

การประหยัดพลังงาน โดยการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ Energy saving by VSD's

กรณีศึกษา (Case Study)
การประหยัดพลังงาน
โดยการปรับความเร็วรอบมอเตอร์สำหรับพัดลม
Energy saving by VSD's for fan application

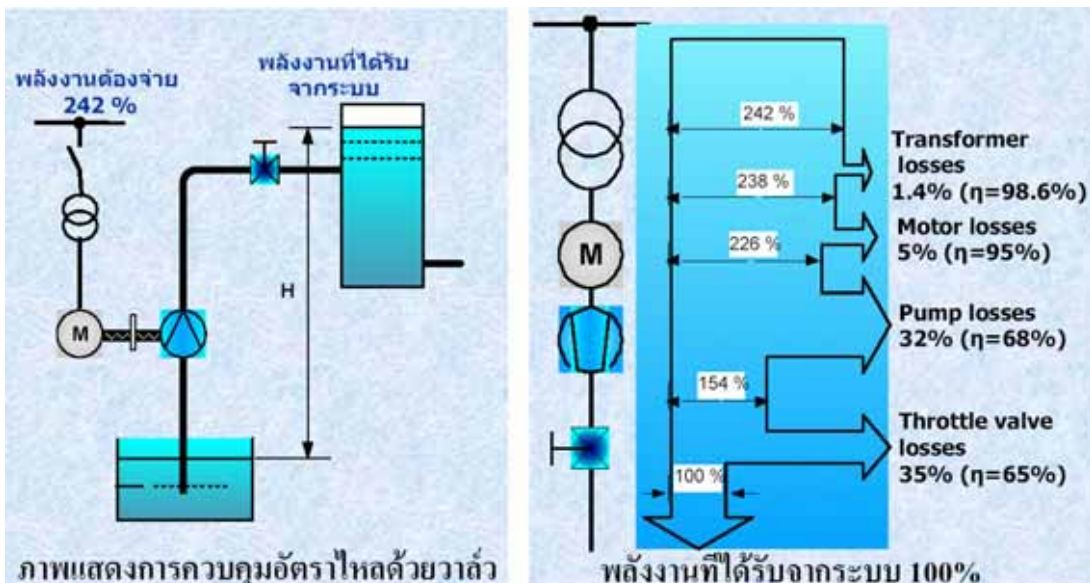
ในขบวนการผลิตสินค้า เช่นการผลิตกระดาษ เหล็ก ปูนซีเมนต์ หรือ ปิโตรเคมี จะต้องมีการควบคุมปริมาณการไหลของอากาศ สำหรับพัดลม หรือของเหลวเช่นเครื่องสูบน้ำ อาจจะใช้วาล์ว หรือ เดมเปอร์ เพื่อควบคุมปริมาณการไหล หรือควบคุมความเร็วรอบโดยวิธีทางกล เช่น ไฮดรอลิกคัปปลิ้ง นอกเหนือจากสามารถควบคุมการไหลได้ตามต้องการแล้ว ผลพลอยได้ที่ได้รับคือการประหยัดพลังงานจากการควบคุมความเร็วรอบ

การประหยัดพลังงานโดยวิธีการควบคุมความเร็วรอบนั้น เป็นวิธีที่มีการทำกันมาเป็นเวลาช้านานแล้ว โดยส่วนใหญ่ในอดีตจะใช้วิธีการปรับความเร็วรอบโดยทางกลมากกว่า เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย และราคาไม่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมด้วยไฟฟ้า

ในรอบหลายปีที่ผ่านมา การพัฒนาเทคโนโลยีไฟฟ้ามีความก้าวหน้าไปมาก ชุดควบคุมความเร็วรอบสำหรับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก (Variable Speed Drives, VSDs) จึงมีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย เพื่อมาทดแทนการปรับความเร็วรอบระบบทางกล เช่น ระบบไฮดรอลิกคัปปลิ้ง หรือการใช้เกียร์เพื่อการทดรอบเป็นช่วง ๆ

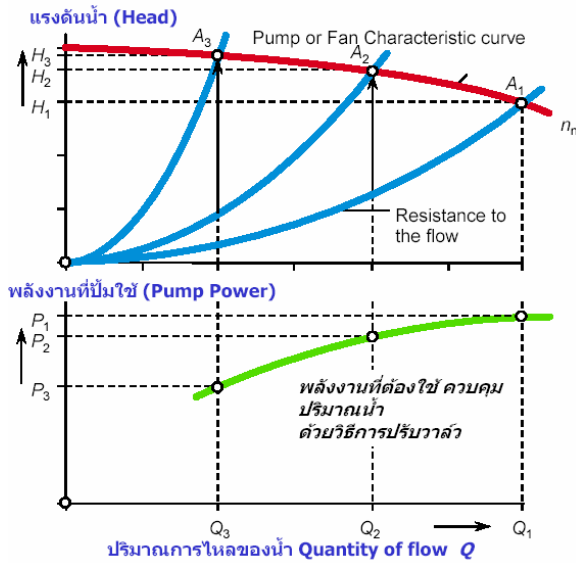
ความเร็วรอบลดลงจะประหยัดพลังงานได้อย่างไร?

คำถามนี้จะเกิดกับวิศวกรไฟฟ้าเป็นส่วนใหญ่ เพราะมหาวิทยาลัยจะสอนมาแต่เรื่องไฟฟ้าเท่านั้น การประหยัดพลังงานนั้นเป็นผลมาจากทฤษฎีของเครื่องกล ตามทฤษฎีเครื่องจักรทุกชนิดจะมีค่าสูญเสียรวมทั้ง VSD ที่ใส่เพิ่มเข้าไปเพื่อปรับความเร็วรอบมอเตอร์เอง ก็มีค่าสูญเสียของพลังงานประมาณ 2% น่าจะยิ่งเพิ่มความสูญเสียเข้าไปในระบบ แล้วจะประหยัดพลังงานได้อย่างไร? เป็นคำถามที่พบได้จากวิศวกรไฟฟ้ามือใหม่ร้อนวิชา



รูปที่ 1 ภาพแสดงการควบคุมปริมาณการไหลของเครื่องสูบน้ำด้วยวาล์ว และพลังงานสูญเสียในแต่ละช่วง

จากรูปที่ 1 การควบคุมอัตราการไหลของน้ำสามารถทำได้โดยการควบคุมที่วาล์ว ในขณะที่มอเตอร์ยังคงหมุนที่ความเร็วปกติคงที่ เครื่องสูบน้ำก็ต้องหมุนที่ความเร็วรอบปกติเท่ากับมอเตอร์ ทำให้เกิดความสูญเสียที่วาล์วประมาณ 35% ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำเหลือ 68% หรืออีกนัยหนึ่งก็คือเกิดการสูญเสียที่เครื่องสูบน้ำ 32% จากพลังงานทั้งหมดที่จ่ายให้แก่เครื่องสูบน้ำ



พลังงาน (Power) \propto ความเร็ว³ (Speed³)

รูปที่ 2 แสดงกราฟคุณสมบัติของเครื่องสูบน้ำ หรือ พัดลมเมื่อควบคุมด้วยวาล์ว

จากรูปที่ 1 และ 2 เมื่อให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ และทำการควบคุมปริมาณการไหลโดยใช้วาล์วบีบ ท่อน้ำให้เล็กลง ค่าสูญเสียในท่อ หรือค่าความต้านทานของ ท่อจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงดันน้ำเพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่ 2 ทำให้จุดตัดจากจุด A₁ เป็นจุดตัด A₂, A₃ โดยจุดตัดของ เส้นกราฟของแรงดันน้ำเปลี่ยนจากจุด H₁ เป็น H₂, H₃ ปริมาณน้ำที่ไหลออกจะลดลงจาก Q₁ ไปเป็น Q₂, Q₃ ดังนั้น กำลังที่เครื่องสูบน้ำต้องการจะเปลี่ยนจากจุด P₁ เป็นจุด P₂, P₃

เมื่อลดปริมาณน้ำโดยใช้วาล์วควบคุม พลังงานที่ใช้ ก็ลดลงจาก P₁ ไปเป็น P₂, P₃ แต่การลดลงนั้นไม่มากเมื่อ เปรียบเทียบกับการควบคุมอัตราการไหลด้วย VSD

จากกฎของ Affinity Laws สำหรับเครื่องสูบน้ำ หรือ พัดลมแบบเซ็นติฟูกัล

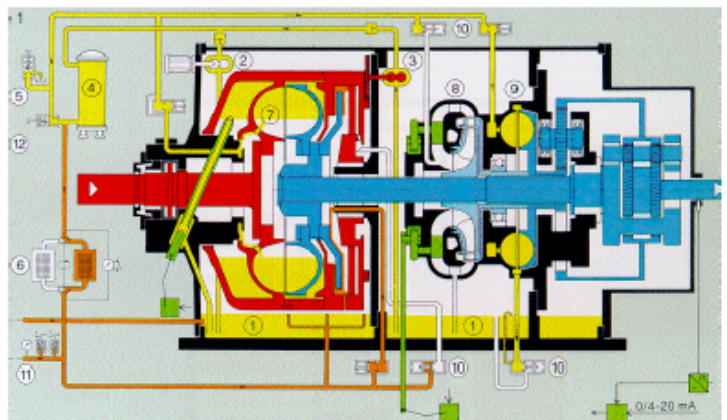
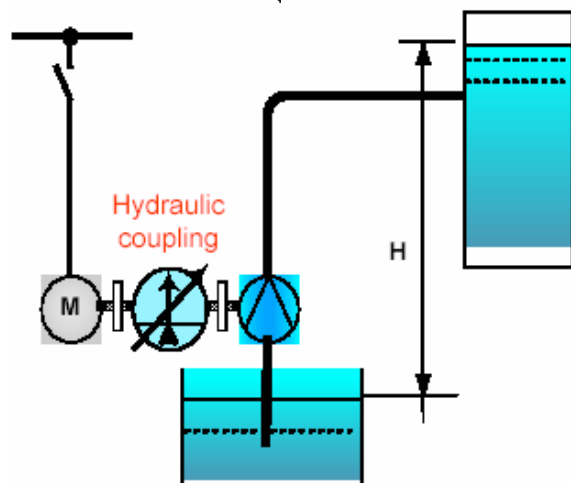
- ปริมาณ (Volume) \propto ความเร็วรอบ (Speed)
- แรงดัน (Pressure) \propto ความเร็ว² (Speed²)

ดังนั้นตามทฤษฎีเมื่อสามารถเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์ หรือเครื่องสูบน้ำ เพื่อควบคุมปริมาณการ ไหล จะทำให้ปริมาณน้ำที่ผ่านเครื่องสูบน้ำด้วยแรงดันน้ำคงที่ จะจะเป็นไปตามกฎ Affinity Law โดยความ ต้านทานในท่อจะไม่เพิ่มขึ้น ทำให้พลังงานที่ใช้จะลดลงตามทฤษฎี กล่าวคือเมื่อต้องการปริมาณลดลง พลังงาน ที่ใช้จะลดลงตามอัตราส่วนความเร็วรอบเครื่องสูบน้ำยกกำลังสาม (n^3)

จากกฎของ Affinity Laws ที่ได้กล่าวไปแล้วนั้นเป็นทฤษฎีที่ทราบกันมานานแล้ว ทำให้มีผู้คิดค้นวิธี ควบคุมความเร็วรอบออกมาหลายๆ แบบ ตามเทคโนโลยีในแต่ละยุคแต่ละสมัย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมกับ สถานะการณ์ สิ่งแวดล้อม และความคุ้มค่าในแง่การลงทุนเป็นไป

การควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ Hydraulic coupling

การควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ Hydraulic คัพปลิงนี้เป็นการควบคุมแรงบิดมอเตอร์ โดยทำให้เกิดสลิป ที่คัพปลิง แต่มอเตอร์ยังคงหมุนที่ความเร็วคงที่ ค่าความสูญเสียเนื่องจากสลิปที่เกิดขึ้น จะตกไปอยู่ที่ Hydraulic คัพปลิงในรูปของความร้อน ประกอบกับการบำรุงรักษาต้องการการดูแลเป็นพิเศษ ประสิทธิภาพโดยรวมของทั้ง ระบบดีขึ้นกว่าการควบคุมโดยใช้วาล์ว แต่งบประมาณการลงทุนค่อนข้างสูง



รูปที่ 3 ภาพแสดงการควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ Hydraulic coupling และภาพขยาย

นอกจาก Hydraulic คัพปลิง การควบคุมอีกวิธีหนึ่งที่คล้ายกันคือ Eddy current coupling หลักการ ทำงานคล้ายคลึงกับ Hydraulic คัพปลิง กล่าวคือ Hydraulic คัพปลิง เป็นการควบคุมการสิ้นเปลืองตามทฤษฎีของ ไหล ตามหลักวิชาเครื่องกล แต่ Eddy current coupling จะใช้ทฤษฎีทางไฟฟ้า โดยอาศัยสนามแม่เหล็กมา ควบคุมการสิ้นเปลือง จึงสามารถควบคุมได้ยาวนานกว่า Hydraulic คัพปลิง ข้อดี และข้อเสียคล้ายๆกัน ทำให้ ปัจจุบันนี้ไม่ค่อยมีผู้นิยมนำมาใช้มากนัก

การควบคุมความเร็วรอบโดยใช้ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ VSD



ความเร็วรอบของมอเตอร์เหนี่ยวนำชนิดกรงกระรอกตามหลักการพื้นฐานแล้วมีตัวแปร 3 ตัวที่ส่งผลกระทบต่อความเร็วรอบมอเตอร์ (n , rpm) คือ จำนวนขั้วแม่เหล็ก (P) ความถี่ไฟฟ้า (f , Hz) และ สลิป (slip) ของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยมีความสัมพันธ์ตามสูตร

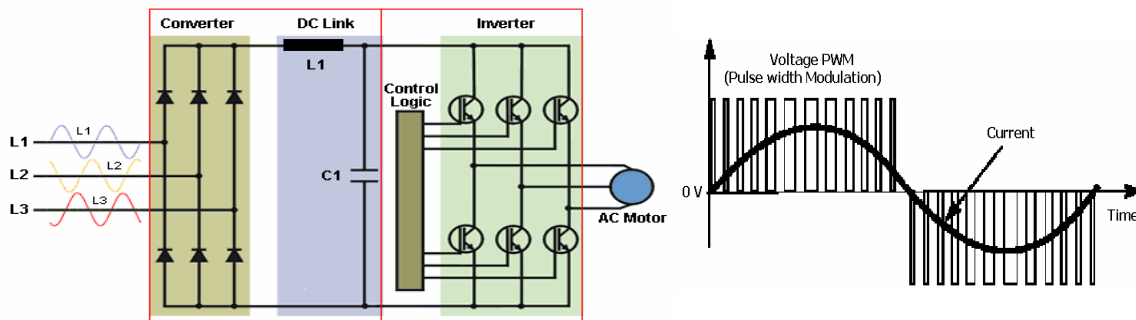
$$\text{Speed, } n = (1 - \text{Slip}) \frac{120f}{P} \approx \frac{120f}{P}$$

การควบคุมสลิปสามารถทำได้ 2 วิธีด้วยกัน คือ การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์ ข้อดีของการควบคุมวิธีนี้คือ ง่ายและราคาถูก แต่ข้อเสียคือ แรงบิดจะลดลงเมื่อแรงดันลดลง ส่วนอีกวิธีหนึ่งคือ การเพิ่มค่าความต้านทานที่โรเตอร์ หรือเพิ่มกำลังสูญเสียในตัวโรเตอร์เป็นการเพิ่มสลิป แต่จะทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ต่ำลงด้วย วิธีนี้สามารถนำไปใช้ได้กับมอเตอร์แบบสลิปปรังเท่านั้น

ส่วนการปรับจำนวนขั้วแม่เหล็กของมอเตอร์สามารถทำได้เพียงแค่เลือกว่าจะเอาที่กี่ขั้ว ในอดีตนั้นมีการพันมอเตอร์เป็นแบบ Pole changing อาจจะมีขั้วแม่เหล็ก 2 ชุดในตัวเดียวกัน ทำให้สามารถเลือกความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ 2 ระดับความเร็วรอบ ในปัจจุบันมอเตอร์ชนิดนี้ไม่เป็นที่นิยมนำมาใช้งานกันมากนักเพราะประสิทธิภาพของมอเตอร์จะต่ำ และราคาสูง การปรับความเร็วไม่สามารถปรับความเร็วรอบได้ Smooth ตามต้องการ ประกอบกับไม่มีผู้จำหน่ายมอเตอร์รายใดต้องการเก็บสต็อกสินค้าไว้บริการหลังการขาย จึงยิ่งส่งผลให้ราคามอเตอร์แบบเปลี่ยนขั้วได้แพงขึ้นกว่ามอเตอร์ปกติมาก ดังนั้นวิธีที่ดีที่สุดคือการปรับความเร็วรอบมอเตอร์โดยวิธีควบคุมความถี่ไฟฟ้า ซึ่งความเร็วรอบของมอเตอร์ จะแปรผันตรงกับค่าความถี่ไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่มอเตอร์

การปรับความเร็วรอบมอเตอร์โดยวิธีควบคุมความถี่ไฟฟ้า บางครั้งเรียกว่า **VVF** ย่อมาจาก **V**ariable **V**oltage **V**ariable **F**requency หรือ บางครั้งเรียกว่า **VSD** ย่อมาจาก **V**ariable **S**peed **D**rives เป็นการปรับทั้งแรงดันและความถี่ไฟฟ้าให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอก การควบคุมวิธีนี้ บางครั้งจะเรียกว่า V/F control

นอกจากนี้ยังมีชื่ออื่นๆ ที่พบบ่อยๆ เช่น **Vector Control (VC)**, **Direct Torque Control (DTC)**, Flux Control หรือคำอื่นๆ ซึ่งอาจจะมีข้อแตกต่างกันบ้างทางด้านวิธีการออกแบบวิธีการควบคุม ซึ่งเป็นชื่อทางการค้า ซึ่งมีหลักการทำงานเบื้องต้นแทบจะเหมือนกันเกือบทั้งหมดดังรูปต่อไปนี้

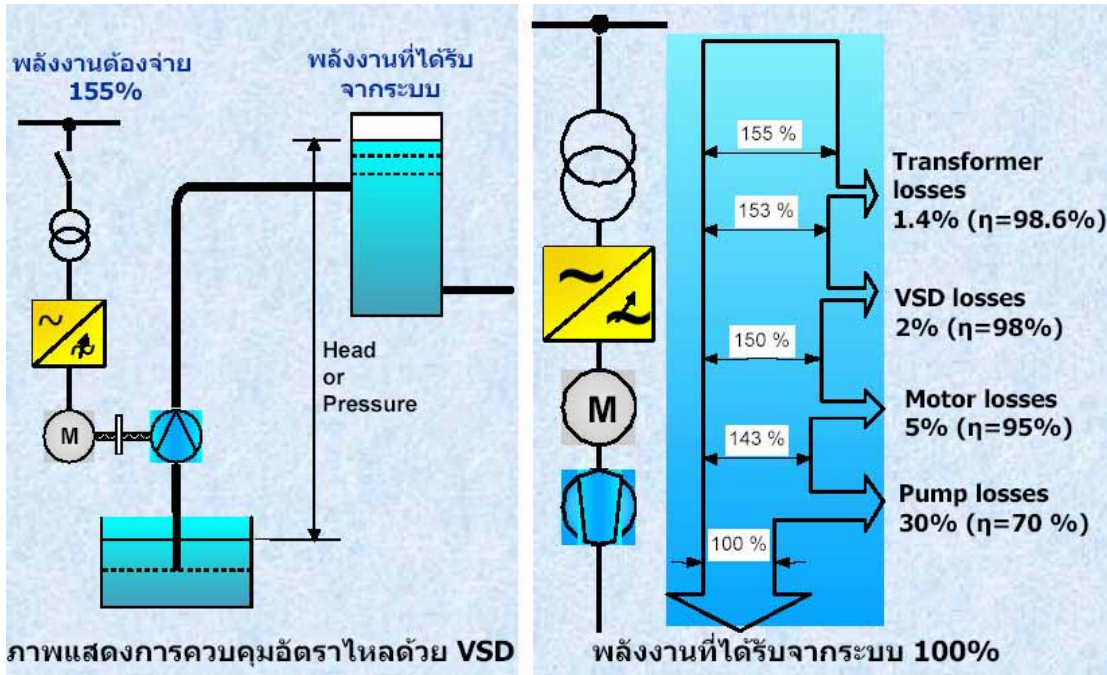


รูปที่ 4 ก, ข พื้นฐานวงจรไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์แบบ Voltage Source, PWM 2 Level

จากรูปที่ 4 ก. พื้นฐานวงจรไฟฟ้าของคอนเวอร์เตอร์แบบ Voltage Source, PWM จากวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าสามเฟส ผ่านชุด ไดโอดเรกติฟาย แปลงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็น ไฟฟ้ากระแสตรง เรียกว่า "DC Link" DC Linkจะประกอบไปด้วยคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่ต่อขนาน บางครั้งอาจจะมิ อินดักเตนซ์ต่ออนุกรมเพื่อลด di/dt พลังงานจะถูกเก็บไว้ที่ DC Link โดย คาปาซิเตอร์ทำหน้าที่กรองรูปคลื่นให้เรียบมากขึ้น ไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกชุดอินเวอร์เตอร์สวิตชิงให้เกิดย่านความถี่ต่างๆ แบบ PWM โดยมีค่าแรงดันสูงสุดคงที่ตามค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ผ่านการเรกติไฟร์แล้ว ความถี่ที่สวิตชิงอาจจะกว้างหรือแคบในแต่ละช่วงจังหวะจะเป็นไปตามรูปแบบ PWM การปรับความเร็วหรือการปรับแรงดัน **rms** สามารถทำได้โดยการปรับย่านความกว้างและจังหวะในการสวิตชิง ตามรูปที่ 4 ข. แสดงแรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM แบบชนิด 2 ระดับ (2 Level)

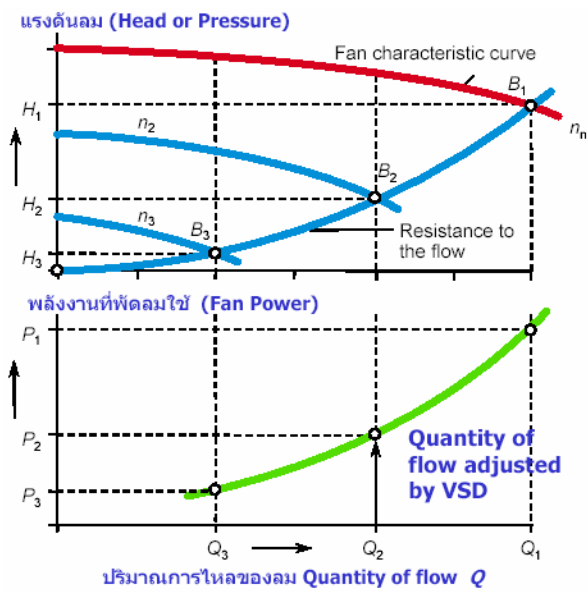
แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากอินเวอร์เตอร์แบบ PWM ถูกส่งผ่านเข้าไปยังมอเตอร์ ทำให้เกิด รูปคลื่นชายนเวฟของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้ามอเตอร์ตามรูปที่ 4 ข. อันเป็นผลกระทบอันเนื่องมาจากค่าอินดักแตนซ์ของมอเตอร์ที่มีปริมาณมากกว่าค่าความต้านทาน จึงแปลงรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า PWM เป็นรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าชายนเวฟ ที่มีริบเบิลบ้างเล็กน้อย

จากรูปที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 5 พลังงานที่ได้รับจากการสูบน้ำจากระบบทั้งหมดเท่ากันคือ 100% แต่ต้องจ่ายพลังงานไปเกือบ 242% ตามรูปที่ 1 แต่เมื่อเปลี่ยนมาใช้ VSD พลังงานที่จ่ายจะลดลงเหลือเพียง 155% ตามรูปที่ 5 เพราะเมื่อเครื่องจักรที่ปลายทางต้องการพลังงานมาก พลังงานสูญเสียตั้งแต่ต้นทางก็จะมากไปด้วยตามสัดส่วนของประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 5 นั่นคือเหตุผลที่ว่า เมื่อนำ VSD ไปใช้ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ที่ความเร็วรอบต่ำจะช่วยประหยัดพลังงานได้มากกว่าการใช้วาล์วควบคุมอัตราการไหลของระบบ



รูปที่ 5 ภาพแสดงระบบการควบคุมปริมาณการไหลของเครื่องสูบน้ำด้วย VSD และพลังงานสูญเสียในแต่ละช่วง

จากรูปที่ 5, 6 เปรียบเทียบกับรูปที่ 1, 2 เมื่อปรับให้มอเตอร์หมุนที่ความเร็วรอบลดลง จะทำให้กราฟคุณสมบัติของเครื่องสูบน้ำหรือพัดลม เปลี่ยนจากเส้นกราฟ n_n ตกลงมาเป็นเส้นกราฟ n_2, n_3 ทำให้สามารถควบคุมปริมาณการไหล หรือแรงดันของระบบได้ ทำให้ค่าสูญเสียในท่อ หรือค่าความต้านทานของระบบลดลง ดังรูปที่ 6



ทำให้จุดตัดจากจุด B_1 เป็นจุดตัด B_2, B_3 โดยจุดตัดของเส้นกราฟของแรงดันน้ำเปลี่ยนจากจุด H_1 เป็น H_2, H_3 ปริมาณน้ำที่ไหลออกจะลดลงจาก Q_1 ไปเป็น Q_2, Q_3 ดังนั้นกำลังที่เครื่องสูบน้ำต้องการจะเปลี่ยนจากจุด P_1 เป็นจุด P_2, P_3

เมื่อลดปริมาณน้ำโดยใช้ VSD พลังงานที่ใช้ก็ลดลงจาก P_1 ไปเป็น P_2, P_3 ซึ่งการลดลงนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับ การควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วตามรูปที่ 2 จะเห็นว่ามี ความแตกต่างของพลังงานที่ใช้ P_2, P_3 ลดลงมากกว่า

ดังนั้นการเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์เพื่อควบคุมปริมาณการไหล จะทำให้ปริมาณน้ำที่ผ่านเครื่องสูบน้ำด้วยแรงดันน้ำคงที่ ทำให้ใช้พลังงานลดลงเป็นอย่างมาก โดยพลังงานที่ใช้จะแปรผันตามความเร็วรอบมอเตอร์ยกกำลังสาม (n^3) เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำที่จ่ายออกไป ตามกฎ Affinity Law

รูปที่ 6 แสดงกราฟคุณสมบัติของเครื่องสูบน้ำ หรือ พัดลมเมื่อควบคุมด้วย VSD



อักษรย่อ

DOL	D irect O n L ine การเริ่มหมุนมอเตอร์โดยการต่อตรงแรงดันไฟฟ้าเต็มพิกัดแรงดัน
Drive ES	Name of software and Parameterization to the SIMOVERT VSD .
PC	P ersonal C omputer
PLC	P rogrammable L ogic C ontroller
PWM	P ulse W idth M odulation
rms	r oot m ean s quare เป็นค่าเฉลี่ยทางไฟฟ้าของรูปคลื่นซายด์เวฟ
rpm	r ound p er m inute หน่วยของความเร็รรอบเป็น รอบต่อนาที
SCADA	S upervisory C ontrol and D ata A cquisition
SIMOVERT MV	ชื่อทางการค้าของบริษัทซีเมนส์สำหรับ VSDs M edium V oltage
THD	T otal H armonic D istortions
VCB	V acuum C ircuit B reaker
VSD	V ariable S peed D rives ชุดควบคุมความเร็รรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ
VVVF	V ariable V oltage V ariable F requency

อ้างอิง

1. Siemens A&D-LD catalog DA63-2002 Simovert MV
2. K. Bauer, M. Kaufhold, H. Wang, „High Voltage Motor Winding Insulation for High Power Adjustable Speed Drives fed by IGBT Converter“, submitted for publication at BEAMA 1998.
3. R. Sommer, A. Mertens, C. Brunotte, G. Trauth, “Medium Voltage Drive System with NPC Three-level Inverter using IGBTs“, 8th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 1999, Lausanne, CH.
4. Benoit Schmitt “Energy Savings with VSD For reheat furnace combustion air fans” Article Siemens A&D-LD

ตีพิมพ์ลงในวารสาร เทคนิค เครื่องกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม ฉบับที่ 227 ประจำเดือน กันยายน พ.ศ.2546 หน้า 163-172

ต้องการดูบทความอื่นๆ สามารถ Down Load เพิ่มเติมได้จาก <http://www.tinamics.com>