

บทที่ 3

การวิเคราะห์ผลของการเบรคมอเตอร์

3.1 สมการแรงบิดด้านการหมุน

จากสมการแรงบิด(torque equation)ในแกนเปรียบเทียบ d-q ของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบสามเฟส

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)(\lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds}) \quad (3.1)$$

ซึ่งจะมีค่าเป็นบวก แต่ เมื่อเปิดวงจรเฟส a และต่อเฟส b-c (หรือต่อตัวเก็บประจุพร้อมเฟส a-b) ในตอนนี้ i_{qs} จะเท่ากับศูนย์ส่วน i_{ds} จะถูกเหนี่ยวนำมาจากกระแสที่ตกค้างในโรเตอร์เนื่องจากโรเตอร์มีค่าเวลาคงตัว(time constant) ดังนั้น

$$T_e = -\left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)\lambda_{qs}i_{ds} \quad (3.2)$$

$$\text{หรือ} \quad T_e = -\left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)(Mi_{ds}i_{qr}') \quad (3.3)$$

ซึ่งจะเป็นลบด้านการหมุนของโรเตอร์มีผลทำให้ความเร็วของโรเตอร์ลดลงโดยจะขึ้นอยู่กับค่าของ i_{ds} และ i_{qr}' เป็นสำคัญ

3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของโรเตอร์

จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของโรเตอร์

$$T_e = J\left(\frac{2}{P}\right)\dot{\omega}_r + T_L \quad (3.4)$$

$$\text{หรือ} \quad \dot{\omega}_r = (T_e + T_L)\frac{P}{2J} \quad (3.5)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \dot{\omega}_r = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)(\lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds})\frac{P}{2J} - \frac{T_L P}{2J} \quad (3.6)$$

แทนค่า λ_{ds} และ λ_{qs} ลงใน 3.6

$$\dot{\omega}_r = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)\left(\frac{P}{2J}\right)M(i_{qs}i_{dr}' - i_{ds}i_{qr}') - \frac{T_L P}{2J} \quad (3.7)$$

$$\dot{\omega}_r = 0.375\frac{P^2}{J} M(i_{qs}i_{dr}' - i_{ds}i_{qr}') - \frac{T_L P}{2J} \quad (3.8)$$

พิจารณาสมการที่ 3.8 จะพบว่า

(1) เมื่อเปิดวงจรทั้งสามเฟสของมอเตอร์ i_{qs} และ i_{ds} จะเท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$\dot{\omega}_r = -\frac{T_L P}{2J} \quad (3.9)$$

ความเร็วของโรเตอร์จะค่อยๆ ลดลงเนื่องจากแรงเสียดทานของโรเตอร์และภาระ (load) ซึ่งเป็นการปล่อยให้ความเร็วลดลงอย่างอิสระ

(2) เมื่อเปิดวงจรเฉพาะเฟส a และต่อตัวเก็บประจุรอมเฟส b-c ของสเตเตอร์เฉพาะ i_{qs} เท่านั้นที่เป็นศูนย์ ดังนั้นจากสมการ 3.8 จะได้

$$\dot{\omega}_r = -0.375 \frac{P^2}{J} M i_{ds} i_{qr}' - \frac{T_L P}{2J} \quad (3.10)$$

ซึ่งความเร็วของโรเตอร์จะถูกทำให้ลดลงเนื่องจาก i_{ds} และ i_{qr}' ซึ่งเท่ากับเป็นการเบรคมอเตอร์นั่นเอง

3.3 การจำลองการเบรคมอเตอร์

ในการจำลองผลของการเบรคมอเตอร์ด้วยคอมพิวเตอร์ก่อนการทดลองจริงนั้นจะมีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.3.1 วิเคราะห์หาเงื่อนไขเริ่มแรก (initial condition) โดยก่อนการเปิดวงจรทางด้านสเตเตอร์นั้นจะถือว่ามอเตอร์ทำงานในสถานะอยู่ตัว (steady state) ดังนั้นเทอมอนุพันธ์ทั้งหมดในสมการที่เกี่ยวข้องจะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega (L_{ls} + M) i_{ds} + \omega M i_{dr}' \quad (3.11)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \omega (L_{ls} + M) i_{qs} + \omega M i_{qr}' \quad (3.12)$$

$$\text{หรือจะได้ว่า } i_{dr}' = [(v_{qs} - R_s i_{qs} - \omega (L_{ls} + M) i_{ds})] / \omega M \quad (3.13)$$

$$i_{qr}' = [(v_{ds} - R_s i_{ds} - \omega (L_{ls} + M) i_{qs})] / \omega M \quad (3.14)$$

และจากสมการของการแปลงจะได้ว่า

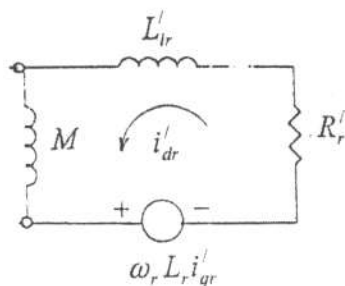
$$v_{qs} = v_{as} \quad (3.15)$$

$$v_{ds} = \frac{-2}{\sqrt{3}} v_{bs} - \frac{1}{\sqrt{3}} v_{as} \quad (3.16)$$

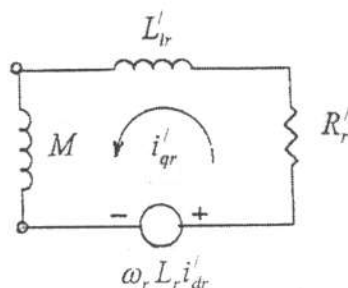
$$i_{qs} = i_{as} \quad (3.17)$$

$$i_{ds} = \frac{-2}{\sqrt{3}} i_{bs} - \frac{1}{\sqrt{3}} i_{as} \quad (3.18)$$

3.3.2 เมื่อเปิดวงจรทางคันสแตเตอร์ทั้งสามเฟส จากวงจรตามภาพที่ 2.2 และ 2.3 พิจารณาการเปิดวงจรหลังสถานะอยู่ตัว(steady state)เราจะได้วงจรเทียบเท่าตามภาพที่ 3.1 และภาพที่ 3.2 และสามารถตั้งสมการสเตตได้ตามสมการที่ 3.19



ภาพที่ 3.1 วงจรเทียบเท่าในแกน d เมื่อเปิดวงจรทางสแตเตอร์



ภาพที่ 3.2 วงจรเทียบเท่าในแกน q เมื่อเปิดวงจรทางสแตเตอร์

$$\begin{bmatrix} \dot{i}'_{dr} \\ \dot{i}'_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R'_r/L_r & -\omega_r \\ \omega_r & -R'_r/L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{dr} \\ i'_{qr} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

นำสมการ 3.19 ไปจำลองหาค่า i'_{dr} และ i'_{qr} โดยให้ i'_{dr} เริ่มแรกเท่ากับ $i'_{dr} + (M/L_r)i_{ds}$ และ i'_{qr} เริ่มแรกเท่ากับ $i'_{qr} + (M/L_r)i_{qs}$ ซึ่งแต่ละตัวคือค่าสุดท้ายจากข้อ 3.3.1 นั้นเอง

3.3.3 เมื่อต่อตัวเก็บประจุคร่อมเฟส b-c (single capacitor self-excitation) ในเวลาเกือบจะทันทีที่เปิดวงจรทางสแตเตอร์ทั้งสามเฟสออก เราจะต่อตัวเก็บประจุแบบไรซ์ซ์คร่อมเข้าไปในเฟส b และ c ของสแตเตอร์ ซึ่งในขณะนั้นกระแสในโรเตอร์จะยังคงเหลือค้างอยู่เนื่องจากค่าเวลาคงตัว (time constant) ของตัวโรเตอร์เอง โดย

$$\tau_{dr} = (L'_{lr} + M) / R'_r \quad (3.20)$$

และ $\tau_{qr} = (L'_{lr} + M) / R'_r \quad (3.21)$

กระแสในโรเตอร์จะถูกกระตุ้นโดยตัวเก็บประจุทำให้เกิดกระแสในสเตเตอร์ขึ้นใหม่เฉพาะ i_{ds} ทำให้เกิดแรงบิดลัพธ์ขณะนี้มีทิศทางต้านการหมุนเดิมมีผลทำให้ความเร็วของมอเตอร์ลดลงได้ในระดับหนึ่ง การจำลองในช่วงนี้จะใช้สเตทในสมการที่ 2.32 และสมการความเร็วที่ 3.8 โดยมีเงื่อนไขก่อนหน้า(initial condition)ดังนี้คือ

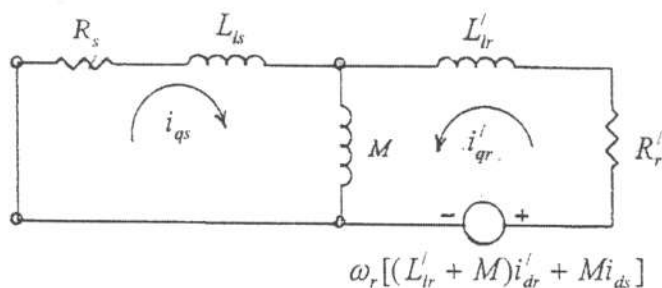
$$\omega_r = \text{ความเร็วของโรเตอร์ก่อนการเบรคมอเตอร์}$$

$$i_{ds} = 0, i_{qs} = 0$$

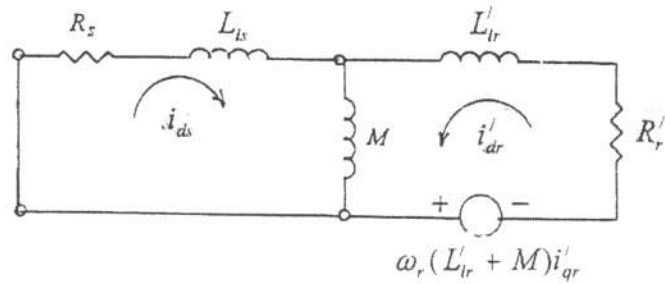
$$i'_{dr}, i'_{qr} = \text{ค่าสุดท้ายจากหัวข้อที่ 3.3.2}$$

3.3.4 ไม่ต่อตัวเก็บประจุ (open-circuit capacitor) เมื่อเปิดวงจรของตัวเก็บประจุออกก่อนที่จะต่อปลายทั้งสามของสเตเตอร์เข้าหากันจะใช้สมการสเตทเดียวกันกับสมการที่ 3.19 (โดยที่ค่า i_{qs} จะเท่ากับศูนย์ในขณะนี้) โดยมีเงื่อนไขเริ่มแรกในตอนนี้เป็น $i'_{dr} = i'_{dr} + (M/L_r)i_{ds}$ และ $i'_{qr} = i'_{qr}$ ซึ่งแต่ละตัวคือค่าสุดท้ายของข้อที่ 3.3.3

3.3.5 ต่อปลายทั้งสามของสเตเตอร์เข้าด้วยกัน(magnetic brake) ในทันทีที่ปลดตัวเก็บประจุออกจากสเตเตอร์ปลายทั้งสามของสเตเตอร์จะถูกต่อเข้าหากันซึ่งในตอนนี้จะกระแสทางด้านโรเตอร์ที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีขนาดสูงขึ้นในขั้นตอนการกระตุ้นด้วยตัวเก็บประจุ (single capacitor self-excitation) จะย้อนกลับมาเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสในขดสเตเตอร์ที่มีลักษณะคล้ายสัญญาณกระแสตรงซึ่งเป็นผลทำให้เกิดมีสนามแม่เหล็กขึ้นเนื่องจากขดสเตเตอร์ทำให้ความเร็วของโรเตอร์ลดลงได้อีก เราเรียกช่วงนี้ว่าเบรคแม่เหล็ก(magnetic brake)การวิเคราะห์หาสมการสเตทจะใช้วงจรในภาพที่ 3.3 และภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.3 วงจรเทียบเท่าในแกน q เมื่อต่อปลายทั้งสามของสเตเตอร์เข้าด้วยกัน



ภาพที่ 3.4 วงจรเทียบเท่าในแกน d เมื่อต่อปลายทั้งสามของสเตเตอร์เข้าด้วยกัน

ดังนั้นเราจะได้สมการจากภาพที่ 3.3 และ 3.4 ดังนี้

$$R_s i_{qs} + L_{ls} \dot{i}_{qs} + M(\dot{i}_{qs} + \dot{i}_{dr}') = 0 \quad (3.22)$$

$$-\omega_r [M i_{ds} + (L_{ls} + M)] + R_r' i_{qr}' + L_{lr}' \dot{i}_{qr}' + M(\dot{i}_{ds} + \dot{i}_{dr}') = 0 \quad (3.23)$$

$$R_s i_{ds} + L_{ls} \dot{i}_{ds} + M(\dot{i}_{ds} + \dot{i}_{dr}') = 0 \quad (3.24)$$

$$\omega_r (L_{lr}' + M) i_{qr}' + R_r' i_{qr}' + L_{lr}' \dot{i}_{qr}' + M(\dot{i}_{ds} + \dot{i}_{dr}') = 0 \quad (3.25)$$

จากสมการ 3.22, 3.23, 3.24 และ 3.25 และให้ $L_s = (L_{ls} + M)$, $L_r = (L_{lr}' + M)$,

$K = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$ จะได้สมการสเตทตามสมการที่ 3.26

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{ds} \\ \dot{i}_{dr}' \\ \dot{i}_{qs} \\ \dot{i}_{qr}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s / K L_s & M R_r' / K L_s L_r & 0 & \omega_r / K L_s \\ M R_s / K L_s L_r & -R_r' / K L_r & 0 & M R_r' / K L_s L_r \\ -M^2 \omega_r / K L_s L_r & -\omega_r M / K L_s & -R_s / K L_s & M R_r' / K L_s L_r \\ \omega_r M / K L_r & \omega_r / K & M R_s / K L_s L_r & -R_r' / K L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{dr}' \\ i_{qs} \\ i_{qr}' \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

ในการจำลองจะใช้สมการที่ 3.26 และสมการความเร็วที่ 3.8 โดยใช้เงื่อนไขเริ่มแรกดังนี้

คือ

i_{ds}, i_{qs} เท่ากับศูนย์
 $\omega_r, i_{dr}', i_{qr}'$ ใช้ค่าสุดท้ายจากการจำลองในหัวข้อที่ 3.3.4