หน่วยที่ 4

การวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง และประสิทธิภาพ

หัวข้อเรื่อง (Topics)

4.1 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นแยก
4.2 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชันต์
4.3 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซีรีส์
4.4 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอมปาวด์
4.5 การสูญเสียในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง
4.6 กำลังในส่วนต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง
4.7 ประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง
4.8 การคำนวณหาค่าต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง
4.9 ภาวะที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

สมรรถนะย่อย (Element of Competency)

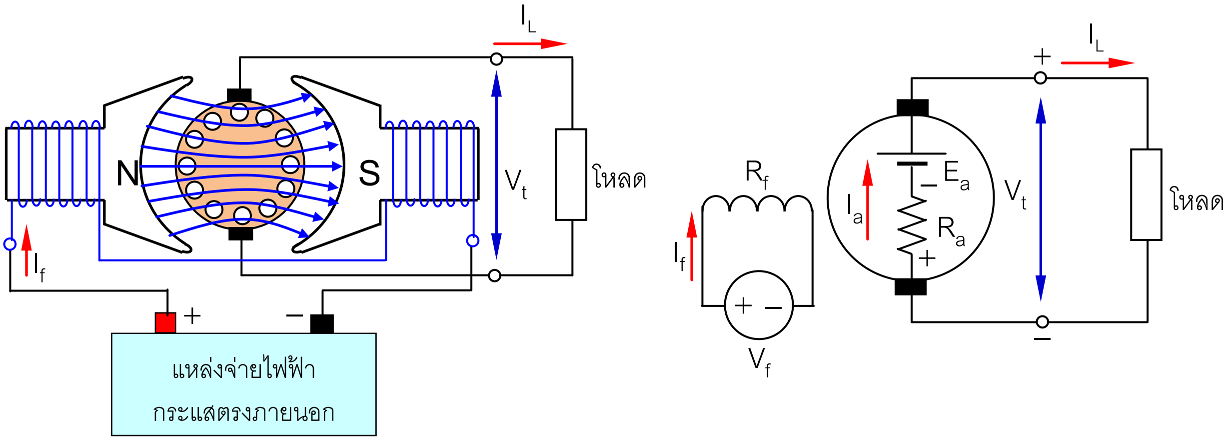
1. แสดงความรู้เกี่ยวกับการวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงและประสิทธิภาพ
2. ปฏิบัติการทดลองเกี่ยวกับกำลังไฟฟ้าสูญเสียและประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม (Behavioral Objectives)

1. อธิบายวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นแยกได้
2. อธิบายวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชันต์ได้
3. อธิบายวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซีรีส์ได้
4. อธิบายวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอมปาวด์ได้
5. อธิบายการสูญเสียในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงได้
6. อธิบายกำลังในส่วนต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงได้
7. อธิบายประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงได้
8. คำนวณหาค่าต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงได้
9. อธิบายภาวะที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้

4.1 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นแยก

แผนภาพวงจร (Schematic diagram) แสดงดังรูปที่ 4.1 (ก) ซึ่งภายในขดลวดอาร์เมเจอร์เทียบเท่าว่ามีแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (E_a) กับค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์ (R_a) ที่ต่อนุกรมกัน ส่วนที่ขดลวดสนามแม่เหล็กเทียบเท่าว่ามีค่าความต้านทานจากขดลวดสนามแม่เหล็ก (R_f) และมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็ก (I_f) และเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 4.1 (ข)



(ก) แผนภาพวงจร (ข) วงจรสมมูล

รูปที่ 4.1 แผนภาพวงจรและวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกระตุ้นแยกเมื่อมีโหลด

จากวงจรสมมูลรูปที่ 4.1 (ข) จะได้สมการว่า

$$E_a = V_t + I_aR_a$$

ดังนั้น $$V_t = E_a - I_aR_a \qquad \text{..... (4.1)}$$

เมื่อคิดผลของแรงดันไฟฟ้าลดลงเนื่องจากอาร์เมเจอร์รีแอกชัน

ดังนั้น $$V_t = E_a - I_aR_a - V_{ar} \qquad \text{..... (4.2)}$$

กำลังไฟฟ้าที่โหลดได้จากสมการ

$$P_L = V_tI_L \qquad \text{..... (4.3)}$$

กระแสที่ไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็กได้จากสมการ

$$I_f = \frac{V_f}{R_f} \qquad \text{..... (4.4)}$$

เมื่อ V_t = แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

E_a = แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่อาร์เมเจอร์

V_{ar} = แรงดันไฟฟ้าลดลงเนื่องจากอาร์เมเจอร์รีแอกชัน

I_a = กระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์

I_L = กระแสไฟฟ้าที่โหลด

I_f = กระแสไฟฟ้าที่ขดลวดสนามแม่เหล็ก

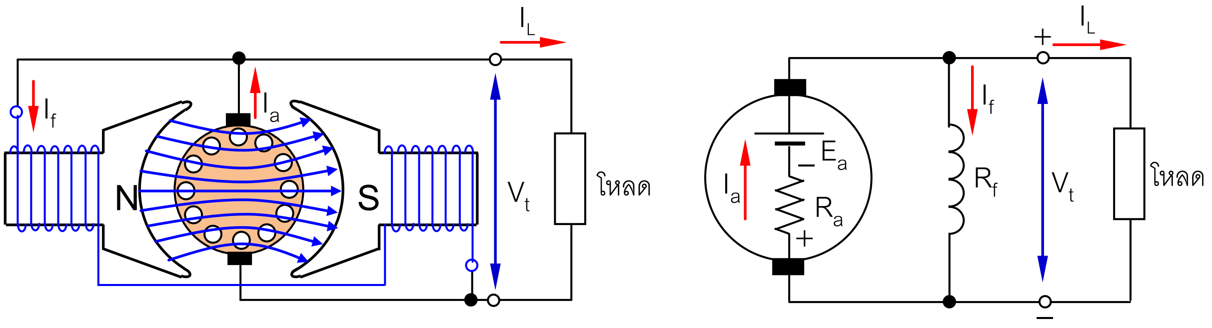
R_a = ความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์

R_f = ความต้านทานของขดลวดสนามแม่เหล็ก

P_L = กำลังไฟฟ้าที่โหลด

4.2 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชันต์

แผนภาพวงจรแสดงดังรูปที่ 4.2 (ก) ซึ่งวงจรสมมูลของขดลวดอาร์เมเจอร์และขดลวดสนามแม่เหล็กเหมือนกับแบบกระตุ้นแยก เพียงมีแหล่งจ่ายจากตัวมันเองมากระตุ้นและเขียนเป็นวงจรสมมูลทางไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 4.2 (ข)



(ก) แผนภาพวงจร (ข) วงจรสมมูล

รูปที่ 4.2 แผนภาพวงจรและวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชันต์เมื่อมีโหลด

จากวงจรสมมูลรูปที่ 4.2 (ข) จะได้สมการว่า

$$E_a = V_t + I_aR_a$$

ดังนั้น

$$V_t = E_a - I_aR_a$$

เมื่อคิดผลของแรงดันไฟฟ้าลดลงเนื่องจากอาร์เมเจอร์รีแอกชัน

ดังนั้น

$$V_t = E_a - I_aR_a - V_{ar}$$

กำลังไฟฟ้าที่โหลดได้จากสมการ

$$P_L = V_tI_L$$

กระแสที่ไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็กได้จากสมการ

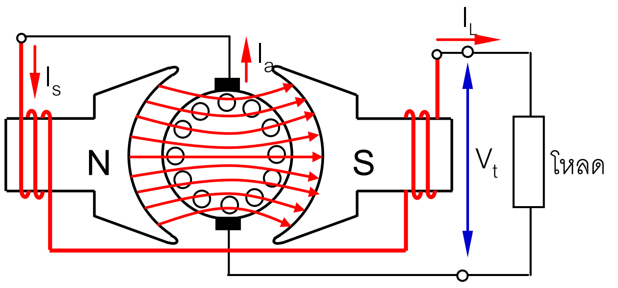
$$I_f = \frac{V_t}{R_f} \quad \text{..... (4.5)}$$

กระแสที่ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ได้จากสมการ

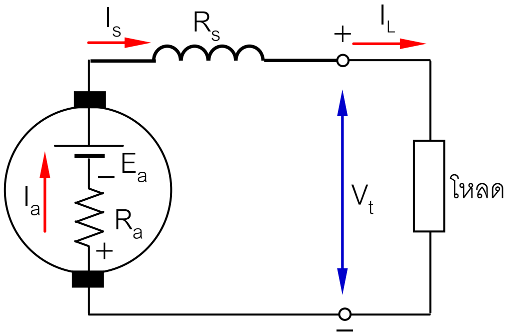
$$I_a = I_L + I_f \quad \text{..... (4.6)}$$

4.3 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซีรีส์

แผนภาพวงจรแสดงดังรูปที่ 4.3 (ก) ซึ่งวงจรสมมูลของขดลวดอาร์เมเจอร์เหมือนกับแบบชันต์ ส่วนขดลวดสนามแม่เหล็กแบบอนุกรม (R_S) ต่ออนุกรมกับอาร์เมเจอร์และเขียนเป็นวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 4.3 (ข)



(ก) แผนภาพวงจร



(ข) วงจรสมมูล

รูปที่ 4.3 แผนภาพวงจรและวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซีรีส์เมื่อมีโหลด

จากวงจรสมมูลรูปที่ 4.3 (ข) จะได้สมการว่า

$$E_a = V_t + I_a R_a + I_a R_s$$

ดังนั้น

$$V_t = E_a - I_a (R_a + R_s)$$

เมื่อคิดผลของแรงดันไฟฟ้าลดลงเนื่องจากอาร์เมเจอร์รีแอกชัน

ดังนั้น

$$V_t = E_a - I_a (R_a + R_s) - V_{ar}$$

กำลังไฟฟ้าที่โหลดได้จากสมการ

$$P_L = V_t I_L$$

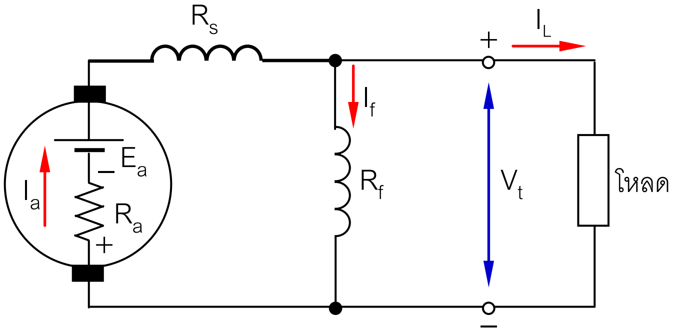
กระแสที่ไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็กแบบซีรีส์ (I_s) ได้จากสมการ

$$I_s = I_a = I_L \qquad \text{..... (4.7)}$$

4.4 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอมปาวด์

เพื่อให้เข้าใจได้มากขึ้นเกี่ยวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอมปาวด์เมื่อมีโหลด ซึ่งในที่นี้จะวิเคราะห์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กเสริมกัน ดังนั้นสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลได้อีก 2 แบบตามลักษณะการต่อ (สุธน แก่นต้น, 2556: 173-174) ดังนี้

4.4.1 **แบบลองชันต์คอมปาวด์** เป็นการนำขดลวดสนามแม่เหล็กแบบซีรีส์มาต่ออนุกรมกับอาร์-เมเจอร์ก่อนแล้วจึงนำมาต่อขนานกับขดลวดสนามแม่เหล็กแบบชันต์ ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบลองชันต์คอมปาวด์

จากวงจรสมมูลรูปที่ 4.4 จะได้สมการว่า

$$E_a = V_t + I_a(R_a + R_s)$$

เมื่อคิดผลของแรงดันไฟฟ้าลดลงเนื่องจากอาร์เมเจอร์รีแอกชัน ดังนั้น

ดังนั้น $$V_t = E_a - I_a(R_a + R_s) - V_{ar}$$

กำลังไฟฟ้าที่โหลดได้จากสมการ

$$P_L = V_t I_L$$

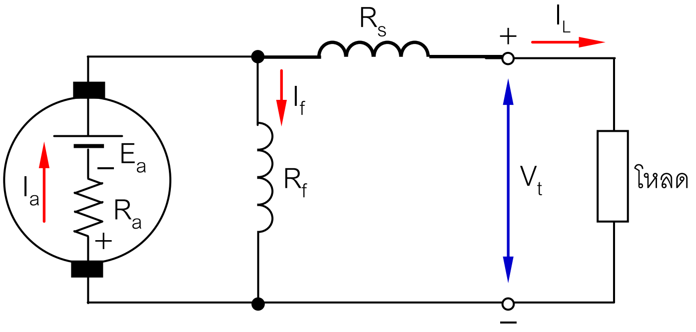
กระแสที่ไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็กแบบชันต์ ได้จากสมการ

$$I_f = \frac{V_t}{R_f}$$

กระแสที่ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ได้จากสมการ

$$I_a = I_L + I_f$$

4.4.2 **แบบช๊อตชันต์คอมปาวด์** เป็นการนำขดลวดสนามแม่เหล็กแบบชันต์มาต่อขนานกับอาร์-เมเจอร์ก่อนแล้วจึงนำมาต่ออนุกรมกับขดลวดสนามแม่เหล็กแบบซีรีส์ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบช๊อตชันต์คอมปาวด์

จากวงจรสมมูลรูปที่ 4.4 จะได้สมการว่า

$$E_a = V_t + I_a R_a + I_L R_s$$

ดังนั้น $$V_t = E_a - I_a R_a - I_L R_s$$

เมื่อคิดผลของแรงดันไฟฟ้าลดลงเนื่องจากอาร์เมเจอร์รีแอกชัน

ดังนั้น $V_t = E_a - I_aR_a - I_LR_s - V_{ar}$

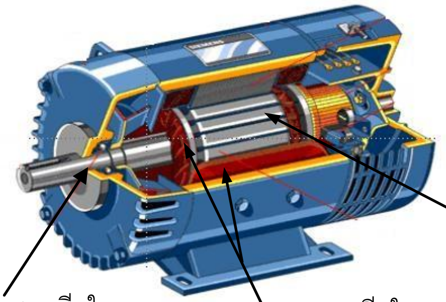
กำลังไฟฟ้าที่โหลดได้จาก $P_L = V_tI_L$

กระแสที่ไหลผ่านขดลวดสนามแม่เหล็กแบบชันต์ ได้จากสมการ

$$I_f = \frac{V_t + I_LR_s}{R_f} \qquad \text{..... (4.8)}$$

4.5 การสูญเสียในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้ายังไม่มีโหลดหรือมีโหลดก็ตาม จะมีการสูญเสียในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่ การสูญเสียในขดลวดทองแดง การสูญเสียในแกนเหล็กและการสูญเสียในทางกล (วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์, 2556: 221) ซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กลุ่มการสูญเสียของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

4.5.1 **การสูญเสียในขดลวดทองแดง** (Copper losses) เนื่องจากขดลวดทองแดงที่พันอยู่ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าความต้านทานและเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าขึ้นที่ขดลวด ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปและได้ออกมาในรูปของความร้อน ซึ่งการสูญเสียในขดลวดทองแดง แบ่งออกเป็น

1. การสูญเสียจากขดลวดสนามแม่เหล็กแบบชันต์ หาได้จากสมการ

$$P_f = I_f^2R_f \qquad \text{..... (4.9)}$$

2. การสูญเสียจากขดลวดสนามแม่เหล็กแบบซีรีส์ หาได้จากสมการ

$$P_S = I_S^2R_S \qquad \text{..... (4.10)}$$

3. การสูญเสียจากขดลวดอาร์เมเจอร์รวมกับการสัมผัสหน้าแปรงถ่าน หาได้จากสมการ

$$P_a = I_a^2R_a \qquad \text{..... (4.11)}$$

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในขดลวดทองแดงทั้งหมดกำหนดให้เป็น P_{CO} หาได้จากสมการ

$$P_{CO} = P_f + P_S + P_a \qquad \text{..... (4.12)}$$

4.5.2 **การสูญเสียในแกนเหล็ก** (Core losses) การสูญเสียนี้เกิดขึ้นที่แกนอาร์เมเจอร์ขณะที่แกนอาร์เมเจอร์หมุนเคลื่อนที่ผ่านขั้วเหนือและขั้วใต้ ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปและได้ออกมาในรูปของความร้อน แบ่งออกเป็น

1. การสูญเสียจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis losses) เกิดจากโมเลกุลของแกนเหล็กที่ทุ่นของอาร์เมเจอร์เกิดการกลับตัวไปมาตลอดเวลาขณะที่อาร์เมเจอร์หมุนไป โดยกำลังไฟฟ้าสูญเสียส่วนนี้บอกมาเป็นจำนวนเปอร์เซ็นต์ของกำลังเอาต์พุต กำหนดให้เป็น P_h หน่วยเป็นวัตต์

2. การสูญเสียจากกระแสไหลวน (Eddy current losses) เกิดจากกระแสที่ไหลวนในแกนเหล็กของอาร์เมเจอร์ขณะที่อาร์เมเจอร์หมุนไป โดยกำลังไฟฟ้าสูญเสียส่วนนี้บอกมาเป็นจำนวนเปอร์เซ็นต์ของกำลังเอาต์พุต กำหนดให้เป็น P_e หน่วยเป็นวัตต์

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียในแกนเหล็กกำหนดให้เป็น P_C หาได้จากสมการ

$$P_C = P_h + P_e \quad \text{..... (4.13)}$$

4.5.3 **การสูญเสียในทางกล** (Mechanical losses) การสูญเสียนี้เกิดขึ้นขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนไปซึ่งต้องใช้กำลังบางส่วนเพื่อชนะแรงทางกลเหล่านี้ บางครั้งเรียกว่า **การสูญเสียในการหมุน** (Rotationary losses) กำหนดให้เป็น P_{rot} ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าที่สูญเสียไปเช่นกัน แบ่งออกเป็น

1. การสูญเสียจากความฝืด (Friction losses) ซึ่งเกิดจากแรงกดของสปริงไปกดแปรงถ่าน กับซี่คอมมิวเตเตอร์ นอกจากนี้ยังเกิดจากการเสียดสีในตลับลูกปืนที่ยึดติดกับฝาปิดหัวท้ายกับแกนอาร์เมเจอร์

2. การสูญเสียจากแรงลมต้าน (Windage losses) การสูญเสียส่วนนี้เกิดจากการหมุนของอาร์เมเจอร์ โดยที่แกนเพลาของอาร์เมเจอร์จะติดตั้งใบพัดเพื่อระบายความร้อน เมื่อใบพัดนี้หมุนไปก็จะปะทะกับแรงลมจึงทำให้เกิดการสูญเสียค่านี้ขึ้น

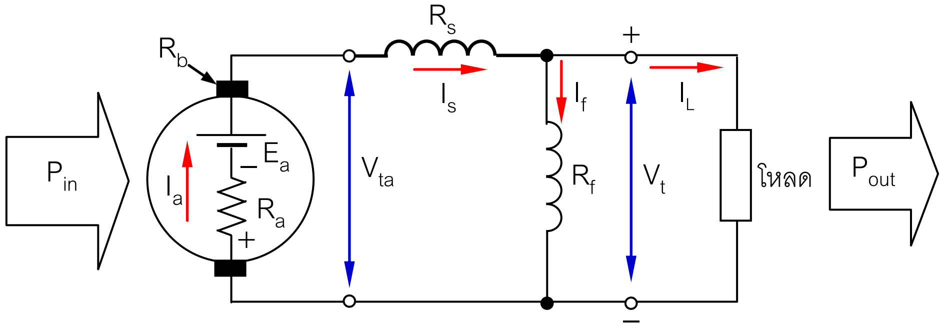
ผลรวมของการสูญเสียจากความฝืดและแรงลมต้านจะกำหนดให้เป็นการสูญเสียในการหมุน โดยกำลังไฟฟ้าสูญเสียส่วนนี้บอกมาเป็นจำนวนเปอร์เซ็นต์ของกำลังเอาต์พุต มีหน่วยเป็นวัตต์

ดังนั้นกำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กำหนดให้เป็น P_{loss} หาได้จากสมการ

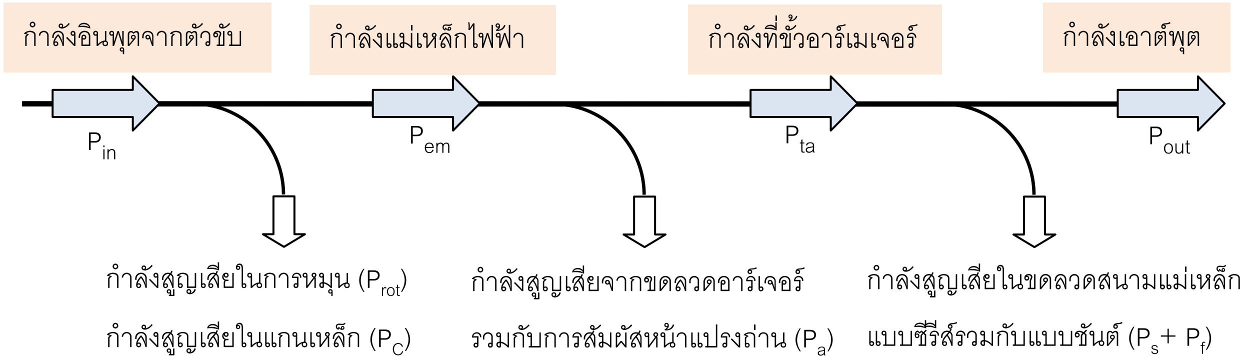
$$P_{loss} = P_{CO} + P_C + P_{rot} \quad \text{..... (4.14)}$$

4.6 กำลังในส่วนต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเมื่อยังไม่มีโหลดหรือมีโหลดก็ตาม จะมีการสูญเสียในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่ กลุ่มการสูญเสียในขดลวดทองแดง กลุ่มการสูญเสียในแกนเหล็กและกลุ่มการสูญเสียในการหมุน ดังรูปที่ 4.7 (ก) เป็นวงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอมปาวด์โดยมีกำลังอินพุตจ่ายเข้ามา มีกำลังเอาต์พุตออกไปที่โหลดและยังได้แสดงกำลังไฟฟ้าในส่วนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พร้อมทั้งกำลังสูญเสียที่แยกออกไป (Stephen J. Chapman, 1999: 499-500) ดังรูปที่ 4.7 (ข)



(ก) วงจรสมมูลเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอมปาวด์โดยมีกำลังอินพุตและกำลังเอาต์พุต



(ข) แสดงกำลังไฟฟ้าในส่วนต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอมปาวด์

(Stephen J. Chapman, 1999: 499-500)

รูปที่ 4.7 วงจรสมมูลของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอมปาวด์และส่วนต่าง ๆ ของกำลังไฟฟ้า

4.6.1 **กำลังอินพุตจากตัวขับ** (Input from prime mover) เป็นกำลังกลที่ใช้ในการขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ได้จากตัวต้นกำลัง เช่น กำลังจากเครื่องยนต์ กำลังที่เพลาของมอเตอร์ไฟฟ้า เป็นต้น โดยกำลังอินพุตจากตัวขับหาได้จาก

$$P_{in} = P_{em} + P_C + P_{rot} \qquad \text{..... (4.15)}$$

4.6.2 **กำลังแม่เหล็กไฟฟ้า** (Electromagnetic power) เป็นกำลังไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นในขดลวดอาร์เมเจอร์ ซึ่งเป็นกำลังที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแปรสภาพพลังงาน (Energy conversion) จากกำลังกลไปเป็นกำลัง ไฟฟ้า โดยกำลังแม่เหล็กไฟฟ้าหาได้จาก

$$P_{em} = E_a I_a \qquad \text{..... (4.16)}$$

หรือ

$$P_{em} = P_{ta} + P_a$$

4.6.3 **กำลังไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์** (Armature terminal power) เป็นกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขั้วของอาร์เมเจอร์ที่แปรงถ่านทั้งสองสัมผัสอยู่ โดยกำลังไฟฟ้าที่ขั้วอาร์เมเจอร์หาได้จาก

$$P_{ta} = V_{ta} I_a \qquad \text{..... (4.17)}$$

หรือ

$$P_{ta} = P_{out} + P_s + P_f$$

4.6.4 **กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต** (Output power) เป็นกำลังไฟฟ้าที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจ่ายให้กับโหลด โดยกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตหาได้จาก

$$P_{out} = V_t I_L \qquad ..... (4.18)$$

4.7 ประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

กำลังอินพุตที่จ่ายเข้ามาเพื่อขับเครื่องกำเนิดซึ่งเป็นกำลังกลและมีกำลังบางส่วนได้สูญเสียไป โดยกำลังที่เหลือเป็นกำลังไฟฟ้าทางเอาต์พุตหรือกำลังไฟฟ้าที่โหลด ถ้ากำหนดให้อัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตต่อกำลังไฟฟ้าอินพุต ก็คือประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั่นเอง

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \frac{\text{กำลังเอาต์พุต}}{\text{กำลังอินพุต}} \times 100$$

$$= \frac{\text{กำลังเอาต์พุต}}{\text{กำลังเอาต์พุต} + \text{กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด}} \times 100$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100 \qquad ..... (4.19)$$

4.8 การคำนวณหาค่าต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

ตัวอย่างที่ 4.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบกระตุ้นแยก มีค่าความต้านทานจากขดลวดอาร์เมเจอร์และความต้านทานจากขดลวดสนามแม่เหล็กเป็น 1.2 Ω และ 200 Ω ตามลำดับ มีแรงดันไฟฟ้าภายนอกจ่ายให้กับขดลวดสนามแม่เหล็ก 160 V จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลด 15 A ที่แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว 240 V มีการสูญเสียในการหมุน 290 W การสูญเสียในแกนเหล็ก 250 W ไม่คิดผลของอาร์เมเจอร์รีแอกชัน จงคำนวณหา

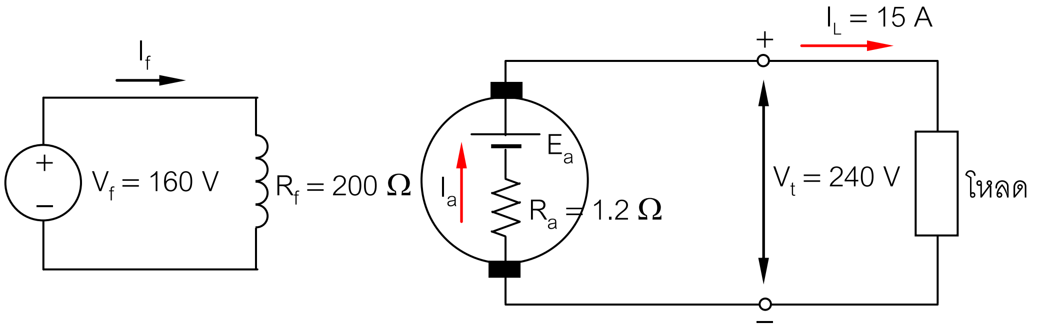
ก. แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่อาร์เมเจอร์

ข. กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด

ค. กำลังไฟฟ้าอินพุต

ง. ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

วิธีทำ เขียนวงจรสมมูลและกำหนดค่าต่าง ๆ ให้กับวงจร



จากวงจรสมมูลจะได้ $I_f = \frac{V_f}{R_f} = \frac{160}{200} = 0.8\ \text{A}$

$I_a = I_L = 15\ \text{A}$

ก. แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่อาร์เมเจอร์

$$E_a = V_t + I_a R_a = 240 + (15 \times 1.2)$$

$$E_a = 258\ \text{V}$$

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่อาร์เมเจอร์มีค่าเท่ากับ 258 V **ตอบ**

ข. กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด

กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากขดลวดสนามแม่เหล็ก

$$P_f = I_f^2 R_f = (0.8)^2 \times 200 = 128\ \text{W}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากอาร์เมเจอร์

$$P_a = I_a^2 R_a = (15)^2 \times 1.2 = 270\ \text{W}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก

$$P_c = 250\ \text{W}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในการหมุน

$$P_{rot} = 290\ \text{W}$$

ดังนั้นการสูญเสียทั้งหมด

$$P_{loss} = P_f + P_a + P_c + P_{rot}$$

$$= 128 + 270 + 250 + 290$$

$$P_{loss} = 938\ \text{W}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 938 W **ตอบ**

ค. กำลังไฟฟ้าอินพุต

$$P_{in} = P_{out} + P_{loss}$$

$$= V_t I_L + P_{loss} = (240 \times 15) + 938$$

$$P_{in} = 4538\ \text{W}$$

กำลังไฟฟ้าอินพุตมีค่าเท่ากับ 4538 W **ตอบ**

ง. ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{3600}{4538} \times 100$$

$$\eta = 79.33\ \%$$

ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 79.33 % **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 4.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบชันต์ มีค่าความต้านทานจากขดลวดอาร์เมเจอร์รวมแปรงถ่าน 0.25 Ω และจากขดลวดสนามแม่เหล็ก125 Ω ตามลำดับ มีกำลังไฟฟ้าที่โหลด 20 kW ที่แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว 250 V มีการสูญเสียในการหมุนรวมในแกนเหล็ก 3.2 kW โดยมีแรงดันไฟฟ้าลดลงเนื่องจากอาร์เมเจอร์รีแอกชัน 5.5 V จงคำนวณหา

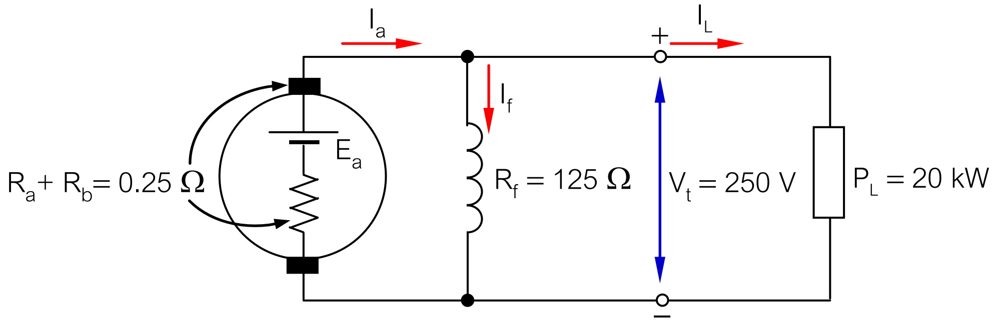
ก. แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่อาร์เมเจอร์

ข. กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากขดลวดทั้งหมดรวมแปรงถ่าน

ค. กำลังแม่เหล็กไฟฟ้า

ง. ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

วิธีทำ เขียนวงจรสมมูลและกำหนดค่าต่าง ๆ ให้กับวงจร



จากวงจรสมมูลกระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์หาได้ดังนี้

$$I_L = \frac{P_L}{V_t} = \frac{20\times10^3}{250} = 80\text{ A}$$

$$I_f = \frac{V_t}{R_f} = \frac{250}{125} = 2\text{ A}$$

$$I_a = I_f + I_L = 2+80 = 82\text{ A}$$

ก. แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่อาร์เมเจอร์

$$E_a = V_t + I_aR_a + V_{ar}$$

$$= 250 + (82\times0.25)+5.5$$

$$E_a = 276\text{ V}$$

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่อาร์เมเจอร์มีค่าเท่ากับ 276 V **ตอบ**

ข. กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากขดลวดทั้งหมดรวมแปรงถ่าน

$$P_{co} = P_f + P_a$$

$$= I_f^2R_f + I_a^2(R_a + R_b)$$

$$= (2^2\times125)+(82^2\times0.25)$$

$$P_{co} = 2181\text{ W}$$

ค. กำลังแม่เหล็กไฟฟ้า

$$P_{em} = E_a I_a = 276 \times 82$$
$$= 22632 \text{ W} = 22.632 \text{ kW}$$

กำลังแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 22.632 kW **ตอบ**

หรือกำลังแม่เหล็กไฟฟ้าหาได้จากสมการ

กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการลดลงเนื่องจากอาร์เมเจอร์รีแอกชัน

$$P_{em} = P_{out} + P_{co} + (V_{ar} I_a)$$
$$= 20000 + 2181 + (5.5 \times 82)$$

$P_{em} = 22632 \text{ W}$ เห็นว่าคำตอบมีค่าเท่ากัน

ง. ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

$$P_{in} = P_{em} + (P_{rot} + P_c) = 22.632\text{kW} + 3.2\text{kW}$$
$$= 25.832\text{kW}$$
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 = \frac{20\text{ kW}}{25.832\text{ kW}} \times 100$$
$$\eta = 77.42 \%$$

ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 77.42 % **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 4.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบซีรีส์ มีกำลังไฟฟ้าที่อินพุตมีค่าเท่ากับ 1200 W โดยให้ประสิทธิภาพ 80 % มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก 40 W กำลังไฟฟ้าสูญเสียในการหมุน 110 W มีค่าความต้านทานจากขดลวดเมเจอร์รวมกับขดลวดสนามแม่เหล็กแบบซีรีส์ 1.5 Ω จงคำนวณหา

ก. กำลังไฟฟ้าเอาต์พุต

ข. กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงทั้งหมด

ค. กระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากอาร์เมเจอร์และแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว

วิธีทำ

ก. กำลังไฟฟ้าอินพุต

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100$$
$$P_{out} = \frac{\eta}{100} \times P_{in} = \frac{80}{100} \times 1200 = 960 \text{ W}$$

กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตมีค่าเท่ากับ 960 W **ตอบ**

ข. กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงทั้งหมด

$$P_{in} = P_{out} + P_{loss}$$
$$P_{loss} = P_{in} - P_{out} = 1200 - 960 = 240 \text{ W}$$

แต่ $P_{loss} = P_{co} + P_c + P_{rot}$

ดังนั้น $P_{co} = P_{loss} - (P_c + P_{rot}) = 240 - (40 + 110)$

$P_{co} = 90\ \text{W}$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดทองแดงทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 90 W **ตอบ**

ค. กระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากอาร์เมเจอร์และแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว

$$P_{co} = I_a^2 (R_a + R_s)$$

$$I_a = \sqrt{\frac{P_{co}}{(R_a + R_s)}} = \sqrt{\frac{90}{1.5}} = 7.74\ \text{A}$$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากอาร์เมเจอร์มีค่าเท่ากับ 7.74 A **ตอบ**

หาแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วได้ดังนี้

$$V_t = \frac{P_L}{I_L} = \frac{P_L}{I_a} = \frac{960}{7.74} \quad (I_a = I_L)$$

$$V_t = 124\ \text{V}$$

แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วมีค่าเท่ากับ 124 V **ตอบ**

ตัวอย่างที่ 4.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบลองชันต์คอมปาวด์และสร้างเส้นแรงแม่เหล็กเสริมกัน มีค่าความต้านทานจากขดลวดอาร์เมเจอร์ จากขดลวดสนามแม่เหล็กแบบซีรีส์ จากขดลวดสนามแม่เหล็กแบบชันต์เป็น 0.5 Ω, 0.2 Ω และ 400 Ω ตามลำดับ มีกำลังไฟฟ้าที่โหลด เป็น 5 kW ที่แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 200 V มีกำลังไฟฟ้าสูญเสียในการหมุน 420 W กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก 180 W แรงดันไฟฟ้าลดลงเนื่องจากอาร์เมเจอร์รีแอกชันไม่นำมาคิด จงคำนวณหา

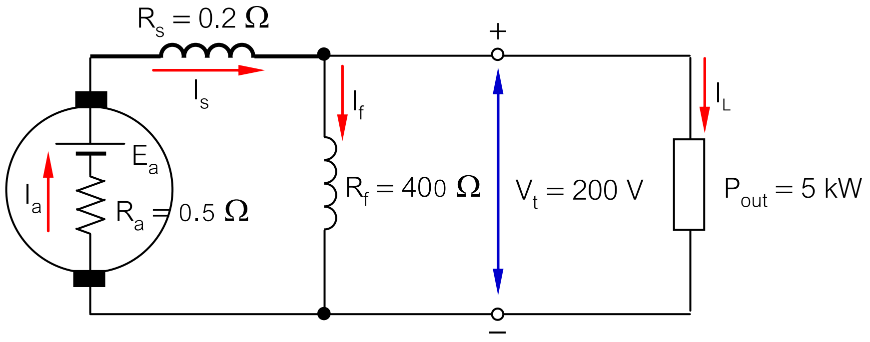
ก. แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่อาร์เมเจอร์

ข. กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด

ค. ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ง. เขียนกำลังไฟฟ้าในส่วนต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

วิธีทำ เขียนวงจรสมมูลทางไฟฟ้าและกำหนดค่าต่าง ๆ ให้กับวงจร



จากวงจรสมมูลหากระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์ก่อนได้ดังนี้

$$I_L = \frac{P_L}{V_t} = \frac{5 \times 10^3}{200} = 25 \text{ A}$$

$$I_f = \frac{V_t}{R_f} = \frac{200}{400} = 0.5 \text{ A}$$

$$I_a = I_s = I_f + I_L = 0.5 + 25 = 25.5 \text{ A}$$

ก. แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่อาร์เมเจอร์

$$E_a = V_t + I_a R_a + I_s R_s$$

$$= 200 + (25.5 \times 0.5) + (25.5 \times 0.2)$$

$$E_a = 217.85 \text{ V}$$

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่อาร์เมเจอร์มีค่าเท่ากับ 217.85 V **ตอบ**

ข. กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด $P_{co} = P_f + P_a + P_s = I_f^2 R_f + I_a^2 R_a + I_s^2 R_s)$

$$= (0.5^2 \times 400) + (25.5^2 \times 0.5) + (25.5^2 \times 0.2)$$

$$= 100 + 325.125 + 130.05$$

$$P_{co} = 555.175 \text{ W}$$

โจทย์กำหนดให้ $P_{rot} = 420$ W และ $P_c = 180$ W

$$P_{loss} = P_{co} + P_{rot} + P_c = 555.175 + 420 + 180$$

$$P_{loss} = 1155.175 \text{ W}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 1155.175 W **ตอบ**

ค. ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

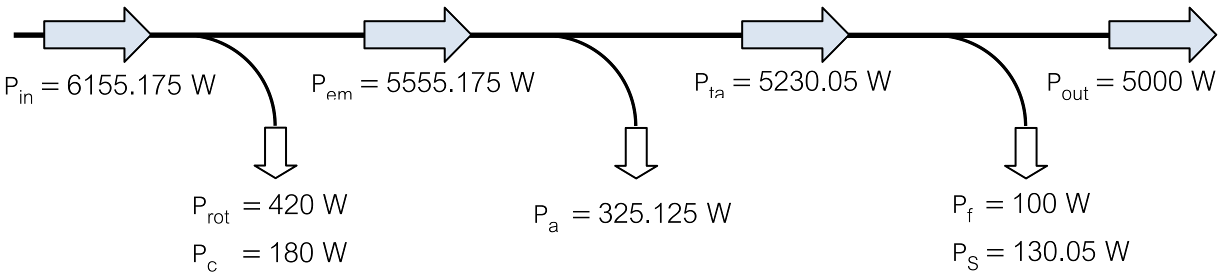
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \times 100$$

$$= \frac{5000}{(5000 + 1155.175)} \times 100$$

$$= 81.23$$

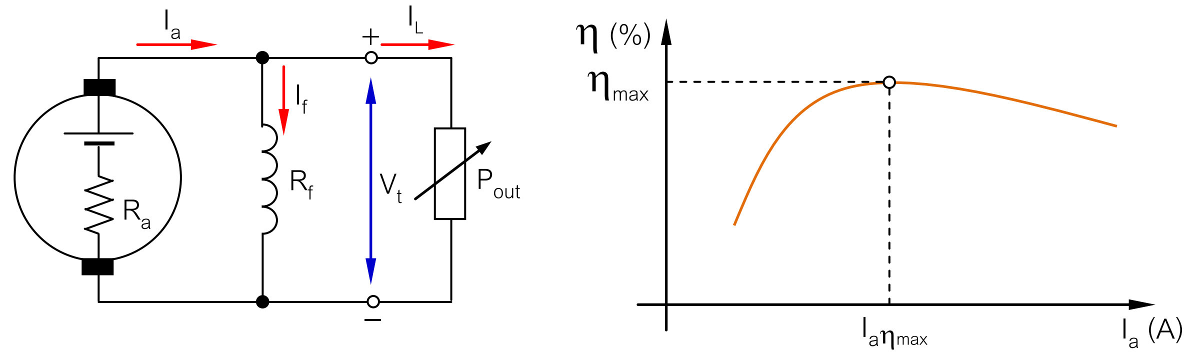
ประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 81.23 % **ตอบ**

ง. เขียนกำลังไฟฟ้าในส่วนต่าง ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า



4.9 ภาวะที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงผลทำให้กระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์เปลี่ยนแปลงด้วยดังรูปที่ 4.8 (ก) ซึ่งทำให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและกำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดอาร์เมเจอร์และในขดลวดซีรีส์เกิดการเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน แต่กำลังสูญเสียในการหมุน ในแกนเหล็กและจากขดลวดชันต์มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามกระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์ เมื่อกระแส I_a ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพค่อย ๆ เพิ่มขึ้นและมีกระแส I_a ค่าหนึ่งที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด จากนั้นจะค่อย ๆ มีค่าลดลง ดังรูปที่ 4.8 (ข)



(ก) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชันต์เมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง (ข) เส้นกราฟประสิทธิภาพเมื่อ I_a เพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.8 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชันต์เมื่อมีโหลดเปลี่ยนแปลงและประสิทธิภาพ

จากการเปลี่ยนแปลงของกระแส I_a นี้จะทำให้มีค่าหนึ่งที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นเมื่อพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบชันต์ ซึ่งหาค่าได้ดังนี้

เมื่อ $P_{out} = V_t I_L = V_t(I_a - I_f) = V_t I_a$

เนื่องจากกระแส I_f มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกระแส I_a ดังนั้นจึงกำหนดให้ $I_L = I_a$

$(P_a + P_s)$ = กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวดอาร์เมเจอร์และในขดลวดซีรีส์

P_{rot} = กำลังไฟฟ้าสูญเสียในการหมุน

P_c = กำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็ก

จากสมการของประสิทธิภาพ $$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{rot} + P_c + P_f + P_a}$$

$$\eta = \frac{V_t I_a}{V_t I_a + P_{rot} + P_c + P_f + I_a^2 R_a}$$

จากเรื่องค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดทำการอนุพันธ์ (Differentiate) ค่า η เทียบกับ I_a แล้วให้มีค่าเท่ากับศูนย์

$$\frac{d\eta}{dI_a} = 0 = \frac{d}{dI_a}\left(\frac{V_t I_a}{V_t I_a + P_{rot} + P_c + P_f + I_a^2 R_a}\right)$$

$$0 = \frac{(V_tI_a + P_{rot} + P_c + P_f + I_a^2R_a)\frac{d}{dI_a}(V_tI_a) - (V_tI_a)\frac{d}{dI_a}(V_tI_a + P_{rot} + P_c + P_f + I_a^2R_a)}{(V_tI_a + P_{rot} + P_c + P_f + I_a^2R_a)^2}$$

$$0 = (V_tI_a + P_{rot} + P_c + P_f + I_a^2R_a)(V_t) - (V_tI_a)(V_t + 0 + 0 + 0 + 2I_aR_a)$$

นำ V_t หารตลอดจะได้

$$0 = (V_tI_a + P_{rot} + P_c + P_f + I_a^2R_a) - (I_a)(V_t + 0 + 0 + 0 + 2I_aR_a)$$

$$0 = V_tI_a + P_{rot} + P_c + P_f + I_a^2(R_a - V_tI_a - 2I_a^2R_a$$

$$0 = P_{rot} + P_c + P_f - I_a^2R_a$$

$$I_a^2R_a = P_{rot} + P_c + P_f \qquad \text{..... (4.20)}$$

เห็นว่าเกิดกำลังไฟฟ้าสูงสุดเมื่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ซึ่งแปรค่าไปตามกระแสที่อาร์เมเจอร์มีค่าเท่ากับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในการหมุนรวมกับกำลังไฟฟ้าสูญเสียในแกนเหล็กและกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากขดลวดชันต์ซึ่งเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียคงที่ นั่นคือประสิทธิภาพจะสูงสุด เมื่อ

กำลังไฟฟ้าสูญเสียแปรค่าตามกระแสที่อาร์เมเจอร์ = กำลังไฟฟ้าสูญเสียคงที่

โดยกระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์จะมีค่าหนึ่งที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด กำหนดให้เป็น $I_{a\eta max}$ หาค่าได้ดังนี้

$$I_{a\eta max}^2 R_a = P_{rot} + P_c + P_f$$

$$I_{a\eta max}^2 = \frac{P_{rot} + P_c + P_f}{R_a}$$

$$I_{a\eta max} = \sqrt{\frac{P_{rot} + P_c + P_f}{R_a}} \qquad \text{..... (4.21)}$$

เมื่อพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบซีรีส์ จะได้

$$I_{a\eta max} = \sqrt{\frac{P_{rot} + P_c}{R_a + R_s}} \qquad \text{..... (4.22)}$$

เมื่อพิจารณาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบคอมปาวด์ซึ่งมีทั้งขดลวดซีรีส์และขดลวดชันต์ จะได้

$$I_{a\eta max} = \sqrt{\frac{P_{rot} + P_c + P_f}{R_a + R_s}} \qquad \text{..... (4.23)}$$

ตัวอย่างที่ 4.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแบบลองชันต์คอมปาวด์สร้างเส้นแรงแม่เหล็กเสริมกัน มีค่าความต้านทานจากขดลวดอาร์เมเจอร์ จากขดลวดสนามแม่เหล็กแบบซีรีส์ จากขดลวดสนามแม่เหล็กแบบชันต์เป็น 0.08 Ω 0.1 Ω และ 110 Ω ตามลำดับ มีกำลังไฟฟ้าที่โหลดเป็น 22 kW แรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว 220 V ให้ประสิทธิภาพ 80 % แรงดันไฟฟ้าลดลงเนื่องจากอาร์เมเจอร์รีแอกชันไม่นำมาคิด จงคำนวณหา

ก. กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด

ข. กำลังไฟฟ้าสูญเสียในการหมุนรวมการสูญเสียในแกนเหล็ก

ค. กระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์ที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงสุด

ง. ประสิทธิภาพสูงสุด

วิธีทำ

$$I_L = \frac{P_L}{V_t} = \frac{22\times10^3}{220} = 100\ \text{A}$$

$$I_f = \frac{V_t}{R_f} = \frac{220}{110} = 2\ \text{A}$$

$$I_a = I_f + I_L = 2+100 = 102\ \text{A}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในขดลวด

$$P_{co} = P_f + P_a + P_s$$

$$= I_f^2R_f + I_a^2R_a + I_S^2R_S)$$

$$= (2^2\times110)+(102^2\times0.08)+(102^2\times0.1)$$

$$= 440+832.32+1040.4$$

$$P_{co} = 2312.72\ \text{W}$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}\times100$$

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\frac{\eta}{100}} = \frac{22\times10^3}{\frac{80}{100}} = 27500\ \text{W}$$

ก. กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมด

$$P_{loss} = P_{in} - P_{out} = 27500-22000$$

$$P_{loss} = 5500\ \text{W}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 5500 W **ตอบ**

ข. กำลังไฟฟ้าสูญเสียในการหมุนรวมการสูญเสียในแกนเหล็ก

$$P_{rot} + P_C = P_{loss} - P_{co} = 5500-2312.72$$

$$P_{rot} + P_C = 3187.28\ \text{W}$$

กำลังไฟฟ้าสูญเสียในการหมุนรวมการสูญเสียในแกนเหล็กมีค่าเท่ากับ 3187.28W **ตอบ**

ค. กระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์ที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงสุด

$$I_{a\eta max} = \sqrt{\frac{P_{rot} + P_c + P_f}{R_a + R_s}}$$

$$I_{a\eta max} = \sqrt{\frac{3187.28 + 440}{0.08 + 0.1}}$$

$$I_{a\eta max} = 141.956 \quad A$$

กระแสไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์ที่ทำให้ประสิทธิภาพสูงสุดมีค่าเท่ากับ 141.956 A **ตอบ**

ง. ประสิทธิภาพสูงสุด

ประสิทธิภาพจะสูงสุดเมื่อ $(P_a + P_s) = (P_{rot} + P_c) + P_f = 3187.28 + 440 = 3627.28$ W

$$I_L = I_{a\eta max} - I_f = 141.956 - 2 = 139.956 \quad A$$

$$\eta_{max} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100$$

$$\eta_{max} = \frac{V_t I_L}{V_t I_L + (P_a + P_s) + (P_{rot} + P_c + P_f)} \times 100$$

$$\eta_{max} = \frac{220 \times 139.956}{(220 \times 139.956) + (3627.28) + (3627.28)} \times 100$$

$$\eta_{max} = \frac{30790.32}{38044.88} \times 100 = 80.93 \%$$

ประสิทธิภาพสูงสุดมีค่าเท่ากับ 80.93 % **ตอบ**