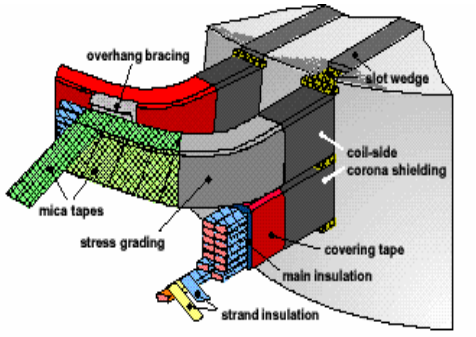
สงวนลิขสิทธิ์ © พ.ศ. 2546 ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ โดย พิรพงศ์ ลิ้มประสิทธิ์วงศ์ ห้ามลอกเลียนแบบไม่ว่าส่วนหนึ่งส่วนใดของบทความฉบับนี้ ไม่ว่าในรูปแบบใดๆ นอกจากจะได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากผู้เขียนเท่านั้น ยกเว้นเพื่อการศึกษาโดยไม่แสวงหากำไร (Copyright © 2003)



พิรพงศ์ ลิ้มประสิทธิ์วงศ์
(Bs.EE$_{KMITN}$., MBA$_{NIDA}$)
pirapongl@siemens.com
Sales Manager, Siemens Limited

ผลกระทบจากอินเวอร์เตอร์ต่อฉนวนมอเตอร์ไฟฟ้า
(Insulation behavior of inverter fed motors)

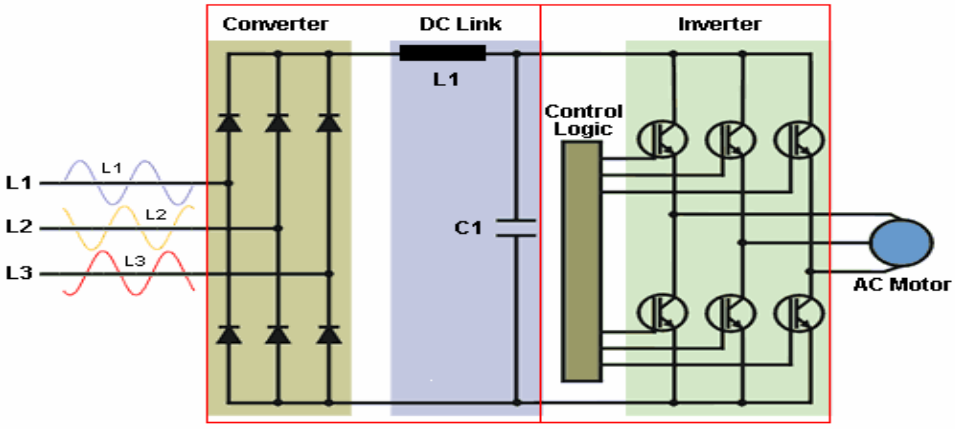
กว่า 20 ปี ของการพัฒนาเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำประเภท เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ หรือ Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs) ทำให้สามารถทนกระแสได้สูง ที่ระดับความถี่และแรงดันสูงได้ ทำให้เกิดการพัฒนาชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ (Variable Speed Drives, VSDs) ชนิดแบบ PWM ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เพื่อมาทดแทนการปรับความเร็วรอบจากระบบทางกล ซึ่งก่อนหน้านี้อาจจะใช้ระบบไฮโดรลิกคลับปริ้ง หรือการใช้เกียรเพื่อการทดรอบเป็นช่วงๆ ดังนั้น IGBTs จึงได้ถูกนำมาใช้แทนทรานซิสเตอร์ และ Gate Turn Off thyristors (GTOs) ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคเดิมของชุดปรับความเร็วรอบมอเตอร์ในอดีต

ตามหลักการของการออกแบบชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ หรือคอนเวอร์เตอร์ (คอนเวอร์เตอร์ประกอบด้วยภาคเร็กติไฟเออร์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง และภาคอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับ) เราต้องการให้ง่ายต่อการใช้งาน และง่ายต่อการควบคุม มีความคงทนไม่เสียง่าย อายุการใช้งานยาวนาน ลดความสูญเสียให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ไม่ต้องการให้เกิดเสียงรบกวน(Noise) และต้องการให้มอเตอร์ตอบสนองต่อแรงบิดให้เร็วทันตามต้องการ ตามทฤษฎีสามารถทำได้วิธีหนึ่งคือ สวิทชิ่ง PMW ที่ความถี่สูง แน่นอนเมื่อต้องการอย่างหนึ่งก็ย่อมต้องเสียอีกอย่างหนึ่ง

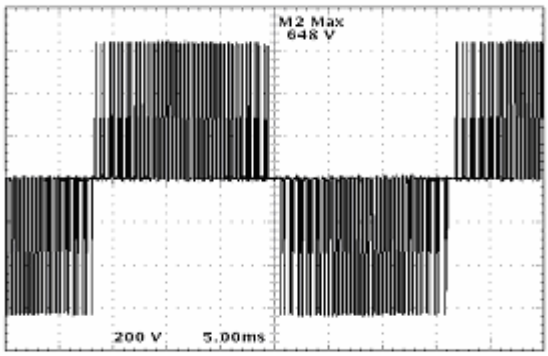
จากคุณสมบัติของ IGBT เมื่อสวิทชิ่งที่ความถี่สูงจะมีปัญหาตามมาคือ เกิด EMC และเพิ่มความเสี่ยงที่ฉนวนมอเตอร์จะเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากแรงดันทรานเซียน หรือแรงดันเกินที่ไม่ต้องการ จากคุณสมบัติ dv/dt จะมีรูปคลื่นแปลกปลอมที่เราไม่ต้องการผสมในคลื่นไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่มอเตอร์ อาจจะทำให้อายุการใช้งานของฉนวนมอเตอร์สั้นลงกว่าปกติ ดังนั้นการเลือกใช้ฉนวนของขดลวดในสเตเตอร์จำเป็นจะต้องได้รับการพิจารณาเลือกใช้ให้เหมาะสมกับแรงดัน เช่น ระบบไฟฟ้า 690 โวลท์ หรือสูงกว่า รวมกระทั้งการเลือกใช้ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่เหมาะสมกับการใช้งาน การเลือกใช้ชนิดของฉนวนมอเตอร์ไฟฟ้าให้เหมาะแก่อุณหภูมิและความชื้นตามสภาพการใช้งาน นับรวมไปถึงขนาด, ชนิด และความยาวของสายเคเบิ้ล ที่จะทำให้การทำงานทั้งระบบทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และยาวนานตามอายุการใช้งาน

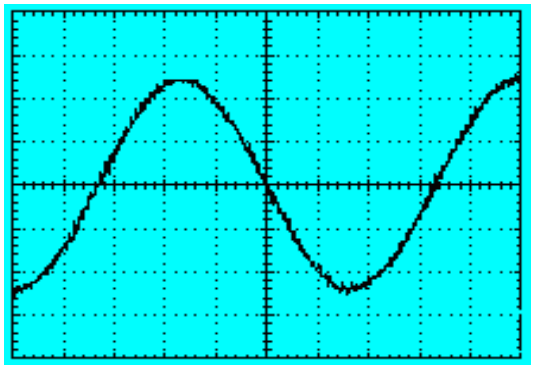
<u>พื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์</u>

จากรูปที่1ก. พื้นฐานวงจรไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์แบบ Voltage Source, PWM จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟส ผ่านชุด ไดโอดเรกติฟายร์ แปลงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็น ไฟฟ้ากระแสตรง เรียกว่า "DC Link" DC Linkจะประกอบไปด้วยคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่ต่อขนาน บางครั้งอาจจะมี อินดักเตนซ์ต่ออนุกรมเพื่อลด di/dt พลังงานจะถูกเก็บไว้ที่ DC Link โดย คาปาซิเตอร์ทำหน้าที่กรองรูปคลื่นให้เรียบมากขึ้น ไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกชุดอินเวอร์เตอร์สวิทชิ่งให้เกิดย่านความถี่ต่างๆ โดยมีค่าแรงดันสูงสุดคงที่ตามค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ผ่านการเร็กติไฟร์แล้ว ความถี่ที่สวิทชิ่งอาจจะกว้างหรือแคบในแต่ละช่วงจังหวะจะเป็นไปตามรูปแบบ PWM การปรับความถี่หรือการปรับแรงดัน rms สามารถทำได้โดยการปรับย่านความกว้างและจังหวะในการสวิทชิ่ง ตามรูปที่1ข. แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM แบบชนิด 2 ระดับ (2 Level)



<u>รูปที่1ก. พื้นฐานวงจรไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์แบบ Voltage Source, PWM</u>





รูปที่1ข. แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM *รูปที่1ค. รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามอเตอร์*

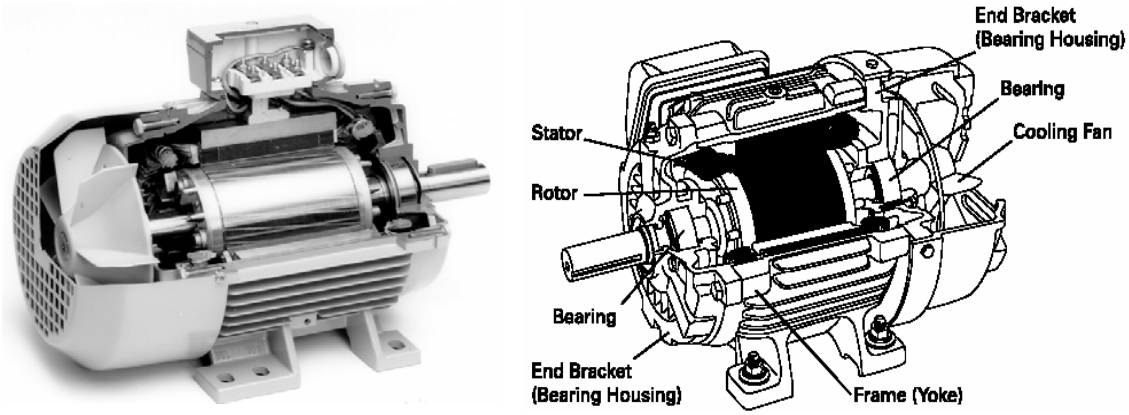
จากรูปที่1ข. แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ถูกส่งผ่านเข้าไปยังมอเตอร์ ทำให้เกิด รูปคลื่นซายน์เวฟของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามอเตอร์ ตามรูปที่1ค. อันเป็นผลกระทบอันเนื่องมาจากค่าอินดักเตนซ์ของมอเตอร์ที่มีปริมาณมากกว่าค่าความต้านทาน จึงแปลงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า PMW ตามรูปที่ 1ข. เป็นรูปคลื่นซายน์เวฟของกระแสไฟฟ้าที่มีริปเปิ้ลบ้างเล็กน้อย

การเพิ่มความถี่ของ PWM ให้สูงขึ้นจะทำให้รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าจะมีค่าใกล้เคียงกับ รูปคลื่นซายน์เวฟมากเท่านั้น (ลดกระแสฮาโมนิกส์) ปัจจุบัน IGBT สามารถจะทำการสวิทชิ่งสำหรับกระแสสูง หรือไดร์ฟตัวใหญ่ ที่ความถี่ 2 kHz ถึง 20kHz+สำหรับไดร์ฟตัวเล็กได้ (ประมาณสิบปีที่ผ่านมาทรานซิสเตอร์สวิทชิ่งประมาณ 0.1-1kHz เท่านั้น) ดังนั้นความเร็วของการสวิทชิ่ง และเทคนิคในการสวิทชิ่งมีผลอย่างมากต่อการการพัฒนาชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ รวมไปถึงผลที่จะอาจจะตามมาทั้งข้อดีและข้อเสียที่เกิดกับระบบคือ

1. ประสิทธิภาพของมอเตอร์ (Motor Efficiency)
2. ความสูญเสียที่คอนเวอร์เตอร์ (Inverter losses)
3. เสียงรบกวนที่เกิดขึ้นที่ตัวมอเตอร์ และคอนเวอร์เตอร์ (Motor/Inverter audible noise)
4. การตอบสนองต่อแรงบิดที่มอเตอร์ (Torque response or dynamic performance)
5. การขับโหลดที่รอบต่ำๆ (Low speed operating characteristics)
6. การลดค่าสูงสุดการใช้งานของมอเตอร์ (Motor de-rating)
7. สนามแม่เหล็กรบกวน (Electromagnetic radiation.)
8. แรงดันสูงสุดที่มอเตอร์ (Peak Motor Voltage)

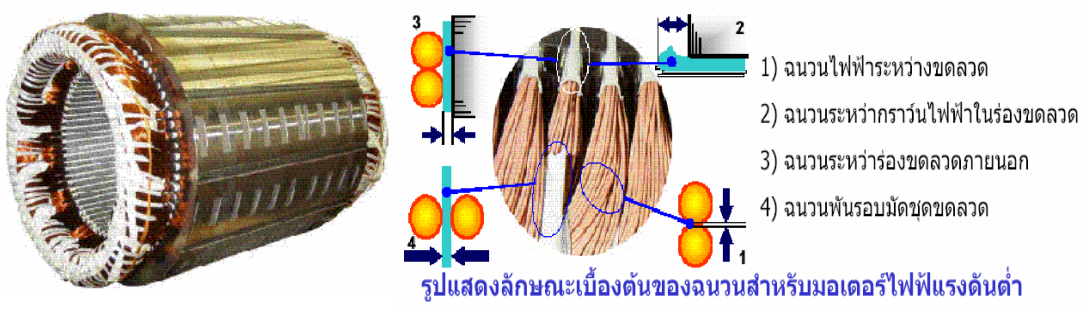
มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก

เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอกสามเฟสนั้นเป็น เครื่องกลที่แปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ ให้เป็นพลังงานกลที่มีความแข็งแรง ทนทาน ง่ายต่อการการเริ่มหมุน และมีความนิยมนำมาใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะการเริ่มหมุนแบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้าโดยตรง (Direct On Line, DOL) ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวก ราคาประหยัด บำรุงรักษาน้อย และให้แรงบิดเริ่มหมุนได้เต็มพิกัด แต่ก็จะต้องสูญเสียการกระชากของกระแสอย่างมากจากแหล่งจ่าย (ประมาณ 5-7 เท่าของกระแสใช้งาน) และแรงบิดเริ่มหมุนจะกระชากไม่นิ่มนวล



รูปที่ 2 แสดงลักษณะโครงสร้างของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก

จากรูปที่ 2 แสดงมอเตอร์โดยทั่วไปจะประกอบด้วยโครงเหล็กหรืออลูมิเนียมด้านนอกครอบสเตเตอร์ที่ทำจากแผ่นเหล็กบางเรียงอัดซ้อนกัน พร้อมขดลวดทองแดงหุ้มด้วยฉนวนฝังในร่องสเตเตอร์ แล้วทำการชุบหรือเคลือบด้วยฉนวนวานิช แล้วอบแห้งเพื่อให้ทนทานต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการใช้งาน บางชนิดของมอเตอร์หรือบางโรงงานอาจจะผ่านกรรมวิธี VPI (Vacuum Pressure Impregnation) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเคลือบวานิชให้กระจายทุกซอกทุกมุม เพิ่มความคงทนแข็งแรงอันเนื่องมาจากการสั่นสะเทือน และลดโอกาสที่ฝุ่นละอองจะเข้าไปจับระหว่างขดลวด โดยทั่วไปในปัจจุบันนี้วัสดุของฉนวนที่ใช้ส่วนใหญ่ จะสามารถทนอุณหภูมิได้ตามการออกแบบ ฉนวนไฟฟ้า Class F ซึ่งจะสามารถทนอุณหภูมิได้สูงสุด 155^{O}C

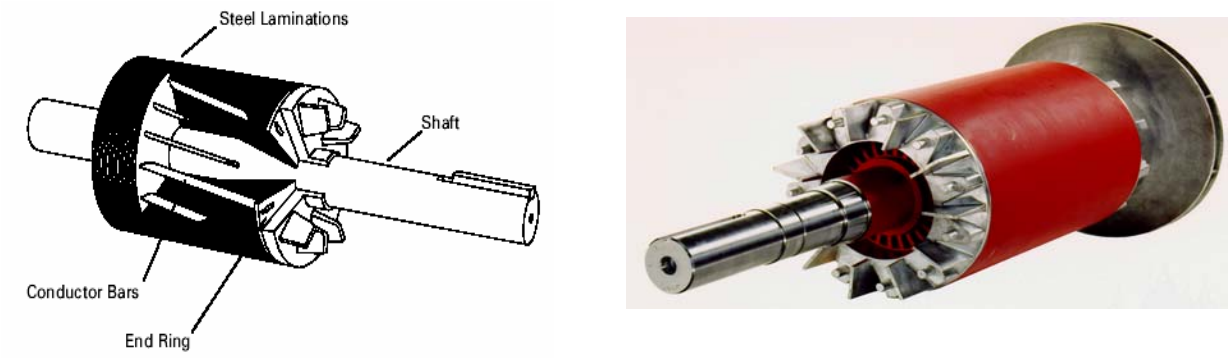


รูปที่ 3 แสดงลักษณะโครงสร้าง และ ขดลวดของ Stator ของมอเตอร์ไฟฟ้า

จากรูปที่ 3 แสดงลักษณะของขดลวดเมื่อพันเสร็จแล้วกลายเป็นขดลวดสเตเตอร์ รวมทั้งฉนวนขดลวดที่ใช้กันโดยทั่วไป โดยระบบของฉนวนสำหรับขดลวดไฟฟ้าในสเตเตอร์จะประกอบไปด้วย

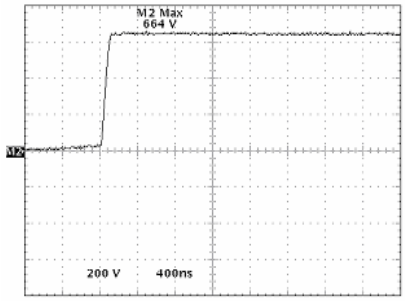
ก.) ฉนวนระหว่างเฟสไฟฟ้า หรือระหว่างขดลวด (Phase barrier)
ข.) ฉนวนระหว่างกราว์นกับเฟสไฟฟ้า (Slot liners etc.)
ค.) ฉนวนระหว่างขดลวดไฟฟ้าเช่น ฉนวนเคลือบน้ำยาวานิชเป็นต้น

ส่วนชุดโรเตอร์กรงกระรอกสำหรับมอเตอร์ขนาดใหญ่อาจจะใช้ ทองแดงหรืออลูมินั่มเหลวฉีดฝังในร่อง เหล็กแผ่นที่อัดเรียงกันเป็นโรเตอร์ การออกแบบรูปร่างของร่องโรเตอร์ขึ้นอยู่กับการออกแบบและความสามารถในการผลิตของผู้ผลิต หากเป็นอลูมินั่มเหลวฉีด จะมีข้อดีคือ น้ำหนักเบาและสามารถออกแบบรูปร่างของร่องโรเตอร์ได้ตามต้องการ ทำให้สามารถออกแบบลักษณะแรงบิดเริ่มหมุนของมอเตอร์ได้ตาม ชนิดของโหลดที่จะนำไปใช้งาน แต่หากใช้วิธีแท่งทองแดงวางในร่องแล้วเชื่อมวงแหวนปิดท้าย ทำให้รูปร่างของร่องจะถูกจำกัดทางด้านการออกแบบ ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีของบริษัทใหญ่ๆที่ผลิตมอเตอร์ จะมีเครื่องฉีดอลูมินั่มเหลวอัตโนมัติ สามารถฉีดอลูมินั่มเหลวในตัวโรเตอร์ได้ถึงขนาด 1000 kW (ซึ่งบริษัทเล็กๆ เมื่อตัวใหญ่ขึ้นจำเป็นจะต้องใช้แท่งทองแดงลงด้วยมือเพราะปริมาณทางการค้าไม่มากพอที่จะออกแบบเครื่องจักรฉีดอลูมินั่มเหลวมาใช้สำหรับมอเตอร์ขนาดใหญ่)



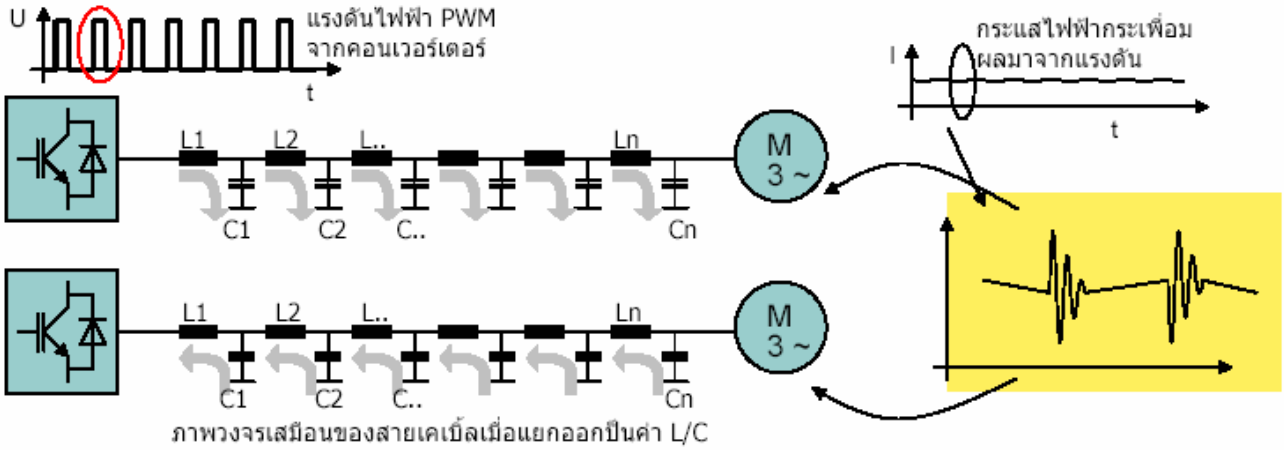
รูปที่ 4 แสดงลักษณะโครงสร้างของ Rotor ของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดกรงกระรอก

ผลกระทบจากสายเคเบิ้ล และ แรงดัน transient จาก PWM



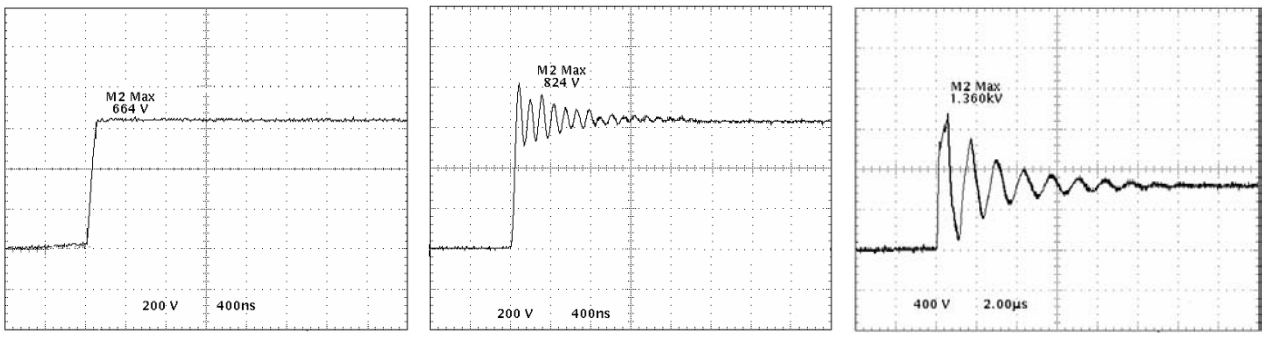
จากรูปเป็นภาพขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ชนิด 2 ระดับ จะเห็นว่าระยะเวลาของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าจากจุดต่ำสุดไปยังจุดสูงสุด ใช้เวลาในการสวิทชิ่งน้อยมาก ประมาณ 100 นาโนวินาที จาก 0 โวลท์ ไปเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ 664 โวลท์

ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว จะส่งผลให้เกิดความเครียดแก่สายเคเบิ้ลที่ต่อไปยังมอเตอร์ โดยธรรมชาติของสายเคเบิ้ลไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยค่าความต้านทาน ค่าอินดักแต้นซ์ และค่าคาปาซิแต้นซ์ เมื่อเกิดการสับสวิทช์อย่างรวดเร็ว จะส่งผลให้เกิดค่า ค่าอินดักแต้นซ์ และค่าคาปาซิแต้นซ์ ตามทษฎีของสายส่งไฟฟ้า ดังรูปที่ 5 แสดงการเกิดค่าอินดักแต้นซ์ และค่าคาปาซิแต้นซ์ระหว่างสายส่ง



รูปที่ 5 แสดงการเกิดค่าค่าอินดักแต้นซ์ และค่าคาปาซิแต้นซ์ระหว่างสายส่ง

จากรูปที่ 5 แสดงการเกิดค่าอินดักแต้นซ์ และค่าคาปาซิแต้นซ์ระหว่างสายเคเบิ้ล กระแสจะไหลผ่าน L1 และถูกชาร์จเข้าที่ C1 ด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ เมื่อกระแสถูกส่งต่อผ่านไปยัง L2 และถูกชาร์จเข้าที่ C2 ด้วยแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์บวกกับการคายประจุ เหตุการเช่นนี้จะถูกกระทำไปเรื่อยๆ ตลอดย่านของสายส่งเคเบิ้ล จนกระทั่งถูกส่งถึง Ln ตัวสุดท้ายหรือ จนกระทั่งถึงมอเตอร์ เนื่องจากแรงดันที่ถูกส่งผ่านจาก C1 จนกระทั่งถึง Cn จะส่งผลให้เกิดการเก็บประจุไฟฟ้าเกิดอาการแรงดันโอสซิเลส แรงดันสูงขึ้นหรือ แรงดันทรานเซียล การโอสซิเลสของแรงดันจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับความยาวของสายเคเบิ้ล ดังรูปที่ 6 ก.)ข.)ค.)



รูปที่ 6 ภาพขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์จากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM เมื่อส่งผ่าน
ก.) สายเคเบิ้ลยาว 0.5 เมตร ข.) สายเคเบิ้ลยาว 4 เมตร ค.) สายเคเบิ้ลยาว 42 เมตร

จากรูปที่ 6 เป็นผลจากการทดลองจากอินเวอร์เตอร์แบบ 2 ระดับ Voltage Source PWM สำหรับมอเตอร์แรงดันไฟฟ้า 460 โวลท์ ขนาด 18.5 kW ที่ความยาวสายต่างๆกันที่ 0.5, 4 และ 42 เมตร เมื่อสวิทชิ่ง PWM ที่ความถี่ 2.5 kHz

จากรูปจะเห็นว่าที่ความยาวสายเคเบิ้ล 0.5 เมตร รูปคลื่นจะมีค่าใกล้เคียงกับรูปคลืน PWM มาก แรงดันสูงสุดจะเท่ากับแรงดันจาก DC เรกติไฟร์เอร์คือ 664 โวลท์ ($\sqrt{2}*460 = 650$ โวลท์) เมื่อความยาวสายเคเบิ้ลเปลี่ยนเป็น 4 เมตร รูปคลื่นจะมีค่าเปลี่ยนไปเป็นผลมาจากอาการแรงดันโอสซิเลส จากค่า L และ C ของสายส่ง ส่งผลให้เกิดแรงดันสูงสุดทรานเซียนสูงขึ้นไปเป็น 824 โวลท์ เมื่อทดลองให้สายเคเบิ้ลยาวเป็น 42 เมตร จะส่งผลให้เกิดแรงดันสูงสุดทรานเซียนสูงขึ้นไปถึง 1360 โวลท์ หรือเกือบ 2 เท่าของค่าแรงดัน DC link

โดยทั่วไปมอเตอร์ส่วนใหญ่จะออกแบบฉนวนมาให้ใช้งานตามปกติสำหรับไฟฟ้ารูปคลื่นซายด์ ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้าส่วนใหญ่จะออกแบบเผื่อเอาไว้ประมาณ 10% ของแรงดันสูงสุดของรูปคลื่นซายด์ กล่าวคือ มอเตอร์ 460 โวลท์ จะใช้ฉนวนที่สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ประมาณ √2*460 *1.1 = 715 โวลท์

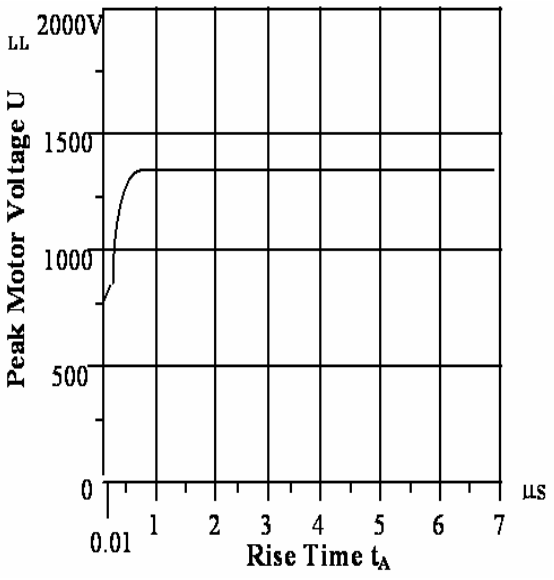
ดังนั้นเพื่อป้องกันสาเหตุความเสียหายที่จะเกิดขึ้นจากอาการแรงดันโอสซิเลส หรือ แรงดันสูงสุดทรานเซี่ยน จากผลการใช้คอนเวอร์เตอร์ชนิด PWM ในการสั่งซื้อมอเตอร์เมื่อจะนำมาใช้กับชุดควบคุมความเร็วรอบ Variable Speed Drive (VSD) หรือ คอนเวอร์เตอร์ ควรจะระบุชนิดของมอเตอร์ที่ออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับชุดควบคุมความเร็วรอบโดยเฉพาะ ทางโรงงานผู้ผลิตมอเตอร์จะทราบดีว่าจะต้องออกแบบฉนวนให้ทนต่อสภาพแรงดันสูงสุดมากขึ้น และ ทรานเซี่ยนสูงขึ้นกว่ามอเตอร์ทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเป็นระบบไฟฟ้าที่สูงกว่า 500 โวลท์ โดยทางโรงงานผู้ผลิตจะต้องออกแบบมอเตอร์โดยใช้ลวดที่มีฉนวนหนาเป็นพิเศษ การชุบวานิชจะต้องดีเป็นพิเศษ รวมถึงระบบการลงขดลวด หรือฉนวนรองร่องขดลวดต่างๆเป็นต้น

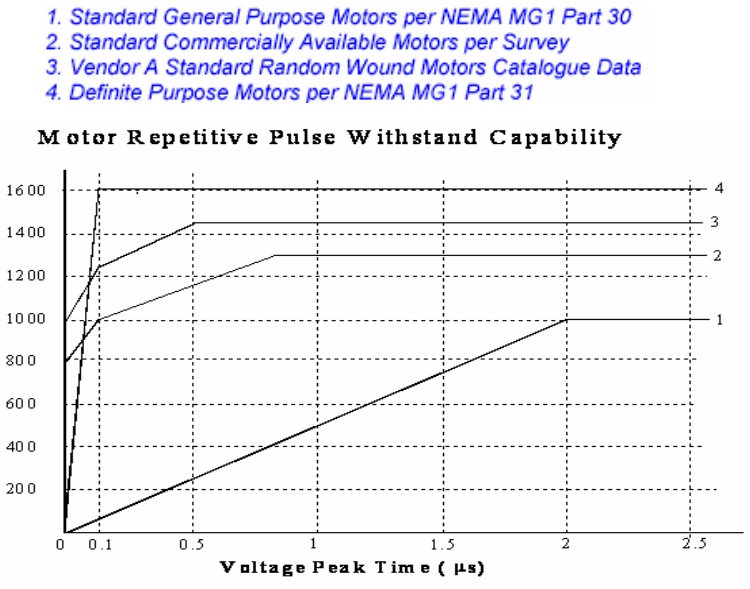
จากรูปที่ 6 ค.) เมื่อเกิดแรงดันสูงสุดสูงขึ้นไปถึง 1360 โวลท์ ในขณะที่มอเตอร์ได้ออกแบบมาให้ใช้กับระบบไฟฟ้า 460 V_{rms} หรืออีกนัยหนึ่งคือค่าสูงสุดของแรงดันคือ 715 V_{max} เมื่อแรงดันสูงเกินกว่าที่ฉนวนของมอเตอร์จะต้านทานไว้ได้ ก็จะเกิดการนำกระแสไฟฟ้าระหว่างขดลวดไหลผ่านทะลุฉนวน ในช่วงแรกๆ อาจจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อนานๆเข้า อาจจะส่งผลกระทบให้เกิด ฉนวนเสื่อมค่าความเป็นฉนวนในที่สุด ทำให้เกิดความเสียหาแก่มอเตอร์ได้ เช่น

1. เกิดการลัดวงจรภายในขดลวดมอเตอร์ลงกราว์น หรือโครงมอเตอร์
2. เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟส ภายในขดลวดมอเตอร์
3. เกิดการลัดวงจรภายในเฟสเดียวกัน หรือ Inter turn coil ของขดลวดมอเตอร์

นอกเหนือไปจากเรื่องฉนวน Break down ผลกระทบที่จะตามมาคือ เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่มอเตอร์ไม่ได้เป็นรูปคลื่นซายด์ จะส่งผลให้เกิดความเครียดที่ขดลวด ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นจะสูงกว่าปกติประมาณ 10% ดังนั้นเมื่อนำมอเตอร์ชนิดปกติสำหรับรูปคลื่นซายด์ มาใช้กับชุดควบคุมความเร็วรอบ หรือ คอนเวอร์เตอร์ (Converter) ความร้อนที่ตัวมอเตอร์จะสูงขึ้นกว่าเดิมประมาณ 10°C ดังนั้นเมื่อนำมอเตอร์ปกติมาใช้กับชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ ถ้าต้องการให้อุณหภูมิ หรือความร้อนของมอเตอร์เพิ่มขึ้นเท่าเดิมจะต้องจ่ายกำลังเพียงแค่ 90% ของกำลังพิกัดเดิม หรือหากยังขับโหลดเท่าเดิมความร้อนที่ตัวมอเตอร์จะสูงขึ้นกว่าเดิมประมาณ 10°C อาจจะทำให้อายุการใช้งานลดลงอันเนื่องมาจากฉนวนเสื่อมคุณภาพ อายุของมอเตอร์จะสั้นลงกว่าเดิมถึง 50% ของอายุการใช้งานตามปกติ

ในปัจจุบันทั้ง IEC และ NEMA ได้ให้ความสนใจ และได้กำหนดมาตรฐานของฉนวนมอเตอร์ ที่จะนำมาใช้กับชุดควบคุมความเร็วรอบให้มีค่าทนแรงดันสูงขึ้นเช่น มาตรฐาน IEC 34-17(ฉบับร่าง) หรือ ของ NEMA โดยมีค่าสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 7 ก.) และ ข.)





รูปที่ 7 ก.) ค่าแรงดันสูงสุดที่ยอมรับได้ตาม IEC 34-17 *รูปที่ 8 ข.) ค่าแรงดันสูงสุดที่ยอมรับได้ตาม NEMA*

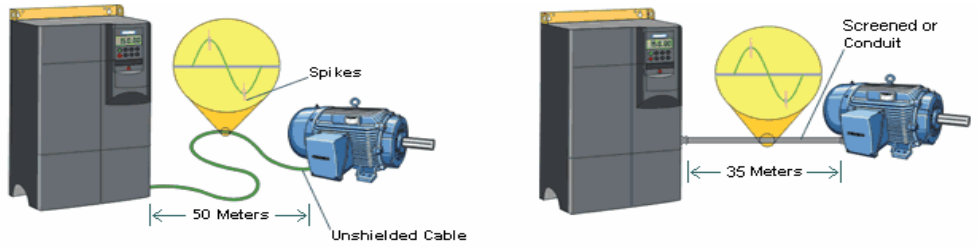
ตามมาตรฐาน NEMA มอเตอร์ที่ยินยอมให้มาใช้ได้กับชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์คือ กราฟที่ 4 โดยมีค่ากำหนดการทดต่อแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของฉนวนมอเตอร์ดังนี้คือ

- ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 600 โวลท์ แรงดันสูงสุดที่ยอมรับได้ต้องไม่น้อยกว่า 1600 โวลท์ ที่ความเร็วสวิทชิ่ง > 100 ns
- ที่แรงดันไฟฟ้าสูงกว่า 600 โวลท์ แรงดันสูงสุดที่ยอมรับได้ต้องไม่น้อยกว่า 2.5 เท่า ที่ความเร็วสวิทชิ่ง > 1 µs

วิธีการลดการชำรุดของฉนวนมอเตอร์ก่อนเวลาอันควร

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาแล้วดังกล่าวข้างต้น เราจะทำอย่างไรให้มอเตอร์ที่จะนำไปใช้กับคอนเวอร์เตอร์มีอายุการใช้งานยาวนานอย่างที่ควรจะเป็น หรือ ทำอย่างไรจึงจะสามารถลดผลกระทบจากความยาวสายเคเบิ้ลได้

การเลือกใช้มอเตอร์ที่ออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับ VSD นับว่าเป็นวิธีที่ง่าย และต้นทุนต่ำกว่า แต่อาจจะมีบริษัทผู้ผลิตไม่มากนักที่สามารถทำได้ตามมาตรฐาน IEC หรือ NEMA หรือในบางครั้งเมื่อเรามีมอเตอร์เดิม ที่กำลังใช้งานอยู่ หรือออกแบบมาใช้กับระบบไฟฟ้าตามปกติ แต่ต้องการจะนำมาประยุกต์ใช้กับชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ จะต้องทำอย่างไร

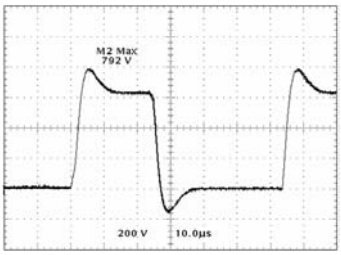


Maximum cable lengths as standard			
Output	Rated voltage	Unscreened cables	Screened cables
To 4 kW	208 to 575V	50 m	35 m
5.5 kW	208 to 575V	70 m	50 m
7.5 kW	208 to 575V	100 m	67 m
11 kW	208 to 575V	110 m	75 m
15 kW	208 to 575V	125 m	85 m
18.5 kW	208 to 575V	135 m	90 m
22 kW	208 to 575V	150 m	100 m
20 to 200 kW	380 to 575V	150m	100 m
250 to 710 kW	380 to 460V	200 m	135 m
250 to 1500 kW	500 to 690V	150 m	100 m

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการกำหนดความยาวสายเคเบิ้ลสูงสุดโดยปราศจากชุดกรองสัญญาณ

จากผลของ PWM ที่ออกจากชุดควบคุมความเร็วรอบ อันเป็นสาเหตุส่งผลให้เกิดค่า L/C ที่สายเคเบิ้ลทำให้เกิดแรงดันโอสซิเลส หรือทรานเซียส ผู้ผลิตชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์จึงต้องกำหนดความยาวสูงสุดของสายเคเบิ้ล ที่สามารถยอมรับได้ดังตารางที่ 1 ในกรณีที่ไม่สามารถ หรือมีความจำเป็นต้องติดตั้งสายเคเบิ้ลยาวกว่าข้อกำหนดสูงสุดของผู้ผลิตชุดควบคุมมอเตอร์กำหนดไว้ วิธีแก้ไขที่นิยมใช้มากที่สุดก็คือ การใส่ชุดแปลงหรือกรองรูปคลื่นเข้าไประหว่างชุดควบคุมความเร็วรอบ และ มอเตอร์ เพื่อลดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอย่างรวดเร็ว (dv/dt) โดยแบ่งออกได้เป็นหลายวิธีขึ้นอยู่กับงบประมาณ และความจำเป็นที่จะนำไปใช้งาน

ก.) ใส่ Out put reactors



วิธีการเพิ่มรีเอ็กเตอร์ หรือ โช้คไปใส่ไว้ที่ด้านขาออกของชุดควบคุมความเร็วรอบ เปรียบเสมือนการเพิ่ม ค่า L1 ให้แก่สายส่ง เพื่อทำให้ลดค่า dv/dt และค่าแรงดันสูงสุดที่จะเกิดประจุไฟฟ้ากับสายส่งได้ ทั้งนี้การคำนาณหาค่า อินดักแต้นซ์จะต้องถูกต้องและเหมาะสมตามขนาดของ VSDs

จากรูปแรงดันไฟฟ้าหลังจากติดตั้งค่ารีเอ็กเตอร์ ที่มีค่า 3% สามารถช่วยลด ค่าแรงดันเปลี่ยนได้ประมาณ 5 µs และลดแรงดันสูงสุดลงเหลือ 729 โวลท์ ซึ่งเป็นแรงดันสูงสุดที่ฉนวนมอเตอร์ตามมาตรฐานโดยทั่วไปสามารถยอมรับได้

โดยปกติโช้คจะติดตั้งที่ด้านขาออกของชุดควบคุมความเร็วรอบทำให้ต้องการพื้นที่มากขึ้น ประสิทธิภาพของทั้งระบบอาจจะลดลงประมาณ 0.5% อันเป็นผลมาจากพลังงานสูญเสียที่ รีเอ็กเตอร์

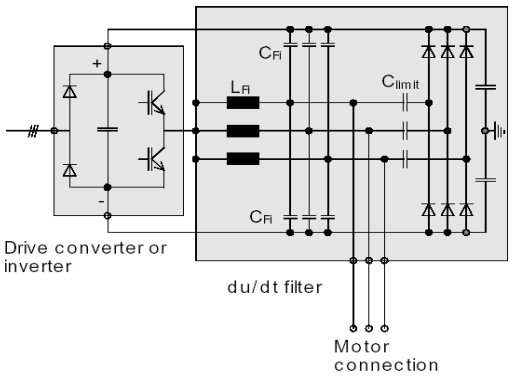
Maximum cable lengths which can be connected when a reactor is used							
Number of reactors in series →		1	2	3	1	2	3
Drive converter/ inverter frame size	Rated voltage	Non-screened cables			Screened cables		
To 4 kW	208 to 575V	150 m	1)	1)	100 m	1)	1)
5,5 kW	208 to 575V	200 m	1)	1)	135 m	1)	1)
7,5 kW	208 to 575V	225 m	450 m	1)	150 m	300 m	1)
11 kW	208 to 575V	240 m	480 m	1)	160 m	320 m	1)
15 kW	208 to 575V	260 m	520 m	1)	175 m	350 m	1)
18,5 kW	208 to 575V	280 m	560 m	1)	190 m	375 m	1)
22 kW	208 to 575V	300 m	600 m	900 m	200 m	400 m	600 m
20 to 200 kW	380 to 575V	300 m	600 m	900 m	200 m	400 m	600 m
250 to 710 kW	380 to 460V	400 m	800 m	1200 m	270 m	530 m	800 m
250 to 630 kW	500 to 690V	300 m	600 m	900 m	200 m	400 m	600 m
710 to 1100 kW 2)	500 to 575V	300 m	450 m	600 m	200 m	300 m	450 m
800 kW	660 to 690V	300 m	600 m	900 m	200 m	400 m	600 m
900 to 1500 kW 2)	660 to 690V	300 m	450 m	600 m	200 m	300 m	450 m

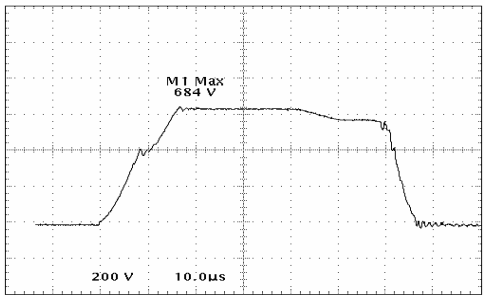
1) Not possible

2) 2 parallel reactors are used with half the rated current

ตารางที่ 2 ตัวอย่างการกำหนดความยาวสายเคเบิ้ลสูงสุดเมื่อใส่ output Reactors

ข.) ชุดกรองแรงดันเปลี่ยนแปลง dv/dt (Voltage Limited filter)





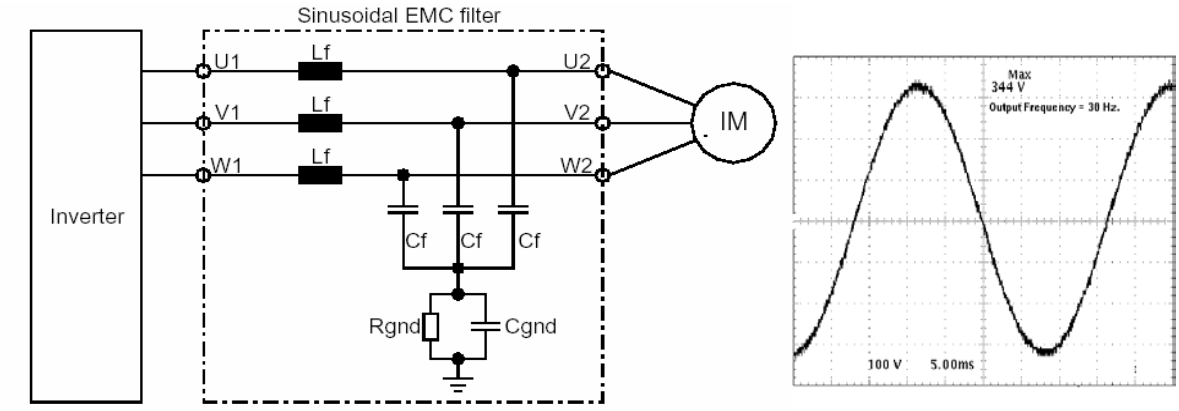
ในกรณีนี้การออกแบบจะต่อคาปาซิเตอร์ และ อินดักเตอร์ และไดโอดเข้าไปด้วยกัน เพื่อลดค่า dv/dt ให้เหลือน้อยกว่า 500 V/µs ถือเป็นการลดแรงดันที่เพิ่มขึ้น (voltage rise time) และแรงดันสูงสุดโดยทางอ้อมจากการกรอง dv/dt
จากรูปแรงดันสูงสุดจะลดลงเหลือ 684 โวลท์ โดยมีค่า dv/dt ประมาณ 40 V/µs เพียงพอสำหรับมอเตอร์มาตรฐาน โดยทั่วไปสามารถยอมรับได้ วิธีนี้เป็นวิธีที่แนะนำให้ใช้สำหรับมอเตอร์ที่ไม่มีข้อมูลเพียงพอต่อการออกแบบ หรือใช้ในกรณีที่ใช้ชุดควบคุมความเร็วรอบไปขับมอเตอร์เก่าที่ติดตั้งอยู่ก่อนแล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งมอเตอร์ที่ใช้แรงดันไฟฟ้ามากกว่า 500 โวลท์
ชุดกรองรูปคลื่น dv/dt ตามประสบการณ์ของผู้เขียนจะมีต้นทุนค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นประมาณ 25% ของราคาชุดควบคุมความเร็วรอบ และต้องการพื้นที่และตู้เพิ่ม เติม

Cable lengths which can be connected when a dv/dt filter is used						
Drive converter / inverter rated current	dv/dt filter	dv/dt filter and reactor	dv/dt filter and 2 reactors [2]	dv/dt filter	dv/dt filter and reactor	dv/dt filter and 2 reactors [2]
	Non-screened cables			Screened cables		
to 22A	150 m	1)	1)	100 m	1)	1)
to 370A [4]	150 m	300 m	450 m	100 m	200 m	300 m
to 225A [5]	150 m	300 m	450 m	100 m	200 m	300 m
510 to 860A [4]	150 m	375 m	1)	100 m	250 m	1)
297 to 860A [5]	150 m	375 m	1)	100 m	250 m	1)
From 990 A [6]	3)	3)	3)	3)	3)	3)

1) Not possible
2) Voltage limiting is no longer effective for line supply voltages > 500 V.
3) Presently not available.
4) Rated line supply voltage, 380 to 460V
5) Rated line supply voltage, 500 to 690V
6) Rated line supply voltage, 380 to 690V

ตารางที่ 3 ตัวอย่างการกำหนดความยาวสายเคเบิ้ลสูงสุดเมื่อใส่ชุดกรองรูปคลื่น dv/dt

ค.) ชุดกรองรูปคลื่นซายด์ (Sinusoidal EMC output filter)



ชุดกรองรูปคลื่นซายด์ เป็นการออกแบบพิเศษเพื่อกรองรูปคลื่นให้เพียงรูปคลื่นที่มีความถี่ต่ำเท่านั้นที่จะผ่านได้ โดยจะป้องกันไม่ให้ความถี่สูง หรือ Harmonic ผ่านออกไป ทำให้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงรูปคลื่นซายด์มากทั้งกระแส และ แรงดันไฟฟ้า

ชุดกรองรูปคลื่นซายด์จะมีราคาค่อนข้างสูง รวมทั้งจะทำให้แรงดันที่ขั้วมอเตอร์ถูกจำกัดไว้เพียงแค่ 90% ของแรงดันพิกัด ทำให้ชุดควบคุมความเร็วรอบ ไม่สามารถจ่ายโหลดได้เต็มพิกัด ทำให้ประสิทธิภาพของทั้งระบบลดลง แต่มีข้อดีที่พอจะสรุปได้ดังต่อไปนี้

ก.) ลดเสียงรบกวนที่เกิดขึ้นที่ตัวมอเตอร์

ข.) ลดความสูญเสียที่ตัวมอเตอร์

ค.) ใช้ได้กับมอเตอร์มาตรฐานแบบชนิดกันระเบิดได้

ง.) ใช้ได้กับมอเตอร์มาตรฐานทั่วไป และใช้ได้กับสายเคเบิ้ลที่ยาวมากๆได้

Cable lengths which can be connected when sinusoidal filters are used				
Output	380 to 460 V	500 to 575 V	380 V to 460 V	500 to 575 V
	Non-screened cables		Screened cables	
To 4 kW	250 m	350 m	170 m	250 m
5.5 kW	320 m	475 m	210 m	320 m
7.5 kW	400 m	550 m	270 m	400 m
11 kW	500 m	700 m	330 m	500 m
15 kW	600 m	900 m	400 m	600 m
18.5 kW to 132 kW	A	B	0,67 • A	A

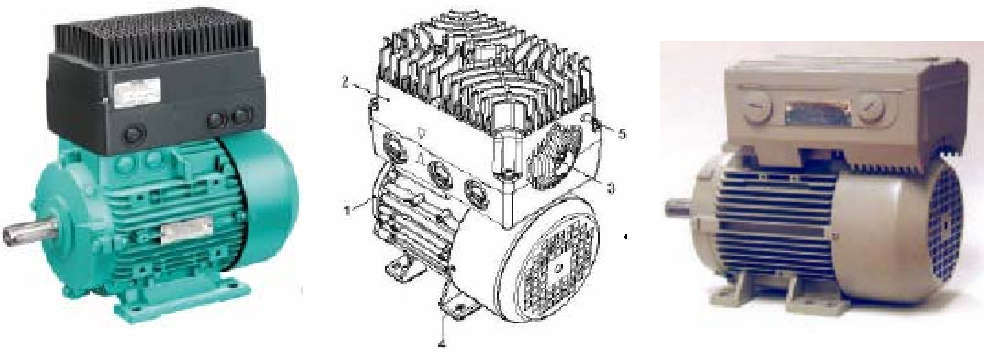
A = 600 m + 7.5 • (P[kW] - 15) m B = 900 m + 10 • (P[kW] - 15) m

P: Rated drive converter or inverter output in kW

ตารางที่ 4 ตัวอย่างการกำหนดความยาวสายเคเบิ้ลสูงสุดเมื่อใส่ชุดกรองรูปคลื่นซายด์

เมื่อประมาณ 4-5 ปี ที่ผ่านมา ได้มีผู้ผลิตหลายราย ได้ผลิตชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ ติดตั้งคู่กับมอเตอร์เหมือนกล่องต่อสายมอเตอร์ ในกรณีนี้ L/C จากสายเคเบิ้ลมอเตอร์จะไม่มีผลกระทบใดๆ กับตัวมอเตอร์ สามารถตัดประเด็นปัญหา EMC และ แรงดันทรานเซียนเกินออกไปได้เลย ผลประโยชน์ที่จะได้รับต่อมา คือง่ายต่อการติดตั้ง เพราะเพียงแต่ต่อสายไฟเข้าชุดควบคุมความเร็วรอบโดยตรง แต่ระบบนี้เหมาะสำหรับมอเตอร์มีขนาดใหญ่ไม่เกิน 7.5 kW

ในประเทศแถบยุโรป, ญี่ปุ่น และอเมริกา เริ่มมีผู้นำไปใช้มากขึ้นเรื่อยๆ เพราะประเทศเหล่านั้น เป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกเครื่องจักรจึงไม่ต้องกังวลถึงการบริการหลังการขายว่าจะยากหรือง่าย หากเกิดชำรุดก็เปลี่ยนใหม่ไม่ต้องมาซ่อมแซมให้เสียเวลา ประกอบกับค่าแรงในการประกอบและติดตั้งสูงเมื่อเทียบกับราคาผลิตภัณฑ์ การนำชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไปติดตั้งคู่กับมอเตอร์ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ได้ แต่สำหรับประเทศไทยเนื่องจากค่าแรงในการติดตั้งยังไม่สูงมากนัก อีกทั้งบ้านเราเป็นเมืองร้อน อุณหภูมิบริเวณที่ติดตั้งมอเตอร์จะสูงกว่าประเทศแถบยุโรป บางครั้งมอเตอร์จะติดตั้งอยู่ภายนอกอาคาร ซึ่งมีมากทั้งฝุ่น, น้ำ และสิ่งสกปรก อีกทั้งผู้ใช้ยังกังวลถึงการซ่อมแซมหากเกิดการชำรุด ดังนั้นในมุมมองของทางการค้าบ้านเรายังคงต้องใช้เวลาเป็นเครื่องพิสูจน์ว่าจะได้รับการตอบรับจากวิศวกรบ้านเรา หรือ จะเหมาะกับสภาพของประเทศไทยมากน้อยแค่ไหน



รูปที่ 8 แสดงชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ ติดกับตัวมอเตอร์โดยตรง

ส่วนผลกระทบอื่นๆ อันเนื่องมาจากการนำคอนเวอร์เตอร์มาใช้งาน เช่น มอเตอร์จะมีเสียงดังรบกวนมากขึ้น ประสิทธิภาพของมอเตอร์อาจจะลดลง ซึ่งเป็นสาเหตุไม่น่ากังวลมากนัก สุดท้ายนี้ ในการเลือกใช้มอเตอร์ จะเป็นการดีที่สุด หากสามารถเลือกสั่งซื้อมอเตอร์เพื่อจะนำมาใช้กับชุดควบคุมความเร็วรอบ (VSD) หรือคอนเวอร์เตอร์ ควรเป็นชนิดที่ออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับชุดควบคุมความเร็วรอบโดยเฉพาะ (motor inverter proof) โดยเฉพาะมอเตอร์ที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงกว่า 400 โวลท์ นอกเหนือไปจากนี้หากผู้อ่านท่านใดมีมอเตอร์ที่ใช้อยู่ ณ.ปัจจุบันเป็นมอเตอร์ที่ออกแบบปกติ แต่ได้นำมาใช้กันคอนเวอร์เตอร์ สิ่งที่ต้องสังเกตุเป็นพิเศษก็คือความร้อนที่เพิ่มขึ้นที่ขดลวดมอเตอร์ จะต้องไม่เกินข้อกำหนดทางพิกัดตามการออกแบบของมอเตอร์นั้นๆ

อักษรย่อ

DOL	**D**irect **O**n **L**ine การเริ่มหมุนมอเตอร์โดยการต่อตรงแรงดันไฟฟ้าเต็มพิกัดแรงดัน
EMC	**E**lectro **M**agnetic **C**ompatibility Standard
GTOs	**G**ate **T**urn **O**ff thyristors
IEC	**I**nternational **E**lectrical **C**ommission มาตรฐานทางไฟฟ้ากลุ่มประเทศยุโรป
IEC 34-1	มาตรฐาน IEC ว่าด้วยเรื่อง Rotating electrical machines Part 1
IEC 34-7	มาตรฐาน IEC ว่าด้วยเรื่อง Rotating electrical machines Part 7 Classification of types of construction mounting arrangements
IGBT's	**I**nsulated **G**ate **B**ipolar **T**ransistor
NEMA	**N**ational **E**lectrical **M**anufactures **A**ssociation มาตรฐานทางไฟฟ้าประเทศอเมริกา
NEMA MG1	มาตรฐาน NEMA ว่าด้วยเรื่อง Motors and Generators
PWM	**P**ulse **W**idth **M**odulation
SIMOVERT MD	ชื่อทางการค้าของบริษัทซีเมนส์สำหรับ **VSD**s **M**aster **D**rives
VPI	**V**acuum **P**ressure **I**mpregnation ส่วนหนึ่งของกรรมวิธีการชุบวานิชของฉนวนมอเตอร์ไฟฟ้า
VSD	**V**ariable **S**peed **D**rives ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

อ้างอิง

1. Siemens Manchester by Steve Barker "Insulation behaviors of inverter fed low voltage induction motors" Date 24/03/1998 (English)
2. Doherty K G, "Investigation of Voltage Reflections Associated With PWM Inverter Installations. IEE submission, 1996.
3. Finlayson P T, "Output Filter Considerations for PWM inverter Drives With Induction Motors"
4. Melhorn C J, Tang L, "Transient Effects of PWM Drives on Induction Motors". IEEE 0093-9994/97, 1997
5. Siemens catalog DA65.10-2001 Simovert Master Drives Vector Control