



## ผลกระทบจากอินเวอร์เตอร์ต่อแรงดันไฟฟ้าที่เพลามอเตอร์ และกระแสแบร์ริง Shaft Voltage and Bearing Currents in AC motor

ด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่ ทำให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำประเภท เพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ หรือ **Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs)** ที่แรงดันไฟฟ้าสูง ที่ระดับความถี่สูงได้ ทำให้มีการพัฒนาชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ (**Variable Speed Drives, VSDs**) แบบ PWM ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เพื่อมาทดแทนการปรับความเร็วรอบจากระบบทางกล ซึ่งก่อนหน้านี้อาจจะใช้ระบบไฮดรอลิกคลัมป์ริง หรือการใช้เกียร์เพื่อการทดรอบเป็นช่วงๆ ดังนั้น IGBTs จึงได้ถูกนำมาใช้แทนทรานซิสเตอร์ และ **Gate Turn Off thyristors (GTOs)** ซึ่งเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบเดิมของชุดปรับความเร็วรอบมอเตอร์ตั้งแต่ปี ค.ศ.1980

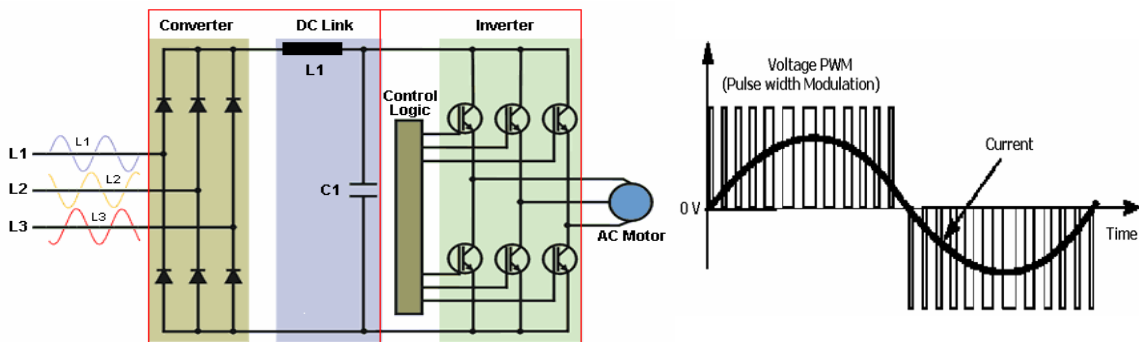
ตามหลักการของการออกแบบชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ หรือคอนเวอร์เตอร์ จะประกอบไปด้วยภาคเรกติไฟเออร์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง (AC → DC) และภาคอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับ (DC → AC) ตามทฤษฎี **PWM (Pulse Width Modulation)**

ตามพื้นฐานของการออกแบบชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ เราต้องการให้ง่ายต่อการใช้งาน ง่ายต่อการควบคุม มีความคงทนไม่เสียหาย อายุการใช้งานยาวนาน มีความสูญเสียน้อยที่สุด หรือให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ไม่ต้องการให้เกิดเสียงรบกวน(Noise) มีความแม่นยำ และต้องการให้มอเตอร์ตอบสนองต่อแรงบิดเร็วทันตามต้องการ ตามทฤษฎีสามารถทำได้วิธีหนึ่งคือ การสวิทชิง PMW ที่มีความถี่สูง แน่นนอนเมื่อต้องการอย่างหนึ่งก็ย่อมต้องเสียอีกอย่างหนึ่ง

จากคุณสมบัติของ IGBT เมื่อสวิทชิงที่ความถี่สูงจะมีปัญหาตามมาคือ เกิด **Electro Magnetic Compatibility (EMC)** และ แรงดันไฟฟ้าเกินที่ไม่ต้องการ จากคุณสมบัติ  $dv/dt$  จะมีรูปคลื่นแปลกปลอมที่เราไม่ต้องการผสมในคลื่นไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่มอเตอร์ อาจจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ หรือเกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่เพลามอเตอร์ เกิดกระแสไหลวนผ่านแหวนรองลื่น (Bearing) ลงกราวด์ได้

### พื้นฐานของคอนเวอร์เตอร์

จากรูปที่1 พื้นฐานวงจรไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์แบบ Voltage Source, PWM จากแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟสผ่านชุด ไดโอดเรกติไฟयर แปลงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็น ไฟฟ้ากระแสตรง (AC → DC) เรียกว่า "DC Link" DC Linkจะประกอบไปด้วยคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่ต่อขนาน บางครั้งอาจจะมี อินดักเตนซ์ต่ออนุกรมเพื่อลด  $di/dt$  พลังงานจะถูกเก็บไว้ที่ DC Link โดย คาปาซิเตอร์ทำหน้าที่กรองรูปคลื่นให้เรียบมากขึ้น ไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกชุดอินเวอร์เตอร์สวิทชิงให้เกิดย่านความถี่ต่างๆ โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดคงที่ตามค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ผ่านการเรกติไฟร์แล้ว ความถี่ที่สวิทชิงอาจจะกว้างหรือแคบในแต่ละช่วงจังหวะจะเป็นไปตามรูปแบบ PWM การปรับความถี่ หรือการปรับแรงดันไฟฟ้า rms สามารถทำได้โดยการปรับย่านความกว้างและจังหวะในการสวิทชิง ตามรูปที่1 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM แบบชนิด 2 ระดับ (2 Level)



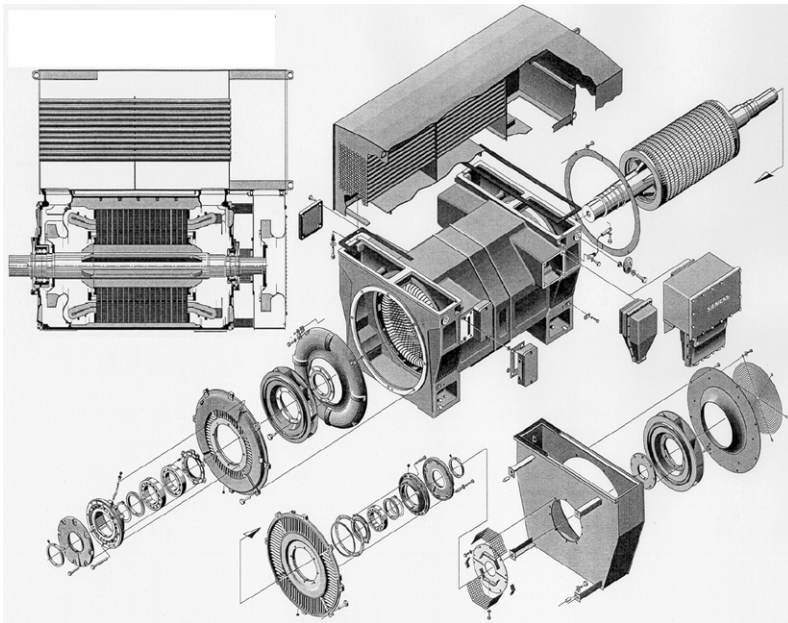
รูปที่1 พื้นฐานวงจรไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์แบบ Voltage Source, PWM

จากรูปที่ 1 แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ถูกส่งผ่านเข้าไปยังมอเตอร์ ทำให้เกิด รูปคลื่นชายนีเวฟของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามอเตอร์ อันเป็นผลกระทบอันเนื่องมาจากค่าอินดักเตนซ์ของมอเตอร์ที่มีปริมาณมากกว่าค่าความต้านทาน จึงแปลงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า PWM เป็นรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าชายนีเวฟ ที่มีริบเปลี้ยบ้างเล็กน้อย

การเพิ่มความถี่ของ PWM ให้สูงขึ้นจะทำให้รูปคลื่นของกระแสไฟฟ้าจะมีค่าใกล้เคียงกับ รูปคลื่นชายนีเวฟมากขึ้น ด้วยเทคโนโลยีของสารกึ่งตัวนำในปัจจุบัน IGBT's สามารถจะทำการสวิตชิงสำหรับกระแสสูงๆ หรือ วัตต์สูงๆ ที่ความถี่ 2 kHz ถึง 20kHz+ สำหรับวัตต์เล็กได้ (ความถี่สูงกว่า 20 เท่าเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีซิลิคอนที่ผ่านมา ทราซซิสเตอร์สวิตชิงประมาณ 0.1-1kHz เท่านั้น) ดังนั้นความเร็วในการสวิตชิง และเทคนิคในการสวิตชิงซึ่งมีผลอย่างมากต่อการพัฒนาชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

### มอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก

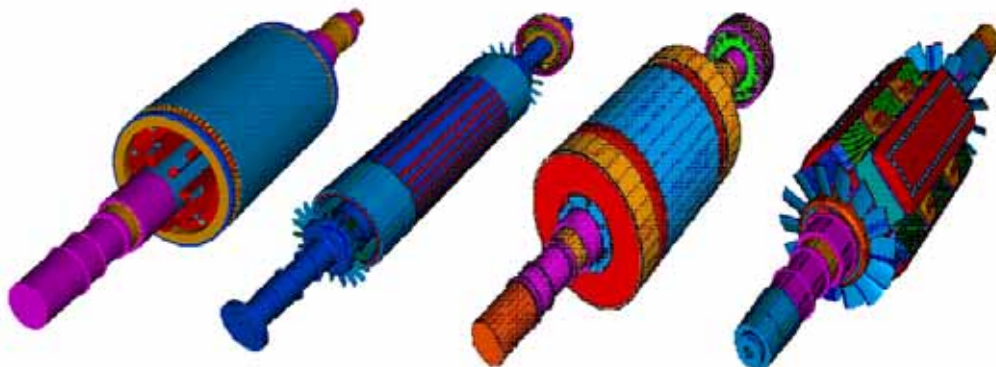
เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอกสามเฟสนั้นเป็น เครื่องจักรกลที่แปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ ให้เป็นพลังงานกลที่มีความแข็งแรง ทนทาน ง่ายต่อการการเริ่มหมุน และมีความนิยมนำมาใช้งานมากที่สุด โดยเฉพาะการเริ่มหมุนแบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้าโดยตรง (Direct On Line, DOL) ซึ่งเป็นวิธีที่สะดวก ราคาประหยัด บำรุงรักษาน้อย และให้แรงบิดเริ่มหมุนได้เต็มพิกัด แต่ก็ต้องสูญเสียการกระชากของกระแสอย่างมากจากแหล่งจ่าย (ประมาณ 5-7 เท่าของกระแสใช้งาน) และแรงบิดเริ่มหมุนจะกระชากไม่นิ่ง



โรเตอร์

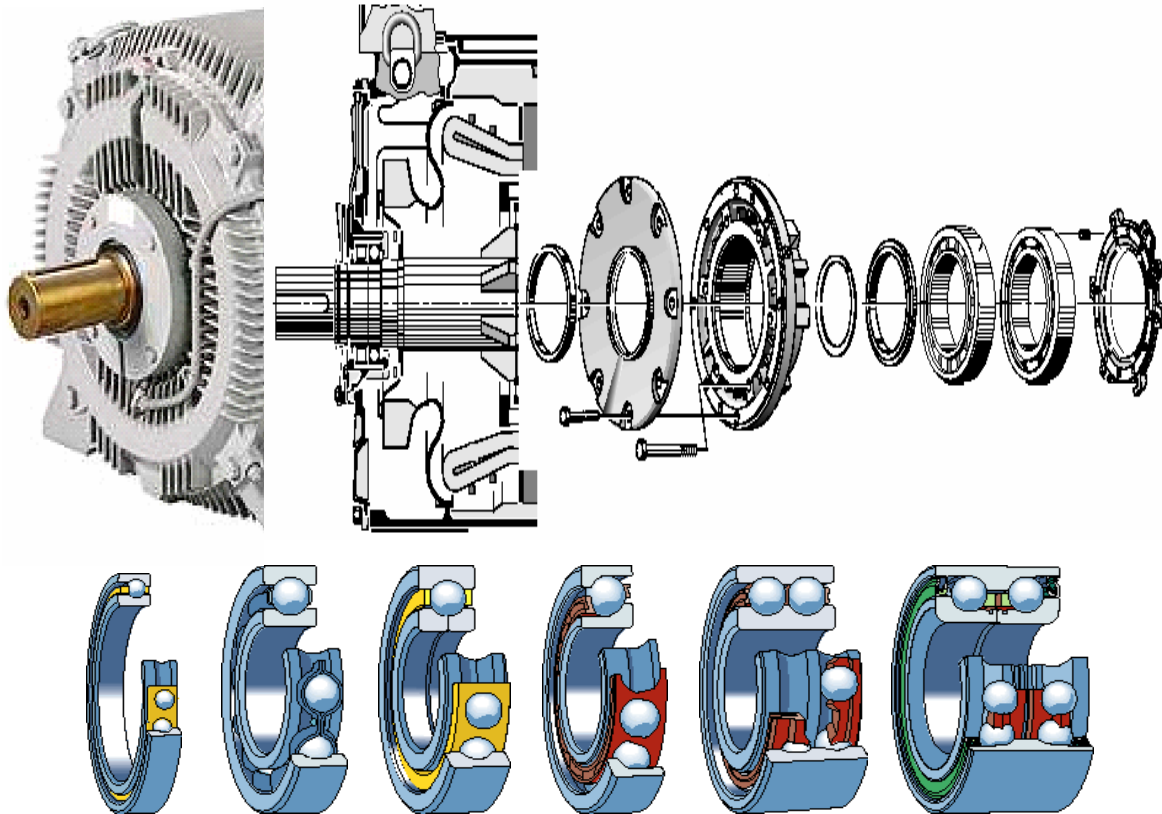
จากรูปที่ 2 แสดงมอเตอร์ โดยทั่วไปจะประกอบด้วยโครงสร้างอลูมิเนียมสำหรับตัวเล็ก ๆ หรือทำจากเหล็กหล่อ หรือ เมื่อมอเตอร์ตัวใหญ่มากขึ้นจะต้องทำจากเหล็กเหนียวขึ้นรูป อยู่นอกเพื่อป้องกันฝุ่น และนำตามมาตรฐาน IP55 และช่วยนำพาระบายความร้อนออกจากมอเตอร์ โดยออกแบบครอบสเตเตอร์ที่ทำจากแผ่นเหล็กบางเรียงอัดซ้อนกัน พร้อมขดลวดทองแดงหุ้มด้วยฉนวนฝังในร่อง ส่วนชุดโรเตอร์กรงกระรอกตามรูปที่ 3 อาจจะใช้ แท่งทองแดง หรือ อลูมิเนียมเคลือบฝังในร่องในเหล็กแผ่นลามิเนต ที่อัดเรียงกันเป็นแท่งโรเตอร์ แล้วเชื่อมปิดหัวและท้าย (End Ring) เพื่อให้ครบวงจรคล้ายกรงกระรอก โดยมีแท่งเพลาวางอยู่บนแหวนรองลื่น (Bearing) เพื่อรับน้ำหนักหมุนโรเตอร์ ระหว่างโครงมอเตอร์ และแกนเพลาร

รูปที่ 2 แสดงลักษณะภาพขยาย โครงสร้างภายในของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ



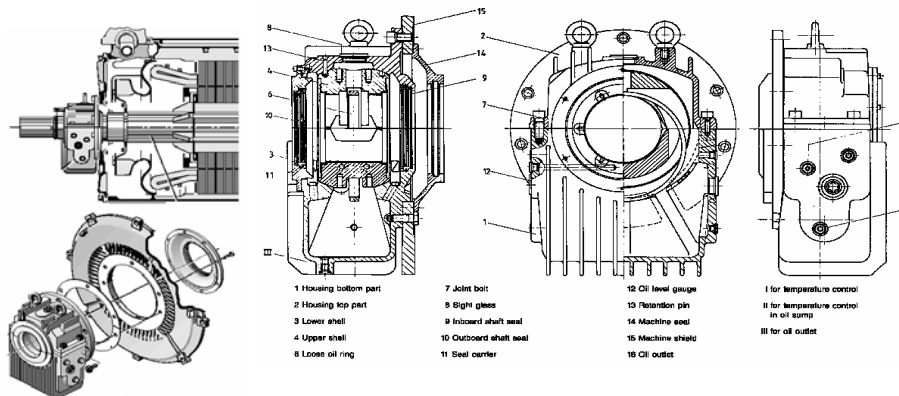
รูปที่ 3 แสดงลักษณะโครงสร้างของ Rotor ชนิดต่างๆ ของมอเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับ

แหวนรองลื่น หรือ แบริ่งที่มีใช้งานกันโดยทั่วไปสำหรับมอเตอร์ชนิดแบบติดตั้งวางติดตั้งกับพื้น ตามแนวแกนนอน ตามมาตรฐาน IEC 34-7 IM B3 หรือ IM 1001 โดยส่วนใหญ่จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ แหวนรองลื่นแบบปลอก (Sleeve bearing) จะนิยมใช้กับมอเตอร์ขนาดใหญ่กว่า 1 MW ขึ้นไป และ แหวนรองลื่นที่เห็นกันโดยทั่วไป แบบลูกกลิ้ง (Antifriction Ball or Roller bearing) หรือบางครั้งอาจจะเรียกว่า ดับบลิวบีอิน ทำหน้าที่รองรับน้ำหนักของทุ่นโรเตอร์ และเป็นจุดหมุนของแกนโรเตอร์ โดยส่วนใหญ่จะมีแหวนรองลื่นติดตั้ง 2 ด้าน คือ ด้านเพลลาขับ (Drives end) และด้านตรงข้ามเพลลาขับ (Non drives end) ดังรูปที่ 4 และ 5



*รูปที่ 4 ภาพแสดงลักษณะ Ball หรือ Roller แบริ่งสำหรับมอเตอร์ทั่วไป*

ถ้าพูดถึงเรื่องของกระแสรั่วผ่านทางแหวนรองลื่นแบบลูกกลิ้งจะมีมากกว่าแบบปลอก เนื่องจากแหวนรองลื่นแบบปลอกจะมีฟิล์มจากน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งทำหน้าที่ลดความฝืด จะมีความเป็นฉนวนกันระหว่างกลางแกนเพลลา และโครงมอเตอร์ ส่วนแหวนรองลื่นแบบลูกกลิ้ง จะประกอบไปด้วยแหวนอยู่สองวง คือ วงแหวนด้านนอก และวงแหวนด้านใน ดังรูปที่ 4 ระหว่างกลางจะมีลูกบอลสำหรับรับแรงและทำหน้าที่เป็นลูกกลิ้ง เมื่อมอเตอร์หมุนได้สักระยะ สารหล่อลื่นระหว่างร่องวงแหวนจะถูกบีบออก ทำให้เกิดมีหน้าสัมผัสโดยตรงระหว่างโลหะทำให้เกิดการไหลของกระแสได้ง่ายกว่า



*รูปที่ 5 ภาพแสดงลักษณะ Sleeve แบริ่งสำหรับมอเตอร์ขนาดใหญ่กว่า 1 MW*

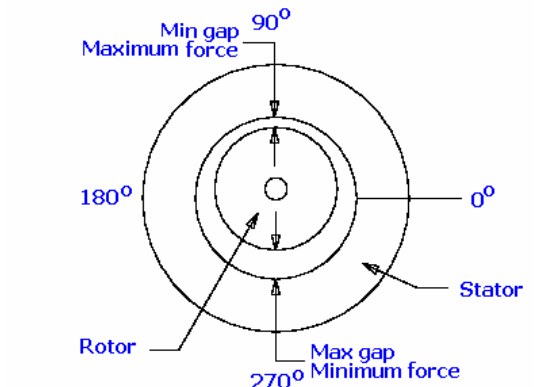
ความเสียหายที่แหวนรองลื่นของมอเตอร์ส่วนใหญ่จะเกิดจากสาเหตุทางกลเสียเป็นส่วนใหญ่เพราะสามารถมองเห็นได้ง่าย เช่น ขาดการดูแลสารหล่อลื่น การสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากการติดตั้ง หรือแนวเพลามาไม่ตรงกับโพลด์ หรือ การสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากแหวนรองลื่นชำรุดก่อนเวลาอันควรโดยไม่ทราบสาเหตุ

กระแสเหนี่ยวนำอันเนื่องมาจากสนามแม่เหล็กหมุน จากไฟฟ้ากระแสสลับ หรือสาเหตุเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า PWM อย่างรวดเร็ว (dv/dt) ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ อาจจะทำให้เกิดกระแสไหลวนผ่านทางแหวนรองลื่น เมื่อความเป็นจนวนไฟฟ้าของแหวนรองลื่นเสื่อมสภาพเมื่อแหวนรองลื่นมีกระแสไหลวนตลอดเวลา จะเกิดการสปาร์กเล็กๆ เหมือนกับเครื่องเชื่อมไฟฟ้า ทำให้ผิวภายในแหวนรองลื่นขรุขระ เกิดการสั่นสะเทือนเหมือนแหวนรองลื่นเสียหาย โดยไม่รู้สาเหตุต้นตอที่แท้จริง อันจะนำไปสู่การแก้ปัญหาที่ไม่ถูกต้อง

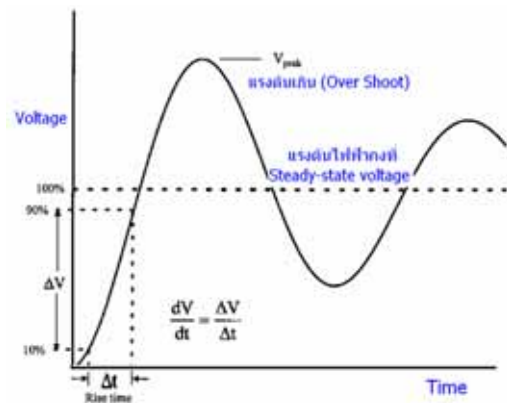
**ทฤษฎีการเกิดกระแสไหลผ่านแหวนรองลื่น (Bearing current)**

กระแสไฟฟ้าที่เพลามอเตอร์เกิดขึ้น ด้วยหลักการเหนี่ยวนำแบบเดียวกันกับที่เกิดที่ลวดโรเตอร์ทรงกระบอก เหมือนกับหลักการหม้อแปลงไฟฟ้า สนามแม่เหล็กนี้จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าต่างศักย์ขึ้นที่เพลามอเตอร์ หากเป็นมอเตอร์เล็กๆ มีความยาวเพลาลเพียง 10-20 เซนติเมตรก็คงไม่ต้องกังวลมากนัก

ด้วยเทคโนโลยีการพัฒนาประสิทธิภาพมอเตอร์ ส่วนหนึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้โดย ออกแบบให้ตัวมอเตอร์ยาวมากขึ้นเพื่อลดช่องว่างทางอากาศระหว่างโรเตอร์และสเตเตอร์ ทำให้มอเตอร์สมัยใหม่จะมีลักษณะยาวกว่าสมัยก่อน เมื่อแกนเพลามอเตอร์ยาวมากขึ้น อาจจะทำให้ความต่างศักย์ทางไฟฟ้าที่แหวนรองลื่นด้านเพลาชับ กับด้านไม่ใช่เพลาชับมีความต่างศักย์อาจจะมีถึง 1 โวลท์ แรงดันไฟฟ้านี้ดูเหมือนเล็กน้อยมาก หากไม่ครบวงจรก็คงไม่มีกระแสไหลได้ แต่ถ้าครบวงจรมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านค่าความต้านทานที่มีค่าเกือบเป็นศูนย์ ก็จะทำให้เกิดกระแสไหลผ่านแหวนรองลื่นเพียงพอที่จะทำความเสียหายแก่แหวนรองลื่นได้ ส่วนสาเหตุของการเกิดแรงดันไฟฟ้าต่างศักย์นั้นพอจะสรุปได้ดังนี้



รูปแสดงสนามแม่เหล็กไม่สมมาตรเนื่องจากช่องว่างอากาศ

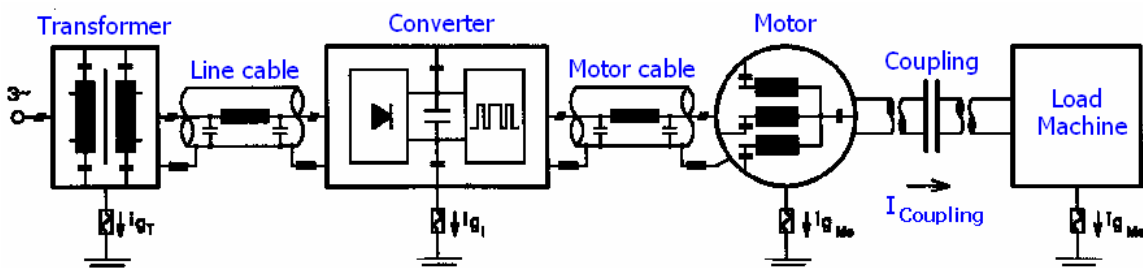


รูปที่ 6 แรงดัน Harmonics เกิดจาก PWM

1. จากรูปสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำไม่สมมาตร อันเกิดจากสนามแม่เหล็กหมุน ผ่านทางช่องว่างอากาศที่ไม่เท่ากันทุกองศา ทำให้เกิดวงจรแม่เหล็กไม่สมมาตรทุกมุมอย่างสมบูรณ์ (Electromagnetic fluxes asymmetries)

2. จากผลของแรงดันไฟฟ้าไม่สมมาตร และมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว อันเนื่องมาจาก PWM มี dv/dt ประมาณ 5-8 kV/μs ดังรูปที่ 6 อันเกิดจากสาเหตุ การสวิตชิงที่ความถี่สูงแบบ PWM ด้วยเทคโนโลยี IGBT ในขณะที่เทคโนโลยี GTO สมัยก่อนมี dv/dt แคเพียง 500 V/μs เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่สูงผ่านไปยังสายเคเบิ้ล จะเกิดปรากฏการณ์ L/C ดังรูปที่ 7 ซึ่งแสดงภาพการต่อวงจรของระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ทั้งระบบ เมื่อมีความถี่สูง PWM ออกจาก VSD จะทำให้เกิด L/C ตามทฤษฎีสายส่ง ที่สายเคเบิ้ลเข้ามอเตอร์ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า Harmonic dv/dt

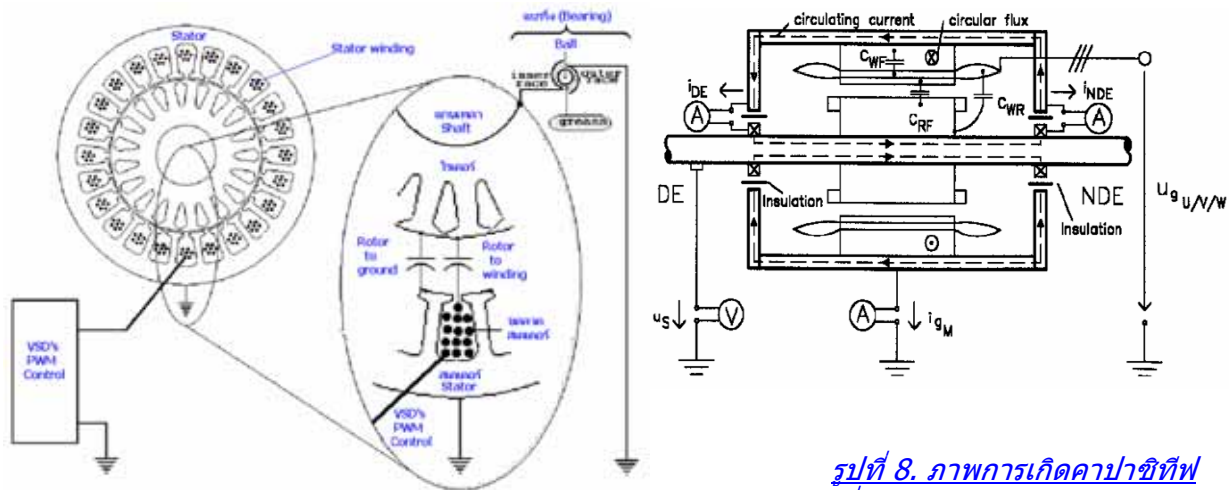
สูงเกินที่ตัวมอเตอร์เอง



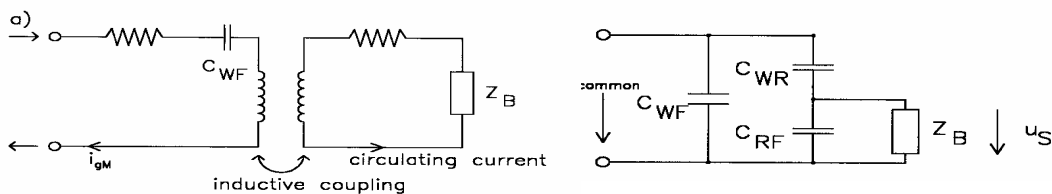
รูปที่ 7 ภาพแสดงการต่อระบบการขับเคลื่อน VSD รวมทั้งระบบ

3 แรงดันไฟฟ้าขายนั้เวฟ 3 เฟส ปกติจะสมมาตรกันทางไฟฟ้า โดยทำมุมห่างกัน  $120^\circ$  ทางไฟฟ้าทำให้แรงดันไฟฟ้า จะหักล้างกันเองทางเวกเตอร์ ตามทฤษฎีจึงไม่มีแรงดันไฟฟ้าที่สายนิวทรัล แต่แรงดันไฟฟ้า 3 เฟส ที่ออกจาก VSD ในรูปของ PWM จะจ่ายแรงดันไฟฟ้าด้วยควาถี่สูงซึ่งไม่สมมาตรกันทั้ง 3 เฟสแน่นอน ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วนิวทรัลไม่เป็นศูนย์ (Common mode voltage source circuit) ที่จุดสตาร์พอยท์ของขดลวดมอเตอร์ ทุกๆ ครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นไฟฟ้าทั้ง 3 เฟส จะทำให้เกิดความต่างศักย์ที่ขั้วนิวทรัล จึงทำให้เกิด กระแสพยายามไหลผ่านไปยังสายดินของระบบ หรือไหลวนกลับเข้าไปสู่สายดินของระบบ หรือของอินเวอร์เตอร์ เราเรียกขบวนการนี้ว่า Common mode current ซึ่งจะส่งผลให้เกิดค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่าง ขั้วนิวทรัลขดลวดสเตเตอร์มอเตอร์ และสายดินระหว่างโครงมอเตอร์กับโครงของ VSD

แรงดันไฟฟ้าไม่สมดุลย์ (common mode voltage) นี้จะส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตกคล่อมเกิดเป็นค่าคาปาซิแตนซ์ เกิดมีแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จ ส่งผ่านไปยังแกนเพลามอเตอร์ อันเนื่องมาจาก คาปาซิทีฟระหว่างสเตเตอร์ และโรเตอร์ และระหว่างสายดิน ดังรูปที่ 8 จะเกิด Capacitance ( $C_{WF}$ ) ระหว่างขดลวดสเตเตอร์กับโครงกราวด์มอเตอร์ Capacitance ( $C_{WR}$ ) ระหว่างขดลวดสเตเตอร์กับโรเตอร์ และ Capacitance ( $C_{RF}$ ) ระหว่างโรเตอร์กับโครงกราวด์มอเตอร์ จากค่า  $C_{WR}$  และ  $C_{RF}$  อันเนื่องมาจากผลของค่าคาปาซิเตอร์ หากมีค่ามากจะเกิดการนำกระแส (common mode current) และจ่ายกระแสผ่านทางแหวนรองลื่น เราเรียกว่า **Electromagnetic Discharge Machining (EDM)**



รูปที่ 8. ภาพการเกิดคาปาซิทีฟเนื่องมาจากผล PWM ของ VSD



รูปที่ 9. วงจรเสมือนการเกิดคาปาซิทีฟเนื่องมาจากผล PWM ของ VSD

จากรูปที่ 9 วงจรเสมือนกระแสไหลวนจากสาเหตุ inductive coupling เป็นผลมาจากกระแส  $I_{gM}$  และแรงดันไม่สมมาตรจาก VSD (common-mode current) และ แรงดันไฟฟ้าคาปาซิทีฟดิสชาร์จ ( $C_{WF}$ ) ระหว่างขดลวดสเตเตอร์กับสายดิน ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าต่างศักย์ระหว่างโรเตอร์ และสายดิน ( $U_S$ )

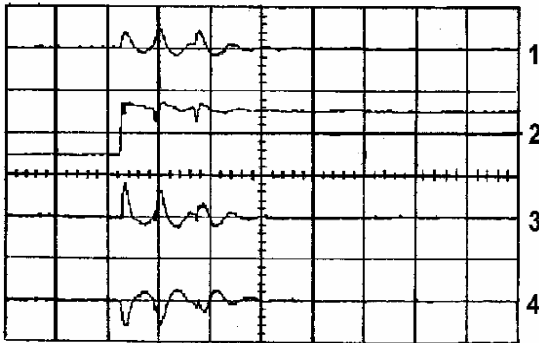
แรงดันไฟฟ้าที่เพลามอเตอร์สามารถพิสูจน์ได้โดยการวัดด้วยเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าแบบจับรูปคลื่นที่มีความถี่ 10 kHz–2 MHz ได้ โดยวัดได้ที่ระหว่างแกนเพลลา และสายดินในขณะที่มอเตอร์กำลังหมุน หากวัดแรงดันไฟฟ้าได้สูงกว่า 350 mV<sub>rms</sub> ก็สูงเพียงพอที่จะทำให้ฟิล์มที่สารหล่อลื่นแหวนรองลื่นแบบ Sleeve นำไฟฟ้าได้ และอาจจะทำให้แหวนรองลื่นเสียหาย และอายุการใช้งานสั้นลง

ดังนั้นมอเตอร์ขนาดใหญ่ที่ใช้กับไฟฟ้าแรงดันสูงโดยทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่กว่าเฟรม 500 ตาม IEC หรือมีขนาดใหญ่กว่า 500 kW และมอเตอร์ที่มีขั้วแม่เหล็กไม่มาก เช่นมอเตอร์ ชนิด 2 ขั้ว จะมีโอกาสเกิดวงจรแม่เหล็กไม่สมมาตรมากกว่ามอเตอร์ที่มีขั้วมาก ถึงแม้ว่าจะนำมอเตอร์นั้นมาใช้กับแรงดันไฟฟ้าปกติรูปคลื่นขายนั้หรือใช้กับ VSD ดังนั้นการออกแบบมอเตอร์จะผลิทมอเตอร์ขึ้นมาโดยติดตั้งฉนวนที่แหวนรองลื่นด้านใดด้านหนึ่ง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดกระแสไหลวนครบวงจรได้

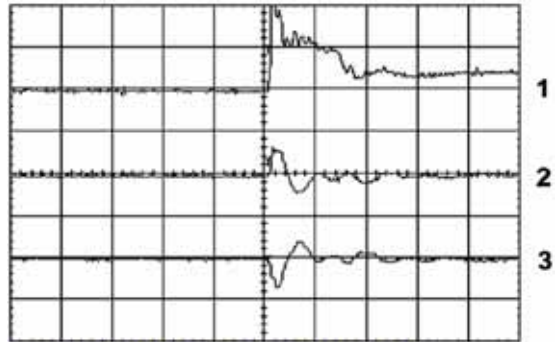
### การวิเคราะห์ทดลองกระแสไหลวนผ่านแหวนรองลื่น

ในการทดสอบการวัดแรงดันไฟฟ้าที่เพลา และกระแสไหลวนผ่านแหวนรองลื่น ได้ติดตั้งเครื่องมือวัดกระแส และ แรงดันไฟฟ้างดรูปที่ 8 โดยใช้ ดิจิตอลโอสซิลโลสโคป วัดกับมอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันต่ำ ขนาด 180 kW, 400V, 4 ขั้ว กับ ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ VSD 2 ระดับ(2 level) และ มอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันสูง ขนาด 3000 kW, 3.3 kV, 4 ขั้ว กับ ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ VSD 3 ระดับ (3 Level) ขับโดย HV IGBTs โดยแหวนรองลื่นเป็นแบบ sleeve มีฉนวนไฟฟ้าทั้งสองด้านของมอเตอร์ (DE และ NDE)

แรงดันไฟฟ้าที่เพลามอเตอร์ได้ติดตั้งแปรงถ่านคาร์บอนเพื่อยึดโพรบของดิจิตอลโอสซิลโลสโคป มอเตอร์ทั้งสองตัวขับตัวเปล่า ไม่ได้ต่อกับโหลดภายนอก ส่วนมอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันต่ำได้ติดตั้งบนแท่นทดสอบรองฉนวนไฟฟ้า โดยแยกสายดินออกมาต่างหาก



1. กระแส Igm 20A/ช่อง
2. แรงดัน phase to ground Ugu 500 V/ช่อง
3. กระแสที่แหวนรองลื่นด้านเพลาขับ 4 A/ช่อง
4. กระแสที่แหวนรองลื่นด้านตรงข้ามปลายเพลา 4 A/ช่อง
5. เวลาอ้างอิง 5  $\mu$ s/ช่อง



0. กระแส Igm ไม่ได้วัดเพราะต่อกราวด์เฟรม
1. แรงดัน phase to ground Ugu 1 kV/ช่อง
2. กระแสที่แหวนรองลื่นด้านเพลาขับ 10 A/ช่อง
3. กระแสที่แหวนรองลื่นด้านไม่ใช้ปลายเพลา 10 A/ช่อง
- เวลาอ้างอิง 5  $\mu$ s/ช่อง

### รูปที่ 9 ผลการวัดกระแสไหลวนที่แหวนรองลื่นที่มอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันต่ำ เมื่อขับที่ $f_1=0.1$ Hz

### รูปที่ 10 ผลการวัดกระแสไหลวนที่แหวนรองลื่นที่มอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันสูง เมื่อขับที่ $f_1=0.25$ Hz

รูปที่ 9 และ 10 แสดงผลที่ได้จากการวัดค่าต่างๆ เมื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ความเร็วรอบช้ามากๆ เพราะจะได่มองเห็นได้ถึงข้อแตกต่างอันเนื่องมาจากผลกระทบ PWM inverter ได้ชัดเจน โดยเฉพาะมอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันต่ำ มีค่า  $I_{gm}$  จะไหลกลับไปสู่แหล่งจ่ายผ่านทางสายดิน หรือ สายชิล โดยมีค่าความถี่โซแนนท์ที่ 300 kHz หากแรงไม่มีความถี่จะเกิดความเสียหายได้อย่างง่ายดาย

### ผลกระทบเมื่อมีกระแสไหลผ่านแหวนรองลื่น (Bearing effect)

Antifriction bearing หรือ บอลเบรริงประกอบด้วยลูกบอลอยู่ตรงกลาง หมุนอยู่ในร่องวงแหวนรองลื่นที่ยึดติดกับ แกนเพลา และที่ฝาครอบโครงมอเตอร์ ดังรูปที่ 4 เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจาก วงแหวนรองลื่นที่ยึดติดกับแกนเพลา ผ่านลูกบอลหมุน และไหลผ่านร่องวงแหวนรองลื่นที่ฝาครอบโครงมอเตอร์ เมื่อกระแสไหลผ่านระหว่างส่วนหมุนและส่วนที่อยู่กับที่ จะทำให้เกิดการสปาร์กเล็กๆ คล้ายการเชื่อมไฟฟ้า การเกิดขึ้นซ้ำๆ ซากๆ



ในขณะที่เพลากำลังหมุนอยู่ การอาร์กนี้ จะทำให้เกิดการกัดกร่อนที่ผิวของแหวนรองลื่น เมื่อการกัดกร่อนเกิดขึ้นแล้วจะเป็นทางเดินของกระแสไฟฟ้าที่ตีมากขึ้นเรื่อยๆ จนทำให้เกิดการลุกไหม้อย่างรวดเร็ว ทำให้แหวนรองลื่นเสียหายดังรูปที่ 11 หากทำการวัดความสั่นสะเทือนที่มอเตอร์จะพบว่าเกิดการสั่นสะเทือนสูงเกินขีดจำกัด และอาจจะส่งผลเสียหายทั้งกับตัวมอเตอร์เอง และขบวนการผลิตอย่างคาดไม่ถึง

### รูปที่ 11 ภาพแสดงแหวนรองลื่นมอเตอร์เสียหายอันเนื่องมาจากกระแสไหลผ่าน

### สรุปผล และวิธีการป้องกัน

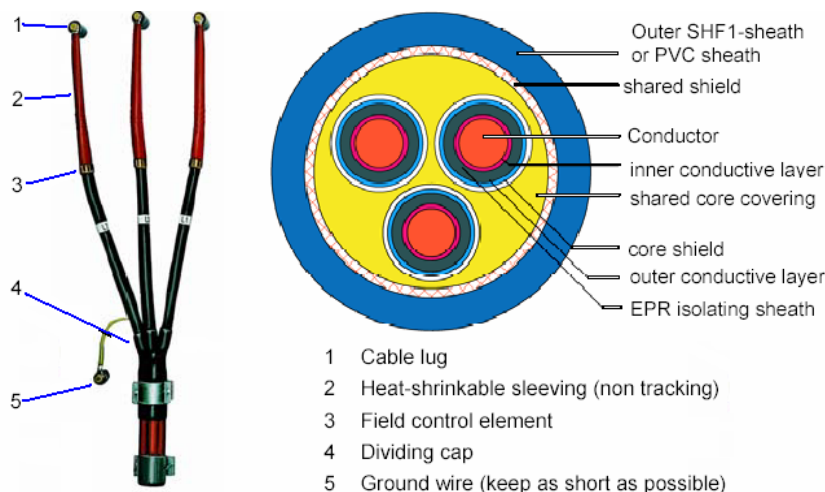
โดยส่วนใหญ่โรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ในประเทศไทยเจ้าของจะเป็นชาวต่างชาติ ในขณะที่กำลังก่อสร้าง หรือขยายกำลังการผลิต เครื่องจักรส่วนใหญ่จะจัดซื้อสำเร็จรูปมาจากต่างประเทศ ซึ่งได้คัดเลือกตามมาตรฐานของประเทศนั้นๆ โดยไม่ได้คำนึงถึงสภาพแวดล้อมของประเทศไทย เมื่อมาถึงประเทศไทย วิศวกรมีหน้าที่เพียงแคดูแล และรักษาให้เครื่องจักรกลสามารถทำงานได้ โดยขาดโอกาสศึกษาตั้งแต่เริ่มต้น ตั้งแต่ขบวนการออกแบบ และการคัดเลือกมอเตอร์

จากประสบการณ์ของผู้เขียนมีหลายกรณีที่แหวนรองลื่นของมอเตอร์เสียหายเร็วกว่าเวลาอันควร อาจจะเกิดมาจากสาเหตุที่เข้าใจไม่ถึง ยกตัวอย่างเช่น เมื่อครบกำหนดเวลาต้องเปลี่ยนแหวนรองลื่น ผู้ทำหน้าที่ซ่อมบำรุงตามโรงงาน หรือวิศวกรซ่อมบำรุง อาจจะเป็นวิศวกรเครื่องกลซึ่งขาดความเข้าใจทางไฟฟ้า ทำการเปลี่ยนแหวนรองลื่น จากแบบจนวนเป็นแบบธรรมดาที่มีขายโดยทั่วไป เนื่องจากมีประสบการณ์ไม่เพียงพอ หรืออาจจะเนื่องด้วยไม่มีการเรียนการสอนในมหาวิทยาลัย ประกอบกับ VSD ขนาดใหญ่ๆ ฟังจะเริ่มนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางมากขึ้น

โดยส่วนใหญ่บริษัทที่รับซ่อมมอเตอร์ขนาดใหญ่จะทราบวิธีการแก้ไขปัญหาคะแสรั่ว ที่ส่งผลทำให้แหวนรองลื่นเสียหายได้ แต่ด้วยนิสัยของคนไทย เมื่อรู้อะไรก็เก็บอมเอาไว้เป็นความลับทางการค้า ไม่ยอมถ่ายทอดประสบการณ์ให้กับคนรุ่นหลัง จึงทำให้วิศวกรรุ่นหลังต้องมานั่งเริ่มต้นลองผิดลองถูกกันใหม่ จึงทำให้วิศวกรซ่อมบำรุงรุ่นใหม่ ไม่สามารถหาต้นตอของสาเหตุที่แท้จริงได้ จึงทำได้แต่เพียงเปลี่ยนแหวนรองลื่นใหม่ ซึ่งไม่สามารถหยุดปัญหาดังกล่าวได้

จากรูปที่ 7 ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว เพื่อป้องกันสาเหตุดังกล่าวอันเนื่องมาจากการยึดสายดินที่มอเตอร์ไม่ดีพอ หรือไม่ได้ใช้สายชีลด์ต่อเข้ามอเตอร์ (Shielded or screen cable) มีวิธีการหยุดกระแสไหลไปทำอันตรายแหวนรองลื่นของโพลดิวิธีหนึ่ง คือ ใช้คัลป์ปลิงเป็นแบบมีฉนวน (Insulated coupling) เพื่อป้องกันกระแสไหลผ่าน ทำให้กระแส  $I_{Coupling}$  ไม่สามารถไหลลงสายดินที่โพลได้ เป็นวิธีหยุดกระแสไหลผ่านไปครบวงจรที่โพลแหวนรองลื่นอีกวงจรหนึ่ง ซึ่งปัจจุบันนี้คัลป์ปลิงแบบมีฉนวน หลายแบบหลายขนาด สามารถหาซื้อได้ไม่ยากนัก นอกจากนี้ยังมีวิธีการลดกระแสไหลผ่านแหวนรองลื่นมอเตอร์ อันเนื่องมาจากแรงดันไฟฟ้าต่างศักย์ในแกนเพลามอเตอร์ได้อีก หลายวิธี เช่น

1. หาก VSD ไม่ได้ใส่ชุดกรองรูปคลื่นไฟฟ้า เพื่อลดผลกระทบจาก  $dv/dt$  เนื่องมาจากสายเคเบิลที่ต่อเข้าสู่มอเตอร์ตามทฤษฎีสายส่งไฟฟ้า การเลือกใช้สายไฟฟฟ้าที่วางให้สมมาตร (symmetrical multi core cable) เป็นสาย 3 เส้นวางท่ามุม  $120^\circ$  พร้อมทั้งสายดิน และชีลด์โดยรอบ เพื่อให้สนามแม่เหล็กหักล้างกันเอง และป้องกันสนามแม่เหล็ก EMC ดังรูป จะช่วยลดผลกระทบลงได้ โดยเฉพาะกับ VSD ไฟฟ้าแรงดันสูงที่ต่อโดยตรงกับมอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันสูง



รูปที่ 12 ภาพแสดงรายละเอียดของสายเคเบิลไฟฟ้าแรงดันสูงสำหรับต่อเข้ามอเตอร์

2. เปลี่ยนเป็นแหวนรองลื่นชนิดมีฉนวนป้องกันทั้งสองด้านของมอเตอร์ จริงๆ แล้วด้านเดียวก็เพียงพอแต่เพื่อความอุ่นใจจะใส่ทั้งสองด้านก็ไม่ผิดกติกาแต่อย่างใด โดยลูกบอล หรือ โรเลอร์ อาจจะทำมาจากเซรามิก หรือใช้วัสดุฉนวนเคลือบผิวด้านนอกแหวนรองลื่น
3. ติดตั้งสายดินทั้งที่มอเตอร์ และชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ อาจจะใช้วิธีการเชื่อมติดเพื่อลดโอกาสที่ขั้วสายดินจะหลวม ทำให้การนำกระแสที่ไฟฟ้าแรงดันต่ำได้ยาก สายดินที่ใช้ควรจะเป็นสายถัก เพื่อสามารถทนต่อการสั่นสะเทือน และให้ความถี่สูงผ่านได้สะดวก

