



## วิธีการเริ่มหมุนมอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันสูง How to start up HV motor?

มอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันสูง (High Voltage Motor) ตามคำนิยามของ IEC หมายถึงมอเตอร์ที่ใช้แรงดันไฟฟ้าสูงกว่า 1 kV โดยส่วนใหญ่จะมีขนาดใหญ่กว่า 200 kW เมื่อมอเตอร์มีขนาดใหญ่และใหญ่มากยิ่งขึ้นอาจจะมากกว่า 10 MW เมื่อเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ Direct On Line (DOL) ไม่ว่าจะเป็นอินดักชันมอเตอร์ หรือซิงโครนัสมอเตอร์ จะส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าตก ทำให้กระทบกระเทือนต่อระบบส่งจ่ายไฟฟ้า อาจส่งผลกระทบไปเป็นบริเวณกว้างถึงโรงงานผลิตไฟฟ้าของการไฟฟ้าได้

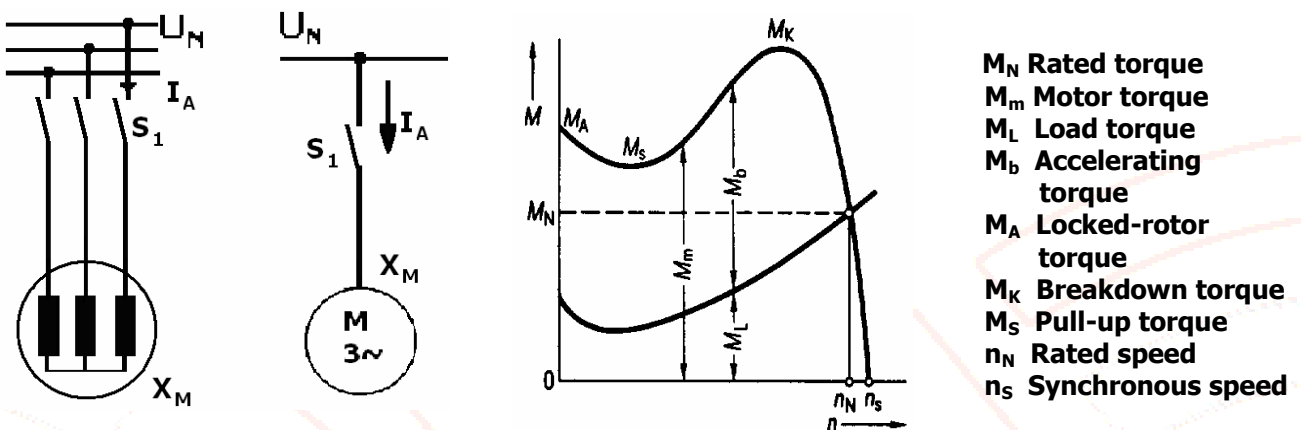
เนื่องจากข้อดีของการการเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ Direct On Line (DOL) ที่ง่ายแก่การติดตั้ง, อุปกรณ์ควบคุมไม่สลับซับซ้อน และง่ายแก่การบำรุงรักษา รวมทั้งประหยัดค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ติดต่อทางไฟฟ้า (Switch gear) และอุปกรณ์ต่อพ่วง ทำให้วิธีการเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ Direct On Line (DOL) จึงเป็นที่นิยมกันโดยทั่วไป

ในบางกรณี อาจจะมีค่าจำเป็นต้องลดขนาดกระแสไฟฟ้ากระชากตอนเริ่มหมุน เพื่อให้ส่งผลกระทบต่อระบบส่งจ่ายไฟฟ้า ให้มีแรงดันไฟฟ้าตกคละน้อยที่สุด ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการเลือกวิธีการเริ่มหมุนให้เหมาะสมกับสภาพ และข้อจำกัดที่มีจากสภาพแหล่งจ่ายไฟฟ้า รวมทั้งขนาดของ short circuit power และชนิดของโหลด

ต่อไปนี้จะเป็นการเปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียของการเริ่มหมุนมอเตอร์ในแต่ละแบบ, ลำดับและวิธีการทำงานของอุปกรณ์แต่ละตัว, การคำนวณหากระแสไฟฟ้าเริ่มหมุน และแรงบิดเริ่มหมุน รวมทั้งเปรียบเทียบจำนวนของอุปกรณ์ที่จะนำไปคำนวณหาต้นทุนในการติดตั้ง วงจรไฟฟ้า, พร้อมทั้งตัวอย่างในการคำนวณหาขนาดของอุปกรณ์

### 1. การเริ่มหมุนแบบการต่อตรง Direct On Line (DOL)

วิธีการเริ่มหมุนแบบต่อตรงเป็นวิธีที่นิยมกันมากที่สุด ง่ายต่อการติดตั้ง ในบางกรณีเราสามารถลดกระแสไฟฟ้าการเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ DOL โดยการออกแบบมอเตอร์ให้มีคาร์เอ็กแดนซ์ที่ขดลวด สเตเตอร์ให้มีความมากขึ้น อาจลดกระแสไฟฟ้าเริ่มหมุนได้ 15 ถึง 25% แต่จะส่งผลกระทบต่อค่าประสิทธิภาพ และ ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ได้



รูปที่ 1 วงจรการต่อมอเตอร์แบบการต่อตรง (DOL) และ torque curve



- ต้นทุนของอุปกรณ์ : 1 Circuit Breakers ( $S_1$ ), จำนวนสายไฟที่ต้องเดินจากตู้ CB ไปยังมอเตอร์ 3 เส้น
- ลำดับการทำงานของสวิตช์ (Sequence) : มอเตอร์จะเริ่มหมุนหลังจากสับสวิตช์ on ( $S_1$ )
- อุปกรณ์ช่วยในการเริ่มหมุน (Starting devices) : ไม่ต้องการเพิ่มเติม
- ข้อดี (Advantages) : อุปกรณ์ไม่สลับซับซ้อน, ง่ายแก่การติดตั้ง, ง่ายแก่การบำรุงรักษา ต้นทุนหรือค่าใช้จ่ายต่ำเพราะมีเพียงสวิตช์ตัดต่อทางไฟฟ้า (Switch gear)
- ข้อเสีย (Disadvantages) : กระแสไฟฟ้าเริ่มหมุนสูงประมาณ 4 ถึง 6.5 เท่าของกระแสไฟฟ้าพิกัด, แรงดันไฟฟ้าตกขณะสับสวิตช์เริ่มหมุน ทั้งนี้ขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกคล่อมขึ้นอยู่กับขนาดของ short circuit power ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

#### ตัวอย่างการคำนวณ

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า  
สายเคเบิล

$S_K$  = ขนาดของ short circuit power = 200 MVA แรงดันไฟฟ้า 6 kV  
 $l$  = length = 1.5 km สายไฟประกอบด้วย 3 สายวางขนานกัน ( $n=3$ ) ขนาดสาย  $3 \times 240 \text{ mm}^2$

$X_K$  = รีแอกแตนซ์ (Inductive reactance)  
= 0.085 Ohm/km (สามารถหาได้จากข้อมูลสายไฟฟ้า)

ข้อมูลมอเตอร์

$P_N$  = ขนาดกำลังมอเตอร์ = 8 MW, 4 Pole

$\eta$  = ประสิทธิภาพของมอเตอร์ = 98%

$U_N$  = ขนาดแรงดันไฟฟ้ามอเตอร์ = 6 kV, P.f. = 0.9,

$I_N$  = ขนาดพิกัดกระแสไฟฟ้า = 875 A

$\frac{I_A}{I_N}$  = กระแสไฟฟ้าเริ่มหมุนแบบ DOL ต่อขนาดพิกัดกระแสไฟฟ้า = 5.3 เท่า

$\frac{M_A}{M_N}$  = ขนาดแรงบิดเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ DOL ต่อขนาดพิกัดแรงบิด = 0.9

“เงื่อนไข” การเริ่มหมุนมอเตอร์จะต้องมีแรงดันไฟฟ้าตกไม่มากกว่า 10% ( $\Delta U_N$ ) และแรงบิดเริ่มหมุนต้องไม่น้อย

กว่า 25%  $\frac{M_A}{M_N}$  หรือ  $\frac{M_{A1}}{M_N}$  หรือ  $\frac{M_{A2}}{M_N}$  หรือ  $\frac{M_{A3}}{M_N} \geq 0.25$

**เพื่อความมั่นใจในการออกแบบระบบ เมื่อมีการกำหนดแรงดันไฟฟ้าตกคล่อมที่ยอมรับได้ หรือคาดว่าจะเป็นอย่างนั้น เช่น  $\Delta U_N=10\%$  กราฟแสดงแรงบิดเริ่มหมุนโดยเฉลี่ยของมอเตอร์จากบริษัทผู้ผลิตมอเตอร์ จะต้องออกแบบ และยืนยันได้ว่าสามารถจะขับโหลดได้แม้ว่าแรงดันไฟฟ้าจะตกลงเหลือเพียง 90% ของแรงดันไฟฟ้าพิกัด**

ในขบวนการออกแบบโครงการ จะต้องสอบถาม และยืนยันความสามารถการเริ่มหมุนจากบริษัทผู้ผลิตมอเตอร์ เพราะหากมอเตอร์ที่จัดซื้อไม่สามารถเริ่มหมุนได้ จะส่งผลต่อโครงการสูงมาก ถึงอาจจะต้องจัดซื้อมอเตอร์ใหม่ หากมอเตอร์ไม่สามารถเริ่มหมุนได้ วิธีการแก้ไขคือจะต้องเพิ่มขนาดมอเตอร์ให้ใหญ่ขึ้น หรือ ยอมรับแรงดันไฟฟ้า

ตก หรือ ออกแบบมอเตอร์ใหม่ให้มีขนาด  $\frac{M_A}{M_N}$  มากกว่าเดิม



### จากตัวอย่าง การเริ่มหมุนแบบการต่อตรง Direct On Lin (DOL)

ในขั้นตอนแรกจะต้อง คำนวณหาค่าความต้านทานรีเอกแตนซ์ (Reactance) ของทั้งวงจรก่อน โดยแบ่งออกเป็น รีเอกแตนซ์ของแหล่งจ่ายระบบไฟฟ้า Line reactance ( $X_N$ )

$$X_N = \frac{1.1^*) * U_N^2}{S_K} = \frac{1.1 * 6^2}{200} = 0.198 \Omega/\text{Phase}$$

$$1.1^*) \text{ ค่าประมาณอัตราส่วนจากการเกิด EMF/ U} = 1.05^2$$

รีเอกแตนซ์ของสายเคเบิล Cable reactance ( $X_K$ )

$$X_K = \frac{L * X'_K}{n} = \frac{1.5 * 0.085}{3} = 0.043 \Omega/\text{Phase}$$

$$\begin{aligned} \text{รีเอกแตนซ์ของมอเตอร์ขณะเริ่มหมุน (X}_{Motor}) &= U_N / \sqrt{3} * \frac{I_A}{I_N} * I_N = 6000 / \sqrt{3} * 5.3 * 875 \\ &= 0.748 \Omega/\text{Phase} \end{aligned}$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่อสายมอเตอร์ขณะเริ่มหมุน ( $U_{motor}$ ) จะต้องลดลงอันเนื่องมาจากแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมจากค่ารีเอกแตนซ์ ดังกล่าว

$$U_{motor} = U_N * \frac{X_{Motor}}{X_{Motor} + X_N + X_K} = U_N * \frac{0.748}{0.748 + 0.198 + 0.043}$$

= 0.76  $U_N$  (หมายความว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ในขณะเริ่มหมุนจะมีเพียง 76% ของแรงดันไฟฟ้าพิกัด) ดังนั้นกระแสไฟฟ้าเริ่มหมุนจะต้องมีค่าลดลงด้วยตามสัดส่วนอันเนื่องมาจากค่าแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงเนื่องจากค่ารีเอกแตนซ์ของทั้งระบบ

$$\frac{I_{A1}}{I_N} = \frac{I_A}{I_N} * \frac{X_{Motor}}{X_{Motor} + X_N + X_K} = 5.3 * \frac{0.748}{0.748 + 0.198 + 0.043}$$

= 4.0 (หมายความว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ในขณะเริ่มหมุนมีเพียง 76% ของแรงดันไฟฟ้าพิกัด กระแสไฟฟ้าเริ่มหมุนจะลดลงจาก 5.3 เท่า เหลือเพียง 4 เท่าของกระแสไฟฟ้าพิกัดเท่านั้น)

$I_A$  = ขนาดกระแสไฟฟ้าเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ DOL เมื่อแรงดันคงที่เท่าพิกัด

$I_N$  = ขนาดกระแสไฟฟ้าพิกัดของมอเตอร์

$$\frac{I_{A1}}{I_N} = \text{อัตราส่วนกระแสไฟฟ้าเริ่มหมุนเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ลดลงต่อพิกัดกระแสไฟฟ้า}$$

ในทางปฏิบัติจะต้องตรวจสอบ และคิดผลกระทบอันเนื่องมาจากค่าอิมพีแดนซ์ของสนามแม่เหล็ก จากโรงงานผู้ผลิต ดังรูปที่ 2 กราฟแสดงค่า a factor เพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบค่าที่ควรจะเป็น ยกตัวอย่างเช่น มอเตอร์ตัวนี้ 4 ขั้ว แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ในขณะเริ่มหมุนมีเพียง 76% ( $U_{A \text{ Motor}}/U_N$ ) = 0.76, a factor จากกราฟ = 0.74

$$\frac{I_{A1}}{I_N} = a * \frac{I_A}{I_N} = 0.74 * 5.3 \rightarrow 3.9 \text{ เท่าของกระแสไฟฟ้าพิกัด}$$

เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ในขณะเริ่มหมุนลดลง กระแสไฟฟ้าเริ่มหมุนจะต้องมีค่าลดลงด้วย และทำให้แรงบิดเริ่มหมุนจะต้องมีค่าลดลงด้วยตามสัดส่วน

$$\frac{M_{A1}}{M_N} = \frac{M_A}{M_N} * \left( \frac{X_{Motor}}{X_{Motor} + X_N + X_K} \right)^2 = 0.9 * \left( \frac{0.748}{0.748 + 0.198 + 0.043} \right)^2$$

= 0.52 (หมายความว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ในขณะเริ่มหมุนมีเพียง 76% ของแรงดันไฟฟ้าพิกัด แรงบิดเริ่มหมุนจะลดลงเหลือเพียง 0.52 เท่า จากเดิม 0.9 เท่าของแรงบิดพิกัด)

ในทางปฏิบัติจะต้องตรวจสอบ และคิดผลกระทบอันเนื่องมาจากค่าอิมพีแดนซ์ของสนามแม่เหล็ก จากโรงงานผู้ผลิต ดังรูปที่ 2 กราฟแสดง a factor คำนวณ เพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบค่าที่ควรจะเป็น

$$\frac{M_{A1}}{M_N} = a^2 * \frac{M_A}{M_N} = 0.74^2 * 0.9 \rightarrow 0.49 \text{ เท่าของแรงบิดพิกัด}$$



$$\frac{M_{A1}}{M_N} = \text{อัตราส่วนแรงบิดเริ่มหมุนต่อแรงบิด}$$

พิกัดเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ลดลง  
ทดลองคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าตก (Voltage dip) อันเนื่องจากการเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ DOL

$$\Delta U_N = \frac{X_N}{X_{Motor} + X_N + X_K} * 100\% = \frac{0.198}{0.748 + 0.198 + 0.043} * 100\% \rightarrow 20\%$$

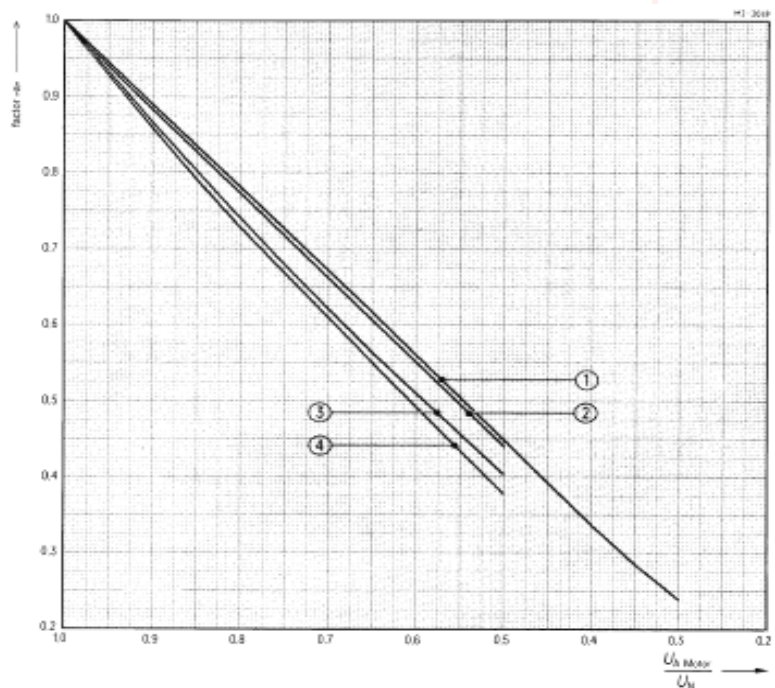
จากความต้องการในเบื้องต้น ไม่ต้องการให้เกิดค่าแรงดันไฟฟ้าตก (Voltage drop) มากเกินกว่า 10% ( $\Delta U_N \leq 10\%$ ) และสามารถยอมรับให้แรงบิดเริ่มหมุน ( $M_{A2}/M_N \geq 0.25$ ) ผลจากการคำนวณปรากฏว่าจะเกิดแรงดันไฟฟ้าตก 20% จะต้องหันไปใช้วิธีการเริ่มหมุนโดยวิธีลดแรงดันไฟฟ้าโดยใช้ Reactor ในการเริ่มหมุน เพื่อทำหน้าที่ให้แรงดันตกไม่เกินค่าที่ต้องการ

กราฟเส้นที่ 1. สำหรับมอเตอร์  
2 และ 4 ขั้ว เมื่อมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 MW

กราฟเส้นที่ 2. สำหรับมอเตอร์  
6 และ 8 ขั้ว เมื่อมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 MW

กราฟเส้นที่ 3. สำหรับมอเตอร์  
2 และ 4 ขั้ว เมื่อมอเตอร์ที่มีขนาดเล็กกว่า 1 MW

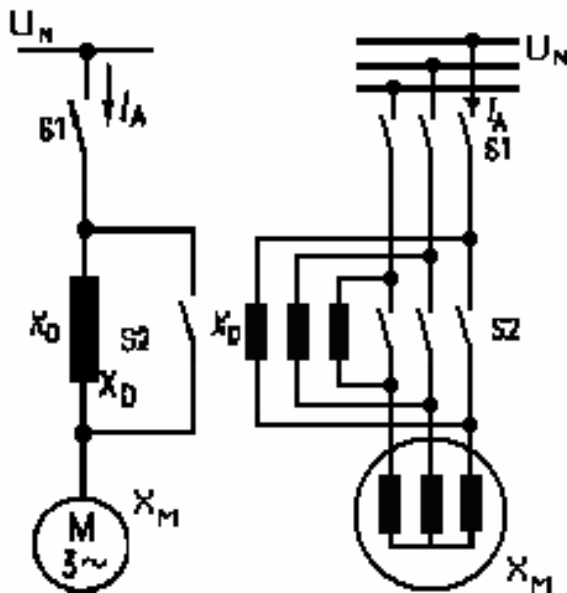
กราฟเส้นที่ 4. สำหรับมอเตอร์  
6 และ 8 ขั้ว เมื่อมอเตอร์ที่มีขนาดเล็กกว่า 1 MW



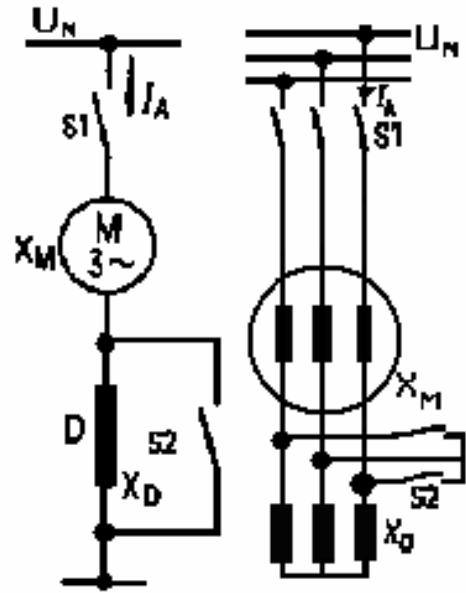
รูปที่ 2 กราฟแสดงค่าโดยประมาณ a-Factor เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ลดลง ( $\Delta U_N$ ) ขณะเริ่มหมุนมอเตอร์

## 2. การเริ่มหมุนแบบลดแรงดันไฟฟ้าโดยผ่าน Reactor

วิธีการเริ่มหมุนโดยใช้ Reactor เพื่อทำหน้าที่ลดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ มี 2 วิธี คือการต่อ Reactor ก่อนจะถึงมอเตอร์ และแบบต่อหลังมอเตอร์ ดังรูปที่ 3.1 และ รูป 3.2 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 การต่อ Reactor ก่อนเข้ามอเตอร์



รูปที่ 3.2 การต่อ Reactor ที่ขั้วต่อสาย star point

ต้นทุนของอุปกรณ์

: Circuit Breakers 2 ชุด ( $S_1, S_2$ ) Reactor 1 ชุด และสายไฟที่ต้องเดินจากตู้ MCB ไปยังมอเตอร์ 3 หรือ 6 เส้น

ลำดับการทำงานของสวิตช์ (Sequence)

: มอเตอร์จะเริ่มหมุนหลังจากสับสวิตช์ on ( $S_1$ ) ในขณะที่สวิตช์  $S_2$  ยังคงเปิดวงจรอยู่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าจะไปตกคร่อมที่ Reactor  $X_D$  ทำให้กระแสไฟฟ้าเริ่มหมุนลดลง เมื่อความเร็วรอบของมอเตอร์เข้าใกล้ความเร็วรอบปกติ สวิตช์  $S_2$  จะปิดวงจรลงเพื่อทำหน้าที่ลัดวงจร Reactor กลายเป็นสภาพการต่อโดยตรง

อุปกรณ์ช่วยในการเริ่มหมุน (Starting devices)

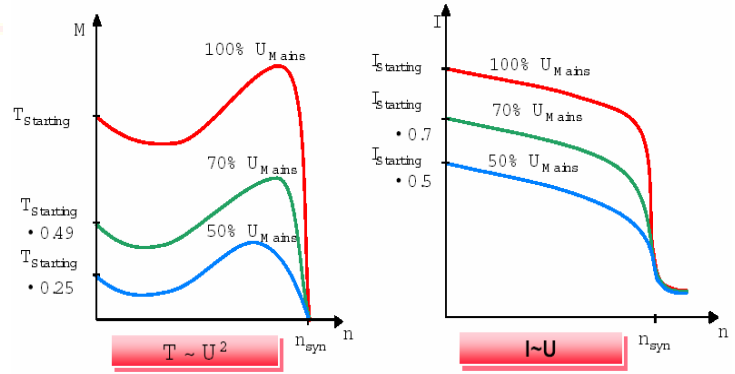
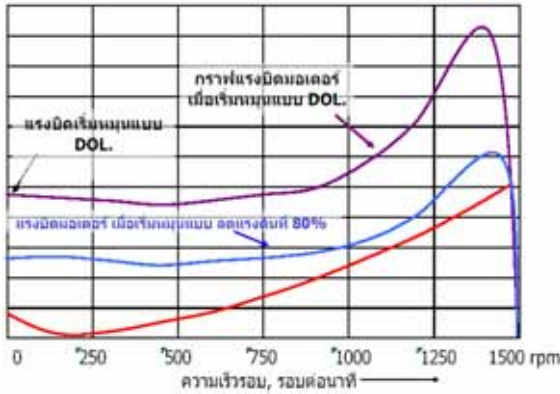
: Reactor 1 ชุด

ข้อดี (Advantages)

: สามารถลดกระแสไฟฟ้าขณะเริ่มหมุนมอเตอร์ได้ดีพอสมควร ส่วนวิธีการต่อโดยต่อ Reactor ที่ขั้วต่อสาย Start point ไม่จำเป็นต้องใช้ CB แบบ Short circuit proof.

ข้อเสีย (Disadvantages)

: ช่วงการสับสวิตช์ทำให้เกิด Voltage drop และเกิดการกระตุกที่มอเตอร์ ขนาดของแรงดันไฟฟ้าตกคล่อมจะขึ้นอยู่กับขนาด และชนิดของ โหลด ส่วนใหญ่ใช้ได้เฉพาะโหลดแบบ ยกกำลังสอง เช่น พัดลม หรือปั้มน้ำ ส่วนวิธีการต่อ Reactor ที่ขั้วต่อสาย Start point จำเป็นจะต้องออกแบบมอเตอร์แบบมีจุดต่อสาย Star point box ทำให้ราคามอเตอร์แพงขึ้นจากเดิม

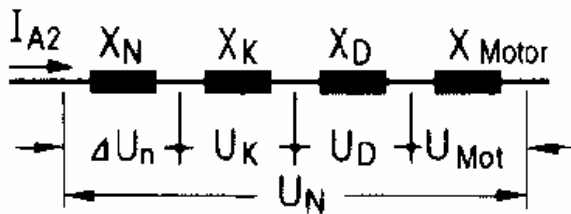


รูปที่ 4 รูปกราฟแสดงการเปรียบเทียบการเริ่มหมุนแบบ DOL และ แบบลดแรงดันเริ่มหมุน

จากรูปที่ 4 เมื่อแรงดันไฟฟ้าในช่วงเริ่มหมุนมอเตอร์ลดลงจะทำให้กระแสลดลงตามสัดส่วน แต่แรงบิดเริ่มหมุนของมอเตอร์ลดลงไปด้วยตามสัดส่วนแรงดันไฟฟ้ายกกำลังสอง ( $U^2$ ) เช่น เมื่อแรงดันที่ ขั้วมอเตอร์ลดลงเหลือ 80% แรงบิดจะลดลงเหลือเพียง 64% ( $0.8^2=0.64$ ) หรือ แรงดันที่ ขั้วมอเตอร์ลดลงเหลือ 70% แรงบิดจะลดลงเหลือเพียง 49% ของแรงบิดพิกัดเมื่อเทียบกับการเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ DOL ดังนั้นจุดที่กำหนดค่าสูงสุดที่สามารถลดแรงดันได้ก็คือ แรงบิดที่โหลดต้องการ จะเป็นตัวกำหนดว่าจะสามารถลดแรงดันได้มากที่สุดเท่าไร

ตัวอย่างการคำนวณจากที่ได้กล่าวมาแล้ว

ในขั้นตอนแรกจะต้อง คำนวณหาค่าความต้านทานรีเอ็กแตนซ์ (Reactance) ของทั้งวงจรก่อน โดยมีส่วนที่เพิ่มคือ รีเอ็กแตนซ์ของ Reactor ( $X_D$ ) จากความต้องการในเบื้องต้น ไม่ต้องการให้เกิดค่าแรงดันไฟฟ้าตก (Voltage drop) ไม่เกินกว่า 10% ( $\Delta U_N \leq 0.1$ )



$$\frac{\Delta U_N}{U_N} = \frac{X_N}{X_N + X_K + X_D + X_{Motor}} = 0.1/1$$

$$X_N = 0.1 (X_N + X_K + X_D + X_{Motor})$$

$$10 X_N = X_N + X_K + X_D + X_{Motor}$$

$$9 X_N = X_K + X_D + X_{Motor}$$

$$X_D = 9 * X_N - (X_K + X_{Motor}) = 9 * 0.198 - (0.043 + 0.748) = 0.991 \Omega/Phase$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วต่อสายมอเตอร์ขณะเริ่มหมุนจะต้องลดลงอันเนื่องมาจากแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมจากค่ารีเอ็กแตนซ์ ต่างๆดังกล่าว

$$U_{motor} = U_N * \frac{X_{Motor}}{X_{Motor} + X_N + X_K + X_D} = U_N * \frac{0.748}{0.748 + 0.198 + 0.043 + 0.991}$$

$$= 0.38 U_N \text{ (หมายความว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ในขณะเริ่มหมุนมีเพียง 38% ของแรงดันไฟฟ้าพิกัดจากแหล่งจ่าย)}$$

ดังนั้นกระแสไฟฟ้าเริ่มหมุนจะต้องมีคาลลดลงด้วยตามสัดส่วนอันเนื่องมาจากค่าแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงเนื่องจากค่ารีเอ็กแตนซ์ของทั้งระบบ

$$\frac{I_{A2}}{I_N} = \frac{I_A}{I_N} * \frac{X_{Motor}}{X_{Motor} + X_N + X_K + X_D} = 5.3 * \frac{0.748}{0.748 + 0.198 + 0.043 + 0.991}$$

$$= 2.0 \text{ (หมายความว่าเมื่อติด Reactor แล้วกระแสไฟฟ้าเริ่มหมุนจะลดลงจาก 5.3 เท่า เหลือเพียง 2 เท่าของกระแสไฟฟ้าพิกัดเท่านั้น)}$$



$$\frac{I_{A2}}{I_N} = \text{อัตราส่วนกระแสไฟฟ้าเริ่มหมุนเมื่อ}$$

แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ลดลงจากการต่อ Reactor ต่อพิกัดกระแสไฟฟ้ามอเตอร์

ในทางปฏิบัติจะต้องตรวจสอบ และคิดผลกระทบอันเนื่องมาจากค่าอิมพีแดนซ์ของสนามแม่เหล็ก จากโรงงานผู้ผลิต ดังรูปที่ 2 กราฟแสดง a factor ค่าวน เพื่อมาใช้เปรียบเทียบค่าที่ควรจะเป็น

เมื่อทราบแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์แล้วสามารถคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มหมุนเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ ลดลงโดยดูได้จากกราฟ รูปที่ 2 ยกตัวอย่างเช่น มอเตอร์ตัวนี้ 4 ขั้ว แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ในขณะเริ่มหมุนมี เพียง 38% ( $U_{A \text{ Motor}}/U_N$ ) = 0.38, a factor จากกราฟ = 0.32

$$\frac{I_{A2}}{I_N} = a * \frac{I_A}{I_N} = 0.32 * 5.3 \rightarrow 1.7 \text{ เท่าของกระแสไฟฟ้าพิกัด}$$

เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ในขณะเริ่มหมุนลดลง กระแสไฟฟ้าเริ่มหมุนจะต้องมีค่าลดลงด้วย และทำให้แรงบิดเริ่มหมุนจะต้องมีค่าลดลงด้วยตามสัดส่วน

$$\frac{M_{A2}}{M_N} = \frac{M_A}{M_N} * \left( \frac{X_{Motor}}{X_{Motor} + X_N + X_K + X_D} \right)^2 = 0.9 * \left( \frac{0.748}{0.748 + 0.198 + 0.043 + 0.991} \right)^2$$

$$= 0.13 \text{ (หมายความว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ในขณะเริ่มหมุนมีเพียง 38% ของแรงดันไฟฟ้าพิกัด แรงบิดเริ่มหมุนจะลดลงเหลือเพียง 0.13 เท่า จากเดิม 0.9 เท่าของแรงบิดพิกัด)}$$

$$\frac{M_{A2}}{M_N} = \text{อัตราส่วนแรงบิดเริ่มหมุนต่อแรงบิดพิกัดเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ลดลง}$$

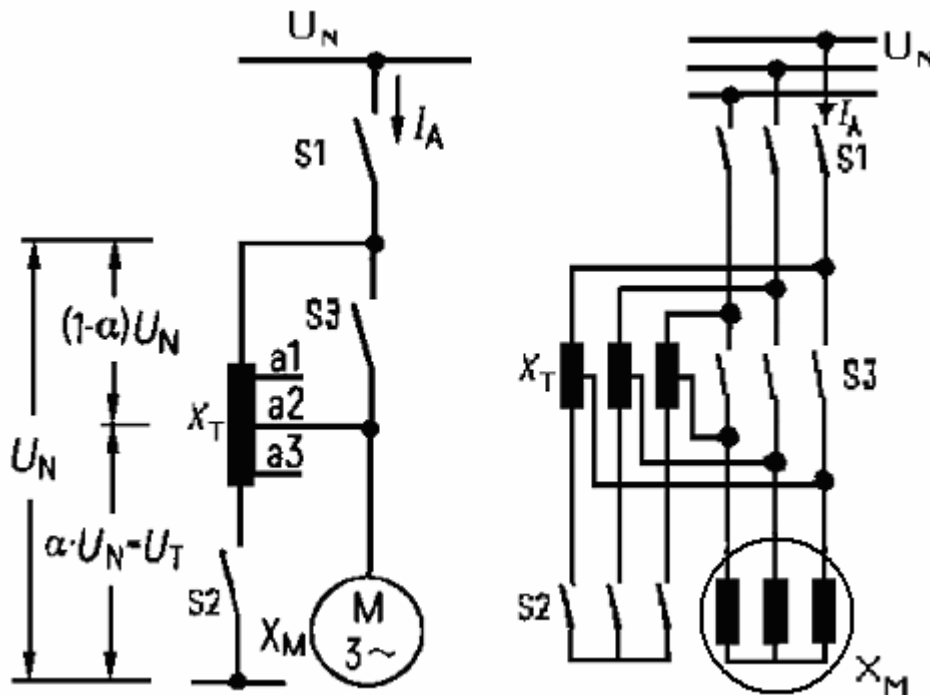
เพื่อให้ง่ายแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานทดลองใช้ a factor ค่าวน

$$\frac{M_{A2}}{M_N} = a^2 * \frac{M_A}{M_N} = 0.32^2 * 0.9 \rightarrow 0.092 \text{ เท่าของแรงบิดพิกัด}$$

จากเงื่อนไข "การเริ่มหมุนมอเตอร์จะต้องมีแรงดันไฟฟ้าตกไม่มากกว่า 10% ( $\Delta U_N$ ) และแรงบิดเริ่มหมุน  $\frac{M_{A2}}{M_N}$

ต้องไม่น้อยกว่า 0.25 วิธีการเริ่มหมุนโดยต่อ Reactor แรงบิดไม่สามารถขับโหลดได้ จึงจะต้องลองใช้วิธีต่อไป แบบ ลดแรงดันไฟฟ้าแบบ หลายจังหวะ ("Korndorfer" method)

### 3. การเริ่มหมนมอเตอร์แบบลดแรงดันไฟฟ้า (Reduce Voltage starting)



รูปที่ 5 การต่อ Auto Transformer หลายจังหวะ ("Korndorfer" method)

ต้นทุนของอุปกรณ์

: Circuit Breakers 3 ชุด ( $S_1, S_2, S_3$ ) ออโตทรานส์ฟอร์มเมอร์พร้อม Tapping ( $a_1, a_2, a_3$ ) จำนวนสายไฟที่ต้องเดินจากตู้ CB ไปยังมอเตอร์ 3 เส้น

ลำดับการทำงานของสวิตช์ (Sequence)

: มอเตอร์จะเริ่มหมุนหลังจากสับสวิตช์ on  $S_2$  และสวิตช์ on  $S_1$  แรงดันที่มอเตอร์ได้รับจะเท่ากับ  $U_T = \alpha U_N$  จนกระทั่งมอเตอร์หมุนได้ระดับหนึ่ง จึงสั่งให้สวิตช์  $S_2$  เปิดวงจรออก ในขณะที่สวิตช์  $S_2$  ยังคงเปิดวงจรอยู่ ทำให้แรงดันไฟฟ้าจะไปตกคร่อมที่ Auto Transformer  $X_T = (1-\alpha) U_N$  เหมือนกับการทำหน้าที่ Reactor เพื่อลดแรงดันตามอัตราส่วนที่ออกแบบ Auto Transformer เมื่อความเร็วรอบของมอเตอร์เข้าใกล้ความเร็วรอบพิกัด สวิตช์  $S_3$  จะปิดวงจรลงเพื่อทำหน้าที่ลัดวงจร Auto Transformer  $X_T$  กลายสภาพเป็นการต่อโดยตรง

อุปกรณ์ช่วยในการเริ่มหมุน (Starting devices)

: Auto Transformer  $X_T$  1 ชุด พร้อม Tapping ( $a_1, a_2, a_3$ ) โดย  $a_1$  และ  $a_3$  ต่อ tapping  $\pm 5\%$  เพื่อใช้สำหรับปรับหาจุดที่เหมาะสม

ข้อดี (Advantages)

: สามารถลดกระแสไฟฟ้าขณะเริ่มหมนมอเตอร์ได้หลายจังหวะดีพอสมควรตามอัตราส่วนของโหลด แรงดันไฟฟ้าสามารถตั้งเวลาให้เหมาะสมได้

ข้อเสีย (Disadvantages)

: ต้นทุนของอุปกรณ์ ราคาสูง

ตัวอย่างการคำนวณจากที่ได้กล่าวมาแล้ว

ในขั้นตอนแรกจะต้อง คำนวณหาอัตราส่วนที่จะต่อ Tapping  $\alpha$  จากความต้องการในเบื้องต้น ไม่ต้องการให้เกิดค่าแรงดันไฟฟ้าตก (Voltage drop) ไม่เกินกว่า 10% ( $\Delta U_N \leq 0.1$ )

$$\begin{aligned}
 X_{ges} &= \text{Total reactance} &= \frac{100\%}{\Delta U_N} * X_N &= \frac{100\%}{10} * 0.198 \\
 &= 1.98 \text{ Ohm/Phase}
 \end{aligned}$$





$$\alpha = \sqrt{\frac{X_{Motor}}{X_{ges} - (X_N + X_K)}} = \sqrt{\frac{0.748}{1.98 - (0.198 + 0.043)}} = 0.66$$

ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ระหว่างการเริ่มหมุนมอเตอร์ คือ

$$U_{mot} = \frac{X_{Motor}}{X_{Motor} + (X_N + X_K + X_{KAT}) \cdot \alpha^2} \cdot \alpha \cdot U_N$$

$\alpha$	$U_x$	$X_{Tran}$	=	ค่า Short circuit reactance ของหม้อแปลงเริ่มหมุนมอเตอร์
0.5	5 %	$U_x$	=	ค่า แรงดันไฟฟ้า reactance ของหม้อแปลงเริ่มหมุนมอเตอร์
0.6	4 %	$X_{Tran}$	$\approx$	$\frac{U_x}{100} (X_{Motor} \cdot \frac{1}{a^2} + X_N)$
0.7	3 %		$\approx$	$\frac{3.4}{100} (0.748 \cdot \frac{1}{0.66^2} + 0.198)$
0.8	2 %		$\approx$	$\approx 0.065 \text{ Ohm/Phase}$

$$U_{motor} = \frac{0.748}{0.748 + (0.198 + 0.043 + 0.065)0.66^2} \cdot 0.66 \cdot U_N$$

$$= 0.56 U_N \text{ (หมายความว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ในขณะที่เริ่มหมุนมีเพียง 56% ของแรงดันไฟฟ้าปกติจากแหล่งจ่าย)}$$

คำนวณหาค่าแรงบิดเริ่มหมุนมอเตอร์

$$\frac{M_{A3}}{M_N} = \left(\frac{M_A}{M_N}\right)_{DOL} \cdot \left(\frac{U_{Motor}}{U_N}\right)^2 = 0.9 \cdot 0.56^2 = 0.282$$

- $M_A$  = ค่าแรงบิดเริ่มหมุนเมื่อเริ่มหมุนมอเตอร์ที่แรงดันปกติ
- $M_{A3}$  = ค่าแรงบิดเริ่มหมุนเมื่อเริ่มหมุนมอเตอร์ผ่าน Auto Transformer
- $M_N$  = ค่าแรงบิดปกติมอเตอร์ ที่แรงดันปกติหลังจากเริ่มหมุนไปแล้ว

จากการคำนวณดูเหมือนว่าจะใช้ได้ตามเงื่อนไขของโจทย์ที่ต้องการ แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติจะต้องตรวจสอบและคิดผลกระทบอื่นเนื่องมาจากค่าอิมพีแดนซ์ของสนามแม่เหล็ก จากโรงงานผู้ผลิต ดังรูปที่ 2 กราฟแสดง a factor

คำนวณ เพื่อมาใช้เปรียบเทียบค่าที่ควรจะเป็น

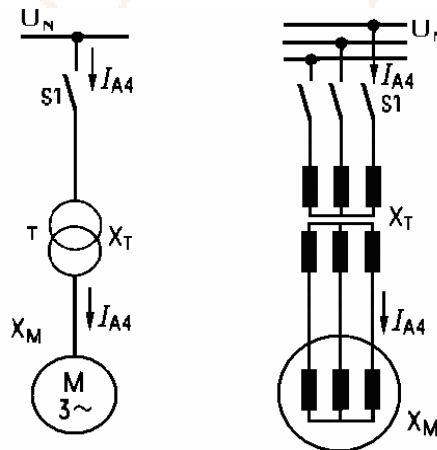
$$\text{ที่ } U_{motor} / U_N = 0.56, a \text{ factor} = 0.515, \text{ ดังนั้นค่าแรงบิดเริ่มต้นที่แท้จริงจะเป็น}$$

$$\frac{M_{A3}}{M_N} = \left(\frac{M_A}{M_N}\right)_{DOL} \cdot a^2 = 0.9 \cdot 0.515^2 = 0.24$$

จากเงื่อนไขที่ว่า "การเริ่มหมุนมอเตอร์จะต้องมีแรงดันไฟฟ้าตกไม่มากกว่า 10% ( $\Delta U_N$ ) และแรงบิดเริ่มหมุน ( $M_{A3}/M_N$ ) ต้องไม่น้อยกว่า 0.25 วิธีการต่อแบบ ลดแรงดันไฟฟ้าแบบ หลายจังหวะ ("Korndorfer" method) แรงบิดไม่สามารถขับโหลดได้ มีวิธีการแก้ไข คือ ให้ออกแบบมอเตอร์ใหม่ที่มีแรงบิดเริ่มหมุน 0.95 ก็จะสามารถขับโหลดได้ตรงตามเงื่อนไข



**4. การเริ่มหมุนมอเตอร์แบบลดแรงดันไฟฟ้าโดยผ่าน Transformer**



*รูปที่ 6 การต่อวิธีการเริ่มหมุนมอเตอร์โดยต่อหม้อแปลงโดยตรง*

- ต้นทุนของอุปกรณ์ : Circuit Breakers 1 ชุด (S<sub>1</sub>) ทรานฟอร์มเมอร์ จำนวนสายไฟที่ต้องเดินจากตู้ CB ไปยังมอเตอร์ 3 เส้น
- ลำดับการทำงานของสวิตช์ (Sequence) : มอเตอร์จะเริ่มหมุนหลังจากสับสวิตช์ on S<sub>1</sub>
- อุปกรณ์ช่วยในการเริ่มหมุน (Starting devices) : Transformer X<sub>T</sub> 1 ชุด
- ข้อดี (Advantages) : สามารถลดกระแสไฟฟ้าขณะเริ่มหมุนมอเตอร์ได้โดยทางอ้อม เพราะ หม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าแรงดัน impedance สูง (>5%) โดยส่วนใหญ่วิธีนี้จะใช้กับมอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่มากๆ ในการเลือกวิธีนี้จะเหมาะสำหรับระยะทางจากสวิตช์ถึงมอเตอร์ไกลมากๆ สามารถออกแบบให้หม้อแปลงให้อยู่ใกล้กับตัวมอเตอร์ ทำให้สามารถลดขนาดสายได้เนื่องจากมาใช้แรงดันสูง
- ข้อเสีย (Disadvantages) : ต้นทุนของอุปกรณ์ราคาสูง โดยเฉพาะถ้าใช้ สวิตช์เกียร์ด้านขาเข้าแรงดันสูงแทน และจะมีกระแสไฟฟ้าผ่านหม้อแปลงตลอดเวลา ทำให้เกิดค่าสูญเสียที่หม้อแปลงตลอดเวลา

ตัวอย่างการคำนวณ

- แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (S<sub>K</sub>) = ขนาดของ short circuit power = 500 MVA แรงดันไฟฟ้า 30 kV
- ขนาดของหม้อแปลง = 30/6 kV Rated power(S<sub>N</sub>) = 10 MVA
- แรงดันไฟฟ้า Impedance (U<sub>K</sub>) = 10% (impedance voltage)
- ความยาวสายไฟฟ้าเท่าเดิมคือ = 1500 เมตร

เงื่อนไข "การเริ่มหมุนมอเตอร์จะต้องมีแรงดันไฟฟ้าตกไม่มากกว่า 10% ( ΔU<sub>N</sub>) และแรงบิดเริ่มหมุน (M<sub>A2</sub>/M<sub>N</sub>) ต้องไม่น้อยกว่า 0.25"

$$\text{รีเอกแตนซ์ของสายส่งระบบไฟฟ้า (X<sub>N</sub>)} = \frac{1.1^{*}) * U_N^2}{S_K} = \frac{1.1 * 6^2}{500} = 0.079 \Omega/\text{Phase}$$

1.1\*) ค่าประมาณอัตราส่วนจากการเกิด EMF/ U = 1.05<sup>2</sup>

$$\text{รีเอกแตนซ์ของสายเคเบิล (X<sub>K</sub>)} = \frac{L * X'_K}{n} = \frac{1.5 * 0.085}{3} = 0.043 \Omega/\text{Phase}$$

$$\text{รีเอกแตนซ์ของหม้อแปลง (X<sub>T</sub>)} = \frac{U_K * U_N^2}{100 * S_N} = \frac{10.6^2}{100 * 10} = 0.36 \Omega/\text{Phase}$$



$$U_{\text{motor}} = \frac{X_{\text{Motor}}}{X_{\text{Motor}} + X_T + X_N + X_K} * U_N = \frac{0.748}{0.748 + (0.36 + 0.079 + 0.043)} * U_N = 0.608 U_N$$

(หมายความว่าแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ในขณะที่เริ่มหมุนมีเพียง 60.8% ของแรงดันไฟฟ้าปกติ)

ดังนั้นกระแสไฟฟ้าเริ่มหมุนจะต้องมีค่าลดลงด้วยตามสัดส่วนอันเนื่องมาจากค่าแรงดันไฟฟ้าที่ลดลง

$$\frac{I'_{A4}}{I_N} = \frac{I_{A4}}{I_N} = \frac{X_{\text{Motor}}}{X_{\text{Motor}} + X_T + X_N + X_K} * \frac{I_A}{I_N} = \frac{0.748}{0.748 + (0.36 + 0.079 + 0.043)} * 5.3 = 3.22$$

(หมายความว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ในขณะที่เริ่มหมุนมีเพียง 60.8% ของแรงดันไฟฟ้าปกติ กระแสไฟฟ้าเริ่มหมุนจะลดลงจาก 5.3 เท่า เหลือเพียง 3.22 เท่าของกระแสไฟฟ้าปกติเท่านั้น)

$$\frac{I_{A4}}{I_N} = \text{อัตราส่วนกระแสไฟฟ้าเริ่มหมุนเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ลดลงต่อปกติกระแสไฟฟ้า}$$

ในทางปฏิบัติจะต้องตรวจสอบ และคิดผลกระทบอันเนื่องมาจากค่าอิมพีแดนซ์ของสนามแม่เหล็ก จากโรงงานผู้ผลิต ดังรูปที่ 2 กราฟแสดง a factor คำนวณ เพื่อมาใช้เปรียบเทียบค่าที่ควรจะเป็น ยกตัวอย่างเช่น มอเตอร์ตัวนี้ 4 ขั้ว แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ในขณะที่เริ่มหมุนมีเพียง 60.8% ( $U_{A \text{ Motor}}/U_N$ ) = 0.608, a factor จากกราฟ = 0.56

$$\frac{I_{A4}}{I_N} = a * \frac{I_A}{I_N} = 0.56 * 5.3 \rightarrow 2.97 \text{ เท่าของกระแสไฟฟ้าปกติ}$$

เมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ในขณะที่เริ่มหมุนลดลง กระแสไฟฟ้าเริ่มหมุนจะต้องมีค่าลดลงด้วย และทำให้แรงบิดเริ่มหมุนจะต้องมีค่าลดลงด้วยตามสัดส่วน

$$\frac{M_{A4}}{M_N} = \frac{M_A}{M_N} * \left( \frac{X_{\text{Motor}}}{X_{\text{Motor}} + X_T + X_N + X_K} \right)^2 = 0.9 * \left( \frac{0.748}{0.748 + (0.36 + 0.079 + 0.043)} \right)^2 = 0.33$$

(หมายความว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ในขณะที่เริ่มหมุนมีเพียง 60% ของแรงดันไฟฟ้าปกติ แรงบิดเริ่มหมุนจะลดลงเหลือเพียง 0.33 เท่า จากเดิม 0.9 เท่าของแรงบิดปกติ)

ในทางปฏิบัติจะต้องตรวจสอบ และคิดผลกระทบอันเนื่องมาจากค่าอิมพีแดนซ์ของสนามแม่เหล็ก จากโรงงานผู้ผลิต ดังรูปที่ 2 กราฟแสดง a factor คำนวณ เพื่อมาใช้เปรียบเทียบค่าที่ควรจะเป็น

$$\frac{M_{A4}}{M_N} = a^2 * \frac{M_A}{M_N} = 0.56^2 * 0.9 \rightarrow 0.282 \text{ เท่าของแรงบิดปกติ}$$

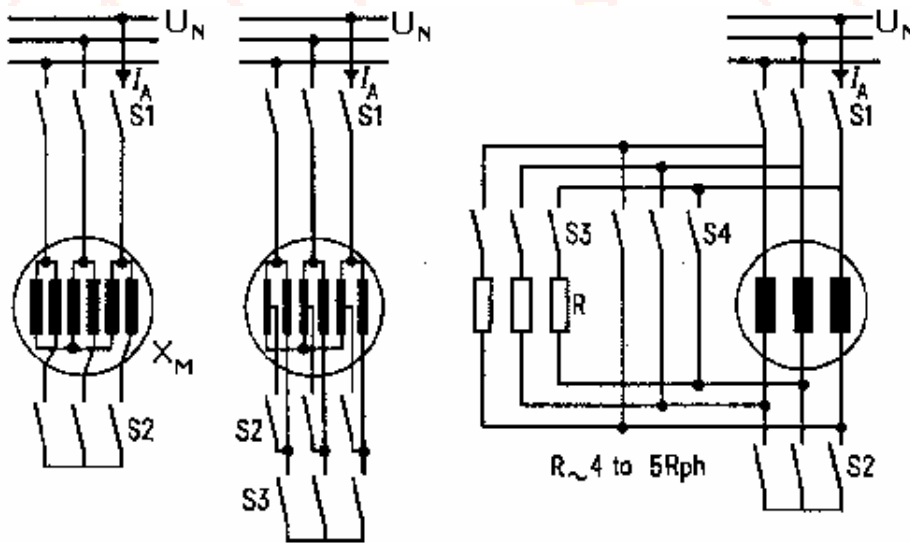
$$\frac{M_{A4}}{M_N} = \text{อัตราส่วนแรงบิดเริ่มหมุนต่อแรงบิดปกติเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมอเตอร์ลดลง}$$

ทดลองคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าตก (Voltage drop) อันเนื่องจากการเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ DOL

$$\Delta U_N = \frac{X_N}{X_{\text{Motor}} + X_T + X_N + X_K} * 100\% = \frac{0.079}{0.748 + (0.36 + 0.079 + 0.043)} * 100\% = 6.42 \%$$

จากเงื่อนไข "การเริ่มหมุนมอเตอร์จะต้องมีแรงดันไฟฟ้าตกไม่มากกว่า 10% ( $\Delta U_N$ ) และแรงบิดเริ่มหมุน ( $M_{A4}/M_N$ ) ต้องไม่น้อยกว่า 0.25 การเริ่มหมุนมอเตอร์โดยต่อหม้อแปลงแยกวงจรออกมาอิสระสำหรับมอเตอร์สามารถทำได้ตรงตามความต้องการตามเงื่อนไข

ทั้งนี้ยังมีวิธีอื่นๆ ที่ยังไม่ได้อธิบายข้างต้น เพราะไม่เป็นที่นิยมนำมาใช้ในการเริ่มหมุนมอเตอร์แรงดันสูง ยกตัวอย่างเช่น การเริ่มหมุนแบบ Part-winding starting, Modified part-winding starting, Star-Delta starting with out field interruption ดังรูปแสดงดังต่อไปนี้



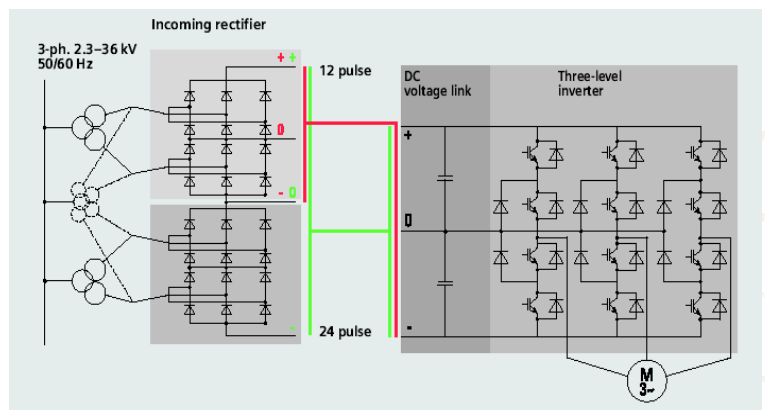
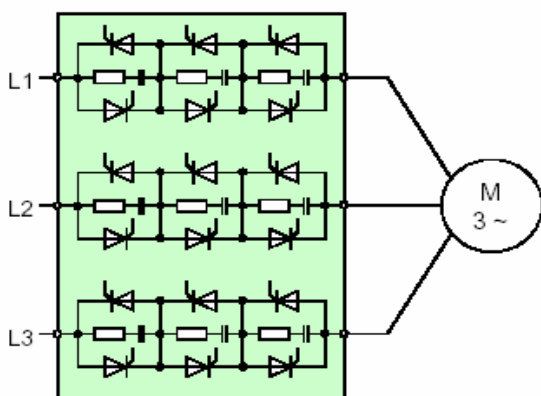
Part-winding starting

รูปที่ 7 การต่อวิธีการเริ่มหมุนมอเตอร์แบบ

Modified part-winding starting

star-delta starting with out field interruption

นอกเหนือไปจากวิธีที่นิยมทำกันดังที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น ยังมีวิธีการเริ่มหมุนมอเตอร์โดยใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ ซึ่งเกิดจากการพัฒนาเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ ทำให้สามารถพัฒนา Soft Starter หรือ Variable Speed Drives ที่สามารถใช้ได้กับไฟฟ้าแรงดันสูงมากกว่า 13.8 kV และนับวันจะมีการนำมาใช้ทางการค้ามากขึ้น ดังจะเห็นได้จากบริษัทผู้ผลิตใหญ่ๆ ของโลก ทางด้านไฟฟ้าเริ่มมีการนำเสนอทั้ง MV Soft Starter หรือ MV Variable Speed Drives กันมากขึ้น ส่วนรายละเอียดทั้ง MV Soft Starter หรือ MV Variable Speed Drives สามารถหาได้โดยทั่วไป หรือบทความเพิ่มเติมในหัวข้อเรื่อง MV Soft Starter และ MV Variable Speed Drives ซึ่งโดยหลักการ จะเหมือนกับระบบไฟฟ้าแรงดันต่ำ แต่อาจจะแตกต่างกันในส่วนของเทคโนโลยี เพราะแรงดันไฟฟ้าสูงมีอันตรายมากกว่า ดังตัวอย่างวงจรภายในด้านล่างนี้เป็นวงจรหลักเบื้องต้นของ MV Soft Starter หรือสามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้จากผู้จัดจำหน่ายหรือผู้ผลิตได้โดยตรง



รูปที่ 8 แสดงวงจรภายในของ MV Soft Starter และ MV Variable Speed Drives