

เทคนิคการปรับความเร็วรอบ มอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูง

หนังสือจำกัดที่ล้าหลังของเทคโนโลยีการปรับรอบมอเตอร์ไฟฟ้า
แรงสูงที่ใช้ไทรสเตอร์

ในอดีตเครื่องปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูงนั้น มีข้อจำกัดอย่างมากในเรื่องของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ต้องใช้ไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์หลัก เพราะเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเพียงชนิดเดียวที่ทนต่อแรงดันสูงๆ ได้ในระดับ KV แต่เนื่องจากไทรสเตอร์มีข้อจำกัดในหลายด้าน ทำให้เทคนิคการปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูงค่อนข้างล้าหลัง เมื่อเทียบกับเทคโนโลยีการปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าแรงต่ำ ซึ่งก้าวไกลไปกว่ามาก เนื่องจากสามารถนำเอาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในตระกูลทรานซิสเตอร์ ซึ่งมีความง่ายในการควบคุมสูงกว่ามาใช้เป็นอุปกรณ์หลักในวงจรได้ ทำให้เกิดการพัฒนาเทคนิคการขับเคลื่อนในหลายรูปแบบ เช่น เทคนิคการสร้างรูปคลื่นแบบ PWM, เทคนิคการควบคุมแบบเวกเตอร์ ฯลฯ ในขณะที่เทคนิคการปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูงยังย่ำอยู่กับที่ด้วยวิธีที่ต้องใช้ไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์หลักในวงจรภาคกำลัง เช่น การปรับความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (current source inverter), ไซโคลคอนเวอร์เตอร์ (cycloconverter), ระบบขับเคลื่อนเครมอร์แบบ

สถิต (Static Kramer drive), และระบบขับเคลื่อนเซอร์เบียสแบบสถิต (Static Sherbius drive) ระบบการปรับความเร็วรอบต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นนี้จะใช้ไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์หลัก เนื่องจากสามารถทนต่อแรงดันสูงๆ ได้ ในขณะที่อุปกรณ์ในตระกูลทรานซิสเตอร์ไม่สามารถทำได้

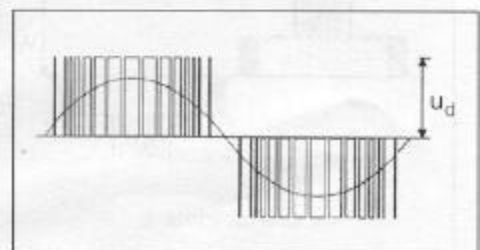
อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าจะใช้ไทรสเตอร์เป็นอุปกรณ์หลัก ก็ยังมีเพียงสองระบบแรกเท่านั้นที่ใช้ไทรสเตอร์ในการควบคุมแรงดันทางด้านแรงสูง ในขณะที่สองระบบหลังจะหนีไปควบคุมแรงดันด้านโวลเทจซึ่งเป็นแรงดันด้านต่ำแทน

ระบบขับเคลื่อนต่างๆ เหล่านี้ ถึงแม้จะใช้งานได้ดีพอสมควรกับมอเตอร์แรงสูง แต่ก็ยังมีปัญหาที่แก้ไม่ตกในเรื่องฮาร์มอนิกและการกระเพื่อมทางแรงบิด (torque pulsation) ที่เกิดขึ้นที่เพลลาของมอเตอร์เนื่องมาจากผลของกระแสที่มีลักษณะเป็นขั้นบันได และผลของฮาร์มอนิกที่เกิดจากกระแสที่ไม่เป็นไซน์นี้ ยังทำให้เกิดความร้อนที่ตัวมอเตอร์เพิ่มขึ้นจากปกติ และทำให้ประสิทธิภาพของระบบรวมลดลง นอกจากนี้การที่เราไม่สามารถควบคุมไทรสเตอร์ได้อย่างอิสระเหมือนอุปกรณ์ในตระกูล

ทรานซิสเตอร์ ทำให้ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดทำได้ค่อนข้างต่ำ และการที่ไทรสเตอร์ต้องใช้ช่วงเวลาในการ recovery ประจวบกับข้างนาน ทำให้ระบบทำงานได้ที่ความถี่สูงสุดที่ค่อนข้างต่ำ

ในปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในตระกูลทรานซิสเตอร์ที่นิยมใช้กันอยู่ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์แรงดันต่ำ คือ IGBT มาใช้กับมอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันสูง เพื่อทำให้การควบคุมมอเตอร์มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ในปัจจุบันการพัฒนาเพื่อเข้าสู่เป้าหมายดังกล่าวได้แยกเป็นสองแนวทาง

แนวทางแรก คือ การพัฒนา IGBT ให้ทนต่อแรงดันได้สูงขึ้น ทำให้ได้ IGBT ที่ใช้ได้กับแรงดันสูง หรือ HV-IGBT แล้วนำเอา HV-IGBT นี้มาต่อเป็นวงจรบริดจ์ โดยใช้เทคนิคการสร้างรูปคลื่น PWM แบบสาม



รูปที่ 1 อินเวอร์เตอร์ PWM แบบสองระดับ

ระดับ

ส่วนอีกแนวทางหนึ่ง คือ การนำเอา IGBT แรงดันต่ำมาต่ออนุกรมกันหลายๆ ครั้ง เพื่อให้รับกับแรงดันสูงของระบบได้ แล้วใช้เทคนิคการต่อวงจรเพื่อสร้างรูปคลื่น PWM แบบหลายระดับ เพื่อให้ได้ระดับแรงดันตามความต้องการของมอเตอร์ โดยที่ IGBT แต่ละตัวยังรับภาระต่อแรงดันต่ำอยู่ ซึ่งจะได้กล่าวถึงเทคนิคการทำ IGBT แต่ละแบบมาใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูงโดยละเอียดดังนี้

อินเวอร์เตอร์ PWM แบบสามระดับ

อินเวอร์เตอร์ PWM ดังที่แสดงในรูปที่ 1 นั้น รูปคลื่น PWM ที่ได้เรียกว่ารูปคลื่น PWM แบบสองระดับ กล่าวคือ จะมีเพียงสองระดับแรงดัน คือ 0 กับ $+V_d$ และ 0 กับ $-V_d$ ลักษณะของรูปคลื่น PWM สองระดับนี้ จะเหมาะกับมอเตอร์แรงดันต่ำ แต่ใน

กรณีของมอเตอร์แรงดันสูงนั้น การใช้อินเวอร์เตอร์ PWM แบบสองระดับ จะมีปัญหาทั้งในส่วนข้อจำกัดในเรื่องพิกัดแรงดันของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ, ค่าแรงดันเค้น (stress voltage) ที่มีต่อขนาดของมอเตอร์ และค่า dv/dt ที่มีค่าสูงมากๆ ซึ่งจะส่งผลต่อขนาดของสายเคเบิล และตัวมอเตอร์ รวมทั้งเกิดกระแสคาปาซิทีฟที่เคเบิล ทำให้อินเวอร์เตอร์ต้องจ่ายโหลดมากกว่าปกติ

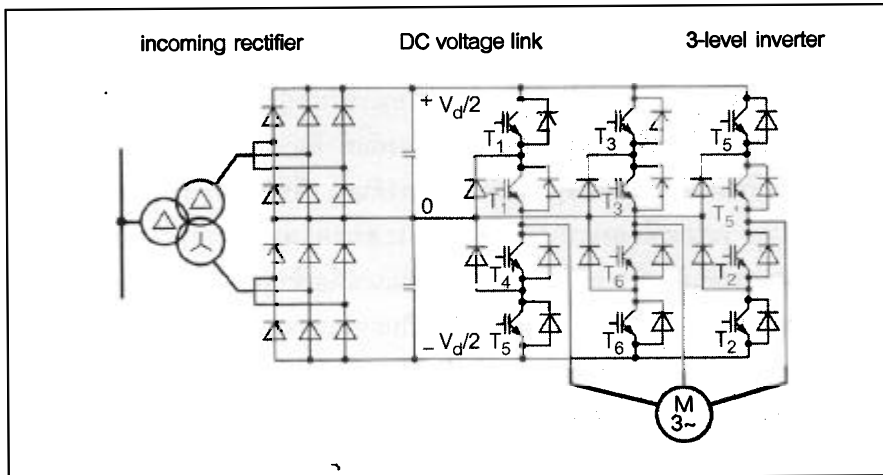
จากเหตุผลของข้อจำกัดต่างๆ เหล่านี้ของอินเวอร์เตอร์ PWM แบบสองระดับ ทำให้อินเวอร์เตอร์ PWM แบบสามระดับถูกค้นคว้าขึ้นเพื่อแก้ปัญหาต่างๆ ดังกล่าวข้างต้นเมื่อต้องนำอินเวอร์เตอร์มาใช้กับมอเตอร์แรงดันสูง รูปที่ 2 เป็นวงจรของอินเวอร์เตอร์ PWM แบบสามระดับ ส่วนรูปที่ 3 แสดงลักษณะของรูปคลื่น PWM แบบสามระดับที่ได้

จากรูปจะเห็นได้ว่าวงจรเชื่อมโยยกระแสตรงจะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน โดยรับพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับจากขด

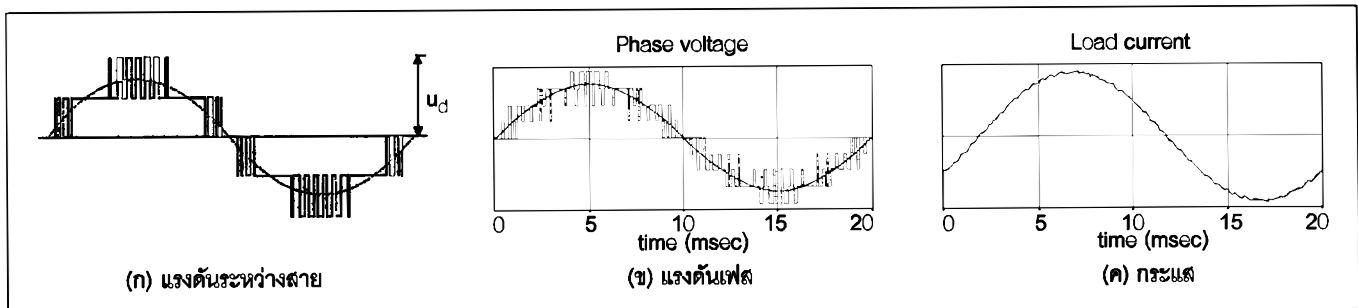
ลวดทุติยภูมิทั้งสองชุดของหม้อแปลงวงจรบริดจ์ไดโอดชุดบนจะทำหน้าที่แปลงไฟจากขดทุติยภูมิชุดบน แรงดันของวงจรเชื่อมโยยกระแสตรงที่ได้จะมีค่าเท่ากับ $+V_d/2$ ส่วนวงจรบริดจ์ไดโอดชุดล่าง จะทำหน้าที่แปลงไฟจากขดทุติยภูมิชุดล่าง และแรงดันของวงจรเชื่อมโยยกระแสตรงที่ได้จะมีค่าเท่ากับ $-V_d/2$ สำหรับวงจรอินเวอร์เตอร์ก็จะประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ทั้งหมด 12 ตัว และไดโอดอีก 6 ตัว หลักการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์นี้ ทรานซิสเตอร์ชุดใน คือ T_1 ถึง T_6 จะทำงานตลอดเวลา ส่วนทรานซิสเตอร์ชุดนอก คือ T_1 ถึง T_6 จะทำงานก็ต่อเมื่อต้องการให้ขาออกขึ้นสูงถึง $+V_d$ หรือ $-V_d$ และจะสลับกันทำงานหากต้องการให้แรงดันขาออกอยู่ที่ $+V_d/2$ หรือ $-V_d/2$

ยกตัวอย่างเช่น ต้องการให้ระดับแรงดันอยู่ที่ $+V_d/2$ ถ้าสมมุติว่าเรากระตุ้นให้ T_1, T_1' และ T_2' ทำงาน กระแสก็จะไหลผ่าน T_1, T_1' , เฟส a, เฟส c, T_2' และไดโอดตัวที่คร่อม T_2' อยู่ และกลับเข้าสายศูนย์ แรงดันที่คร่อมเฟส a-c ของมอเตอร์ก็จะเป็น $+V_d/2$ ต่อมาถ้าเรากระตุ้น T_2 ให้ทำงานด้วยแรงดันที่คร่อมเฟส a-c มอเตอร์ ก็จะเปลี่ยนจาก $+V_d/2$ มาเป็น $+V_d$ แทน

ในการทำงานเดียวกัน ถ้าเรากระตุ้น T_4, T_4' และ T_5' ให้ทำงาน กระแสก็จะไหลจากสายศูนย์ผ่านไดโอดที่คร่อม T_5' ผ่านมายังเฟส c, เฟส a, T_4' และ T_4 กลับเข้าแหล่งจ่ายแรงดันที่คร่อมเฟส a-c ก็จะเปลี่ยนจาก $-V_d/2$ ต่อมาเมื่อเรากระตุ้น T_5 ให้ทำงานเพิ่มเข้ามาด้วย แรงดันที่คร่อมเฟส a-c ก็



รูปที่ 2 อินเวอร์เตอร์ PWM แบบสามระดับ



รูปที่ 3 รูปคลื่น PWM ของแรงระหว่างสายของอินเวอร์เตอร์ PWM แบบสามระดับ

จะเปลี่ยนจาก $-V_d/2$ มาเป็น $-V_d$ ดังนี้ เป็นต้น รูปคลื่น PWM ที่ได้จึงออกมาเป็นรูปคลื่นสามระดับ ตามรูปที่ 3 รูปคลื่น PWM ที่ได้นี้จะมีข้อดีอยู่หลายประการ เช่น ลดแรงดันเค้น ที่มีผลต่อฉนวนของมอเตอร์, ฮาร์มอนิกของแรงดันจะมีค่าน้อยกว่า ทำให้สามารถสวิตช์ทรานสเตอร์ให้ทำงานได้ดีกว่าที่ต่ำกว่าแบบสองระดับ ซึ่งก็หมายความว่ากำลังสูญเสียในการสวิตช์ (switching loss) จะต่ำลงไปด้วย กำลังสูญเสียในแกนเหล็กซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ของการสวิตช์ก็จะลดลงเช่นกัน ปัญหาต่างๆ ที่เกิดกับอินเวอร์เตอร์แบบสองระดับตามที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นก็จะลดลง เมื่อเปลี่ยนมาเป็นอินเวอร์เตอร์แบบสามระดับ

อินเวอร์เตอร์ PWM แบบหลายระดับ

นอกเหนือจากการใช้อินเวอร์เตอร์ PWM แบบสามระดับสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์แรงสูงแล้ว เทคนิคการสร้างรูปคลื่น PWM แบบหลายระดับก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาในเรื่องข้อจำกัดเกี่ยวกับพิกัดแรงดันของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเอง ซึ่งในการใช้เทคนิคการสร้างรูปคลื่น PWM แบบหลายระดับนี้จะทำให้สามารถใช้อุปกรณ์ที่มีพิกัดแรงดันต่ำกว่าแบบสามระดับได้เมื่อต้องการขนาดแรงดันขาออกเท่ากัน

แนวคิดของอินเวอร์เตอร์ PWM แบบหลายระดับ ก็คือ การนำเอาแหล่งจ่ายหลายเซลล์มาต่อเข้าด้วยกันในลักษณะของอนุกรม เพื่อที่จะได้ระดับแรงดันที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4

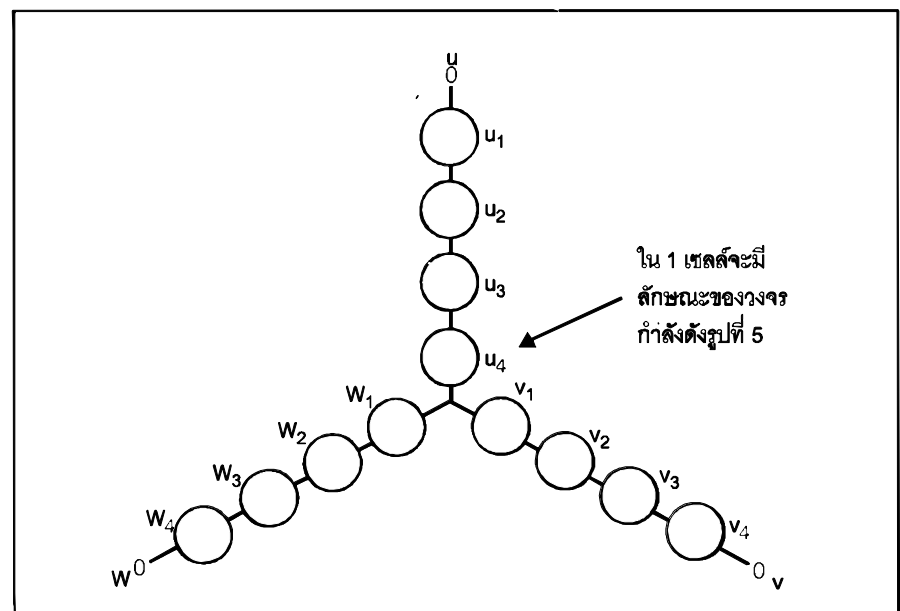
จากรูปที่ 4 แหล่งจ่ายแต่ละเซลล์ในเฟสเดียวกันจะมีขนาดเท่ากัน และมีมุมอินเฟสกัน ดังนั้นขนาดของแรงดันเฟสจะเท่ากับผลรวมของแรงดันของทุกเซลล์ใน

เฟสนั้น ยกตัวอย่างจากรูปที่ 4 ซึ่งแต่ละเฟสประกอบไปด้วย 4 เซลล์ของแหล่งจ่าย ถ้าต้องการแรงดันระหว่างสายเท่ากับ 3300 V หรือแรงดันเฟสเท่ากับ 1905 V ก็จะได้ว่าแรงดันของแหล่งจ่ายแต่ละเซลล์จะมีค่าเท่ากับ 476 V ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเราสามารถนำเอาแหล่งจ่ายแรงดันต่ำมาทำงานร่วมกัน เพื่อให้ได้แหล่งจ่ายแรงดันสูงได้

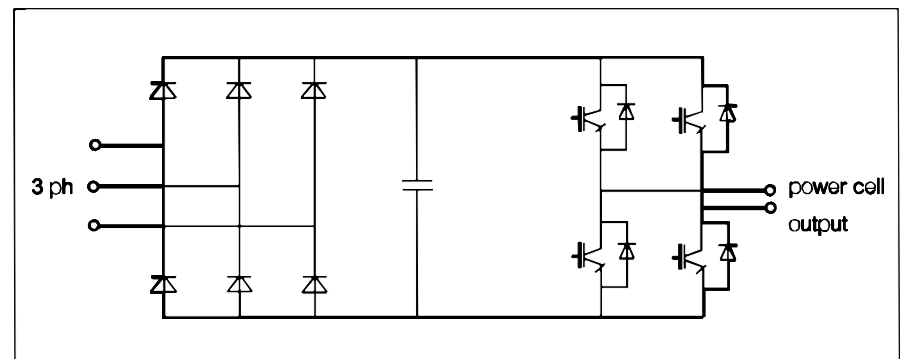
จากแนวคิดดังกล่าวข้างต้น หากเราแทนแหล่งจ่ายแต่ละเซลล์ด้วยอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส เราจะได้อินเวอร์เตอร์แรงดันสูง 3 เฟส ที่สามารถปรับทั้งขนาดและความถี่ของแรงดันขาออกได้ รูปที่ 5 แสดงวงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส ที่จะนำมาแทนแหล่งจ่ายแต่ละเซลล์

การกำหนดช่วงจังหวะการทำงาน

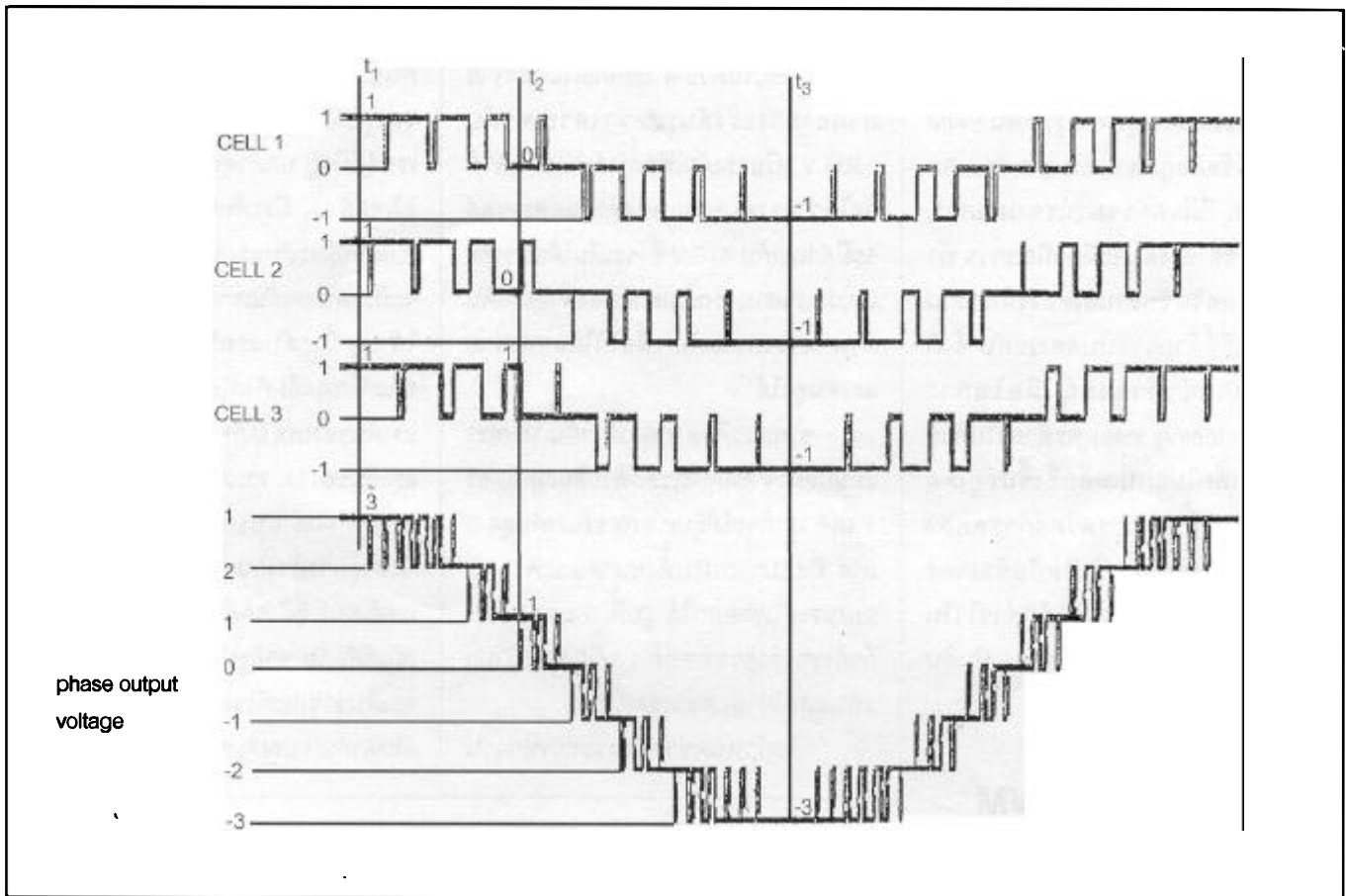
ของอินเวอร์เตอร์แต่ละเซลล์ จะทำให้แรงดันขาออกของแต่ละเฟสมีระดับแรงดันของรูปคลื่นได้หลายระดับเท่ากับจำนวนเซลล์ที่มีอยู่ ยกตัวอย่างเช่น ในเฟส U ถ้าให้เซลล์ U_1 มีระดับแรงดันเท่ากับ 1 ส่วน เซลล์อื่นมีระดับแรงดันเท่ากับ 0 เฟส U ก็จะมีระดับแรงดันเท่ากับ 1 ต่อมาก็กำหนดให้ U_2 มีระดับแรงดันเท่ากับ 1 ด้วย ในขณะที่เซลล์อื่นยังเป็น 0 เหมือนเดิม ระดับแรงดันของเฟส U ก็จะเพิ่มเป็น 2 ตามระดับแรงดันของ U_1 รวมกับ U_2 รูปที่ 6 แสดงรูปคลื่น PWM แบบหลายระดับ และช่วงจังหวะการทำงานของแต่ละเซลล์ของอินเวอร์เตอร์ ที่มีเซลล์อินเวอร์เตอร์ย่อยสามเซลล์ต่อกัน จากรูปถ้าพิจารณาที่เวลา t_1 จะเห็นว่าขณะที่เซลล์ทั้งสามให้ระดับแรงดันเท่ากับ 1 แรงดันขาออกของเฟสก็จะเท่า



รูปที่ 4 หลักการทำงานของอินเวอร์เตอร์แบบหลายระดับ



รูปที่ 5 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์แต่ละเซลล์



รูปที่ 6 การสร้างรูปคลื่น PWM หลายระดับ

กับ 3 ต่อมาที่เวลา t_2 เซลล์ 1 และ 2 ให้ระดับแรงดันเท่ากับ 0 เหลือเพียงเซลล์ 3 เท่านั้นที่ให้ระดับแรงดันเท่ากับ 1 แรงดันเฟสที่เวลา t_2 จึงมีค่าเท่ากับ 1 ส่วนที่เวลา t_3 เซลล์ทั้งสามให้ระดับแรงดันที่ -1 จึงทำให้ระดับแรงดันของเฟสขาออกอยู่ที่ -3 ลักษณะของรูปคลื่นขาออกจึงออกมาเป็นดังรูป

เทคนิคการสร้างรูปคลื่น PWM แบบหลายระดับนี้ มีข้อดีตรงที่ว่า สามารถใช้อุปกรณ์สวิตกึ่งตัวนำที่มีระดับแรงดันต่ำมาสร้างอินเวอร์เตอร์แรงดันสูงได้ ทำให้ลดข้อจำกัดในเรื่องพิกัดแรงดันของอุปกรณ์ลงไปได้มาก แต่ยังคงต้องปรับปรุงในเรื่องของจำนวนอุปกรณ์ที่มีจำนวนมาก ซึ่งจำนวนอุปกรณ์ที่มีมากนี้จะมีผลต่อเสถียรภาพของระบบ เพราะจำนวนโอกาสที่ระบบจะทำงานผิดพลาดก็มีมากขึ้นไปด้วยตามจำนวนของอุปกรณ์

สรุป

ทั้งเทคนิคการสร้างรูปคลื่น PWM แบบสามระดับ และแบบหลายระดับนี้ มีจุดประสงค์บางประการที่คล้ายกัน ในขณะที่จุดประสงค์บางประการก็ต่างกัน จุดประสงค์ที่คล้ายกันของการเพิ่มระดับของรูปคลื่น PWM จาก 1 ระดับ ตามแบบที่ใช้ในอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์แรงดันต่ำ ก็คือ การเพิ่มระดับของรูปคลื่น PWM จะทำให้ระดับแรงดันที่ตกคร่อม IGBT แต่ละตัวมีค่าน้อยกว่าแรงดันของระบบ และจะมีผลดีในเรื่องของการลดค่าแรงดันเค้น (stress voltage), ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน (dv/dt) ซึ่งจะมีผลกระทบโดยตรงต่ออายุการใช้งานของอินเวอร์เตอร์ ส่วนแนวทางที่ต่างกัน ก็คือ อินเวอร์เตอร์ PWM แบบสามระดับ จะใช้กับไดโอด และ IGBT ที่ทนต่อแรงดันสูงได้ ทำให้จำนวนอุปกรณ์ที่ต้องใช้น้อย ใน

ขณะที่อินเวอร์เตอร์ PWM แบบหลายระดับจะมีข้อดีในเรื่องรูปร่างของแรงดันที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงคลื่นรูปไซน์มากกว่า แต่จำนวนอุปกรณ์สวิตกึ่งตัวนำที่ใช้จะมีจำนวนมาก อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าเทคนิคการปรับความเร็วรอบมอเตอร์แรงดันสูงที่ทั้งสองรูปแบบยังติดปัญหาในเรื่องขนาดและพิกัดของอุปกรณ์อยู่บ้าง แต่ก็ได้จุดประกายให้เกิดการพัฒนาให้ปัญหาของการปรับความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูงได้รับการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และมีแนวโน้มที่จะทำให้ข้อจำกัดต่างๆ ที่เคยมีได้รับการแก้ไขให้ลดน้อยลงไปเรื่อยๆ

ME