บทที่ 4

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

วัตถุประสงค์

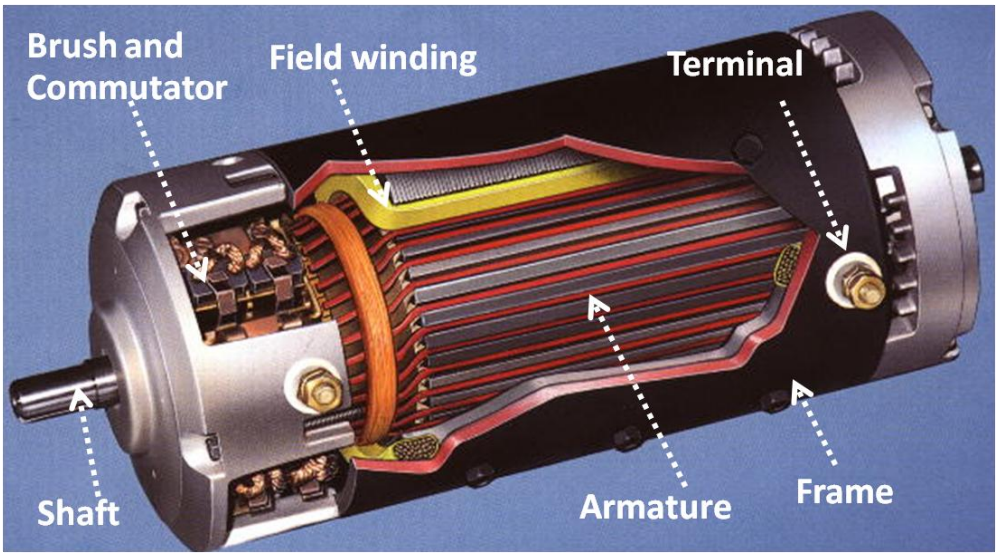
1. บอกชนิด โครงสร้าง ส่วนประกอบและชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้
2. บอกชนิดของกำลังสูญเสียในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้
3. คำนวณเกี่ยว กำลังไฟฟ้า และแรงบิด และประสิทธิภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้

3.1 บทนำ

มอเตอร์ไฟฟ้า คือ เครื่องกลไฟฟ้าทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล โดยอาศัยหลักการดังนี้ คือ เมื่อมีกระแสไหลผ่านลวดตัวนำซึ่งวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก จะมีแรงเกิดขึ้นที่ลวดตัวนำ ทำให้ลวดตัวนำเกิดการเคลื่อนที่

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีโครงสร้างและส่วนประกอบเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงทุกประการ การแบ่งชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจึงคล้ายกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงกล่าวคือ แบ่งเป็น 4 ประเภทดังนี้

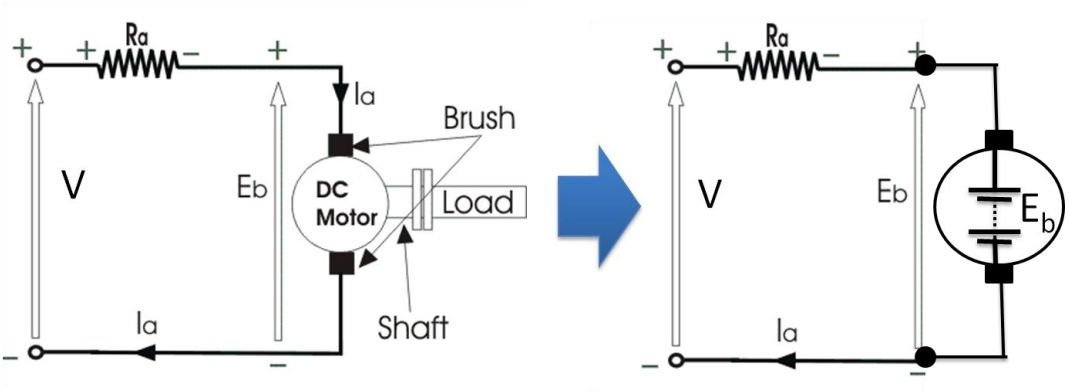
ก. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบแยกวงจรกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก (Separately excited D.C. motor)
ข. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน (D.C. shunt motor)
ค. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม (D.C. series motor)
ง. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม (D.C. compound motor)



รูปที่ 4-1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

4-2 แรงดันไฟฟ้า และแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1. แรงดันไฟฟ้าต้านกลับ(Back e.m.f) เกิดขึ้นขณะที่อาร์เมเจอร์หมุน ตัวนำที่อาร์เมเจอร์จะตัดกับเส้นแรงแม่เหล็ก ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่อาร์เมเจอร์ (E_b) ซึ่งจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ (E) จึงเรียกแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ว่าแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ และแรงดันไฟฟ้าต้านกลับนี้จะมีค่าน้อยกว่าแรงดันที่ป้อนเข้ามาเสมอ



รูปที่ 4-2 ทิศทางของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ

$$E_b = \frac{\phi ZN}{60} \times \frac{P}{A} \qquad (4\text{-}1)$$

และเนื่องจาก ZP/60 A เป็นค่าคงที่ของมอเตอร์แต่ละตัว ดังนั้นจึงได้

$$E_b = K_1 \phi N \qquad (4\text{-}2)$$

เมื่อ K_1 = ค่าคงที่ของมอเตอร์ = (Z P/60 A)

N = ความเร็วรอบของมอเตอร์ เป็น รอบต่อนาที

ϕ = จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กต่อหนึ่งขั้วเป็นเวเบอร์

จากรูปที่ 4-2 กำหนดให้

V = แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์

R_a = ความต้านทางในวงจรของอาร์เมเจอร์

I_a = กระแสอาร์เมเจอร์

E_b = แรงดันไฟฟ้าต้านกลับ

เราสามารถเขียนสมการกระแสอาร์เมเจอร์ได้ดังนี้

$$I_a = \frac{V - E_b}{R_a}$$

หรือ $V = E_b + I_a R_a$

หรือ $E_b = V - I_a R_a$

2. สมการแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์

เขียนสมการของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าได้ดังนี้ คือ

$$V = E_b + I_a R_a$$

นำ I_a คูณเข้าไปทั้งสองข้างของสมการ

$$VI_a = E_b I_a + I_a^2 R_a$$

กำหนดให้

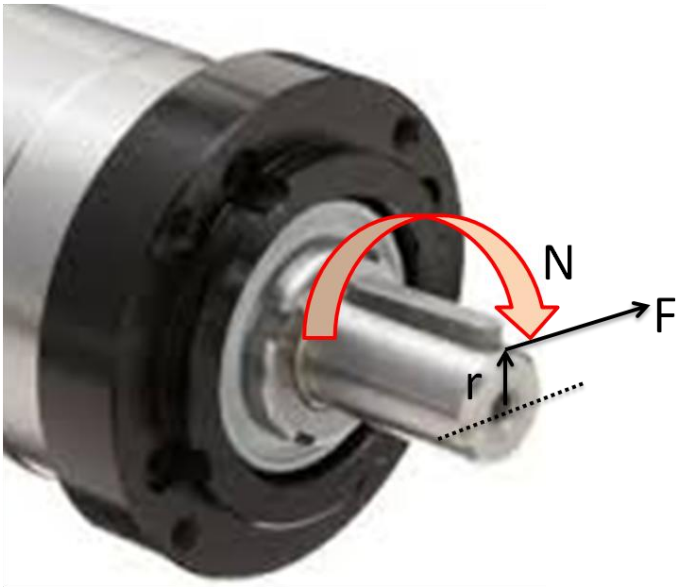
VI_a = กำลังอินพุตที่จ่ายให้กับอาร์เมเจอร์

$E_b I_a$ = กำลังไฟฟ้าส่วนที่เปลี่ยนรูปเป็นพลังงานกลในอาร์เมเจอร์

$I_a^2 R_a$ = การสูญเสียในขดลวดอาร์เมเจอร์

3. แรงบิดที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์ (Armature torque of a motor; T_a)

แรงบิด หมายถึง โมเมนต์ของแรงที่ทำให้เกิดการหมุนหรือการบิดรอบแกนเพลาของมอเตอร์ ซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้ผลคูณของแรงกับรัศมี ณ จุดที่แรงกระทำ เมื่อพิจารณาเพลาอันหนึ่งที่มีรัศมี r เมตร มีแรง F นิวตัน มากระทำกับเพลา ทำให้เพลานี้หมุนไปด้วยความเร็ว n รอบต่อวินาที



รูปที่ 4-3 แรงบิดที่เกิดขึ้นที่เพลาของอาร์เมเจอร์

ดังนั้น แรงบิด $T = F \times r$ นิวตัน-เมตร

งานที่ทำได้ 1 รอบจากแรง F = แรง × ระยะทาง

$= F \times 2\pi r$ จูลส์

งานที่ทำได้ต่อวินาที $= F \times 2\pi r \times n$ จูลส์/วินาที หรือวัตต์

$= (F \times r) \times 2\pi n$

$= T_a \times 2\pi n$

$= \dfrac{2\pi T_a N}{60}$ วัตต์ (4-3)

เมื่อ n = N/60 และ N = ความเร็วรอบต่อนาที (rpm)

กำลังกลที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์ = $E_b I_a$ วัตต์ (4-4)

$$\frac{2\pi T_a N}{60} = E_b I_a$$

$$\therefore \quad T_a = \frac{60 E_b I_a}{2\pi N} \text{ นิวตัน-เมตร}$$

หรือ $$\therefore \quad T_a = \frac{9.55 E_b I_a}{N} \qquad (4\text{-}5)$$

จากขนาน $$E_b = \frac{\phi Z N}{60} \times \frac{P}{A}$$

แทนค่า E_b ลงในสมการ $$T_a = \frac{9.55 E_b I_a}{N}$$

$$T_a = \left(0.159 \times Z \times \frac{P}{A}\right) \phi I_a \text{ นิวตัน-เมตร}$$

ค่าที่อยู่ภายในวงเล็บเป็นค่าคงที่ของแรงบิด

$$T_a = K_2 I_a$$

กำหนดให้ K_2 ค่าคงที่ของแรงบิด $= \left(0.159 \times Z \times \frac{P}{A}\right)$

4. แรงบิดที่ปลายเพลา (Shaft torque ; T_{sh})

$$P_{out} = T_{sh} \times 2\lambda N/60$$

กำหนดให้ T_{sh} = แรงบิดที่ปลายเพลา

N = ความเร็วเป็นรอบต่อนาที

หรือ P_{out} = กำลังเอาท์พุตของมอเตอร์

หรือ $$T_{sh} = \frac{P_{out}}{2\pi N / 60}$$

$$= \frac{60 P_{out}}{2\pi N}$$

$$T_{sh} = \frac{9.55 P_{out}}{N} \text{ N-m (นิวตัน-เมตร)} \qquad (4\text{-}6)$$

5. ความเร็วของมอเตอร์ (Speed of D.C. motor)

จากสมการ $E_b = V - I_a R_a$ หรือ $E_b = \frac{\phi Z N}{60} \times \frac{P}{A}$

ดังนั้น $$\frac{\phi ZN}{60}\times\frac{P}{A} = V-I_aR_a$$

$$N = \frac{V-I_aR_a}{\phi}\times\frac{60A}{ZP}\text{r.p.m.}$$

หรือ $$N = \frac{E_b}{\phi}\times\frac{60A}{ZP}$$

$$\therefore\ N = K_3\frac{E_b}{\phi} \qquad (4\text{-}7)$$

กำหนดให้ K_3 เป็นค่าคงที่ของความเร็ว $\frac{60A}{ZP}$

จากสมการจะพบว่าความเร็วของมอเตอร์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ (E_b) และเป็นสัดส่วนผกผันกับเส้นแม่เหล็ก (ϕ) หรือ $N\alpha I_a/\phi$

ก. กรณีมอเตอร์แบบอนุกรม

กำหนดให้ K_1 = ความเร็วของมอเตอร์เมื่อขับโหลดค่าหนึ่ง

I_{al} = กระแสอาร์เมเจอร์

ϕ_1 = เส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว

และ N_2, I_{a2} และ ϕ_2 เป็นค่าที่สอดคล้องกัน แต่โหลดของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงเป็นอีกค่าหนึ่ง ดังนั้นจึงได้ว่า

$$N_1\ \alpha\ \frac{E_{bl}}{\phi_1} \quad \text{เมื่อ} \quad E_{bl} = V-I_{al}R_a$$

$$N_2\ \alpha\ \frac{E_{b2}}{\phi_2} \quad \text{เมื่อ} \quad E_{b2} = V-I_{a2}R_a$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{E_{b2}}{E_{b1}}\times\frac{\phi_1}{\phi_2} \qquad (4\text{-}8)$$

ก่อนที่ขั้วแม่เหล็กจะถึงจุดอิ่มตัว ; $\phi\alpha I_a$

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{E_{b2}}{E_{b1}}\times\frac{\phi_1}{\phi_2} \qquad (4\text{-}9)$$

ข. กรณีมอเตอร์แบบขนาน

มีสมการของความเร็วเช่นเดียวกับมอเตอร์แบบอนุกรม ดังนั้น ถ้าแรงดันป้อน V ของมอเตอร์แบบขนานคงที่ จะได้ ϕ คงที่ด้วย ดังนั้น $\phi_1 = \phi_2$

$$\therefore \quad \frac{N_2}{N_1} = \frac{E_{b2}}{E_{bl}} \qquad (4\text{-}10)$$

6. ความเร็วเรกกูเรชั่น (Speed regulation)

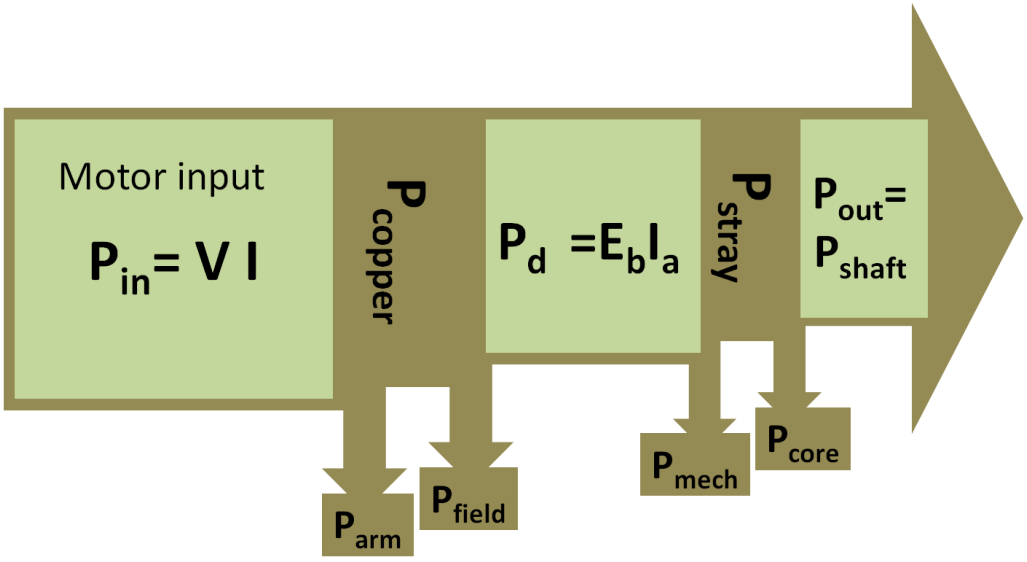
หมายถึง การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของมอเตอร์จากสภาวะโหลดเต็มพิกัดมาเป็นสภาวะไม่มีโหลด ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด อัตราการเปลี่ยนแปลงนี้จะอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ของความเร็วรอบในสภาวะโหลดเต็มพิกัด เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{ความเร็วเรกกูเรชั่น} = \frac{N_o - N_F}{N_F} \times 100 \qquad (4\text{-}11)$$

กำหนดให้ N_o = ความเร็วรอบเมื่อไม่มีโหลด (no-load)

N_F = ความเร็วรอบเมื่อโหลดเต็มพิกัด (full-load)

7. การสูญเสียและประสิทธิภาพ (Efficiency and Losses)



รูปที่ 4-4 แสดงการสูญเสียและประสิทธิภาพ

การสูญเสียในขดลวดทองแดง = $P_{in} - P_d = P_{Copper}$

การสูญเสียในแกนเหล็กและความฝืด = $P_d - P_{out} = P_{Stray}$

ประสิทธิภาพของมอเตอร์ $\eta_c = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100$ (4-12)

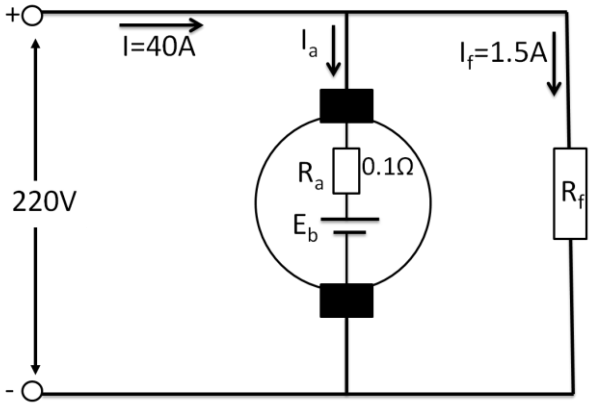
ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า $\eta_e = \frac{P_d}{P_{in}} \times 100$ (4-13)

ประสิทธิภาพทางกล $\eta_m = \frac{P_{out}}{P_d} \times 100$ (4-14)

ตัวอย่างที่ 4-1 มอเตอร์แบบขนานตัวหนึ่ง มี 4 ขั้วแม่เหล็ก ใช้กับแรงดันไฟฟ้า220 V พันขดลวดแบบแลปมี 600 ตัวนำ ใช้กระแสไฟฟ้า 40 A จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ามีกำลังเอาต์พุต 5 kW ขดลวดฟิลด์มีกระแส 1.5 A อาร์เมเจอร์มีความต้านทาน 0.1Ωและมีเส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว 25 mWb คำนวณหา

(ก) ความเร็วรอบ

(ข) แรงบิดที่เกิดขึ้นเป็น N-m



วิธีทำ

กระแสอาร์เมเจอร์ $I_a = I - I_f = 40 - 1.5 = 38.5\,A$

$E_b - V - I_a R_a = 220V - (38.5\,A \times 0.1\Omega) = 216.15V$

(ก) ความเร็วรอบ $E_b = \frac{\phi ZN}{60} \times \frac{P}{A}$

$216.15V = \frac{25 \times 10^{-3} \times 600 \times N}{60} \times \frac{4}{4}$

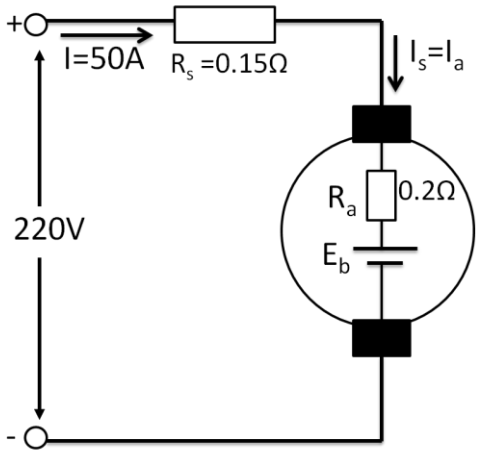
$N = 864.6$ r.p.m.

(ข) แรงบิดที่เกิดขึ้น $T_{sh} = \frac{9.55P_{out}}{N}$

$= \frac{9.55 \times 5{,}000}{864.6}$

$= 55.22 \quad N-m$

ตัวอย่างที่ 4-2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรมเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้า 220V เข้าที่ขั้วอินพุตจะกินกระแสไฟฟ้า 50A มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็ว 1,000 rpm. ถ้าอาร์เมเจอร์มีความต้านทาน 0.2Ω และขดลวดอนุกรมมีความต้านทาน 0.15 Ω ตามลำดับ ถ้ามีการสูญเสียในแกนเหล็กและความฝืด 500 W จงหาแรงบิดที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์ และกำลังเอาต์พุตของมอเตอร์



วิธีทำ

แรงบิดในอาร์เมเจอร์ $T = \frac{9.55 E_b I_a}{N}$

$E_b = V - I_a R_a - I_s R_s$

$= 220\,V - (50\,A \times 0.2\Omega) - (50\,A \times 0.15\Omega)$

$= 202.5 \text{ V}$

$T = \frac{9.55 \times 202.5V \times 50A}{1{,}000\,r.p.m}$

$= 96.69 \quad N-m$

การสูญเสียในขดลวดอาร์เมเจอร์และซีรีส์ฟิลด์ $= I_a^2 R_a + I_s^2 R_s$

$= \left(50^2 \times 0.2\Omega\right) + \left(50^2 \times 0.15\Omega\right)$

$= 875\ \text{W}$

การสูญเสียในแกนเหล็กและความฝืด $= 500\ \text{W}$

$\therefore$ การสูญเสียทั้งหมด $= 875W + 500W$

$= 1{,}375\ \text{W}$

กำลังอินพุตของมอเตอร์ $= VI$

$= 220V \times 50A$

$= 11{,}000\ \text{W}$

กำลังเอาต์พุตของมอเตอร์ $= 11{,}000W - 1{,}375W$

$= 9.625\ \text{kW}$

ตัวอย่างที่ 4-3 จงคำนวณหากำลังงานกลที่เพลาของมอเตอร์แบบอนุกรม โดยมอเตอร์มีประสิทธิภาพ 83.5 % ความเร็วรอบ 550 rpm. เมื่อมีกระแส 65A ความต้านทานของมอเตอร์ 0.2 Ω จำนวน เส้นแรงแม่เหล็กต่อขั้ว 25 mWbขดลวดอาร์เมเจอร์พันแบบแลป มีตัวนำทั้งหมด 1,200 ตัวนำ

วิธีทำ

จาก $P_{in} = P_d + Copper\,loss$

$= E_b I_a + I^2R$

$E_b = \dfrac{\phi ZN}{60} \times \dfrac{P}{A}$

เนื่องจากขดลวดอาร์เมเจอร์พันแบบแลป P = A

$E_b = \dfrac{25 \times 10^{-3} wb \times 1{,}200 \times 550\, r.p.m}{60}$

$= 275\ \text{V}$

$\therefore\ P_{in} = \left(275\,V \times 65\,A\right) + \left(65\,A^2 \times 0.2\Omega\right)$

$= 18{,}720\ \text{W}$

$P_{out} = \dfrac{\eta \times P_{in}}{100} = \dfrac{83.5 \times 18{,}720W}{100} = 15{,}631.2W$

แบบฝึกหัดบทที่ 4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จงเลือกคำตอบที่ถูกต้องที่สุดเพียงคำตอบเดียว

1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดใดที่ให้แรงบิดสูงที่สุด
   ก. แยกวงจรกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก ข.แบบขนาน
   ค.แบบอนุกรม ง.แบบผสม
2. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดใดที่มีขดลวดสนามแม่เหล็กสองชุด
   ก. แยกวงจรกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก ข.แบบขนาน
   ค.แบบอนุกรม ง.แบบผสม
3. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดใดที่ขดลวดสนามแม่เหล็กมีความต้านทานต่ำที่สุด
   ก. แยกวงจรกระแสกระตุ้นสนามแม่เหล็ก ข.แบบขนาน
   ค.แบบอนุกรม ง.แบบผสม

4.ข้อใดคือสมการแรงบิดที่เพลาของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

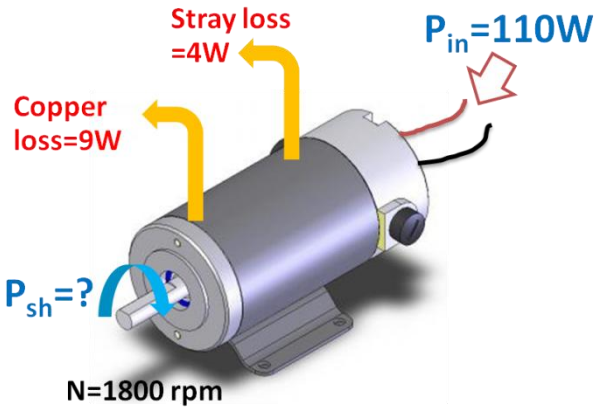
ก. $\frac{9.55P_{out}}{N}$ ข. $\frac{9.55P_{a}}{N}$ ค. $\frac{9.55P_{in}}{N}$ ง. $\frac{9.66P_{out}}{rpm}$

5. Copper losses หมายความถึง กำลังสูญเสียใน.....
   ก. มอเตอร์ ข.ขดลวดอาร์เมเจอร์
   ค.ขดลวดสนามแม่เหล็ก ง. ถูก ข้อ ข และ ค
6. ข้อใดคือสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ก. $E_b = \frac{\phi ZA}{60} \times \frac{P}{N}$ ข. $E_b = \frac{\phi ZN}{60} \times \frac{P}{A}$

ค. $E_b = \frac{\phi ZA}{120} \times \frac{P}{N}$ ง. $E_b = \frac{\phi 2ZA}{60} \times \frac{P}{N}$

จากรูปต่อไปนี้ใช้ตอบคำถามข้อ 7-9



7.กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตเท่ากับข้อใด

ก. 91W ข. 97W ค. 101W ง. 86W

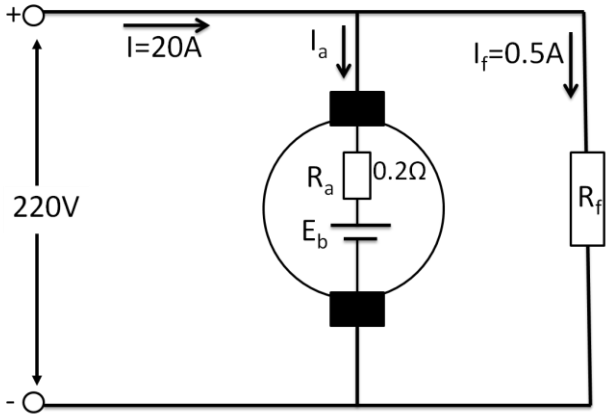
8.กำลังไฟฟ้าที่อาร์เมเจอร์เท่ากับข้อใด

ก. 99W ข. 100W ค. 101W ง. 102W

9.ประสิทธิภาพของมอเตอร์เท่ากับ ร้อยละ.....

ก. 98.7 ข. 91.2 ค. 88.2 ง. 88.7

จากรูปต่อไปนี้ใช้ตอบคำถามข้อ 10-14



มอเตอร์ขนาด 3kW มี 4 ขั้วแม่เหล็ก พันขดลวดแบบแลป 800 ตัวนำ และ ϕ=20mWb

10.กระแสอาร์มาเจอร์เท่ากับ.....A

ก. 19.5 ข. 17.5 ค. 16.7 ง. 16.2

11.ความเร็วรอบของมอเตอร์เท่ากับ.....rpm

ก. 990.4 ข. 846.1 ค. 820.6 ง. 810.4

12.แรงบิดที่เพลาของมอเตอร์เท่ากับ.....N-m

ก. 29 ข. 31.4 ค. 34.3 ง. 35

13.แรงดันไฟฟ้าต้านกลับในอาร์มาเจอร์เท่ากับ.....V

ก. 219.5 ข. 216.1 ค. 216.7 ง. 210.2

14. จากตัวอย่างที่ 4-3 จงหาค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กและความฝืด (P_{Stray})

ก. 2.244kW ข. 2.422kW ค. 2200W ง. 1200W