก็เรียกว่า ความเร็วสลิป (Slip Speed)

จะเห็นได้ว่าความเร็วของโรเตอร์ (มอเตอร์) คือ $= N - N_s(1 - s)$

2.3.5 สรุป

วิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาการเกิดแรงดันเกินในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดีบีลิวเอ็ม มีความยาวของสายตัวนำที่ไกล เพื่อนำผลจากการวิเคราะห์ องค์ประกอบที่ทำให้เกิดปัญหาดังกล่าวมาออกแบบการป้องกัน เพื่อลดทอนแรงดันเกิน ในขั้วของ มอเตอร์ที่จะมีผลให้ฉนวนของมอเตอร์เกิดการเสียหาย และในการวิเคราะห์ แบบจำลองของปัญหาจะ นั้นจะใช้แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ดังนั้นจำเป็น ที่จะต้องทำความเข้าใจโครงสร้าง และหลักการพื้นฐานเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองที่ใช้ทดสอบต่อไป

2.4 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

2.4.1 บทนำ

อินเวอร์เตอร์มีหน้าที่สำคัญในการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และเปลี่ยนความถี่ ที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยวิธีการขับเคลื่อนแบบพัลส์บวกลวเอม (Pulse-Width Modulation, PWM) ดังนั้นจึงต้องการทำความเข้าใจในหลักการทำงานของ อินเวอร์เตอร์ โดยในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาโดยมีลำดับของการศึกษาดังนี้ วงจรและภาพคลื่น สัญญาณ การควบคุม อินเวอร์เตอร์แบบ PWM และวงจรกรองความถี่และแรงดัน เพื่อนำไปใช้ในการแก้ปัญหาต่อไป

2.4.2 วงจรและรูปคลื่นสัญญาณ

อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสเหมาะสำหรับกรณีที่ต้องการกำลังไฟฟ้าสูง ซึ่งโครงสร้าง และรูปคลื่นสัญญาณของวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแสดงอยู่ในภาพที่ 2.5 (ก)

เทคนิค PWM สามารถใช้ได้กับวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ไม่ว่าจะเป็นเทคนิค ไซน์ตัดสามเหลี่ยม หรือเทคนิคการกำจัดฮาร์มอนิกต่ำ หรือการควบคุมรูปคลื่นของกระแส

ภาพที่ 2.5 (ข) แสดงหลักการของเทคนิค ไซน์ตัดสามเหลี่ยม เรามีรูปสามเหลี่ยม V_T ซึ่งมีความถี่เท่ากับความถี่การสวิตช์ และมีสัญญาณอ้างอิงรูปไซน์ 3 สัญญาณได้แก่คือ V_{rA} , V_{rB} และ V_{rC} ซึ่งมีมุมเฟสต่างกัน 120° โดยมีจุดตัดระหว่าง V_T กับ V_{rA} (V_{rA} และ V_{rC}) เป็นตัวกำหนดการตัดต่อ วงจรของสวิตช์ Q_1 Q_4 (Q_3 Q_6 และ Q_5 Q_2 ตามลำดับ) รูปคลื่นของแรงดัน V_{AG} , V_{BG} (G คือ สายลบบของแหล่งแรงดันไฟตรง) และ V_{AB} แสดงอยู่ในภาพที่ 2.5 (ค) สังเกตได้ว่าองค์ประกอบหลักมูลของ V_{AG} หรือ V_{AG1} มีแอมพลิจูดเท่ากับค่าที่แสดงในสมการที่ 2.3 (V_{AG} ต่างกับ V_{AO} เพียงค่าแรงดันไฟตรง $V_s / 2$)

$$V_{AG1} = m_a V_s \quad ; m_a \leq 0.5 \quad (2.3)$$

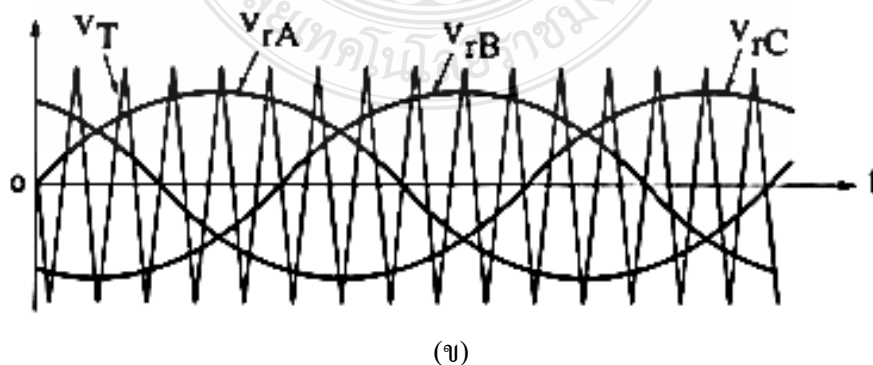
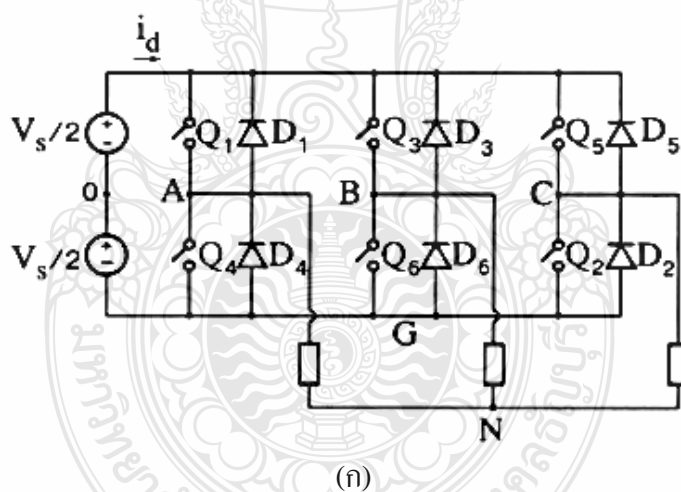
$$V_{AB1} = \sqrt{3} m_a V_s \quad ; m_a \leq 0.5 \quad (2.4)$$

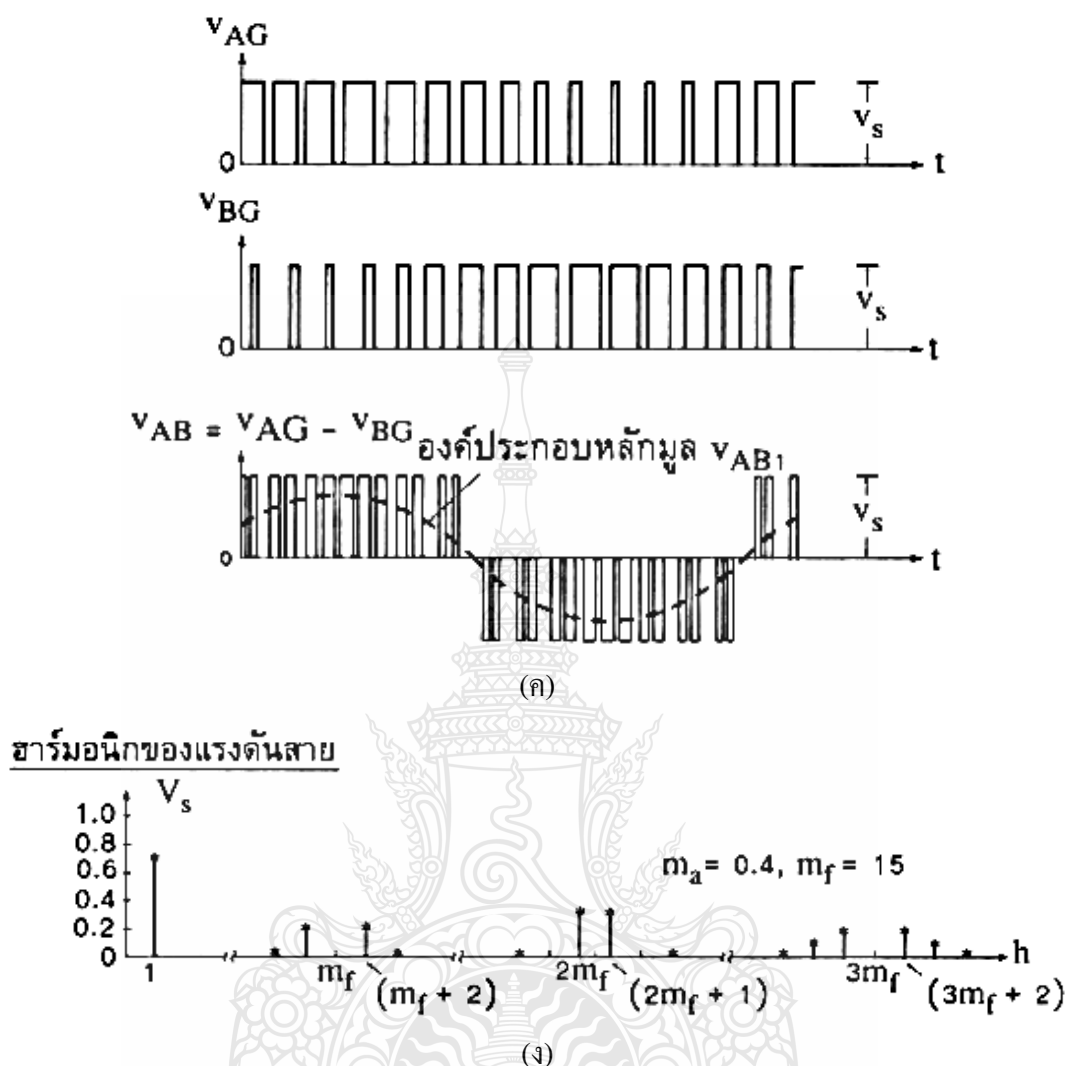
แรงดันสาย V_{AB} มีองค์ประกอบหลักมูลเท่ากับ V_{AB1} แอมพลิจูดของ V_{AB1} เท่ากับ 3 ของแอมพลิจูดของ V_{AG1} เนื่องจาก V_{AG} และ V_{BG} มีเฟสต่างกัน 120° และ V_{AB1} มีเฟสล้ำหลัง V_{AG1} อยู่ 30° (แสดงในภาพที่ 2.5 (ค)) ดังนั้น

$$V_{AB1} = \sqrt{3} m_a V_s \quad ; m_a \leq 0.5 \quad (2.5)$$

ในการออกแบบระบบ โดยทั่วไปนิยมเลือกอัตราการมอดูเลตความถี่ m_f เป็นเลขคี่ และเป็นพหุคูณของ 3 และให้ความลาดชันของ V_T และ V_r ณ จุดที่แรงดันทั้งสอง มีค่าเป็นศูนย์มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกัน(แสดงในภาพที่ 2.5 (ข)) ในกรณีนี้ถ้า $0.5 a m \leq$ สเปกตรัมของ V_{AB} จะเป็นดังแสดงในภาพที่ 2.5 (ง) นอกจากนี้สังเกตได้ว่าฮาร์มอนิกต่ำสุดเกิดขึ้น ที่ความถี่ $(m_f \pm 2k) f_a$ ตารางที่ 2.1 แสดงฮาร์มอนิกของแรงดันสายของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส สำหรับอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส เราอาจจะออกแบบให้วงจรทำงานถึงในย่านการมอดูเลตเกิน เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตที่มีค่าสูงขึ้นส่วนข้อเสียที่เนื่องมาแต่ฮาร์มอนิกที่เพิ่มขึ้นมักจะพอยอมรับได้

ถ้าโหลดมีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำโดยมีค่าคงตัวเวลาที่ เป็นไปตามเงื่อนไข สมการที่ 2.4 กระแสโหลดจะเป็นรูปใกล้เคียงไซน์โดย ทิศทางของกระแสโหลดเป็น ตัวกำหนดการนำกระแสของ ไดโอด เช่น กรณีที่เฟสของโหลดเท่ากับ 30° (ตามลำหลัง) รูปคลื่น จะเป็นดังแสดงสมการที่ 2.5 โดยสังเกตได้ว่าในช่วงเวลาที่ $i_c > 0$ และ $V_{CG} = 0 = (Q_2$ หรือ D_2 นำกระแส) แต่ทิศทางของ i_c แสดงว่า D_2 นำกระแส (แสดงในภาพที่ 2.5 (ก))



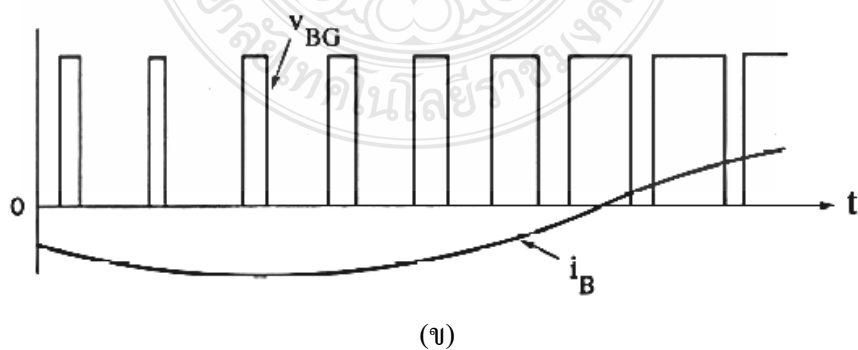
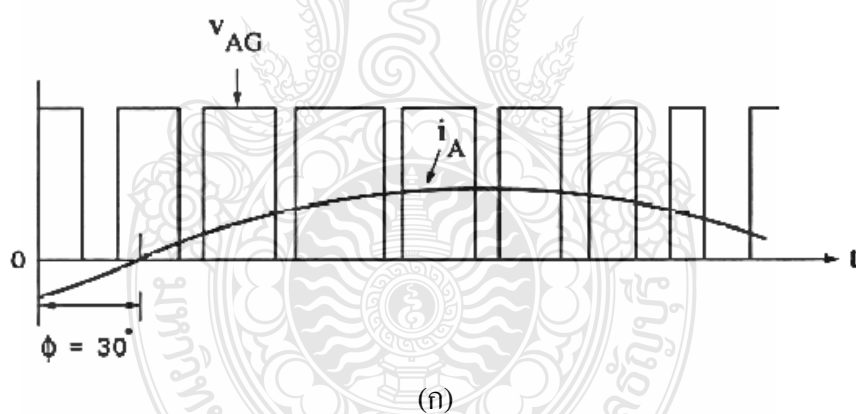


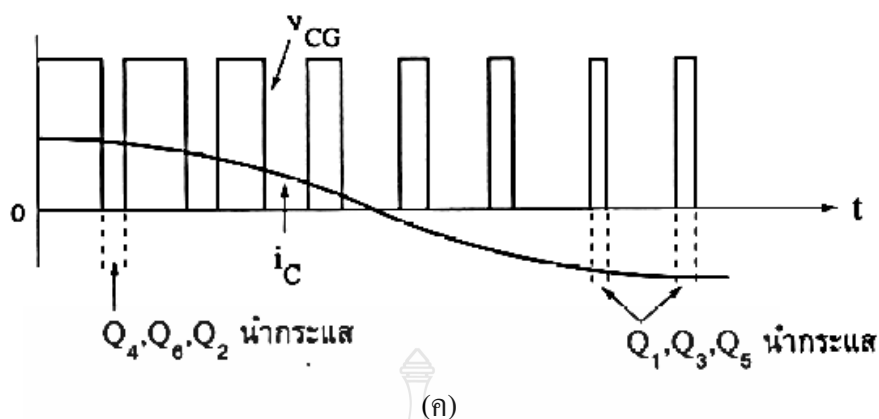
ภาพที่ 2.5 วงจรและรูปคลื่นสัญญาณของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ PWM [13]

เมื่อพิจารณารูปคลื่นสัญญาณในภาพที่ 2.5 จะพบว่า ในบางช่วงเวลาดังแสดงในภาพล่าง สวิตช์จะต่อทั้งสามของโหลดเข้ากับขั้วลบของแหล่งจ่าย V_s (เช่น เมื่อ Q_4, Q_6, Q_2 นำกระแส) และบางช่วงเวลาสวิตช์จะต่อทั้งสามของโหลดเข้ากับขั้วบวกของแหล่ง V_s (เช่น เมื่อ Q_1, Q_3, Q_6 นำกระแส) ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าว กระแสอินพุทของอินเวอร์เตอร์ (i_d ในภาพที่ 2.5 (ก)) มีค่าเป็นศูนย์ หมายความว่ากำลังงานไม่ไหลจากแหล่งจ่ายสู่โหลด ซึ่งระยะเวลาของการควบคุมช่วงเวลาเป็นการควบคุมกำลังงานที่จ่ายให้แก่โหลด หรือควบคุมค่าองค์ประกอบหลักมูลของแรงดัน เอาท์พุทนั่นเอง

ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนระหว่างค่า RMS ของฮาร์มอนิกกับ V_s ของแรงดันสายของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

H	m_a	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
1		0.122	0.245	0.367	0.490	0.612
$m_r \pm 2$		0.010	0.031	0.080	0.135	0.195
$m_r \pm 4$					0.005	0.011
$2m_r \pm 1$		0.116	0.200	0.227	0.192	0.111
$2m_r \pm 5$					0.008	0.020
$3m_r \pm 2$		0.027	0.085	0.124	0.108	0.038
$3m_r \pm 4$			0.007	0.029	0.064	0.096
$4m_r \pm 1$		0.100	0.096	0.005	0.064	0.042
$4m_r \pm 5$				0.021	0.051	0.073
$4m_r \pm 7$					0.010	0.030





ภาพที่ 2.6 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสของอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแสดงช่วงกำลังงานไม่ไหลสู่โหลด [13]

2.4.3 การควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบ PWM (Pulse Width Modulate)

การเฉลี่ยเฉพาะที่ แรงดันเอาต์พุต V_o ของวงจรทอนระดับสัญญาณดังภาพที่ 2.7 (ก) สามารถเปลี่ยนแปลงได้ระหว่างค่า 0 ถึงค่า V_s โดยที่วัฏจักรงาน D มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้าเราให้ D เป็นฟังก์ชันของเวลา $d(t)$ โดยที่ $d(t)$ มีการเปลี่ยนแปลงค่าอย่างช้าๆ เมื่อเทียบกับคาบของการสวิตช์ ซึ่งถ้าเป็นในกรณี เช่นนี้เราสามารถสังเคราะห์แรงดันเอาต์พุต V_o ซึ่งมีค่าเฉลี่ยจะเป็นฟังก์ชันของเวลา และมีค่าเท่ากับ $d(t) V_s$ อย่างไรก็ตามเวลาในการเฉลี่ยค่า V_o จำเป็นต้องเป็นช่วงเวลาที่นานเมื่อเทียบกับคาบเวลาของการสวิตช์ T แต่คาบเวลาดังกล่าวจะต้องสั้นกว่าเมื่อเทียบกับ คาบเวลาของ $d(t)$

การเฉลี่ยค่าแรงดันเอาต์พุต V_o ในที่นี้หมายถึงการเฉลี่ยเฉพาะที่ (local averaging) และจะใช้สัญลักษณ์ $\overline{V_o}(t)$ สำหรับสัญลักษณ์ $\langle V_o \rangle$ หมายถึงค่าเฉลี่ยจริงซึ่งเป็นค่าคงตัว หรืออาจกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ค่าเฉลี่ยดังกล่าวเป็นค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ได้จากการกรองสัญญาณ แรงดันเอาต์พุตด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยขจัดความถี่สูงออกและคงเหลือไว้แต่สัญญาณความถี่ต่ำๆ เช่น องค์ประกอบหลักมูล (Fundamental Component) ในขณะที่ถ้าส่วนค่าเฉลี่ยได้จากการกรองทุกความถี่ออก จะคงเหลือไว้แต่องค์ประกอบไฟตรง

สำหรับวงจรทอนระดับสัญญาณแสดงในภาพที่ 2.7 (ก) ถ้าเราให้วัฏจักรงาน $d(t)$ เป็นฟังก์ชันไซน์ซอซด์ เราจะได้แรงดันเอาต์พุตที่เป็นองค์ประกอบไฟตรงบวกกับไซน์ซอซด์ ได้ดังนี้

ถ้า

$$d(t) = 0.5 + m_a \sin \omega_a t$$

$$V_o(t) = 0.5V_s + m_a V_s \sin \omega_a t \quad ; m_a \leq 0.5 \quad (2.6)$$

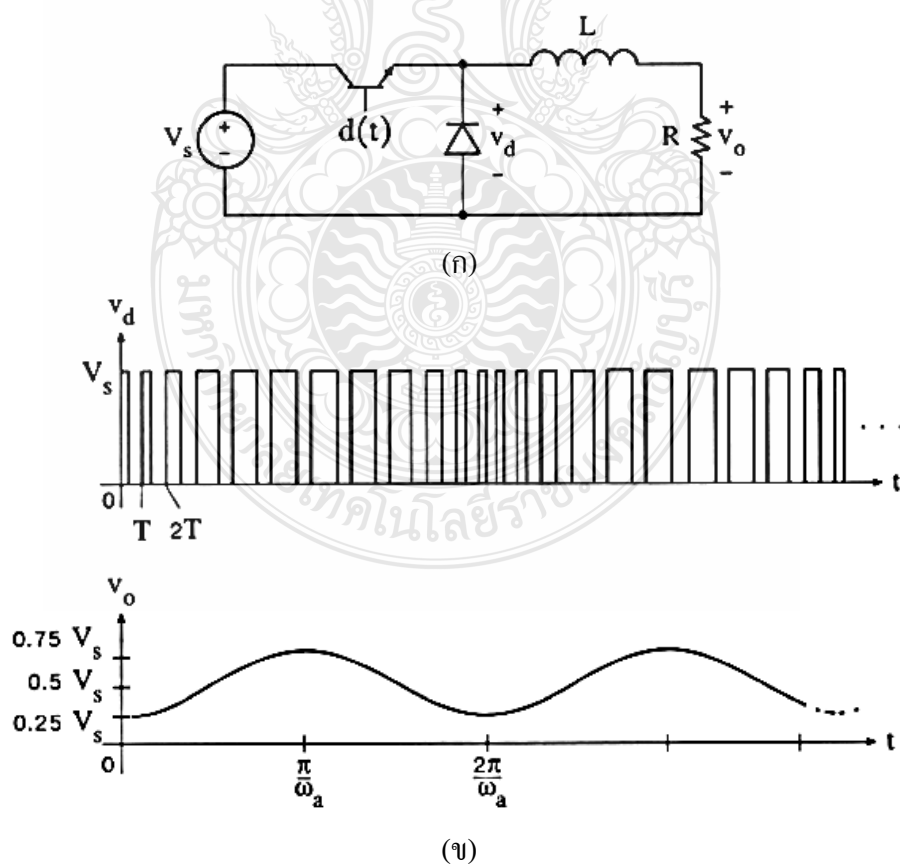
m_a คือ Amplitude Modulation

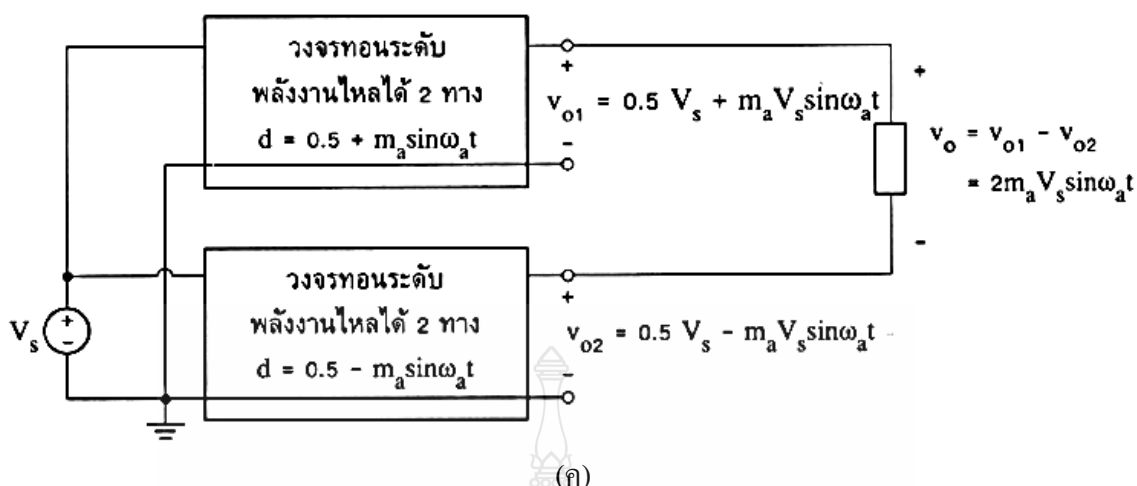
ω_a คือ Frequency Modulation

โดยมีเงื่อนไขดังนี้

$$T \ll \frac{L}{R} \ll \frac{2\pi}{\omega_a} \quad (2.7)$$

แรงดัน V_d เป็นพัลส์ที่มีความถี่เท่ากับ $1/T$ แต่มีความกว้างพัลส์ที่ไม่คงตัว เราเรียก รูปคลื่นที่วัฏจักรงานเป็นฟังก์ชันของเวลาว่ารูปคลื่นสัญญาณ PWM ค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของ รูปคลื่น PWM หรือ $\overline{V_d}$ จะเป็นฟังก์ชันของเวลา ถ้าเราทำการกรอง V_d ด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำ ผ่านที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ L และ R โดยมีพารามิเตอร์เป็นไปตามเงื่อนไขสมการที่ 2.7 ดังนั้นค่าความถี่การสวิตช์จะถูกกรองออกไปแต่ความถี่ ω_a ไม่ถูกลดทอน





ภาพที่ 2.7 การใช้เทคนิค PWM กับวงจรทอนระดับ [13]

ในภาพที่ 2.7 (ข) V_o คือค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของรูปคลื่น PWM เนื่องจาก $d(t)$ เป็นฟังก์ชันไซน์ซอซด์ ค่าเฉลี่ยเฉพาะที่ของรูปคลื่น PWM จึงเป็นรูปไซน์ซอซด์ด้วย แต่ $d(t)$ อาจเป็นฟังก์ชันของเวลาใดๆ (ที่เป็นไปตามเงื่อนไขสมการที่ 2.7) $V_o(t)$ ก็จะเป็นฟังก์ชันที่เหมือนกับ $d(t)$

อย่างไรก็ดี แรงดันเอาต์พุต V_o ของวงจรทอนระดับสัญญาณยังมีองค์ประกอบไฟตรงผสมอยู่ (เป็นไปตามสมการที่ 2.6 และภาพที่ 2.7 (ข)) ดังนั้นการกำจัดองค์ประกอบไฟตรงสามารถทำ

ได้โดยการต่อวงจรทอนระดับ 2 วงจร โดยที่สัญญาณมอดคูเลตของวงจรทั้งสองมีเฟสต่างกัน 180° (ดังแสดงในภาพที่ 2.7 (ค)) เมื่อนำสัญญาณด้านเอาต์พุตมาลบกับ จะส่งผลให้แรงดันไฟตรงก็จะหักล้างกันไปเหลือแต่แรงดันไฟสลับ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากกระแสด้านออก i_o เป็นกระแสลับวงจรทอนระดับที่ใช้จะต้องเป็นชนิดที่ก้าลังงานไหลได้ 2 ทิศทาง กล่าวคือ แต่ละวงจรใช้สวิตช์ ที่กระแสไหลได้ 2 ทางจำนวน 2 ตัวถ้าให้สัญญาณมอดคูเลตเป็นฟังก์ชัน ใดๆ แต่องค์ประกอบความถี่สูงสุดยังเป็นไปตามเงื่อนไขสมการที่ 2.7 แรงดันด้านออกจะเป็นฟังก์ชันเดียวกับสัญญาณมอดคูเลตเพียงแต่จ่ายกำลังได้มากขึ้น ในแง่นี้วงจรทำหน้าที่เป็นวงจร ขยายกำลังแบบวิธีสวิตช์ (Switch Mode Power Amplifier)

$$m_f = \frac{f}{f_a} \quad (2.8)$$

m_f = อัตราการมอดคูเลตความถี่

f = ความถี่การสวิตช์

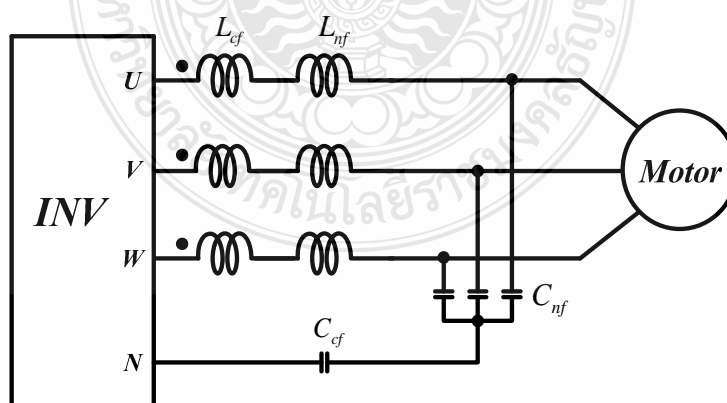
f_a = ความถี่การมอดดูเลต

2.4.4 วงจรกรองความถี่และแรงดัน

1) วงจรกรองพาสซีฟ

การนำเสนอวงจรพาสซีฟรูปแบบต่างๆ เพื่อลดทอนแรงดันโหมคร่วม ใช้ตัวเหนี่ยวนำแบบโหมคร่วมและใช้วงจรกรองพาสซีฟแบบ LC เพื่อลด dv/dt หลักการของ วงจรกรองทั้ง 2 แบบนี้จะทำหน้าที่กรององค์ประกอบของแรงดันโหมคร่วมที่มีความถี่สูงกว่า ความถี่สวิตช์ ซึ่งทำให้วงจรกรองมีขนาดเล็ก วงจรกรองชนิดนี้มีคุณสมบัติการกรองที่ดีเฉพาะ ในย่านความถี่สูงมากๆ (>10 เท่าของความถี่การสวิตช์) เนื่องจากต้องออกแบบให้ความถี่ตัดข้ามของวงจรกรอง (Cut-off Frequency) อยู่ห่างจากความถี่การสวิตช์มากๆ เพื่อหลีกเลี่ยง การถูกกระตุ้นจากระโซแนนซ์ ทำให้สามารถแก้ไขผลกระทบจากแรงดันโหมคร่วมเฉพาะ ในประเด็นที่เกี่ยวกับปัญหา EMI และความล้มเหลวของตัวขั้วบอกความผิดพลาดลงดินเท่านั้น แต่จะไม่สามารถแก้ปัญหาอื่นๆ ได้เนื่องจากองค์ประกอบที่ความถี่การสวิตช์ของแรงดัน โหมคร่วม ซึ่งไม่ได้ถูกกรองออกไปยังสามารถกระตุ้นให้เกิดปัญหาที่เหลือได้

วงจรกรองพาสซีฟแบบ LC ที่ทำหน้าที่กรองแรงดันโหมคร่วม ทั้งองค์ประกอบความถี่สูงและองค์ประกอบความถี่ การสวิตช์สามารถทำได้โดยออกแบบให้วงจรกรองมีความถี่ตัดข้ามต่ำกว่าความถี่การสวิตช์วงจรกรองชนิดนี้เป็นที่รู้จักกันดีและใช้กันมานานตั้งแต่อดีต เพราะมีโครงสร้างที่ง่ายดังแสดงในภาพที่ 2.8 และเนื่องจากองค์ประกอบทั้งหมดของ วงจรเป็นองค์ประกอบเนื้อยางานวงจรกรองจึงมีแบนด์วิดท์ที่กว้างครอบคลุมความถี่การสวิตช์ จนถึงย่านความถี่การแทรกสอดทางแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการนำ



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างของวงจรกรองแบบพาสซีฟที่มีความถี่ตัดข้ามต่ำกว่าความถี่การสวิตช์

ถึงแม้ว่าวงจรกรองชนิดนี้จะสามารถลดทอนแรงดันโหมคร่วมได้เป็นอย่างดี และสามารถแก้ปัญหาผลกระทบจากแรงดันโหมคร่วมได้ครอบคลุมทุกประเด็น แต่ข้อด้อย คือ การออกแบบวงจรกรองจะทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากในด้านหนึ่งผู้ออกแบบจะต้องออกแบบวงจรกรอง เพื่อลดทอนองค์ประกอบที่ความถี่การสวิตช์ของแรงดันโหมคร่วม กล่าวคือ จะวางความถี่ตัดเข้ามาให้ต่ำที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ แต่ในขณะที่เดียวกันจะต้องหลีกเลี่ยงไม่ให้วงจรกรองถูกกระตุ้นจากแรงดันลำดับศูนย์ที่มีความถี่ 3n เท่าที่ของความถี่ด้านออกของ อินเวอร์เตอร์ที่เกิดจากวิธีการมอดูเลตแบบสเปซเวกเตอร์ ซึ่งหมายถึงว่า จะต้องวางความถี่ ตัดเข้ามาให้สูงกว่าความถี่ฮาร์มอนิกของความถี่ด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ความต้องการ ที่ขัดแย้งกันนี้ อาจทำให้ไม่สามารถออกแบบวงจรกรองที่มีสมรรถนะที่ต้องการได้ ปัญหาดังกล่าว อาจหลีกเลี่ยงได้ หากจำกัดวิธีการมอดูเลตเป็นแบบคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal PWM) เพราะจะไม่มี การฉีดแรงดันลำดับศูนย์ แต่จะทำให้สมรรถนะการสร้างแรงดันออกของอินเวอร์เตอร์ด้อยลง ซึ่งเป็นปัญหาในการใช้งานที่ยอมรับได้ยากเช่นกัน นอกจากนี้ โครงสร้างของวงจรกรองที่มีตัวเก็บประจุต่อขนานที่ด้านออกอินเวอร์เตอร์ C_{nf} จะส่งผลให้เกิดกระแสโหมคผลต่าง ค่าสูงได้ ดังนั้นวงจรกรองชนิดนี้ต้องใช้ร่วมกับตัวเหนี่ยวนำโหมคผลต่าง (Differential-Mode Choke) L_{nf} เสมอ เพื่อจำกัดกระแส โหมคผลต่างไม่ว่าจะมีความจำเป็นที่ต้องลดทอนแรงดันโหมค ผลต่าง (Differential-Mode Voltage) หรือไม่ก็ตาม ยังผลทำให้วงจรกรองมีราคาแพงและ มีขนาดโดยรวมใหญ่มาก

2) วงจรกรองแอกทีฟ

การใช้วงจรกรองแบบพาสซีฟชนิดต่างๆ มีข้อจำกัดที่สำคัญจากปัญหา เรโซแนนซ์ การแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการใช้วงจรกรองแอกทีฟจึงได้รับความสนใจอย่าง กว้างขวาง วงจรกรอง EMI ชนิดแอกทีฟแบบขนานที่นำเสนอโดย Takahashi [14] เป็นวงจรกรองขนาดเล็กที่สามารถแก้ปัญหา EMI และความถี่ของตัวขับเคลื่อนความถี่พร้อมลงดินได้เป็น อย่างดี แต่เนื่องจากวงจรกรองชนิดนี้ไม่ได้ทำหน้าที่กรองแรงดันโหมคร่วม เป็นเพียงแค่ การเบี่ยงทางไหลของกระแสโหมคร่วมไม่ให้ลงกราว์เท่านั้น ดังนั้นจึงไม่สามารถนำไปใช้ เพื่อแก้ปัญหาที่เป็นผลกระทบจากแรงดันโหมคร่วมในประเด็นอื่นๆ ได้ นอกจากนี้ยังมี ข้อจำกัด คือ สามารถนำไปใช้งานได้เฉพาะกับอินเวอร์เตอร์ที่มีระดับแรงดันต่ำๆ และมี กระแสโหมคร่วมขนาดเล็ก ทั้งนี้เนื่องจากขีดจำกัดทางพิกัดแรงดันและกระแสของทรานซิสเตอร์ ในวงจรขยายแบบพหุพูล

วงจรกรองแอกทีฟแบบอนุกรมสำหรับชดเชยแรงดันโหมคร่วม เป็นวงจร กรองที่สามารถกำจัดแรงดัน โหมคร่วมได้เป็นอย่างดี แต่มีข้อจำกัดทางด้านพิกัดแรงดันและ กระแสของทรานซิสเตอร์ในวงจรขยายแบบพหุพูลที่ใช้สร้างแรงดันชดเชย เมื่อนำไปประยุกต์ เพื่อใช้งานจริงใน

ระบบที่มีแรงดันบัลไฟตรงสูงเกินกว่า 500 V Xing เสนอ Active Common-Mode=Voltage compensator (ACCom) ที่จะชดเชยแรงดันโหมคร่วมด้วยอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา (Single-leg 4-Level Inverter) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เหมาะสมกับการใช้งานกับระบบขับเคลื่อน แรงดันสูง อย่างไรก็ตามแนวทางที่ Xing นำเสนอนี้จะให้วงจรกรองชดเชยของคัพประกอบ ของแรงดันโหมคร่วมในทุกย่านความถี่ตั้งแต่ที่ความถี่ต่ำ ทำให้หม้อแปลงเชื่อมร่วม (Coupling Transformer) มีขนาดใหญ่ไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริงได้ ทั้งๆ ที่องค์ประกอบ ของแรงดันโหมคร่วมที่ความถี่สูงเท่านั้นที่เป็นต้นเหตุของปัญหาต่างๆ ดังที่กล่าวข้างต้น นอกจากนี้ยังเป็นเพียงการยืนยันแนวคิดด้วยการจำลองการทำงานของระบบ โดยยังขาดรายละเอียดการออกแบบสำหรับการสร้างวงจรอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับ 1 ขา เพื่อนำไป ใช้งานในทางปฏิบัติได้จริง

โดยสรุปแล้วจะเห็นได้ว่าวงจรกรองแอกทีฟแบบอนุกรมมีข้อดีหลายอย่าง เมื่อเทียบกับวงจรกรองแบบพาสทีฟ โดยเฉพาะในเรื่องปัญหาเรโซแนนซ์ที่ทำให้เกิดข้อจำกัด ในการใช้งาน ดังนั้นการใช้วงจรกรองแอกทีฟเพื่อลดทอนแรงดันโหมคร่วมจึงเป็นแนวทาง ที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งานจริง แต่มีปัญหาบางประการที่ต้องการแก้ไขหรือพัฒนาเพื่อนำไปสู่เป้าหมายการนำไปใช้จริงในทางปฏิบัติดังนี้ คือ

1) จากการศึกษาวงจรกรองแบบแอกทีฟที่นำเสนอ พบว่าถึงแม้วงจรกรองแอกทีฟ จะมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับวงจรกรองแบบพาสทีฟ แต่การชดเชยแรงดันโหมคร่วมตลอดย่าน ความถี่รวมทั้งความถี่ฮาร์โมนิกของความถี่ด้านออกด้วย ททำให้หม้อแปลงเชื่อมร่วมมี ขนาดใหญ่เกินความจำเป็น และเนื่องจากหม้อแปลงเป็นองค์ประกอบหลักที่กำหนดขนาด ของวงจรกรองแอกทีฟจึงจำเป็นที่จะต้องหาวิธีการลดขนาดของหม้อแปลงที่ใช้ในวงจรกรองแอกทีฟ

2) ปัญหาข้อจำกัดของอุปกรณ์สวิตช์กำลังที่ใช้สร้างแรงดันชดเชย ทำให้โครงสร้างของวงจรภาคกำลังแบบพหุขพลไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ และวงจรอินเวอร์เตอร์ 4 ระดับที่ทำงาน ในลักษณะสวิตช์มีความเหมาะสมมากกว่า แต่ก็ยังต้องพิจารณาปัญหาข้อจำกัดในเรื่องเวลาหน่วง (Delay Time) ในส่วนการสร้างแรงดันโหมคร่วมในลักษณะการสวิตช์ที่ทำให้มีข้อจำกัดในการชดเชยในย่านความถี่สูง ซึ่งเป็นประเด็นที่เกี่ยวข้องกับวิธีการตรวจจับแรงดันโหมคร่วม

2.4.5 สรุป

การศึกษาวจรและรูปคลื่นสัญญาณ การควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบ PWM และวงจรกรองความถี่และแรงดัน ซึ่งเป็นหลักการทำงานสำคัญของอินเวอร์เตอร์ เพื่อนำไปใช้ในการแก้ปัญหาที่เป็นผลกระทบข้างเคียงของเปลี่ยนความถี่ที่ใช้ในการขับเคลื่อนด้วยวิธีการขับเคลื่อน แบบพีดับบลิวเอ็ม

(Pulse-Width Modulation, PWM) โดยจะนำไปใช้ในการศึกษาปัญหาและสร้างอาร์คแวร์ที่ใช้ทดสอบการแก้ปัญหา

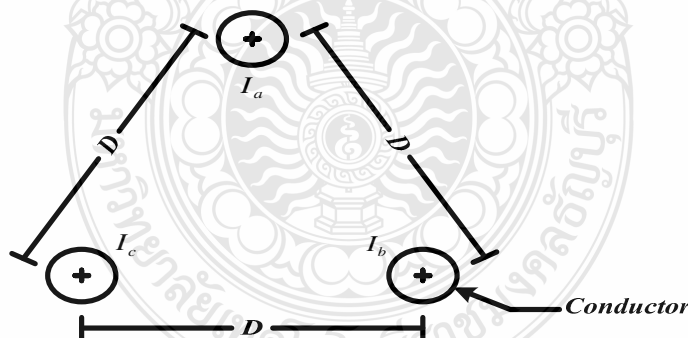
2.5 การประมาณค่าพารามิเตอร์ของสายไฟฟ้า

2.5.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์นี้จะทำการศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาการเกิดแรงดันเกินในมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดีบีบลิวเอ็ม ที่มีความยาวของสายตัวนำที่ไกล เพื่อนำผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบที่ทำให้เกิดปัญหาดังกล่าวมาออกแบบการป้องกัน เพื่อลดทอนแรงดันเกินในขั้วของมอเตอร์ที่จะมีผลให้จำนวนของมอเตอร์เกิดการเสียหาย โดยใช้วิธีพาสซีฟฟิลเตอร์ (Passive Filter) การหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับสายไฟฟ้าจะต้องทำความเข้าใจเพื่อนำไปใช้วิเคราะห์และแก้ปัญหาตามลำดับ

2.5.2 อินдукแตนซ์ของเคเบิล 3 แกนที่วางตัวเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า (Three-phase Inductance-Delta Spacing)

ระบบไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งประกอบด้วยสายตัวนำ 3 เส้นแต่ละเส้นมีรัศมีเท่ากับ r และวางตัวเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า มีระยะห่างเป็น D ดังภาพ 2.9 เราเรียกการวางตัวของสายตัวนำหรือสายส่งเหล่านี้ว่า การวางตัวเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า



ภาพที่ 2.9 อินдукแตนซ์ของเคเบิล 3 แกนที่วางตัวเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า

ถ้ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายตัวนำทั้ง 3 เฟส อยู่ในสภาพสมดุล ($I_1 + I_2 + I_3 = 0$) จะหาค่าอินдукแตนซ์ในสายตัวนำแต่ละเส้น หรือค่าอินдукแตนซ์ต่อเฟสโดยพิจารณาได้ดังนี้

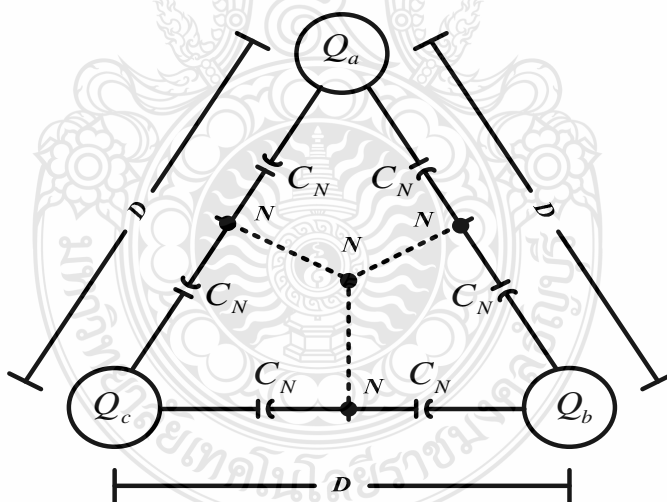
$$L = \frac{1}{2} \times 10^{-7} + 2 \times 10^{-7} \ln(D/r) \quad (2.9)$$

ทำให้ได้ค่าอินตีกแทนซ์ต่อเฟสของสายส่งในภาพ 2-15 ดังนี้คือ

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{GMR} \quad (2.10)$$

2.5.3 แรงดันไฟฟ้าและคาปาซิแตนซ์ของเคเบิล 3 แกนที่วางตัวเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า

การหาค่าแรงดันไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ของสายส่ง 3 เฟสที่มีรัศมีเท่ากับ r และวางตัวเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าดังภาพที่ 2.10 ทำได้โดยหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากประจุไฟฟ้าของสายตัวนำที่ละเส้น โดยมีเงื่อนไขว่าประจุไฟฟ้าของสายตัวนำทั้ง 3 สายมีสภาพสมดุล นั่นคือ $Q_a = Q_b = Q_c = 0$ และกำหนดระยะพิจารณาใหม่ คือ S ซึ่งเป็นระยะที่ความต่างศักย์หรือแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากตัวนำทั้งสามมีค่าเป็นศูนย์ จากนั้นใช้หลักการวางซ้อนมารวมพิจารณา จะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าสายนิวทรัล



ภาพที่ 2.10 แรงดันไฟฟ้าและคาปาซิแตนซ์ของเคเบิล 3 แกนที่วางตัวเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า

การหาค่าแรงดันไฟฟ้าสายถึงนิวทรัลของสายตัวนำ (กำหนดให้เป็น V_{an}) ทำได้ดังนี้

$$V_{an} = \frac{Q_a}{2\pi \epsilon_0} \ln(S/r) + \frac{Q_b}{2\pi \epsilon_0} \ln(S/D) + \frac{Q_c}{2\pi \epsilon_0} \ln(S/D) \quad (2.11)$$

เมื่อ

$$Q_b + Q_c = -Q_a \quad (2.12)$$

$$V_{an} = \frac{1}{2\pi \epsilon_0} [Q_a \ln(S/r) - Q_a \ln(S/D)] \quad (2.13)$$

$$V_{an} = \frac{Q_a}{2\pi \epsilon_0} \ln(D/r) \quad (2.14)$$

แทนสมการที่ 2.14 ลงในสมการที่ 2.15

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.15)$$

จะได้

$$C_{an} = \frac{2\pi \epsilon_0}{\ln(D/r)} \text{ (F/m)} \quad (2.16)$$

หรือ

$$C_{an} = \frac{0.0388}{\log(D/r)} ; (\mu\text{F} / \text{mile}) \quad (2.17)$$

$$C_{an} = \frac{0.0241}{\log(D/r)} ; (\mu\text{F} / \text{mile}) \quad (2.18)$$

ข้อสังเกต คือ คาปาซิแตนซ์ที่ได้จากสมการที่ 2.16 ถึงสมการที่ 2.18 เป็นค่าต่อเฟส และ $C_{an} = C_{bn} = C_{cn} = C_n$

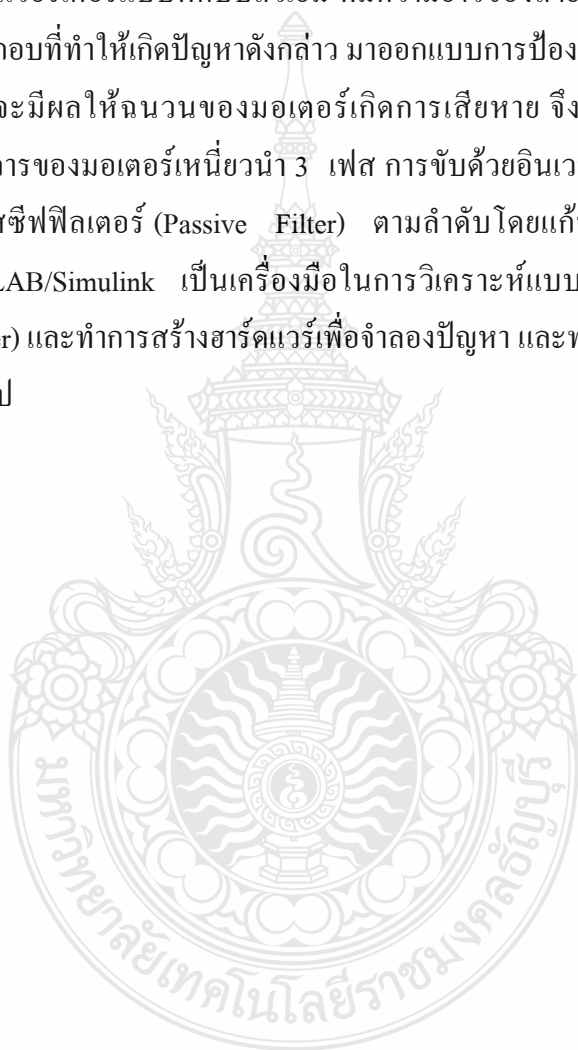
2.5.4 สรุป

จากการศึกษาการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับสายไฟฟ้า เพื่อนำไปเป็น ส่วนช่วยวิเคราะห์ปัญหาการเกิดแรงดันเกินในมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ แบบพีดับบลิวเอ็ม ที่มีความยาวของสายตัวนำที่ไกลนั้น การศึกษาอินดักแตนซ์ของเคเบิล 3 แกน ที่วางตัวเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า (Three-Phase Inductance-Delta Spacing) แรงดันไฟฟ้า และคาปาซิแตนซ์ของเคเบิล 3 แกนที่

วางตัวเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า จะถูกนำไปใช้หาอิมพีแดนซ์รวมของสาย ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปัญหาแรงดันเกินที่ขั้วมอเตอร์

2.6 สรุปผลทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาทฤษฎีและวรรณกรรมเกี่ยวข้องจากปัญหาการเกิดแรงดันเกินใน มอเตอร์เหนี่ยวนำที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับบลิวเอ็ม ที่มีความยาวของสายตัวนำที่ไกล เพื่อนำผลจากการวิเคราะห์ห้วงคํ์ประกอบที่ทำให้เกิดปัญหาดังกล่าว มาออกแบบการป้องกัน เพื่อลดทอนแรงดันเกินในขั้วของมอเตอร์ที่จะมีผลให้ฉนวนของมอเตอร์เกิดการเสียหาย จึงต้องมี การทำความเข้าใจโครงสร้าง และหลักการของมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส การขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ แบบพีดับบลิวเอ็ม สายไฟฟ้าและวิธีพาสซีฟฟิลเตอร์ (Passive Filter) ตามลำดับโดยแก้ปัญหาคือใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ MATLAB/Simulink เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์แบบจำลอง โดยใช้ วิธีพาสซีฟฟิลเตอร์ (Passive Filter) และทำการสร้างฮาร์ดแวร์เพื่อจำลองปัญหา และทดสอบการแก้ไขปัญหาคือจะนำเสนอในบทต่อไป



บทที่ 3

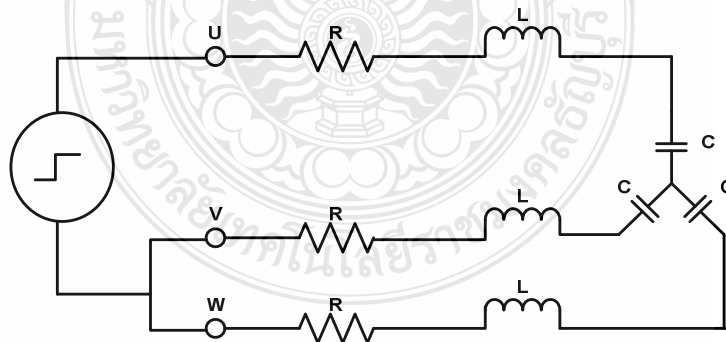
ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK ในการสร้างแบบจำลอง การเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินที่ขั้วของมอเตอร์ที่ถูกขับโดยอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ที่มีสายตัวนำยาว และนำผลที่ได้มาออกแบบวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้าเกิน โดยในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้หลักการ LC Passive Filter เป็นตัวกรองแรงดันไฟฟ้าที่ขอมให้ความถี่ในย่านต่ำสามารถผ่านไปได้ มาเป็นตัวช่วยในการลดทอนแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้น เพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายทั้งอินเวอร์เตอร์ และมอเตอร์

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1.1 แบบจำลองของสายเคเบิล

การจำลองการทำงานของมอเตอร์ที่ถูกขับด้วยอินเวอร์เตอร์ ที่มีสายเคเบิลยาวตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดปัญหาแรงดันไฟฟ้าเกินที่ขั้วของมอเตอร์ คือค่าอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล ที่มีระยะทางที่ยาวซึ่งในสายเคเบิลจะประกอบไปด้วยค่า ริซีสแตนซ์ อินดักแตนซ์ ซึ่งในระยะสาย ที่มีระยะทางที่ยาวจำเป็นต้องพิจารณา ค่าคาปาซิแตนซ์ มาเป็นองค์ประกอบในการพิจารณาด้วย โดยปกติแล้วในการหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล จะมีตัวแปรทางด้านความถี่มาคำนวณด้วยซึ่งในสายเคเบิลที่ถูกขับโดยอินเวอร์เตอร์แบบ PWM จะได้รับความถี่สูงตามความถี่สวิตชิ่งของ IGBT



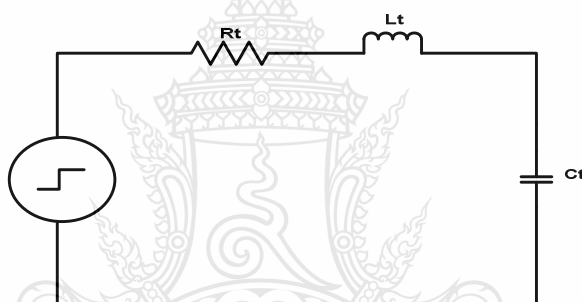
ภาพที่ 3.1 แบบจำลองสายเคเบิลที่ความถี่สูงด้วยวงจรสมมูลรวมกลุ่ม

โดยที่ R คือ ความต้านทานภายในสายเคเบิล
 L คือ อินдукแตนซ์ภายในสายเคเบิล
 C คือ คาปาซิแตนซ์ระหว่างสายเคเบิล

จากภาพที่ 3.1 เป็นการจำลองสายเคเบิลที่เมื่อสายยาวจะประกอบไปด้วย อิมพีแดนซ์ RLC ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ดังกล่าวจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระยะทางของสายเคเบิล เมื่อได้ทำการขุบรวมค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการที่ 3.1

$$Z_{vw} = Z_v // Z_w \quad (3.1)$$

$$Z_{th} = Z_U // Z_{vw} \quad (3.2)$$



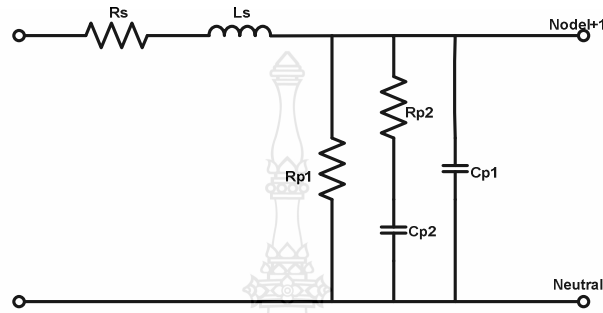
ภาพที่ 3.2 แบบจำลองสายเคเบิลที่ความถี่สูงด้วยวงจรเทวินิน

ในการหาค่าพารามิเตอร์ในสายเคเบิลซึ่งประกอบไปด้วย RLC โดยที่ค่าของสายเคเบิล ตามมาตรฐาน โดยทั่วไปจะระบุค่าความต้านทานของสายเคเบิลต่อหน่วยความยาว ซึ่งค่าที่จะต้องประมาณการได้แก่ค่า L และ C ของสาย จากสมการที่ 3.3 และสมการที่ 3.4 ซึ่งการใช้สมการดังกล่าวพิจารณาจากการใช้สายเคเบิลที่อยู่ในสภาวะสมดุล

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{GMR} \quad \text{H/m} \quad (3.3)$$

$$C_n = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(D/r)} \quad \text{F/m} \quad (3.4)$$

โดยทั่วไปแล้วค่า L และค่า C ของสายเคเบิลจะแปรผันตามความถี่ที่ 50 Hz ตามระบบไฟฟ้าแต่เนื่องจากสายเคเบิลนี้ได้ใช้ร่วมกับอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์แบบ PWM ซึ่งมีย่านความถี่สูงกว่าปกติซึ่งในการจำลองนี้ใช้ความถี่สวิตชิ่งของอินเวอร์เตอร์ 2 KHz ถึง 10 KHz จำเป็นต้องใช้วงจรสมมูลแบบความถี่สูงของสายเคเบิล



ภาพที่ 3.3 แบบจำลองสายเคเบิลที่ความถี่สูงที่ใช้ในการจำลอง

จากแบบจำลองดังภาพที่ 3.3

$$Z_o = \sqrt{(Z_{oc} Z_{sc})} \quad (3.5)$$

$$R_s = \frac{2}{3} \text{Real}\{Z_{sc}\}_{f_{low}} \quad (3.6)$$

$$L_s = \frac{2}{3} \frac{1}{2\pi f_{high}} \text{Imag}\{Z_{sc}\}_{f_{high}} \quad (3.7)$$

$$R_{p1} = 2 \left(\text{Real}\{Z_{sc}\}_{f_{low}} \right) \left[\left(\frac{\text{Imag}\{Z_{oc}\}_{f_{low}}}{\text{Real}\{Z_{oc}\}_{f_{low}}} \right)^2 + 1 \right] \quad (3.8)$$

$$R_{p2} = 2 \left(\text{Real}\{Z_{sc}\}_{f_{high}} \right) \left[\left(\frac{\text{Imag}\{Z_{oc}\}_{f_{high}}}{\text{Real}\{Z_{oc}\}_{f_{high}}} \right)^2 + 1 \right] \quad (3.9)$$

$$C_{p2} = \left[(2\pi f_{high}) \left(\frac{Real\{Z_{oc}\}_{f_{high}}}{Imag\{Z_{oc}\}_{f_{high}}} \right) R_{p2} \right]^{-1} \quad (3.10)$$

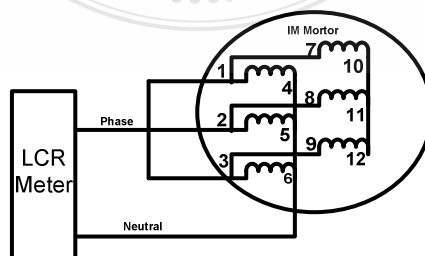
$$C_{p1} = \left[(2\pi f_{low}) \left(\frac{Real\{Z_{oc}\}_{f_{low}}}{Imag\{Z_{oc}\}_{f_{low}}} \right) R_{p2} \right]^{-1} - C_{p2} \quad (3.11)$$

- เมื่อ $Z_o = \sqrt{(Z_{oc}Z_{sc})}$ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล
 Z_{oc} คือ ค่าอิมพีแดนซ์เปิดวงจรของสายเคเบิล
 Z_{sc} คือ ค่าอิมพีแดนซ์ลัดวงจรของสายเคเบิล
 R_s, L_s คือ ค่ารีซิสแตนซ์และอินดักแตนซ์ขณะลัดวงจรของสายเคเบิล
 R_{p1}, R_{p2} คือ ค่ารีซิสแตนซ์ขณะเปิดวงจรของสายเคเบิล
 C_{p1}, C_{p2} คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ขณะเปิดวงจรของสายเคเบิล

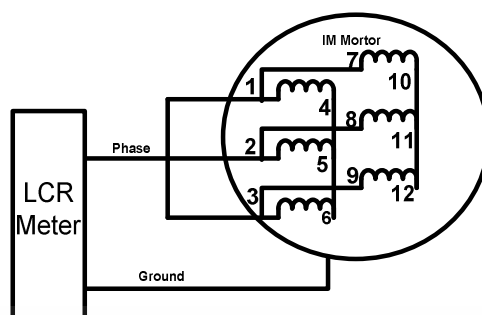
ความถี่ที่ใช้ในการหาค่าอิมพีแดนซ์ในย่านความถี่ต่ำคือ 100 Hz และในย่านความถี่สูงคือ 2 MHz ในการนำมาคำนวณ

3.2 แบบจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำความถี่สูงด้วยวงจรสมมูล

การจำลองผลของแรงดันไฟฟ้าเกินที่ขั้วของมอเตอร์จำเป็นต้องใช้วงจรสมมูลของมอเตอร์ที่ได้รับแรงดันในย่านความถี่สูงเนื่องจากอินเวอร์เตอร์มีการขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยความถี่สูงเนื่องจากความถี่พาหะในการสวิตชิงของไอจีบีทีมีค่าความถี่ในอุตสาหกรรมโดยทั่วไปจะมีค่า 2 KHz ถึง 20 KHz ซึ่งในการหาค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์เพื่อใช้ในแบบจำลองจะประกอบด้วยการหาค่าอิมพีแดนซ์เทียบกับกราวด์และเทียบกับนิวทรัล

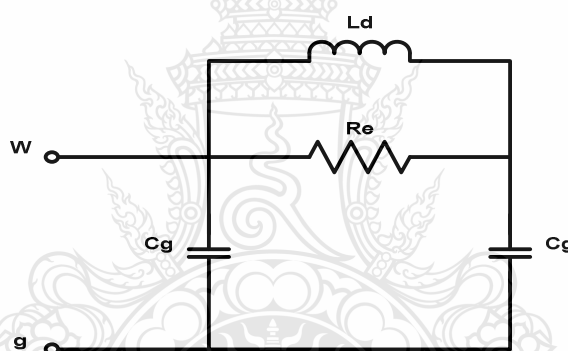


ภาพที่ 3.4 การวัดหาค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเทียบกับนิวทรัล



ภาพที่ 3.5 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเทียบกับกราวด์

จากภาพที่ 3.4 และ 3.5 เมื่อเราทำการวัดได้ค่าอิมพีแดนซ์ตำแหน่งต่างๆดังภาพเราจะสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ในวงจรสมมูลความถี่สูงของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



ภาพที่ 3.6 แบบจำลองของมอเตอร์เหนี่ยวนำความถี่สูงที่ใช้ในการจำลอง

จากแบบจำลองดังภาพที่ 3.6 เราสามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$C_g = \frac{1}{6(2\pi fZ_{wg})} \quad (3.11)$$

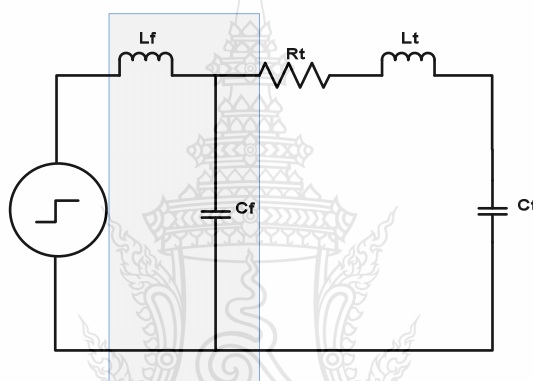
$$Re = 3Z_{wn} \quad (3.12)$$

$$L_{d(hf)} = \frac{1}{(2\pi fz_{wg})^2 c_g} \quad (3.13)$$

- เมื่อ C_g คือ คาปาซิแตนซ์ของมอเตอร์เทียบกับกราวด์
 R_e คือ ความต้านทานกระแสเอ็ดดี้ในขดลวดสนามแม่เหล็กและเฟรม
 L_d คือ ค่าอินดักแตนซ์รั่วไหล

3.3 การออกแบบวงจรกรองพาสซีฟชนิด LC

เนื่องจากแรงดันดันออกของวงจรอินเวอร์เตอร์มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้วยความถี่สูงซึ่งแรงดันไฟฟ้าเกินที่เกิดขึ้น สามารถใช้หลักการวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านชนิด LC เข้ามาช่วยลดทอนปัญหาโดยวงจรกรองจะมิยอมให้แรงดันที่มีปัญหาดังแต่ย่านความถี่ที่กำหนด



ภาพที่ 3.7 วงจรสมมูลของวงจรกรองที่ใช้ในการออกแบบ

การออกแบบวงจรกรองแบบ Low Pass Filter เพื่อจ่ายต่อการออกแบบจะทำการจำลองวงจรเทวินินเข้ามาช่วยโดยการออกแบบวงจรกรองจะมีขั้นตอนดังนี้

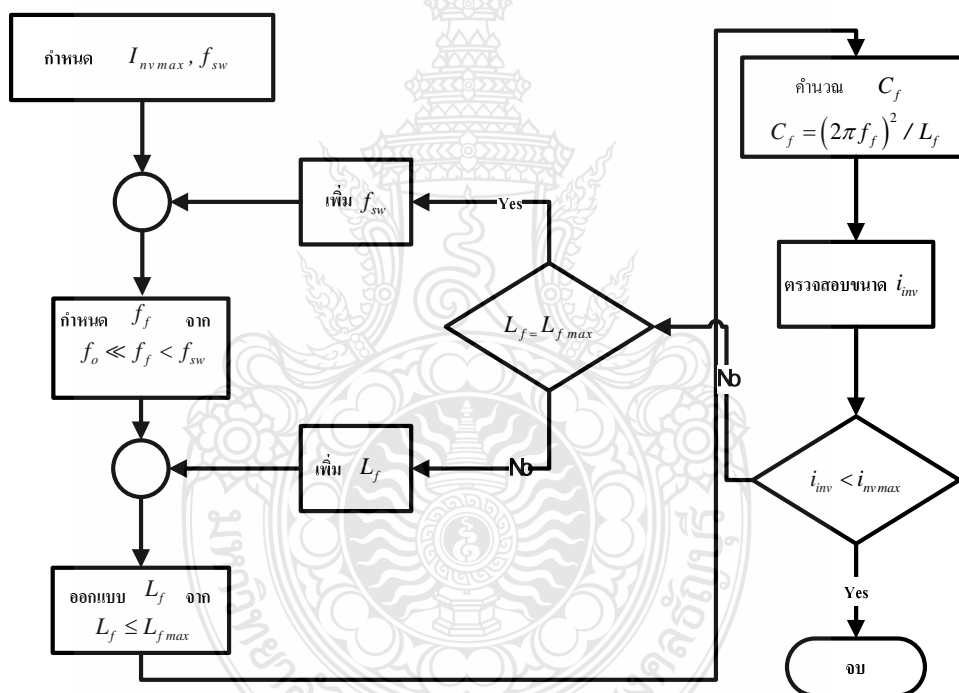
- 1) กำหนดตัวเหนี่ยวนำ L_f ของวงจรกรองโดยพิจารณาจากแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่หลักมูลโดยแรงดันที่ตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำจะมีค่าไม่เกินร้อยละ 5 ของแรงดันปกติแสดงได้จากสมการที่ 3.14

$$L_f \leq \frac{0.05V_{rate}}{2\pi f_{inv(rate)}} \quad (3.14)$$

2) กำหนดความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรกรอง f_f เพื่อกรองความถี่สวิตช์ของแรงดันอินเวอร์เตอร์ โดยจะเลือกที่ความถี่เรโซแนนซ์ต้องมีค่ามากกว่าความถี่หลักมูล และจะต้องมีค่าน้อยกว่าความถี่สวิตช์ของอินเวอร์เตอร์โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

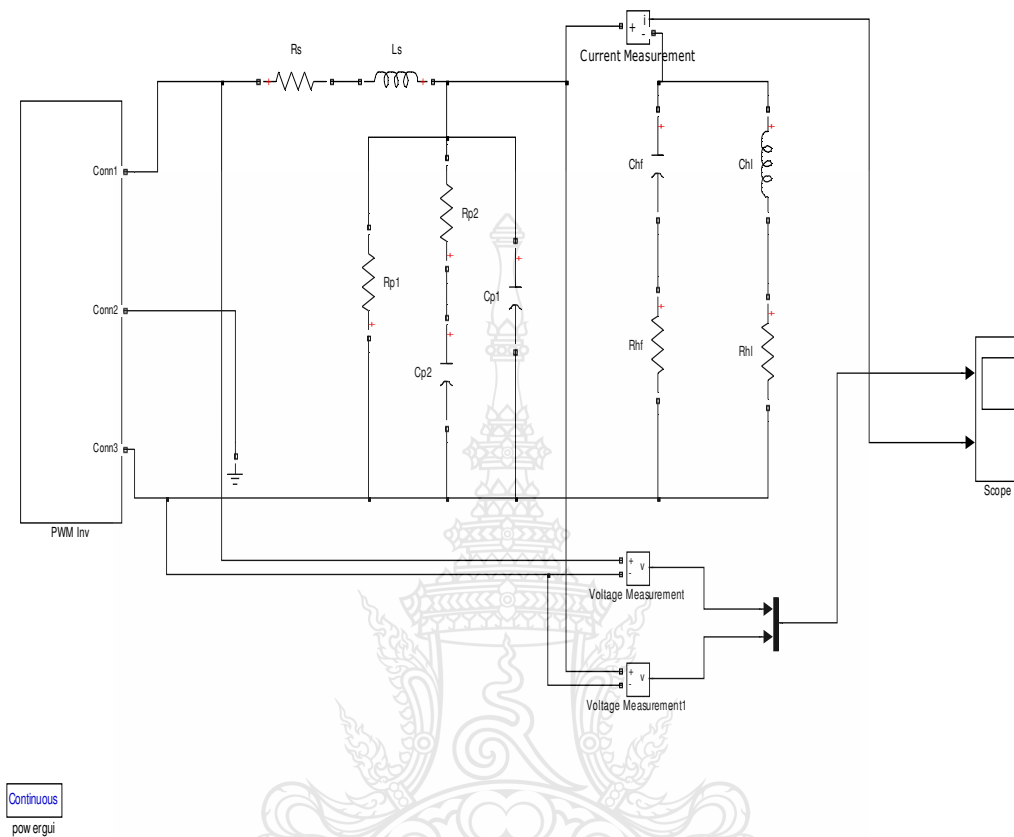
$$f_o < f_f = \left(\frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} \right) < f_{sw} \quad (3.15)$$

3) กำหนดขนาดของคาปาซิแตนซ์ของวงจรกรอง C_f โดยพิจารณาจากสมการที่ 3.15 ซึ่งขั้นตอนในการออกแบบวงจรลดทอนสามารถดูขั้นตอนได้จากแผนภูมิการออกแบบวงจรแบบดังภาพที่ 3.8



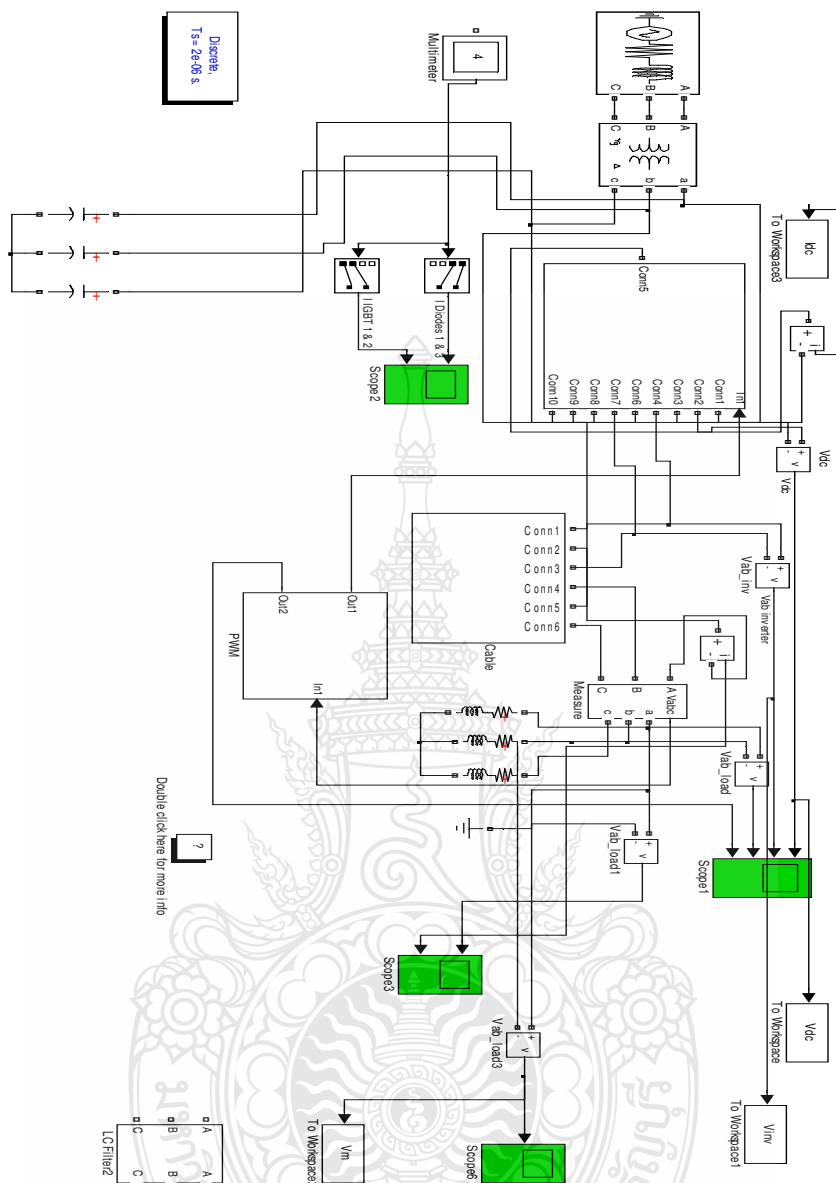
ภาพที่ 3.8 แผนภูมิการออกแบบวงจรกรองพาสซีบแบบ LC

3.4 การทดลองทางโปรแกรม



ภาพที่ 3.9 วงจรการจำลองด้วยวงจรสมมูลความถี่สูง

จากภาพที่ 3.9 แสดงการจำลองวงจรสมมูลของปัญหาโดยการจำลองประกอบด้วยโมเดลของสายเคเบิล และมอเตอร์เหนี่ยวนำความถี่สูงที่ได้จากการวัดค่าอิมพีแดนซ์แล้วมาคำนวณลงในสมการเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ลงในวงจรสมมูล โดยการจำลองทำการจำลองทั้งในแบบติดตั้งฟิลเตอร์และขณะไม่ได้ติดตั้งฟิลเตอร์เพื่อลดทอนปัญหา เพื่อนำผลการจำลองมาเปรียบเทียบลักษณะแรงดันไฟฟ้าชั่วขณะที่เกิดขึ้นที่ขั้วของมอเตอร์เหนี่ยวนำ



ภาพที่ 3.10 แบบจำลองเมื่อใช้เป็นระบบสามเฟส

3.5 การจำลองผลทางฮาร์ดแวร์

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการจำลองผลทางด้านฮาร์ดแวร์ด้วยเพื่อทำการเปรียบเทียบผลการจำลองจากวงจรการจำลอง และนำผลที่ได้มาออกแบบวงจรลดทอนแรงดันไฟฟ้าเกินที่ขั้วมอเตอร์ โดยในการจำลองจะใช้ มอเตอร์เหนี่ยวนำขนาด 400 วัตต์ 3 เฟส 200 โวลต์ ใช้สายเคเบิล ขนาด 2.5 มิลลิเมตร และอินเวอร์เตอร์อุตสาหกรรมขนาด 400 วัตต์ 3 เฟส 200 โวลต์ โดยการจำลองจะแบ่งเป็น

การจำลองผลขณะไม่มีฟิลเตอร์และมีฟิลเตอร์ โดยแบ่งความยาวของสายเคเบิลออกเป็นสามระยะ ได้แก่ 5 เมตร 10 เมตร และ 15 เมตร



ภาพที่ 3.11 อุปกรณ์การจำลองผลทางฮาร์ดแวร์



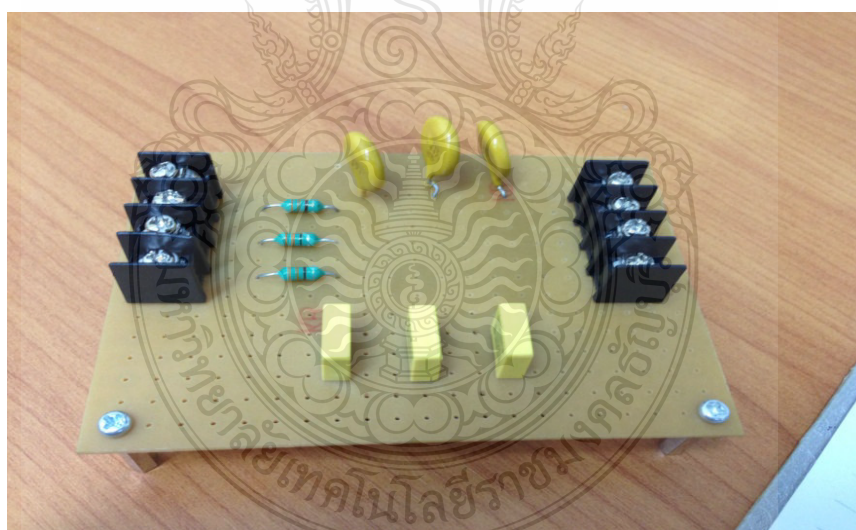
ภาพที่ 3.12 การวัดค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์

จากภาพที่ 3.12 แสดงการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์เหนี่ยวนำโดยใช้ LCR มิเตอร์รุ่น 8101G ในการวัด และใช้มอเตอร์เหนี่ยวนำรุ่น SF-JR ขนาด 400 วัตต์ โดยจะวัดอิมพีแดนซ์เทียบกับกราวด์ และเทียบกับนิวทรัล เพื่อนำไปแทนลงสมการหาค่าพารามิเตอร์ในการจำลองของตัวมอเตอร์



ภาพที่ 3.13 การใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ

จากภาพที่ 3.13 แสดงการจำลองใช้อินเวอร์เตอร์อุตสาหกรรม รุ่น F720P4 ขนาด 400 วัตต์ 200 โวลต์ ขับมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยการทดลองจะใช้ความถี่ที่ 50 Hz ที่ความถี่สวิตซ์ซิ่ง 2 KHz



ภาพที่ 3.14 วงจรพาสซีฟฟิลเตอร์



ภาพที่ 3.15 การใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมมอเตอร์ในการจำลองและวัดผล

จากภาพที่ 3.14 และ 3.15 แสดงฮาร์ดแวร์ของวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ที่ได้จากการคำนวณคำสั่งสมการข้างต้นและการทดลองโดยการต่อวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ทางด้านแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ที่จะเข้ามอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อลดทอนแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะที่เกิดขึ้น

3.6 สรุปขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้จะประกอบด้วยวงจรของเคเบิลความถี่สูง และมอเตอร์เหนี่ยวนำที่ถูกขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ที่ทำการจำลองลงในโปรแกรม MATLAB จำลองผล ซึ่งสามารถแบ่งการจำลองเป็นการจำลองการเกิดปัญหาขณะที่ไม่ได้ติดตั้งวงจรฟิลเตอร์ และ หลังการติดตั้งวงจรฟิลเตอร์เพื่อลดทอนแรงดันเกิน โดยแบ่งตามความยาวของสายเคเบิลเป็น 5 10 และ 15 เมตร โดยจะนำผลการจำลองจากโปรแกรมมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากฮาร์ดแวร์จริงซึ่งมีเงื่อนไขในการจำลองแบบเดียวกับการจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

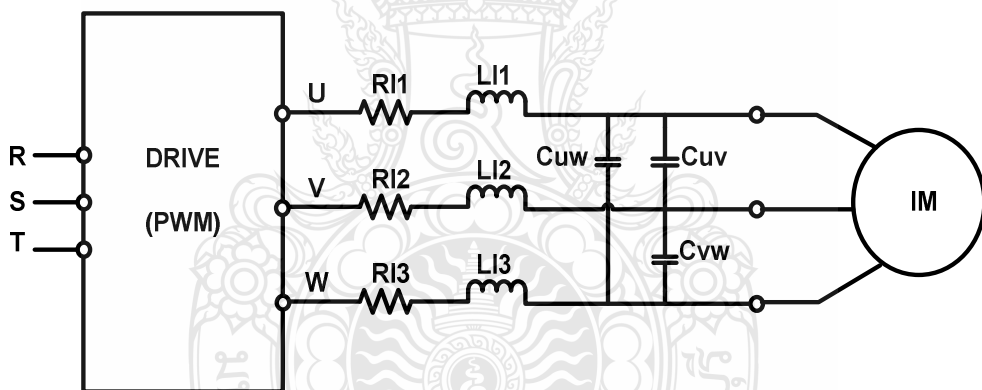
บทที่ 4

การจำลองระบบและผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลของการจำลองระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำ ที่มีสายเคเบิลยาว จะแสดงให้เห็นถึงผลของแรงดันที่มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของสาย และผลของการจำลองการออกแบบวงจรระบบพาสซีฟในการแก้ปัญหา เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาต่อไป

4.1 โครงสร้างระบบ

เนื่องจากปัญหาด้านการออกแบบระบบไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรม และเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมในอุตสาหกรรม จึงทำให้ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำในเครื่องจักรจำเป็นต้องมีการควบคุมระยะไกลจึงเป็นเหตุให้เกิดปัญหาแรงดันเกินขึ้น

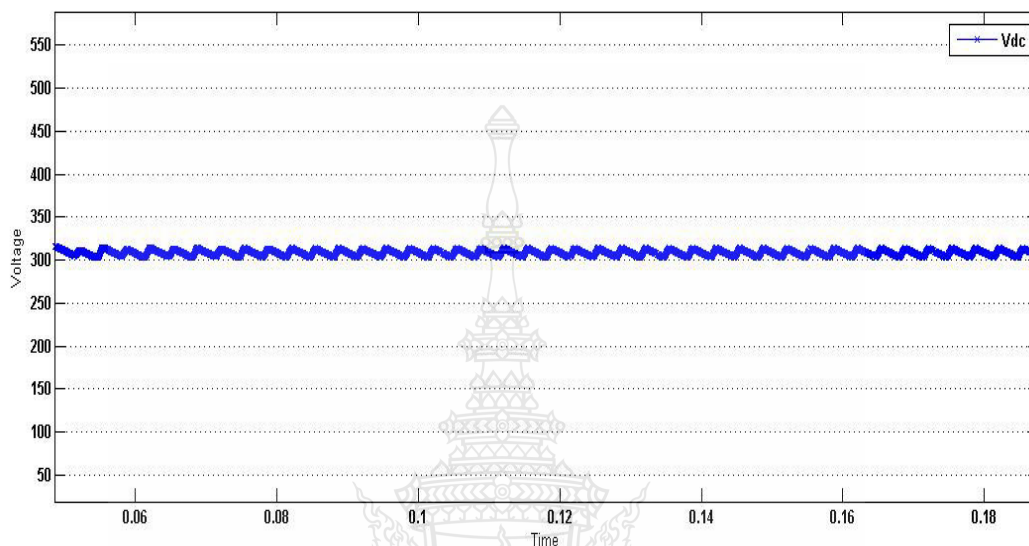


ภาพที่ 4.1 แบบจำลองของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีสายเคเบิลยาว

จากแบบจำลองดังภาพที่ 4.1 ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดปัญหาแรงดันเกินที่ขั้วของมอเตอร์ คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลเนื่องจากการเกิดสถานะแรงดันโหมคร่วม และดิฟเฟอเรนเชียล โหมค โดยแรงดันที่เกิดขึ้นที่ขั้วมอเตอร์จะมีค่าแรงดันอ้างอิงจากแรงดันที่ DC Link ในอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ในการขับมอเตอร์

4.2 ผลการจำลองแรงดันที่อินเวอร์เตอร์

จากโครงสร้างของระบบเมื่อนำมาจำลองระบบด้วยโปรแกรม แล้วจะได้ค่าของแรงดันเกินที่ขั้วมอเตอร์ดังแสดงได้ดังผลการจำลองดังนี้



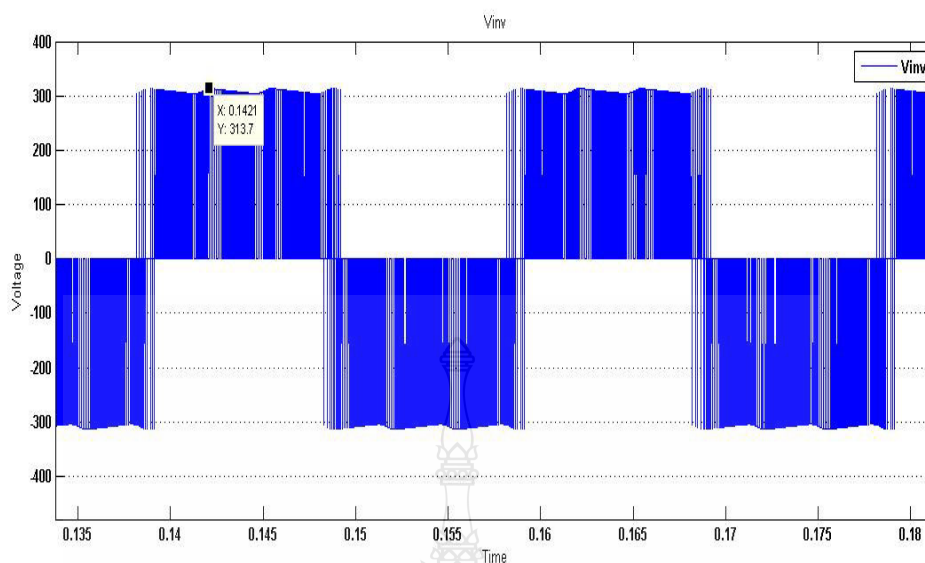
ภาพที่ 4.2 แรงดันไฟฟ้าที่ DC Link ของอินเวอร์เตอร์ในแบบจำลอง

จากภาพที่ 4.2 แสดงถึงแรงดันไฟฟ้าที่ DC Link ของอินเวอร์เตอร์ซึ่งค่าที่ได้เป็นไปตามสมการที่ 4.1 โดยประมาณ 310 โวลต์

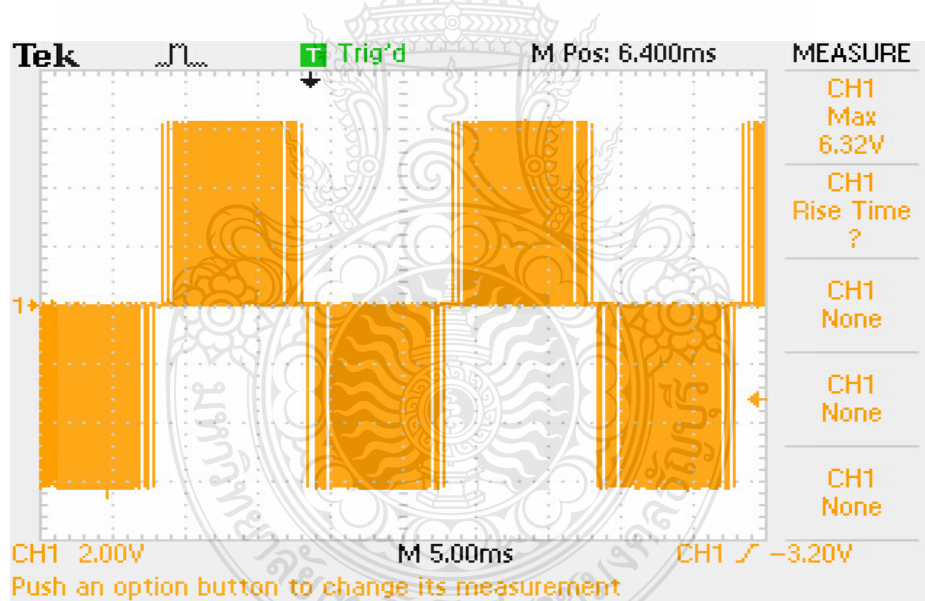
$$V_{dc} = \sqrt{2} \times V_s \quad (4.1)$$

$$V_{dc} = \sqrt{2} \times 220 \quad (4.2)$$

$$V_{dc} = 311 \text{ โวลต์} \quad (4.3)$$



ภาพที่ 4.3 แรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์จากโปรแกรม



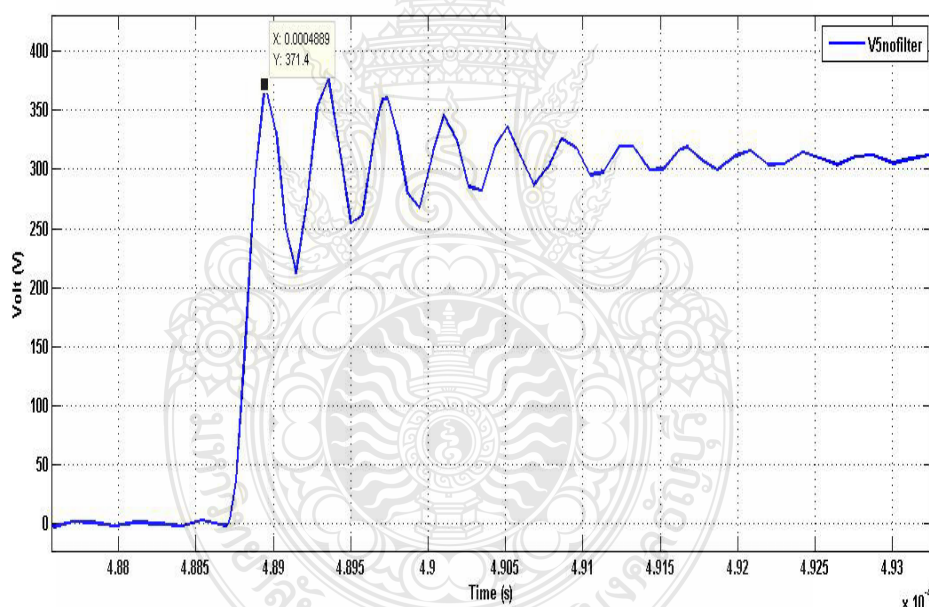
ภาพที่ 4.4 แรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์จากฮาร์ดแวร์

จากภาพที่ 4.3 เป็นแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ที่ทำงานแบบ PWM ซึ่งมีแรงดันโดยประมาณ 315 V เทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่บัสไฟตรงโดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลอง จากภาพที่ 4.4 เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์จริงโดยสามารถอ่านค่าได้จากออสซิลโลสโคปประมาณ 316 V (โดยตั้งค่าออสซิลโลสโคปเท่ากับ 2 V/Div และคิฟเฟอเรน

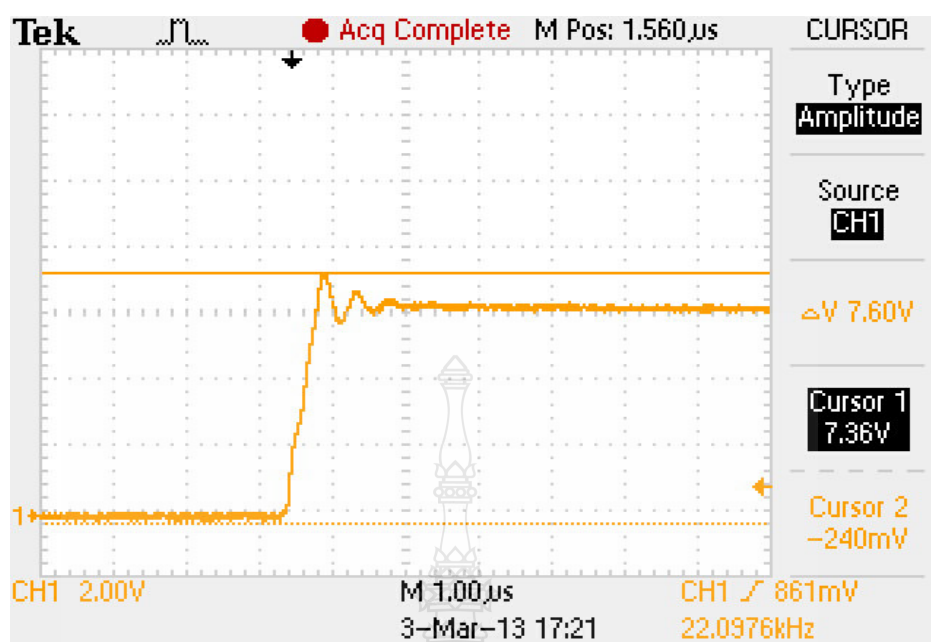
เซิล โพรบมีตัวคูณแอมป์เตอร์เท่ากับ 25) ซึ่งจะมีค่าแรงดันใกล้เคียงกับแรงดันที่บัสไฟตรงของอินเวอร์เตอร์

4.3 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ก่อนติดตั้งวงจรฟิลเตอร์

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอถึงผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะที่เกิดขึ้นที่ขั้วมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟสที่ใช้ในอุตสาหกรรมที่มีสายเคเบิลยาว โดยสามารถแบ่งออกเป็นผลการจำลองในกรณีที่ไม่มีวงจรฟิลเตอร์และมีวงจรฟิลเตอร์เพื่อลดทอนปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งจะใช้สายเคเบิลในการจำลองมีความยาวที่ 5 10 และ 15 เมตร จะจำลองลงในโปรแกรม MATLAB เปรียบเทียบกับการใช้อุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดแวร์วิเคราะห์และศึกษาปัญหาเพื่อนำไปออกแบบวงจรลดทอนแรงดันที่ใช้ในการจำลอง

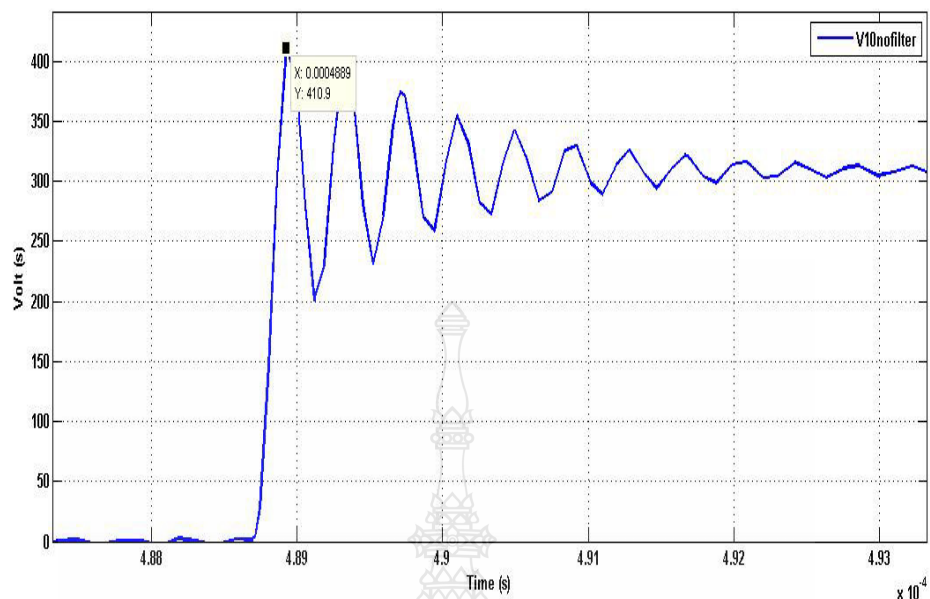


ภาพที่ 4.5 แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 5 เมตรจากโปรแกรม MATLAB

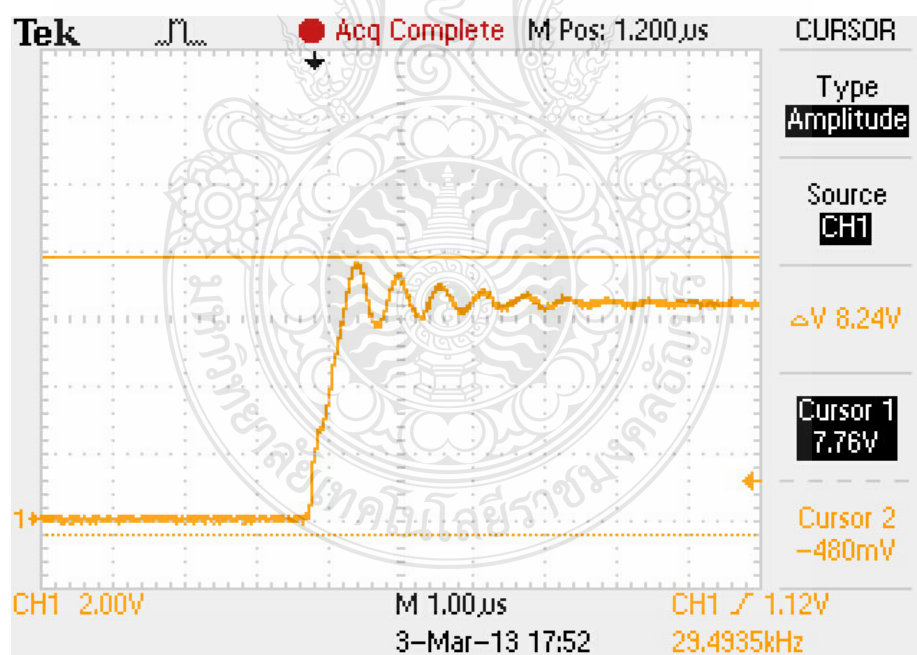


ภาพที่ 4.6 แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 5 เมตรจากฮาร์ดแวร์

ภาพที่ 4.5 และ ภาพที่ 4.6 แสดงลักษณะแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์เมื่อสายเคเบิลมีความยาว 5 เมตร ซึ่งค่าแรงดันจากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB สามารถอ่านค่าได้เท่ากับ 370 V และจากการจำลองทางด้านฮาร์ดแวร์สามารถอ่านค่าได้เท่ากับ 380 V โดยตั้งย่านการวัดของออสซิลโลสโคปไว้ที่ 2 V/Div และดิฟเฟอเรนเชียลโพรบมีตัวคูณอยู่ที่ 25 จากการเปรียบเทียบพบว่าแรงดันไฟฟ้าเกินสูงสุดที่ขั้วมอเตอร์มีค่าของแรงดันใกล้เคียงกัน ซึ่งการจำลองในวิทยานิพนธ์นี้จะมีลักษณะการจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะไม่มีโหลดทั้งในตัวโปรแกรม MATLAB และการจำลองทางฮาร์ดแวร์

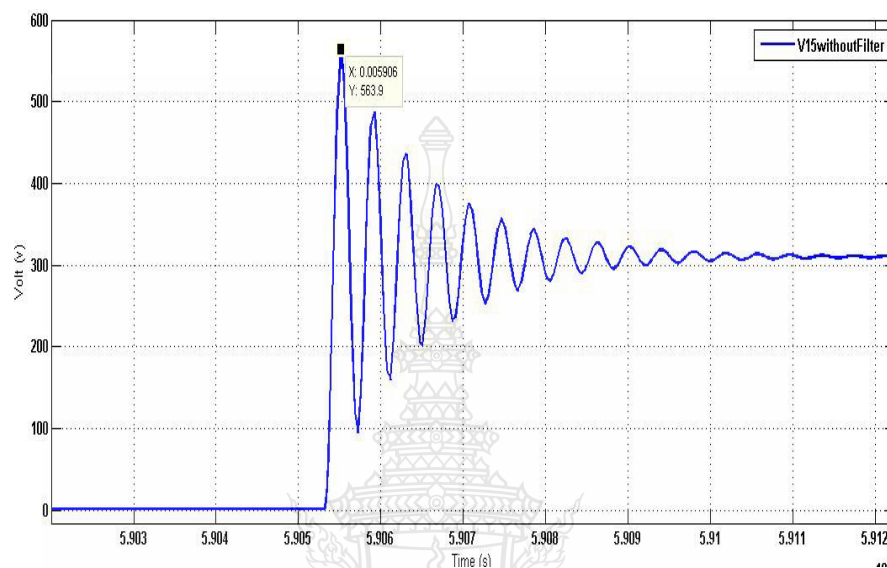


ภาพที่ 4.7 แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 10 เมตรจากโปรแกรม MATLAB

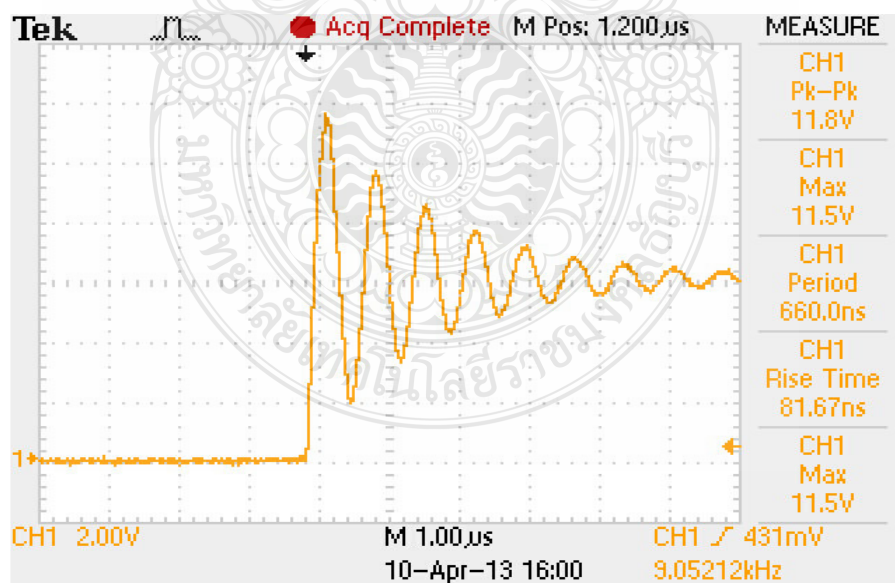


ภาพที่ 4.8 แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 10 เมตรจากฮาร์ดแวร์

จากภาพที่ 4.7 และ 4.8 แสดงแรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะของสายเคเบิลยาวเท่ากับ 10 เมตร โดยผลของการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB สามารถอ่านค่าแรงดันได้ 410 V และจากผลการจำลองทางด้านฮาร์ดแวร์สามารถอ่านค่าได้ 388 V



ภาพที่ 4.9 แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 15 เมตรจากโปรแกรม MATLAB



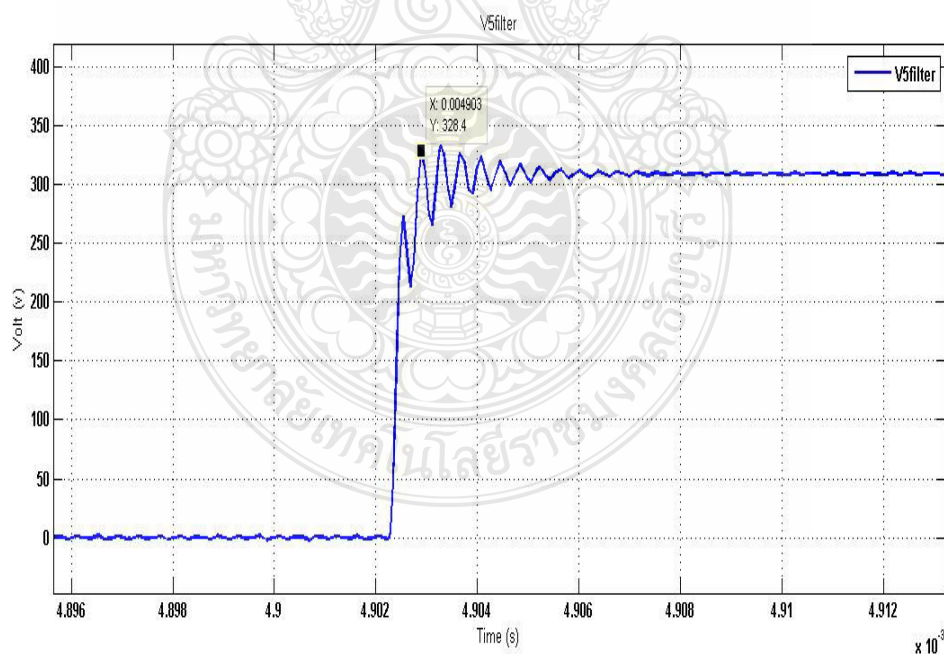
ภาพที่ 4.10 แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 15 เมตรจากฮาร์ดแวร์

จากภาพที่ 4.10 และภาพที่ 4.11 เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 15 เมตร โดยจากการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB สามารถอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของมอเตอร์ได้ 564 V และจากการจำลองผลด้วยฮาร์ดแวร์สามารถอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของมอเตอร์ได้เท่ากับ 575 V

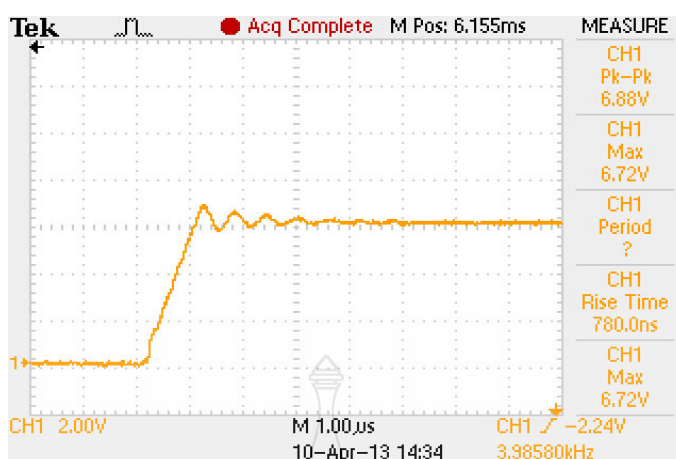
จากการจำลองผลของแรงดันเกินชั่วขณะที่ขั้วของมอเตอร์ขณะยังไม่ได้ติดตั้งวงจรฟิลเตอร์พบว่าแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นตามความยาวของสายเคเบิล และจากการเปรียบเทียบแรงดันระหว่างการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB และด้วยฮาร์ดแวร์จะพบว่าแรงดันมีลักษณะใกล้เคียงกันเพื่อเป็นการยืนยันความแม่นยำของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

4.4 ผลการจำลองแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์หลังติดตั้งวงจรฟิลเตอร์

ในการลดทอนปัญหาแรงดันไฟฟ้าเกินในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วงจรฟิลเตอร์ชนิดพาสซีฟเข้ามาช่วยลดทอนปัญหาโดยจะประกอบด้วย Inductor และ Capacitor เป็นอุปกรณ์หลักในวงจรโดยอาศัยหลักการคัตออฟแรงดันช่วงความถี่ที่เกิดปัญหาออกไปดังสมการที่ 3.14 ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบแรงดันระหว่างโปรแกรม MATLAB และอุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดแวร์

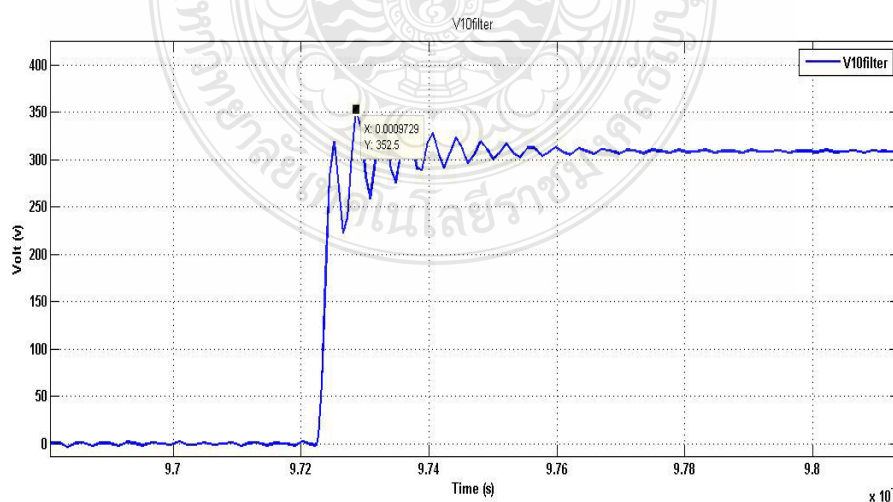


ภาพที่ 4.11 แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 5 เมตรจากโปรแกรม MATLAB

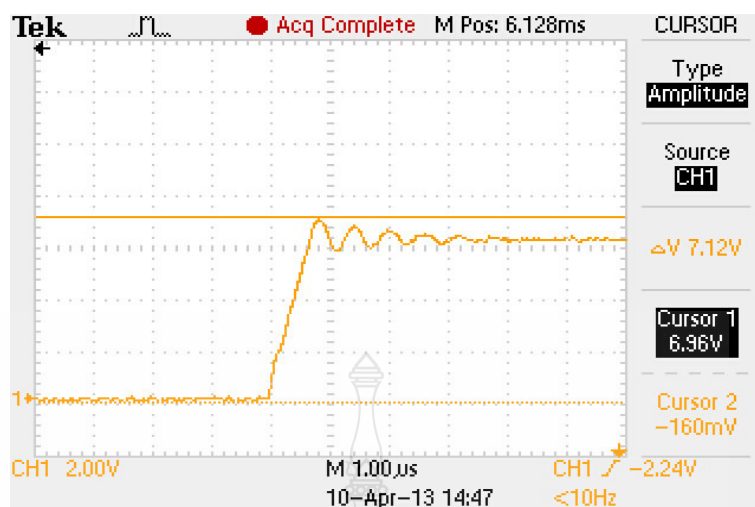


ภาพที่ 4.12 แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 5 เมตรจากฮาร์ดแวร์

จากภาพที่ 4.12 และ 4.13 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของมอเตอร์เหนี่ยวนำหลังจากทำการติดตั้งวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ในการลดทอนปัญหาแรงดันเกินชั่วขณะที่ความยาวของสายเคเบิลมีความยาว 5 เมตร ซึ่งจากการจำลองผลโดยโปรแกรม MATLAB สามารถอ่านค่าแรงดันได้ 329 V และจากการจำลองทางด้านฮาร์ดแวร์หลังติดตั้งวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์สามารถอ่านค่าได้ 335 V โดยมีการปรับตั้งค่าออสซิลโลสโคปไว้ 2 V/Div และตัวคูณของดิฟเฟอเรนเชียลโพรบมีค่าเท่ากับ 25 จากการเปรียบเทียบพบว่าแรงดันไฟฟ้าเกินสูงสุดที่ขั้วมอเตอร์มีค่าของแรงดันใกล้เคียงกัน ซึ่งการจำลองในวิทยานิพนธ์นี้จะมีลักษณะการจำลองมอเตอร์เหนี่ยวนำในสถานะไม่มีโหลดทั้งในตัวโปรแกรม MATLAB และการจำลองทางฮาร์ดแวร์

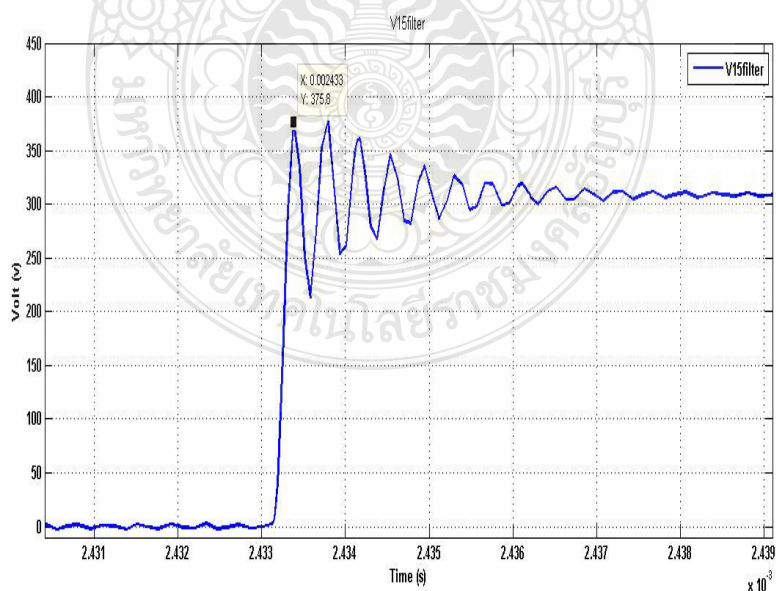


ภาพที่ 4.13 แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 10 เมตรจากโปรแกรม MATLAB

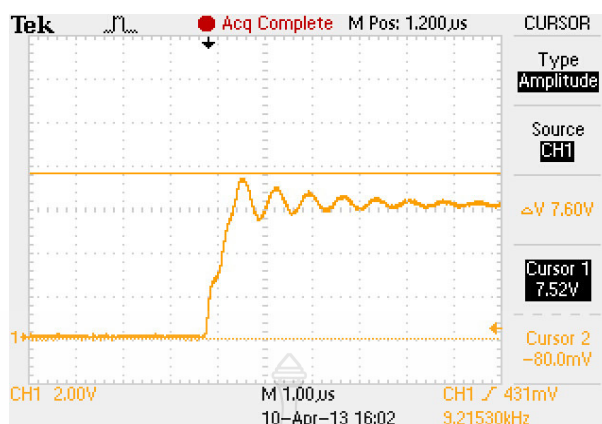


ภาพที่ 4.14 แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 10 เมตรจากฮาร์ดแวร์

จากภาพที่ 4.13 และ 4.14 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของมอเตอร์เหนี่ยวนำหลังจากทำการติดตั้งวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ในการลดทอนปัญหาแรงดันเกินชั่วขณะที่ความยาวของสายเคเบิลมีความยาว 10 เมตร ซึ่งจากการจำลองผลโดยโปรแกรม MATLAB สามารถอ่านค่าแรงดันได้ 350 V และจากการจำลองทางด้านฮาร์ดแวร์หลังติดตั้งวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์สามารถอ่านค่าได้ 356 V โดยมีค่าปรับตั้งค่าออสซิลโลสโคปไว้ 2 V/Div และตัวคูณของดิฟเฟอเรนเชียลโพรบมีค่าเท่ากับ 25



ภาพที่ 4.15 แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 15 เมตรจากโปรแกรม MATLAB



ภาพที่ 4.16 แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีระยะสายเคเบิล 15 เมตรจากฮาร์ดแวร์

จากภาพที่ 4.15 และ 4.16 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของมอเตอร์เหนียวหลังจากทำการติดตั้งวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ในการลดทอนปัญหาแรงดันเกินชั่วขณะที่มีความยาวของสายเคเบิลมีความยาว 10 เมตร ซึ่งจากการจำลองผลโดยโปรแกรม MATLAB สามารถอ่านค่าแรงดันได้ 372 V และจากการจำลองทางด้านฮาร์ดแวร์หลังติดตั้งวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์สามารถอ่านค่าได้ 376 V โดยมีการปรับตั้งค่าออสซิลโลสโคปไว้ 2 V/Div และตัวคูณของดิฟเฟอเรนเชียลโพรบมีค่าเท่ากับ 25

4.5 สรุปผลการจำลอง

จากผลการจำลองในข้างต้นจะพบว่าค่าแรงดันเกินที่ขั้วมอเตอร์มีค่าสูงขึ้นตามระยะของสายเคเบิล ซึ่งเป็นองค์ประกอบของการเปลี่ยนแปลงแรงดันต่อเวลาตามความถี่สวิตซ์ซิ่งของอินเวอร์เตอร์ โดยมีค่าอิมพีแดนซ์เป็นตัวส่งผลโดยตรงต่อปัญหาดังกล่าว ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แสดงถึงการเกิดปัญหาโดยใช้การจำลองทางโปรแกรม MATLAB ซึ่งแบ่งการจำลองเป็นการจำลองในเงื่อนไขที่ยังไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์พาสซีฟฟิลเตอร์ในการลดทอนปัญหา จะแบ่งสายเคเบิลออกเป็น 3 ระยะคือ 5 10 และ 15 เมตร เมื่อทราบค่าแรงดันในสถานะยังไม่ได้ป้องกันแล้วได้ทำการติดตั้งวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์เพื่อใช้ในการลดทอน โดยเก็บผลการจำลองตามระยะสายเคเบิลตามข้างต้นเมื่อทำการจำลองทางโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว จะทำการเปรียบเทียบผลของการจำลองปัญหา และการแก้ไขกับอุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดแวร์ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ฮาร์ดแวร์ที่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมโดยทำการจำลองปัญหาทั้งก่อนติดตั้งและหลังติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟฟิลเตอร์เพื่อนำผลที่ได้มาเทียบกับผลของโปรแกรม MATLAB

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย การอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ และออกแบบการลดทอนปัญหาการเกิดแรงดันไฟฟ้าเกิน ที่ขั้วของมอเตอร์เหนี่ยวนำซึ่งส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อมอเตอร์ เพราะเกิดแรงดันเกินกว่าที่ฉนวนของมอเตอร์รับได้ เมื่อนานเข้าจะทำให้ฉนวนของมอเตอร์มีความเสียหาย และเนื่องจากสภาวะการเกิดแรงดันเกินยังส่งผลทำให้เกิดกระแสชอร์ตประจุไฟฟ้า เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของสายส่งผลให้อุณหภูมิภายในอินเวอร์เตอร์มีค่าสูง และอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออินเวอร์เตอร์ได้

การจำลองในโปรแกรม MATLAB จะทำการเปรียบเทียบแบบจำลองที่มีสายเคเบิลยาวซึ่งในแบบการจำลองจะใช้อินเวอร์เตอร์และมอเตอร์ขนาด 400 W 200 V 3 เฟส 2 A ใช้สายเคเบิลขนาด 2.5 mm. ยาว 5 เมตร 10 เมตร และ 15 เมตร ตามลำดับ โดยใช้ LCR Meter ในการเข้ามาช่วยในการหาค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ในการจำลองซึ่งจะมีรูปแบบของการจำลองแบ่งเป็นก่อนติดตั้งวงจรฟิลเตอร์และหลังติดตั้งวงจรฟิลเตอร์ นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบการจำลองด้วยฮาร์ดแวร์จริงที่ใช้ในอุตสาหกรรมโดยมีเงื่อนไขในการจำลองลักษณะเดียวกันกับการจำลองทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการจำลองผลของแรงดันไฟฟ้าเกินที่ขั้วมอเตอร์พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขั้วมอเตอร์มีลักษณะเป็นเซิร์จแรงดันขึ้นอาจมีค่าถึงสองเท่าของแรงดันไฟฟ้าที่ DC Link และปริมาณแรงดันที่เกิดขึ้นมีนัยสำคัญกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลเนื่องจาก โดยปกติอุปกรณ์ทางด้านอินเวอร์เตอร์และสายเคเบิลพร้อมมอเตอร์มีการเกิดแรงดันคอมมอน โหมดโดยเฉพาะถ้าสายเคเบิลมีระยะทางที่ยาวจะมีอิมพีแดนซ์สายประจุสร้างแรงดันเกินขึ้นมาดังแสดงได้จากการจำลองในช่วงต้นในการออกแบบการทดลองนี้ยังพบว่าความถี่ก็เป็นปัจจัยสำคัญเช่นกัน

ผลการจำลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ในสภาวะก่อนการติดตั้งวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ในการลดทอนปัญหา โดยทำการเปรียบเทียบแรงดันที่เกิดขึ้นที่ขั้วของมอเตอร์ระหว่างการใส่โปรแกรมคอมพิวเตอร์และการวัดค่าจริงจากอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการจำลองในระยะสายเคเบิลยาว 5 เมตร ด้วยโปรแกรมมีค่าเท่ากับ 370 V จากฮาร์ดแวร์มีค่าเท่ากับ 380 V ในระยะสายเคเบิลยาว 10 เมตร การจำลองทางด้านโปรแกรมมีค่าเท่ากับ 410 V จากฮาร์ดแวร์มีค่าเท่ากับ 388 V และการจำลองในระยะสายเคเบิลมีความยาว 15 เมตร ด้วยโปรแกรมมีค่าเท่ากับ

564 V และจากการจำลองด้วยอุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดแวร์มีค่าเท่ากับ 575 V จากผลการจำลองดังกล่าว จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันระหว่างโปรแกรมและฮาร์ดแวร์มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีอัตราแรงดันต่างกันไม่เกินร้อยละ 10 ของแรงดันทั้งสอง

ผลการจำลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ในสภาวะหลังการติดตั้งวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ในการลดทอนปัญหา เมื่อได้ค่าแรงดันจากกรณีการจำลองขณะก่อนติดตั้งวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ได้มีการนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของวงจรพาสซีฟฟิลเตอร์ที่ยอมรับให้ความถี่ต่ำกว่าความถี่คัทออฟผ่านไปได้ โดยจะประกอบด้วยค่าของตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าเท่ากับ 0.056 mH และค่าของตัวเก็บประจุ 4.7 nF และนำมาติดตั้งทางด้านแรงดันด้านออกของอินเวอร์เตอร์ในระยะเวลาที่สายเคเบิลมีความยาวเท่ากับ 5 เมตรจากโปรแกรมสามารถอ่านค่าได้ 329 V จากการจำลองด้วยอุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดแวร์อ่านค่าได้ 335 V ที่ความยาวของสายเคเบิลเท่ากับ 10 เมตร จากการจำลองทางโปรแกรมสามารถวัดค่าได้ 350 V จากการจำลองด้วยอุปกรณ์ทางด้านฮาร์ดแวร์สามารถอ่านค่าได้ 356 V และที่ความยาวสายเคเบิลมีค่าเท่ากับ 15 เมตร จากการจำลองด้วยโปรแกรมสามารถวัดค่าได้ 372 V และจากการจำลองผลด้วยฮาร์ดแวร์สามารถวัดค่าได้ 376 V ค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าทั้งสองการจำลองมีค่าไม่เกินร้อยละ 10 จะเห็นได้ว่าจากการจำลองเมื่อติดตั้งวงจรกรองแบบพาสซีฟฟิลเตอร์จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเกินชั่วขณะที่ขั้วของมอเตอร์มีค่าลดลงสูงสุดถึงร้อยละ 65

เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการแก้ปัญหาต่อไปควรมีการศึกษาวงจรกรองชนิดอื่น ๆ และเก็บข้อมูลจากหน้างานจริง เพราะสภาวะงานจริงจะมีค่าตัวแปรอื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ระบบกราวด์ เป็นต้น หรืออาจทำการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบวิธีการแก้ปัญหากระหว่างการแก้ด้วยวงจรกรองหรือการแก้ด้วยเทคนิคควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ว่าอย่างไรเหมาะสมกับการใช้มากกว่ากันทั้งทางด้านทางเศรษฐศาสตร์ และผลลัพธ์ที่ยอมรับได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ส่วนของการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB จำเป็นต้องใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดฮาร์ดแวร์ที่มีค่าค่อนข้างแม่นยำเพื่อเวลาจำลองเปรียบเทียบกันจะได้มีค่าความผิดพลาดที่ต่ำที่สุด

5.2.2 ส่วนของฮาร์ดแวร์เครื่องมือวัดจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดที่ทนแรงดันได้สูงเนื่องจากสภาวะชั่วขณะของแรงดันมีค่าสูง

5.2.3 การค้นคว้าหาข้อมูลในการทำวิจัยส่วนใหญ่จะมีแต่บทความจากต่างประเทศจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ข้อมูลให้ละเอียดและเช็คอุปกรณ์ในประเทศของเราว่าแตกต่างกันอย่างไร

5.2.4 การพัฒนาต่อออกควรรหาอุปกรณ์และเซตอุปกรณ์ที่ใช้ขนาดใดเนื่องจากยกตัวอย่าง เช่น สายไฟถ้ามีการเปรียบเทียบควรจะวัดค่าต่างๆที่ความยาวนั้นให้ครบก่อนไม่เช่นนั้นอาจต้องหาใหม่และจะสิ้นเปลืองงบประมาณ

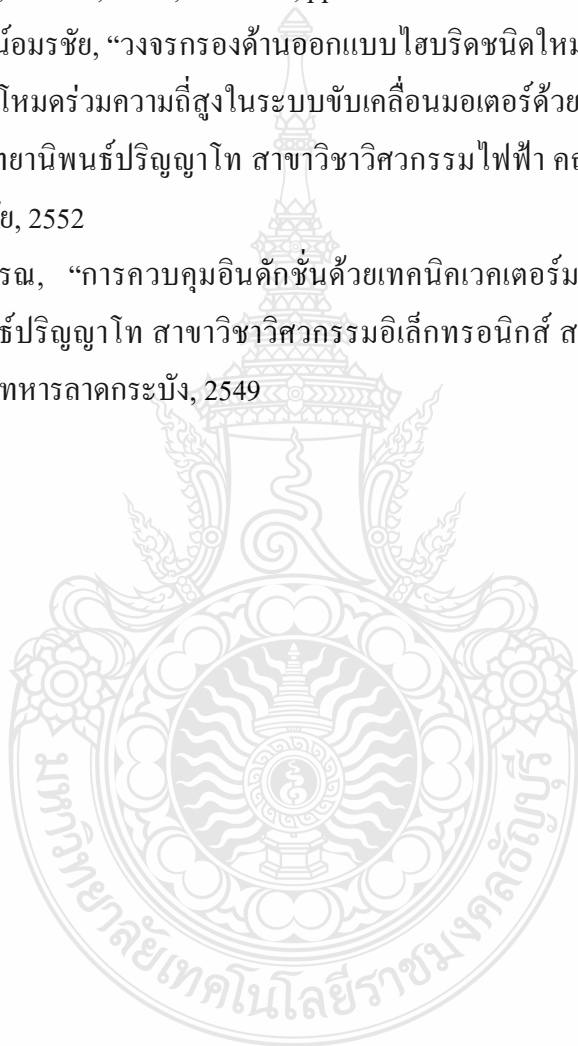
5.2.5 ในปัจจุบันได้มีการกำหนดมาตรฐานของแรงดันไฟฟ้าเกินของแต่ละอุปกรณ์ไฟฟ้าขึ้นมาควรจะนำข้อมูลทางด้านนี้มาประกอบการวิจัยด้วย



รายการอ้างอิง

- [1] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และวุฒิพล ชาราธิ์เศรษฐ์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง. ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: หจก. วี.เจ. พรินติ้ง, 2547. หน้า 9, 327.
- [2] S. Amarir, and K. Al-Haddad, “A Modeling Technique to Analyze the Impact of Inverter Supply Voltage and Cable Length on Industrial Motor-Drives” , IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23, No. 2, March 2008, pp. 753-762.
- [3] M. Saito, T. Shimizu, and M. Nakamura, “A Novel Motor Surge Voltage Suppression Method with Surge Energy Regeneration”, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Sep 2009, pp. 1309-1316.
- [4] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และคณะ, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, หจก. วี.เจ. พรินติ้ง, 2547. หน้า 424-455.
- [5] T. Shimizu, M. Saito, and M. Nakamura, “Calculation of Motor Surge Voltage under the use of a Surge Suppression Cable”, 13th European Conference on Power Electronics and Application, Sep 2009, pp. 1-10.
- [6] N. Aoki, K. Satoh, and A. Nabae, “Damping Circuit of Suppress Motor Terminal Overvoltage and Ringing in PWM Inverter-Fed AC Motor Drive Systems with Long Motor Leads”, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 35, No. 5, September/October 1999, pp. 1014-1020.
- [7] B. Basavaraja, and D.V.S.S.Siva Sarma, “Application problem of PWM AC drives due to long cable length and high dv/dt”, International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, Dec 2006, pp. 1-6.
- [8] A.V. Jouanne, D. A. Rendusara, P. N. Enjeti, and J.W. Gray, “Filtering Techniques to Minimize the Effect of Long Motor Leads on PWM Inverter-Fed AC Motor Drive Systems”, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 32, No. 4, July/August 1996, pp. 919-926.
- [9] K. Obata, and R. Takeuchi, “Methods to Decrease Turn-to-Turn Voltage of Motors Fed by Inverter Drives”, IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 2007, pp. 1-4.

- [10] B. Basavaraja, and D.V.S.S.Siva Sarma, “Modeling, Simulation and Experimental Analysis of Transient Terminal Over voltage in PWM-Inverter fed Induction Motors”, IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 2007, pp. 1-8.
- [11] J. Liu, P. Pillay, and H. Douglas, “Wavelet Modeling of Motor Drives Applied to the Calculation of Motor Terminal Overvoltages”, IEEE Transactions on Industry Electronics, Vol. 51, No. 1, Feb 2004, pp. 61-66.
- [12] เพ็ญภา ไพโรจน์อมรชัย, “วงจรกรองด้านออกแบบไฮบริดชนิดใหม่สำหรับลดทอนผลกระทบจากแรงดันโหมคร่วมความถี่สูงในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอินเวอร์เตอร์แบบพีดับเบิลยูเอ็ม”, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552
- [13] ประสูติ เดชสุวรรณ, “การควบคุมอินดักชันด้วยเทคนิคเวกเตอร์มอดดูเลชัน โดยใช้ FPGA”, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549





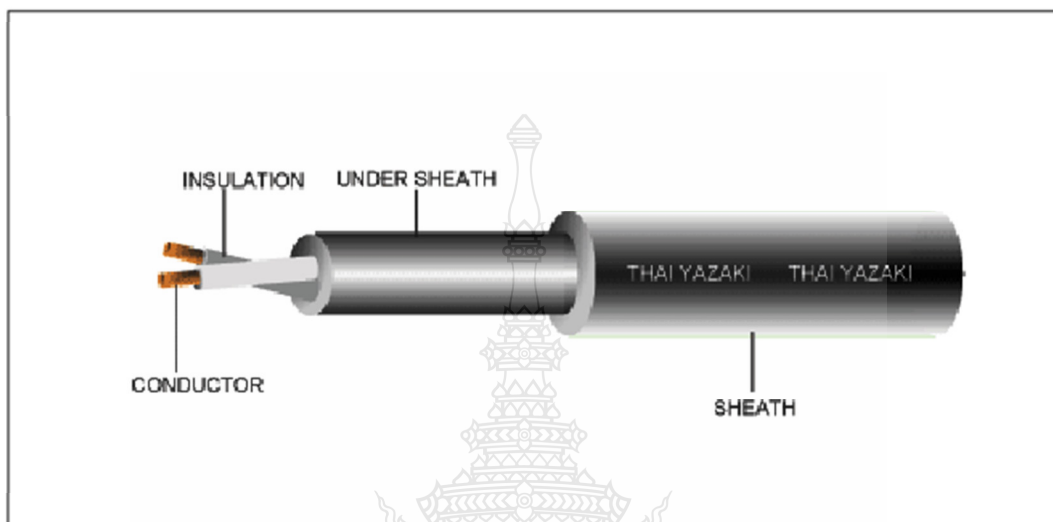


ภาคผนวก ก
ข้อมูลอุปกรณ์การทดลอง

๑.1 Thai-Yazaki NYY, MEA TYPE C

NYY, MEA TYPE C

750 V 70 °C PVC INSULATED AND DOUBLE SHEATHED ROUND TYPE



CABLE STRUCTURE

NUMBER OF CORE CONDUCTOR	: Up to 4 cores
	: Solid and stranded annealed copper, sizes 1 mm ² up to 500 mm ²
	: Multi core 1 mm ² up to 300 mm ²
INSULATION	: PVC
	Color: Single core – Black
	2 cores – Light gray and Black
	3 cores – Light gray, Black and Red
	4 cores – Light gray, Black, Red and Blue
SHEATH	: PVC
	Color: Black
CLASSIFICATION	: Maximum conductor temperature 70 °C
	Circuit voltage not exceeding 750 volts
TESTING VOLTAGE	: 2,500 volts
REFERENCE	: TIS 11 Table 6 (Single core)
	: TIS 11 -2531, Table 7 (Multi core)

NYY, MEA TYPE C (SINGLE CORE)

TIS 11-2531
TABLE 6

Nominal Cross Sectional area (mm ²)	Number and diameter of wire (No./mm)	Insulation thickness (mm)	Sheath thickness (mm)	Max. Overall diameter (mm)	Minimum insulation resistance at 70 °C (MΩ-Km)	Maximum continuous current rating in free air (Ampere)		Cable weight (approx.) (Kg/Km)	Standard length (m)
						Free air	Under air		
1	1 / 1.13	1.5	1.8	8.6	0.0207	17	22	80	100/C
1	7 / 0.43	1.5	1.8	8.8	0.0200	17	22	80	100/C
1.5	1 / 1.38	1.5	1.8	9.0	0.0184	21	27	85	100/C
1.5	7 / 0.53	1.5	1.8	9.2	0.0175	21	27	90	100/C
2.5	1 / 1.78	1.5	1.8	9.4	0.0157	28	36	100	100/C
2.5	7 / 0.67	1.5	1.8	9.8	0.0146	28	36	110	100/C
4	1 / 2.25	1.5	1.8	10.0	0.0135	38	47	120	100/C
4	7 / 0.85	1.5	1.8	10.5	0.0124	38	47	130	100/C
6	7 / 1.04	1.5	1.8	11.0	0.0107	49	60	160	100/C
10	7 / 1.35	1.5	1.8	12.0	0.0088	67	81	210	500/D
16	7 / 1.70	1.5	1.8	13.0	0.0074	89	105	280	500/D
25	7 / 2.14	1.5	1.8	14.5	0.0061	118	136	390	500/D
35	19 / 1.53	1.5	1.8	16.0	0.0053	146	165	490	500/D
50	19 / 1.78	1.5	1.8	17.0	0.0046	177	196	600	500/D
70	19 / 2.14	1.5	1.8	19.0	0.0039	222	241	850	500/D
95	19 / 2.52	1.7	1.8	21.5	0.0038	274	289	1,100	500/D
120	37 / 2.03	1.7	1.8	23.0	0.0034	318	330	1,400	500/D
150	37 / 2.25	1.9	2.0	26.0	0.0034	362	370	1,700	500/D
185	37 / 2.52	2.1	2.0	28.0	0.0034	416	419	2,100	500/D
240	61 / 2.25	2.3	2.2	31.5	0.0033	492	486	2,700	500/D
300	61 / 2.52	2.5	2.2	35.0	0.0032	565	551	3,400	500/D
400	61 / 2.85	2.7	2.2	38.5	0.0030	655	629	4,300	500/D
500	61 / 3.20	3.1	2.4	43.0	0.0031	757	717	5,400	500/D

TISI Permitted to increase the maximum overall diameter by 5 %
C: Packing in coil.
D: Packing in drum.

NYY, MEA TYPE C

TIS 11-2531
TABLE 7

Number of core	Nominal Cross Section area (mm ²)	Number and diameter of wire (No./mm)	Insulation thickness (mm)	Under sheath thickness (mm)	Sheath thickness (mm)	Max. overall diameter (mm)	Minimum insulation resistance at 70 °C (M Ω -Km)	Maximum continuous current rating in free air (Ampere)		Cable weight (approx.) (Kg/Km)	Standard length (m)
								Free air	Under ground		
2	1	1 / 1.13	0.8	0.8	1.8	12.0	0.0141	15	21	160	100/C
	1	7 / 0.43	0.8	0.8	1.8	12.5	0.0135	15	21	160	100/C
	1.5	1 / 1.38	0.8	0.8	1.8	12.5	0.0123	19	27	170	100/C
	1.5	7 / 0.53	0.8	0.8	1.8	13.0	0.0116	19	27	190	100/C
	2.5	1 / 1.78	0.8	0.8	1.8	13.5	0.0102	25	35	210	100/C
	2.5	7 / 0.67	0.8	0.8	1.8	14.0	0.0093	25	35	230	100/C
	4	1 / 2.25	0.9	0.8	1.8	15.0	0.0094	33	47	270	100/C
	4	7 / 0.85	0.9	0.8	1.8	15.5	0.0085	33	47	290	100/C
	6	7 / 1.04	0.9	0.8	1.8	17.0	0.0073	43	60	360	100/C
	10	7 / 1.35	1.1	0.8	1.8	19.5	0.0069	60	81	550	500/D
	16	7 / 1.70	1.1	0.8	2.0	22.5	0.0057	80	105	700	500/D
	25	7 / 2.14	1.3	1.2	2.0	27.0	0.0054	106	136	1,100	500/D
	35	19 / 1.53	1.3	1.2	2.0	29.5	0.0047	130	165	1,400	500/D
	50	19 / 1.78	1.5	1.2	2.2	33.5	0.0046	157	196	1,800	500/D
	70	19 / 2.14	1.5	1.5	2.2	38.0	0.0039	195	240	2,400	500/D
	95	19 / 2.52	1.7	1.5	2.2	42.5	0.0038	239	290	3,200	500/D
	120	37 / 2.03	1.7	1.5	2.4	46.5	0.0034	280	332	3,900	500/D
	150	37 / 2.25	1.9	1.8	2.6	52.0	0.0034	320	370	4,800	500/D
185	37 / 2.52	2.1	1.8	2.8	57.0	0.0034	370	419	6,000	500/D	
240	61 / 2.25	2.3	2.0	3.0	64.0	0.0033	440	484	7,500	500/D	
300	61 / 2.52	2.5	2.0	3.2	70.5	0.0032	507	547	9,500	500/D	
3	1	1 / 1.13	0.8	0.8	1.8	12.5	0.0141	12	18	180	100/C
	1	7 / 0.43	0.8	0.8	1.8	13.0	0.0135	12	18	180	100/C
	1.5	1 / 1.38	0.8	0.8	1.8	13.0	0.0123	16	22	200	100/C
	1.5	7 / 0.53	0.8	0.8	1.8	13.5	0.0116	16	22	210	100/C
	2.5	1 / 1.78	0.8	0.8	1.8	14.0	0.0102	21	30	240	100/C
	2.5	7 / 0.67	0.8	0.8	1.8	15.0	0.0093	21	30	260	100/C
	4	1 / 2.25	0.9	0.8	1.8	15.5	0.0094	28	39	320	100/C
	4	7 / 0.85	0.9	0.8	1.8	16.5	0.0085	28	39	350	100/C
	6	7 / 1.04	0.9	0.8	1.8	18.0	0.0073	37	50	440	100/C
	10	7 / 1.35	1.1	0.8	1.8	20.5	0.0069	50	68	650	500/D
	16	7 / 1.70	1.1	1.2	2.0	24.5	0.0057	67	87	950	500/D
	25	7 / 2.14	1.3	1.2	2.0	28.5	0.0054	89	113	1,400	500/D
	35	19 / 1.53	1.3	1.2	2.0	31.5	0.0047	109	137	1,700	500/D
	50	19 / 1.78	1.5	1.5	2.2	36.0	0.0046	131	162	2,300	500/D
	70	19 / 2.14	1.5	1.5	2.2	40.5	0.0039	163	200	3,100	500/D
	95	19 / 2.52	1.7	1.5	2.4	46.0	0.0038	202	240	4,200	500/D
	120	37 / 2.03	1.7	1.8	2.6	50.5	0.0034	235	273	5,000	500/D
	150	37 / 2.25	1.9	1.8	2.8	56.0	0.0034	269	306	6,500	500/D
185	37 / 2.52	2.1	2.0	3.0	61.5	0.0034	311	346	8,000	500/D	
240	61 / 2.25	2.3	2.0	3.2	69.0	0.0033	371	402	10,000	500/D	
300	61 / 2.52	2.5	2.2	3.4	76.0	0.0032	427	453	12,500	500/D	

NYY, MEA TYPE C

**TIS 11-2531
TABLE 7**

Number of core	Nominal Cross Sectional area (mm ²)	Number and diameter of wire (No./mm)	Insulation thickness (mm)	Under sheath thickness (mm)	Sheath thickness (mm)	Max. overall diameter (mm)	Minimum insulation resistance at 70 °C (MΩ-Km)	Maximum continuous current rating in free air (Ampere)		Cable weight (approx.) (Kg/Km)	Standard length (m)
								Free air	Under ground		
4	1	1 / 1.13	0.8	0.8	1.8	13.5	0.0141	11	16	200	100/C
	1	7 / 0.43	0.8	0.8	1.8	14.0	0.0135	11	16	210	100/C
	1.5	1 / 1.38	0.8	0.8	1.8	14.0	0.0123	14	20	230	100/C
	1.5	7 / 0.53	0.8	0.8	1.8	14.5	0.0116	14	20	240	100/C
	2.5	1 / 1.78	0.8	0.8	1.8	15.0	0.0102	19	27	290	100/C
	2.5	7 / 0.67	0.8	0.8	1.8	16.0	0.0093	19	27	310	100/C
	4	1 / 2.25	0.9	0.8	1.8	17.0	0.0094	25	35	390	100/C
	4	7 / 0.85	0.9	0.8	1.8	17.5	0.0085	25	35	410	100/C
	6	7 / 1.04	0.9	0.8	1.8	19.0	0.0073	33	45	550	500/D
	10	7 / 1.35	1.1	0.8	2.0	23.0	0.0069	45	60	800	500/D
	16	7 / 1.70	1.1	1.2	2.0	26.5	0.0057	60	77	1,100	500/D
	25	7 / 2.14	1.3	1.2	2.0	31.0	0.0054	79	100	1,700	500/D
	35	19 / 1.53	1.3	1.5	2.2	35.0	0.0047	97	120	2,200	500/D
	50	19 / 1.78	1.5	1.5	2.2	39.5	0.0046	117	144	2,900	500/D
	70	19 / 2.14	1.5	1.5	2.4	44.5	0.0039	147	176	4,000	500/D
	95	19 / 2.52	1.7	1.8	2.6	57.5	0.0038	182	211	5,500	500/D
	120	37 / 2.03	1.7	1.8	2.8	56.0	0.0034	213	241	6,500	500/D
	150	37 / 2.25	1.9	2.0	3.0	62.0	0.0034	243	270	8,000	500/D
	185	37 / 2.52	2.1	2.0	3.2	68.0	0.0034	282	306	10,000	500/D
	240	61 / 2.25	2.3	2.2	3.4	76.5	0.0033	335	354	13,000	500/D
300	61 / 2.52	2.5	2.2	3.8	85.0	0.0032	385	399	16,000	500/D	

TISI Permitted to increase the maximum overall diameter by 5 %

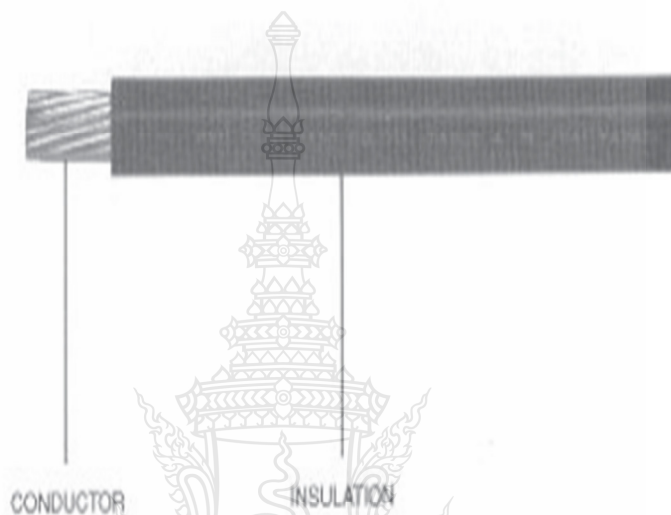
* REMARK : Special protection can be produced.

C: Packing in coil.

D: Packing in drum.

THW, MEA TYPE A

 TIS 11-2531
 Table 4

750 V 70° C PVC INSULATED, SINGLE CORE

CABLE STRUCTURE

CONDUCTOR	Solid and stranded annealed copper, sizes 0.5 mm ² up to 500 mm ²
INSULATION	PVC - Any colour
CLASSIFICATION	Maximum conductor temperature 70°C Circuit voltage not exceeding 750 volts
TESTING VOLTAGE	: 2,500 volts
REFERENCE	: TIS 11-2531, Table 4

Nominal cross sectional area (mm ²)	Number and diameter of wire (No./mm)	Insulation thickness (mm)	Overall diameter (mm)	Minimum insulation resistance at 70°C (MΩ-Km)	Maximum continuous current rating in free air (Ampere)	Cable weight (approx.) (Kg/Km)	Standard length (m)
0.5	1/0.80	0.0	3.0	0.0175	9	11	100/C
1	1/1.13	0.8	3.3	0.0141	13	17	100/C
1	7/0.40	0.0	3.5	0.0135	13	17	100/C
1.5	1/1.38	0.8	3.6	0.0123	17	22	100/C
1.5	7/0.50	0.8	3.8	0.0116	17	22	100/C
2.5	1/1.78	0.8	4.0	0.0102	23	31	100/C
2.5	7/0.67	0.8	4.3	0.0093	23	31	100/C
4	1/2.25	0.9	4.8	0.0094	32	50	100/C
4	7/0.85	0.9	5.2	0.0085	32	50	100/C
6	7/1.04	0.9	5.8	0.0073	43	75	100/C
10	7/1.35	1.1	7.2	0.0089	60	120	100/C
16	7/1.70	1.1	8.4	0.0057	83	180	100/C
25	7/2.14	1.3	10.5	0.0054	114	290	100/C
35	19/1.53	1.3	11.5	0.0047	141	380	100/C
50	19/1.78	1.5	13.5	0.0046	175	540	500/D
70	19/2.14	1.5	15.5	0.0039	221	720	500/D
95	19/2.52	1.7	18.0	0.0038	275	1,000	500/D
120	37/2.03	1.7	19.5	0.0034	321	1,240	500/D
150	37/2.25	1.9	21.5	0.0034	367	1,520	500/D
185	37/2.52	2.1	24.0	0.0034	424	1,900	500/D
240	61/2.25	2.3	27.0	0.0033	505	2,480	500/D
300	61/2.52	2.5	30.0	0.0032	581	3,100	500/D
400	61/2.85	2.7	33.5	0.0030	675	3,950	500/D
500	61/3.20	3.1	38.0	0.0031	781	5,150	500/D

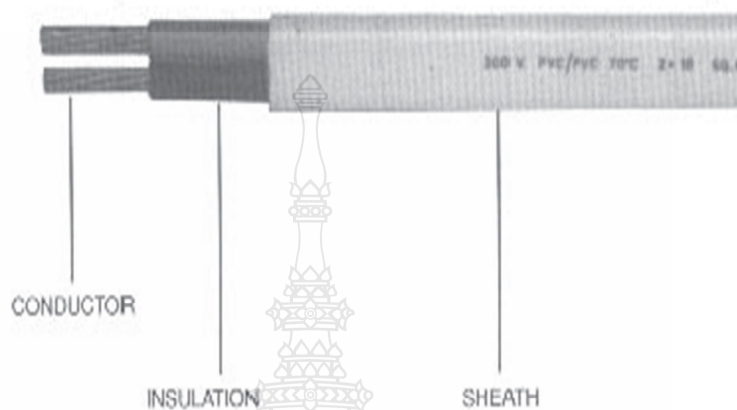
C : Packing in coil.

D : Packing in drum.

VAF

TIS 11-2531
Table

300 V 70°C PVC INSULATED AND SHEATHED FLAT TYPE

**CABLE STRUCTURE**

NUMBER OF CORE	:	2-3 cores
CONDUCTOR	:	Solid and stranded annealed copper sizes 0,5 mm ² up to 35 mm ² for 2-core and up to 16 mm ² for 3 cores
INSULATION	:	PVC Colour : 2 core-Light grey, Black 3 core-Light grey, Black, Red
SHEATH	:	PVC Colour : White
CLASSIFICATION	:	Maximum conductor temperature 70° C Circuit voltage not exceeding 300 volts
TESTING VOLTAGE	:	2,000 volts
REFERENCE	:	TIS 11-2531, Table 2

Number of core	Nominal cross sectional area (mm ²)	Number and diameter of wire (No./mm)	Insulation thickness (mm)	Sheath thickness (mm)	Overall diameter (mm)		Minimum insulation resistance at 70°C (MΩ-Km)	Maximum continuous current rating in free air (Ampere)	Cable weight (approx.) (Kg/Km)	Standard length (m)
					Lower Limit	Upper Limit				
2	0.5	1/0.80	0.6	0.9	3.6 x 5.6	4.4 x 6.8	0.0146	7	37	100/C
	1	1/1.13	0.6	0.9	4.0 x 6.2	4.8 x 7.4	0.0115	11	50	100/C
	1	7/0.40	0.6	0.9	4.6 x 6.4	5.0 x 7.8	0.0110	11	50	100/C
	1.5	1/1.38	0.6	1.2	4.8 x 7.2	5.8 x 8.6	0.0100	15	70	100/C
	1.5	7/0.50	0.6	1.2	4.9 x 7.4	6.0 x 9.2	0.0094	15	70	100/C
	2.5	1/1.78	0.7	1.2	5.4 x 8.4	6.4 x 10.0	0.0092	20	100	100/C
	2.5	7/0.67	0.7	1.2	5.6 x 8.8	6.8 x 10.5	0.0084	20	100	100/C
	4	1/2.25	0.8	1.2	6.0 x 9.8	7.2 x 11.5	0.0086	27	140	100/C
	4	7/0.85	0.8	1.2	6.2 x 10.0	7.6 x 12.0	0.0078	27	140	100/C
	6	7/1.04	0.8	1.2	6.8 x 11.0	8.2 x 13.5	0.0088	35	200	100/C
	10	7/1.35	0.9	1.2	8.0 x 13.5	9.4 x 16.0	0.0059	49	300	100/C
	16	7/1.70	1.0	1.2	9.2 x 16.0	11.0 x 18.5	0.0053	65	440	100/C
	25	7/2.14	1.2	1.4	11.0 x 19.5	13.0 x 22.5	0.0051	88	690	500/D
	35	19/1.53	1.2	1.4	12.0 x 22.0	14.5 x 25.0	0.0043	109	900	500/D
3	0.5	1/0.80	0.6	0.9	3.6 x 7.4	4.4 x 9.0	0.0146	6	50	100/C
	1	1/1.13	0.6	0.9	4.0 x 8.4	4.8 x 10.0	0.0115	9	70	100/C
	1	7/0.40	0.6	0.9	4.6 x 8.6	5.0 x 10.5	0.0110	9	70	100/C
	1.5	1/1.38	0.6	1.2	4.8 x 9.8	5.8 x 11.5	0.0100	12	100	100/C
	1.5	7/0.50	0.6	1.2	4.9 x 10.0	6.0 x 12.5	0.0094	12	100	100/C
	2.5	1/1.78	0.7	1.2	5.4 x 11.5	6.4 x 13.5	0.0082	16	150	100/C
	2.5	7/0.67	0.7	1.2	5.6 x 12.0	6.8 x 14.5	0.0084	16	150	100/C
	4	1/2.25	0.8	1.2	6.0 x 13.5	7.2 x 16.0	0.0086	22	210	100/C
	4	7/0.85	0.8	1.2	6.2 x 14.0	7.6 x 16.5	0.0078	22	210	100/C
	6	7/1.04	0.8	1.2	6.8 x 16.0	8.2 x 18.5	0.0086	29	300	100/C
	10	7/1.35	0.9	1.2	8.0 x 19.0	9.4 x 22.0	0.0059	40	450	500/D
	16	7/1.70	1.0	1.4	9.6 x 23.0	11.5 x 26.5	0.0053	53	680	500/D

TISI permitted to increase the maximum overall diameter by 5%

C : Packing in coil.

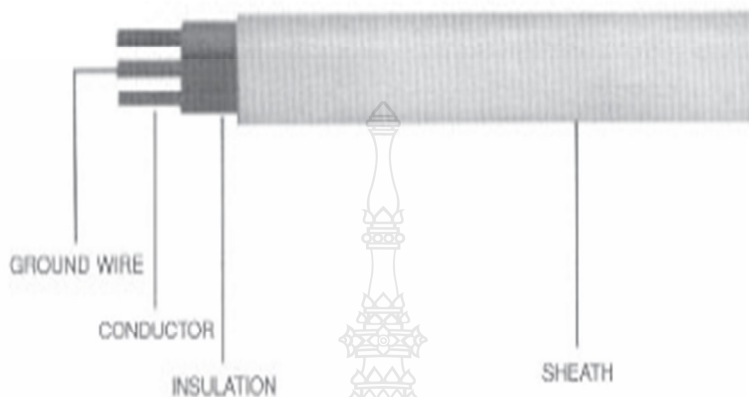
D : Packing in drum.

VAF-GRD



TIS 11-2531
Table 11

300 V 70°C PVC INSULATED AND SHEATHED FLAT TYPE, WITH GROUND



CABLE STRUCTURE

NUMBER OF CORE	2-3 cores with safety-ground
CONDUCTOR	Solid and stranded annealed copper, sizes 1 mm ² up to 35 mm ²
GROUND WIRE	Ground conductor sizes 1mm ² up to 10 mm ²
INSULATION	PVC Colour : 2 core-Light grey, Black 3 core-Light grey, Black, Red Ground core-Green/Yellow
SHEATH	PVC Colour : White
CLASSIFICATION	Maximum conductor temperature 70°C Circuit voltage not exceeding 300 volts
TESTING VOLTAGE	: 2,000 volts
REFERENCE	: TIS 11-2531, Table 11

Number of core	Nominal cross sectional area (mm ²)	Number and diameter of wire (No./mm)	Insulation thickness (mm)	Nominal cross sectional area of ground conductor (mm ²)	Ground insulation thickness (mm)	Sheath thickness (mm)	Overall diameter (mm)		Minimum insulation resistance at 70°C (MΩ-Km)	Maximum continuous current rating in free air (Ampere)	Cable weight (approx.) (Kg/Km)	Standard length (m)
							Lower Limit	Upper Limit				
2	1	1/1.13	0.6	1	0.6	0.9	4.0 x 8.4	4.8 x 10.0	0.0115	11	70	500/D
	1	7/0.40	0.6	1	0.6	0.9	4.0 x 8.6	5.0 x 10.5	0.0110	11	70	500/D
	1.5	1/1.38	0.6	1	0.6	1.2	4.8 x 9.4	5.8 x 11.5	0.0100	15	95	500/D
	1.5	7/0.5	0.6	1	0.6	1.2	4.8 x 9.8	6.0 x 12.0	0.0094	15	95	500/D
	2.5	1/1.78	0.7	1.5	0.6	1.2	5.4 x 10.5	6.4 x 13.0	0.0082	20	130	500/D
	2.5	7/0.67	0.7	1.5	0.6	1.2	5.6 x 11.5	6.8 x 14.0	0.0084	20	130	500/D
	4	1/2.25	0.8	2.5	0.6	1.2	6.0 x 12.5	7.2 x 15.0	0.0086	27	190	500/D
	4	7/0.85	0.8	2.5	0.6	1.2	6.2 x 13.0	7.6 x 16.0	0.0078	27	190	500/D
	6	7/1.04	0.8	4	0.6	1.2	6.8 x 15.0	8.2 x 17.5	0.0066	35	270	500/D
	10	7/1.35	0.9	4	0.6	1.2	8.0 x 17.0	9.4 x 20.0	0.0059	49	380	500/D
	16	7/1.70	1.0	6	0.6	1.2	9.2 x 20.0	11.0 x 23.0	0.0053	65	550	500/D
	25	7/2.14	1.2	6	0.6	1.4	11.0 x 24.0	13.0 x 27.0	0.0051	88	810	500/D
	35	19/1.53	1.2	10	0.6	1.4	12.0 x 27.0	14.5 x 31.0	0.0043	109	1,070	500/D
3	1	1/1.13	0.6	1	0.6	0.9	4.0 x 10.5	4.8 x 12.5	0.0115	9	95	500/D
	1	7/0.40	0.6	1	0.6	0.9	4.0 x 11.0	5.0 x 13.5	0.0110	9	95	500/D
	1.5	1/1.38	0.6	1	0.6	1.2	4.8 x 12.0	5.8 x 14.0	0.0100	12	130	500/D
	1.5	7/0.50	0.6	1	0.6	1.2	4.8 x 12.5	6.0 x 15.0	0.0094	12	130	500/D
	2.5	1/1.78	0.7	1.5	0.6	1.2	5.4 x 14.0	6.4 x 16.5	0.0082	16	180	500/D
	2.5	7/0.67	0.7	1.5	0.6	1.2	5.6 x 14.5	6.8 x 17.5	0.0084	18	180	500/D
	4	1/2.25	0.8	2.5	0.6	1.2	6.0 x 16.0	7.2 x 19.0	0.0086	22	260	500/D
	4	7/0.85	0.8	2.5	0.6	1.2	6.2 x 17.5	7.6 x 20.5	0.0078	22	260	500/D
	6	7/1.04	0.8	4	0.6	1.2	6.8 x 19.5	8.2 x 22.5	0.0066	29	370	500/D
	10	7/1.35	0.9	4	0.6	1.2	8.0 x 22.5	9.4 x 26.0	0.0059	40	520	500/D
	16	7/1.70	1.0	6	0.6	1.4	9.2 x 27.5	11.0 x 31.5	0.0053	53	860	500/D

TISI permitted to increase the maximum overall diameter by 5%

C : Packing in coil
D : Packing in drum



ก.2 ข้อมูลอินตักชั้นมอเตอร์



MITSUBISHI ELECTRIC AUTOMATION (THAILAND) CO., LTD. /

Feature and Benefits

Compact Size and Light Weight

Size and weight reductions have been achieved by the use of cast-plate frame and aluminum brackets in the small-capacity motors.

Highly Reliable Insulation Systems

Class B and F insulation systems are characterized by superior resistance to heat, humidity and chemicals for top-notch reliability.

Full Lineup

We have produced various types of motors, ranged from 1/4 HP to 125 HP, thus providing a full lineup of motors ideal for any application.

Superior Characteristics and High Reliability

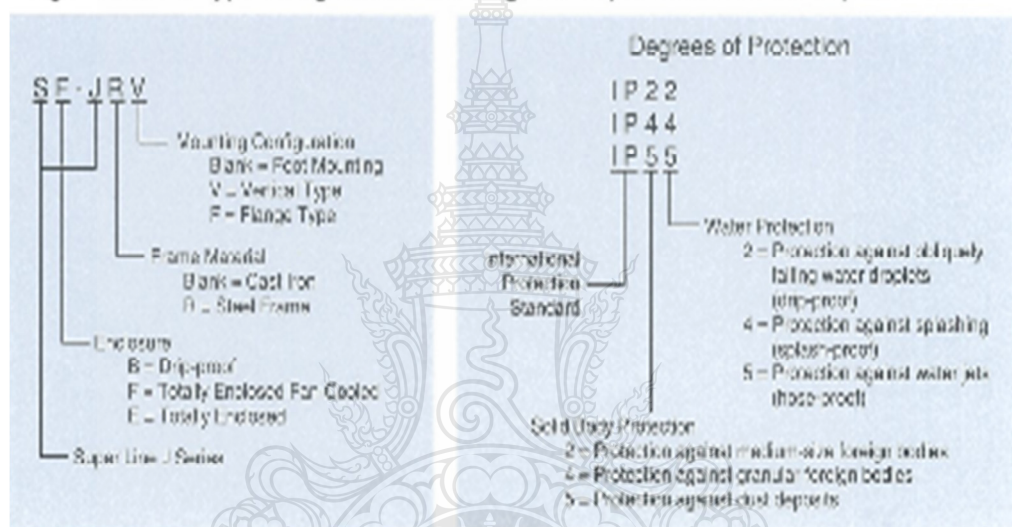
Based on experience and technology accumulated over many years, along with an excellent quality-control system, each motor is assured to exhibit only the finest characteristics.

Safety: All the rotating parts and the "live" areas are made sure that it cannot be accidentally touched directly.

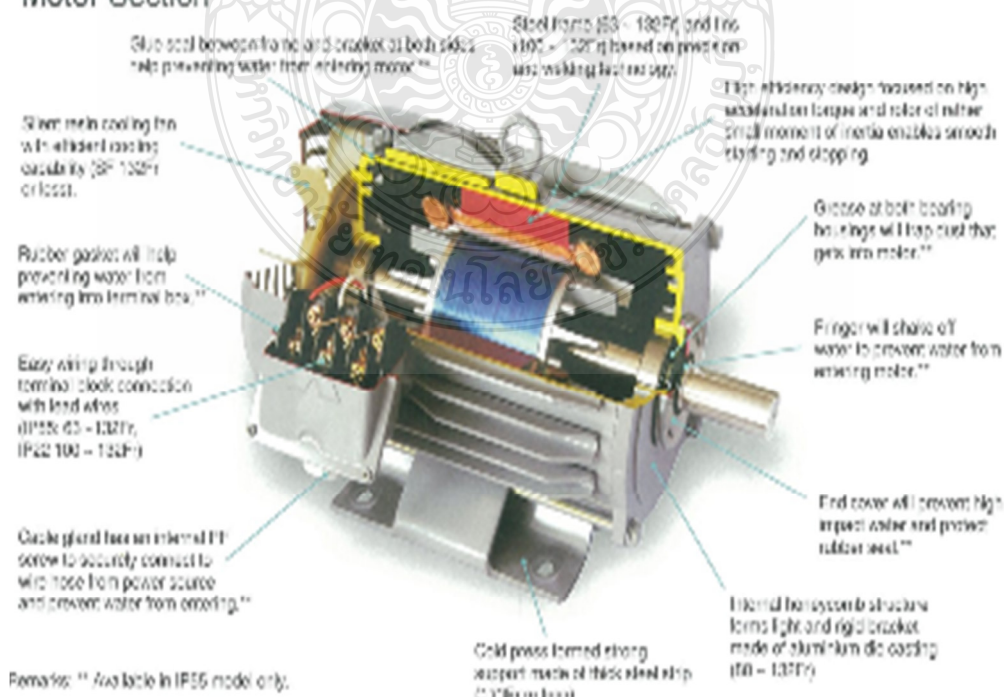
Smooth Acceleration: The low moment of inertia of the rotor combined with the motor's high acceleration torque, contributes to smooth starting and stopping.

Low Noise and Vibration Levels: This feature has been achieved due to our highly individualized electric design, the ample rigidity and the precise machining of the motor frames and brackets, and the exact balancing of the rotor.

Significance of type designations and degrees of protection for three phase motor



Motor Section



Standard Specifications

Item	Specifications																																	
Voltage and Frequency	LT: 10HP and below = 220/390-415V 50Hz, 220/440V 60Hz HT: 5HP and above = 380-415V 50Hz, 380-440V 60Hz(Subable for Y-Δ starting)																																	
Enclosure Construction and Degrees of Protection	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Degrees of Protection</th> <th rowspan="2">Enclosure Construction</th> <th colspan="3">Model Name</th> <th rowspan="2">Frame No.</th> </tr> <tr> <th>Horizontal</th> <th>Vertical</th> <th>Flange*</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">IP55</td> <td rowspan="3">Totally Enclosed Fan-Cooled Type</td> <td>SF-JR</td> <td>SF-JRV</td> <td>SF-JHF</td> <td rowspan="3">63M - 132M 160M - 190L 200L - 250M</td> </tr> <tr> <td>SF-J</td> <td>SF-JV</td> <td>SF-JF</td> </tr> <tr> <td>SF-J</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>IP44</td> <td>Totally Enclosed Fan-Cooled Type</td> <td>SF-JR</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>63M - 90L</td> </tr> <tr> <td>IP22</td> <td>Drip-proof</td> <td>SB-JR</td> <td>SB-JRV</td> <td>-</td> <td>80W - 132M</td> </tr> </tbody> </table> <p>* Standard vertical-type motor can be used for indoor large type.</p>	Degrees of Protection	Enclosure Construction	Model Name			Frame No.	Horizontal	Vertical	Flange*	IP55	Totally Enclosed Fan-Cooled Type	SF-JR	SF-JRV	SF-JHF	63M - 132M 160M - 190L 200L - 250M	SF-J	SF-JV	SF-JF	SF-J	-	-	IP44	Totally Enclosed Fan-Cooled Type	SF-JR	-	-	63M - 90L	IP22	Drip-proof	SB-JR	SB-JRV	-	80W - 132M
Degrees of Protection	Enclosure Construction			Model Name				Frame No.																										
		Horizontal	Vertical	Flange*																														
IP55	Totally Enclosed Fan-Cooled Type	SF-JR	SF-JRV	SF-JHF	63M - 132M 160M - 190L 200L - 250M																													
		SF-J	SF-JV	SF-JF																														
		SF-J	-	-																														
IP44	Totally Enclosed Fan-Cooled Type	SF-JR	-	-	63M - 90L																													
IP22	Drip-proof	SB-JR	SB-JRV	-	80W - 132M																													
Frame Material	63M - 132M : Steel Plate 160M - 250M : Cast Iron																																	
Power Transmission System	Direct-coupled and belt driven, for up to 10HP 2-pole motor and all model 4-pole & 6-pole motor. Direct-coupled, for 2-pole motor with 10HP and above.																																	
Direction of Rotation	Counter-Clockwise (CCW) viewed from shaft end side.																																	
Thermal Class	IP22 and IP44 : 90L and below : Class D 100L and above : Class F IP55 : All models : Class F																																	
Circumstance Condition	Ambient Temperature	-20 ~ +40°C																																
	Ambient Humidity	85% RH or less (for Drip-proof Structure) 95% RH or less (for Totally Enclosed Structure)																																
	Altitude	Less than 1,000m above sea level																																
	Environment	No bursting / explosive gas or vapor																																
Connection Type	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Degrees of Protection</th> <th>Frame No.</th> <th>No. of leads</th> <th>Connection Type</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">IP55</td> <td>63M - 132M</td> <td>6</td> <td>Terminal Block</td> </tr> <tr> <td>160M - 250M</td> <td>6</td> <td>Lead Wire (also suitable for Y-Δ starting)</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">IP44</td> <td>63M - 90L</td> <td>6</td> <td>Lead Wire</td> </tr> <tr> <td>80M - 90L</td> <td>6</td> <td>Lead Wire</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">IP22</td> <td>100L - 132M</td> <td>6</td> <td>Terminal Block</td> </tr> </tbody> </table>	Degrees of Protection	Frame No.	No. of leads	Connection Type	IP55	63M - 132M	6	Terminal Block	160M - 250M	6	Lead Wire (also suitable for Y-Δ starting)	IP44	63M - 90L	6	Lead Wire	80M - 90L	6	Lead Wire	IP22	100L - 132M	6	Terminal Block											
Degrees of Protection	Frame No.	No. of leads	Connection Type																															
IP55	63M - 132M	6	Terminal Block																															
	160M - 250M	6	Lead Wire (also suitable for Y-Δ starting)																															
IP44	63M - 90L	6	Lead Wire																															
	80M - 90L	6	Lead Wire																															
IP22	100L - 132M	6	Terminal Block																															
	Coating Colour	Munsell N6.5 (Gray)																																
Comforme Standard	IEC 60084-1 & JIS C 4210 (for Horizontal Type), JIS C 2137 2000 (for Vertical Type)																																	

Three Phase Motor Characteristics

LT (220/ 380–415V 50Hz, 220/ 440V 60Hz)

SF-JR IP44 63M–90L 4P (Thermal Class B)

SF-JR(V) IP55 63M–132M (Thermal Class F)

Pole	Output		Frame No.	Full Load Current(A) / Full Load Revolution(r/min)				
	HP	KW		220V 50Hz	380V 50Hz	415V 50Hz	220V 60Hz	440V 60Hz
2	1/4	0.2	63M	0.97/2810	0.58/2610	0.56/2640	0.94/3020	0.59/3020
	1/2	0.4	71M	1.73/2830	1.0/2830	1.0/2850	1.65/3420	0.9/3440
	1	0.75	80M	3.1/2830	1.8/2830	1.8/2850	2.9/3400	1.8/3430
	2	1.5	90L	5.5/2860	3.2/2890	3.1/2870	5.2/3440	2.5/3450
	3	2.2	90L	7.8/2850	4.6/2830	4.8/2870	7.5/3430	4.0/3460
	5	3.7	112M	12.0/2890	7.4/2890	7.2/2910	12.8/3470	8.5/3460
	7.5	5.5	132S	20.1/2900	11.8/2900	11.6/2910	18.9/3480	10/3500
	10	7.5	132S	25.7/2910	14.5/2910	14.1/2920	24.5/3490	12.4/3610
	14	9.2	89M	1.11/1430	0.54/1430	0.53/1440	0.97/1730	0.61/1730
	16	9.4	71M	2.0/1410	1.15/1410	1.2/1430	1.8/1720	1.0/1730
4	1	0.75	80M	3.3/1430	1.9/1430	1.8/1410	3.0/1720	1.7/1730
	2	1.5	90L	5.9/1430	3.4/1430	3.4/1440	5.5/1710	3.1/1730
	3	2.2	102L	8.7/1420	5.0/1430	4.9/1430	8.0/1710	4.6/1730
	5	3.7	112M	13.7/1430	7.9/1430	7.7/1430	13.5/1710	7.2/1730
	7.5	5.5	132S	20.4/1430	11.5/1430	11.1/1440	19.9/1720	10.3/1740
	10	7.5	132M	27.4/1430	15.4/1430	14.8/1440	26.7/1730	13.5/1740
	14	9.2	71M	1.2/1320	0.7/1320	0.7/1330	1.12/1100	0.65/1120
	16	9.4	80M	2.25/1320	1.3/1320	1.3/1330	2.1/1100	1.2/1110
	1	0.75	90L	3.8/1440	2.1/1440	2.2/1330	3.5/1130	2.0/1150
	2	1.5	100L	7.0/1330	4.0/1330	4.0/1340	6.8/1110	3.8/1120
3	2.2	112M	9.5/1340	5.5/1340	5.4/1350	9.0/1120	5.1/1140	
5	3.7	132S	15.2/1340	8.3/1340	8.4/1330	14.2/1130	7.8/1150	
7.5	5.5	132M	22.1/1300	12.8/1300	13/1320	21/1140	11.5/1160	

SB-JR(V) IP22 80M–90L(Thermal Class B), 100L–132M (Thermal Class F)

Pole	Output		Frame No.	Full Load Current(A) / Full Load Revolution(r/min)				
	HP	KW		220V 50Hz	380V 50Hz	415V 50Hz	220V 60Hz	440V 60Hz
4	1	0.75	80M	8.5/1400	2.0/1400	2.3/1410	2.9/1700	1.7/1720
	2	1.5	90L	8.2/1390	3.0/1420	4.0/1460	5.5/1720	3.2/1740
	3	2.2	100L	8.7/1420	5.0/1420	4.3/1450	6.5/1710	4.6/1730
	5	3.7	112M	15.7/1420	7.2/1410	6.7/1430	13.0/1710	7.2/1730
	7.5	5.5	132S	20.4/1430	11.0/1430	11.0/1440	15.4/1720	11.2/1730
	10	7.5	132M	26.4/1440	13.2/1440	13.2/1450	25.4/1730	13.7/1740

Three Phase Motor Characteristics

HT (380-415V 50Hz, 380-440V 60Hz)

SF-JR(V) IP55 112M-132M (Thermal Class F), SF-J(V) 160M-250M (Thermal Class F)

Pole	Output		Frame No.	Full Load Current(A) / Full Load Torque(Nm)			
	HP	KW		380V 50Hz	415V 50Hz	380V 60Hz	440V 60Hz
2	5	3.7	112M	7.5 / 2880	7.3 / 2810	7.3 / 3470	5.6 / 3450
	7.5	5.5	132S	11.6 / 2900	11.8 / 2910	10.9 / 3480	10 / 3520
	10	7.5	132S	14.4 / 2900	14.0 / 2800	14.2 / 3480	12.4 / 3510
	15	11	160M	21.5 / 2910	20.5 / 2900	21 / 3490	18.5 / 3510
	20	15	160M	28 / 2910	27 / 2920	27 / 3490	24 / 3510
	25	18.5	160L	34 / 2910	33 / 2930	33 / 3490	29 / 3510
	30	22	180M	42 / 2910	39 / 2930	41 / 3490	36 / 3510
	40	30	180L	55 / 2920	52 / 2940	54 / 3490	47 / 3520
	50	37	200L	69 / 2920	67 / 2940	67 / 3510	60 / 3530
	75	55	225S	103 / 2930	101 / 2940	101 / 3520	89 / 3540
4	5	3.7	112M	7.9 / 1430	7.7 / 1430	7.3 / 1710	7.2 / 1730
	7.5	5.5	132S	11.8 / 1430	11.1 / 1440	11.5 / 1720	10.3 / 1740
	10	7.5	132M	15.2 / 1430	14.5 / 1440	15.0 / 1720	13.4 / 1740
	15	11	160M	22.8 / 1430	21.8 / 1440	21.5 / 1720	19 / 1740
	20	15	160L	30 / 1450	31 / 1460	28.5 / 1740	25 / 1760
	25	18.5	180M	38 / 1460	35 / 1470	35 / 1750	32 / 1760
	30	22	180M	45 / 1460	42 / 1470	42 / 1750	38 / 1760
	40	30	180L	58 / 1460	55 / 1470	56 / 1750	49 / 1760
	50	37	200L	69 / 1450	65 / 1450	69 / 1750	60 / 1770
	60	45	200L	83.5 / 1450	82 / 1450	82 / 1750	72 / 1770
	75	55	225S	106 / 1460	102 / 1460	101 / 1760	90 / 1770
	100	75	250S	140 / 1470	130 / 1470	140 / 1760	123 / 1750
	125	90	250M	178 / 1470	174 / 1470	173 / 1720	155 / 1740
6	5	3.7	132S	8.3 / 940	8.3 / 930	8.2 / 1130	7.8 / 1150
	7.5	5.5	132M	12.8 / 950	13 / 910	12.1 / 1140	11.3 / 1160
	10	7.5	152M	16.5 / 950	16.5 / 960	16 / 1130	14.5 / 1160
	15	11	160L	24 / 950	24 / 970	23 / 1140	21 / 1160
	20	15	180M	32 / 950	32 / 960	31 / 1130	28 / 1170
	25	18.5	180L	40 / 950	39 / 970	38 / 1130	33 / 1170
	30	22	180L	46 / 950	43 / 970	44 / 1130	39 / 1170
	40	30	200L	60 / 950	58 / 970	60 / 1130	51 / 1170
	50	37	200L	74 / 950	70 / 970	72 / 1130	64 / 1170
	60	45	225S	98 / 960	90 / 970	98 / 1160	86 / 1170

SB-JR(V) IP22 112M-132M (Thermal Class F)

Pole	Output		Frame No.	Full Load Current(A) / Full Load Torque(Nm)			
	HP	KW		380V 50Hz	415V 50Hz	380V 60Hz	440V 60Hz
4	5	3.7	112M	7.9 / 1420	7.7 / 1430	7.3 / 1710	7.2 / 1730
	7.5	5.5	132S	11.8 / 1430	11.1 / 1440	11.2 / 1720	10.3 / 1730
	10	7.5	132M	15.8 / 1440	15.2 / 1450	14.7 / 1730	13.6 / 1730

SB-JR 80M~132M HORIZONTAL TYPE

Drip-Proof Type, IP 22 Degrees of Protection



SB-JR 1HP 4P 80M

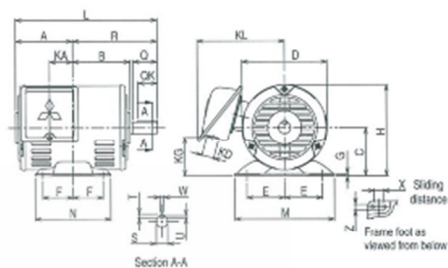


Fig. 1

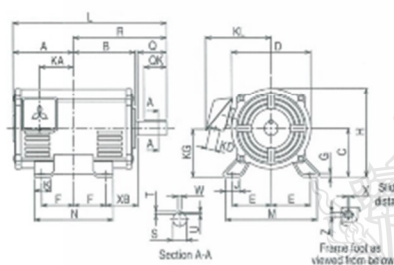


Fig. 2

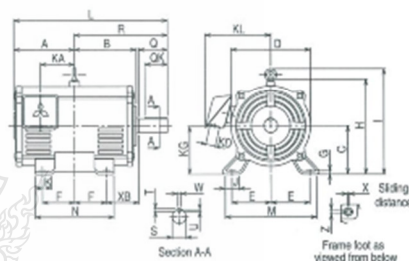


Fig. 3

Dimensions (mm)

Model	Frame No.	Output HP (kW)			Fig.	Motor																	Terminal Box				
		2-Pole	4-Pole	6-Pole		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	ML	N	X	XB	Z	KA	KG	KD	KL
SB-JR	80M	1(0.75)	1(0.75)	1/2(0.4)	1	95	95	80	141	62.5	50	3.2	150.5	-	-	235	160	-	125	15	50	9	39.5	63	27	144	
	90L	2(1.5), 3(2.2)	2(1.5)	1(0.75)	1	112.5	112.5	90	168	70	62.5	4	174	-	-	261	175	-	150	15	56	9	53	76	27	157	
	100L	-	3(2.2)	2(1.5)	2	130	128	100	168	80	70	6.5	184	-	40	45	323	200	212	180	4	63	12	65	86	27	157
	112M	5(3.7)	5(3.7)	3(2.2)	2	136	135	112	190	95	70	6.5	220	254	40	45	336	230	242	180	4	70	12	69	101	27	168
	132S	7.5(5.5), 10(7.5)	7.5(5.5)	5(3.7)	3	153	152	132	220	108	70	6.5	255	289	40	45	392	256	268	180	4	89	12	75	118	27	185
	132M	-	10(7.5)	7.5(5.5)	3	172	171	132	220	108	89	6.5	255	289	40	45	430	256	268	218	4	89	12	94	118	27	185

* The perpendicular variation of tolerance for the shaft center is -0.5

Model	Frame No.	Shaft End						Bearing No.		Approximate Weight (kg)			Approximate Packing Dimensions (LxWxH)	Packing Weight (kg)			
		Q	QK	R	S	T	U	W	Drive End	Opposite	2-Pole	4-Pole		6-Pole	2-Pole	4-Pole	6-Pole
SB-JR	80M	40	32	140	19 j6	6	3.5	6	6204ZZ	6203ZZ	9	11	11	295 x 270 x 206	10	10.8	12
	90L	50	40	168.5	24 j6	7	4	8	6205ZZ	6204ZZ	16, 16	16	16	350 x 280 x 350	17, 16	17	17
	100L	60	45	193	28 j6	7	4	8	6206ZZ	6205ZZ	-	22	24	409 x 355 x 300	-	21.2	27
	112M	60	45	200	28 j6	7	4	8	6207ZZ	6206ZZ	27	30	31	477 x 399 x 315	31	34	35
	132S	80	63	239	38 k6	8	5	10	6308ZZ	6207ZZ	38, 42	40	41	526 x 403 x 347	42, 46	44	45
	132M	80	63	258	38 k6	8	5	10	6308ZZ	6207ZZ	-	51	52	526 x 403 x 347	-	55	56

SB-JRV 80M~132M VERTICAL TYPE

Drip-Proof Type, IP 22 Degrees of Protection



SB-JRV 10HP 4P 132M

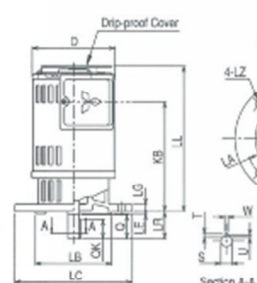


Fig. 4

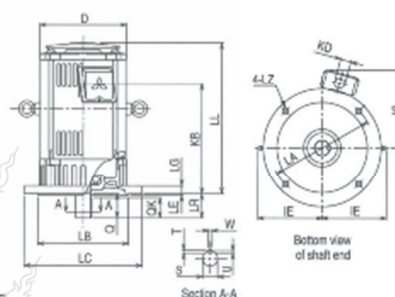


Fig. 5

Dimensions (mm)

Model	Flange No.	Frame No.	Output-HP (kW)			Fig.	Motor										Terminal Box		
			2-Pole	4-Pole	6-Pole		D	LE	LA	LB	LC	LE	LG	LL*	LZ	KB	KD	KL	
SB-JRV	FF165	80M	1(0.75)	1(0.75)	1/2(0.4)	4	141	-	165	130	6	200	3.5	12	234(227)	12	171.5	27	145
	FF165	90L	2(1.5), 3(2.2)	2(1.5)	1(0.75)	4	168	-	165	130	6	200	3.5	12	270(261)	12	201.5	27	158
	FF215	100L	-	3(2.2)	2(1.5)	5	168	-	215	180	6	250	4	16	320(300)	14.5	237	27	155
	FF215	112M	5(3.7)	5(3.7)	3(2.2)	5	190	141.5	215	180	6	250	4	16	352(329)	14.5	263	27	166
	FF265	132S	7.5(5.5), 10(7.5)	7.5(5.5)	5(3.7)	5	220	156.5	265	230	6	300	4	20	393(369)	14.5	292	27	181
	FF265	132M	-	10(7.5)	7.5(5.5)	5	220	156.5	265	230	6	300	4	20	431(407)	14.5	330	27	181

* () is dimension of vertical type without drip-proof cover.

Model	Flange No.	Frame No.	Shaft End						Bearing No.		Approximate Weight (kg)			Approximate Packing Dimensions (LxWxH)	Packing Weight (kg)				
			LR	Q	OK	S	T	U	W	Drive End	Opposite	2-Pole	4-Pole		6-Pole	2-Pole	4-Pole	6-Pole	
SB-JRV	FF165	80M	40	40	32	19	6	6	3.5	6	6204ZZ	6203ZZ	12	14	14	305 x 260 x 235	14	16	16
	FF165	90L	50	50	40	24	6	7	4	8	6205ZZ	6204ZZ	19, 19	19	19	370 x 280 x 235	21, 21	21	21
	FF215	100L	60	60	45	28	6	7	4	8	6206ZZ	6205ZZ	-	28	30	430 x 340 x 330	-	30	32
	FF215	112M	60	60	45	28	6	7	4	8	6207ZZ	6206ZZ	37	40	41	390 x 387 x 354	41	44	45
	FF265	132S	80	80	63	38	6	8	5	10	6308ZZ	6207ZZ	52, 56	54	55	569 x 427 x 384	59, 63	61	62
	FF265	132M	80	80	63	38	6	8	5	10	6308ZZ	6207ZZ	-	67	68	607 x 427 x 384	-	74	75

SF-JR 63M~90L HORIZONTAL TYPE

Totally-Enclosed Fan-Cooled Type, IP 44 Degrees of Protection



SF-JR 1HP 4P 80M

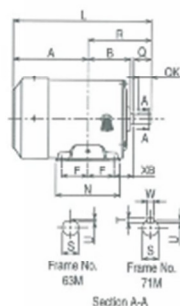
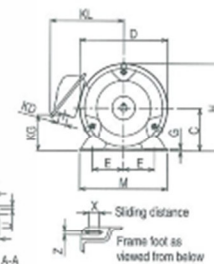


Fig. 6



Fig. 7



Section A-A

Dimensions (mm)

Model	Frame No.	Output HP (kW)	Pole	Fig.	Motor													Terminal Box				
					A	B	C*	D	E	F	G	H	L	M	N	X	XB	Z	KA	KG	KD	KL
SF-JR	63M	1/4(0.2)	4	6	113	77	63	127	50	40	2.3	127	216	135	100	12	40	7	-	-	-	-
	71M	1/2(0.4)			118	87	71	148	56	45	3.2	145	238	148	110	18	45	7	-	-	-	-
	80M	1(0.75)		7	122	95	80	166	62.5	50	3.2	166	262	160	125	15	50	9	39.5	63	27	145
	90L	2(1.5)			143	114	90	188	70	62.5	4	187	311.5	175	150	15	56	9	53	76	27	158

* The perpendicular variation of tolerance for the shaft center is -0.5

Model	Frame No.	Shaft End							Bearing No.		Approximate Weight (kg)	Approximate Packing Dimensions (LxWxH)	Packing Weight (kg)
		Q	QK	R	S	T	U	W	Drive End	Opposite			
SF-JR	63M	23	-	103	11 h6	-	1	-	6201ZZ	6201ZZ	5.6	245 x 165 x 170	6
	71M	30	25	120	14 j6	5	3	5	6202ZZ	6201ZZ	6.2	270 x 200 x 185	7.5
	80M	40	32	140	19 j6	6	3.5	6	6204ZZ	6203ZZ	11	315 x 270 x 206	11.7
	90L	50	40	168.5	24 j6	7	4	8	6205ZZ	6204ZZ	20	368 x 280 x 226	20

SF-JR 63M~132M HORIZONTAL TYPE

Totally Enclosed Fan Cooled Type, IP 55 Degrees of Protection



SF-JR 3HP 4P 100L

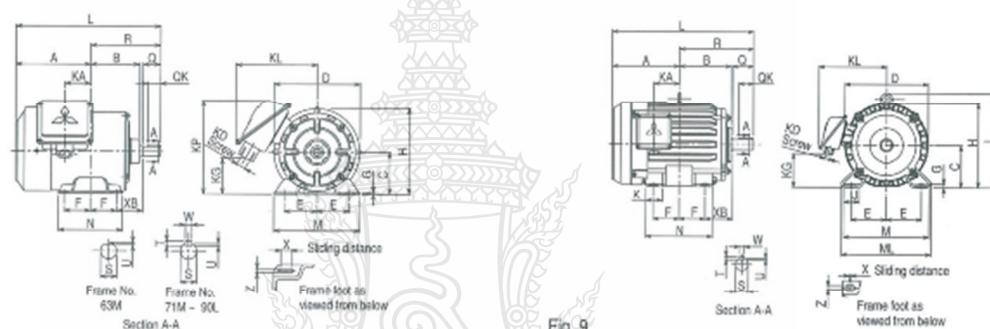


Fig. 8

Fig. 9

Model	Frame No.	Output HP (kW)			Fig.	Motor																	Terminal Box					
		2-Pole	4-Pole	6-Pole		A	B	C*	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	ML	N	X	XB	Z	KA	KG	KD	KL	KP**
SF-JR	63M	1/4(0.2)	1/4(0.2)	-	8	121.4	73.6	63	130	50	40	2.3	126.3	-	-	224.4	135	-	100	12	40	7	38.4	75	PF1/2	130	162	
	71M	1/2(0.4)	1/2(0.4)	1/4(0.2)		128.5	83	71	147.6	56	45	3.2	144.8	-	-	249.5	148	-	110	18	45	7	44.5	67	PF1/2	140	161	
	80M	1(0.75)	1(0.75)	1/2(0.4)		122	98	80	161.6	62.5	50	3.2	165.4	-	-	262	160	-	125	15	50	9	39.5	38	PF3/4	145	-	
	90L	2(1.5), 3(2.2)	2(1.5)	1(0.75)		143	117	90	183.6	70	62.5	4	186.3	-	-	311.5	175	-	150	15	56	9	53	59	PF3/4	158	-	
	100L	-	3(2.2)	2(1.5)		173	131	100	207	80	70	6.5	203.5	230	40	45	366	200	212	180	4	63	12	65	64	PF3/4	170	-
	112M	5(3.7)	5(3.7)	3(2.2)		181	138	112	228	95	70	6.5	226	253	40	45	381	230	242	180	4	70	12	69	87	PF3/4	182	-
SF-JR	132S	7.5(5.5), 10(7.5)	7.5(5.5)	5(3.7)	9	211.5	155	132	266	108	70	6.5	265	288	40	45	450.5	256	268	180	4	89	12	75	96	PF1	210	-
	132M	-	10(7.5)	7.5(5.5)		230.5	174	132	266	108	89	6.5	265	288	40	45	488.5	256	268	218	4	89	12	94	96	PF1	210	-

* The perpendicular variation of tolerance for the shaft center is ± 0.5

** This dimension is for model which KP > H only.

Model	Frame No.	Shaft End						Bearing No.		Approximate Weight (kg)			Approximate Packing Dimensions (LxWxH)	Packing Weight (kg)			
		Q	OK	R	S	T	U	W	Drive End	Opposite	2-Pole	4-Pole		6-Pole	2-Pole	4-Pole	6-Pole
SF-JR	63M	23	-	103	11 h6	-	1	-	6201ZZ	6201ZZ	6.5	6.6	-	245 x 221 x 193	5.7	6	-
	71M	30	25	120	14 j6	5	3	5	6202ZZ	6201ZZ	8.0	9.2	9.0	275 x 256 x 180	7.2	8	8
	80M	40	32	140	19 j6	6	3.5	6	6204ZZ	6203ZZ	10.5	11	11	315 x 270 x 206	10.7	11.7	11.5
	90L	50	40	168.5	24 j6	7	4	8	6205ZZ	6204ZZ	17, 20.5	20	21.5	368 x 280 x 226	17.2, 21	20	19.5
	100L	60	45	193	28 j6	7	4	8	6206ZZ	6205ZZ	-	24	25	430 x 355 x 300	-	28	27
	112M	60	45	200	28 j6	7	4	8	6207ZZ	6206ZZ	33	36	37	477 x 399 x 315	40	42	44
	132S	80	63	239	38 k6	8	5	10	6308ZZ	6207ZZ	47, 55	48	50	579 x 435 x 347	55, 63	56	58
132M	80	63	258	38 k6	8	5	10	6308ZZ	6207ZZ	-	58	61	579 x 435 x 347	-	66	69	

SF-J 160M~250M HORIZONTAL TYPE

Totally Enclosed Fan Cooled Type, IP 55 Degrees of Protection



SF-J 75HP 4P 225S

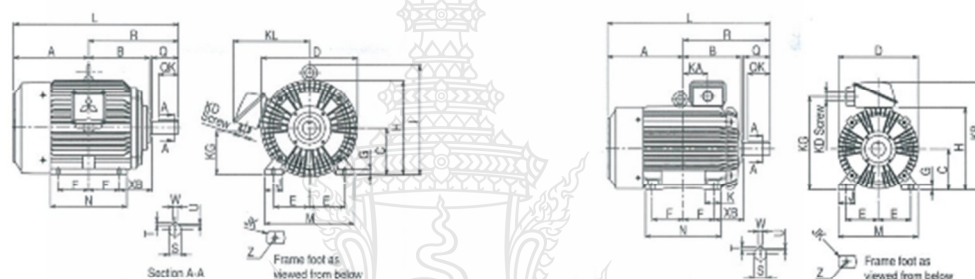


Fig. 10

Fig. 11

Dimensions (mm)

Model	Frame No.	Output HP (kW)			Fig.	Motor																Terminal Box					
		2-Pole	4-Pole	6-Pole		A	B	C*	D	E	F	G	H	I	J	JK	K	L	M	N	XB	Z	KA	KG	KD	KL	KP
SF-J	160M	15(11), 20(15)	15(11)	10(7.5)	10	252	207	160	324	127	105	20	322	373	55	R6	-	575	310	260	108	15	-	127	PF1 1/4	271	-
	160L	25(18.5)	20(15)	15(11)		274	229	160	324	127	127	20	322	373	55	R6	-	619	310	304	108	15	-	127	PF1 1/4	271	-
	180M	30(22)	25(18.5), 30(22)	20(15)		294.5	239	180	376	139.5	120.5	22	367	427	70	R6	-	646	350	300	121	15	-	151	PF1 1/2	295	-
	180L	40(30)	40(30)	25(18.5), 30(22)	313.5	258	180	376	139.5	139.5	22	367	427	70	R6	-	684	350	338	121	15	-	151	PF1 1/2	295	-	
	200L	50(37), 60(45)	50(37), 60(45)	40(30), 50(37)	370.5	281	200	410	159	152.5	25	405	-	80	R6	78	(766) 796	390	369	133	18.5	120	476	PF2	-	550	
	225S	75(55)	75(55)	60(45)	380	287.5	225	459	176	143	28	457	-	80	R8	82	(782) 812	430	350	149	18.5	120	528	PF2	-	602	
	250S	-	100(75)	-	417.5	318.7	250	495	203	155.5	30	-	-	80	R8	95	661	466	387	168	24	136.5	560	PF2 1/2	-	643	
250M	-	125(90)	-	436.5	337.7	250	495	203	174.5	30	-	-	80	R8	95	919	466	425	168	24	155.5	560	PF2 1/2	-	643		

* The perpendicular variation of tolerance for the shaft center is ± 0.5

Model	Frame No.	Shaft End						Bearing No.		Approximate Weight (kg)			Approximate Packing Dimensions (LxWxH)	Packing Weight (kg)			
		Q	QK	R	S	T	U	W	Drive End	Opposite	2-Pole	4-Pole		6-Pole	2-Pole	4-Pole	6-Pole
SF-J	160M	110	90	323	42 k6	8	5	12	6309ZZ	6308ZZ	105, 115	107	107	743 x 601 x 494	126, 136	128	128
	160L	110	90	345	42 k6	8	5	12	6309ZZ	6308ZZ	145	135	135	787 x 601 x 494	166	156	156
	180M	110	90	351.5	48 k6	9	5.5	14	6311ZZ	6310ZZ	190	185, 195	195	814 x 651 x 548	214	209, 219	219
	180L	110	90	370.5	55 m6	10	6	16	6312ZZ	6310ZZ	220	230	220, 235	852 x 651 x 548	244	254	244, 259
	200L	(110) 140	(90) 110	(395.5) 425.5	(55 m6) 60 m6	(10) 11	(6) 7	(18) 18	(6312ZZC3) 6313ZZ	(6311ZZC3) 6311ZZ	280, 195	285, 310	295, 340	964 x 542 x 691	307, 222	312, 337	322, 367
	225S	(110) 140	(90) 110	(402) 432	(55 m6) 65 m6	(10) 11	(6) 7	(18) 18	(6312ZZC3) 6315ZZ	(6312ZZC3) 6312ZZ	315	345	370	980 x 591 x 774	345	375	400
	250S	140	110	463.5	75 m6	12	7.5	20	6318ZZ	6315ZZ	-	490	-	1087 x 627 x 824	-	505	-
	250M	140	110	482.5	75 m6	12	7.5	20	6318ZZ	6315ZZ	-	557	-	1087 x 627 x 824	-	572	-

() is dimension for 2-pole motors.

SF-JRV 63M~132M & SF-JV 160M~180L VERTICAL TYPE

Totally Enclosed Fan Cooled Type, IP 55 Degrees of Protection



SF-JRV 10HP 4P 132M

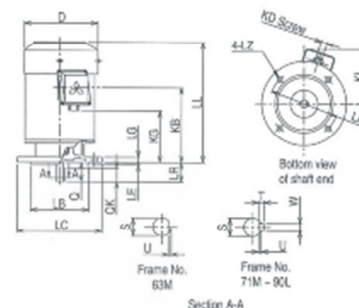


Fig. 12

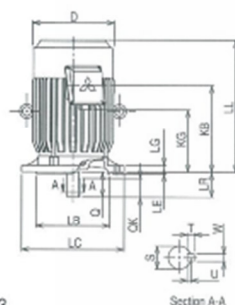


Fig. 13

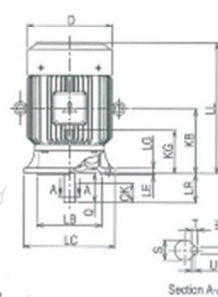
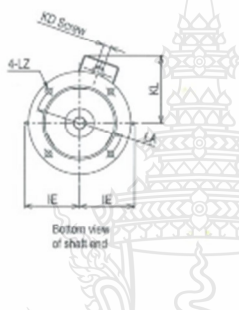


Fig. 14

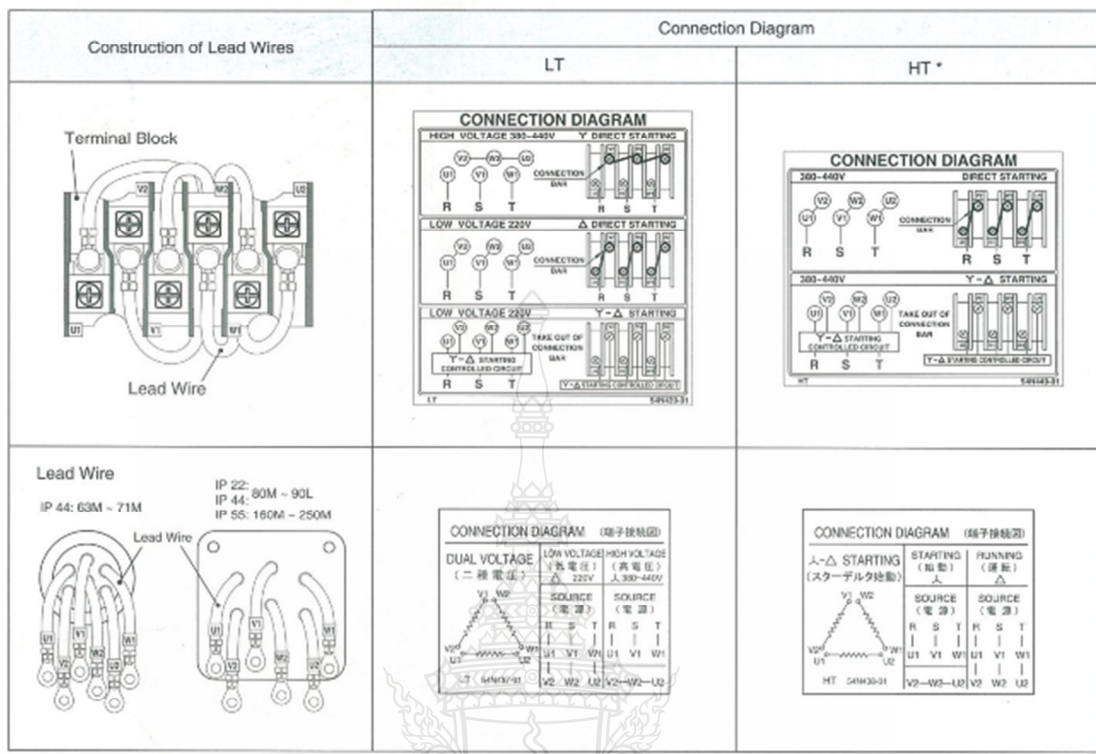


Dimensions (mm)

Model	Flange No.	Frame No.	Output HP (kW)			Fig	Motor								Terminal Box			
			2-Pole	4-Pole	6-Pole		D	IE	LA	LB	LC	LE	LG	LL	LZ	KD	KG	KL
SF-JRV	FF130	63M	1/4(0.2)	1/4(0.2)	-	12	127	-	130	110 j6	160	3.5	10	208	10	PF1/2	58	125
	FF130	71M	1/2(0.4)	1/2(0.4)	1/4(0.2)		148	-	130	110 j6	160	3.5	10	229	10	PF1/2	80	138
	FF165	80M	1(0.75)	1(0.75)	1/2(0.4)		166	-	165	130 j6	200	3.5	12	226	12	PF3/4	78	144
	FF165	90L	2(1.5), 3(2.2)	2(1.5)	1(0.75)	13	186.3	-	185	130 j6	200	3.5	12	288.5	12	PF3/4	133	156
	FF215	100L	-	3(2.2)	2(1.5)		207	130	215	180 j6	250	4	16	321	14.5	PF3/4	148	169
	FF215	112M	5(3.7)	5(3.7)	3(2.2)		230	141	215	180 j6	250	4	16	351	14.5	PF3/4	174	180
FF265	132S	7.5(5.5), 10(7.5)	7.5(5.5)	5(3.7)	14	266	156	265	230 j6	300	4	20	392.5	14.5	PF1	173	213	
FF265	132M	-	10(7.5)	7.5(5.5)		266	156	265	230 j6	300	4	20	430.5	14.5	PF1	211	213	
FF300	160M	15(11), 20(15)	15(11)	10(7.5)		324	213	300	250 j6	350	5	20	500	18.5	PF1 1/4	147	259	
SF-JV	FF300	160L	25(18.5)	20(15)	15(11)	14	324	213	300	250 j6	350	5	20	544	18.5	PF1 1/4	169	259
	FF350	180M	30(22)	25(18.5), 30(22)	20(15)		376	247	350	300 j6	400	5	20	576	18.5	PF1 1/2	176	284
	FF350	180L	40(30)	40(30)	25(18.5), 30(22)		376	247	350	300 j6	400	5	20	614	18.5	PF1 1/2	195	284

Model	Flange No.	Frame No.	Shaft End						Bearing No.		Approximate Weight (kg)			Approximate Packing Dimensions (LxWxH)		Packing Weight (kg)		
			LR	Q	OK	S	T	U	W	Drive End	Opposite	2-Pole	4-Pole	6-Pole	2-Pole	4-Pole	6-Pole	
SF-JRV	FF130	63M	23	23	-	11 h6	-	1	-	6201ZZ	6201ZZ	6.5	6.6	-	318 x 256 x 180	6.8	6.9	-
	FF130	71M	30	30	25	14 j6	5	3	5	6202ZZ	6201ZZ	8.0	9.2	9.0	318 x 256 x 180	9.3	9.8	9.4
	FF165	80M	40	40	32	19 j6	6	3.5	6	6204ZZ	6203ZZ	12	13	13	368 x 280 x 226	13	14.5	13.5
	FF165	90L	50	50	40	24 j6	7	4	8	6205ZZ	6204ZZ	19.5, 23	22.5	21.5	425 x 280 x 226	19.6, 23.8	23	22.5
	FF215	100L	60	60	45	28 j6	7	4	8	6206ZZ	6205ZZ	-	28	29	456 x 355 x 300	-	29.5	31.5
	FF215	112M	60	60	45	28 j6	7	4	8	6207ZZ	6206ZZ	37	40	42	507 x 401 x 357	44	47	49
	FF265	132S	80	80	63	38 k6	8	5	10	6308ZZ	6207ZZ	55, 63	56	58	569 x 459 x 386	63, 71	64	66
	FF265	132M	80	80	63	38 k6	8	5	10	6308ZZ	6207ZZ	-	66	68	637 x 459 x 386	-	74	76
SF-JV	FF300	160M	110	110	90	42 k6	8	5	12	6309ZZ	6308ZZ	110, 120	110	110	778 x 602 x 557	134, 144	134	134
	FF300	160L	110	110	90	42 k6	8	5	12	6309ZZ	6308ZZ	150	140	140	822 x 602 x 557	174	164	164
	FF350	180M	110	110	90	48 k6	9	5.5	14	6311ZZ	6310ZZ	195	190, 200	200	854 x 652 x 610	222	217, 227	227
	FF350	180L	110	110	90	55 m6	10	6	16	6312ZZ	6310ZZ	225	235	225, 240	892 x 652 x 610	252	262	252, 267

Connection



* HT can be used only with motors 5HP and above.

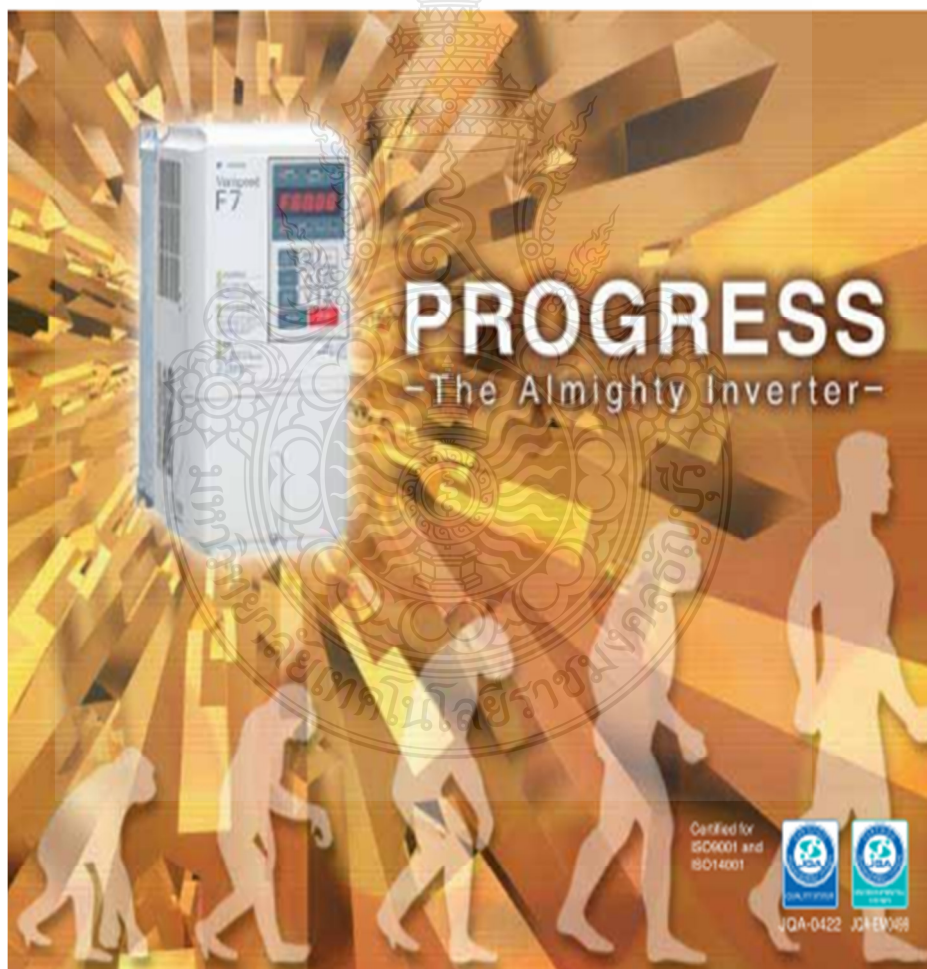


ก.3 แกดตาสื่ออินเวอร์เตอร์



ADVANCED CURRENT VECTOR CONTROL
GENERAL-PURPOSE INVERTER
Varispeed F7

200V CLASS 0.4 TO 110 kW (1.2 TO 160 kVA)
400V CLASS 0.4 TO 300 kW (1.4 TO 510 kVA)



Extra Value at Maximum Cost-performance

The Varispeed F7 has achieved progress toward an almighty inverter with an advanced flux vector control.

The Varispeed F7 achieves optimum control over a wide range of applications for the variable torque applications, such as fans and pumps, and the constant torque applications, such as extruders and printing machines.

Take advantages of the Varispeed F7 that provides the significant performance and functions equivalent to a higher-class inverter, such as variable speed range of 1:1000, torque limit, and torque control, with the maximum cost performance.

For Variable Torque (VT)



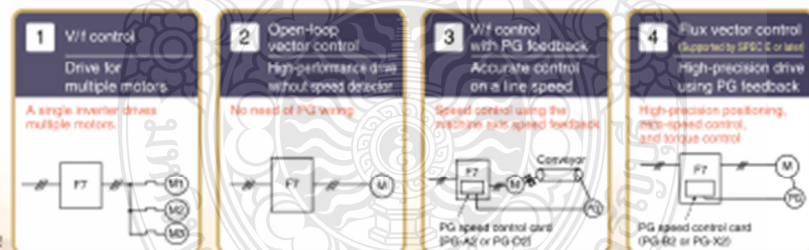
For Constant Torque (CT)



Note: For the applications that require high torque with low noise or oversized capacity above 150%, increase the inverter capacity or use a higher-capacity inverter Varispeed G7.

PROGRESS

Equipped with 4 Control Modes





Optimum characteristics for your application

The optimum control can be obtained by selecting characteristics for variable torque (VT) or constant torque (CT).

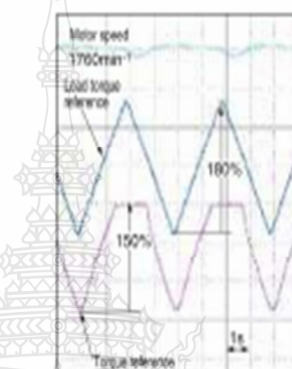
VTC/CT Selector ¹⁾	VT	CT
Inverter Constants ¹⁾	C6-D1=1	C6-D1=0
Load Characteristics	 Variable torque	 Constant torque
	Fans, pumps, etc. Load torque is proportional to motor speed. (Constant resistance capacity is required)	Conveyors, cranes, etc. Load torque is constant regardless of motor speed. (Fully rated resistance capacity is required)
Inverter Characteristics	DebbitCapch 120% for 1 min	150% for 1 min
	Max. Output Frequency 400 Hz	300 Hz
	Carrier Frequency High carrier frequency (15 kHz max.)	Low carrier frequency (2 kHz) (With a low-carrier frequency low-noise option)
	Stall/Preventor Level 120%	150%

- *1: Only VT is available for 200V-class 110 kW and 400V-class 220/300 kW inverters.
 *2: The factory setting of Varispeed F7 SPEC E or later is CT (constant torque). If noise from the motor causes a problem after having applied the Varispeed F7 with that of SPEC E or later, set C6-D1 to 1.

Torque Control to Protect Machines

The precision torque limit function allows accurate control of the output torque, protecting your machines from sudden load fluctuations.

Torque Control: Torque limit set at 150%



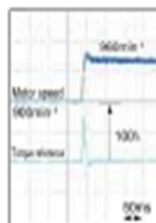
High-speed response

Open-loop vector control: Speed response 5Hz
 Flux vector control: Speed response 40 Hz/motor unit

With a PG, our unique high-speed current vector control enables your machine to respond more rapidly to speed-reference changes. The speed remains constant even if the load fluctuates.

Quick Response to Reference Changes

Speed reference step response



Handles Sudden Load Fluctuations*

Fluctuation of load torque



* Speed recovery characteristics upon load surges

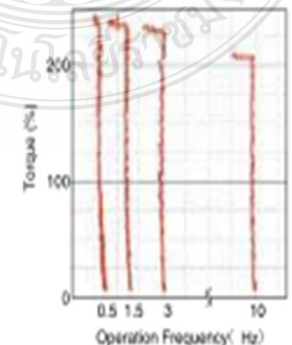
High starting torque

With flux-vector control, a high-torque operation of 150% or more is possible from zero speed.

With open-loop vector control, a high-torque operation of 150% at 0.5 Hz is possible from a low speed of 1/100 when CT is selected.

High Torque from 1/100 Speed

(Dynamic auto-tuning, open loop vector control)
 Speed control range: 1:100, with PG 1:1000



Varispeed
 Inverter Drives

CONTENTS

Features **3**

Digital Operator **6**

Specifications **10**

Construction and Installation **12**

Dimensions **14**

Software Functions **18**

Constants List **21**

Constant Descriptions **29**

Application Examples **57**

Protective Functions **61**

Typical Connection Diagram **64**

Options, Peripheral Devices **67**

Notes **90**

Supplements **94**

Service Network **97**

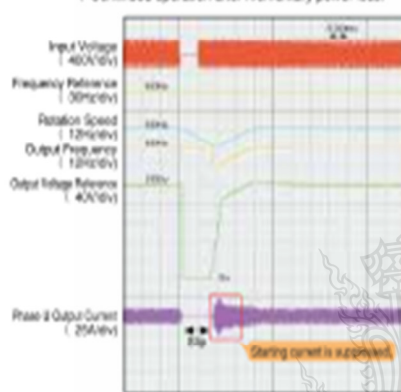
FUNCTIONS Fully Equipped Functions to meet diverse needs

High-speed search (patent pending)

- The high-speed search function reduces the recovery time after momentary power loss (halved in in-house comparison).
- Recovery is possible regardless of direction of rotation without speed detector.

Quick, Shockless Start

(Continued operation after momentary power loss)

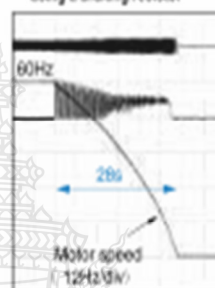


Quick stop without using braking resistor

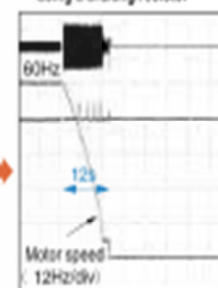
The newly developed high-slip braking function reduces deceleration time to 50% (comparison with Yaskawa conventional inverters) without using a braking resistor even for a load with high moment of inertia. This function is effective for emergency stop of machines with high moment of inertia such as press machines, centrifuges, and blowers.

Note: Do not use this function frequently. Doing so may cause motor overheat.

Deceleration to a stop without using a braking resistor



High-slip braking stop without using a braking resistor



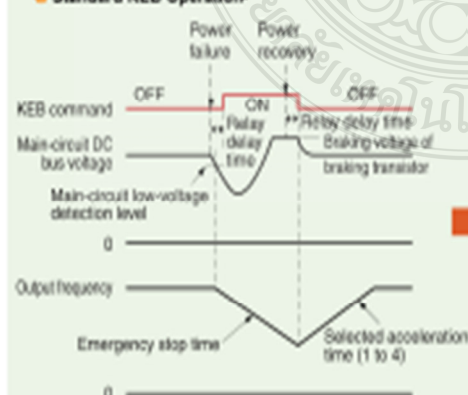
Backup during power loss with kinetic energy

The KEB (Kinetic Energy Back-up) function enables operation during a momentary power loss without blocking.

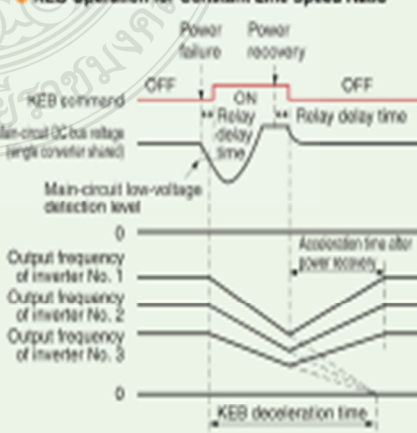
This function is effective for production lines for film, textiles and other products that require measures against momentary power loss as well as for machine-tool spindle motors that require an emergency stop because of power failure.

The KEB function can also be used to keep a constant speed ratio (line speed ratio) among inverters.

Standard KEB Operation



KEB Operation for Constant Line Speed Ratio



New functions to support your machine (with flux vector control)

Torque Control

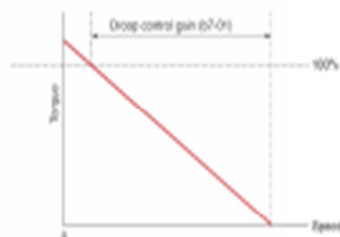
The motor torque can be controlled freely using external references. This function is effective for winding and rewinding motions of winders.

	Winding Operation		Rewinding Operation	
Configuration				
Start/Stop/Decel	Forward	Reverse	Forward	Reverse
Torque Reference Polarity (TRP)	(+)	(-)	(-)	(+)
Speed Limit Polarity (SLM)	(+)	(-)	(+)	(-)
Generated Torque				

Droop Control

This function arbitrarily sets the slip of the motor. This function is effective for material handling machines such as cranes and conveyors.

• Droop Control Gain



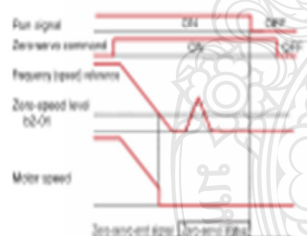
④ Set the droop control gain as the speed reduction at a 100% motor torque, as a percentage of the maximum output frequency.

Zero-servo Control

No matter if an external force is applied or an offset is set for an analog reference input, this function stops a motor electrically and freely when the frequency (speed) reference drops to the zero-speed level.

• Zero-servo Signal Timing Chart

Setting the zero-servo command to one of the multi-function contact inputs S3 to S8 enables the zero-servo function.



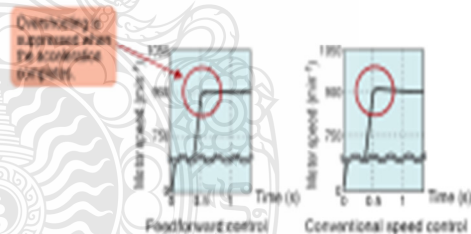
If the frequency (speed) reference increases to the zero-speed level while the zero-servo command is ON, the motor stops at zero-speed status.

Feedforward Control

An acceleration torque is applied by the feedforward control device, which enables a quick response. Therefore, it is not necessary to increase the gain forcibly.

This function is effective to improve response to acceleration for a load with high moment of inertia or machine with low rigidity.

• Overshoot Control Effects



Enhanced autotuning functions

Three autotuning modes are provided to use the best of motor capacity.

① Rotational autotuning

[Open-loop vector control, flux vector control]

The conventional autotuning mode. Use this mode for the applications where high-starting torque and high-speed control accuracy are required.



② Stationary autotuning

[Open-loop vector control, flux vector control]

Use this mode to perform autotuning for a motor connected to a load such as material handling machine.



③ Stationary autotuning for line-to-line resistance only

[V/f control]

If the motor cable length changes or the motor capacity is different from the inverter capacity in the applications using V/f control, perform this autotuning to improve the control accuracy.

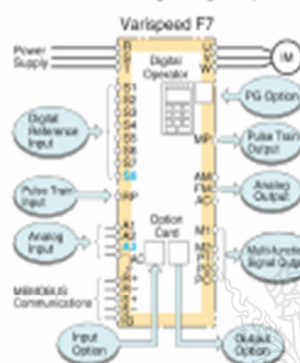




User-friendly Specifications to enhance the inverter with facilities

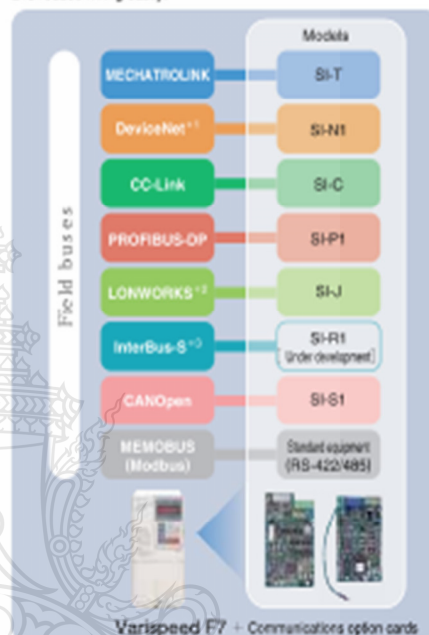
Various I/O interfaces

- The Varispeed F7 supports various I/O interfaces shown in the figure below. The digital reference input points are increased to 8 (conventionally 7), and the analog reference input points are increased to 3 (conventionally 2).
- Analog reference card (AI-14U and AI-14B) and digital reference card (DI-08 and DI-16H2) are also available.
- Input terminal logic can switch between sink (0V common) or source (+24V common). An external +24V power supply is also available for selecting the signal input.



Supporting global field networks

All models are fully compliant with RS-422/485 (MEMOBUS/Modbus protocol) standards. The networks are available by using communications option cards. Now you can connect to hosts and PLC, implement centralized management of production equipment and reduce wiring easily.



Countermeasures to minimize harmonics current

Models of 22KW or more come equipped with a built-in DC reactor to minimize harmonics current (option for models of 18.5KW or less). They also have 12-pulse input to prevent current distortion.

6-pulse input without AC reactor
(conventional model)
Current distortion factor: 88%

↓
12-pulse input with optical
transformer with a dual star-
delta secondary
Current distortion factor: 12%



Note: For 12-pulse input, a transformer with a star-delta secondary is required for the input power supply.

Global standards

Certified by UL/cUL and
CE marking



Note: When using CE standard inverters, the special EMC-compatible noise filter is required. Contact your Yaskawa representative.

Easy maintenance and inspection

- Detachable terminals make it easy to exchange units fully wired.
- Screw terminals for the main and the control circuits and the independent cover of the wiring parts promise easy wiring and high reliability.
- The one-touch detachable cooling fan life is extended with the on/off control function.
- The accumulated operation time and the cooling fan operation time can be recorded and displayed.



SOFTWARE DriveWizard 100 to support adjustment and maintenance

Note: When using Vaispeed F7 with a PC, DriveWizard 100 is required for operation such as parameter editing. For obtaining a DriveWizard 100, contact your Yaskawa representative.

Wide variety of on-screen operations

All constants of each inverter can be managed by a personal computer, which simplifies the adjustment and maintenance.



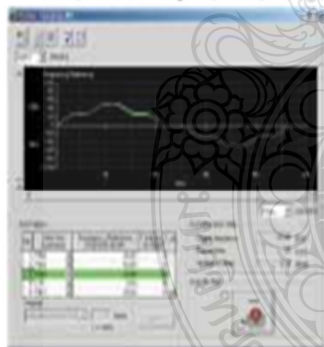
System Requirements

PC	PC/AT, DOS/V-compatible device
CPU	Pentium 200 MHz min.
Main Memory	64 MB min. (96 MB min. recommended)
Free Hard	For standard setup
Disk Space	• 100MB min. (200MB min. recommended for installation)
Resolution	Super VGA monitor (800 x 600 pixels, small fonts)
Number of Colors	256 colors min. (65,536 colors min. recommended)
OS	<ul style="list-style-type: none"> • Windows 98 • Windows NT4.0 Service Pack3 or later (IE4.01 Service Pack2 or later) • Windows 2000 • Windows ME • Windows XP
Others	<ul style="list-style-type: none"> • RS-232C, RS-422, or RS-485 I/F • CD-ROM drive (for installation only) • Adobe Acrobat Reader (Adobe Systems Incorporated) <p>Note: Required when Help window is displayed.</p>

Note: Pentium is a registered trademark of Intel Corporation.
Windows and Windows NT are registered trademarks of Microsoft Corporation, U.S.A.

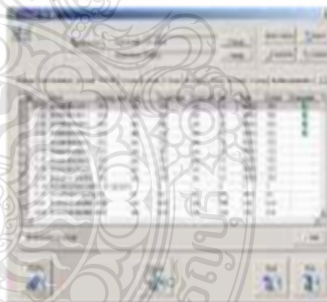
Automatic Operation with Preset Pattern

Automatic operation according to a preset operation pattern is possible.



Parameter Editing

Display or edit inverter constants.



Autotuning

Automatically adjusts the motor-related inverter constants.



Oscilloscope Display

Monitor data during operation online.



Troubleshooting

Confirm faults occurred. Display fault trace, cause, and corrective actions.



Digital Operator (Standard Equipment)

● Features

- The standard digital operator with easy to read LED indicators allows remote operation using an extension cable (option).
 - The quick program mode requires only few constant settings.
 - The verify mode enables you to check all modified constants at one time.
 - Constants can be easily up/downloaded using the copy function. Even if an inverter failure occurs, operations can be quickly resumed soon after the replacement of the inverter.
 - An operator with a LCD indicator corresponding to seven languages* are available as an option.
- * : Japanese (Katakana), English, German, French, Italian, Spanish, and Portuguese.

● Functions

Rotating Direction Display
FWD: LED lights at forward run.
REV: LED lights at reverse run.

Remote Mode
lights when selecting input mode from the control circuit terminal.
SEQ: LED lights when selecting run command from control circuit terminal.
REF: LED lights when selecting frequency reference from control circuit terminals AI and A2.

Alarm Display

Mode Display
DRIVE : LED lights at Drive Mode.
QUICK : LED lights at Quick Programming Mode.
ADV : LED lights at Advanced Programming Mode.
VERIFY: LED lights at Verify Mode.
A. TUNE: LED lights at Auto-tuning Mode.

Data Display
Displays data for monitoring, user constants, and set values in 5 digits.

Menu Key
Changes the display of operation and programming mode.

Escape Key
Returns to the status entered before [DATA/ENTER] key was pressed.

Operation Mode Selection Key
The operation mode is alternated with REMOTE (control circuit terminal) and LOCAL (digital operator) (When operation continued and frequency reference are set at control circuit terminal.)

DATA/ENTER Key
Selects mode, group, function or program name. Displays each constant set value while displaying a constant name. By pressing this key again, the set value is written in.

▲ Increment key
▼ Decrement key
Selects mode, group, function, constant name or set value.

Shift/Reset Key
Selects a digit of a set value to be changed. The selected digit blinks. (halts operation at fault.)

Run Command Keys
Run command keys for use by digital operator. Enabled only in the drive mode.
JOG : Jog run is enabled while depressing this key.
FWD/REV: Selects forward or reverse run. Forward and reverse run is alternated.
RUN* : Red LED lights by depressing RUN.
STOP* : Red LED lights by depressing STOP.

* RUN or STOP LED light ON or OFF, or blinks in accordance with each operation.

Terminal Block

Terminal	Function	LED
AI	Frequency Reference	REF
A2	Frequency Reference	REF
AI	Run Command	SEQ
A2	Run Command	SEQ
AI	Forward Run	FWD
A2	Reverse Run	REV
AL	Alarm	ALARM

○: ON □: Blinking ●: OFF

Easy Operation with Digital Operator

Description	Key Operation	Operator Display
① Power ON • Displays frequency reference value.		STOP LED ON F 0.00
② Operation Condition Setting • Select LOCAL mode.		STOP LED ON, RUN LED ON F 0.00
③ Forward Jog Run (6 Hz) JOG run procedure (RUNs while depressing JOG key.)		F 6.00 <small>Display only while depressing JOG key.</small>
④ Frequency Setting • Change reference value. • Write in set value. • Select output frequency in color display.		F 00.00
		F 15.00
		F 15.00
		F 00.00
⑤ Forward Run • Forward Run (15 Hz)		15.00 RUN LED ON
⑥ Frequency Changing (3Hz~40Hz) • Select frequency display. • Change reference value. • Write in set value. • Select output frequency in color display.		F 15.00
		F 15.00
		F 60.00
		F 60.00
⑦ Reverse Run • Switch to reverse run.		-60.00
⑧ Stop • Decelerates to a stop.		0.00

Autotuning Function Procedure

The procedure of line-to-line resistor static autotuning at V/F control mode. (When using a motor of 3.7kW 4pole 200V 14.8A)

Description	Key Operation	Operator Display
Mode selection		AUTO-STOP F 1-01
Select tuning mode.		AUTO-ON F 1-01
Select line-to-line resistor static autotuning.		Check if the output is 0. 00
Select motor rated output constant.		F 1-01
Check rated output.		F 1-02 New value is display and output 003.70
Select motor rated current constant.		F 1-02
Check rated current.		F 1-04 New value is display and output 00.40
Start autotuning.		STOP ON F 1-04 F 1-02
Returns to drive mode.		STOP LED OFF F 1-02 End F 60.00

Monitor Display Procedure

Description	Key Operation	Operator Display
Power ON		STOP LED ON F 0.00
Mode selection		F 0.00
Select drive mode.		F 0.00
Parameter reference display		STOP LED ON F 0.00
Output frequency in analog		0.00
Output in speed in analog		0.00R
Output voltage in analog (line-to-line)		0.0V
DH-C monitor		U 1-01
Hz (0.1Hz/div) (with 1Hz)		U 2-01
U/V (0.1V/div) (with 1V)		U 3-01

Main Monitor Functions

Parameter No.	Parameter Description	Parameter Description
U1-01	Frequency reference	50.0
U1-02	Output frequency	50.0
U1-03	Output frequency (Hz)	2.00
U1-04	Control speed	0
U1-05	Motor speed	50.0
U1-06	Output voltage	150.0
U1-07	DC bus voltage	207.0
U1-08	Output current	0.0
U1-09	Frequency reference (Hz)	50.0
U1-10	Input reference value	0.0000
U1-11	Output reference value	0.0000
U1-12	Control speed	0.0000
U1-13	Speed limit	300

Digital Operator

Specifications

200 V Class (Specifications in blue letters are available for inverters of 5301 E or later)

Model CIMR-F7A	0P4	0P7	1P0	2P0	3P7	5P5	7P0	10.1	14.1	18.1	24.2	30.4	38.7	49.1	61.5	76.0	93.0	113		
Max. Applicable Motor Output ^{*)}	kW	0.4	0.75	1.5	2.2	3.7	5.5	7.5	11	15	18.5	22	30	37	45	55	75	90	110	
Rated Input Current	A	3.8	4.9	8.4	11.5	18	24	32	45	58	84	94	120	150	180	227	317	381	457	
Inverter Capacity	kVA	1.2	1.6	2.7	3.7	5.7	8.8	12	17	22	27	32	41	50	60	82	110	130	160	
Rated Current	A	3.2	4.1	7.0	9.6	15	23	31	45	58	71	85	115	145	180	235	290	346	415	
Max. Voltage	3-phase, 200/200/230/230/240 V (Proportional to input voltage)																			
Max. Frequency	CT (low carrier frequency, constant torque mode): 300 Hz, VT (high carrier frequency, variable torque mode): 400 Hz																			
Rated Input Voltage and Frequency	3-phase 200/200/230/230/240 V, 50/60 Hz ^{*)}																			
Allowable Voltage Fluctuation	+10%, -15%																			
Allowable Frequency Fluctuation	±0.5%																			
Harmonic Wave	DC Reverse	Option																	Provided	
Prevention	12 Pulse Input	Not available																	Available ^{*)}	
Environmental Conditions	Vibration	9.8 m/s ² at 20 Hz or below, up to 5.9 m/s ² at 20 Hz to 50 Hz															9.8 m/s ² at 20 Hz or below, up to 2.0 m/s ² at 20 Hz to 50 Hz			

^{*)} Our standard 3-phase motors are used for max. applicable motor output. Choose the inverter model whose rated current is allowable within the motor rated current range.
^{**)} When using the inverter of 200 V class 37 kW or more with a cooling fan, a cooling fan of 200 V 50 Hz or 240 V 50/60 Hz power supply, a transformer for the cooling fan is required.
^{**)} A 3-wired transformer is required at 12-pulse input.

400 V Class (Specifications in blue letters are available for inverters of 5301 E or later)

Model CIMR-F7A	0P4	0P7	1P0	2P0	3P7	5P5	7P0	10.1	14.1	18.1	24.2	30.4	38.7	49.1	61.5	76.0	93.0	113	133	160	195	238	300		
Max. Applicable Motor Output ^{*)}	kW	0.4	0.75	1.5	2.2	3.7	5.5	7.5	11	15	18.5	22	30	37	45	55	75	90	110	132	160	195	238	300	
Rated Input Current	A	2.2	2.5	4.4	6.4	8.8	12	17	22	27	32	40	46	53	60	72	96	108	128	165	196	238	294	371	471
Inverter Capacity	kVA	1.4	1.6	2.8	4.0	5.5	8.0	11	15	19	24	29	35	41	49	59	80	96	117	147	180	220	270	340	
Rated Current	A	1.8	2.1	3.7	5.3	7.4	10.1	13	17	21	25	31	36	42	50	60	81	96	112	140	170	208	260	330	
Max. Voltage	3-phase, 380/400/415/440/480/500 V (Proportional to input voltage)																								
Max. Frequency	CT (low carrier frequency, constant torque mode): 300 Hz, VT (high carrier frequency, variable torque mode): 400 Hz																								
Rated Input Voltage and Frequency	3-phase 380/400/415/440/480/500 V, 50/60 Hz																								
Allowable Voltage Fluctuation	+10%, -15%																								
Allowable Frequency Fluctuation	±0.5%																								
Harmonic Wave	DC Reverse	Option																					Provided		
Prevention	12 Pulse Input	Not available																					Available ^{*)}		
Environmental Conditions	Vibration	9.8 m/s ² at 20 Hz or below, up to 5.9 m/s ² at 20 Hz to 50 Hz																		9.8 m/s ² at 20 Hz or below, up to 2.0 m/s ² at 20 Hz to 50 Hz					

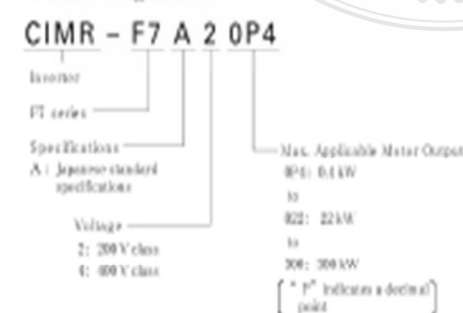
^{*)} Our standard 3-phase motors are used for max. applicable motor output. Choose the inverter model whose rated current is allowable within the motor rated current range.
^{**)} A 3-wired transformer is required at 12-pulse input.

Enclosures

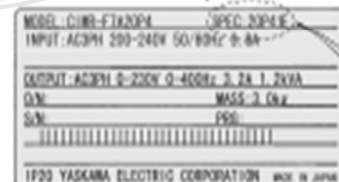
Class	Model CIMR-F7A	0P4	0P7	1P0	2P0	3P7	5P5	7P0	10.1	14.1	18.1	24.2	30.4	38.7	49.1	61.5	76.0	93.0	113	133	160	195	238	300			
200 V Class	Enclosed Type (NEMA 1 Type I)	Available as standard																					Available by option	Standard			
	Open Chassis Type (IEC IP00)	Available by specifying the upper and lower cover of enclosed type																					Available as standard				
400 V Class	Enclosed Type (NEMA 1 Type I)	Available as standard																					Available by option				Not available
	Open Chassis Type (IEC IP00)	Available by specifying the upper and lower cover of enclosed type																					Available as standard				

Enclosed type (NEMA 1 Type I): Provides a degree of protection against dust and dirt within the enclosure. Front and rear panels are fully enclosed (e.g. front, rear, right, left, top, bottom).
 Open chassis type (IEC IP00): Designed for installation in a cabinet or enclosure. Constructed so that the user does not work direct or indirect access to live parts by personnel.

Model Designation



Name Plate Example



200/400 V Class (Specifications in blue letters are available for inverters of Spec E or later)

Control Characteristics	Control Method	Five wire PWM [Flux vector, open loop vector, V/LV/V with PG control (switched by parameter)]
	Starting Torque	150% at 0.5 Hz (Open loop vector control, CT mode)*1, *2, 150% at 1 Hz*1 (Flux vector control, CT mode)*1, *2
	Speed Control Range	1 : 100 (Open loop vector control)*1, 1 : 1000 (Flux vector control)*1
	Speed Control Accuracy	±0.2%*3 (Open loop vector control at 25°C ± 10°C)*3, ±0.02% (Flux vector control)*3
	Speed Response	5 Hz (Open loop vector control)*1, 40 Hz (Flux vector control)*1
	Torque Limit	Provided for vector control only
	Frequency Control Range	CT mode : 0.1 to 300 Hz*3, VT mode : 0.01 to 400 Hz*3
	Frequency Accuracy	Digital reference: ±0.01% (-10°C to +40°C); Analog reference: ±0.1%, 25°C ± 10°C
	Frequency Setting Resolution	Digital Reference: 0.01 Hz; Analog reference: 0.03 Hz (0.1 to 11 kHz)
	Output Frequency Resolution	0.001 Hz
	Overload Capacity	CT mode: 150% rated output current for 1 min. (not available when using 200V 110kW or 400V 220 to 300kW inverters) VT mode: 120% rated output current for 1 min.
	Frequency Setting Signal	-10V to +10V, 0 to +10V, 4 to 20 mA pulse train
	Accel/Decel Time	0.01 to 6000.0 s (Accel/Decel time setting independently, 4 steps available)
Braking Torque	Approx. 20% (Approx. 225% slip, using braking resistor)*4 Inverters of 200/400V 18.5kW or less have a built in braking transistor.	
Main Control Functions	Torque control, drop output, speed feedback control, switching, feedforward control, zerozero control, main rotary position loss reset, speed search, overtorque detection, torque limit, 17 step speed operation (max limit), accel/decel time changeover, forward/reverse, 3 wire sequence, auto-tuning (dynamic, static), Dwell, cooling fan ON/OFF, auto compensation, torque boost operation, jump frequency, frequency upper/lower limit settings, DC injection (flux regeneration), high speed braking, V/F control (with slip function), energy saving control, MEMO01/5 series solutions (45-65/420 min. (0.2 Hz)), fault reset, constant cpg, etc.	
Protective Functions	Motor Overload Protection	Electronic thermal overload relay
	Instantaneous Overcurrent	Motor coast to stop after approx. 200% rated output current
	Phase Protection	Motor coast to stop at power loss
	Overload	CT mode: Motor coast to stop at 150% rated output current for 1 min. (Not available when using 200V class 110kW, 400V class 220 to 300kW inverters.) VT mode: Motor coast to stop at 120% rated output current for 1 min.
	Overvoltage	Motor coast to stop after main circuit relay closed approx. 40VDC (approx. 80VDC for 400V class).
	Undervoltage	Motor coast to stop if the main circuit voltage drops to approx. 100VDC (approx. 200VDC for 400V class) or below.
	Momentary Power Loss	Inverters stop after 10 sec. supply power loss (or factory setting). Continuous operation during power loss is about 2s (standard).
	Fin Overheat	Thermostat
	Stall Prevention	Stall prevention during acceleration, deceleration and constant speed operation
Ground Fault*5	Provided by electronic circuit (intercurrent level)	
Power Charge Indication	Indicates when the input/neutral voltage reaches 50V	
Environmental Conditions	Location	Indoor (Protected from external power and dust)
	Humidity	95%RH (max condensing)
	Storage Temperature	-20 to 60°C (for short period during shipping)
	Ambient Temperature	-10 to 40°C for NEMA1 type, -20 to 45°C for open chassis type
	Altitude	1000 m or below

*1: Specifications for open vector control and flux vector control require dynamic auto-tuning.

*2: When exceeding the overload capacity, increase the inverter capacity.

*3: The speed control accuracy depends on the installation conditions and type of motor used. Contact your Yaskawa representative for details.

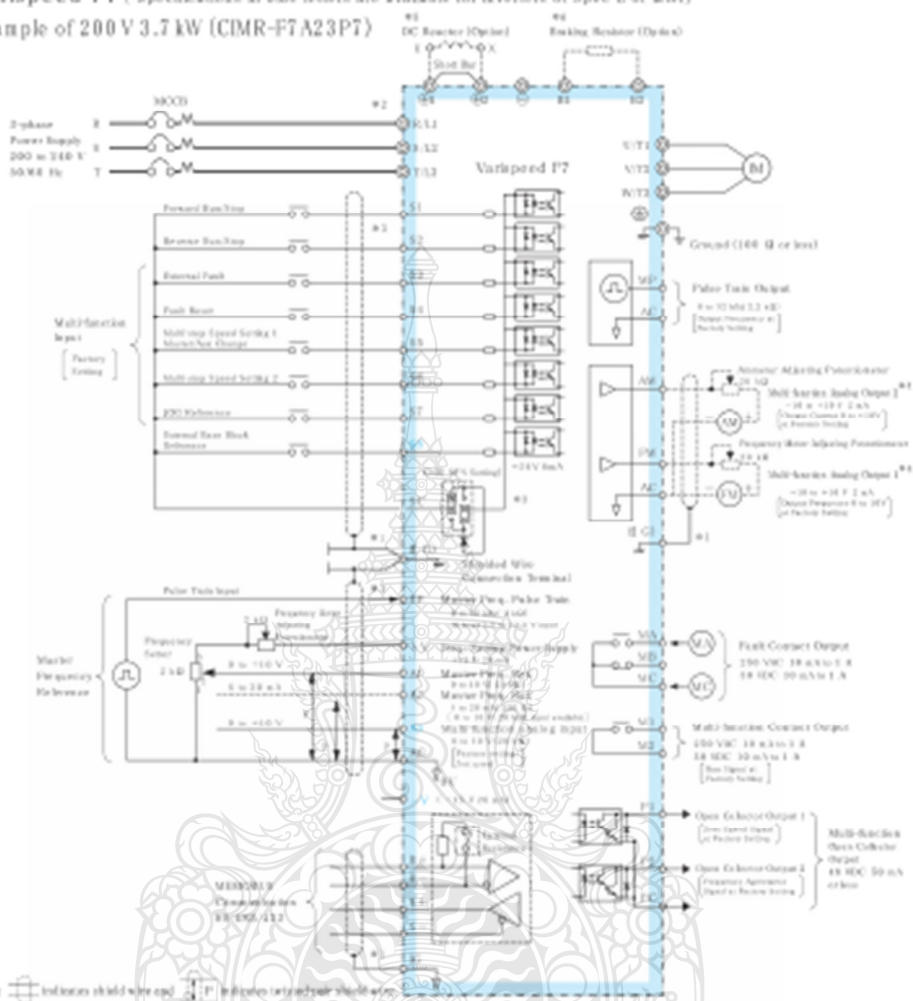
*4: When using a braking resistor or braking resistor unit, set (S01)=0 (deceleration stall prevention). If not, motor may not stop at the set time.

*5: The ground fault here is one that occurs in the motor wiring during operation. Ground faults may not be detected under the following conditions.

- A ground fault with low resistance which occurs in motor cables or terminals.
- The inverter power supply is turned ON after a ground fault has occurred.

Connection Diagram and Terminal Functions

Varispeed F7 (Specifications in blue letters are available for inverters of Spec E or later)
 Example of 200 V 3.7 kW (CIMR-F7A23P7)



- Ⓜ1: indicates shielded wire; indicates shielded pair.
- Ⓜ2: Terminal symbols: shows shielded circuit; shows shielded pair.
- Ⓜ3: Connection when separate 24V supply is not used. When using a separate 24V supply, refer to the Typical Connection Diagram (p.44).
- Ⓜ4: Multi-function analog output is only for control system. Frequency, current, voltage and speed feedback for the feedback control system.
- Ⓜ5: DC resistor is built in for inverter of 200V/3.7kW, 110kW and 180V/3.7kW. It is to prevent the system signal noise for 18.5kW or load. When connecting a DC resistor for inverter of 18.5kW or less, remove the short circuit.
- Ⓜ6: When connecting external type braking resistor (BR), set resistor constant 1500 Ω. When using an externally installed braking resistor with a sequence is required to break the power by the inverter.

Control Circuit and Communication Circuit Terminal Arrangement (Specifications in blue letters are available for inverters of Spec E or later)

K	GI	FM	AC	AM	P1	P2	FC	SC	MF	MA	MR	MC
SC	A1	A2	A3	+V	NC	+	-	+	-	MI	M2	IG
S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	+	-				

Terminal Functions

Main Circuit

Voltage	200 V			400 V		
Model (CMR-PTA)	20P4 to 201R	2421, 2020	2037 to 2110	40P4 to 401R	4022 to 4025	4075 to 4300
Max. Applicable Motor Output	0.4 to 18.5 kW	22 to 30 kW	37 to 110 kW	0.4 to 18.5 kW	22 to 55 kW	75 to 300 kW
R/L1	Main circuit input power supply	Main circuit input power supply	Main circuit input power supply	Main circuit input power supply	Main circuit input power supply	Main circuit input power supply
S/R2						
T/L3						
H1/L11		R/R1, S/S1 and T/T1 have been wired before shipment. (See P50).			R/R1, S/S1 and T/T1 have been wired before shipment. (See P50).	
S1/R21						
T1/L31						
U/T1						
V/T2		Inverter output			Inverter output	
W/T3						
B1	Braking resistor unit			Braking resistor unit		
B2						
⊕	+DC reactor (⊕1 - ⊕2)	+DC power supply (⊕1 - ⊕2)	+Braking unit (⊕2 - ⊕3)	+DC reactor (⊕1 - ⊕2) +DC power supply*1 (⊕1 - ⊕2)	+DC power supply (⊕1 - ⊕2) +Braking unit (⊕2 - ⊕3)	
⊖						
⚡/⚡			Cooling fan power supply			
r/⚡						Cooling fan power supply*2
⚡/⚡/200/⚡/200						
⚡/⚡/400/⚡/400						
⊕		Ground terminal (30 Ω or less)			Ground terminal (30 Ω or less)	

- *1: ⊕1 - ⊕2 DC power input does not require an UL/UL listed transformer.
- *2: Cooling fan power supply r/⚡: P: 200 to 220 V AC 50 Hz, 200 to 220 V AC 60 Hz
: (Transformer is required for 200 V 50 Hz or 200 V 60 Hz power supply)
- *3: Cooling fan power supply r/⚡: P: 200 to 220 V AC 50 Hz, 200 to 220 V AC 60 Hz, r/⚡: P: 400 to 400 V AC 50/60 Hz

Control Circuit (200 V/400 V Class) Specifications may vary when applicable for inverters of Spec E or later)

Classification	Terminal	Signal Function	Description	Signal Level
Sequence Input Signal	S1	Forward running signal	Forward run (closed) stop at "open"	Photo-coupler isolation Input: 24 VDC 8 mA
	S2	Reverse running signal	Reverse run (closed) stop at "open"	
	S3	Multi-function input selection 1	Factory setting: forward fault at "closed"	
	S4	Multi-function input selection 2	Factory setting: stop reset at "closed"	
	S5	Multi-function input selection 3	Factory setting: multi-function stop at "closed"	
	S6	Multi-function input selection 4	Factory setting: multi-function stop at "closed"	
	S7	Multi-function input selection 5	Factory setting: XX (reset) at "closed"	
Analog Input Signal	S8	Multi-function input selection 6	Factory setting: XX (reset) at "closed"	
	S9	Multi-function input selection 7	Factory setting: XX (reset) at "closed"	
	S10	Inverter control speed reference	Factory setting: speed reference at "closed"	
	+V	+14.5 V power supply (input)	For analog reference voltage power supply	+14.5 V (Allowable current: 20 mA max.)
	-V	-14.5 V power supply (input)	For analog reference voltage power supply	-14.5 V (Allowable current: 20 mA max.)
	A1	Motor speed feedback (V)	Eq. 1: $V = 200 \times \frac{N}{1000} \times 0.01 \times 0.025 \times 2000$ Eq. 2: $V = 400 \times \frac{N}{1000} \times 0.01 \times 0.025 \times 2000$	0 V to 18 V (Input impedance: 20 kΩ)
Open-collector Output	A2	Motor speed feedback (V)	Eq. 1: $V = 200 \times \frac{N}{1000} \times 0.01 \times 0.025 \times 2000$ Eq. 2: $V = 400 \times \frac{N}{1000} \times 0.01 \times 0.025 \times 2000$	0 V to 18 V (Output impedance: 250 Ω)
	A3	Motor speed feedback (V)	Eq. 1: $V = 200 \times \frac{N}{1000} \times 0.01 \times 0.025 \times 2000$ Eq. 2: $V = 400 \times \frac{N}{1000} \times 0.01 \times 0.025 \times 2000$	0 V to 18 V (Output impedance: 250 Ω)
	A4	Analog common	0 V	0 V
Relay output	R/G1	Collector to inhibit stop and reverse start (V)	0 V	
	P1	Multi-function FFC output 1	Factory setting: stop reset signal Closed: stop reset signal (V) Open: stop reset signal (V)	+45 VDC 20 mA or less
Analog Monitor Output	P2	Multi-function FFC output 2	Factory setting: stop reset signal Closed: stop reset signal (V) Open: stop reset signal (V)	+45 VDC 20 mA or less
	PC	Photo-coupler output (open collector)	Factory setting: stop reset signal Closed: stop reset signal (V) Open: stop reset signal (V)	
	MA	Fault output (50% duty)	Factory setting: stop reset signal Closed: stop reset signal (V) Open: stop reset signal (V)	
	ME	Fault output (50% duty)	Factory setting: stop reset signal Closed: stop reset signal (V) Open: stop reset signal (V)	
	MC	Relay contact output (open collector)	Factory setting: stop reset signal Closed: stop reset signal (V) Open: stop reset signal (V)	Dry contact, contact capacity: 200 VAC 10 mA to 1 A 20 VDC 10 mA to 1 A
Pulse IO	M1	Multi-function contact output (ON contact)	Factory setting: stop reset signal Closed: stop reset signal (V) Open: stop reset signal (V)	
	M2	Multi-function contact output (OFF contact)	Factory setting: stop reset signal Closed: stop reset signal (V) Open: stop reset signal (V)	
	DM	Multi-function analog monitor 1	Factory setting: stop reset signal Closed: stop reset signal (V) Open: stop reset signal (V)	0 to 10 VDC ±0.5%
Pulse IO	AM	Multi-function analog monitor 2	Factory setting: stop reset signal Closed: stop reset signal (V) Open: stop reset signal (V)	0 to 10 VDC ±0.5%
	AC	Analog common	0 V	0 V
Pulse IO	BP	Multi-function pulse output	Factory setting: stop reset signal (V) Closed: stop reset signal (V) Open: stop reset signal (V)	8 to 32 MHz (3.3 Ω)
	MP	Multi-function pulse monitor	Factory setting: stop reset signal (V) Closed: stop reset signal (V) Open: stop reset signal (V)	8 to 32 MHz (3.3 Ω)

Communication Circuit Terminal (200 V/400 V Class)

Classification	Terminal	Signal Function	Description	Signal Level
H1-481/422 Transmission	R+	MODBUS communication input		Differential input PPC isolation
	R-			
	S+	MODBUS communication output		Differential output PPC isolation
	S-			
	IG	Shielded wire for communication		

Connection Diagram and Terminal Functions



ภาคผนวก ข
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



The 3rd International Conference
 On Sustainable Energy and Green Architecture
 Chaophya Park Hotel, Bangkok, Thailand
 March 14-16, 2012

Abstracts Book



Conference theme: Climate Change Mitigation through Sustainable Built Environment development

Organized by:



RCSEEG
 ENERGY & ENVIRONMENT

Rattanakosin College for Sustainable Energy and Environment, Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Co-Hosted by:



Faculty of Architecture Kaset'sart University

Organizing Committees

Chairperson

- Joseph KHEDARI

Advisor

- Issaree HUNSACHAROONROJ

Treasurer

- Montana WISAWABUMRUNGCHAI

Conference Coordinator

- Pard TEEKASAP

International Scientific Committee

- Mana AMORNKITBAMRUNG *King Mongkut's University of Technology, Thailand*
- Hazim B. AWBI *University of Reading, UK*
- Nam-Choon BAEK *Korea Institute of Energy Research, Korea*
- Tika BUNNAG *Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Thailand*
- Preeda CHANTAWONG *King Mongkut's University of Technology, Thailand*
- Michel DAGUENET *France*
- David ETHERIDGE *University of Nottingham, UK*
- Gian Vincenzo FRACASTORO *Politecnico di Torino, Italy*
- Yves GAGNON *University of Moncton, Canada*
- Shabbir H. GHEEWALA *King Mongkut's University of Technology, Thailand*
- Fariborz HAGHIGHAT *Concordia University, Canada*
- Jongjit HIRUNLABH *King Mongkut's University of Technology, Thailand*
- Yoon Jong HO *Hanbat National University, Korea*
- Issaree HUNSACHAROONROJ *Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Thailand*
- Raphael Muzondiwa JINGURA *Chinhoyi University of Technology, Zimbabwe*

- Joseph KHEDARI *Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Thailand*
- Pojanie KHUMMONGKOL *King Mongkut's University of Technology, Thailand*
- Yuguo LI *University of Hong Kong, China*
- Martin LIDDAMENT *The International Journal of Ventilation, UK*
- Christian MASSON *University of Quebec, Canada*
- Noppanun NANKONGNAB *Mahidol University, Thailand*
- Hideaki OHGAKI *Nagoya University, Japan*
- S. A. OKE *University of Lagos, Nigeria*
- Phadungsak RATTANADECHO *Thammasat University, Thailand*
- Claude-Alain ROULET *Swiss Federal Institute of Technology, Switzerland*
- Massood SAMIL *Southern New Hampshire University, USA*
- S. C. SEKHAR *National University of Singapore, Singapore*
- U-Cheul SHIN *Daejeon University, Korea*
- Suntud SIRIANUNTAPIBOON *King Mongkut's University of Technology, Thailand*
- Pasinee SUNAKORN *Kasetsart University, Thailand*
- Pattaranan TAKKANON *Kasetsart University, Thailand*
- Sombat TEEKASAP *Eastern Asia University, Thailand*
- Kittichai TRIRATANASIRICHAJ *Khon Kaen University, Thailand*
- Ming-Lang TSENG *Ming Dao University, Taiwan*
- Sopa VISITSAK *Kasetsart University, Thailand*
- Jompob WAEWSAK *Thaksin University, Thailand*
- L. Q. "Rick" WANG *University of Hong Kong, China*
- Somchai WONGWISES *King Mongkut's University of Technology, Thailand*
- Nuparb YAMTRAIIPAT *Mahanakorn University of Technology, Thailand*
- Belkacem ZEGHMATI *Universite de Perpignan Via Domitia, France*







Committee

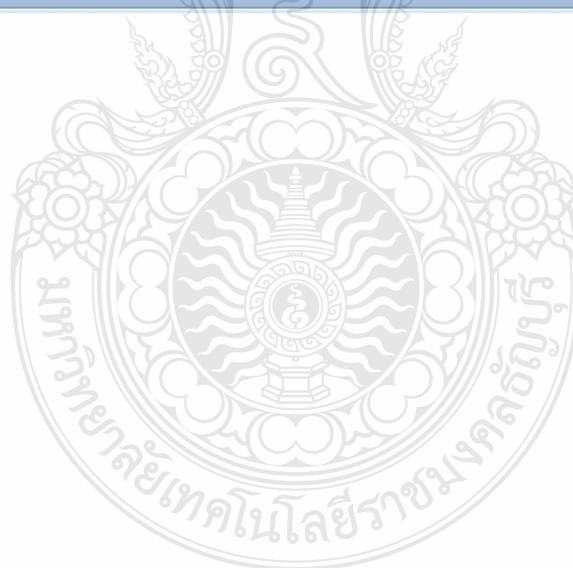
- Tika BUNNAG (Chair)
- Vorakamol BOONYAYOTHIN
- Kanokorn HUSSARO
- Waraporn KLINBUN
- Manjiri KUNTE
- Withaya PUANGSOMBUT
- Pard TEEKASAP
- Tusanee TONDEE

- Joseph KHEDARI *Rajamangala University of Technology Rattanakosin, Thailand*
- Pojanie KHUMMONGKOL *King Mongkut's University of Technology, Thailand*
- Yuguo LI *University of Hong Kong, China*
- Martin LIDDAMENT *The International Journal of Ventilation, UK*
- Christian MASSON *University of Quebec, Canada*
- Noppanun NANKONGNAB *Mahidol University, Thailand*
- Hideaki OHGAKI *Nagoya University, Japan*
- S. A. OKE *University of Lagos, Nigeria*
- Phadungsak RATTANADECHO *Thammasat University, Thailand*
- Claude-Alain ROULET *Swiss Federal Institute of Technology, Switzerland*
- Massood SAMIL *Southern New Hampshire University, USA*
- S. C. SEKHAR *National University of Singapore, Singapore*
- U-Cheul SHIN *Daejeon University, Korea*
- Suntud SIRIANUNTAPIBOON *King Mongkut's University of Technology, Thailand*
- Pasinee SUNAKORN *Kasetsart University, Thailand*
- Pattaranan TAKKANON *Kasetsart University, Thailand*
- Sombat TEEKASAP *Eastern Asia University, Thailand*
- Kittichai TRIRATANASIRICHAH *Khon Kaen University, Thailand*
- Ming-Lang TSENG *Ming Dao University, Taiwan*
- Sopa VISITSAK *Kasetsart University, Thailand*
- Jompob WAEWSAK *Thaksin University, Thailand*
- L. Q. "Rick" WANG *University of Hong Kong, China*
- Somchai WONGWISES *King Mongkut's University of Technology, Thailand*
- Nuparb YAMTRAIPAT *Mahanakorn University of Technology, Thailand*
- Belkacem ZEGHMATI *Universite de Perpignan Via Domitia, France*

Committee

- Tika BUNNAG (Chair)
- Vorakamol BOONYAYOTHIN
- Kanokorn HUSSARO
- Waraporn KLINBUN
- Manjiri KUNTE
- Withaya PUANGSOMBUT
- Pard TEEKASAP
- Tusanee TONDEE

G13		fx			
	A	B	C	F	G
19	18	RE-18	Somphol Chiwamongkolkarn; Jompob Waewsak;	Wind Resource Assessment Using CFD Model for Simple Terrain in Southern Thailand	
20	19	RE-19	Jakaphong Kongpanya; Kanokorn Hussaro; Joseph Khedari	Potential and Perspectives of Biomass from Palm Oil Mill for use as Renewable Energy in Thailand	
21	20	RE-20	Amornthep Pattayanun; Krischonme Bhumkittipich	Optimal Placement of Large-Scale PV Power Generation Systems in Radial Distribution Systems for Loss Reduction	
22	21	RE-21	Taswal Kumpeerapun; Voravit Kosalathip; Jongjit Hirunlabh	Electricity by Waste Heat Recovery from Household Equipments	
23	22	RE-22	Sawat yukhalang and Krischonme Bhumkittipich	Load-Frequency Control of Interconnected Power System by using Fuzzy Logic Controller	
24	23	RE-23	Supawat Kamtip and Krischonme Bhumkittipich	Design and Analysis of Interleaved Boost Converter for Renewable Energy Applications	
25	24	RE-24	Udomsak Yoosanong and Krischonme Bhumkittipich	Analysis Overvoltage Problem at Terminal of Induction Motors	
26	25	RE-25	Sontaya Manmai, Nathabhat Phankong, Krischonme	Modeling of Grid-connected with Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) by Using Vector Control	
27	26	RE-26	Seksit Kheamtong and Krischonme Bhumkittipich	Design of an Algorithm for Faults Location on 22 kV Distribution System	
28	27	RE-27	Nopparat Mounghum, Wanchai Subsingha	SVPWM AC-DC Converter by Do Frame Control Technique	



ANALYSIS OVERVOLTAGE PROBLEM AT TERMINAL OF INDUCTION MOTORS

Udomsak Yoosanong and Krischonme Bhumkittipich

Power and Energy System Research Center (PSRC), Rajamangala University of Technology Thunyaburi, 39 Moo 1 Rangsit-Nakhonnayok Rd. Klong 6, Thunyaburi Pathum Thani, 12110 Thailand, Corresponding Author: E-mail: krischonme.b@en.rmutt.ac.th

ABSTRACT

This paper present the analysis overvoltage problem at terminal of induction motors drive by PWM inverter at long cable. For analysis problem, in industrial have the long cable between inverter drive with induction motor cause insulate of winding the motor damage. This problem in paper used MATLAB program analysis and simulation include the high-frequency cable model and high-frequency induction motor model. The cable used in paper is AWG length 35 m and 75 m. For induction motor 1.5 Kw, 3 phase 380 V. The result of paper found that key factor caused problem is impedance of long cable and induction motor, the overvoltage have the value around 2 time of the DC link in inverter drive.

Keyword: PWM Inverter, Impedance, D.C. Link

INTRODUCTION

In the Induction motor drive system with electronic devices are being used more widely in the industry with an easy-to-performance induction motor control the machine properly and to save energy machine. It is time for the development of electronic devices such as power transistor or Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBT) has the ability to work in the switching frequency and high voltage electrical currents. The adoption of the IGBT is developed for induction motor speed control (Variable Speed Drives, VSD) with a control technique that is widely used in the PWM (Pulse-Width Modulation).

The characteristic of the IGBT switching frequency up to 20 kHz. [1] As a result, the voltage and time dv/dt 500 - 600 v/ μ s. (c.g.B.Basavaraja et al.,2006) of the changes. in the case of power cable

between the output of the inverter and motor, the distance will result in voltages exceeding the power of the motor. It is the result of the impedance of the cable conductors and motor. (c.g. B.Basavaraja et al., 2007) (c.g. Toshiba et al., 2000)

This paper presents the simulation of such problems by using computer program to simulate three-phase induction motor of 1.5 Kw, 380 V. The cable size range 4 sq.mm, cable 35 meters and 75 meters. Order

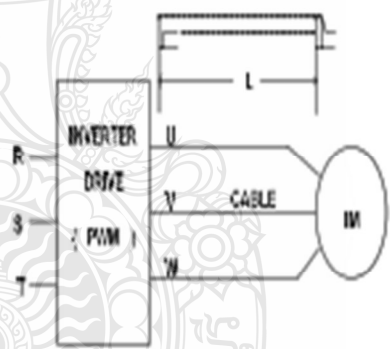


Figure1. Diagram of the problem

INVERTER MODEL

Because the overvoltage at Terminal of motor occur DC link voltage in inverter has changed dv/dt Cause the voltage at the DC Link as a reference. DC Link voltage is determined from the equation.

$$V_{dc} = 3 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \times V_s \tag{1}$$

When, V_{dc} is a voltage at D.C. link and V_s is Voltage input for VSD

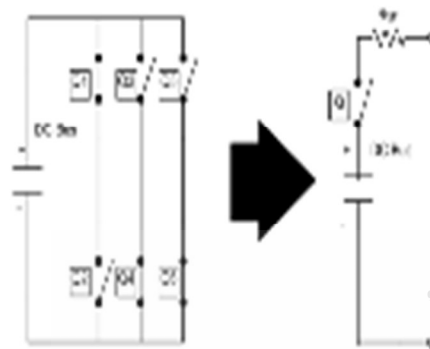


Figure2. Inverter model used analysis

Figure 2 shows schematic diagram inverter 3 phase transfer circuit diagram use for switching model in PWM inverter 2 level simulations.

f_{low} are the lowest (100 Hz) and highest (2 MHz) test frequency in the impedance measurement.

$$R_x = \frac{2}{3} \text{Real}\{Z_{sc}\} f_{low} \tag{3}$$

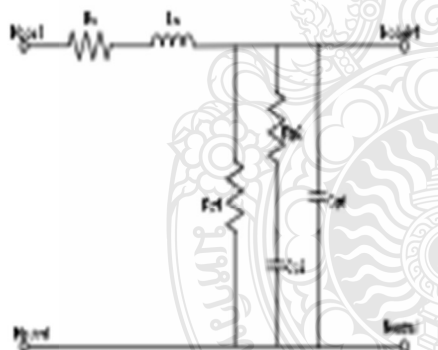
$$L_x = \frac{2}{3} \frac{1}{2\pi f_{high}} \text{Imag}\{Z_{sc}\} f_{high} \tag{4}$$

$$R_{p1} = 2 \left(\text{Real}\{Z_{oc}\} f_{low} \left[\left(\frac{\text{Imag}\{Z_{oc}\} f_{low}}{\text{Real}\{Z_{oc}\} f_{low}} \right)^2 + 1 \right] \right) \tag{5}$$

$$R_{p2} = 2 \left(\text{Real}\{Z_{oc}\} f_{high} \left[\left(\frac{\text{Imag}\{Z_{oc}\} f_{high}}{\text{Real}\{Z_{oc}\} f_{high}} \right)^2 + 1 \right] \right) \tag{6}$$

HIGHT- FREQUENCY CABLE MODEL

An estimations of the cable parameter use for simulations this paper present cable model include impedance of long cable, RLC per-unit length. Figure3. Parameter RLC estimations for equation (2)-(8) (c.g. Alessandro et al., 2002)



$$C_{p1} = \left[\left(\frac{\text{Real}\{Z_{oc}\} f_{high}}{2\pi f_{high}} \right) \left(\frac{\text{Real}\{Z_{oc}\} f_{high}}{\text{Imag}\{Z_{oc}\} f_{high}} \right) R_{p2} \right]^{-1} \tag{7}$$

$$C_{p2} = \left[\left(\frac{\text{Real}\{Z_{oc}\} f_{low}}{2\pi f_{low}} \right) \left(\frac{\text{Real}\{Z_{oc}\} f_{low}}{\text{Imag}\{Z_{oc}\} f_{low}} \right) R_{p1} \right]^{-1} - C_{p1} \tag{8}$$

When R_s is resistance of short circuit impedance. L_s is the inductance of short circuit-impedance Resistance of open circuit impedance is R_{p1}, R_{p2} and C_{p1}, C_{p2} is the capacitance of open circuit- impedance

HIGH-FREQUENCY INDUCTION MOTOR MODEL

Figure3. High-frequency model of the power cable per-unit length.

The cable characteristic impedance is calculated from short-circuit and open-circuit impedances according to (2) (c.g. Alessandro et al., 2002)

$$Z_0 = \sqrt{Z_{oc} Z_{sc}} \tag{2}$$

When, Z_0 is the cable characteristic Z_{oc} is open circuit impedance and Z_{sc} is short circuit impedance

The experiments were conducted using 1-m samples of the cable gauges: #6 AWG. in which f_{low} and

Another key factor for analysis overvoltage at terminal induction motor is input impedance of motor the value of input impedance varies as a function of frequency. (c.g. Alessandro et al., 2002). The model motor input impedance is based on high-frequency model. The parameter of the model are derived using the frequency responses of the phase-to-neutral impedance (Z_{pn}) and phase-to-ground impedance (Z_{pg})(6). Parameter of high frequency model estimations for equation (9)-(15) (c.g. Alessandro et al., 2002) The experiments were induction motor use 3 phase 1.5 Kw. 380 V

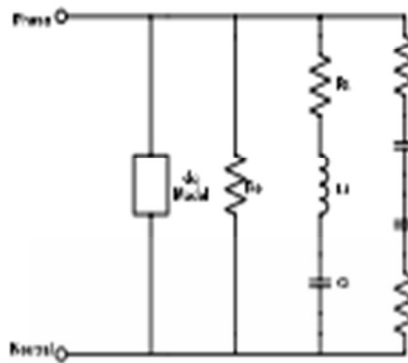


Figure4. High-frequency of induction motor and the dynamic d-q model

Fig 4 Show the proposed per-phase high-frequency motor model that is used in the calculation on the overvoltage. The dynamic d-q model is responsible for capturing the low-frequency transient, while the remaining network is responsible to represent the high-frequency phenomena. Winding-to-ground capacitance and winding turn-to-turn capacitance is the major role in the high-frequency phenomena (e.g. Alessandro et al., 2002) (e.g. Said et al., 2008). In order to estimate the parameter of high-frequency part of the model, it is suggested to replace the d-q model by a lumped inductance L_d .

When C_g is winding to ground capacitance R_g is motor frame resistance L_d is lumped inductance R_r is responsible to account for losses introduced by eddy current inside the magnetic core and R_r, L_r, C_r is The part of the network responsible to capture the second resonance in the frequency response

SIMULATION AND RESULT ANALYSIS OF OVERVOLTAGE

For inverter model, high-frequency cable model and high-frequency induction motor model can be simulated in the MATLAB program. This paper used #6 AWG cable length 35 m and 75 m. Induction motor size 1.5 Kw, 3 phase 380 V.

$$C_g = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} \right) \frac{1}{(2\pi f_{low}) \text{Imag} \{ Z_{pg} \} f_{low}} \quad (9)$$

$$R_g = 3 \times \text{Re} \{ Z_{pg} \} f_{high} \quad (10)$$

$$L_d = \frac{2}{C_g} \left(\frac{1}{2\pi f_{pole} - Z_{pn}} \right)^2 \quad (11)$$

$$R_c = 3 \times \text{Im} \{ Z_{pn} \} f_{pole} \cdot Z_{pn} \quad (12)$$

$$C_l = \frac{C_g}{10} \quad (13)$$

$$L_l = \frac{1}{C_l} \left(\frac{1}{2\pi f_{zcr0} - Z_{pn}} \right)^2 \quad (14)$$

$$R_l = 3 \times \text{Re} \{ Z_{pn} \} f_{zcr0} \cdot Z_{pn} \quad (15)$$

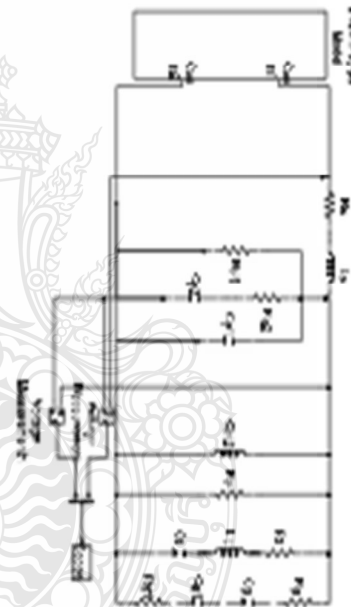


Figure5. The schematic diagram used simulation overvoltage

Figure 5 used the high-frequency cable model connected high-frequency induction motor model and used input is PWM inverter model simulation in MATLAB program

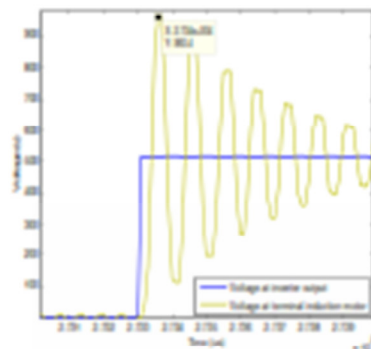


Figure6. The voltage at cable length 35 m.

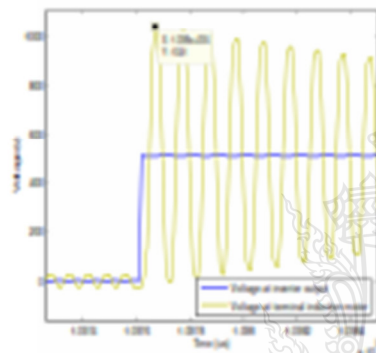


Figure7. The voltage at cable length 75 m

For the Figure 6 result of simulation is voltage at inverter output around 515 V. But voltage at terminal of induction motor has over value of overvoltage is 960 V. Fig 7 result of simulation is voltage at inverter output is same Fig 6. But voltage at terminal of induction motor has over than Fig 6 the value overvoltage is 1041 V.

CONCLUSIONS

This paper used MATLAB program simulation problem found that overvoltage at terminal of induction motor have high value depending on impedance in long power cable according this paper present overvoltage at terminal of induction motor in case cable length 75 m have overvoltage more than 35 m. So the industrial are need surge suppression for protection insulator of winding inverter damage.

REFERENCES

- B. Basavanaja, and D.V.S.S.Siva Sarma 2006. Analysis of the Overvoltage in PWM-Inverter fed Induction Motors, NIT Warangal, Andhra Pradesh, India.
- Toshihisa Shimizu, Mikiya Saito and Masanori Nakamura 2009. Calculation of Motor Surge Voltage under the use of a Surge Suppression Cable, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan.
- Alexandro F. Moreira, Thomas A. Lipo, Giri Venkataramanan, Steffen Bernet 2002. High-Frequency Modeling for Cable and Induction Motor Overvoltage Studies in Long Cable Drives, University of Wisconsin, Madison, USA.
- Said Amair, and Kamal Al-Haddad 2008. A Modeling Technique to Analyze the Impact of Inverter Supply Voltage and Cable Length on Industrial Motor-Drives, Quebec University, Montreal, Canada.
- B. Basavanaja, and D.V.S.S.Siva Sarma 2007. Modelling, Simulation and Experimental Analysis of transient terminal Overvoltage in PWM-Inverter fed Induction Motors, NIT Warangal, Andhra Pradesh, India.



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

บทความวิจัย

- ไฟฟ้ากำลัง
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง
- ไฟฟ้าสื่อสารและโทรคมนาคม
- ระบบควบคุมและการวัดคุม
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ
- พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน
- นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า

บทความวิชาการ

27-29 มีนาคม 2556 โรงแรมหัวหินแกรนด์ แอนด์ พลาซ่า จังหวัดประจวบคีรีขันธ์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

EENET2013



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5
 Proceedings of The 5th Conference of Electrical Engineering Network of Rajabhat Udon Thani of Technology (EENET 2013)



รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ
 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

ผู้ทรงคุณวุฒิ	หน่วยงาน
ศาสตราจารย์ ดร. วัลลภ	สุระก่าพลธร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. นรินทร์	วัฒนกุล มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร. พิชัย	อารีย์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร. อนุวัฒน์	จางวนิชาติ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. ปุศักร์	ชีวิวิทย์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. วิจิตร	กิมเรศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. วิสุทธิ์	ฐิติรุ่งเรือง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. สมพร	สิริสารอนุกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. สุขสันต์	หวังสถิตย์วงศ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์	ชันนาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต	เนียมมณี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร. ธนัชชัย	ภูตวรวานิชพงษ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร. เวทิน	ปวิรัตน์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เนนบุญ	หุนเจริญ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุวิชัย	เคชชอนันต์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรพงษ์	สุวรรณกวิน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรินทร์	คำฝอย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยุทธนา	ข้าสุวรรณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อภิภาวัลย์	นาคทรัพย์ มหาวิทยาลัยสยาม
อาจารย์ ดร. ชาญณรงค์	บาลมงคล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
อาจารย์ ดร. นาดยา	คล้ายเรือง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
อาจารย์ ดร. อยุทธ	นราภรณ์ มหาวิทยาลัยสยาม
อาจารย์ ดร. นิमित	บุญภิรมย์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
อาจารย์ ดร. สมมาตร	แสงเงิน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

Proceedings of The 5th Conference of Electrical Engineering Network of Rajabhat Udon Thani University of Technology (EENET 2013)



รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

ผู้ทรงคุณวุฒิ	หน่วยงาน
อาจารย์ ดร. วุฒิวัฒน์	กองรัตนประเสริฐ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ ดร. สายชล	ชุดเจือจีน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ชัยณรงค์	วิเศษศักดิ์วิชัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิโรจน์	เพชรพันธุ์ศรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุกัญ	พลสิงห์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิพนธ์	ทางทอง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ประหยัด	กองสุข มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์ภัทรพงศ์	อัญชันภาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์สมพล	โคศรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์สมยศ	สันติมาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
อาจารย์ทัศนีย์	สุวรรณศักดิ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ฤกษ์ชัย	ภูมิศักดิ์พิชญ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย	ทรัพย์สิงห์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จักรวิ	ศรีนันทมิตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. จักรชัย	สุกทิพย์สกุล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. กิตติวัฒน์	นิมเกิดผล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. บุญยัง	ปลั่งกลาง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. สุรินทร์	แห่งมงาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชัย	หิรัญวโรดม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. อำนวย	เรืองวารีย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร. ณัฐภัทร	พันธุ์คง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย	แดงเอม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐวุฒิ	โสมะเกษมศรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์พนิจ	จิตจริง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์สมชาย	เบียนสูงเนิน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

Proceedings of The 5th Conference of Electrical Engineering Network of Rajabhat University of Technology (EENET 2013)



รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ สำหรับการพิจารณาบทความ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

ผู้ทรงคุณวุฒิ	หน่วยงาน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.ประสพ โชค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.มนตรี สมดุลยภณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์อดิศักดิ์ แข็งสารวิกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กันต์พงษ์ ศรีสถิตย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.ไกรฤกษ์ เซอชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.พิชิต กิตติสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์กาญจน์บุษยา พาณิชเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ดิศพล จำเริญกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์โสภา แซ่เอ็ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์สิทธินันท์ บุญปโยทัศน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
รองศาสตราจารย์สมพันธ์ อำพวัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิฑูรย์ พงศ์เทพเกษราวุธ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัช เกิดชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน (นครราชสีมา)
อาจารย์ ดร.พินิจ ศรีธ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน (นครราชสีมา)
อาจารย์ ดร.วรรณรีย์ วงศ์ไตรรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน (นครราชสีมา)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พันธพงษ์ อภิชาติกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน (นครราชสีมา)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วุฒิชัย สง่างาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน (นครราชสีมา)
อาจารย์รุ่งเพชร ก่องนอก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน (นครราชสีมา)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุทธินันท์ ดันโพธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน (นครราชสีมา)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤตวิทย์ นัวใหญ่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน (นครราชสีมา)
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประเสริฐ เคื่อนหมื่นไวย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน (นครราชสีมา)
อาจารย์กิตติวุฒิ จินนบุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน (นครราชสีมา)
อาจารย์ ดร.มงคล กุฑินาย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน (นครราชสีมา)
อาจารย์ ดร.ประจวบ อินระวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอิสาน (นครราชสีมา)



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

Proceedings of The 5th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)



รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

ผู้ทรงคุณวุฒิ		หน่วยงาน
ดร.อภิรดา	นามแสง	สถาบันการบิณฑลเรื้อน
ดร.สุวิทย์	อัคริยะเมต	สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
ดร.ชวงศ์	วัฒนศักดิ์ภูบาล	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
ดร.อรรด	พยอมหอม	การไฟฟ้าานครหลวง
ดร.ปามาณ	กุลวานิช	กรมวิทยาศาสตร์บริการ





สารบัญ

สาขาบทความอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

รหัสบทความ	ชื่อเรื่อง	หน้า
PE01 บทความดีเด่น	การควบคุมคอนเวอร์เตอร์พืงระบบจำหน่ายภายใต้สภาวะแรงดันตกช่วงสั้นสำหรับกังหันลม หรือระบบ คำธาร ¹ บัลดิงก์ เนียมมณี ² และคุณทน คำน่าน ¹ ¹ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ² มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	89
PE02	การออกแบบและควบคุมคอนเวอร์เตอร์พืงระบบจำหน่ายในสภาวะแรงดันไม่สมดุลสำหรับ กังหันลมที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกรงกระรอก หรือระบบ คำธาร ¹ บัลดิงก์ เนียมมณี ² และคุณทน คำน่าน ¹ ¹ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ² มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	93
PE03	การชดเชยแรงดันตกชั่วขณะ โดยใช้เอช-เอช ซี ทีดับเบิลยูเอ็ม คอนเวอร์เตอร์สำหรับประดุกต์ ใช้ในระบบไฟฟ้าสามเฟสสี่สาย วัชริน ศรีวัฒนาวิรัชกุล และคุณชนร ช่างสุวรรณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	97
PE04	การลดสารโหมกต์ด้วยวิธี Pulse Width Modulation สำหรับมอเตอร์ชนิด Flux Concentration Interior PM ศรีสุตา ไชยทองสุข ¹ ประมุข คุณทะเลขกะ ² ทพร ไชยทองสุข ³ และ N. Takorabet ³ ¹ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ² วิทยาลัยเทคนิคคอนเมือง ³ University of Lorraine, GREEN, France.	101
PE05	การชดเชยผลของแคดโทม สำหรับมอเตอร์กระแสสลับชนิดแม่เหล็กถาวร โดยใช้ตัวสังกคการ สัญญาณรบกวนแบบปรับปรุง สุพร หนอง และสุขสันต์ นุ่นงาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	105
PE06 บทความชมเชย	กรณีศึกษาการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ที่มีสายเคเบิลยาว: การเกิดปัญหา แรงดันเกินจกที่ขั้วมอเตอร์ คุณศักดิ์ อดุตหนอง และคุณฉันทน์ ภูมิภักคิทธิชัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	109



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

The 5th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET2013)

เกียรติบัตรฉบับนี้ให้ไว้เพื่อแสดงว่า

คุณศักดิ์ อยู่สนอง และภกฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์

ผู้เขียนบทความวิจัยเรื่อง

กรณีศึกษาการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ที่มีสายเคเบิลยาว

การเกิดปัญหาแรงดันลิ้งค์ชั่วมอเตอร์

ได้รับการพิจารณาให้เป็นบทความชมเชยสาขาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

๑.๑๘๘

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิไลภ ภูษา)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ประธานจัดงานการประชุมวิชาการ EENET2013

The 5th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET2013)
27-29 มีนาคม 2556 ณ โรงแรมรัตนโกสินทร์ แอ่งใต้ พลาซ่า จังหวัดพระจวบคีรีขันธ์

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ศรีรังสิต

Proceedings of The 5th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)

บทความชมเชย สาขาอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

กรณีศึกษาการขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วย PWM อินเวอร์เตอร์ที่มีสายเคเบิลยาว:

การเกิดปัญหาแรงดันเกินที่ขั้วมอเตอร์

A Case Study of PWM Inverter-Fed Motor Drives System with Long Motor Cables:

The Problem Surge Voltage at Terminal Motors

อุดมศักดิ์ อัฐมทอง และ กฤษณ์ชานนท์ ภูมิภักดิ์พิชญ์

ศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าศรีรังสิต

39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทรศัพท์ : 02-5493571 โทรสาร : 02-5493422

E-mail: krischoime.b@en.rmuttc.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอปัญหาการเกิดแรงดันเกินที่ขั้วมอเตอร์เมื่อถูกขับโดย PWM อินเวอร์เตอร์ที่มีสายเคเบิลจากอินเวอร์เตอร์กับมอเตอร์ที่าว ซึ่งจากการจำลองสายเคเบิลที่มีความถี่สูงด้วยวงจรสมมูล ทำให้ทราบถึงกลไกในการเกิดแรงดันเกิน และสามารถนำไปพัฒนาอุปกรณ์ป้องกันข้อได้ในอนาคต โดยบทความฉบับนี้จะใช้ความยาวของสายเคเบิล #6 AWG และมอเตอร์ขนาด 1.5 Kw, 380 V. โดยการจำลองจะแบ่งความยาวของสายเคเบิลเป็นสองความยาว 35 ม. และ 75 ม. ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลต่างกันและอยู่ในสภาวะ โหมดร่วมกับอุปกรณ์ จากผลการจำลองพบว่าที่เคเบิลความยาว 75-ม. เกิดแรงดันเกินมากถึง 961 V. ซึ่งเป็นอันตรายต่อขั้วมอเตอร์

คำสำคัญ: อินเวอร์เตอร์ การเกิดแรงดันเกินที่ขั้วมอเตอร์ โหมดร่วม

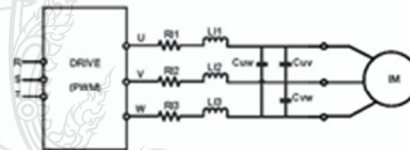
Abstract

This paper presents a mitigation of surge voltage at terminal motor was driven by PWM inverter has cable from inverter to motor that long. A high-frequency model of the long cable represented by an equivalent circuit and made to study the behavior of the surge voltage and can be development of protective device to have in the future. The length of the cable this paper is #6-AWG and motor size 1.5 Kw, 380 V. in the simulation divide length of the cable is 2 length 35 m and 75 m which the impedance of cable different and common mode with device for the simulation show s cable length 75 m. have surge voltage up to 1,041 V. which a damage for insulation motor

Keywords: Inverter, Surge voltage at terminal motor, Common Mode

1. บทนำ

เนื่องด้วยเครื่องจักรในภาคอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนในการผลิตและด้วยจากการวางผังการเดินสายป้อนสำหรับควบคุมการทำงานของมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์มีระยะห่างห่างกันมากในบางกรณี รูปที่ 1 นำเสนอแบบจำลองของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีสายเคเบิลยาว



รูปที่ 1 แบบจำลองระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ที่มีสายเคเบิลยาว

จากแบบจำลองจะเห็นได้ว่านอกจากค่าความต้านทาน R_i และค่าความเหนี่ยวนำ L_i ในกรณีที่มีสายเคเบิลยาวนี้จะพิจารณาค่าตัวเก็บประจุระหว่างสาย C_{ij} ด้วย [1-5] เมื่ออินเวอร์เตอร์มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันสูงตามสัญญาณของ PWM (Pulse Width Modulation) ค่าค่าอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลที่รวมไว้ทำให้เกิดแรงดันเกินที่ขั้วของมอเตอร์มีค่าสูงเกินไปด้วย ซึ่งสาเหตุปัญหาที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลให้เกิดความเสียหายกับมอเตอร์เนื่องจากการเกินของพิกัดแรงดันขั้วของมอเตอร์ [1][3] และยังสามารถเกิดคลื่นเสียงรบกวนที่ขั้วอินเวอร์เตอร์เนื่องจากความรบกวนที่เกิดจากการแผ่กระจายของประจุของสายเคเบิลที่ยาว [2]

จากปัญหาดังกล่าวสามารถนำมานำวิเคราะห์หาสาเหตุการในรูปแบบแรงดันสัมพันธ์กับความยาวของสายโดยที่แทนค่าความยาวด้วยอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลจะ ได้สมการดังนี้[4]

$$V_s = (1 - \Gamma) V_{in} \quad (1)$$

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ ครั้งที่ 5

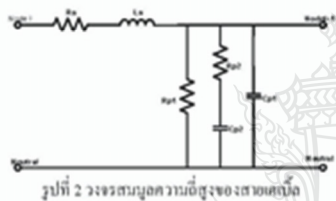
Proceedings of The 5th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)

$$\Gamma = \left(\frac{Z_o - Z_{in}}{Z_o + Z_{in}} \right) \quad (2)$$

จากสมการ(1)-(2) จะได้ V_o เป็นแรงดันที่เกินเกิดขึ้น Γ คือสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนของแรงดันที่มีค่าสัมพันธ์กับอิมพีแดนซ์ของสาย Z_o และอิมพีแดนซ์ของโหลด Z_L

2. วงจรสมมูลความถี่สูงของระบบขับเคลื่อนที่มีสายเคเบิลยาว

ในการวิเคราะห์ข้อมูลของระบบขับเคลื่อนที่มีสายเคเบิลยาว จะสามารถพิจารณาทางประกอบต่างๆ ได้บนอานุกรการทำงานที่ความถี่สูง ความถี่พาหะในการทำงานแบบ PWM อินเวอร์เตอร์จะประกอบด้วยหลักในการวิเคราะห์ได้แก่ รูปที่ 2 วงจรสมมูลความถี่สูงของสายเคเบิล และ รูปที่ 3 วงจรสมมูลความถี่สูงของมอเตอร์ [4][5]



รูปที่ 2 วงจรสมมูลความถี่สูงของสายเคเบิล

จากวงจรสมมูลความถี่สูงของสายเคเบิลจะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของสายเคเบิล ได้จากการหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายในสถานะอิมพีแดนซ์และเปิดวงจรดังสมการที่ (1)

$$Z_o = \sqrt{Z_{oc} Z_{sc}} \quad (3)$$

โดยที่ Z_o คืออิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล Z_{sc} คืออิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลขณะเปิดวงจรและ Z_{oc} คืออิมพีแดนซ์ขณะอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลที่ความถี่สูงได้

$$R_s = \frac{2}{3} \text{Re}\{Z_{oc}\} f_{low} \quad (4)$$

$$L_s = \frac{2}{3 \cdot 2\pi} \frac{1}{f_{high}} \text{Im}\{Z_{oc}\} f_{high} \quad (5)$$

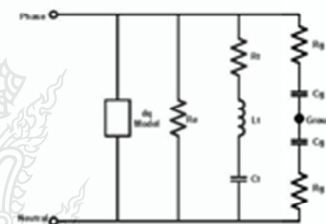
$$R_{p2} = 2 \left(\text{Re}\{Z_{oc}\} f_{low} \right) \left[\frac{\text{Im}\{Z_{oc}\} f_{low}}{\text{Re}\{Z_{oc}\} f_{low}} + 1 \right] \quad (6)$$

$$R_{p2} = 2 \left(\text{Re}\{Z_{oc}\} f_{high} \right) \left[\frac{\left(\frac{\text{Im}\{Z_{oc}\} f_{high}}{\text{Re}\{Z_{oc}\} f_{high}} \right)^2 + 1}{1} \right] \quad (7)$$

$$C_{p2} = \left[2\pi f_{high} \frac{\text{Re}\{Z_{oc}\} f_{high}}{\text{Im}\{Z_{oc}\} f_{high}} \right]^{-1} R_{p2} \quad (8)$$

$$C_{p1} = \left[2\pi f_{low} \frac{\text{Re}\{Z_{oc}\} f_{low}}{\text{Im}\{Z_{oc}\} f_{low}} \right]^{-1} R_{p1} - C_{p2} \quad (9)$$

จากสมการ(2)-(7) จะได้ R_{p1} คือค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำของอิมพีแดนซ์สายเคเบิลแบบเปิดวงจร R_{p1}, R_{p2} คือค่าความต้านทานของอิมพีแดนซ์สายเคเบิลแบบเปิดวงจรและ C_{p1}, C_{p2} คือค่าคาบขั้วเดินขงอิมพีแดนซ์สายเคเบิลแบบเปิดวงจร



รูปที่ 3 วงจรสมมูลความถี่สูงของมอเตอร์

จากวงจรสมมูลความถี่สูงของมอเตอร์จะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ในสถานะความถี่สูงได้จากสมการ (8)-(14) โดยจะไม่พิจารณา ω_c Model เนื่องมาจากในเครื่องกล่าจะมีความถี่สูงในส่วนของความถี่สูงจะมีผลกระทบน้อยลงอีกน้อย [4][5]

$$C_g = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} \frac{1}{(2\pi f_{low}) \text{Im}\{Z_{pg}\} f_{low}} \right) \quad (10)$$

$$R_g \approx 3 \cdot \text{Re}\{Z_{pg}\} f_{high} \quad (11)$$

$$L_d \approx \frac{2}{C_g} \left(\frac{1}{2\pi f_{pole} - Z_{pn}} \right)^2 \quad (12)$$

$$R_c \approx 3 \cdot \text{Im}\{Z_{pn}\} f_{pole} - Z_{pn} \quad (13)$$

$$C_t \approx \frac{C_g}{10} \quad (14)$$

$$L_t \approx \frac{1}{C_t} \left(\frac{1}{2\pi f_{zero} - Z_{pn}} \right)^2 \quad (15)$$

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

Proceedings of The 5th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2019)

$$R_1 \approx 3 \times \text{Real}\{Z_{pn}\} \times f_{\text{zero}} - Z_{pn} \quad (16)$$

โดย C_e คือค่าการเป่ากระแสของขดลวด R_e คือความต้านทานที่เฟรมของมอเตอร์ L_e คือค่าอินดักแตนซ์รวมของมอเตอร์ R_s คือผลคูณของค่าความสูญเสีย Eddy Current Loss และ $C_e L_e R_s$ คือส่วนของผลคูณของค่าความถี่

3. การจำลองการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่ขั้วของมอเตอร์

ในการจำลองที่ใช้ในการนำเสนองานวิจัยฉบับนี้ได้ใช้มอเตอร์ขนาด 1.5 Kw, 380 V, 3 Phase เป็นารจำลองและใช้สายเคเบิ้ล #6 AWG ที่มีความยาวของสายเท่ากับ 35 m และ 75 m

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของวงจรสมมูลความถี่สูงของสายเคเบิ้ล [3]

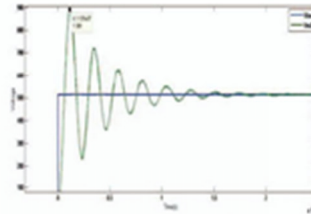
Cable Gauge	R_s (kΩ)	L_s (mH)	R_{p1} (kΩ)	R_{p2} (kΩ)	C_{p1} (pF)	C_{p2} (pF)
6	1.5	0.24	173.9	13.9	137.1	22.5
8	6.0	0.20	262.1	21.2	119.7	15.3
10	7.0	0.28	221.7	18.9	125.4	17.7

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของวงจรสมมูลความถี่สูงของมอเตอร์ [3]

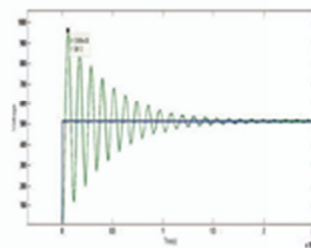
Rate (HP)	C_s (pF)	R_s (kΩ)	L_s (mH)	R_r (kΩ)	C_r (pF)	L_r (mH)	R_r (kΩ)
2	290	15.3	5.1	3.9	29	0.27	0.324
3	314	35.5	4.0	5.6	31.4	2.7	1.15
7.5	700	36.2	0.55	3.3	70	0.21	0.94

4. ผลการจำลองการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่ขั้วของมอเตอร์

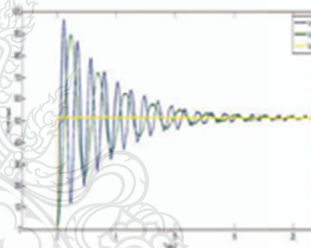
ผลการจำลองการเกิดปัญหาแรงดันเหนี่ยวนำที่ขั้วของมอเตอร์ในงานวิจัยพบว่าแรงดันเหนี่ยวนำที่ขั้วของมอเตอร์ที่มีความยาวสายเคเบิ้ล 35 m รูปที่ 5 มีค่าสูงเท่ากับ 891 V. ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดันที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ที่มีค่าเท่ากับ 500-600 V. ใน DC Link ของอินเวอร์เตอร์ ในส่วนแรงดันเหนี่ยวนำที่สายเคเบิ้ลมีความยาว 75 m รูปที่ 6 พบว่าแรงดันเหนี่ยวนำที่ขั้วของมอเตอร์มีค่ามากขึ้นเท่ากับ 961 V. และยังมีอัตราแอมพลิจูดของแรงดันมากกว่าสายเคเบิ้ลที่มีความยาว 35 m. ค่าที่ได้อธิบายของสายเคเบิ้ลนั้นเอง



รูปที่ 4 ผลการจำลองที่ความยาวเคเบิ้ลเท่ากับ 35 m.



รูปที่ 5 ผลการจำลองที่ความยาวเคเบิ้ลเท่ากับ 75 m.



รูปที่ 6 ผลการจำลองแรงดันเหนี่ยวนำที่ขั้วของมอเตอร์ที่ความยาว 35 m. และ 75 m.

5. สรุป

การวิจัยในบทความนี้เป็นกรณีนำเสนอปัญหาในภาคอุตสาหกรรมที่เกิดปัญหาเช่นจลน์เร่งให้เกิดความเสียหายต่ออินเวอร์เตอร์และมอเตอร์เนื่องมาจากการที่ระยะสายเคเบิ้ลมีความยาวตั้งแต่ 1 เมตร จากผลการจำลองวัดแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นก่อนเป็นของแหล่งของแรงดันที่ DC Link ในระบบของอินเวอร์เตอร์ ถ้าหากสายเคเบิ้ลยาวเกินไป ค่าอินดักแตนซ์ของสายเคเบิ้ลจะเกิดสภาวะ โหมดร่วมระหว่างสายเคเบิ้ลกับขั้วเป็นเหตุให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้น จากผลการจำลองนี้จำเป็นต้องมีการป้องกันและคิดพัฒนาอุปกรณ์ป้องกัน ซึ่งในภาคอุตสาหกรรมมีราคาสูงและยังไม่แพร่หลาย

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 5

Proceedings of The 5th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET 2013)

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Amari, and K. Al-Haddad, "A Modeling Technique to Analyze the Impact of Inverter Supply Voltage and Cable Length on Industrial Motor Drives", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 23, No. 2, March 2008, pp.753-762.
- [2] N. Aoki, K. Satoh, and A. Nabaie, "Damping Circuit to Suppress Motor Terminal Overvoltage and Ringing in PWM Inverter-Fed AC Motor Drive Systems with Long Motor Leads", *IEEE Transactions on Industry Applications* . Vol. 35, No. 5, September/October 1999, pp.1014-1020.
- [3] Alessandro F. Morsira, Thomas A. Lipo, Giri Venkataramanan, Steffen Bernet 2002. "High-Frequency Modeling for Cable and Induction Motor Overvoltage Studies in Long Cable Drives", University of Wisconsin, Madison, USA.
- [4] Toshihisa Shimizu, Mikiya Saito and Masanori Nakamura 2009. "Calculation of Motor Surge Voltage under the use of a Surge Suppression Cable", Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan.
- [5] Udomsak Yoosang and Krischonern Bhumkitipich, "Analysis Overvoltage Problem at Terminal of Induction Motors", International Conference on Sustainable Energy and Green Architecture, March 2012, pp.45



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายอุดมศักดิ์ อยู่สนอง
วัน เดือน ปี เกิด	4 เมษายน 2528
ที่อยู่	344/5 หมู่ 6 ซ.ชุมชน 7 ถ.พหลโยธิน ต.ทะเลชุบศร อ.เมือง จ.ลพบุรี
การศึกษา	สำเร็จการศึกษา สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้า มหาวิทยาลัยราชภัฏ ธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2548 – 2555	วิศวกร โครงการ ตรีศัคดิ์ กรุ๊ป
พ.ศ. 2555 – ปัจจุบัน	วิศวกร โครงการ หจก. เอ.อี.เพาเวอร์

