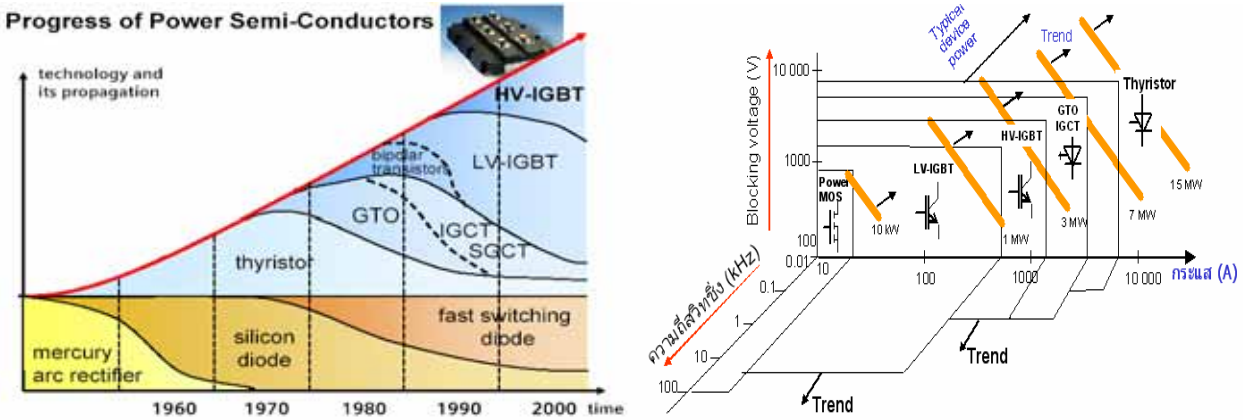
สงวนลิขสิทธิ์ © พ.ศ. 2546 ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ โดย บริษัท ไทนามิก จำกัด ห้ามลอกเลียนแบบไม่ว่าส่วนหนึ่งส่วนใดของบทความฉบับนี้ ไม่ว่าในรูปแบบใดๆ นอกจากจะได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากผู้เขียนเท่านั้น ยกเว้นเพื่อการศึกษาโดยไม่แสวงหากำไร (Copyright © 2003)

บริษัท ไทนามิก จำกัด
Tinamics Co., Ltd.

นวัตกรรม ชุดปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันสูง

Innovation of Medium Voltage Drives

ในอดีตเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันสูงนั้น มีข้อจำกัดอย่างมากในเรื่องของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ต้องใช้ไทริสเตอร์ (Thyristor) เป็นอุปกรณ์หลัก เพราะเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเพียงชนิดเดียวที่ทนต่อแรงดันสูงได้ แต่เนื่องจากไทริสเตอร์มีข้อจำกัดในหลายด้าน ทำให้เทคนิคการปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันสูง จึงค่อนข้างล้าหลัง เมื่อเทียบกับเทคโนโลยีการปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันต่ำ ซึ่งก้าวไกลไปกว่ามาก เนื่องจากสามารถนำเอาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในตระกูลทรานซิสเตอร์ (Transistor) ซึ่งง่ายต่อการควบคุมมากกว่า มาใช้เป็นอุปกรณ์หลักในวงจรได้ ทำให้เกิดการพัฒนาเทคนิคการขับเคลื่อนในหลายรูปแบบ เช่น เทคนิคการสร้างรูปคลื่นแบบ PWM, เทคนิคการควบคุมแบบเวกเตอร์ ฯลฯ ในขณะที่เทคนิคการปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันสูงยังย่ำอยู่กับที่ด้วยวิธีที่ต้องใช้ไทริสเตอร์ เป็นอุปกรณ์หลักในวงจรภาคกำลัง เช่น การปรับความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (Current source inverter), ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ (Cycloconverter) ระบบการปรับความเร็วรอบต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นนี้จะใช้ไทริสเตอร์เป็นอุปกรณ์หลัก ในขณะที่อุปกรณ์ตระกูลทรานซิสเตอร์ไม่สามารถทำได้



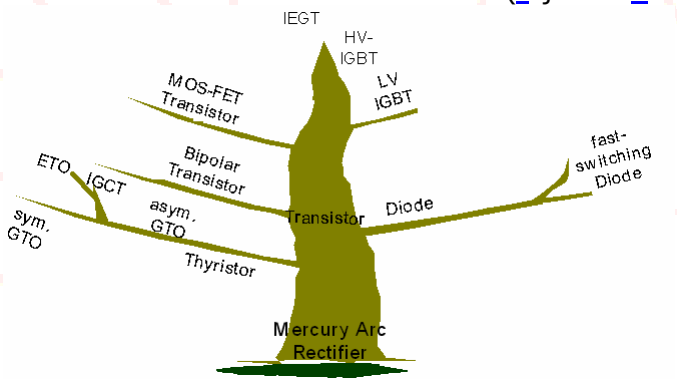
รูปที่ 1. แนวโน้ม การพัฒนาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Trend of power semiconductor)

จากรูปที่ 1 แสดง แนวโน้ม ของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำซึ่งถูกพัฒนามาจาก หลอดศูนย์ญากาศไดโอด (mercury arc rectifier) มาเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ PN ประเภทซิลิคอนไดโอด (Silicon diode) ซึ่งในระยะแรกยังไม่สามาถควบคุมการเปิด-ปิดวงจรได้ ต่อมาจึงได้พัฒนา แตกแขนงออกไปเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถควบคุมได้ คือ สารกึ่งตัวนำประเภทตระกูลทรานซิสเตอร์ (Transistors) และตระกูลไทริสเตอร์ (Thyristors)

หากจะกล่าวถึงอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำภาคกำลัง จากในอดีต Transistor Power MOS พัฒนามาเป็น IGBT (**I**nsulated **G**ate **B**ipolar **T**ransistor) และต่อมาไม่นามมานี้ได้มีการพัฒนามาเป็น HV-IGBT (**H**igh **V**oltage **I**nsulated **G**ate **B**ipolar **T**ransistor) ที่สามารถรองรับแรงดัน กระแส และความถี่ได้สูงขึ้นถึง 6500 โวลท์ และมีแนวโน้มที่จะนำไปแทนที่อุปกรณ์ตระกูล ไทริสเตอร์มากขึ้น เพราะอุปกรณ์ตระกูลทรานซิสเตอร์ ง่ายต่อการควบคุมการเปิด-ปิด เนื่องจากใช้วิธีการควบคุมโดยใช้แรงดันไฟฟ้า ทำให้ง่ายต่อการควบคุม และมีความสลับซับซ้อนของวงจรควบคุม รวมทั้งจำนวนอุปกรณ์จึงน้อยกว่า ชุดควบคุมอุปกรณ์ตระกูลไทริสเตอร์ ที่ใช้วิธีการควบคุมการเปิด-ปิดโดยควบคุมด้วยกระแสไฟฟ้า

อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภททรานซิสเตอร์กำลัง ได้มีการพัฒนา และนำไปใช้กันอย่างกว้างขวางทางการค้า จะเห็นได้ว่าสินค้าประเภท ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แรงดันต่ำ ส่วนใหญ่ในท้องตลาดจะใช้ IGBT เป็นอุปกรณ์หลัก ทำให้หน่วยงานวิจัย และพัฒนาของหลายองค์กรมีความคุ้นเคยกับอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์มากกว่า ตามหลักเศรษฐศาสตร์ เมื่อตลาดมีความต้องการมากขึ้น และมีควงามคุมค่าต่อการลงทุน ผู้ผลิตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำต่างๆ จึงหันมาพัฒนา อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทตระกูลทรานซิสเตอร์ ให้มีความสามารถรองรับได้ทั้งแรงดัน กระแส และ

ความถี่สูงยิ่งขึ้น และง่ายต่อการควบคุมมากยิ่งๆ ขึ้นไป จนปัจจุบันนี้สามารถพัฒนา HV-IGBT ให้สามารถทนแรงดันได้สูงขึ้นไปถึง 6500 โวล์ท และคาดว่าในอนาคตจะพัฒนาไปเป็น IEGT (**I**njection **E**nhanced **G**ate **T**ransistors)



รูปที่ 2. ทิศทาง การพัฒนาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Trend of power semiconductor)

ในอดีตจนถึงปัจจุบันชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แรงดันต่ำ ส่วนใหญ่จะใช้ทรานซิสเตอร์ หรือ IGBT เป็นอุปกรณ์หลัก และเมื่อต้องการไปควบคุมมอเตอร์ที่มีกำลังสูงมากๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นระบบไฟฟ้าแรงดันสูง กระแสจะสูง หรือ กำลังสูงมากๆ ในอดีตอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำตระกูลทรานซิสเตอร์ ยังไม่สามารถทนแรงดัน และกระแสได้มากเพียงพอ จึงจำเป็นจะต้องหลีกหนีข้อจำกัด ไปควบคุมความเร็วรอบ โดยการควบคุมสลิปด้านโรเตอร์ซึ่งมีแรงดันด้านต่ำ แทนที่การควมคุมโดยตรง จากทางด้านสเตเตอร์ จึงทำให้การควบคุมแบบนี้ถูกจำกัดไว้เพียงแค่ มอเตอร์แบบสลิปริ่งเท่านั้น เช่น ระบบขับเคลื่อนแบบเซอร์เบียส (Static Sherblus drive systems) หรือแบบ Cascade ดังแสดงในรูปที่ 3 นั่นเอง

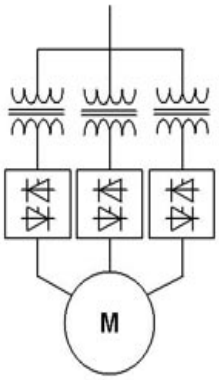
ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ แบบ Sherblus drive หรือ Cascade Systems ซึ่งระบบขับเคลื่อนแบบนี้ จะใช้ได้เฉพาะสลิปริงมอเตอร์เท่านั้น และสามารถความคุมความเร็วรอบ ได้จำกัดในช่วง 70%-100% จะเหมาะกับการควบคุมมอเตอร์ที่มีแรงดันไฟฟ้าด้านสเตเตอร์ไม่เกิน 11 kV และ มอเตอร์ควรจะมีขนาดประมาณ 1 MW -5 MW

รูปที่ 3. ระบบขับเคลื่อนแบบ Sherblus Drives หรือ Cascade Drives

ในอดีตที่ผ่านมา มีเพียงอุปกรณ์ตระกูลไทริสเตอร์เท่านั้นที่สามารถ ทนกระแส และแรงดันไฟฟ้าสูงได้ หากจำเป็นจะต้องควมคุมความเร็วรอบมอเตอร์ โดยตรงทางด้านสเตเตอร์ จำเป็นจะต้องออกแบบ ให้ใช้ อุปกรณ์ตระกูลไทริสเตอร์ประเภท SCR หรือ GTO หรือ IGCT มาใช้ในการควบคุมแรงดัน ทางด้านไฟฟ้าแรงดันสูง โดยในรอบหลายปีที่ผ่านมา มีวิธีการควบคุมได้หลายวิธี ดังต่อไปนี้

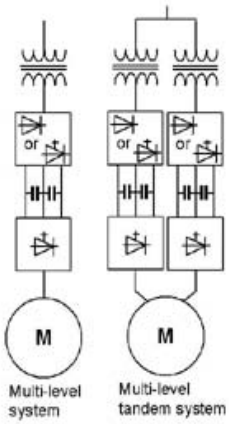
ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ แบบกระแสคงที่ (Current source) ขนาด 3 MVA (Synchronous machines Hydro-generators) ซึ่งโดยส่วนใหญ่ ระบบขับเคลื่อนแบบ Load-commutated inverter (LCI) จะเหมาะกับการควบคุมที่มีแรงดันสูงตั้งแต่ 1 kV จนกระทั่งถึง 23 kV และ ตามความเหมาะสมทางการค้าควรจะมีขนาดใหญ่เกินกว่า 7 MW ขึ้นไป

รูปที่ 4. ระบบขับเคลื่อนแบบ Load-commutated inverter (LCI) โดยใช้ SCR (Simovert® S)



ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ แบบ Cyclo converter โดยใช้อุปกรณ์ไทริสเตอร์ SCR เป็นตัวขับหลัก ซึ่งโดยส่วนใหญ่ ระบบขับเคลื่อนแบบนี้ จะเหมาะกับการควบคุมที่มีแรงดันระหว่าง 1.0 - 3.3 kV และ ตามความเหมาะสมทางการค้า ควรจะมีขนาดใหญ่มากกว่า 5,000 kW – 35,000 kW

รูปที่ 5 ระบบขับเคลื่อนแบบ Cycloconverter (CCV) drives โดยใช่ SCR (Simovert® D)



ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แบบแรงดันคงที่ ที่ใช้อุปกรณ์ไทริสเตอร์ GTO เป็นตัวขับหลัก ซึ่งโดยส่วนใหญ่ ระบบขับเคลื่อนแบบนี้ จะเหมาะกับการควบคุมที่มีแรงดันไม่เกิน 3.3 kV และตามความเหมาะสมทางการค้า ควรจะมีขนาดใหญ่มากกว่า 3,000 kW - 15,000 kW

รูปที่ 6 ระบบขับเคลื่อนแบบ Multi-Level PWM Inverter drives โดยใช้ GTO (Simovert® ML)

ระบบขับเคลื่อนต่างๆ เหล่านี้ถึงแม้จะใช้งานได้ดีพอสมควรกับมอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันสูง ที่มีขนาดใหญ่มากๆ แต่ก็มีปัญหาที่แก้ไม่ตกในเรื่องฮาร์มอนิก และการกระเพื่อมทางแรงบิด (Pulsation Torque) ที่เกิดขึ้นที่เพลาของมอเตอร์เนื่องมาจากผลของกระแสที่มีลักษณะเป็นขั้นบันได และผลของฮาร์มอนิกที่เกิดจากกระแสที่ไม่เป็นไซน์เวฟนี้ ยังทำให้เกิดความร้อนที่ตัวมอเตอร์เพิ่มขึ้นจากปกติ และทำให้ประสิทธิภาพของระบบโดยรวมลดลง นอกจากนี้การที่เราไม่สามารถควบคุมไทริสเตอร์ได้อย่างอิสระเหมือนอุปกรณ์ในตระกูลทรานซิสเตอร์ ทำให้ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดทำได้ค่อนข้างต่ำ และการที่ไทริสเตอร์ต้องใช้ช่วงเวลาในการ Recovery ประจุค่อนข้างนาน ทำให้ระบบทำงานได้ที่ความถี่สูงสุดที่ค่อนข้างต่ำ

จากที่ได้กล่าวไปแล้ว การพัฒนาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในตระกูลทรานซิสเตอร์ที่นิยมใช้กันอยู่ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แรงดันต่ำ คือ IGBT เมื่อนำหลักการ ของชุดควบคุมมอเตอร์แรงดันต่ำ มาใช้กับมอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันสูง เพื่อจะทำให้ชุดควบคุมมอเตอร์สามารถผลิตได้เป็นปริมาณมาก และทำให้เป็นมาตรฐานเดียวกันได้ มีประสิทธิภาพสูง และง่ายต่อการใช้งานมากยิ่งขึ้น ในปัจจุบันการพัฒนาเพื่อเข้าสู่เป้าหมายดังกล่าวได้แยกเป็นสองแนวทาง

รูปที่ 7 แสดงภาพ HV-IGBT ที่ใช้ในชุดปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันสูงแบบสามระดับ

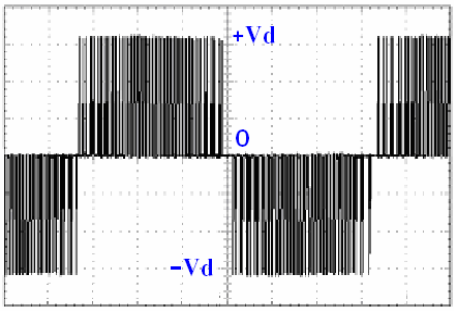
แนวทางแรก คือ การพัฒนา IGBT ให้ทนต่อแรงดันได้สูงขึ้น ทำให้ได้ HV-IGBT โดยนำมาต่อเป็นวงจรบริดจ์ โดยใช้เทคนิคการสร้างรูปคลื่น PWM แบบสามระดับ โดยใช้ระบบควบคุมคล้ายกับชุดควบคุมความเร็วรอบ แบบระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำได้

แนวทางที่สอง คือ การนำเอาชุดควบคุมความเร็วรอบ แบบระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ ที่มี IGBT แรงดันต่ำแบบปกติโดยทั่วไป มาต่ออนุกรมกันหลายๆ ครั้ง เพื่อให้สามารถรองรับไฟฟ้าแรงดันสูงได้ แล้วใช้เทคนิคการควบคุม และต่อวงจรเพื่อสร้างรูปคลื่น PWM ให้เป็นแบบหลายระดับ เพื่อให้ได้ระดับแรงดันตามความต้องการของมอเตอร์ โดยที่

IGBT แต่ละตัวยังคงรับภาระต่อแรงดันต่ำอยู่ ซึ่งจะได้กล่าวถึงเทคนิคการทำ IGBT แต่ละแบบมาใช้กับ การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันสูงโดยละเอียดต่อไป

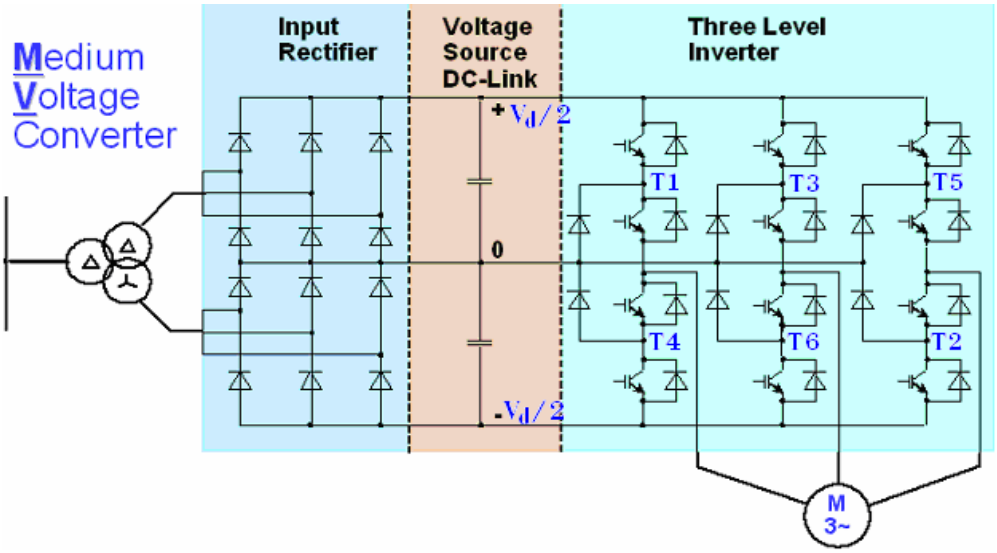
อินเวอร์เตอร์ PWM แบบสามระดับ

อินเวอร์เตอร์ PWM ดังที่แสดงในรูปที่ 8 นั้น เป็นรูปคลื่น PWM แบบสองระดับ กล่าวคือ จะมีเพียงสองระดับแรงดัน คือ 0 กับ $+V_d$ และ 0 กับ $-V_d$ ลักษณะของรูปคลื่น PWM สองระดับนี้ จะเหมาะกับมอเตอร์แรงดันต่ำไม่เกิน 1000 โวลท์ แต่ในกรณีของมอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันสูงเกินกว่า 1000 โวล์ทนั้น การใช้อินเวอร์เตอร์ PWM แบบสองระดับ จะมีปัญหาทั้งในส่วนข้อจำกัดในเรื่อง พิกัดแรงดันของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ, ค่าแรงดันเค้น (stress voltage) ที่มีต่อฉนวนของมอเตอร์ และค่า dv/dt ที่มีค่าสูงมากๆ ซึ่งจะส่งผลต่อฉนวนของสายเคเบิล และตัวมอเตอร์ รวมทั้งเกิดกระแสคาปาซิทีฟที่เคเบิล ทำให้อินเวอร์เตอร์ต้องจ่ายโหลดมากกว่าปกติ



รูปที่ 8 แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ PWM แบบสองระดับ

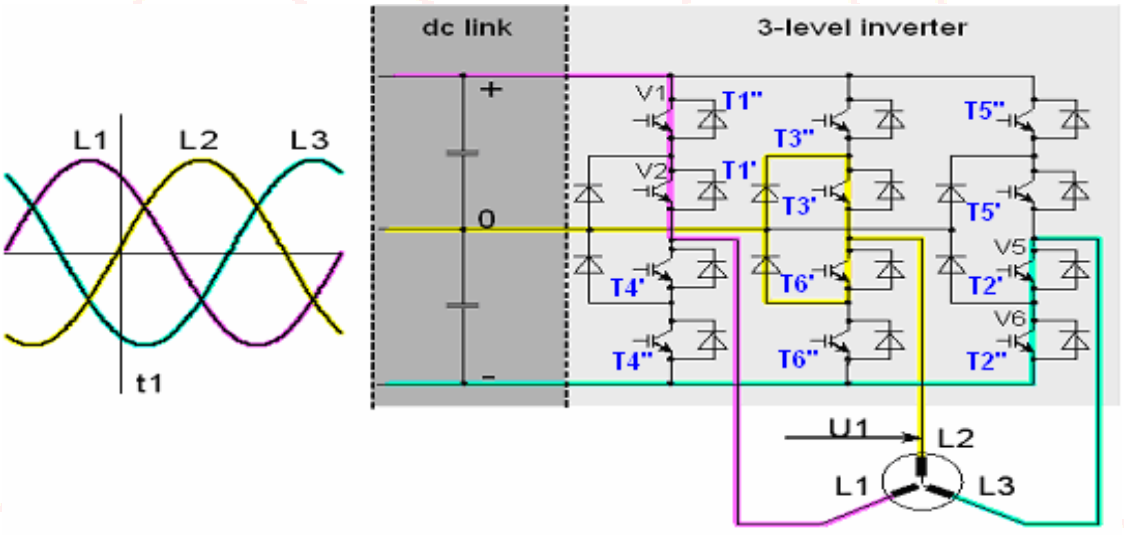
จากเหตุผลของข้อจำกัดต่างๆ เหล่านี้ของอินเวอร์เตอร์ PWM แบบสองระดับ ทำให้อินเวอร์เตอร์ PWM แบบสามระดับถูกค้นคว้าขึ้นเพื่อแก้ปัญหาต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นเมื่อต้องนำอินเวอร์เตอร์มาใช้กับมอเตอร์แรงดันสูง ดังรูปที่ 9 เป็นวงจรของอินเวอร์เตอร์ PWM แบบสามระดับ



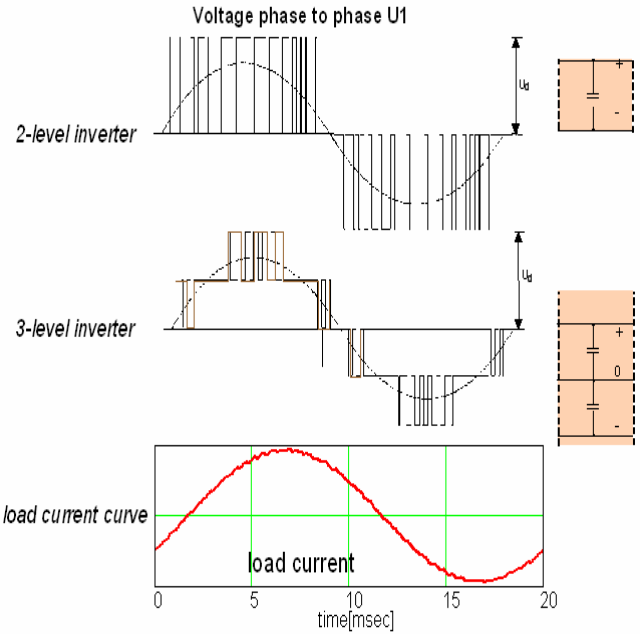
รูปที่ 9 แสดงวงจรของอินเวอร์เตอร์แรงดันสูง PWM แบบสามระดับ

จากรูปจะเห็นได้ว่าวงจรเชื่อมโยงกระแสตรงจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนโดยรับพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับจากขดลวดทุติยภูมิทั้งสองชุดของหม้อแปลงที่วางห่างกัน 30^O องศาทางไฟฟ้า วงจรบริดจ์ไดโอดชุดบนจะทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับ จากขดทุตยภูมิเดลต้าชุดบน แรงดันของวงจรเชื่อมโยงกระแสตรงที่ได้จะมีค่าเท่ากับ $+V_d/2$ ส่วนวงจรบริดจ์ไดโอดชุดล่าง จะทำหน้าที่แปลงไฟจากขดทุติยภูมิวาย ชุดล่าง และแรงดันของวงจรเชื่อมโยงกระแสตรงที่ได้จะมีค่าเท่ากับ $-V_d/2$ สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์ก็จะประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ทั้งหมดอย่างน้อย 12 ตัว หลักการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์นี้ ทรานซิสเตอร์ชุดใน คือ T_1', ถึง T_6', จะทำงานตลอดเวลา ส่วนทรานซิสเตอร์ชุดนอกคือ T_1'' ถึง T_6'' จะทำงานก็ต่อเมื่อต้องการให้ขาออกขึ้นสูงถึง $+ V_d$ หรือ $- V_d$ และจะสลับกันทำงานหากต้องการให้แรงดันขาออกอยู่ที่ $+ V_d /2$ หรือ $- V_d /2$

ยกตัวอย่างตามรูปที่ 10 เมื่อเปรียบเทียบการทำงานของอินเวอร์เตอร์ กับระบบไฟฟ้าสามเฟสรูปคลื่นซายด์เวฟ เช่น ณ. ช่วงเวลาที่ $t_1=0$ เมื่อ L_1 (เส้นสีม่วง) มีแรงดันไฟฟ้าสูงกว่า โดยมีแรงดันต่างศักย์เป็น+ ส่วน L_2 (เส้นสีเหลือง) มีแรงดันไฟฟ้าต่างศักย์เป็น 0 และ L_3 (เส้นสีฟ้า) มีแรงดันไฟฟ้าต่างศักย์เป็น- สวิทช์ IGBT T_1',T_1'' และ T_2',T_2'' มอเตอร์จะเริ่มมองเห็นแรงดันไฟฟ้าเหมือนกับระบบไฟฟ้าสามเฟส โดยให้เฟส L_1 และ L_3 นำกระแสไฟฟ้าครบวงจร โดยมี L_2 (เส้นสีเหลือง) เป็นจุดศุนย์ เหมือนกับระบบไฟฟ้าสามเฟสปกติ



รูปที่ 10 แสดงหลักการทำงานเบื้องต้นของอินเวอร์เตอร์ แบบสามระดับ



รูปที่ 11 แสดงรูปคลื่น PWM ที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ แบบสามระดับ เปรียบเทียบกับ

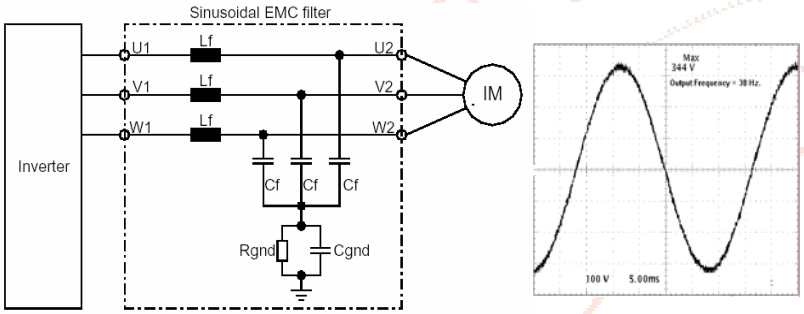
จากปัญหาต่างๆ ที่เกิดกับอินเวอร์เตอร์ แบบสองระดับตามที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น เมื่อเปลี่ยนมาเป็นอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ ก็จะลดลง

จากรูปคลื่น PWM ตามรูปที่ 11 ที่ได้จากอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ ออกมาจะมีรูปคลื่นสามระดับ ทั้งนี้จะมีข้อดีอยู่หลายประการ เช่น ลดแรงดันเค้น ที่มีผลต่อฉนวนของมอเตอร์, ฮาร์มอนิกของแรงดันจะมีค่าน้อยกว่า ทำให้สามารถสวิตซ์ทรานสเตอร์ให้ทำงานได้ที่ความถี่ที่ต่ำกว่าแบบสองระดับ ซึ่งก็หมายความว่ากำลังสูญเสียในการสวิตซ์ (switching loss) จะต่ำลงไปด้วย กำลังสูญเสียในแกนเหล็กซึ่งขึ้นอยู่โดยตรงกับความถี่ของการสวิตซ์ก็จะลดลงเช่นกัน

จากรูปจะเห็นว่าอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ จะมีจำนวนอุปกรณ์หลัก เช่น HV-IGBT เมื่อเปรียบเทียบกับแบบสองระดับ ก็จะต้องเพิ่มมากขึ้น อีกหนึ่งเท่าตัว ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับข้อดีที่มีมากกว่า จึงนับว่ามีความเหมาสมหากออกแบบเพิ่มระดับขึ้นไปอีก อุปกรณ์ที่ต้องใช้ก็จะต้องมากขึ้นตามไปด้วย

ทั้งนี้แม้ว่าจะหันมาใช้แบบสามระดับ แต่เนื่องจากเป็นแรงดันสูงอัตราการเปลี่ยนแปลง dv/dt ก็ยังนับว่ายังสูงอยู่ อาจจะยังไม่สามารถลดแรงเค้นที่ฉนวนมอเตอร์ได้มากพอ ยังมีทางเลือกที่สามารถแก้ไขได้ไม่ยาก โดยการเพิ่มอุปกรณ์ Sinusoidal EMC Output filter เพื่อทำหน้าที่กรองรูปคลื่นให้เรียบ ทำให้ได้รูปคลื่นใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซด์เวฟมากดังรูปที่ 12

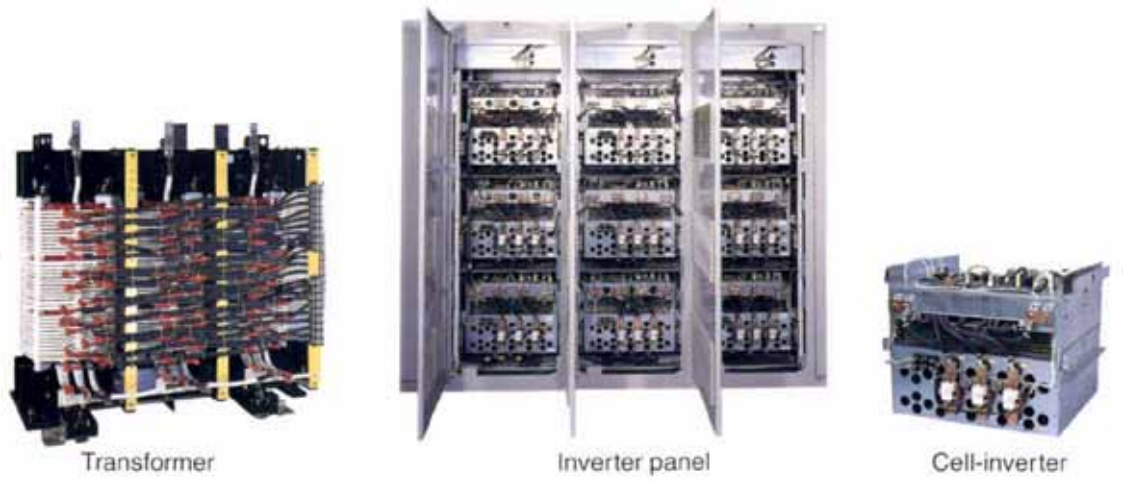
ชุดกรองรูปคลื่นซายด์ เป็นการออกแบบพิเศษเพื่อกรองรูปคลื่นให้เพียงรูปคลื่นที่มีความถี่ต่ำเท่านั้นที่จะผ่านได้ โดยจะป้องกันไม่ให้ความถี่สูงหรือ Harmonic ผ่านออกไป ทำให้รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงรูปคลื่นซายด์มากทั้งกระแส และแรงดันไฟฟ้า



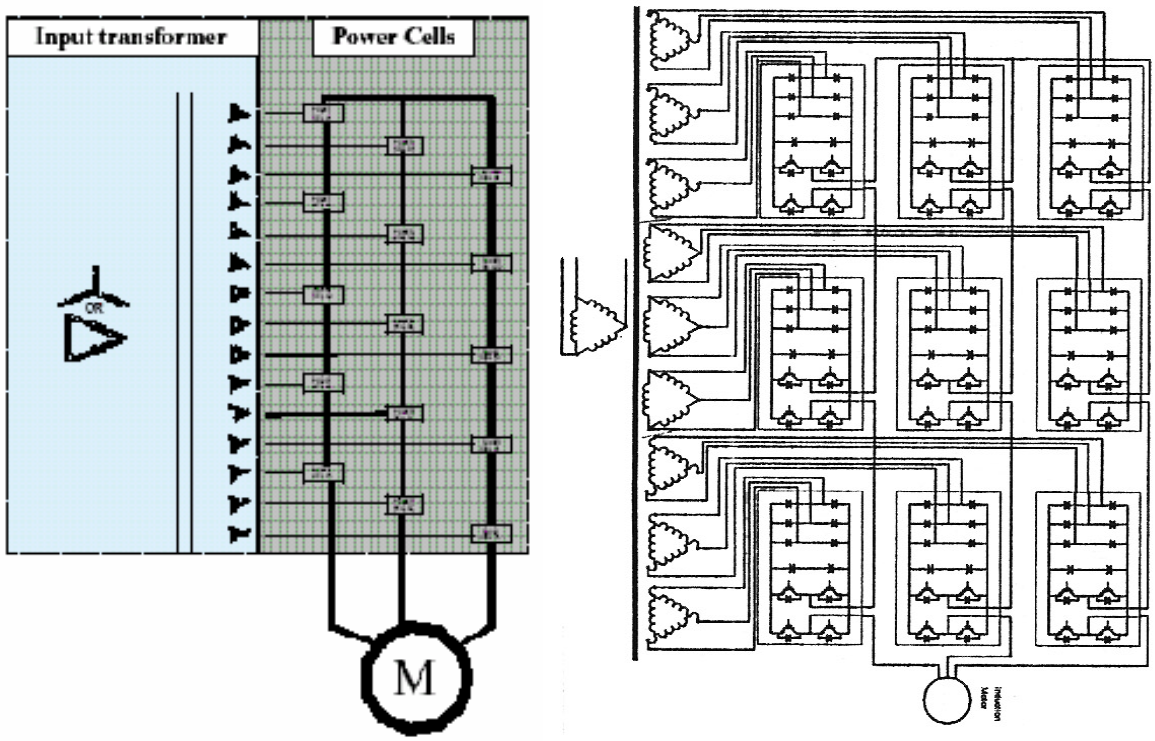
รูปที่ 12 แสดงชุดกรองรูปคลื่นซายด์ (Output filter)

อินเวอร์เตอร์ PWM แบบหลายระดับ

นอกเหนือจากการใช้อินเวอร์เตอร์ PWM แบบสามระดับสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันสูงแล้ว เทคนิคการสร้างรูปคลื่น PWM แบบหลายระดับก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาในเรื่องข้อจำกัด เกี่ยวกับพิกัดแรงดัน ของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเอง ซึ่งในการใช้เทคนิคการสร้างรูปคลื่นแบบ PWM แบบหลายระดับนี้ มีข้อดีคือสามารถใช้อุปกรณ์ที่มีพิกัดแรงดันต่ำกว่าแบบสามระดับได้ ในขณะที่ต้องการขนาดแรงดันขาออกเท่ากัน



รูปที่ 13 แสดงรูปภาพของ หม้อแปลง - เซลอินเวอร์เตอร์ และชุดอินเวอร์เตอร์แบบหลายระดับ

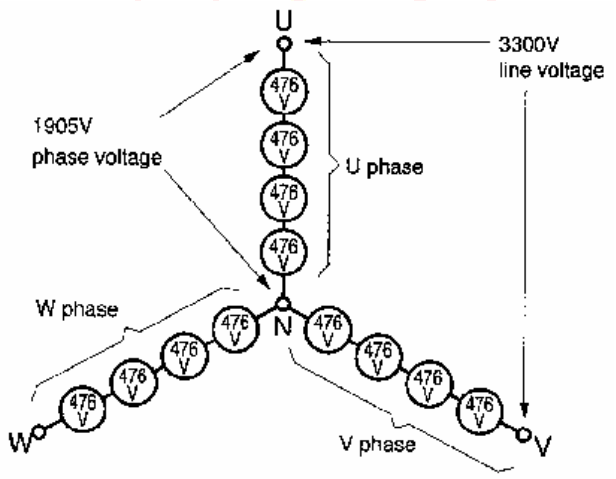


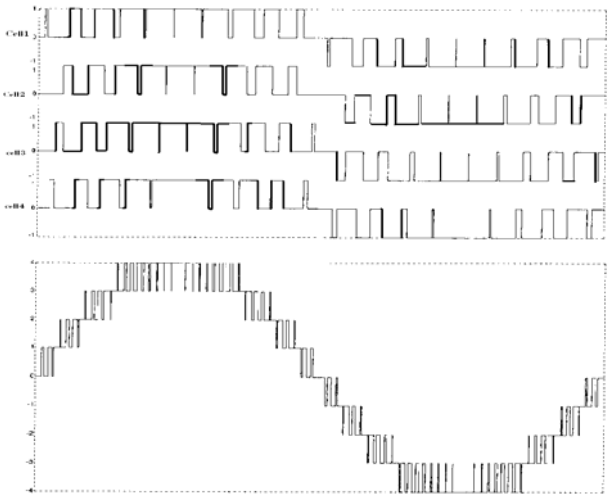
รูปที่ 14 แสดงหลักการทำงานเบื้องต้นของอินเวอร์เตอร์ แบบหลายระดับ

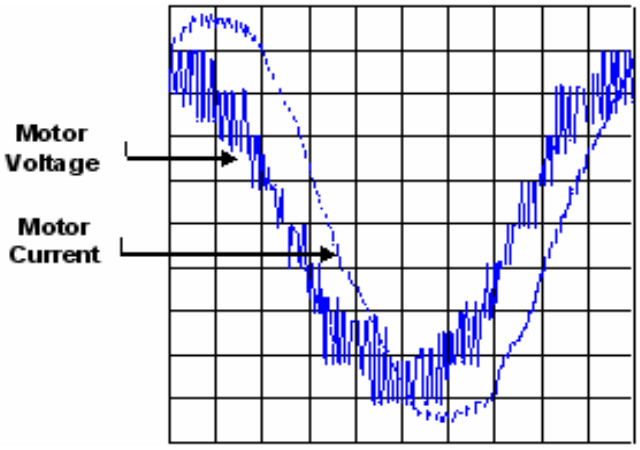
แนวคิดของอินเวอร์เตอร์ PWM แบบหลายระดับ ก็คือ การนำเอาแหล่งจ่ายหลายเซลล์มาต่อเข้าด้วยกันในลักษณะการต่อแบบอนุกรม เพื่อที่จะได้ระดับแรงดันที่สูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 14 โดยใช้แหล่งจ่ายแต่ละเซลล์ในเฟสเดียวกันจะมีขนาดเท่ากัน และมีมุมอินเฟสกัน ดังนั้นขนาดของแรงดันเฟสจะเท่ากับผลรวมของแรงดันของทุกเซลล์ในเฟสนั้น ยกตัวอย่างจากรูปด้านซ้าย ซึ่งแต่ละเฟสประกอบไปด้วย 5 เซลล์ของแหล่งจ่าย ถ้าต้องการแรงดันระหว่างสายเท่ากับ 3300 V หรือแรงดันเฟสเท่ากับ 1905 V ก็จะได้ว่าแรงดันของแหล่งจ่ายแต่ละเซลล์จะมีค่า

เท่ากับ 1905/5=380 V ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเราสามารถนำเอาแหล่งจ่ายแรงดันต่ำมาทำงานร่วมกัน เพื่อให้ได้แหล่งจ่ายแรงดันสูงได้

จากแนวคิดดังกล่าวข้างต้น หากเราแทนแหล่งจ่ายแต่ละเซลล์ด้วยอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส เราก็จะได้อินเวอร์เตอร์แรงดันสูง 3 เฟส ที่สามารถปรับทั้งขนาดและความถี่ของแรงดันขาออกได้รูปที่ 13 ด้านขวามือ แสดงวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ที่จะนำมาแทนแหล่งจ่ายแต่ละเซลล์







รูปที่ 15 แสดง หลักการ และรูปคลื่น PWM ที่ออกจาก อินเวอร์เตอร์ แบบหลายระดับ

การกำหนดช่วงจังหวะการทำงานของอินเวอร์เตอร์แต่ละเซลล์ จะทำให้แรงดันขาออกของแต่ละเฟสมีระดับแรงดันของรูปคลื่นได้หลายระดับเท่ากับจำนวนเซลล์ที่มีอยู่ ยกตัวอย่างเช่น ในเฟส U ถ้าให้เซลล์ U1 มีระดับแรงดันเท่ากับ 1 ส่วนเซลล์อื่นมีระดับแรงดันเท่ากับ 0 เฟส U ก็จะมีระดับแรงดันเท่ากับ 1 ต่อมาก็กำหนดให้ U2 มีระดับแรงดันเท่ากับ 1 ด้วน ในขณะที่เซลล์อื่นยังเป็น 0 เหมือนเดิม ระดับแรงดันของเฟส U ก็จะเพิ่มเป็น 2 ตามระดับแรงดันของ U1 รวมกับ U2 รูปที่ 15 แสดงรูปคลื่น PWM แบบหลายระดับ และช่วงจังหวะการทำงานของแต่ละเซลล์ของอินเวอร์เตอร์ที่มีเซลล์อินเวอร์เตอร์ย่อยสามเซลล์ต่อกัน จากรูปถ้าพิจารณาที่เวลา t1 จะเห็นว่าขณะที่เซลล์ทั้งสามให้ระดับแรงดันเท่ากับ 1 แรงดันขาอกของเฟสก็จะเท่ากับ 3 ต่อมาที่เวลา t2 เซลล์ 1 และ 2 ให้ระดับแรงดันเท่ากับ 0 เหลือเพียงเซลล์ 3 เท่านั้นที่ให้ระดับแรงดันเท่ากับ 1 แรงดันเฟสที่เวลา t2 จึงมีค่าเท่ากับ 1 ส่วนที่เวลา t3 เซลล์ทั้งสามให้ระดับแรงดันที่ –1 จึงทำให้ระดับแรงดันของเฟสขาออกอยู่ที่ –3 ลักษณะของรูปคลื่นขาออกจึงออกมาเป็นดังรูปที 15

เทคนิคการสร้างรูปคลื่น PWM แบบหลายระดับนี้ มีข้อดีตรง สามารถใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีระดับแรงดันต่ำ และราคาถูกกว่ามาสร้างเป็นอินเวอร์เตอร์แรงดันสูงได้ ทำให้ลดข้อจำกัดในเรื่องพิกัดแรงดันของอุปกรณ์ลงได้ แต่ยังต้องปรับปรุงในเรื่องของจำนวนอุปกรณ์ที่มีจำนวนมาก ซึ่งจำนวนอุปกรณ์ที่มีมาก และต่อกันแบบอนุกรมนี้จะมีผลต่อเสถียรภาพของระบบ เพราะจำนวนโอกาสที่ระบบจะทำงานผิดพลาดก็มีมากขึ้นไปด้วยตามจำนวนของอุปกรณ์ที่ต่ออนุกรม และเนื่องจากหม้อแปลงจำเป็นจะต้องใช้หม้อแปลงชนิดแห้ง ประกอบกับจะต้องมีจุดต่อสายจำนวนมากตามระดับที่เพิ่มขึ้น จึงจำเป็นจะต้องวางแนบชิดติดกับชุดควบคุมความเร็วรอบภายในตู้ ทำให้ความร้อนสะสมที่เกิดจากตัวหม้อแปลง เกิดสะสมอยู่ภายในห้องไฟฟ้า หากเป็นเมืองหนาว ก็คงจะไม่มีปัญหาประการใด แต่ประเทศไทยเป็นเมืองร้อน ทำให้ต้องใช้แอร์ขนาดใหญ่ขึ้น และใช้พื้นที่ห้องไฟฟ้ามากกว่า ชุดควบคุมความเร็วรอบแบบสามระดับซึ่งมีความคล่องตัว มากกว่า กล่าวคือสามารถใช้หม้อแปลงแบบแห้ง หรือแบบน้ำมัน ที่ผลิตจากโรงงานทั่วไป หรือจากภายในประเทศได้ และสามารถออกแบบจัดวางหม้อแปลง ให้ติดตั้งภายนอกห้องไฟฟ้าได้ ทำให้มีความคล่องตัวต่อการออกแบบโครงการและการขยายงานมากกว่า

สรุป

ทั้งเทคนิคการสร้างรูปคลื่น PWM แบบสามระดับ และแบบหลายระดับนี้ มีจุดประสงค์บางประการที่คล้ายกัน ในขณะที่จุดประสงค์บางประการก็ต่างกัน จุดประสงค์ที่คล้ายกันของการเพิ่มระดับของรูปคลื่น PWM จาก 2 ระดับ ตามแบบที่ใช้ในอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์แรงดันต่ำ ก็คือ การเพิ่มระดับของรูปคลื่น PWM จะทำให้ระดับแรงดันที่ตกคร่อม IGBT แต่ละตัวมีค่าน้อยกว่าแรงดันของระบบ และจะมีผลดีในเรื่องของการลดค่าแรงดันเค้น (stress voltage), ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (dv/dt) ซึ่งจะมีผลกระทบโดยตรงต่ออายุการใช้งานของฉนวนมอเตอร์ ส่วนแนวทางที่ต่างกัน ก็คือ อินเวอร์เตอร์ PWM แบบสามระดับ จะใช้กับไดโอด และ HV-IGBT ที่ทนต่อแรงดันสูงได้ ทำให้จำนวนอุปกรณ์ที่ใช้มีน้อย ในขณะที่อินเวอร์เตอร์ PWM แบบหลายระดับจะมีข้อดีในเรื่องรูปร่างของแรงดันที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงคลื่นรูปไซน์มากกว่า แต่จำนวนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ใช้จะมีจำนวนมาก อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าเทคนิคการปรับความเร็วรอบมอเตอร์แรงดันสูงที่ทั้งสองรูปแบบยังติดปัญหาในเรื่องขนาดและพิกัดของอุปกรณ์อยู่บ้าง แต่ก็ได้จุดประกายให้เกิดการพัฒนา ให้ปัญหาของการปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันสูงได้รับการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และมีแนวโน้มที่จะทำให้ข้อจำกัดต่างๆ ที่เคยมีได้รับการแก้ไขให้ลดน้อยลงไปเรื่อยๆ

อักษรย่อ

IGBT's	**I**nsulated **G**ate **B**ipolar **T**ransistor
PWM	**P**ulse **W**idth **M**odulation
VSD	**V**ariable **S**peed **D**rives ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ
HV-IGBT	**H**igh **V**oltage **I**nsulated **G**ate **B**ipolar **T**ransistor
IEGT	**I**njection **E**nhanced **G**ate **T**ransistors

อ้างอิง

1. "ABC of Drives" *Siemens technical manual*
2. "Simovert MV" *Siemens catalog Medium voltage drives DA 63.2002*

ตีพิมพ์ลงวารสาร *INDUSTRIAL Technology Review* ฉบับที่ *116* ประจำเดือน พฤษจิกายน 2546