หน่วยที่ 7

การควบคุมความเร็วและการเริ่มเดิน ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

หัวข้อเรื่อง (Topics)

7.1 หลักการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

7.2 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้

7.3 การควบคุมค่าความต้านทานในวงจรอาร์เมเจอร์

7.4 การควบคุมจำนวนเส้นแรงแม่เหล็ก

7.5 การคำนวณหาค่าต่างๆ ในการควบคุมเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

7.6 การเริ่มเดินและความต้านทานเริ่มเดินของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

7.7 การคำนวณหาค่าต่างๆ ในการเริ่มเดินของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

สมรรถนะย่อย (Element of Competency)

1. แสดงความรู้เกี่ยวกับการควบคุมความเร็วและการเริ่มเดินของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
2. ปฏิบัติการทดลองเกี่ยวกับการควบคุมความเร็วและการเริ่มเดินของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม(Behavioral Objectives)

1. บอกหลักการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้
2. อธิบายการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ได้
3. อธิบายการควบคุมค่าความต้านทานในวงจรอาร์เมเจอร์ได้
4. อธิบายการควบคุมจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กได้
5. คำนวณหาค่าต่างๆ ในการควบคุมเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้
6. อธิบายการเริ่มเดินและความต้านทานเริ่มเดินของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้
7. คำนวณหาค่าต่างๆ ในการเริ่มเดินของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้

7.1 หลักการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าได้เริ่มหมุนไปแล้วสามารถที่จะควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้ต่ำกว่า หรือสูงกว่าพิกัดได้ ซึ่งการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระทำได้หลายวิธี พิจารณาสมการได้ดังนี้

$$E_a = V_t - I_aR_a$$

แต่ $$E_a = K_fI_fn \text{ หรือเท่ากับ } K_a\Phi n$$

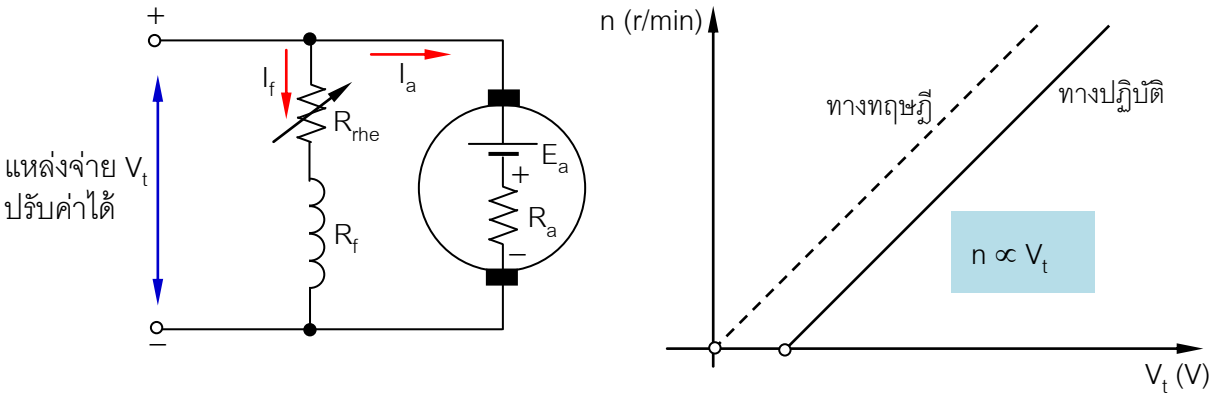
$$K_a\Phi n = V_t - I_aR_a$$

ดังนั้น $$n = \frac{V_t}{K_a\Phi} - \frac{I_aR_a}{K_a\Phi} \qquad \text{..... (7.1)}$$

จากสมการ 7.1 เห็นว่าในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้านั้น มีด้วยกันอยู่ 3 ค่า คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ (V_t) ความต้านทานที่อาร์เมเจอร์ (R_a) และจำนวนเส้นแรงแม่เหล็ก (Φ) หรือ กล่าวได้ว่าการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าทำได้ 3 วิธี ซึ่งทั้ง 3 วิธีสามารถนำไปใช้กับ มอเตอร์ไฟฟ้าแบบชันต์ มอเตอร์ไฟฟ้าแบบซีรีส์และมอเตอร์ไฟฟ้าแบบคอมปาวด์ ในที่นี้ขอกล่าวเฉพาะควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบชันต์

7.2 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้

ทำได้โดยนำแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ปรับค่าได้มาจ่ายให้กับวงจรเพื่อเพิ่มหรือลดขนาดแรงดันไฟฟ้าของวงจรอาร์เมเจอร์ ดังรูปที่ 7.1 (ก) ส่วนตัวต้านทานรีโอสแตตที่ต่อไว้ก็เพื่อควบคุมจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กให้มีค่าคงที่ ทั้งนี้เพื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มีผลเฉพาะที่อาร์เมเจอร์



(ก) แหล่งจ่ายปรับค่าได้เพื่อควบคุมความเร็วรอบ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้

รูปที่ 7.1 การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบชันต์โดยควบคุมแรงดันที่แหล่งจ่าย

จากสมการ $$n = \frac{V_t}{K_a\Phi} - \frac{I_aR_a}{K_a\Phi}$$

ถ้า Φ มีค่าคงที่ ดังนั้น $K_a\Phi$ จึงมีค่าคงที่ด้วยส่วน I_aR_a เป็นแรงดันตกคร่อมจากขดลวดอาร์เมเจอร์ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแหล่งจ่าย V_t ที่มาควบคุม ดังนั้นเห็นว่า $n \propto V_t$

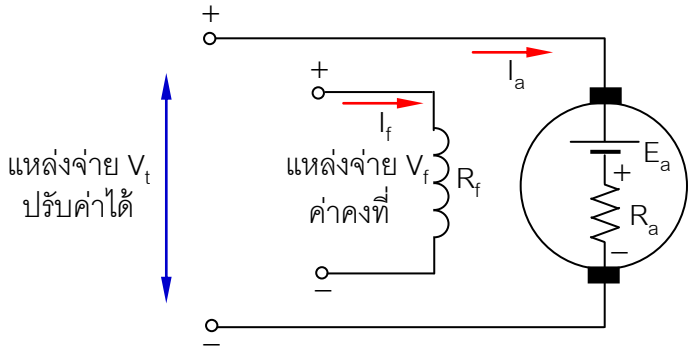
เมื่อปรับขนาดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มีค่าเท่ากับศูนย์โดยตัวแปรอื่นมีค่าคงที่ จะเห็นว่าความเร็วรอบมีค่าเป็นศูนย์ (มอเตอร์ยังไม่หมุน) และเมื่อปรับขนาดแรงดัน V_t ให้เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นผลทำให้ความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จากรูปที่ 7.1 (ข) เส้นกราฟเส้นประซึ่งเป็นในทางทฤษฎี นั่นคือเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มีค่าเท่ากับศูนย์ความเร็วรอบก็มีค่าเป็นศูนย์ด้วยและเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นความเร็วรอบก็จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามด้วยในลักษณะของเส้นตรง แต่ในทางปฏิบัติจะต้องมีแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ค่าหนึ่งเพื่อให้มีกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดอาร์เมเจอร์เพื่อให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กที่อาร์เมเจอร์กับเส้นแรงแม่เหล็กที่แกนขั้วเกิดการผลักตัวนำให้หมุนไปได้ และเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นความเร็วรอบก็จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในลักษณะของเส้นตรง

ข้อดี การควบคุมความเร็วรอบแบบนี้ก็คือสามารถควบคุมความเร็วรอบได้อย่างราบเรียบโดยเริ่มความเร็วรอบตั้งแต่ศูนย์จนกระทั่งถึงพิกัดและเกินพิกัดได้

ข้อเสีย มีดังนี้

1. ที่ความเร็วรอบเกินพิกัดอาจจะต้องปรับแรงดันที่จ่ายให้สูงกว่าพิกัดแรงดันของมอเตอร์ซึ่งอาจจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ขดลวดสนามแม่เหล็กแบบชันต์สูงกว่าพิกัดอาจจะทำให้ขดลวดเสียหายได้
2. ขนาดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มีค่าน้อยส่งผลให้ Φ น้อยด้วย ก็ส่งผลให้แรงบิดหมุนเริ่มเดินน้อยไปด้วย

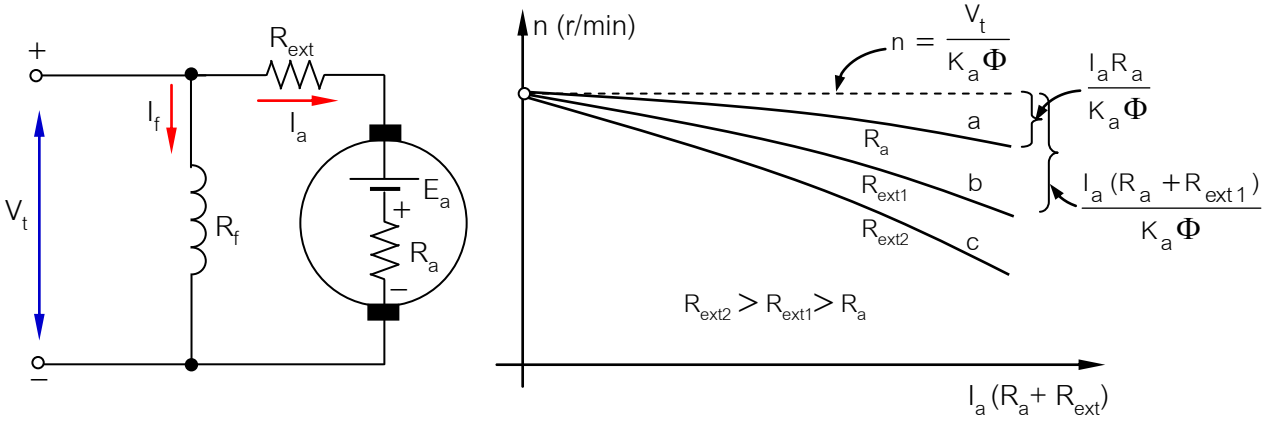
ดังนั้นการควบคุมความเร็วรอบแบบนี้ก็สามารถแก้ข้อเสียดังกล่าวได้โดยการนำแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงจากภายนอกมาจ่ายให้กับขดลวดสนามแม่เหล็กแบบชันต์เป็นแบบกระตุ้นแยก (V_f) โดยแรงดันนี้จะให้มีค่าคงที่ ดังรูปที่ 7.2 ซึ่งทำให้มีจำนวน Φ คงที่อยู่ค่าหนึ่ง ส่วนแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอาร์เมเจอร์เป็นแบบปรับค่าแรงดันไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงทำให้การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าให้มีความเร็วรอบต่ำหรือให้มีความเร็วรอบสูงกว่าพิกัดได้ (ธวัชชัย อัตถวิบูลย์กุล, 2546: 285)



รูปที่ 7.2 การต่อมอเตอร์ไฟฟ้าแบบชันต์ให้เป็นแบบกระตุ้นแยกเพื่อควบคุมความเร็วรอบด้วยวิธีปรับแรงดันไฟฟ้าที่แหล่งจ่าย V_t

7.3 การควบคุมค่าความต้านทานในวงจรอาร์เมเจอร์

ทำได้โดยนำตัวต้านทานภายนอกมาต่ออนุกรมกับขดลวดอาร์เมเจอร์ทั้งนี้เพื่อเพิ่มหรือลดค่าความต้านทานของวงจรอาร์เมเจอร์ (วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์, 2556: 218) ดังรูปที่ 7.3 (ก) ในการเลือกค่าความต้านทานนี้ต้องเลือกให้ใกล้เคียงกับค่าความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์และต้องทนกระแสไฟฟ้าได้เท่ากับหรือมากกว่ากระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์



(ก) ความต้านทานภายนอกต่ออนุกรมกับอาร์เมเจอร์ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์

รูปที่ 7.3 การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบชันต์โดยการควบคุมค่าความต้านทานที่อาร์เมเจอร์

เมื่อพิจาณาจากสมการ

$$n = \frac{V_t}{K_a\Phi} - \frac{I_a(R_a + R_{ext})}{K_a\Phi} \qquad \text{..... (7.2)}$$

จากสมการ 7.2 ถ้าปรับความต้านทานภายนอก (R_{ext}) ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ โดยตัวแปรอื่นให้มีค่าคงที่เห็นว่าความเร็วรอบมีค่าคงที่อยู่ค่าหนึ่งและเมื่อปรับ R_{ext} ให้เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น ผลจะทำให้ความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงลดลงแสดงดังรูปที่ 16.4 เมื่อมอเตอร์ทำงานไม่มีโหลดและยังไม่ได้ต่อตัวต้านทาน R_{ext} จะมีความเร็วรอบอยู่ค่าหนึ่งคือ $n = \frac{V_t}{K_a\Phi}$ ตามแนวเส้นประ เมื่อมอเตอร์ค่อย ๆ มีโหลดเพิ่มขึ้นทำให้มีกระแส I_a ค่อย ๆ ค่าเพิ่มขึ้นจึงทำให้สมการ $\frac{I_aR_a}{K_a\Phi}$ ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเช่นกันและไปลบออกจาก $\frac{V_t}{K_a\Phi}$ จึงทำให้ความเร็วรอบค่อย ๆ ลดลงดังเส้นกราฟ a และเมื่อต่อตัวต้านทาน R_{ext1} อนุกรมกับอาร์เมเจอร์และปรับค่าให้เพิ่มขึ้น โดยให้กระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์เป็นค่าเดียวกันดังนั้นจึงทำให้สมการ $\frac{I_a(R_a+R_{ext1})}{K_a\Phi}$ ค่อย ๆ มีค่าเพิ่มขึ้นและไปลบออกจาก $\frac{V_t}{K_a\Phi}$ จึงทำให้ความเร็วรอบค่อย ๆ ลดลงมากกว่าเดิมเมื่อยังไม่ต่อ R_{ext1} ดังเส้นกราฟ b ส่วนเส้นกราฟ c เป็นเส้นกราฟที่ R_{ext2} มีค่าความต้านทานมากกว่า R_{ext1}

ข้อดี สามารถควบคุมความเร็วรอบเมื่อต้องการลดความเร็วรอบให้ต่ำลงในช่วงเวลาสั้น ๆ

ข้อเสีย มีดังนี้

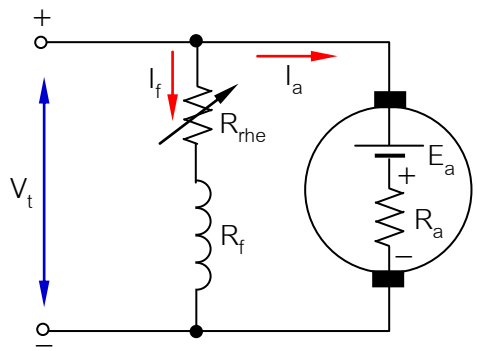
1. ความเร็วรอบจะต่ำกว่าความเร็วรอบที่พิกัดของมอเตอร์ ไม่สามารถที่จะปรับความเร็วรอบให้สูงกว่าพิกัดได้

2. เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากตัวต้านทาน R_{rhe} ที่ใช้ควบคุม ($I_a^2R_{rhe}$) ซึ่งกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากส่วนนี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์เมื่อโหลดมีค่าเพิ่มขึ้น อันเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลง

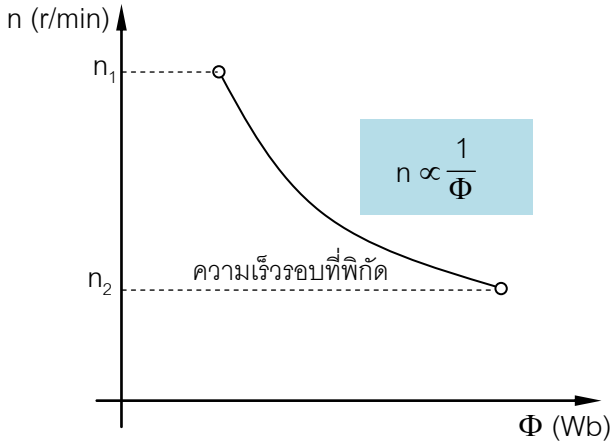
3. การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าตัวต้านทาน R_{rhe} เพียงอย่างเดียวแต่ยังขึ้นอยู่กับโหลดด้วย จึงเป็นการยากที่จะรักษาความเร็วรอบให้คงที่ไว้เมื่อโหลดนั้นมีการเปลี่ยนแปลง

7.4 การควบคุมจำนวนเส้นแรงแม่เหล็ก

ทำได้โดยนำตัวต้านทานรีโอสแตต (R_{rhe}) มาต่ออนุกรมกับขดลวดสนามแม่เหล็กแบบชันต์ เพื่อควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดสนามแม่เหล็กให้มากหรือน้อยตามต้องการ ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดสนามแม่เหล็กนี้ก็จะไปควบคุมจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กให้มากหรือน้อยตามต้องการ ดังรูปที่ 7.4 (ก)



(ก) ความต้านทาน R_{rhe} ต่ออนุกรมกับขดลวดสนามแม่เหล็ก



(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับจำนวนเส้นแรงแม่เหล็ก

รูปที่ 7.4 การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบชันต์โดยการควบคุมจำนวนเส้นแรงแม่เหล็ก

จากสมการ $$n = \frac{V_t}{K_a\Phi} - \frac{I_aR_a}{K_a\Phi}$$

ถ้าให้ V_t มีค่าคงที่ ดังนั้น $\frac{V_t}{K_a}$ จึงมีค่าคงที่ด้วยส่วน I_aR_a เป็นแรงดันตกคร่อมจากขดลวดอาร์เมเจอร์ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแหล่งจ่าย V_t ที่จ่ายให้ ดังนั้นเห็นว่า $n \propto \frac{1}{\Phi}$

จากรูปที่ 7.4 (ข) เมื่อปรับมีค่าความต้านทาน R_{rhe} ในตำแหน่งที่มีค่ามาทำให้ Φ มีค่าน้อยจะส่งผลให้ความเร็วรอบเพิ่มขึ้นที่ความเร็วรอบ n_1 และเมื่อปรับให้มีค่าความต้านทาน R_{rhe} เปลี่ยนแปลงให้มีค่าค่อย ๆ ลดลงทำให้ Φ ค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเร็วรอบค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงลดลงเป็นความเร็วรอบที่ n_2 ดังเส้นโค้ง และถ้าค่าความต้านทาน R_{rhe} ที่ตำแหน่งนี้มีค่าน้อยที่สุดก็จะได้ความเร็วรอบนี้เป็นความเร็วรอบที่พิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้า

ข้อดี การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบขึ้นอยู่กับค่าตัวต้านทาน R_{rhe} เพียงอย่างเดียว ซึ่งไม่ขึ้นอยู่กับโหลด ดังนั้นจึงรักษาความเร็วรอบให้คงที่ไว้เมื่อโหลดนั้นมีการเปลี่ยนแปลง

ข้อเสีย มีดังนี้

1. ความเร็วรอบจะสูงกว่าความเร็วรอบที่พิกัดของมอเตอร์ไฟฟ้า ดังนั้นไม่สามารถที่จะปรับความเร็วรอบให้ต่ำพิกัดได้

2. เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากตัวต้านทาน R_{rhe} ที่ใช้ควบคุม ($I_f^2 R_{rhe}$) ซึ่งกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากส่วนนี้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่ขดลวดสนามแม่เหล็กแบบชันต์ อันเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้าลดลงบ้างแต่ยังถือว่าน้อยกว่าการควบคุมค่าความต้านทานในวงจรอาร์เมเจอร์

7.5 การคำนวณหาค่าต่าง ๆ ในการควบคุมเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ตัวอย่างที่ 7.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบชันต์ มีค่าความต้านทานจากขดลวดอาร์เมเจอร์ 5 Ω เมื่อมีโหลดมีกระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์ 20 A แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ 130 V ที่ความเร็วรอบ 800 r/min โดยให้กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์และที่ขดลวดสนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ ไม่คิดผลของอาร์เมเจอร์รีแอกชัน จงคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ ที่ความเร็วรอบ 1000 r/min, 1200r/min และ 1400 r/min

วิธีทำ จากสมการ $E_a = V_t - I_a R_a$

หรือ $K_f I_f n = V_t - I_a R_a$

ดังนั้น $K_f I_f = \dfrac{V_t - I_a R_a}{n} = \dfrac{130 - (20 \times 5)}{800} = 0.15$

จาก $K_f I_f n = V_t - I_a R_a$

ดังนั้น $V_t = K_f I_f n_1 + I_a R_a$

ที่ $n_1 = 1000$ r/min $V_t = K_f I_f n_1 + I_a R_a$

$= (0.15 \times 1000) - (20 \times 5)$

$V_t = 160$ V

แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ที่ความเร็วรอบ n_1 มีค่าเท่ากับ 160 V **ตอบ**

ที่ $n_2 = 1200$ r/min

$$V_t = K_f I_f n_2 + I_a R_a$$
$$= (0.15 \times 1200) - (20 \times 5)$$
$$V_t = 190 \text{ V}$$

แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ที่ความเร็วรอบ n_2 มีค่าเท่ากับ 190 V **ตอบ**

ที่ $n_3 = 1400$ r/min

$$V_t = K_f I_f n_3 + I_a R_a$$
$$= (0.15 \times 1400) - (20 \times 5)$$
$$V_t = 220 \text{ V}$$

แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ที่ความเร็วรอบ n_3 มีค่าเท่ากับ 220 V **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 7.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบชันต์ มีค่าความต้านทานจากขดลวดอาร์เมเจอร์ 0.1 Ω เมื่อมีโหลดมีกระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์ 70 A แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ 240 V ที่ความเร็วรอบ 850 r/min ถ้านำความต้านทานภายนอกค่า 1.14 Ω มาต่ออนุกรมกับอาร์เมเจอร์และมีกระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์ 50 A โดยให้เส้นแรงแม่เหล็กมีค่าคงที่ ไม่คิดผลของอาร์เมเจอร์รีแอกชัน จงคำนวณหาความเร็วรอบของมอเตอร์

วิธีทำ เมื่อยังไม่ต่อ R_{ext} และมี $I_a = 70$ A

$$E_{a1} = V_t - I_{a1} R_a$$
$$= 240 - (70 \times 0.1) = 233 \text{ V}$$

แต่ $K_f I_f n_1 = E_{a1}$

ดังนั้น $$K_f I_f = \frac{E_{a1}}{n_1} = \frac{233}{850} = 0.2741$$

เมื่อต่อ $R_{ext} = 1.14\,\Omega$ และมี $I_a = 50$ A

$$E_{a2} = V_t - I_{a2}(R_a + R_{ext})$$
$$= 240 - (50 \times (0.1 + 1.14))$$
$$= 240 - 62 = 178 \text{ V}$$

แต่ $K_f I_f n_2 = E_{a2}$

ดังนั้น $$n_2 = \frac{E_{a2}}{K_f I_f} = \frac{178}{0.2741} = 649.39$$

$$n_2 \cong 650 \text{ r/min}$$

ความเร็วรอบของมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 650 r/min **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 7.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบชันต์ มีค่าความต้านทานจากขดลวดอาร์เมเจอร์และจากขดลวดสนามแม่เหล็กแบบชันต์เป็น 0.3 Ω และ 200 Ω ตามลำดับ เมื่อทำงานขณะไม่มีโหลดรับกระแสไฟฟ้าเข้าไป 5 A ที่แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว 220 V ที่ความเร็วรอบ 1000 r/min เมื่อทำงานเต็มพิกัดรับกระแสไฟฟ้าเข้าไป 40 A ผลการเกิดอาร์เมเจอร์รีแอกชันทำให้เส้นแรงแม่เหล็กลดลง 2.5 % จงคำนวณหาความเร็วรอบของมอเตอร์เมื่อทำงานเต็มพิกัด (Mulukutla S. Sarmar and Mukesh K. Pathak, 2010: 479)

วิธีทำ **เมื่อยังไม่มีโหลด**

$$I_f = \frac{V_t}{R_f} = \frac{220}{200} = 1.1 \text{ A}$$

$$I_{ao} = I_{to} - I_f = 5 - 1.1 = 3.9 \text{ A}$$

$$E_{ao} = V_t - I_{ao}R_a$$

$$= 220 - (3.9 \times 0.3) = 218.83 \text{ V}$$

แต่ $K_f I_f n_o = E_{ao}$

ดังนั้น $K_f = \frac{E_{ao}}{I_f n_o} = \frac{218.33}{1.1 \times 1000} = 0.1989$

เมื่อมีโหลด

$$I_{a1} = I_{t1} - I_f = 40 - 1.1 = 38.9 \text{ A}$$

$$E_{a1} = V_t - I_{a1}R_a$$

$$= 220 - (38.9 \times 0.3) = 208.83 \text{ V}$$

ขณะมีโหลดเส้นแรงแม่เหล็กลดลง 2.5 % จาก $\Phi = K_\Phi I_f$ ดังนั้น $I_f = \frac{\Phi}{K_\Phi}$ โดย $I_f \propto \Phi$ เมื่อ Φ ลดลง 2.5 % จึงส่งผลให้กระแส I_{f1} ลดลง 2.5 % ด้วยหรือคงเหลือ 97.5 % ของ I_f นั่นคือ

$$I_{f1} = \frac{97.5}{100} \times I_f = \frac{97.5}{100} \times 1.1 = 1.0725$$

แต่ $K_f I_{f1} n_1 = E_{a1}$

ดังนั้น $n_1 = \frac{E_{a1}}{K_f I_{f1}} = \frac{208.33}{0.1989 \times 1.0725}$

$$= 976.6$$

$$n_1 \cong 977 \text{ r/min}$$

ความเร็วรอบของมอเตอร์เมื่อทำงานเต็มพิกัดมีค่าเท่ากับ 977 r/min **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 7.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบชันต์ มีค่าความต้านทานจากขดลวดอาร์เมเจอร์และจากขดลวดสนามแม่เหล็กแบบชันต์เป็น 0.4 Ω และ 160 Ω ตามลำดับ เมื่อทำงานขณะไม่มีโหลดรับกระแสไฟฟ้าเข้าไป 5 A ที่แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว 240 V ที่ความเร็วรอบ 800 r/min เมื่อทำงานเต็มพิกัดรับกระแสไฟฟ้าเข้าไป 25 A ที่ความเร็วรอบ 950 r/min ผลการเกิดอาร์เมเจอร์รีแอกชันไม่นำมาคิด จงคำนวณหาค่าความต้านทานรีโอสแตต (มนตรี สุวรรณภิงคาร , 2550: 235)

วิธีทำ **เมื่อยังไม่มีโหลด**

$$I_f = \frac{V_t}{R_f} = \frac{240}{160} = 1.5 \text{ A}$$

$$I_{ao} = I_{to} - I_f = 5 - 1.5 = 3.5 \text{ A}$$

$$E_{ao} = V_t - I_{ao}R_a$$

$$= 240 - (3.5 \times 0.4) = 238.6 \text{ V}$$

แต่ $K_f I_f n_o = E_{ao}$

ดังนั้น $$K_f = \frac{E_{ao}}{I_f n_o} = \frac{238.6}{1.5 \times 800} = 0.1988$$

เมื่อมีโหลด

หากระแสไฟฟ้าที่ขดลวดสนามแม่เหล็ก ซึ่งหาได้ดังนี้

$$E_{a1} = V_t - I_{a1}R_a$$

$$K_f I_{f1} n_1 = V_t - I_{a1}R_a$$

$$0.1988 \times I_{f1} \times 950 = 240 - (I_t - I_{f1})R_a$$

$$188.86 I_{f1} = 240 - (25 - I_{f1}) \times 0.4$$

$$188.86 I_{f1} = 240 - 10 + 0.4 I_{f1}$$

$$188.46 I_{f1} = 230$$

$$I_{f1} = \frac{230}{188.46} = 1.22 \text{ A}$$

ดังนั้น $$(R_{rhe} + R_f) = \frac{V_t}{I_{f1}} = \frac{240}{1.22}$$

$$(R_{rhe} + R_f) = 196.72$$

$$R_{rhe} = 196.72 - R_f$$

$$= 196.72 - 160$$

$$R_{rhe} = 36.72 \ \Omega$$

ความต้านทานรีโอสแตตมีค่าเท่ากับ 36.72 Ω **ตอบ**

7.6 การเริ่มเดินและความต้านทานเริ่มเดินของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

7.6.1 **การเริ่มเดิน** ในการเริ่มเดินของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ทำให้กระแสไฟฟ้าขณะเริ่มเดินนั้นมีค่าสูงทั้งนี้เพราะว่าค่าความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์มีค่าต่ำมาก ขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้าเริ่มเดินยังไม่มีแรงดันไฟฟ้าต้านกลับที่อาร์เมเจอร์ ทำให้แรงดันไฟฟ้าเต็มพิกัดจ่ายให้กับขดลวดอาร์เมเจอร์โดยตรง ผลทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ขณะเริ่มเดินมีค่าสูง ซึ่งจะเป็นผลเสียให้กับขดลวดอาร์เมเจอร์ และเมื่ออาร์เมเจอร์หมุนไปแล้วก็มีแรงดันไฟฟ้าต้านกลับและทำให้กระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์ก็จะลดลง ซึ่งสามารถพิจารณาหากระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดอาร์เมเจอร์ ได้ดังนี้

จากสมการ $E_a = V_t - I_a R_a$

ดังนั้น $I_a = \dfrac{V_t - E_a}{R_a}$

แต่ $E_a = \dfrac{\Phi PnZ}{60a}$ โดยขณะเริ่มเดินความเร็วรอบ $n = 0$ ส่งผลให้ $E_a = 0$ ด้วย

นั่นคือ $I_a = \dfrac{V_t - 0}{R_a}$

ถ้ากำหนดให้ I_{st} เป็นกระแสไฟฟ้าขณะเริ่มเดินที่ค่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับมีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้

$$I_{st} = \frac{V_t}{R_a} \qquad \text{..... (7.3)}$$

เมื่อ I_{st} = กระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์ขณะเริ่มเดิน

V_t = แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้

R_a = ความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์

ตัวอย่างที่ 7.5 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบชันต์ มีค่าความต้านทานจากขดลวดอาร์เมเจอร์ 0.25 Ω แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ 220 V เมื่อหมุนขับโหลดเต็มพิกัดมีกระแสที่อาร์เมเจอร์ 35.2 A จงคำนวณหา

ก. กระแสไฟฟ้าขณะเริ่มเดินมอเตอร์

ข. อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าขณะเริ่มเดินต่อกระแสไฟฟ้าที่พิกัด

ค. แรงดันไฟฟ้าต้านกลับเมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าทำงานที่พิกัด

วิธีทำ โจทย์กำหนดให้ $V_t = 220$ V $R_a = 0.25$ Ω และ $I_a = 35.2$ A

ก. กระแสไฟฟ้าขณะเริ่มเดิน

$$I_{st} = \frac{V_t}{R_a} = \frac{220}{0.25} = 880 \text{ A}$$

กระแสไฟฟ้าขณะเริ่มเดินมีค่าเท่ากับ 880 A **ตอบ**

ข. อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าขณะเริ่มเดินต่อกระแสไฟฟ้าที่พิกัด

$$\frac{I_{st}}{I_a} = \frac{880}{32.5} = 25$$

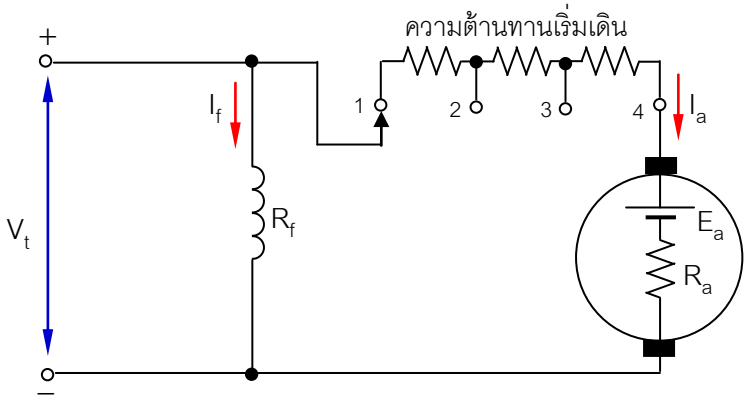
อัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าขณะเริ่มเดินต่อกระแสไฟฟ้าที่พิกัดมีค่าเท่ากับ 25 **ตอบ**

ค. แรงดันไฟฟ้าต้านกลับเมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าทำงานที่พิกัด

$$E_a = V_t - I_a R_a$$
$$= 220 - (32.5 \times 0.25)$$
$$E_a = 211.2 \text{ V}$$

แรงดันไฟฟ้าต้านกลับเมื่อมอเตอร์ทำงานที่พิกัดมีค่าเท่ากับ 211.2 V **ตอบ**

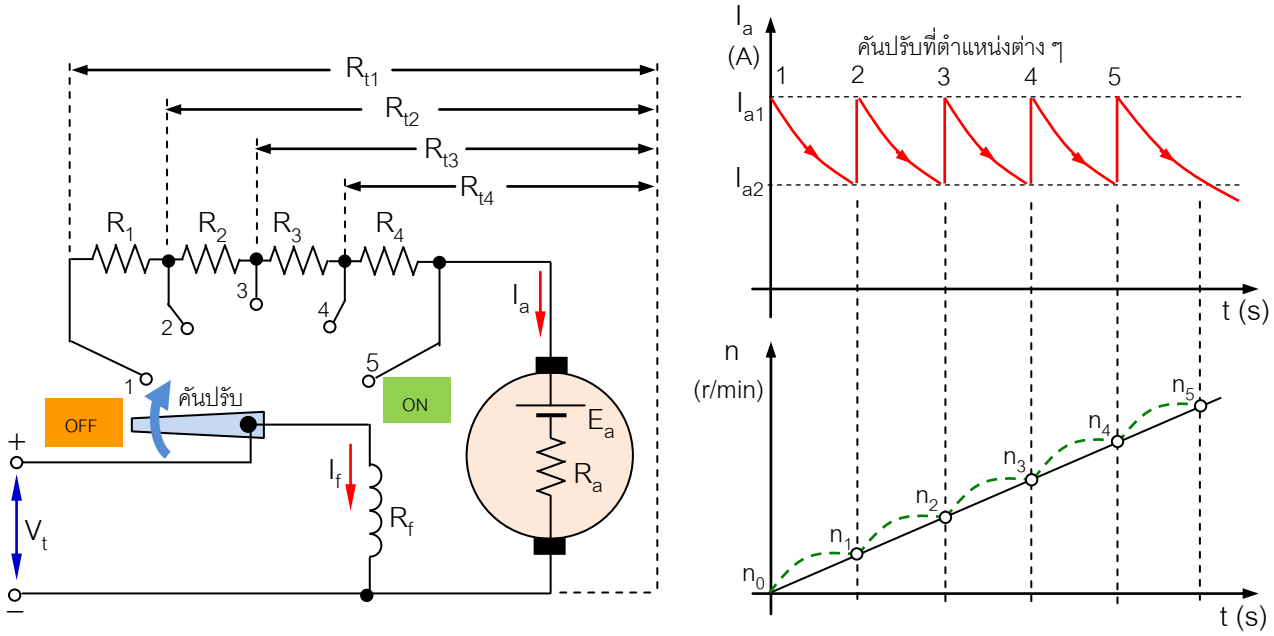
7.6.2 **ความต้านทานเริ่มเดิน** จากตัวอย่างที่ 7.5 เห็นว่ากระแสไฟฟ้าขณะเริ่มเดินนี้สูงถึง 25 เท่าของกระแสไฟฟ้าที่พิกัด ซึ่งเป็นผล เสียต่อวงจรของอาร์เมเจอร์ ซึ่งได้แก่ ขดลวดอาร์เมเจอร์ คอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่าน เพื่อลดกระแส ไฟฟ้าขณะเริ่มเดินจึงจำเป็นต้องใช้ตัวต้านทานจากภายนอกซึ่งเป็นอุปกรณ์เริ่มเดินมาต่ออนุกรมกับอาร์เมเจอร์ เมื่อมอเตอร์เริ่มเดินไปแล้วก็จะเกิดแรงดันไฟฟ้าต้านกลับทำให้กระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์ลดลง โดยตัวต้านทานภายนอกนี้ก็จะถูกปรับให้มีค่าลดลงและถูกตัดออกจากวงจรอาร์เมเจอร์ เรียกตัวต้านทานภายนอกนี้ว่า **ความต้านทานเริ่มเดิน** (Starting resistance) โดยต่ออนุกรมกับอาร์เมเจอร์ สำหรับการเริ่มเดินมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบชันต์แสดงดังรูปที่ 7.5 โดยที่ตำแหน่งที่ 1 เป็นค่าที่มีความต้านทานของวงจรอาร์เมเจอร์มากซึ่งจะลดกระแสเริ่มเดิน จากนั้นก็ลดค่าความต้านทานลงมาที่ตำแหน่งที่ 2 ตำแหน่งที่ 3 และตำแหน่งที่ 4 ตามลำดับ ซึ่งตำแหน่งที่ 4 ความต้านทานเริ่มเดินถูกตัดออกทั้งหมดโดยมีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าที่อาร์เมเจอร์โดยตรง



รูปที่ 7.5 การต่อความต้านทานเริ่มเดินของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบชันต์

7.7 การคำนวณหาค่าความต้านทานเริ่มเดินของมอเตอร์

ตัวต้านทานเริ่มเดินนั้นถูกต่ออนุกรมกับอาร์เมเจอร์เพื่อจำกัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์ในขณะเริ่มเดิน ซึ่งในทางปฏิบัติตัวต้านทานเริ่มเดินนี้จะถูกแบ่งให้เป็นตัวต้านทานหลาย ๆ ค่ามาต่ออนุกรมกัน (R_1, R_2, R_3 และ R_4) ดังรูปที่ 7.6 (ก) เป็นการเริ่มเดินของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบชันต์ เมื่อเลื่อนคันปรับมาเริ่มสัมผัสที่ตำแหน่งที่ 1 ทำให้กระแสขณะเริ่มเดินเป็น I_{a1} โดยความเร็วรอบเป็นศูนย์ (n_0) จากนั้นกระแสที่อาร์เมเจอร์เริ่มเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น I_{a2} และความเร็วรอบเริ่มเปลี่ยนแปลงจาก n_0 ไปเป็น n_1 ดังรูปที่ 7.6 (ข) เมื่อเลื่อนคันปรับเริ่มสัมผัสที่ตำแหน่งที่ 2 ทำให้กระแสขณะเริ่มเดินเพิ่มขึ้นเป็น I_{a1} อีกครั้งหนึ่งจากนั้นกระแสที่อาร์เมเจอร์เริ่มเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น I_{a2} โดยความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจาก n_1 ไปเป็น n_2 เมื่อเลื่อนคันปรับเริ่มสัมผัสที่ตำแหน่งที่ 3 ทำให้กระแสขณะเริ่มเดินเพิ่มขึ้นเป็น I_{a1} อีกครั้งหนึ่งจากนั้นกระแสที่อาร์เมเจอร์เริ่มเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น I_{a2} โดยความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจาก n_2 ไปเป็น n_3 เมื่อเลื่อนคันปรับเริ่มสัมผัสที่ตำแหน่งที่ 4 ทำให้กระแสขณะเริ่มเดินเพิ่มขึ้นเป็น I_{a1} อีกครั้งหนึ่งจากนั้นกระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์เริ่มเปลี่ยนแปลงลดลงเป็น I_{a2} โดยความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจาก n_3 ไปเป็น n_4 และเป็นลักษณะนี้เรื่อยไปจนกระทั่งคันปรับเริ่มสัมผัสที่ตำแหน่งที่ 5 ซึ่งเป็นตำแหน่งสุดท้ายของความต้านทานเริ่มเดิน



(ก) ค่าความต้านทานในแต่ละตำแหน่ง (ข) การเปลี่ยนแปลงของกระแสอาร์เมเจอร์และความเร็วรอบ

รูปที่ 7.6 การหาค่าความต้านทานเริ่มเดินของมอเตอร์ไฟฟ้าแบบชันต์

จากวงจรรูปที่ 7.6 (ก) สามารถคำนวณหาค่าความต้านทานเริ่มเดินได้ดังนี้

$$R_{t1} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_a$$

$$R_{t2} = R_2 + R_3 + R_4 + R_a$$

$$R_{t3} = R_3 + R_4 + R_a$$

$$R_{t4} = R_4 + R_a$$

และ $$R_{t5} = R_a$$

เมื่อคันปรับเริ่มมาสัมผัสตำแหน่งที่ 1 จะได้

$$I_{a1} = \frac{V_t}{R_{t1}}$$

เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนแล้วทำให้เกิด E_a ขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ E_{a1} ดังนั้นกระแสที่อาร์เมเจอร์เป็น I_{a2}

$$I_{a2} = \frac{V_t - E_{a1}}{R_{t1}} \quad \text{..... (7.4)}$$

เมื่อคันปรับถูกเลื่อนจากตำแหน่งที่ 1 เริ่มมาสัมผัสตำแหน่งที่ 2 จะได้

$$I_{a1} = \frac{V_t - E_{a1}}{R_{t2}} \quad \text{..... (7.5)}$$

นำสมการที่ 7.5 หารด้วยสมการที่ 7.4 จะได้

$$\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = \frac{V_t - E_{a1}}{R_{t2}} \times \frac{R_{t1}}{V_t - E_{a1}}$$

$$\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = \frac{R_{t1}}{R_{t2}} \quad \text{..... (7.6)}$$

โดยมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ E_{a2} ดังนั้นกระแสที่อาร์เมเจอร์เป็น I_{a2}

$$I_{a2} = \frac{V_t - E_{a2}}{R_{t2}} \quad \text{..... (7.7)}$$

เมื่อคันปรับถูกเลื่อนจากตำแหน่งที่ 2 เริ่มมาสัมผัสตำแหน่งที่ 3 จะได้

$$I_{a1} = \frac{V_t - E_{a2}}{R_{t3}} \quad \text{..... (7.8)}$$

นำสมการที่ 7.8 หารด้วยสมการที่ 7.7 จะได้

$$\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = \frac{V_t - E_{a2}}{R_{t3}} \times \frac{R_{t2}}{V_t - E_{a2}}$$

$$\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = \frac{R_{t2}}{R_{t3}} \quad \text{..... (7.9)}$$

โดยมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ E_{a3} ดังนั้นกระแสที่อาร์เมเจอร์เป็น I_{a2}

$$I_{a2} = \frac{V_t - E_{a3}}{R_{t3}} \quad \text{..... (7.10)}$$

เมื่อคันปรับถูกเลื่อนจากตำแหน่งที่ 3 เริ่มมาสัมผัสตำแหน่งที่ 4 จะได้

$$I_{a1} = \frac{V_t - E_{a3}}{R_{t4}} \quad \text{..... (7.11)}$$

นำสมการที่ 7.11 หารด้วยสมการที่ 7.10 จะได้

$$\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = \frac{V_t - E_{a3}}{R_{t4}} \times \frac{R_{t3}}{V_t - E_{a3}}$$

$$\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = \frac{R_{t3}}{R_{t4}} \quad \text{..... (7.12)}$$

โดยมอเตอร์หมุนด้วยความเร็วเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าเท่ากับ E_{a4} ดังนั้นกระแสที่อาร์เมเจอร์เป็น I_{a2}

$$I_{a2} = \frac{V_t - E_{a4}}{R_{t4}} \quad \text{..... (7.13)}$$

เมื่อคันปรับถูกเลื่อนจากตำแหน่งที่ 4 เริ่มมาสัมผัสตำแหน่งที่ 5 จะได้

$$I_{a1} = \frac{V_t - E_{a4}}{R_{t5}} = \frac{V_t - E_{a4}}{R_a} \quad \text{..... (7.14)}$$

นำสมการที่ 7.14 หารด้วยสมการ 7.13 จะได้

$$\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = \frac{V_t - E_{a4}}{R_a} \times \frac{R_{t4}}{V_t - E_{a4}}$$

$$\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = \frac{R_{t4}}{R_a} \quad \text{..... (7.15)}$$

จากสมการที่ 7.6, 7.9, 7.12 และสมการที่ 7.15 จะได้

$$\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = \frac{R_{t1}}{R_{t2}} = \frac{R_{t2}}{R_{t3}} = \frac{R_{t3}}{R_{t4}} = \frac{R_{t4}}{R_a} = K \quad \text{..... (7.16)}$$

จากสมการ 7.16 จะได้

$$R_{t4} = KR_a$$

$$R_{t3} = KR_{t4} = KKR_a = K^2R_a$$

$$R_{t2} = KR_{t3} = KK^2R_a = K^3R_a$$

$$R_{t1} = KR_{t2} = KK^3R_a = K^4R_a$$

ถ้ากำหนดให้ n = จำนวนตำแหน่ง หรือจำนวนปุ่มที่คันปรับสัมผัส

n – 1 = จำนวนของส่วนที่แบ่ง หรือจำนวนตัวต้านทาน

ซึ่งจากรูปที่ 7.6 (ก) จำนวนตำแหน่งหรือจำนวนปุ่มเท่ากับ 5 และจำนวนตัวต้านทานเท่ากับ 4 ก็คือ (5 – 1)

$$R_{t1} = K^{(n-1)}R_a$$

เมื่อทราบค่า K ก็สามารถหาค่าความตัวต้านทานของแต่ละส่วนได้ ดังนั้น

$$K^{(n-1)} = \frac{R_{t1}}{R_a}$$

$$K = \left(\frac{R_{t1}}{R_a}\right)^{\frac{1}{(n-1)}} = \sqrt[(n-1)]{\frac{R_{t1}}{R_a}} \quad \text{..... (7.17)}$$

ค่าความต้านทานในแต่ละส่วนหาค่าได้ตามลำดับดังนี้

$$R_1 = R_{t1} - R_{t2}$$
$$R_2 = R_{t2} - R_{t3}$$
$$R_3 = R_{t3} - R_{t4}$$
$$R_4 = R_{t4} - R_a$$

ตัวอย่างที่ 7.6 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบชันต์ มีค่าความต้านทานจากขดลวดอาร์เมเจอร์ 0.5 Ω มีแรงดัน ไฟฟ้าที่จ่ายให้ 500 V มีกระแสขณะเริ่มเดิน 100 A โดยความต้านทานเริ่มเดินแบ่งออกเป็น 5 ส่วน จงคำนวณหาค่าความต้านทานในแต่ละส่วน (B.L. THERAJA, 1984: 667)

วิธีทำ โจทย์กำหนดให้ $V_t = 500$ V $R_a = 0.5$ Ω $I_{st} = 100$ A และ $n-1 = 5$

$$R_{t1} = \frac{V_t}{I_{st}} = \frac{500}{100} = 5\ \Omega$$

$$K = \sqrt[(n-1)]{\frac{R_{t1}}{R_a}} = \sqrt[5]{\frac{5}{0.5}} = \sqrt[5]{10}$$

$$K = 1.5849$$

ดังนั้น

$$R_{t2} = \frac{R_{t1}}{K} = \frac{5}{1.5849} = 3.1547\ \Omega$$
$$R_{t3} = \frac{R_{t2}}{K} = \frac{3.1547}{1.5849} = 1.9904\ \Omega$$
$$R_{t4} = \frac{R_{t3}}{K} = \frac{1.9904}{1.5849} = 1.2558\ \Omega$$

และ

$$R_{t5} = \frac{R_{t4}}{K} = \frac{1.2558}{1.5849} = 0.7923\ \Omega$$

ค่าความต้านทานในแต่ละส่วน

$$R_1 = R_{t1} - R_{t2} = 5 - 3.1547 = 1.8453\ \Omega$$
$$R_2 = R_{t2} - R_{t3} = 3.1547 - 1.9904 = 1.1643\ \Omega$$
$$R_3 = R_{t3} - R_{t4} = 1.9904 - 1.2558 = 0.7346\ \Omega$$
$$R_4 = R_{t4} - R_{t5} = 1.2558 - 0.7923 = 0.4635\ \Omega$$
$$R_5 = R_{t5} - R_a = 0.7923 - 0.5 = 0.2923\ \Omega$$

ค่าความต้านทานในส่วนของ R_1 มีค่าเท่ากับ 1.8453 Ω
ค่าความต้านทานในส่วนของ R_2 มีค่าเท่ากับ 1.1643 Ω
ค่าความต้านทานในส่วนของ R_3 มีค่าเท่ากับ 0.7346 Ω
ค่าความต้านทานในส่วนของ R_4 มีค่าเท่ากับ 0.4635 Ω
ค่าความต้านทานในส่วนของ R_5 มีค่าเท่ากับ 0.2923 Ω

ตอบ

ตัวอย่างที่ 7.7 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบชันต์ 10 hp 230 V มีค่าความต้านทานจากขดลวดอาร์เมเจอร์รวมอินเตอร์โพล 0.39 Ω เมื่อทำงานเต็มพิกัดมีกระแสที่อาร์เมเจอร์ 37 A ความเร็วรอบ 500 r/min โดยความต้านทานเริ่มเดินแต่ส่วนเป็น 1.56 Ω, 0.78 Ω และ 0.39 Ω โดยอาร์เมเจอร์รีแอกชันต์ไม่นำมาคิด จงคำนวณหาค่ากระแสที่อาร์เมเจอร์ขณะเริ่มต้น กระแสอาร์เมเจอร์ก่อนสัมผัสปุ่มก่อนหน้า และความเร็วรอบในแต่ละตำแหน่ง (Mulukutla S. Sarmar and Mukesh K. Pathak, 2010: 484-485)

วิธีทำ โจทย์กำหนดให้ $V_t = 230$ V $R_a = 0.39\ \Omega$ $I_a = 37$ A

$R_1 = 1.56\ \Omega$, $R_2 = 1.56\ \Omega$ และ $R_3 = 0.38\ \Omega$

$$R_{t1} = R_1 + R_2 + R_3 + R_a$$

$$R_{t1} = 1.56 + 0.78 + 0.39 + 0.39 = 3.12\ \Omega$$

เมื่อมอเตอร์ทำงานเต็มพิกัดมี n = 500 r/min และความต้านทานเริ่มเดินถูกตัดไปหมดแล้ว เหลือเพียง R_a ดังนั้น $E_a = V_t - I_a R_a = 230 - (37 \times 0.39) = 215.57$ V

เมื่อคันปรับเริ่มมาสัมผัสตำแหน่งที่ 1 ได้กระแสขณะเริ่มเดิน ($I_{st} = I_{a1}$) ซึ่งเป็นกระแสที่อาร์เมเจอร์ขณะเริ่มต้นหาได้ดังนี้ $I_{a1} = \frac{V_t}{R_{t1}} = \frac{230}{3.12} = 73.72\ \text{A} \cong 74\ \text{A}$

เมื่อเวลาผ่านไปกระแสที่อาร์เมเจอร์จะเปลี่ยนแปลงลดลงมาที่พิกัด ($I_a = I_{a2} = 37$ A)

ดังนั้น $E_{a1} = V_t - I_a R_{t1} = 230 - (37 \times 3.11) = 114.93$ V

และความเร็วรอบ $n_1 = \frac{E_{a1}}{E_a} \times n = \frac{114.93}{215.57} \times 500 = 266.55$ r/min

เมื่อคันปรับเริ่มมาสัมผัสตำแหน่งที่ 2 โดยมอเตอร์ยังทำงานที่ความเร็วรอบ n_1 และแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ E_{a1} ซึ่งตำแหน่งนี้ R_1 ถูกตัดออกไป

ดังนั้น $R_{t2} = R_{t1} - R_1 = 3.12 - 1.56 = 1.56\ \Omega$

และกระแสอาร์เมเจอร์ $I_{a1} = \frac{V_t - E_{a1}}{R_{t2}} = \frac{230 - 114.93}{1.56} = 73.76\ \text{A} \cong 74\ \text{A}$

เมื่อเวลาผ่านไปกระแสที่อาร์เมเจอร์จะเปลี่ยนแปลงลดลงมาที่พิกัดอีกครั้งหนึ่ง ($I_a = I_{a2} = 37$ A)

ดังนั้น $E_{a2} = V_t - I_a R_{t2} = 230 - (37 \times 1.56) = 172.28$ V

และความเร็วรอบ $n_2 = \frac{E_{a2}}{E_a} \times n = \frac{172.28}{215.57} \times 500 = 399.55$ r/min

เมื่อคันปรับเริ่มมาสัมผัสตำแหน่งที่ 3 โดยมอเตอร์ยังทำงานที่ความเร็วรอบ n_2 และแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ E_{a2} ซึ่งตำแหน่งนี้ R_2 ถูกตัดออกไป

ดังนั้น $R_{t3} = R_{t2} - R_2 = 1.56 - 0.78 = 0.78\ \Omega$

และกระแสอาร์เมเจอร์ $I_{a1} = \frac{V_t - E_{a2}}{R_{t3}} = \frac{230 - 172.28}{0.78} = 74$ A

เมื่อเวลาผ่านไปกระแสที่อาร์เมเจอร์จะเปลี่ยนแปลงลดลงมาที่พิกัดอีกครั้งหนึ่ง ($I_a = I_{a2} = 37$ A)

ดังนั้น $E_{a3} = V_t - I_a R_{t3} = 230 - (37 \times 0.78) = 201.14$ V

และความเร็วรอบ $n_3 = \frac{E_{a3}}{E_a} \times n = \frac{201.14}{215.57} \times 500 = 466.5$ r/min

เมื่อคันปรับเริ่มมาสัมผัสตำแหน่งที่ 4 โดยมอเตอร์ยังทำงานที่ความเร็วรอบ n_3 และแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ E_{a3} ซึ่งตำแหน่งนี้ R_3 ถูกตัดออกไป ซึ่งเหลือเพียง R_a

ดังนั้น $R_{t4} = R_{t3} - R_1$

$= 0.78 - 0.39$

$= 0.39\ \Omega = R_a$

และกระแสอาร์เมเจอร์ $I_{a1} = \frac{V_t - E_{a3}}{R_{t4}} = \frac{230 - 201.14}{0.39} = 74$ A

เมื่อเวลาผ่านไปกระแสที่อาร์เมเจอร์จะเปลี่ยนแปลงลดลงมาที่พิกัดอีกครั้งหนึ่ง ($I_a = I_{a2} = 37$ A)

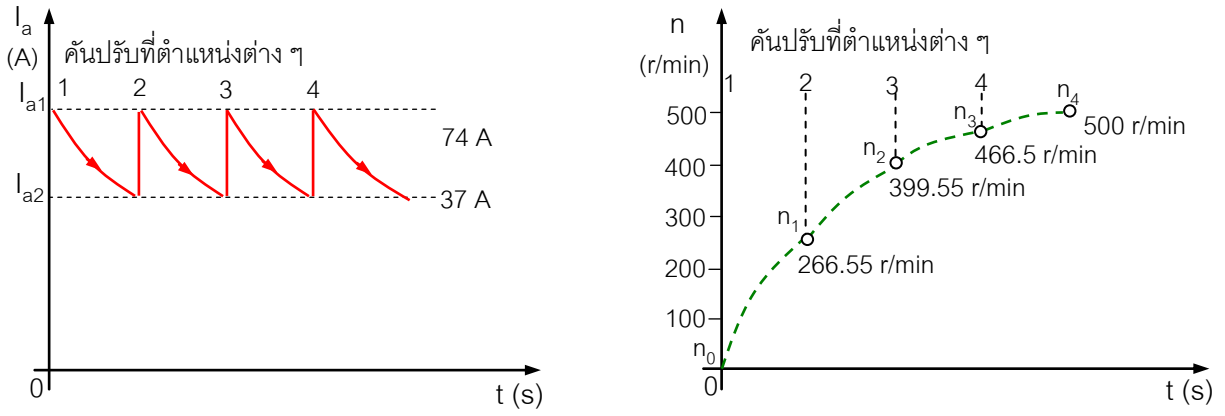
ดังนั้น $E_{a4} = V_t - I_a R_{t4} = 230 - (37 \times 0.39)$

$= 215.57$ V

และความเร็วรอบ $n_4 = \frac{E_{a4}}{E_a} \times n = \frac{215.57}{215.57} \times 500$

$= 500$ r/min

จากค่าที่คำนวณได้นำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่อาร์เมเจอร์และความเร็วรอบที่ตำแหน่งคันปรับต่าง ๆ เมื่อเวลาผ่านไป ดังรูปที่ 7.7



(ก) การเปลี่ยนแปลงของกระแสที่อาร์เมเจอร์ (ข) การเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบ

รูปที่ 7.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่อาร์เมเจอร์และความเร็วรอบเมื่อเวลาผ่านไป