

อินเวอร์เตอร์

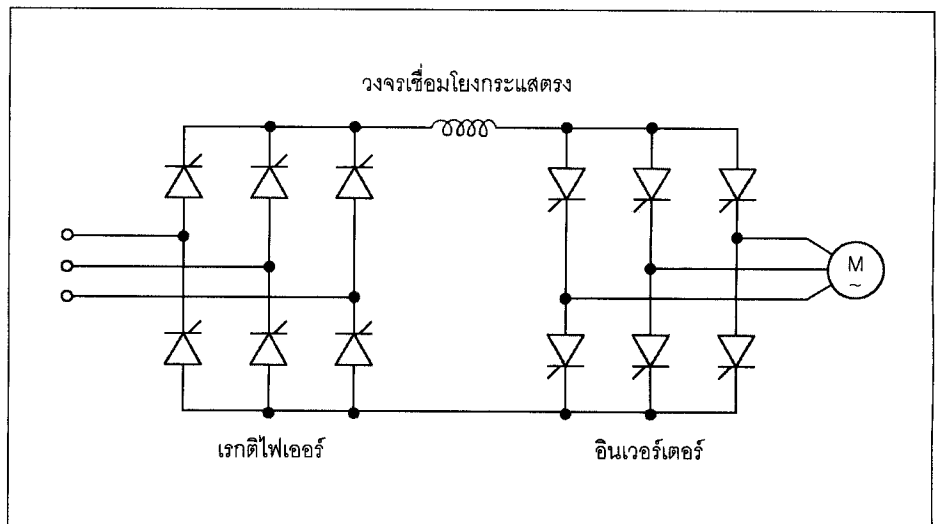
แบบแหล่งจ่ายกระแส

ผู้ใช้ส่วนใหญ่อาจจะไม่เข้าใจการทำงานของ CSI อย่างแท้จริง เพราะมักจะไปสับสนกับอินเวอร์เตอร์แบบ VSI

ในปัจจุบันหากกล่าวถึงอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส (Current Source Inverter : CSI) หลายท่านคงเคยได้ยินแต่ชื่อ แต่ไม่เคยใช้ และหลายท่านถึงแม้จะเคยใช้ แต่ก็ไม่ทราบแน่ชัดว่า CSI ทำงานอย่างไร

ในปัจจุบันอินเวอร์เตอร์เกือบทั้งหมดจะเป็นแบบแหล่งจ่ายแรงดัน (Voltage Source Inverter : VSI) เท่าที่ผู้เขียนได้เห็นการใช้ CSI อยู่บ้างก็มีโรงงานที่ใช้เทคโนโลยีสมัยกลาง และเป็นโรงงานขนาดใหญ่ เช่น โรงงานน้ำตาล, โรงงานปูนซีเมนต์ เป็นต้น และพบว่าผู้ใช้ส่วนใหญ่จะไม่เข้าใจการทำงานของ CSI อย่างแท้จริง เพราะจะไปสับสนกับอินเวอร์เตอร์แบบ VSI ผู้เขียนจึงถือโอกาสนี้อธิบายการทำงานรวมถึงข้อแตกต่างและข้อดี-ข้อเสียเมื่อเทียบกับอินเวอร์เตอร์แบบ VSI ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน

ผู้อ่านบางท่านอาจจะคิดว่าไม่ใช่เรื่องที่นำศึกษา เพราะน่าจะถือเป็นเทคโนโลยีแบบเก่า แต่ท่านทราบหรือไม่ว่า



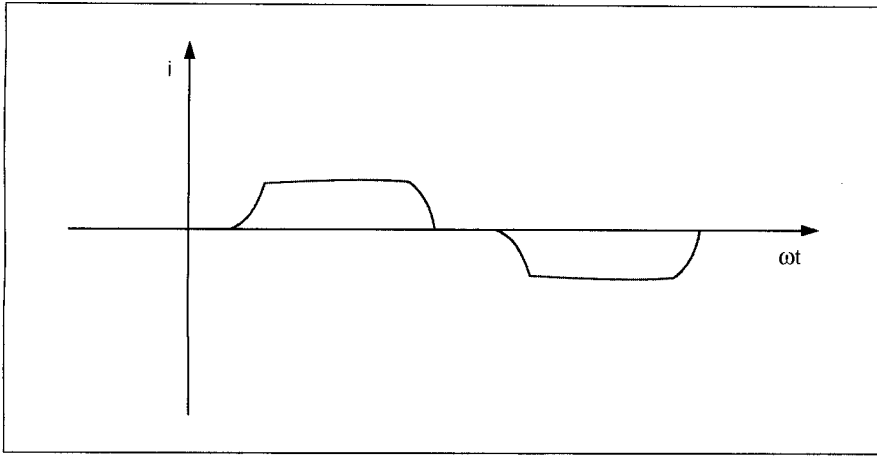
รูปที่ 1 วงจรภาคกำลังของอินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส

สำหรับอินเวอร์เตอร์ตัวใหญ่ๆ แล้ว บางยี่ห้อก็ยังใช้เทคโนโลยี CSI อยู่ นอกจากนี้เทคโนโลยี CSI นี้หากนำไปใช้กับซิงโครนัสมอเตอร์ จะทำให้ได้รูปแบบการทำงานของวงจรภาคกำลังที่เปรียบเสมือน DC motor เพียงทีเดียว และเป็น DC motor ที่ไม่ต้องใช้แปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์มาเป็นตัวเรียงกระแส หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า brushless dc motor ซึ่งจะขอกกล่าวถึงในตอนต่อไป สำหรับในตอนนี้จะขอกกล่าวถึง

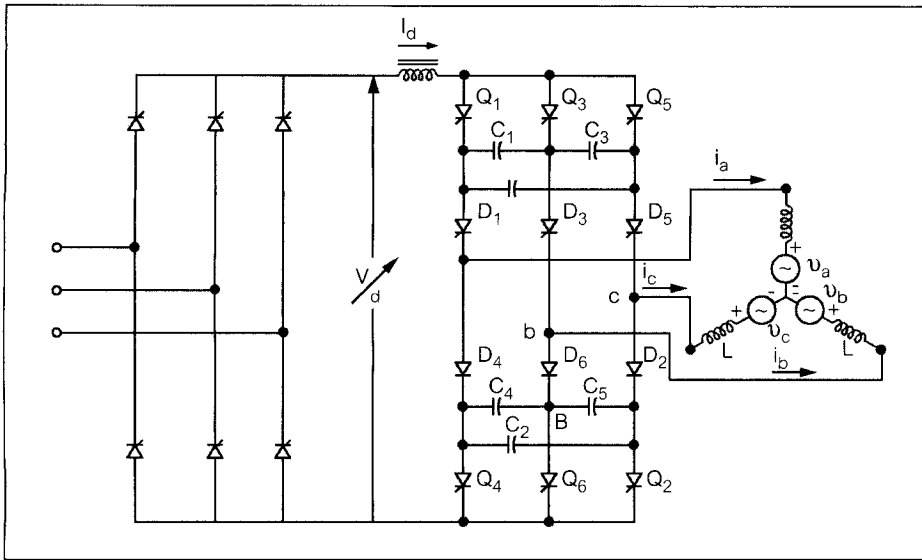
หลักการการทำงานของ CSI โดยทั่วไปและพฤติกรรมของมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำที่ใช้ CSI เป็นตัวจ่ายพลังงาน

หลักการทํางานวงจรภาคกำลังของ CSI

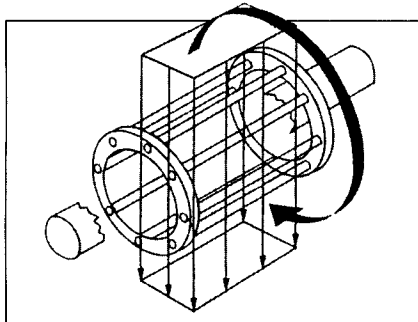
จากรูปที่ 1 ในทางทฤษฎี กระแสที่วงจรเชื่อมโยงจะเป็นกระแสตรงที่เรียบ เพราะมีตัวเหนี่ยวนำทำหน้าที่กรองกระแส



รูปที่ 2 รูปร่างของกระแสที่ไหลเข้าแต่ละเฟสของมอเตอร์



รูปที่ 3 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบ ASCI



รูปที่ 4 โรเตอร์ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กหมุน

ไทรสเตอร์ Q_1 ถึง Q_6 จะผลัดกันทำงานครั้งละ 2 ครั้ง คือ $Q_1-Q_2, Q_2-Q_3, Q_3-Q_4, \dots, Q_6-Q_1$ ทำให้กระแสที่ไหลเข้าแต่ละเฟสของมอเตอร์มีลักษณะดังรูปที่ 2

ส่วน Q_1 ถึง Q_6 ก็จะทำหน้าที่เป็นเรกติไฟเออร์ทำหน้าที่แปลงไฟสลับให้เป็นไฟตรงตามปกติ โดยทำงานครั้งละสองตัวเช่นกัน คือ $Q_1-Q_2, Q_2-Q_3, \dots, Q_6-Q_1$

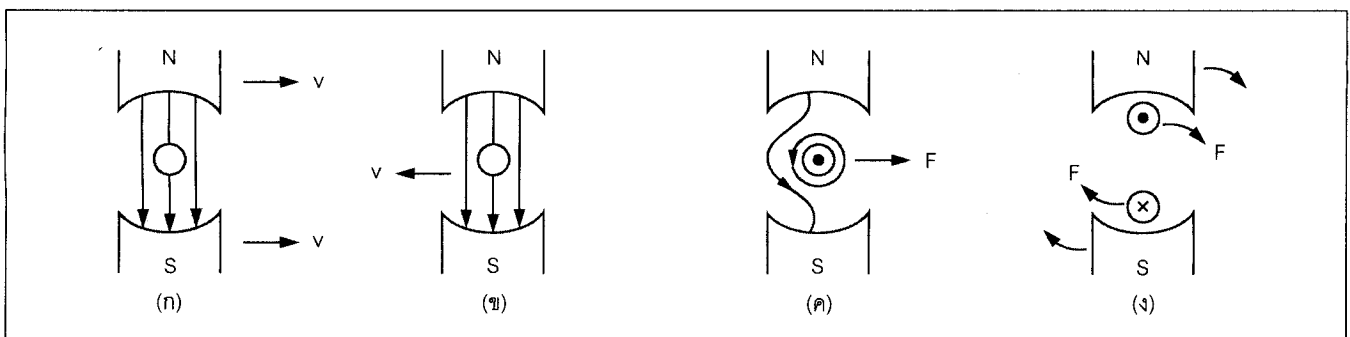
สำหรับการกำหนดจังหวะการทำงานของไทรสเตอร์นั้น ในส่วนของชุดไทรสเตอร์ Q_1-Q_6 จะไม่มีปัญหา เพราะจะอ้างอิงกับระดับแรงดันของแหล่งจ่าย จึงสามารถใช้วิธีการเปลี่ยนการนำกระแสแบบ Natural Commutation จากไทรสเตอร์ตัวหนึ่งไปยังอีกตัวหนึ่งได้ แต่ชุดของ Q_1-Q_6 จะมีปัญหาไม่สามารถใช้วิธีเปลี่ยนการนำกระแสแบบ Natural Commutation ได้ เพราะไม่ได้ต่อกับแหล่งจ่ายในการเปลี่ยนการนำกระแส จึงต้องใช้วิธีอื่นแทนที่นิยมใช้กันมากมีอยู่สองวิธี คือ

1. Auto-Sequential-Force-Commutated Inverter วิธีนี้จะมีลักษณะการต่อของอุปกรณ์ในภาคกำลังดังแสดงในรูปที่ 3 หลักการของวิธีนี้คือ จะใช้ C ในการเก็บประจุ เพื่อให้หยุดการนำกระแสของไทรสเตอร์ที่มีหมายเลขเดียวกัน แล้วส่งต่อการนำกระแสไปยังไทรสเตอร์ตัวถัดไป เช่น C_1 จะให้หยุดการนำกระแสของ Q_1 เพื่อส่งต่อการนำกระแสไปยัง Q_3

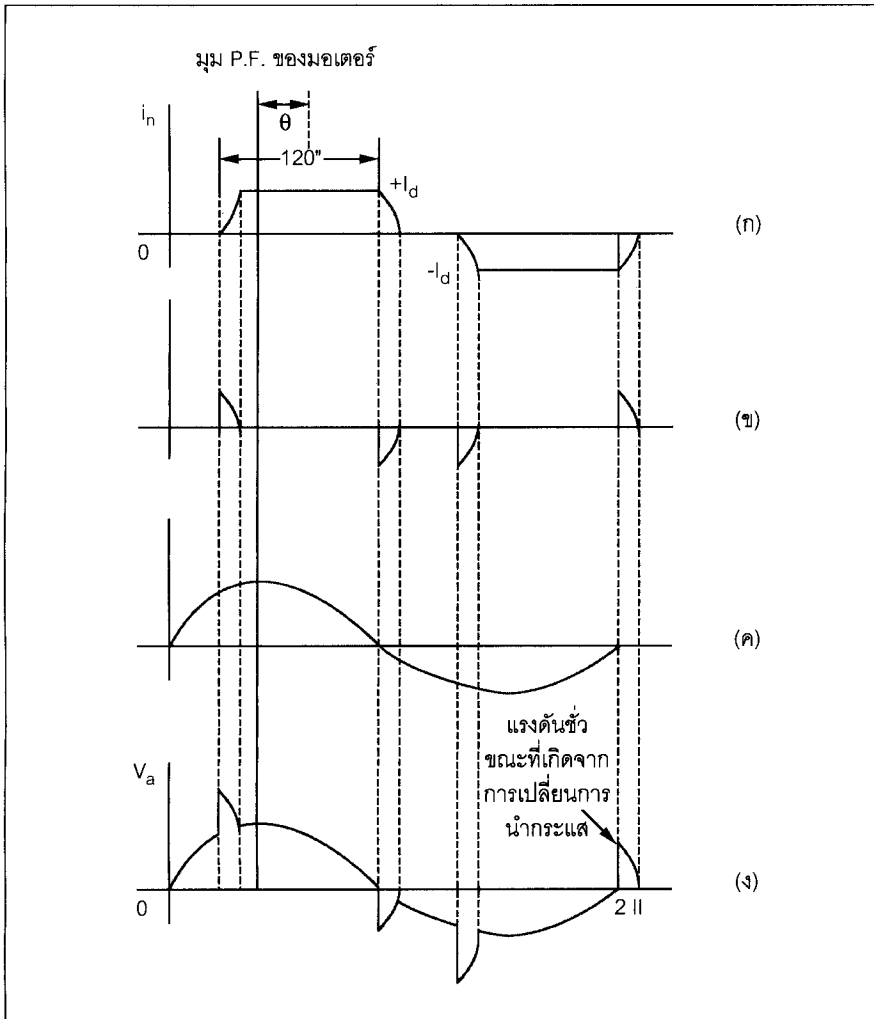
2. Self commutated Inverter วิธีนี้จะมียังจกรกำลังเหมือนรูปที่ 1 ทุกประการ เพียงแต่เปลี่ยนจากไทรสเตอร์ประเภท SCR เป็น GTO เพื่อให้สามารถ Turn-off ได้โดยไม่ต้องใช้ C ช่วย

ผลตอบสนองของมอเตอร์เหนี่ยวนำที่มีต่อ CSI

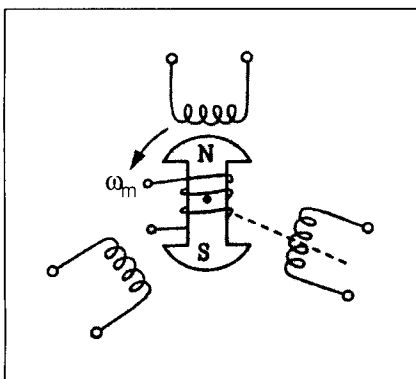
เนื่องจากกระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์



รูปที่ 5 หลักการเกิดกระแสเหนี่ยวนำและแรงบิดบนโรเตอร์



รูปที่ 6 แรงเคลื่อนที่ตกคร่อมขดลวดสเตเตอร์



รูปที่ 7 การหมุนตัดของสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์ที่มีต่อขดลวดสเตเตอร์

เป็นกระแสรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ไม่ใช่กระแสที่เป็นคลื่น Sine เราจึงต้องมาพิจารณากันว่าลักษณะรูปคลื่นแรงดันซึ่งเป็นผลตอบสนองของมอเตอร์ที่มีต่อกระแสรูปสี่เหลี่ยมจะมีลักษณะอย่างไร

จากรูปที่ 4 และ 5 เมื่อจ่ายกระแสรูป

สี่เหลี่ยมเข้าไปให้มอเตอร์จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน หมุนตัดผ่านโรเตอร์และเหนี่ยวนำให้โรเตอร์มีกระแสเหนี่ยวนำซึ่งจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์ ผลักกับสนามแม่เหล็กบนสเตเตอร์เกิดเป็นแรงบิดขึ้นมา ดังนั้นเมื่อพิจารณาแรงเคลื่อนไฟฟ้าซึ่งเป็นผลตอบสนองของวงจรมอเตอร์ จะประกอบด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้าสองส่วน คือ

1. แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจาก $L di/dt$ ขณะเปลี่ยนการนำกระแส หรือถ้าพิจารณาจากรูปที่ 6 ก็คือ ช่วงที่กระแสกำลังขึ้นและกำลังลงในรูป (ก) ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมขดลวดตามรูป (ข)
2. แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กหมุนในช่องว่างอากาศ ที่เหนี่ยวนำขดลวดบนสเตเตอร์

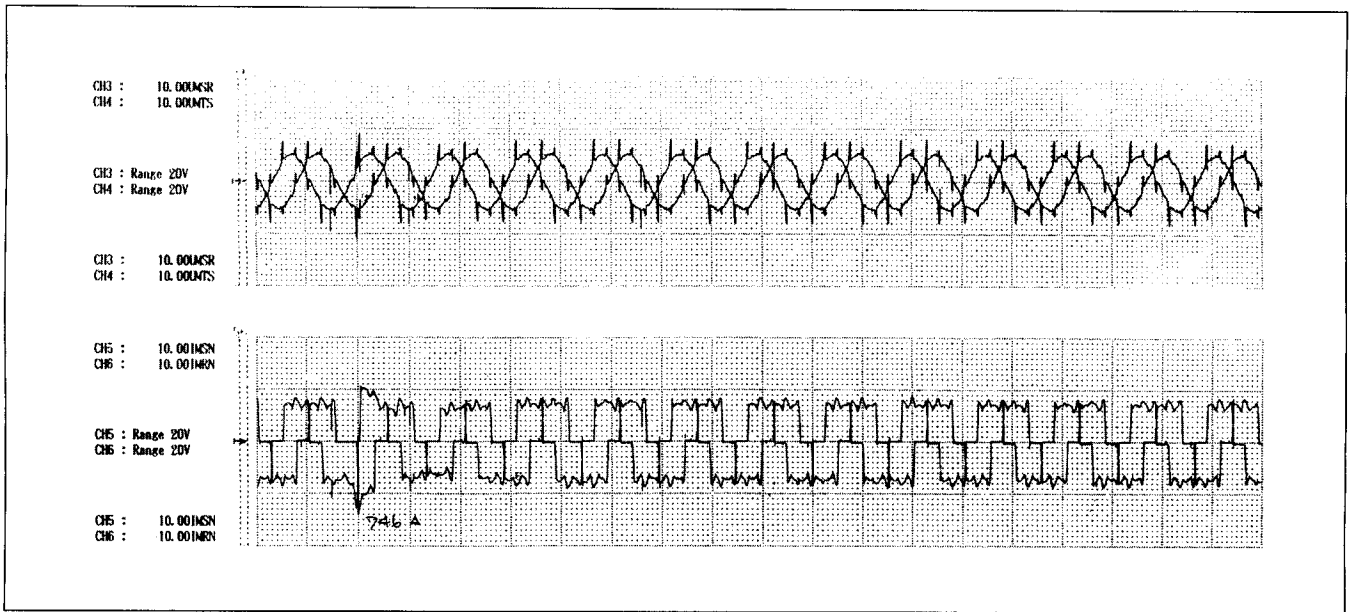
ซึ่งวางอยู่กับที่ ซึ่งแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำนี้จะมีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์ตามปกติ ดังรูป (ค) ซึ่งผู้อ่านอาจจะจินตนาการเหมือนกับว่า สนามแม่เหล็กหมุนในช่องว่างอากาศนี้ เปรียบเหมือนกับแท่งแม่เหล็กที่หมุนตัดผ่านขดลวดตัวนำบนสเตเตอร์ที่อยู่กับที่ ดังรูปที่ 7 ต่างกันเพียงแต่ว่าสนามแม่เหล็กหมุนตัวนี้ไม่ได้เกิดจากการพันขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กบนโรเตอร์ หากแต่เกิดจากกระแสบนสเตเตอร์และโรเตอร์

ดังนั้นหากวัดแรงเคลื่อนตกคร่อมบนสเตเตอร์ก็จะได้แรงดันต่อเฟสของขดลวดบนสเตเตอร์ดังรูปที่ 6 (ง) ซึ่งหากนำมาเทียบกับรูปที่ 8 ที่แสดงแรงดันระหว่างเฟส S-R และ T-S และแสดงกระแสของเฟส S และ R ที่วัดได้จากของจริงก็จะเห็นได้ว่าใกล้เคียงกับที่อธิบายไว้ในทฤษฎีค่อนข้างมาก

เราจึงสรุปได้ว่าสำหรับ CSI แล้ว แรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเป็นผลตอบสนองของวงจรถ่วงคือ เราจ่ายกระแสเข้าไป แล้วจึงเกิดแรงดัน ซึ่งตรงกันข้ามกับ VSI ที่เราจ่ายกระแสเข้าไปแล้วจึงเกิดกระแส ดังนั้นเราลองมาพิจารณากันว่าจะเกิดอะไรขึ้นถ้าเราเพิ่มกระแสที่ DC link โดยการปรับที่เรกติไฟเออร์

เราอาจเปรียบเทียบเรกติไฟเออร์ + ตัวเหนี่ยวนำที่ delink + อินเวอร์เตอร์ได้เท่ากับแหล่งจ่ายกระแส ดังนั้นเราสามารถเขียนวงจรสมมูลของมอเตอร์ที่ต่อกับแหล่งจ่ายกระแสได้ดังรูปที่ 9

จากรูปที่ 9 กระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์จะถูกแบ่งเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่ไหลเข้า L_m ซึ่งเป็นส่วนที่นำไปใช้สร้างสนามแม่เหล็กและส่วนที่ไหลเข้า f_r/s ซึ่งเป็นส่วนที่นำไปขับโหลด สมมุติเราเพิ่มกระแส I_s โดยที่โหลดเท่าเดิม (สลบคังที่) จะทำให้ I_m และ I_r เพิ่ม (หาขนาดของ I_m และ I_r ได้โดยใช้ current divider) นั่นหมายถึงว่า แรงดันที่ขั้วของมอเตอร์จะสูงขึ้น เพราะ L_m และ f_r/s



รูปที่ 8 แร่เคลื่อนที่พร้อมบนสเตเตอร์ที่วัดได้จากของจริง

เท่าเดิม

อย่างไรก็ตาม การพิจารณาข้างต้น เป็นการพิจารณาเมื่อโหลดทางกลไม่เปลี่ยนแปลง เราลองมาจินตนาการต่อกัน ว่าถ้าโหลดเปลี่ยนแปลงจะเกิดอะไรขึ้น

จากรูปที่ 9 สมมติว่าโหลดทางกลน้อยลง ซึ่งการน้อยลงของโหลดทางกลจะสะท้อนเข้ามาในวงจรสมมูลในรูปของสลิปที่ลดลง ทำให้ f_r/s มีค่ามากขึ้น ทำให้กระแส I_r ลดลง และกระแส I_m เพิ่มขึ้น (อย่าลืมนะครับว่า I_s ต้องเท่าเดิม) หากโหลดทางกลลดลงเรื่อยๆ ก็จะทำให้ f_r/s มากขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้ I_r ลดลงเรื่อยๆ และ I_m มากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งหมายถึงสนามแม่เหล็กที่เป็นตัวกำหนดความสามารถในการสร้างแรงบิดของมอเตอร์จะสูงขึ้นตาม I_m แต่เนื่องจากแกนแม่เหล็กมีขีดจำกัดในการจุเส้นแรงแม่เหล็ก เมื่อ I_m เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แกนแม่เหล็กก็จะเกิดการอิ่มตัว ทำให้กราฟความสัมพันธ์แรงบิด-ความเร็วรอบ (T-S curve) ไม่เป็นไปตามเส้นประดังในรูปที่ 10 ซึ่งหากไม่คำนึงถึงการอิ่มตัวของแกนเหล็กแล้ว T-S curve จะต้องเป็นไปตามเส้นประ

รูปที่ 10 ยังแสดงถึง T-S curve ของมอเตอร์เมื่อจ่ายกระแสระดับต่างๆ และเมื่อ

เทียบกับการใช้แหล่งจ่ายแรงดันเป็น source

จากรูปที่ 10 พิจารณา T-S curve เมื่อกระแส $I_s = 1.0$ pu หากเปรียบกับ T-S curve ของมอเตอร์ที่จ่ายพลังงานด้วยแหล่งจ่ายแรงดัน จุดทำงานของมอเตอร์จะอยู่ด้านที่ระบบมีเสถียรภาพ ซึ่งในที่นี้ก็จะต้องเป็นจุด B แต่ปัญหาของมอเตอร์ที่รับพลังงานจากแหล่งจ่ายกระแส คือ จุด B เป็นจุดที่แกนเหล็กอิ่มตัว เนื่องจาก I_m มีค่ามาก (สลิปน้อย ทำให้ I_s ส่วนใหญ่ไหลผ่านมาทาง L_m) มีผลทำให้มอเตอร์อาจมีความร้อนสูง ในทางปฏิบัติจึงย้ายจุดทำงานมาอยู่ที่จุด A ซึ่งถึงแม้จะเป็นจุดที่ไม่มีเสถียรภาพแต่ก็ไม่เกิดปัญหาความร้อน ส่วนปัญหาเรื่องเสถียรภาพก็ใช้การควบคุมแบบป้อนกลับมาช่วยแก้ปัญหา เพื่อให้ระบบทำงานแบบมีเสถียรภาพมากขึ้น

การควบคุม CSI ด้วยวิธีการควบคุมแบบสเกลาร์

รูปที่ 11 แสดงไดอะแกรมการควบคุม CSI โดยใช้วิธีการควบคุมแบบสเกลาร์

จากรูปที่ 11 ω_r^* คือ speed command ในขณะ ω_r คือ speed ที่วัดได้จากการทำงานจริง สมมติว่าในขณะที่มอเตอร์กำลังทำงานอยู่ ณ ความเร็วรอบที่กำหนดแล้ว ต่อมาเมื่อโหลดทางกลเพิ่มเข้ามา การเข้ามาของโหลดทางกลในขณะที่มอเตอร์ยังให้แรงบิดเท่าเดิม ทำให้ ω_r ลดลง จึงเกิดเป็นค่า error ขึ้น ตัวควบคุม G_2 ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็น PI controller จะขยาย และอินทิเกรตสัญญาณ error ทำให้ ω_{sl}^* ซึ่งหมายถึงความเร็วสลิปมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อไปบวกกับ ω_r แล้ว จะได้ ω_e^* ที่สูงขึ้น ซึ่งหมายถึงไปสั่งให้อินเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สูงขึ้น

ในขณะเดียวกัน ω_{sl}^* ที่เพิ่มขึ้น ก็จะไปทำให้ I_d^* เพิ่มขึ้น เพื่อไปสั่งให้เรกติไฟเออร์ R เพิ่มกระแส I_d ให้มากขึ้นเพื่อรับกับแรงบิดของโหลดที่มากขึ้น ω_{sl}^* จะมากขึ้นเรื่อยๆ ตราบใดที่ ω_r ยังน้อยกว่า ω_r^* ซึ่งหมายถึง ω_e^* จะสูงขึ้นเรื่อยๆ และ I_d ก็สูงขึ้นเรื่อยๆ เพื่อให้รับกับโหลดที่เพิ่มขึ้นได้ และแก้ไขความเร็วรอบที่ตกลงไป จนกระทั่งได้ ω_r เท่ากับ ω_r^* และแรงบิดเท่ากับแรงบิดที่โหลดต้องการ

มาถึงตรงนี้ผู้อ่านบางท่านอาจจะยัง

