



การสตาร์ทมอเตอร์ แบบสตาร์ - เดลต้า

Star - delta starting

กรณีศึกษา (Case Study)

การสตาร์ทมอเตอร์แบบต่อโดยตรงจากไลน์ หรือ (Direct on - line starting) เป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูก ระบบไม่ซับซ้อน ทำให้โอกาสความผิดพลาดในการเดินเครื่องจึงมีน้อย แต่ข้อด้อยคือไม่ทนต่อการสตาร์ทที่หนักขึ้นมอเตอร์ 3 เฟสแบบนี้ อาจจะไม่เหมาะกับโหลดบางอย่างของมอเตอร์ เพราะกระแสล่อกรอเตอร์ของมอเตอร์อาจจะมีค่าเพิ่มขึ้นสูง และแรงบิดสตาร์ทที่กระทำอาจจะมีค่าถึง 3 เท่าของแรงบิดปกติ ถ้าหากมอเตอร์มีขนาดใหญ่ อาจทำให้แรงดันตก หรือ แผลงจ่ายไฟเสียหาย อันเนื่องมาจากกระแสล่อกรอเตอร์ หรืออาจทำให้เกิดปัญหาทำงานผิดพลาดเกี่ยวกับ ระบบการป้องกันมอเตอร์ทางด้านอุณหภูมิเนื่องจากความร้อนสูงเกิน ซึ่งเกิดจากกระแสสตาร์ทที่มีค่าสูง 5-7 เท่า สำหรับค่ากระแส Inrush ช่วงขณะสตาร์ท i_{peak} สามารถประมาณได้ตามสมการ ต่อไปนี้

$$i_{peak} = \sqrt{2} \cdot I_A \cdot k_M$$

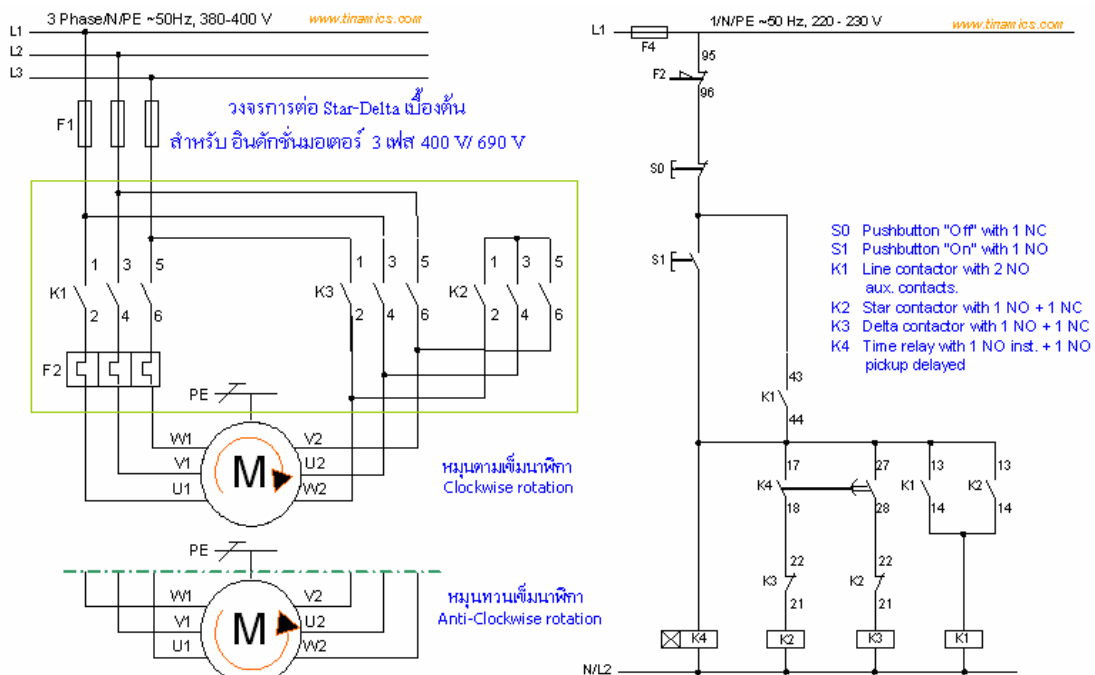
เมื่อ i_{peak} คือค่าสูงสุดของครึ่งรูปคลื่น (Peak value of the initial $t = 10$ ms)

I_A คือกระแสล่อกรอเตอร์ (Lock rotor current, A)

k_M คือค่าแฟกเตอร์ขึ้นอยู่กับขนาดของมอเตอร์

($k_M = 1.8$ สำหรับมอเตอร์ขนาดเล็กและมีค่าถึง 2.0 สำหรับมอเตอร์ขนาดใหญ่)

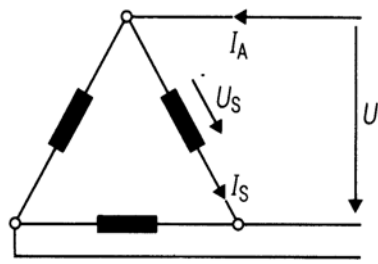
วิธีการการสตาร์ทที่หนักขึ้นมอเตอร์ แบบสตาร์ - เดลต้า (Y-Δ) เป็นอีกวิธีที่ง่าย และสามารถลดกระแสขณะสตาร์ทได้ดีขึ้น ซึ่งมอเตอร์ที่จะนำมาสตาร์ท แบบ Y-Δ ได้ขดลวดสเตเตอร์ จะต้องถูกออกแบบให้ทำงานที่พิกัดขดลวดเป็นขดเฟสที่ต่อแบบ Δ เช่นมอเตอร์ ชนิด 400 VD/ 690 VY ในขณะที่ทำการสตาร์ท ขดลวดมอเตอร์จะถูกต่อแบบ Y ทำให้ค่าแรงดันตกคร่อมที่ขดลวดลดลงเหลือเพียง 57% เมื่อแรงดันตกคร่อมลดลงส่งผลทำให้กระแสสตาร์ทจะลดลง และแรงบิดล่อกรอเตอร์ก็จะลงไปด้วยประมาณ 1 ใน 3 ของค่าที่ต่อแบบ Δ หลังจากนั้นเมื่อความเร็วรอบมอเตอร์เข้าใกล้พิกัด ก็จะต่อกลับกลายเป็นแบบ Δ ที่ระบบไฟฟ้า 400 V ดังแสดงในรูปที่ 1 วงจรกำลัง และวงจรควบคุมของวงจร Star (Y) - Delta (Δ)



รูปที่ 1 การต่อวงจรกำลัง และภาคควบคุม แบบสตาร์และเดลต้า (Y-Δ)



ส่วนค่าต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นกระแส แรงดัน หรือ แรงบิด เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง Y-Δ สามารถแสดงเป็นวงจรเปรียบเทียบ โดยมีค่าต่างๆที่เปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในรูปที่ 2 และ รูปที่ 3

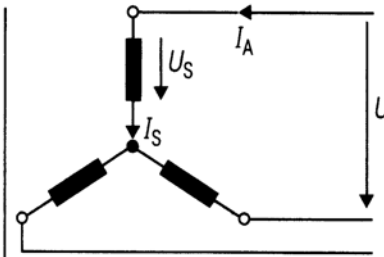


$$U_{S\Delta} = U$$

$$I_{S\Delta} = \frac{U_{S\Delta}}{Z} = \frac{U}{Z}$$

$$I_{A\Delta} = I_{S\Delta} \cdot \sqrt{3} = \frac{U}{Z} \cdot \sqrt{3}$$

$$M_{A\Delta} = k \cdot U_{S\Delta}^2 = k \cdot U^2$$



$$U_{S\gamma} = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

$$I_{S\gamma} = \frac{U_{S\gamma}}{Z} = \frac{U}{Z \cdot \sqrt{3}}$$

$$I_{A\gamma} = I_{S\gamma} = \frac{U}{Z \cdot \sqrt{3}}$$

$$M_{A\gamma} = k \cdot U_{S\gamma}^2 = k \cdot U^2 \cdot \frac{1}{3}$$

$$\frac{I_{A\gamma}}{I_{A\Delta}} = \frac{\frac{U}{Z \cdot \sqrt{3}}}{\frac{U}{Z} \cdot \sqrt{3}} \approx \frac{1}{3}^*)$$

$$\frac{M_{A\gamma}}{M_{A\Delta}} = \frac{k \cdot U^2 \cdot \frac{1}{3}}{k \cdot U^2} \approx \frac{1}{3}^*)$$

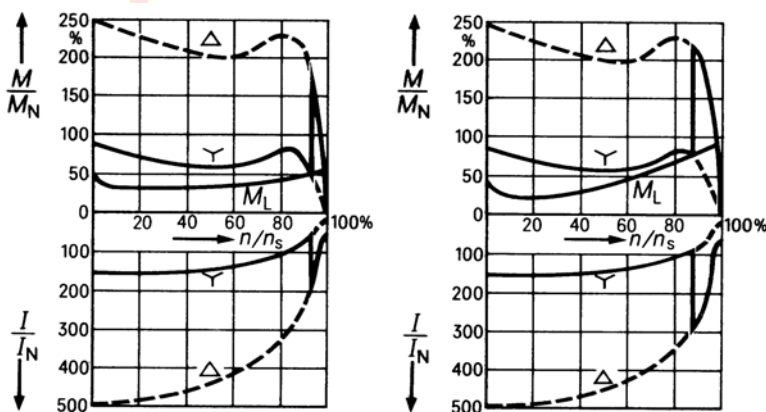
$$\frac{I_{S\gamma}}{I_{S\Delta}} = \frac{\frac{U}{Z \cdot \sqrt{3}}}{\frac{U}{Z}} \approx \frac{1}{\sqrt{3}}^*)$$

รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน, กระแส และแรงบิดสำหรับการต่อแบบ Y-D

- U = คือแรงดันไลน์
- U_S = คือแรงดันเฟส
- M_A = คือแรงบิดลือกโรเตอร์
- Z = คืออิมพีแดนซ์ของ 1 เฟส
- I_A = คือกระแสลือกโรเตอร์ของแหล่งจ่าย
- k = คือค่าคงที่ขึ้นอยู่กับมอเตอร์
- I_S = คือกระแสลือกโรเตอร์ต่อเฟส



*) ในสมการเป็นค่าโดยประมาณแรงบิดมอเตอร์จะถูกกำหนดโดยฟลักซ์และกระแสโรเตอร์; แรงดันตกคร่อมในตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ผลความอิ่มตัว (saturation) ทางแม่เหล็กจะแปรผันตามแรงดันที่จ่ายเข้ามา



รูปที่ 3 แรงบิดและกระแสต่อความเร็วสำหรับการสวิตช์สตาร์ท - เดลต้า ที่ถูกต้อง(ซ้าย) และการสวิตช์สตาร์ท-เดลต้า ก่อนเวลา(ขวา)

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของขดลวดขณะทำการสตาร์ทจะลดลงเป็นอัตราส่วนตามกระแสเฟส ยกกำลังสอง ซึ่ง $I_{S\gamma} = I_{S\Delta} / \sqrt{3}$ ทำให้เวลาขณะสตาร์ทสูงสุดจะมากกว่า 3 เท่าของการสตาร์ทโดยตรง วิธีการนี้สามารถยอมรับเกี่ยวกับแรงบิดเร่งสำหรับขณะเริ่มเดินสตาร์ทมอเตอร์ได้

ถ้าการสวิตช์จากสตาร์ทไป Δ ก่อนเวลากำหนดจะเห็นได้ว่ากระแสจะไหลสูงจะไม่มีมัยสำคัญถึงแม้จะน้อยกว่าแบบสตาร์ทโดยตรง ค่าใช้จ่ายของการสตาร์ทแบบ Y-Δ ก็ยังสูงอยู่ **ดังรูปที่ 3**

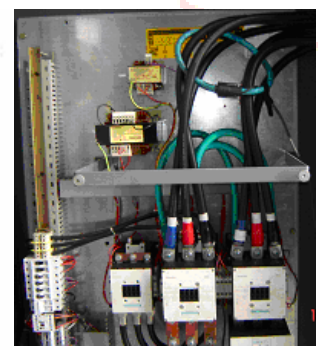
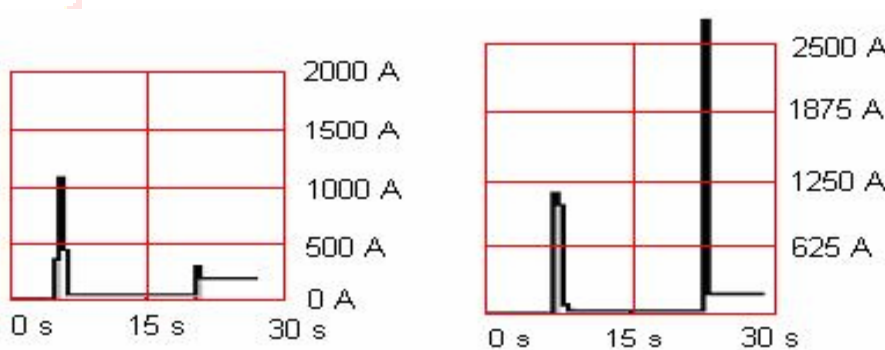


กรณีศึกษา (Case Study)

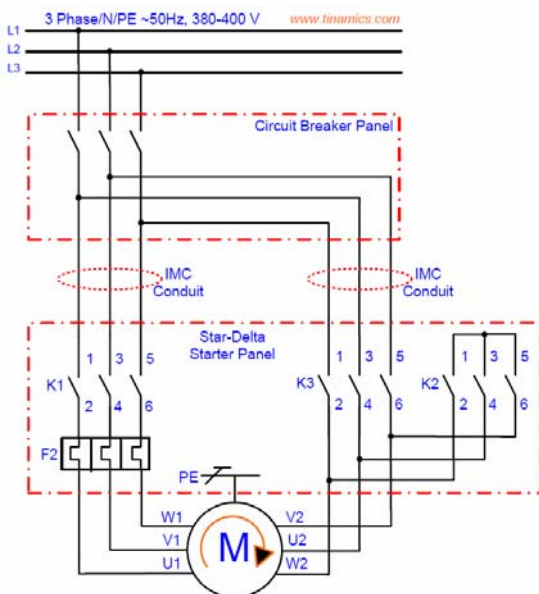
อินดักชั่นมอเตอร์ขนาด 250 kW, 3 AC 400 VD/690 VY, กระแสพิกัดที่แรงดัน 415 A Delta, 2 Pole ขับโหลดคอมเพรสเซอร์ สำหรับอัดอากาศ โดยผ่าน rigid direct coupling ใช้งานไม่ถึง 2 เดือน มอเตอร์ไหม้โดยไม่ทราบสาเหตุ จึงได้ส่งซ่อมโดยวิธีการพันขดลวดใหม่ หลังจากนั้นมาติดตั้ง Circuit Breaker ที่ทำหน้าที่ป้องกันมอเตอร์ ขนาด 500 AT เกิดพังเสียหายโดยไม่ทราบสาเหตุ

จากการสังเกตในเบื้องต้น มีบางครั้งของการสตาร์ท Y-Δ สายเมน และตู้สวิตช์เบรกเกอร์จะสั้นสะเทือนมากผิดปกติจนสังเกตเห็นได้ จึงได้ทำการทดสอบความผิดปกติ ของการสตาร์ทมอเตอร์ แบบ Y-Δ ทำการทดสอบโดยที่มอเตอร์ไม่ได้ต่อกับโหลดใดๆ (No-Load test) จำนวนทั้งหมด 4 ครั้ง ตามวงจร Y-Δ ปกติ ผลการทดสอบดังที่ได้แสดงไว้ในตาราง

ครั้งที่	Star Contactor Energized	Delta Contactor Energized	Result
1	1090A	250A	ok
2	1120A	270A	ok
3	1102A	250A	ok
4	1000A	Over scale	No



รูปที่ 4 กราฟแสดง กระแส No-load ในช่วงสตาร์ท แบบ Y- Δ ในสภาวะปกติ และผิดปกติ



จากตารางจะเห็นได้ว่า กระแสช่วงสตาร์ทที่ต่อแบบ Y (Star connection) จะกินกระแสประมาณ 1100 A หรือประมาณ 2.6 เท่าของกระแสพิกัดมอเตอร์ และ เมื่อได้เวลาประมาณ 15 วินาที สวิตช์ไปหาเดลต้า (Δ) จะกินกระแสประมาณ 250 A หรือ ประมาณ 60% ของกระแสพิกัดมอเตอร์ หลังจากนั้นก็จะทำงานแบบ no load เนื่องจากมอเตอร์ไม่ได้ต่อโหลด จะกินกระแสโดยประมาณ 150 A หรือ ประมาณ 35% ของกระแสพิกัดมอเตอร์ การทดสอบทั้ง 3 ครั้ง มีค่าใกล้เคียงกัน

มอเตอร์ตัวนี้ได้เคยผ่านการซ่อมมาแล้ว ครั้งหนึ่ง ค่าความต้านทานเท่ากันทุกเฟส กระแสมอเตอร์ขณะเดินโหลด มีค่าเท่ากันทุกเฟส แรงดันปกติเท่ากันทุกเฟส ช่วงที่จะเปลี่ยนจาก Y เป็น D มอเตอร์หมุนได้ความเร็ว เกือบ 2900 รอบ ทุกอย่างดูเหมือนสมบูรณ์แบบ

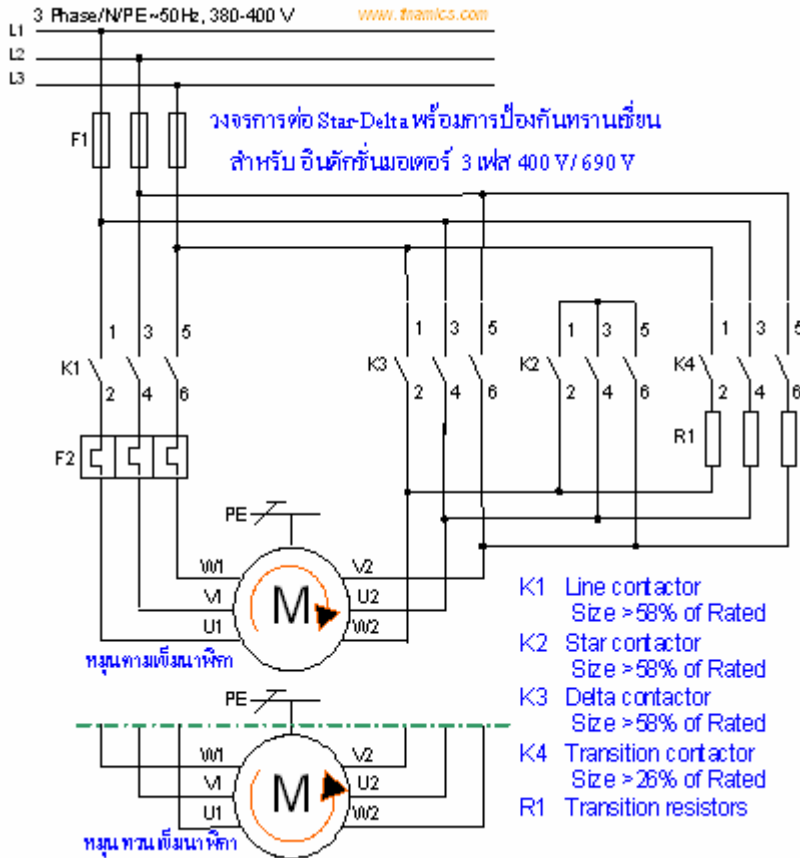
แต่ในการทดสอบครั้งที่ 4 จากกราฟ โดยใช้เครื่องวัด Digital power meter นั้น ในช่วงแรกของการสตาร์ทแบบ Star ไม่พบความผิดปกติใดๆ กระแสปกติ มีค่าไม่สูงมากนัก แต่เมื่อ

ถึงจังหวะที่เปลี่ยนจากตำแหน่ง Y ไปยังตำแหน่งที่ Delta Contactor นั้น สังเกตสายจะกระตุกอย่างแรง และ กระแสที่ Digital Power meter พุ่งสูงขึ้นไปจน over scale ทะลุเกินกว่า 3000 A หรือ เกือบ 7-8 เท่าของกระแสพิกัดมอเตอร์ โดยไม่ทราบสาเหตุ จนเป็นเหตุให้มอเตอร์ไหม้ และ ทำให้ circuit breaker เสียหาย



การสวิตช์ข้าม ระหว่าง สตาร์ – เดลต้า

สำหรับการเริ่มหมุนแบบ Y-Δ จะต้องมียาระยะหน่วงเวลาในการสวิตช์จาก Y-Δ มากกว่า 50 ms ถ้าหากสวิตช์ก่อนเวลาเร็วเกินไป อาจจะทำให้เกิดการลัดวงจรระหว่างเฟสได้ ระบบที่ถูกต้อง จะต้องตัดวงจร Y ออกจากระบบให้เรียบร้อยก่อน เป็นการทำให้แน่ใจว่าได้ยกเลิกการจ่ายไฟให้แก่มอเตอร์ ความเร็วรอบของมอเตอร์อาจจะลดลงเล็กน้อย แล้วจึงจะสับสวิตช์เข้าเป็นโหมดเดลต้า



รูปที่ 5 วงจรการต่อ Star-Delta พร้อมการป้องกันทรานเซียน
Power circuit of Close transition star-delta starting

ในช่วงที่สับสวิตช์เปลี่ยนจาก Y ไปเป็นการต่อแบบ Δ ในบางครั้ง อาจจะทำให้เกิดปัญหา มุมการต่างเฟสจากระบบไฟฟ้าที่จ่ายอีกครั้ง และสนามแม่เหล็กหมุนที่ยังคงตกค้างในขดลวดมอเตอร์ อยู่ในตำแหน่งเวกเตอร์ทางไฟฟ้า ที่ตรงข้ามกัน เปรียบเสมือนมอเตอร์ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชั่วคราว เมื่อสับสวิตช์จะทำให้เกิด Transient phenomena เกิดกระแสไหลชั่วขณะสูงมาก เสมือนการลัดวงจร อาจได้ถึง 20 เท่าของพิกัดกระแสมอเตอร์ เกิด mechanical shocks ทั้งระบบได้

หากเกิดอาการเช่นที่ว่านี้ ไม่ได้เกิดทุกครั้ง หรือเกิดเป็นบางครั้ง ในตำแหน่งช่วงจังหวะที่จะเปลี่ยนโหมดการทำงานจาก Y- Δ อาจจะต้องเพิ่ม transition คอนแทคเตอร์ ที่ต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน ซึ่งคอนแทคเตอร์จะทำงานเป็นการต่อตัวต้านทานคั่นกลางหลังจากทำงานจากโหมด Y อย่างน้อย 50 msec ก่อนที่จะเปลี่ยนเป็นโหมดเดลต้าดังรูปที่ 5 จะทำให้สามารถลดกระแสทรานเซียนสูงระหว่างการสับ Δ ออกไปได้

จากรูปวงจรที่ 5 คอนแทคเตอร์ K4 เป็นชุดที่เพิ่มเติมขึ้นมาจากวงจรพื้นฐาน จะทำงานพร้อม

ทั้ง R1 หลังจากคอนแทคเตอร์ K2 ปลดวงจรออกจาก Y เรียบร้อยแล้วไม่น้อยกว่า 50 ms คอนแทคเตอร์ K4 จะทำงานคั่นกลาง เพื่อให้ระบบแน่ใจว่าได้ discharged สนามแม่เหล็ก และลดกระแสและเพิ่มความมั่นใจว่า K2 ได้ปลดออกมียาระยะเวลาที่เพียงพอแน่นอน ก่อนที่จะสั่งให้ คอนแทคเตอร์ K3 จะทำงาน เข้าสู่โหมด Δ ตามปกติ

สำหรับค่าความต้านทาน R1 ที่ต้องการนำมาต่ออนุกรม เพื่อลดกระแสกระชาก (Transition current) สามารถหาได้จากสูตร

$$R_1 = \frac{U_e}{1.5 \times I_e \times \sqrt{3}} \quad (\text{in } \Omega) \quad \text{ตัวอย่าง มอเตอร์ 250 kW, 400 V, 50 Hz, 2 Pole, 415 A}$$

แทนค่าสูตร จะได้ค่า $R_1 = 0.37 \text{ Ohm/Phase}$

$$P_{R1} = \frac{U_e^2}{1200 \times R_1} \quad (\text{in Watt}) \quad \text{สำหรับการนำไปใช้งานที่มีการสตาร์ท-หยุด น้อยกว่า 12 ครั้ง ต่อชั่วโมง}$$

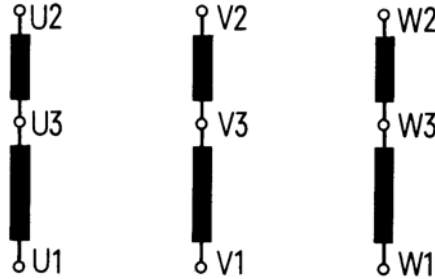
$$P_{R1} = \frac{U_e^2}{500 \times R_1} \quad (\text{in Watt}) \quad \text{สำหรับการนำไปใช้งานที่มีการสตาร์ท-หยุด น้อยกว่า 30 ครั้ง ต่อชั่วโมง}$$

ค่ากระแสที่ไหลผ่าน ความต้านทาน R1 จะมีกระแสไหลเป็นเพียงเสี้ยววินาทีเพื่อลด Transient phenomena คิดเป็นความร้อนสะสม P_{R1} อันเนื่องมาจากกระแสโดยประมาณ 1.5 เท่าของพิกัดกระแสใช้งานของมอเตอร์

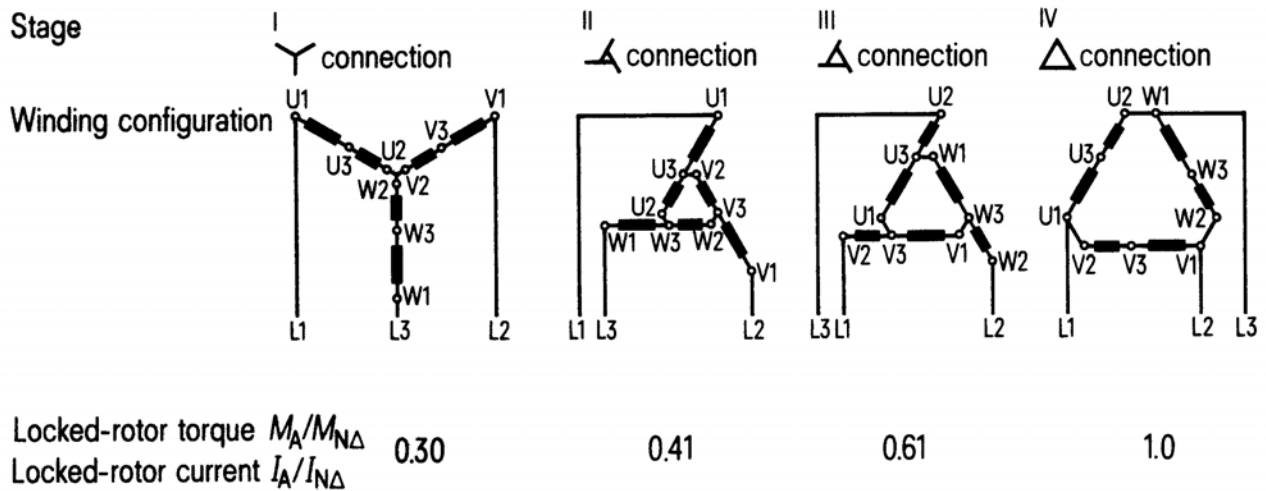


การสตาร์ทแบบสตาร์ - เดลต้าหลายขั้น (Multi - stage Y-Δ starting)

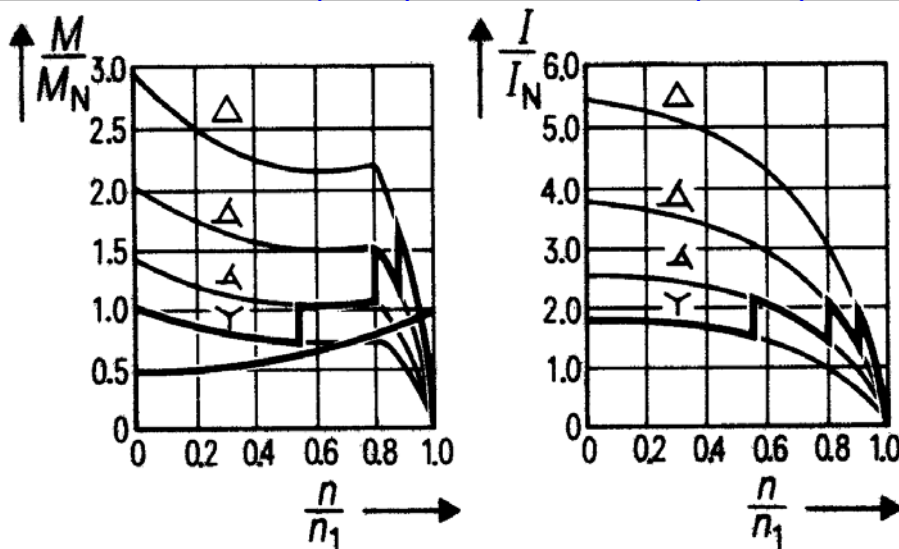
ในกรณีการสตาร์ทแบบ Y-Δ แบบปกติที่ไม่สามารถขับโหลดที่ต้องการแรงบิดเริ่มหมุนสูง การสตาร์ทแบบสี่จังหวะ หรือการสตาร์ทแบบ Y-Δ หลายขั้น สำหรับมอเตอร์ 9 สาย โดยมีสายภายในของมอเตอร์ประกอบด้วย 9 ขั้วต่อกัน *ดังรูปที่ 6* คือ U1 - U3, V1 - V3 และ W1 - W3



รูปที่ 6 ขดลวดหลายขดของมอเตอร์ 3 เฟสชนิดพิเศษ Y-Δ สำหรับการสตาร์ท Y-Δ หลายขั้น

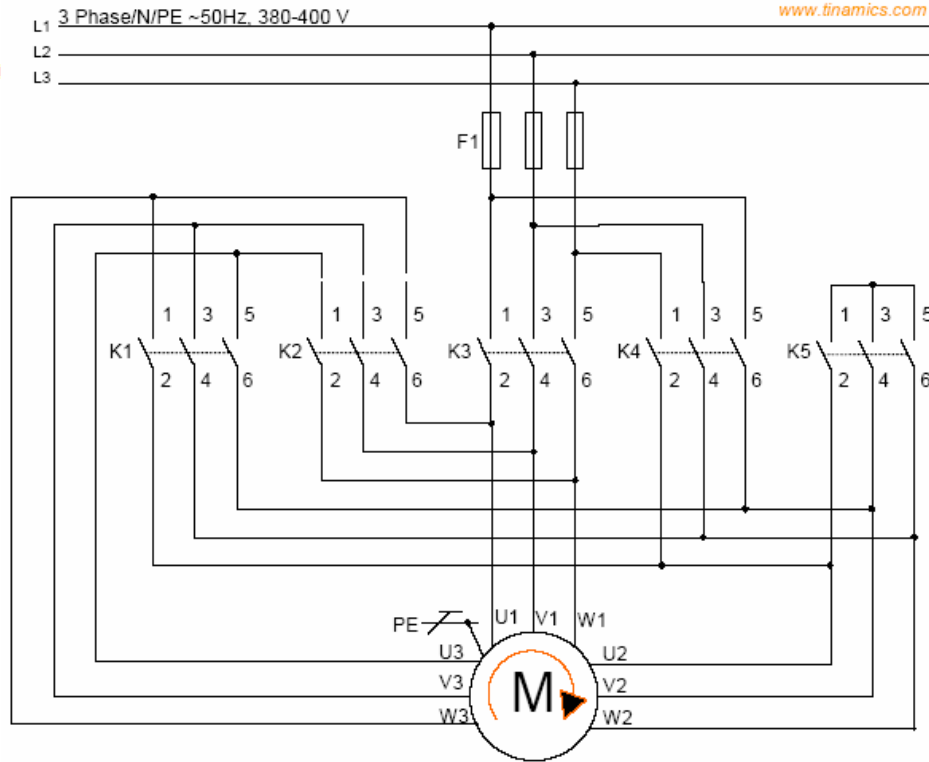


รูปที่ 7 การเปลี่ยนจากการต่อแบบสตาร์ (ลำดับ I) ไปถึงการต่อแบบเดลต้า (ลำดับ IV) ผ่านลำดับ II และ III



รูปที่ 8 แรงบิดและกระแสต่อความเร็วขณะทำการสตาร์ท Y-Δ หลายขั้น

ในรูปที่ 6 แสดงขดลวดหลายขดในมอเตอร์ 3 เฟสพิเศษสำหรับการต่อแบบ Y-Δ ขดลวดจะมีการต่อภายในมอเตอร์ มี 4 ลำดับการสวิตช์จาก 1 ถึง 4 *ดังรูปที่ 7* การทำจริง ๆ นั้นจะใช้คอนแทกเตอร์ต่ออยู่ภายนอกแล้วสวิตช์ตามลำดับ ลักษณะคุณสมบัติของแรงบิดและกระแสที่มีการสวิตช์ จะเป็นไปตามลำดับแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 9 วงจรกำลังของการสตาร์ทสตาร์ - เดลต้าแบบหลายขั้น

นอกเหนือจากวงจรการสตาร์ทมอเตอร์แบบ Y-Δ ดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น ยังมีการสตาร์ทในรูปแบบอื่นๆ ด้วยเหตุผลที่จะช่วยลดกระแส ขณะสตาร์ท เมื่อเปรียบเทียบกับ การสตาร์ทโดยตรงจากไลน์ ดังรูปที่ 10 แสดง วงจรการสตาร์ทในรูปแบบอื่นๆ เปรียบเทียบ เช่นการต่อความต้านทานอนุกรมหรือการเพิ่มจำนวนรอบของขดลวด เป็นต้น

Direct on-line starting	Star point reactor	Unit transformer	Reduced-voltage starting, Korndorfer method	Part-winding starting	Modified part-winding starting (for induction motors)	Star-delta starting without field interruption
$I_A = I_1 = \frac{U_s}{X_\sigma} = 1$	$\frac{I_A}{I_1} = \frac{X_\sigma}{X_\sigma + X_D}$	$\frac{I_A}{I_1} = \frac{X_\sigma}{X_\sigma + X_{Tr}}$	$\frac{I_A}{I_1} = \left(\frac{U_{Tr}}{U_s}\right)^2$	$\frac{I_A}{I_1} = 0.6 \text{ to } 0.7$	$\frac{I_A}{I_1} = 0.6 \text{ to } 0.7$	$\frac{I_A}{I_1} = \frac{1}{3}$
$M_A = M_1 = 1$	$\frac{M_A}{M_1} = \left(\frac{I_A}{I_1}\right)^2$	$\frac{M_A}{M_1} = \left(\frac{I_A}{I_1}\right)^2$	$\frac{M_A}{M_1} = \left(\frac{I_A}{I_1}\right)^2$	$\frac{M_A}{M_1} = 0.40 \text{ to } 0.45$	$\frac{M_A}{M_1} \approx 0.60$	$\frac{M_A}{M_1} = \frac{1}{3}$
S1 closed	S1 closed S2 closed	S1 closed	S1, S2 closed S2 open, S3 closed	S1 closed S2 closed	S1, S2 closed S2 open, S3 closed	S1, S2 closed S3 closed, S2 open, S4 closed, S3 open
1 circuit-breaker 3 lead wires	2 circuit-breakers 1 reactor 6 lead wires	1 circuit-breaker (1 transformer) 3 lead wires	3 circuit-breakers 1 autotransformer 3 lead wires	2 circuit-breakers 6 lead wires	3 circuit-breakers 9 lead wires	4 circuit-breakers 1 resistance unit 6 lead wires
I_A Locked-rotor current	I_1 Locked-rotor current with direct on-line starting	M_A Locked-rotor torque	M_1 Locked-rotor torque with direct on-line starting	U Line voltage	X_σ Leakage reactance	X_D Reactance of reactor
				X_{Tr} Transformer reactance		

รูปที่ 10 เปรียบเทียบวงจรสตาร์ทสำหรับอินดักชันมอเตอร์ขนาดใหญ่ในแบบต่างๆ