

ผลกระทบจากอินเวอร์เตอร์ ต่อฉนวนมอเตอร์ (Insulation behavior of inverter fed motors)

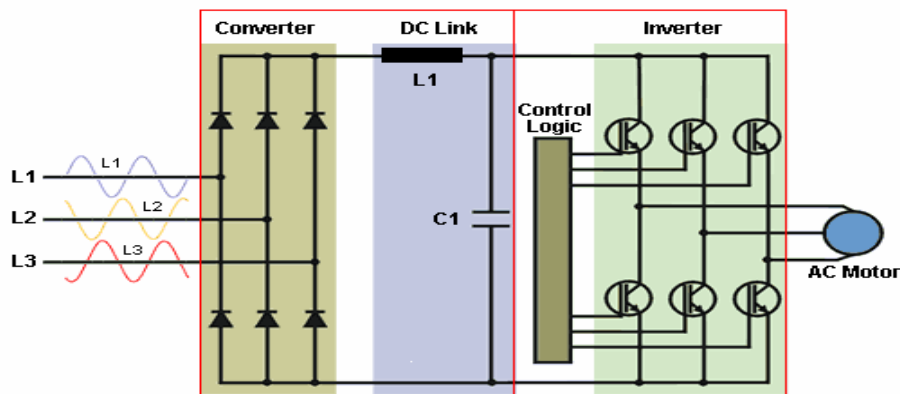
กว่า 20 ปี ของการพัฒนาเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำประเภท เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ หรือ Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs) ทำให้สามารถทนกระแสได้สูง ที่ระดับความถี่และแรงดันสูงได้ ทำให้เกิดการพัฒนาคูควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ (Variable Speed Drives, VSDs) ชนิดแบบ PWM ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เพื่อมาทดแทนการปรับความเร็วรอบจากระบบทางกล ซึ่งก่อนหน้านี้อาจจะใช้ระบบไฮโดรลิกคลัมป์ริง หรือการใช้เกียร์เพื่อการทดรอบเป็นช่วงๆ ดังนั้น IGBTs จึงได้ถูกนำมาใช้แทนทรานซิสเตอร์ และ Gate Turn Off thyristors (GTOs) ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เดิมของชุดปรับความเร็วรอบมอเตอร์ในอดีต

ตามหลักการของการออกแบบชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ หรือคอนเวอร์เตอร์ (คอนเวอร์เตอร์ประกอบด้วยภาคเรกติไฟเออร์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง และภาคอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับ) เราต้องการให้ง่ายต่อการใช้งาน และง่ายต่อการควบคุม มีความคงทนไม่เสียหาย อายุการใช้งานยาวนาน ลดความสูญเสียให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ไม่ต้องการให้เกิดเสียงรบกวน(Noise) และต้องการให้มอเตอร์ตอบสนองต่อแรงบิดให้เร็วทันตามต้องการ ตามทฤษฎีสามารถทำได้วิธีหนึ่งคือ สวิตชิง PMW ที่ความถี่สูง แนนอนเมื่อต้องการอย่างหนึ่งก็ยอมต้องเสียอีกอย่างหนึ่ง

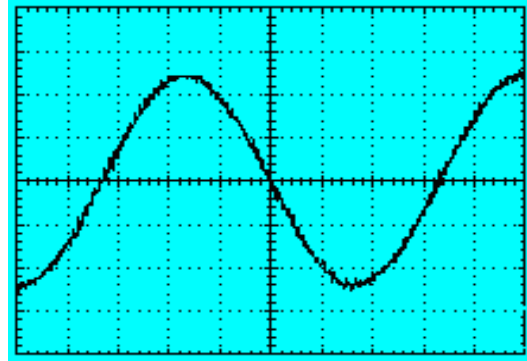
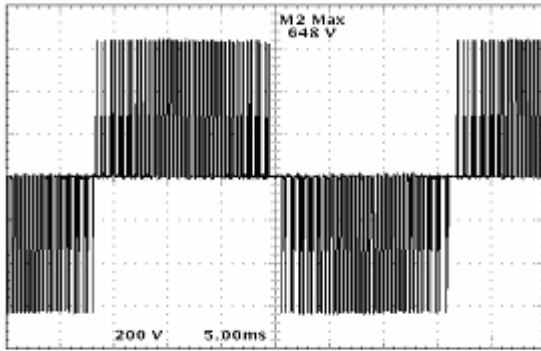
จากคุณสมบัติของ IGBT เมื่อสวิตชิงที่ความถี่สูงจะมีปัญหาตามมาคือ เกิด EMC และเพิ่มความเสี่ยงที่ฉนวนมอเตอร์จะเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากแรงดันทรานเซียน หรือแรงดันเกินที่ไม่ต้องการ จากคุณสมบัติ dv/dt จะมีรูปคลื่นแปลกปลอมที่เราไม่ต้องการผสมในคลื่นไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่มอเตอร์ อาจจะทำให้อายุการใช้งานของฉนวนมอเตอร์สั้นลงกว่าปกติ ดังนั้นการเลือกใช้ฉนวนของชุดลวดในสเตเตอร์จำเป็นจะต้องได้รับการพิจารณาเลือกใช้ให้เหมาะสมกับแรงดัน เช่น ระบบไฟฟ้า 690 โวลท์ หรือสูงกว่า รวมกระทั่งการเลือกใช้ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่เหมาะสมกับการใช้งาน การเลือกใช้ชนิดของฉนวนมอเตอร์ไฟฟ้าให้เหมาะสมแก่อุณหภูมิและความชื้นตามสภาพการใช้งาน นับรวมไปถึงขนาด, ชนิด และความยาวของสายเคเบิล ที่จะทำให้การทำงานทั้งระบบทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และยาวนานตามอายุการใช้งาน

พื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์

จากรูปที่ 1ก. พื้นฐานวงจรไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์แบบ Voltage Source, PWM จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟส ผ่านชุด ไดโอดเรกติไฟาย์ แปลงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็น ไฟฟ้ากระแสตรง เรียกว่า "DC Link" DC Linkจะประกอบไปด้วยคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่ต่อขนาน บางครั้งอาจจะมี อินดักเตนซ์ต่ออนุกรมเพื่อลด di/dt พลังงานจะถูกเก็บไว้ที่ DC Link โดย คาปาซิเตอร์ทำหน้าที่กรองรูปคลื่นให้เรียบมากขึ้น ไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกชุดอินเวอร์เตอร์สวิตชิงให้เกิดย่านความถี่ต่างๆ โดยมีค่าแรงดันสูงสุดคงที่ตามค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ผ่านการเรกติไฟ์แล้ว ความถี่ที่สวิตชิงอาจจะกว้างหรือแคบในแต่ละช่วงจังหวะจะเป็นไปตามรูปแบบ PWM การปรับความถี่หรือการปรับแรงดัน rms สามารถทำได้โดยการปรับย่านความกว้างและจังหวะในการสวิตชิง ตามรูปที่ 1ข. แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM แบบชนิด 2 ระดับ (2 Level)



รูปที่ 1ก. พื้นฐานวงจรไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์แบบ Voltage Source, PWM



รูปที่ 1ข. แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM **รูปที่ 1ค. รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามอเตอร์**

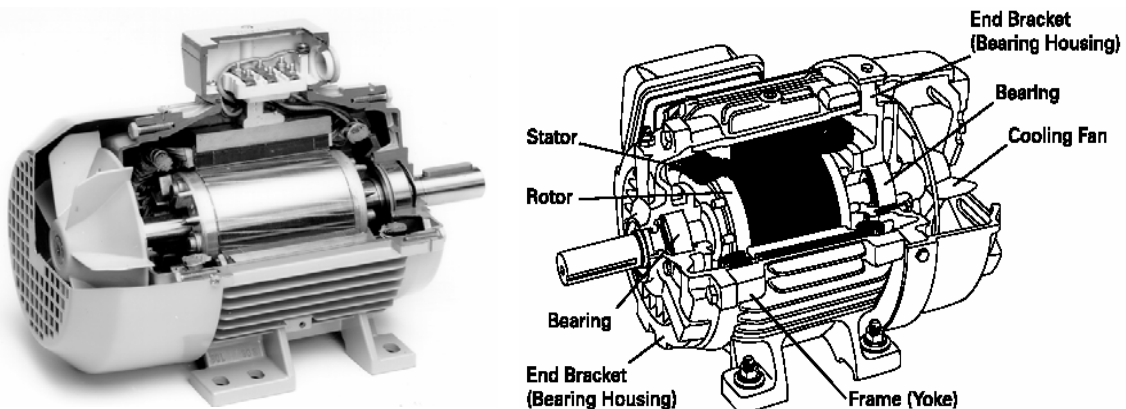
จากรูปที่ 1ข. แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ถูกส่งผ่านเข้าไปยังมอเตอร์ ทำให้เกิด รูปคลื่นขายนเวฟของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามอเตอร์ ตามรูปที่ 1ค. อันเป็นผลกระทบอันเนื่องมาจากค่าอินดักแตนซ์ของมอเตอร์ที่มีปริมาณมากกว่าค่าความต้านทาน จึงแปลงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า PWM ตามรูปที่ 1ข. เป็นรูปคลื่นขายนเวฟของกระแสไฟฟ้าที่มีรูปเบิ้ลข้างเล็กน้อย

การเพิ่มความถี่ของ PWM ให้สูงขึ้นจะทำให้รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าจะมีค่าใกล้เคียงกับ รูปคลื่นขายนเวฟมากเท่านั้น (ลดกระแสฮาร์มอนิกส์) ปัจจุบัน IGBT สามารถจะทำการสวิทซ์สำหรับกระแสสูง หรือไดร์ฟตัวใหญ่ ที่ความถี่ 2 kHz ถึง 20kHz+ สำหรับไดร์ฟตัวเล็กได้ (ประมาณสิบปีที่ผ่านมาทรานซิสเตอร์สวิทซ์ซึ่งประมาณ 0.1-1kHz เท่านั้น) ดังนั้นความเร็วของการสวิทซ์ และเทคนิคในการสวิทซ์ซึ่งมีผลอย่างมากต่อการพัฒนาชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ 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)

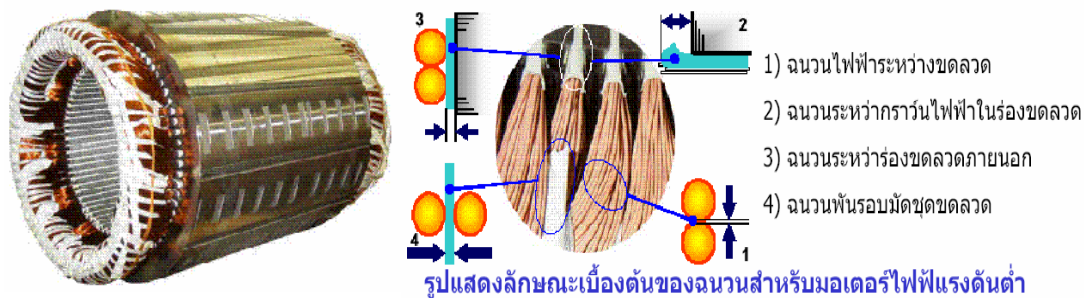
มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก

เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอกสามเฟส นั้นเป็น 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 เพิ่มความคงทนแข็งแรงอันเนื่องมาจากการสิ้นเสเทือน และลดโอกาสที่ฝุ่นละอองจะเข้าไปจับระหว่างขดลวด โดยทั่วไปในปัจจุบันนี้วัสดุของฉนวนที่ใช้ส่วนใหญ่ จะสามารถทนอุณหภูมิได้ตามการออกแบบ ฉนวนไฟฟ้า Class F ซึ่งจะสามารถทนอุณหภูมิได้สูงสุด 155°C

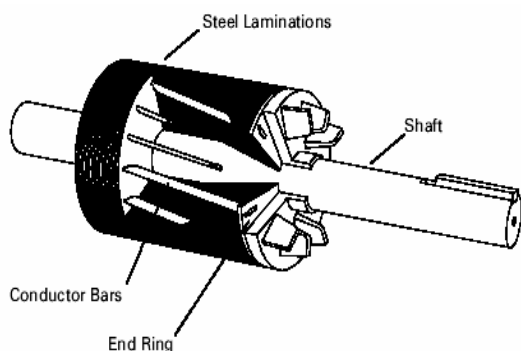


รูปที่ 3 แสดงลักษณะโครงสร้าง และ ขดลวดของ Stator ของมอเตอร์ไฟฟ้า

จากรูปที่ 3 แสดงลักษณะของขดลวดเมื่อพันเสร็จแล้วกลายเป็นขดลวดสเตเตอร์ รวมทั้งฉนวนขดลวดที่ใช้กันโดยทั่วไป โดยระบบของฉนวนสำหรับขดลวดไฟฟ้าในสเตเตอร์จะประกอบไปด้วย

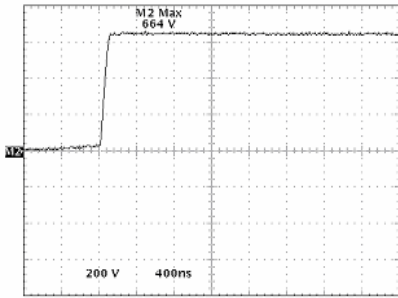
- ก.) ฉนวนระหว่างเฟสไฟฟ้า หรือระหว่างขดลวด (Phase barrier)
- ข.) ฉนวนระหว่างกราว์นกับเฟสไฟฟ้า (Slot liners etc.)
- ค.) ฉนวนระหว่างขดลวดไฟฟ้าเช่น ฉนวนเคลือบนำยาววานิชเป็นต้น

ส่วนชุดโรเตอร์กรงกระรอกสำหรับมอเตอร์ขนาดใหญ่อาจจะใช้ ทองแดงหรืออลูมิเนียมหุ้มเหลวจัดฝังในร่อง เหล็กแผ่นที่อัดเรียงกันเป็นโรเตอร์ การออกแบบรูปร่างของร่องโรเตอร์ขึ้นอยู่กับรูปร่างและการออกแบบและความสามารถในการผลิตของผู้ผลิต หากเป็นอลูมิเนียมหุ้มเหลวจัด จะมีข้อดีคือ น้ำหนักเบาและสามารถออกแบบรูปร่างของร่องโรเตอร์ได้ตามต้องการ ทำให้สามารถออกแบบลักษณะแรงบิดเริ่มหมุนของมอเตอร์ได้ตาม ชนิดของโหลดที่จะนำไปใช้งาน แต่หากใช้วิธีแทงทองแดงวางในร่องแล้วเชื่อมวงแหวนปิดท้าย ทำให้รูปร่างของร่องจะถูกจำกัดทางด้านการออกแบบ ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีของบริษัทใหญ่ๆที่ผลิตมอเตอร์ จะมีเครื่องฉีดอลูมิเนียมหุ้มเหลวจัดอัตโนมัติ สามารถฉีดอลูมิเนียมหุ้มเหลวในตัวโรเตอร์ได้ถึงขนาด 1000 kW (ซึ่งบริษัทเล็กๆ เมื่อตัวใหญ่ขึ้นจำเป็นต้องใช้แทงทองแดงลงด้วยมือเพราะปริมาณทางการค้าไม่มากพอที่จะออกแบบเครื่องจักรฉีดอลูมิเนียมหุ้มเหลวมาใช้สำหรับมอเตอร์ขนาดใหญ่)



รูปที่ 4 แสดงลักษณะโครงสร้างของ Rotor ของมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดกรงกระรอก

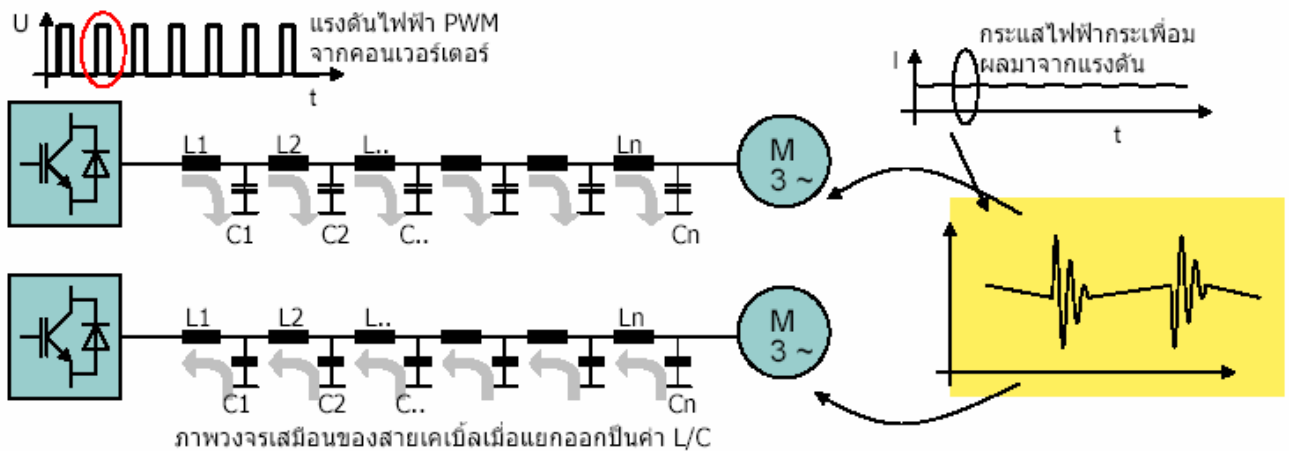
ผลกระทบจากสายเคเบิล และ แรงดัน transient จาก PWM



จากรูปเป็นภาพขยายสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ชนิด 2 ระดับ จะเห็นว่าระยะเวลาของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าจากจุดต่ำสุดไปยังจุดสูงสุด ใช้เวลาในการสวิตช์ซึ่งน้อยมาก ประมาณ 100 นาโนวินาที จาก 0 โวลต์ ไปเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ 664 โวลต์

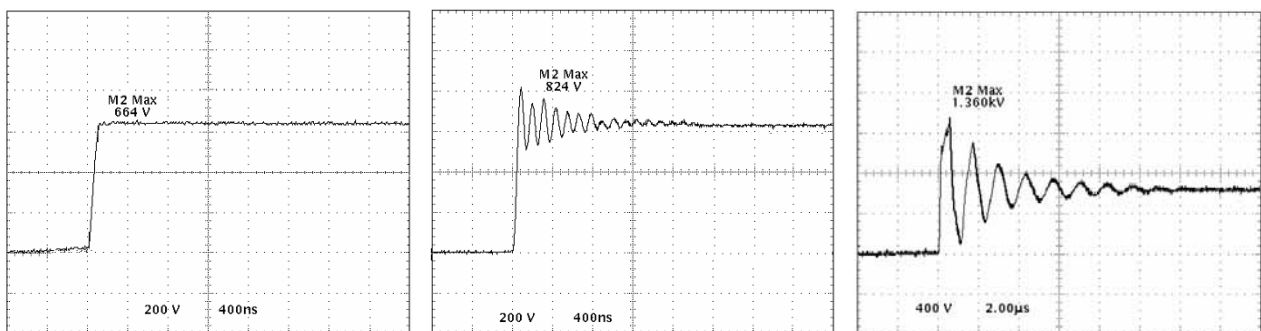
ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว จะส่งผลให้เกิดความเครียดแก่สายเคเบิลที่ต่อไปยังมอเตอร์ โดยธรรมชาติของสายเคเบิลไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยค่าความต้านทาน ค่าอินดักแตนซ์ และค่าคาปาซิแตนซ์ เมื่อเกิดการสับสวิตช์อย่างรวดเร็ว จะส่งผลให้เกิดค่า ค่าอินดักแตนซ์ และค่าคาปาซิแตนซ์ ตามทฤษฎีของสายส่งไฟฟ้า ดังรูปที่ 5

แสดงการเกิดค่าอินดักแตนซ์ และค่าคาปาซิแตนซ์ ระหว่างสายส่ง



รูปที่ 5 แสดงการเกิดค่าอินดักแตนซ์ และค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างสายส่ง

จากรูปที่ 5 แสดงการเกิดค่าอินดักแตนซ์ และค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างสายเคเบิล กระแสจะไหลผ่าน L1 และถูกชาร์จเข้าที่ C1 ด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ เมื่อกระแสถูกส่งต่อไปยัง L2 และถูกชาร์จเข้าที่ C2 ด้วยแรงดันไฟฟ้าจากอินเวอร์เตอร์บวกกับการคายประจุ เหตุการณ์เช่นนี้จะถูกกระทำไปเรื่อยๆ ตลอดย่านของสายส่งเคเบิล จนกระทั่งถูกส่งถึง Ln ตัวสุดท้ายหรือ จนกระทั่งถึงมอเตอร์ เนื่องจากแรงดันที่ถูกส่งผ่านจาก C1 จนกระทั่งถึง Cn จะส่งผลให้เกิดการเก็บประจุไฟฟ้าเกิดการแรงดันโอสซิลเลส แรงดันสูงขึ้นหรือ แรงดันทรานเซียนัล การโอสซิลเลสของแรงดันจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับความยาวของสายเคเบิล ดังรูปที่ 6 ก.)ข.)ค.)



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

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

จากรูปจะเห็นว่าที่ความยาวสายเคเบิล 0.5 เมตร รูปคลื่นจะมีค่าใกล้เคียงกับรูปคลื่น PWM มาก แรงดันสูงสุดจะเท่ากับแรงดันจาก DC เรกติไฟร์เออร์คือ 664 โวลต์ ($\sqrt{2} \times 460 = 650$ โวลต์) เมื่อความยาวสายเคเบิล

เปลี่ยนเป็น 4 เมตร รูปคลื่นจะมีค่าเปลี่ยนไปเป็นผลมาจากอาการแรงดันโอสซิลเลส จากค่า L และ C ของสายส่ง ส่งผลให้เกิดแรงดันสูงสุดทรานเซียนสูงขึ้นไปเป็น 824 โวลท์ เมื่อทดลองให้สายเคเบิลยาวเป็น 42 เมตร จะส่งผลให้เกิดแรงดันสูงสุดทรานเซียนสูงขึ้นไปถึง 1360 โวลท์ หรือเกือบ 2 เท่าของค่าแรงดัน DC link

โดยทั่วไปมอเตอร์ส่วนใหญ่จะออกแบบจนวนมาให้ใช้งานตามปกติสำหรับไฟฟ้ารูปคลื่นซายด์ ความคงทนของจนวนต่อแรงดันไฟฟ้าส่วนใหญ่จะออกแบบเพื่อเอาไว้ประมาณ 10% ของแรงดันสูงสุดของรูปคลื่นซายด์ กล่าวคือ มอเตอร์ 460 โวลท์ จะใช้จนวนที่สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ประมาณ $\sqrt{2} \times 460 \times 1.1 = 715$ โวลท์

ดังนั้นเพื่อป้องกันสาเหตุความเสียหายที่จะเกิดขึ้นจากอาการแรงดันโอสซิลเลส หรือ แรงดันสูงสุดทรานเซียน จากผลการใช้คอนเวอร์เตอร์ชนิด PWM ในการส่งจนวนมอเตอร์เมื่อนำมาใช้กับชุดควบคุมความเร็วรอบ Variable Speed Drive (VSD) หรือ คอนเวอร์เตอร์ ควรจะระบุชนิดของมอเตอร์ที่ออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับชุดควบคุมความเร็วรอบโดยเฉพาะ ทางโรงงานผู้ผลิตมอเตอร์จะทราบดีว่าจะต้องออกแบบจนวนให้ทนต่อสภาพแรงดันสูงสุดมากขึ้น และ ทรานเซียนสูงขึ้นไปกว่ามอเตอร์ทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเป็นระบบไฟฟ้าที่สูงกว่า 500 โวลท์ โดยทางโรงงานผู้ผลิตจะต้องออกแบบมอเตอร์โดยใช้ลวดที่มีจนวนหนาเป็นพิเศษ การขบวนการจะต้องดีเป็นพิเศษ รวมถึงระบบการลงขดลวด หรือจนวนร่องขดลวดต่างๆ เป็นต้น

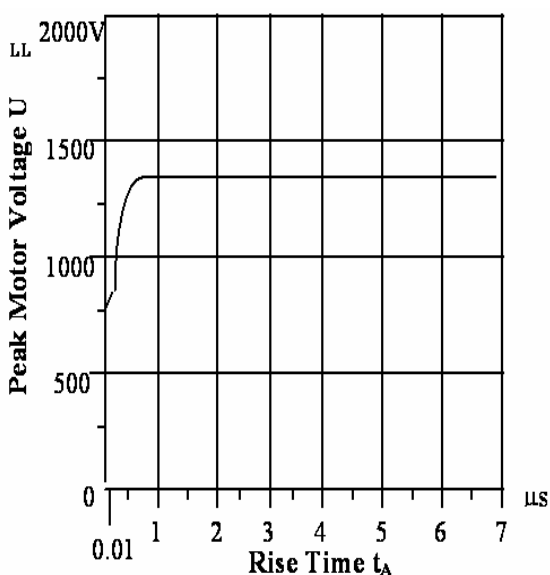
จากรูปที่ 6 ค.) เมื่อเกิดแรงดันสูงสุดสูงขึ้นไปถึง 1360 โวลท์ ในขณะที่มอเตอร์ได้ออกแบบมาให้ใช้กับระบบไฟฟ้า 460 V_{rms} หรืออีกนัยหนึ่งคือค่าสูงสุดของแรงดันคือ 715 V_{max} เมื่อแรงดันสูงเกินกว่าที่จนวนของมอเตอร์จะต้านทานไว้ได้ ก็จะทำให้เกิดการนำกระแสไฟฟ้าระหว่างขดลวดไหลผ่านทะลวจนวน ในช่วงแรกๆ อาจจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อนานๆเข้า อาจจะส่งผลกระทบต่อให้เกิด จนวนเสื่อมค่าความเป็นจนวนในที่สุด ทำให้เกิดความเสียหายแก่มอเตอร์ได้ เช่น

1. เกิดการลัดวงจรภายในขดลวดมอเตอร์ลงกราวด์ หรือ โครมมอเตอร์
2. เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟส ภายในขดลวดมอเตอร์
3. เกิดการลัดวงจรภายในเฟสเดียวกัน หรือ Inter turn coil ของขดลวดมอเตอร์

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

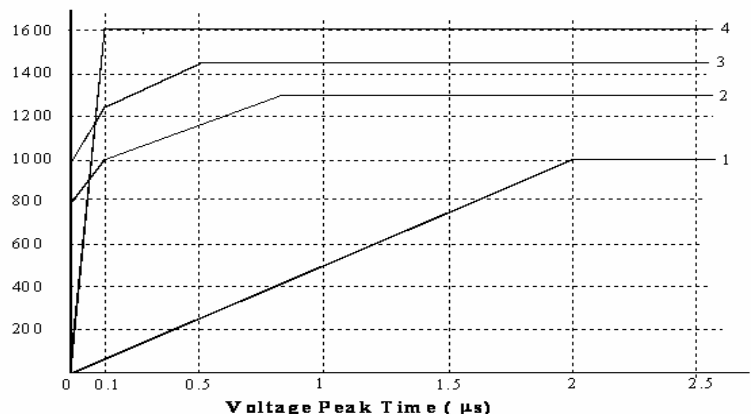
ในปัจจุบันทั้ง IEC และ NEMA ได้ให้ความสนใจ และได้กำหนดมาตรฐานของจนวนมอเตอร์ ที่จะนำมาใช้กับชุดควบคุมความเร็วรอบให้มีค่าทนแรงดันสูงขึ้นไปเช่น มาตรฐาน IEC 34-17(ฉบับร่าง) หรือ ของ NEMA โดยมีค่าสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 7 ก.) และ ข.)

1. Standard General Purpose Motors per NEMA MG1 Part 30
2. Standard Commercially Available Motors per Survey
3. Vendor A Standard Random Wound Motors Catalogue Data
4. Definite Purpose Motors per NEMA MG1 Part 31



รูปที่ 7 ก.) ค่าแรงดันสูงสุดที่ยอมรับได้ตาม IEC 34-17

M Motor Repetitive Pulse Withstand Capability



รูปที่ 8 ข.) ค่าแรงดันสูงสุดที่ยอมรับได้ตาม NEMA

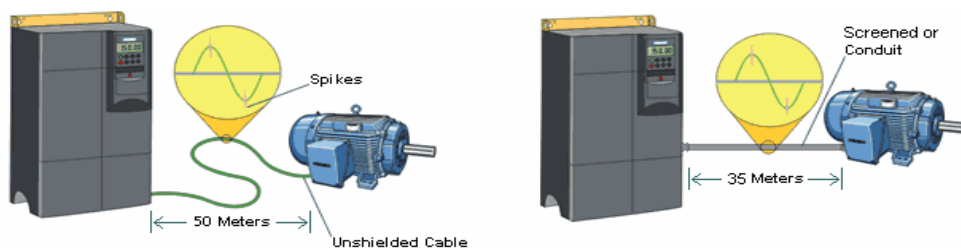
ตามมาตรฐาน NEMA มอเตอร์ที่ยินยอมให้มาใช้ได้กับชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์คือ กราฟที่ 4 โดยมีค่ากำหนดการทดสอบแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของฉนวนมอเตอร์ดังนี้คือ

- ที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 600 โวลท์ แรงดันสูงสุดที่ยอมรับได้ต้องไม่น้อยกว่า 1600 โวลท์ ที่ความเร็วสวิทซ์ชิ่ง > 100 ns
- ที่แรงดันไฟฟ้าสูงกว่า 600 โวลท์ แรงดันสูงสุดที่ยอมรับได้ต้องไม่น้อยกว่า 2.5 เท่า ที่ความเร็วสวิทซ์ชิ่ง > 1 μ s

วิธีการลดการขำรดของฉนวนมอเตอร์ก่อนเวลาอันควร

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาแล้วดังกล่าวข้างต้น เราจะทำอย่างไรให้มอเตอร์ที่จะนำไปใช้กับคอนเวอร์เตอร์มีอายุการใช้งานยาวนานอย่างที่ควรจะเป็น หรือ ทำอย่างไรจึงจะสามารถลดผลกระทบจากความยาวสายเคเบิลได้

การเลือกใช้มอเตอร์ที่ออกแบบมาโดยเฉพาะสำหรับ VSD นับว่าเป็นวิธีที่ง่าย และต้นทุนต่ำกว่า แต่อาจจะมีบริษัทผู้ผลิตไม่มากนักที่สามารถทำได้ตามมาตรฐาน IEC หรือ NEMA หรือในบางครั้งเมื่อเรามีมอเตอร์เดิมที่กำลังใช้งานอยู่ 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

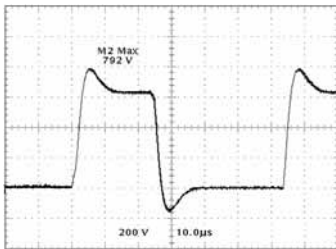
ตารางที่ 1 ตัวอย่างการกำหนดความยาวสายเคเบิลสูงสุดโดยปราศจากชุดกรองสัญญาณ

จากผลของ PWM ที่ออกจากชุดควบคุมความเร็วรอบ อันเป็นสาเหตุส่งผลให้เกิดค่า L/C ที่สายเคเบิลทำให้เกิดแรงดันโอเอสซีเลส หรือทรานเซียนส์ ผู้ผลิตชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์จึงต้องกำหนดความยาวสูงสุดของสายเคเบิล ที่สามารถยอมรับได้ดังตารางที่ 1 ในกรณีที่ไม่สามารถ หรือมีความจำเป็นต้องติดตั้งสายเคเบิลยาวกว่าข้อกำหนดสูงสุดของผู้ผลิตชุดควบคุมมอเตอร์กำหนดไว้ วิธีแก้ไขที่นิยมใช้มากที่สุดก็คือ การใส่ชุดแปลงหรือกรองรูปคลื่นเข้าไประหว่างชุดควบคุมความเร็วรอบ และ มอเตอร์ เพื่อลดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันอย่างรวดเร็ว (dv/dt) โดยแบ่งออกได้เป็นหลายวิธีขึ้นอยู่กับงบประมาณ และความจำเป็นที่จะนำไปใช้งาน

ก.) ใส่ Out put reactors



วิธีการเพิ่มรีเอ็กเตอร์ หรือ ใส่เข้าไปใส่ไว้ที่ด้านขาออกของชุดควบคุมความเร็วรอบ เปรียบเสมือนการเพิ่ม ค่า L1 ให้แก่สายส่ง เพื่อให้ลดค่า dv/dt และค่าแรงดันสูงสุดที่จะเกิดประจุไฟฟ้ากับสายส่งได้ ทั้งนี้การคำนวณหาค่า อินดักแตนซ์จะต้องถูกต้องและเหมาะสมตามขนาดของ VSDs



จากรูปแรงดันไฟฟ้าหลังจากติดตั้งคาร์เอ็กเตอร์ ที่มีค่า 3% สามารถช่วยลด ค่าแรงดันเปลี่ยนได้ประมาณ 5 μ s และลดแรงดันสูงสุดลงเหลือ 729 โวลต์ ซึ่งเป็นแรงดันสูงสุดที่ฉนวนมอเตอร์ตามมาตรฐานโดยทั่วไปสามารถยอมรับได้

โดยปกติใช้จะติดตั้งที่ด้านขาออกของชุดควบคุมความเร็วรอบทำให้ ต้องการพื้นที่มากขึ้น ประสิทธิภาพของทั้งระบบอาจจะลดลงประมาณ 0.5% อันเป็นผลมาจากพลังงานสูญเสียที่ รีเอ็กเตอร์

Maximum cable lengths which can be connected when a reactor is used

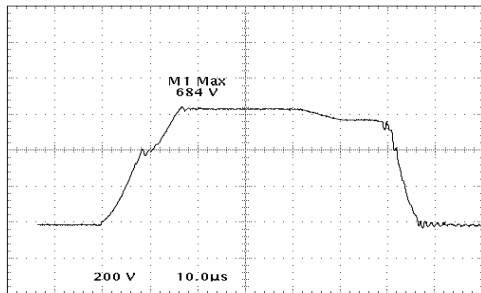
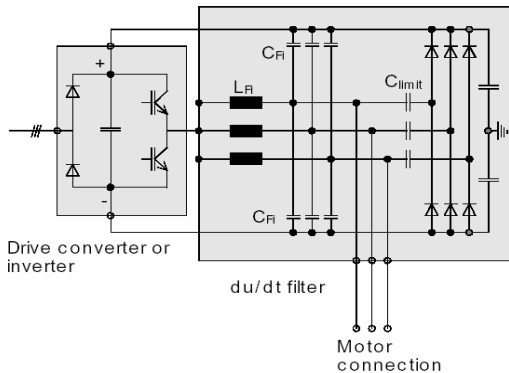
Number of reactors in series →		1	2	3	1	2	3
Drive converter/ inverter frame size	Rated voltage	Non-screened cables			Screened cables		
		To 4 kW	208 to 575V	150 m	1)	1)	100 m
5,5 kW	208 to 575V	200 m	1)	1)	135 m	1)	1)
7,5 kW	208 to 575V	225 m	450 m	1)	150 m	300 m	1)
11 kW	208 to 575V	240 m	480 m	1)	160 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 ตัวอย่างการกำหนดความยาวสายเคเบิลสูงสุดเมื่อใส่ output Reactors

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



ในกรณีนี้การออกแบบจะต่อคาปาซิเตอร์ และ อินดักเตอร์ และไดโอดเข้าไปด้วยกัน เพื่อลดค่า dv/dt ให้เหลือน้อยกว่า $500 \text{ V}/\mu\text{s}$ ถือเป็นการลดแรงดันที่เพิ่มขึ้น (voltage rise time) และแรงดันสูงสุดโดยทางอ้อมจากการกรอง dv/dt จากรูปแรงดันสูงสุดจะลดลงเหลือ 684 โวลต์ โดยมีค่า dv/dt ประมาณ $40 \text{ V}/\mu\text{s}$ เพียงพอสำหรับมอเตอร์มาตรฐานโดยทั่วไปสามารถยอมรับได้ วิธีนี้เป็นวิธีที่แนะนำให้ใช้สำหรับมอเตอร์ที่ไม่มีข้อมูลเพียงพอต่อการออกแบบ หรือใช้ในกรณีที่ใช้ชุดควบคุมความเร็วรอบไปขับมอเตอร์เก่าที่ติดตั้งอยู่ก่อนแล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งมอเตอร์ที่ใช้แรงดันไฟฟ้ามากกว่า 500 โวลต์

ชุดกรองรูปคลื่น dv/dt ตามประสบการณ์ของผู้เขียนจะมีต้นทุนค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นประมาณ 25% ของราคาชุดควบคุมความเร็วรอบ และต้องการพื้นที่และตู้เพิ่ม เต็ม

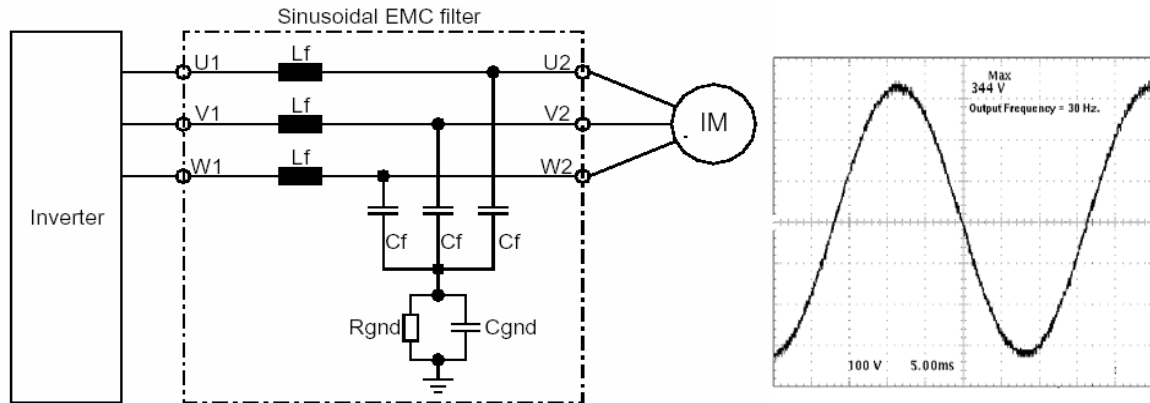
Cable lengths which can be connected when a dv/dt filter is used

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 ตัวอย่างการกำหนดความยาวสายเคเบิลสูงสุดเมื่อใส่ชุดกรองรูปคลื่น 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 และใช้ได้กับสายเคเบิลที่ยาวมากๆ ได้

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

$$A = 600 \text{ m} + 7.5 \cdot (P[\text{kW}] - 15) \text{ m}$$

$$B = 900 \text{ m} + 10 \cdot (P[\text{kW}] - 15) \text{ m}$$

P: Rated drive converter or inverter output in kW

ตารางที่ 4 ตัวอย่างการกำหนดความยาวสายเคเบิลสูงสุดเมื่อใส่ชุดกรองรูปคลื่นซายด์

เมื่อประมาณ 4-5 ปี ที่ผ่านมา ได้มีผู้ผลิตหลายราย ได้ผลิตชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ ติดตั้งคู่กับมอเตอร์เหมือนกล่องต่อสายมอเตอร์ ในกรณีนี้ L/C จากสายเคเบิลมอเตอร์จะไม่มีผลกระทบใดๆ กับตัวมอเตอร์สามารถตัดประเด็นปัญหา EMC และ แรงดันทรานเซียนเกินออกไปได้เลย ผลประโยชน์ที่จะได้รับต่อมา คือง่ายต่อการติดตั้ง เพราะเพียงแค่ต่อสายไฟเข้าชุดควบคุมความเร็วรอบโดยตรง แต่ระบบนี้เหมาะสำหรับมอเตอร์มีขนาดใหญ่ไม่เกิน 7.5 kW

ในประเทศแถบยุโรป, ญี่ปุ่น และอเมริกา เริ่มมีผู้นำไปใช้มากขึ้นเรื่อยๆ เพราะประเทศเหล่านั้น เป็นประเทศผู้ผลิตและส่งออกเครื่องจักรจึงไม่ต้องกังวลถึงการบริการหลังการขายว่าจะยากหรือง่าย หากเกิดชำรุดก็เปลี่ยนใหม่ไม่ต้องมาซ่อมแซมให้เสียเวลา ประกอบกับค่าแรงในการประกอบและติดตั้งสูงเมื่อเทียบกับราคาผลิตภัณฑ์ การนำชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไปติดตั้งคู่กับมอเตอร์ทำให้ลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ได้ แต่สำหรับประเทศไทยเนื่องจากค่าแรงในการติดตั้งยังไม่สูงมากนัก อีกทั้งบ้านเราเป็นเมืองร้อน อุณหภูมิบริเวณที่ติดตั้งมอเตอร์จะสูงกว่าประเทศแถบยุโรป บางครั้งมอเตอร์จะติดตั้งอยู่นอกอาคาร ซึ่งมีมากทั้งฝุ่น, น้ำ และสิ่งสกปรก อีกทั้งผู้ใช้ยังกังวลถึงการซ่อมแซมหากเกิดการชำรุด ดังนั้นในมุมมองของทางการค้า

