

เครื่องจักรกลไฟฟ้าและการประยุกต์ใช้งาน

อ.พิชิต ลำยอง

คณะอนุกรรมการสวัสดิการและสมาชิกสัมพันธ์ สภาวิศวกร

เครื่องจักรกลไฟฟ้าและการประยุกต์ใช้งาน

การประยุกต์ใช้งานเครื่องจักรกลไฟฟ้า

พื้นฐานเครื่องจักรกลไฟฟ้า

การควบคุมและป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้า

Electrical Machines

ปลายศตวรรษที่ 19

DC machine

AC machine

Generator

Motor



อ.พิชิต ถ้ายอง



Electric machines

ปลายศตวรรษที่ 19
ค.ศ.1880



Semiconductor devices

Digital electronics

Personal Computer (PC)

Power electronics

Digital communications

Beginning of the Information Age

Servo motor



AI

Battery technology

NdFeB magnet

Nano technology

M2M, HMI

IoT

หลังสงครามโลกครั้งที่ 2

Inverter

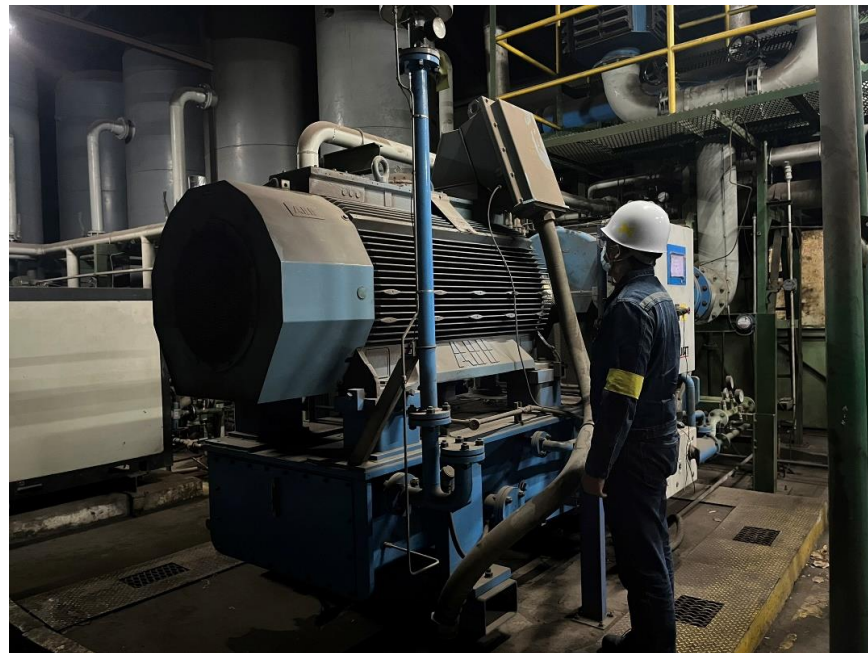
กลางศตวรรษที่ 20
ค.ศ.1950-1980

ต้นศตวรรษที่ 21
ค.ศ.2000-2024

Industrial Revolution

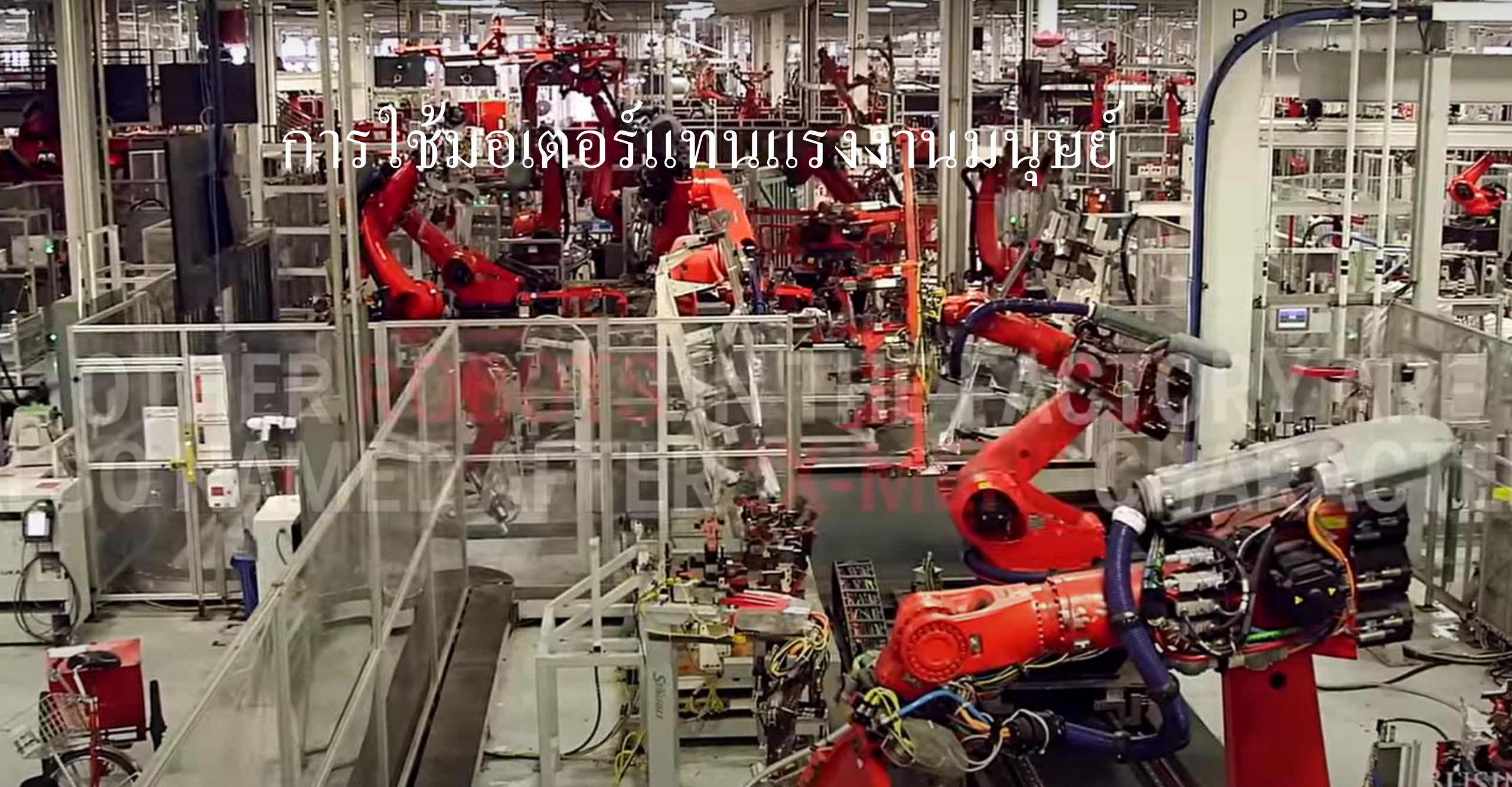
เครื่องจักรกลไฟฟ้า

การใช้งานในภาคธุรกิจ



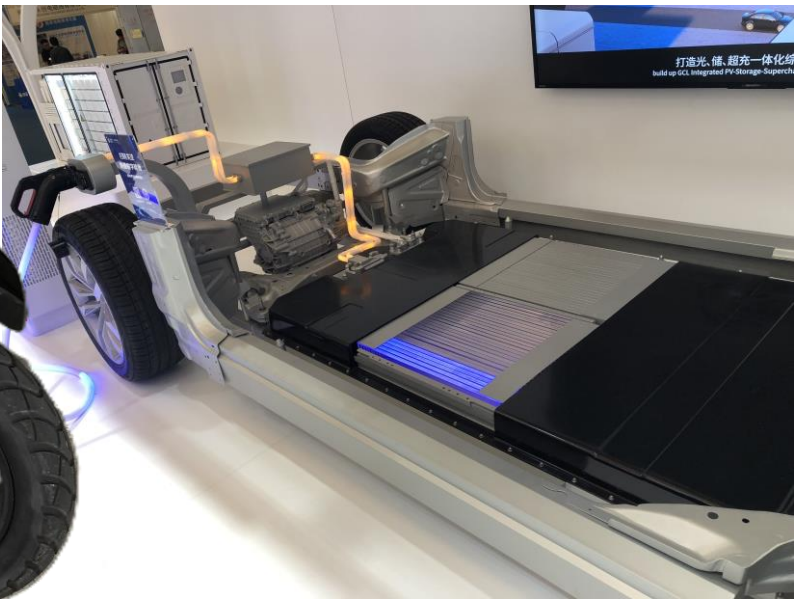
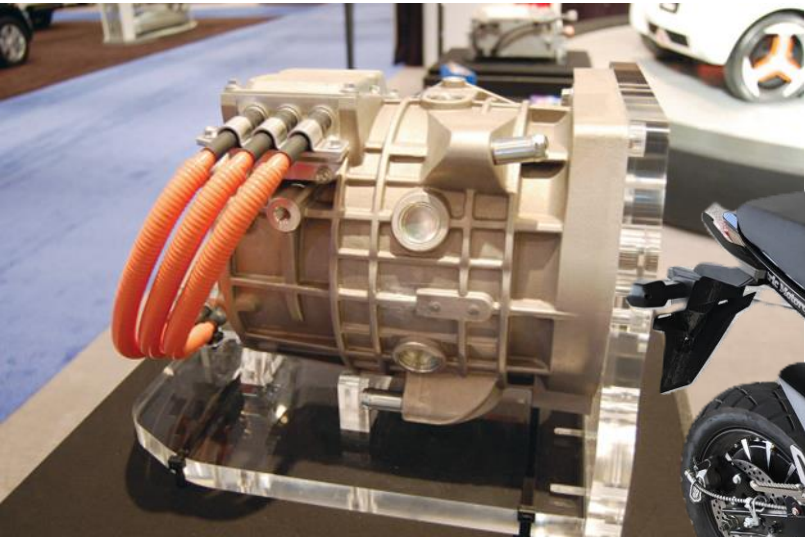
อ.พิชิต ลำยอง

การใช้มอเตอร์แทนแรงงานมนุษย์



มอเตอร์ขับเคลื่อนรถไฟฟ้า

มอเตอร์ถูกนำมาใช้แทนเครื่องยนต์สันดาปภายใน



มอเตอร์ขับเคลื่อนเครื่องอำนวยความสะดวกแทนมนุษย์



อ.พิชิต ถ้ายอง



พื้นฐานเครื่องจักรกลไฟฟ้า

กำลังทางไฟฟ้าและกำลังทางกลที่ป้อนเข้าและจ่ายออกจากเครื่องจักรกลไฟฟ้า

กำลังที่สูญเสียในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

หลักการทำงานของเครื่องจักรกลไฟฟ้า (มอเตอร์ไฟฟ้า)

พื้นฐานเครื่องจักรกลไฟฟ้า

มอเตอร์ทำงานปกติ ?



กำลังทางกลจ่ายออก

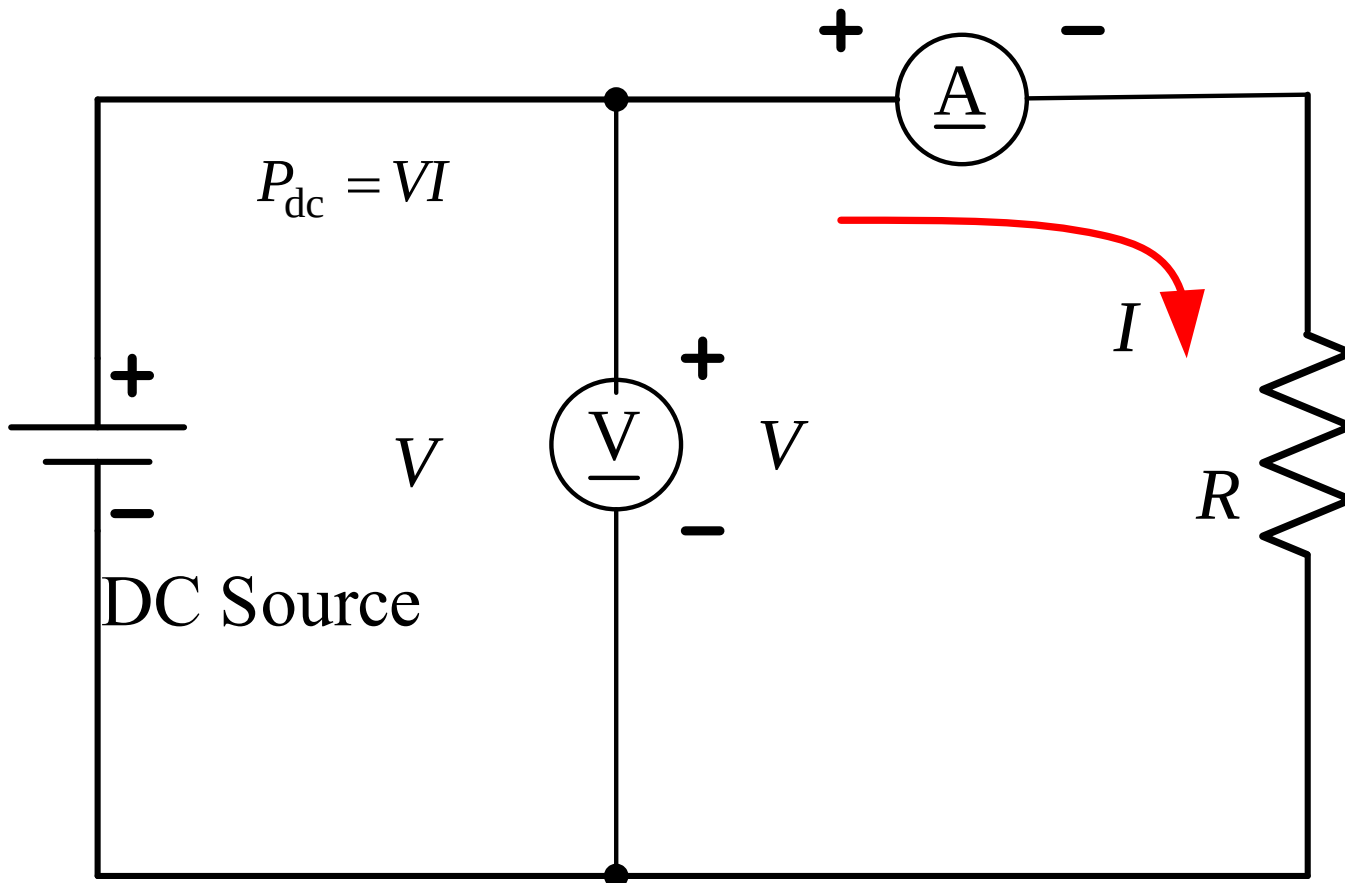
$$P_{o/p} = T_l \omega_r$$

กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า
(ไฟฟ้ากระแสลับ)

$$P_{i/p} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \phi$$

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Electrical power supply)

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง



$$P_{dc} = VI$$

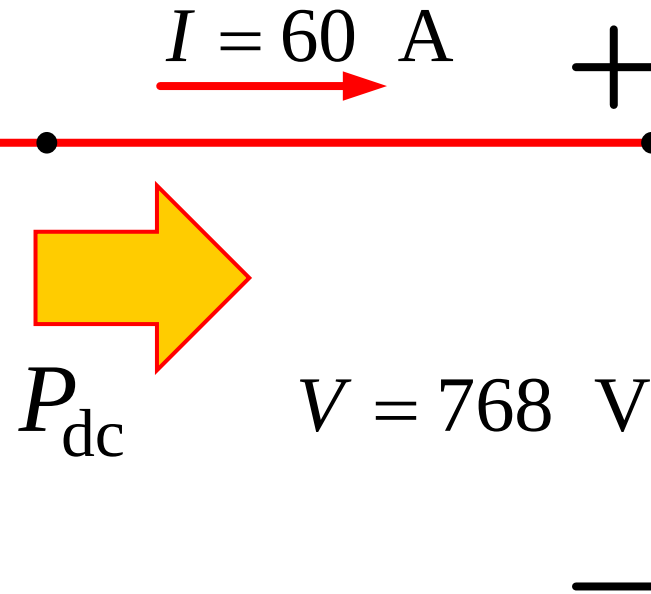
$$P_{i/p,dc} = VI$$

$$P_{i/p,dc} = (\text{voltage}) \times (\text{current})$$

DC supply (Solar panel)



DC load (Battery)



$$P_{dc} = VI = 768 \times 60 = 46,080 \text{ W} \approx 46 \text{ kW}$$

ไฟฟ้ากระแสสลับ

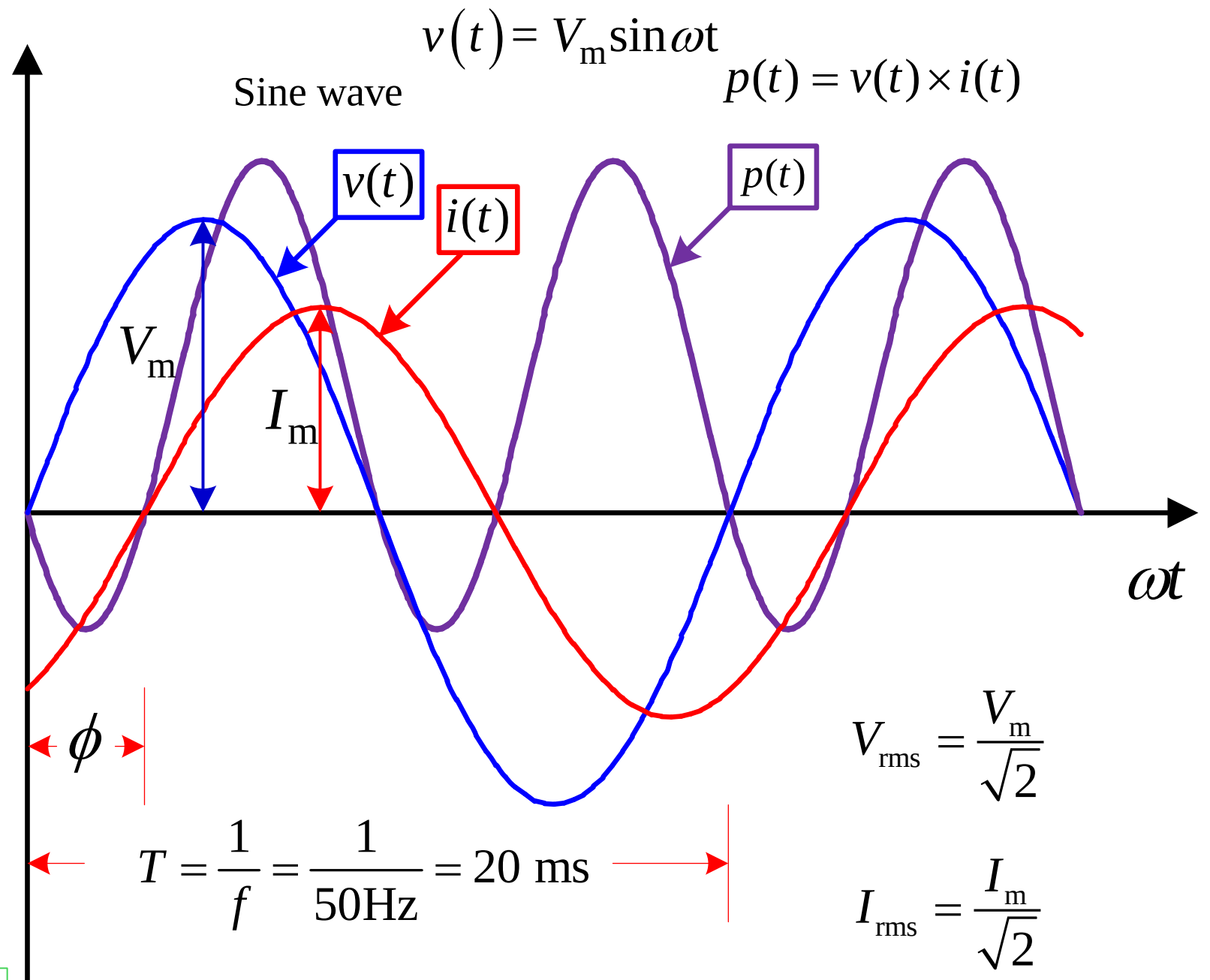
ค่าของแรงดันและกระแส
จะเปลี่ยนแปลงกับเวลา

รูปสัญญาณเป็นแบบ Sine
wave ซึ่งจะระบุค่าสูงสุด
ของสัญญาณและความถี่

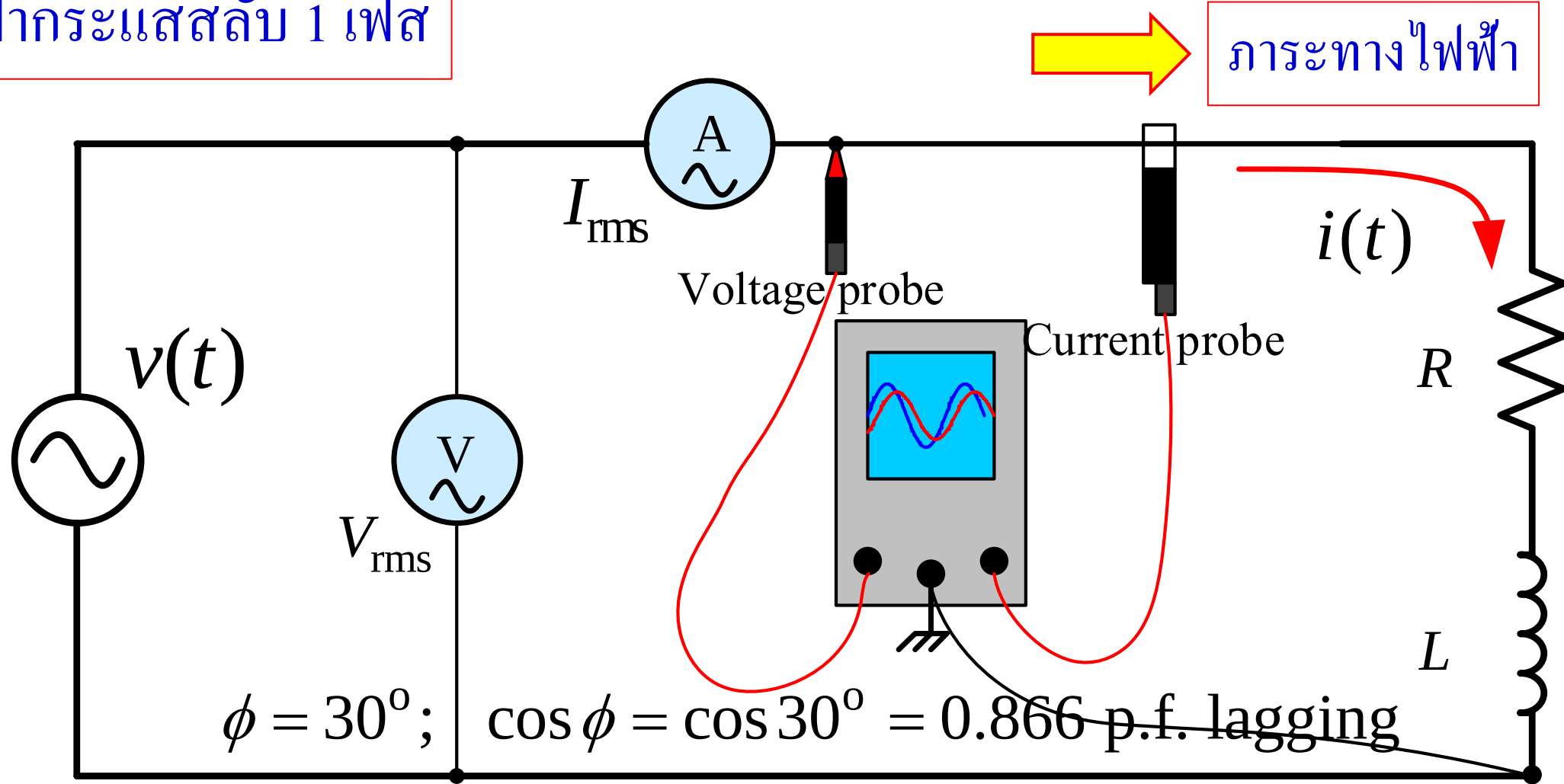
$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$V_m = 325 \text{ V}$$

$$\Rightarrow V_{\text{rms}} = 230 \text{ V}$$



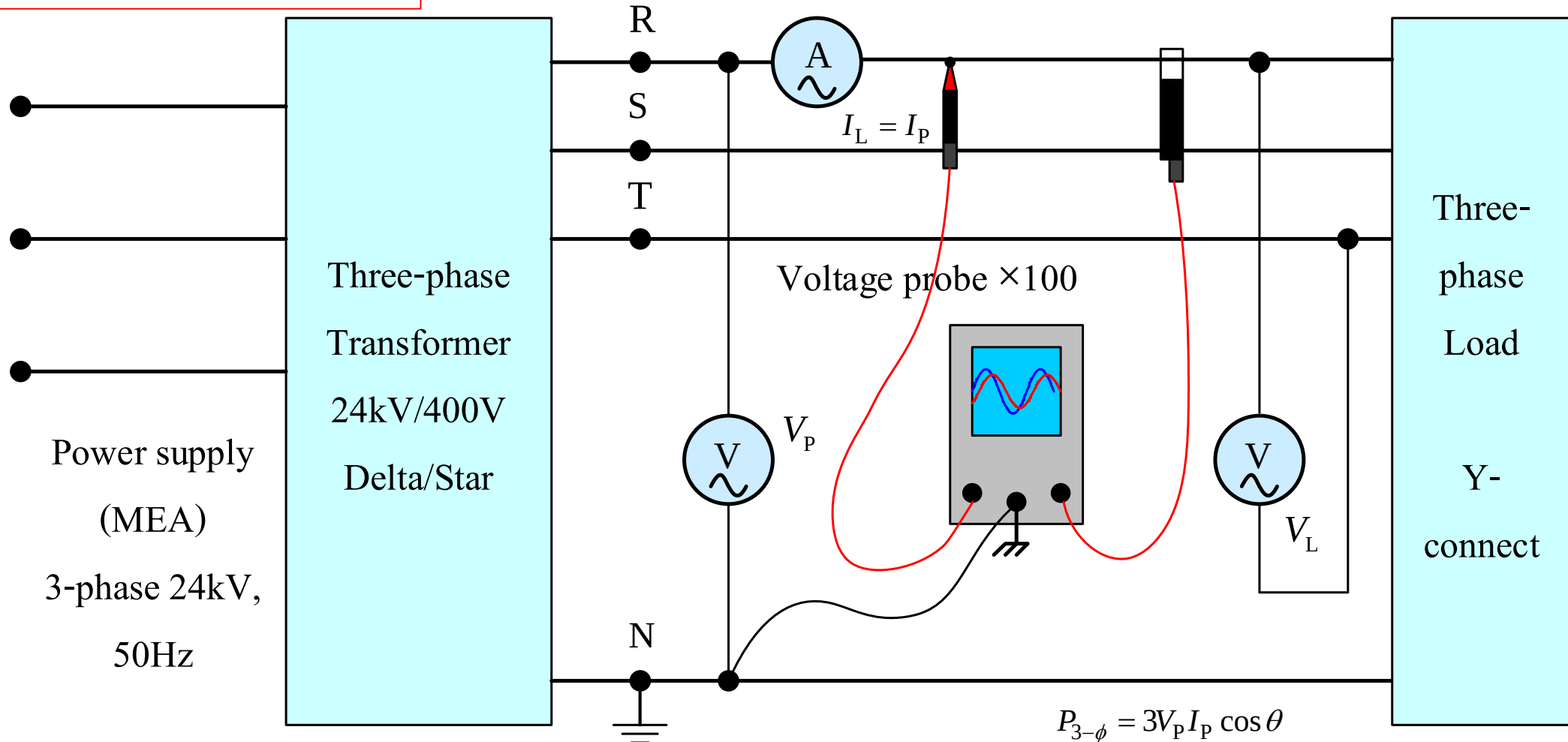
ไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส



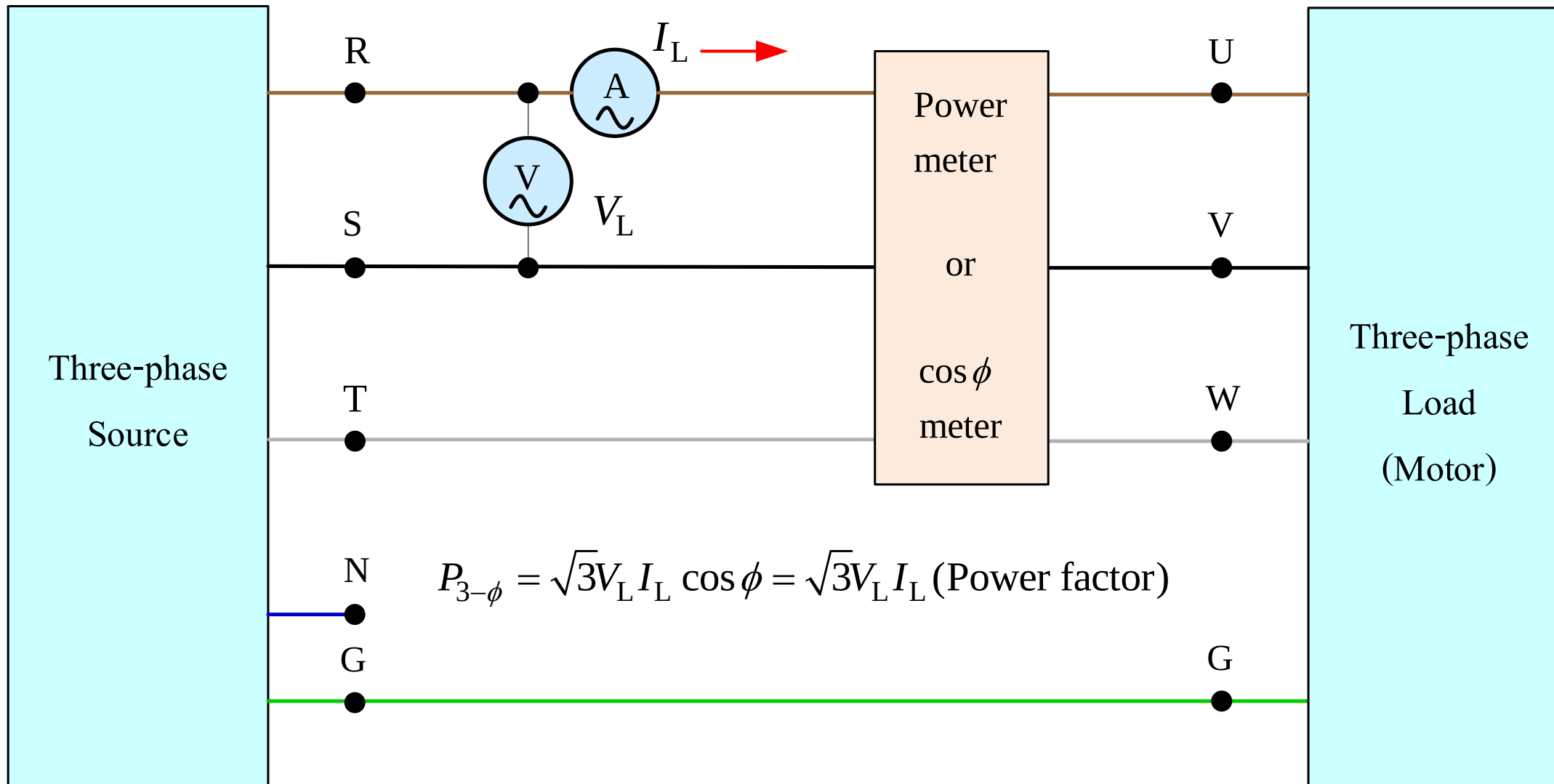
$$P = V_{rms} I_{rms} \cos \phi = V_{rms} I_{rms} \text{ (Power factor)}$$

ไฟฟ้ากระแสลับ 3 เฟส

ภาระทางไฟฟ้า

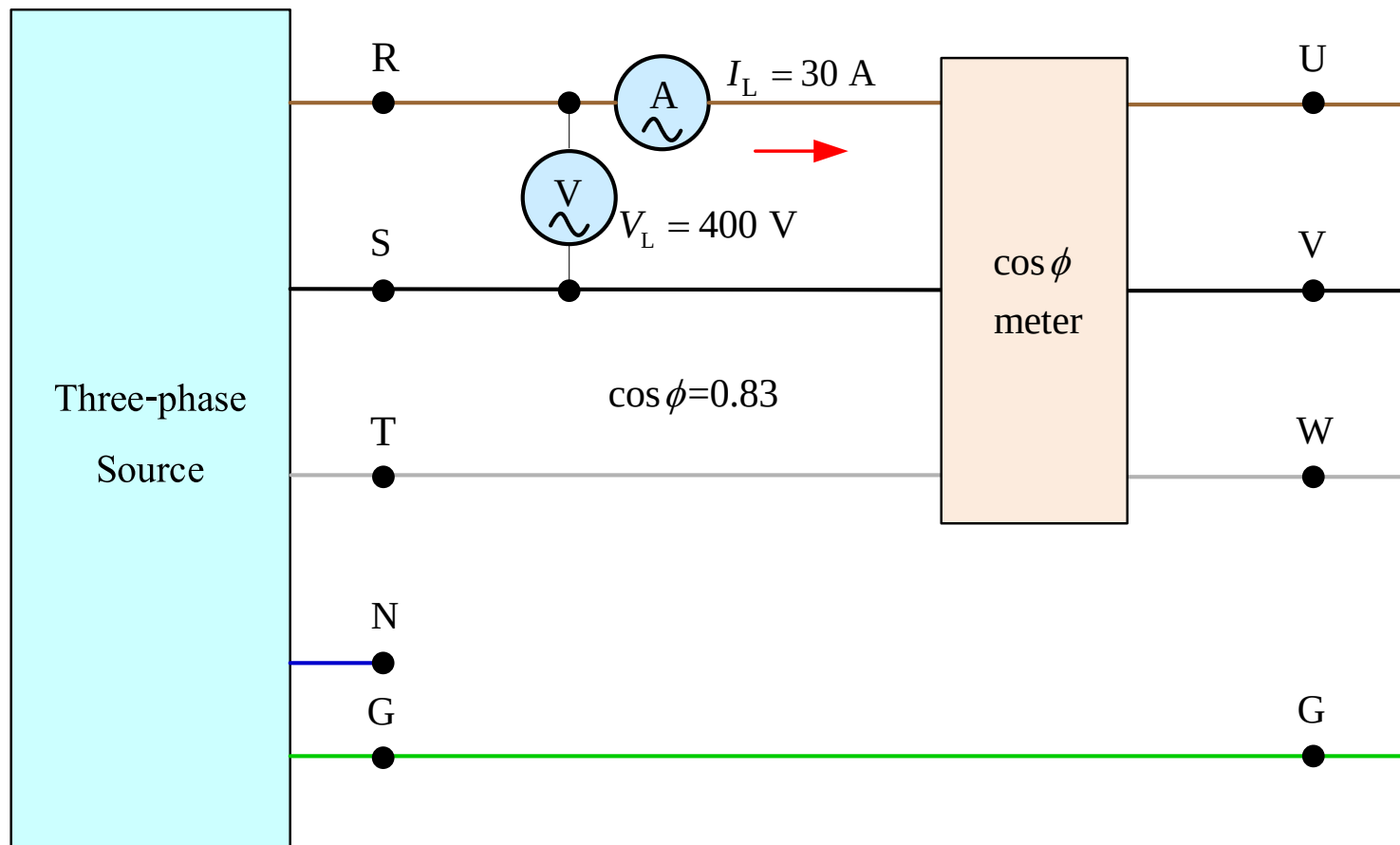


$$P_{3-\phi} = 3V_P I_P \cos \phi = 3V_P I_P (\text{Power factor})$$



$$P_{3-\phi} = \sqrt{3}V_L I_L \cos \phi = \sqrt{3}V_L I_L (\text{Power factor})$$

$$P_{3-\phi} = \sqrt{3}V_L I_L \cos \phi = \sqrt{3}V_L I_L (\text{Power factor})$$

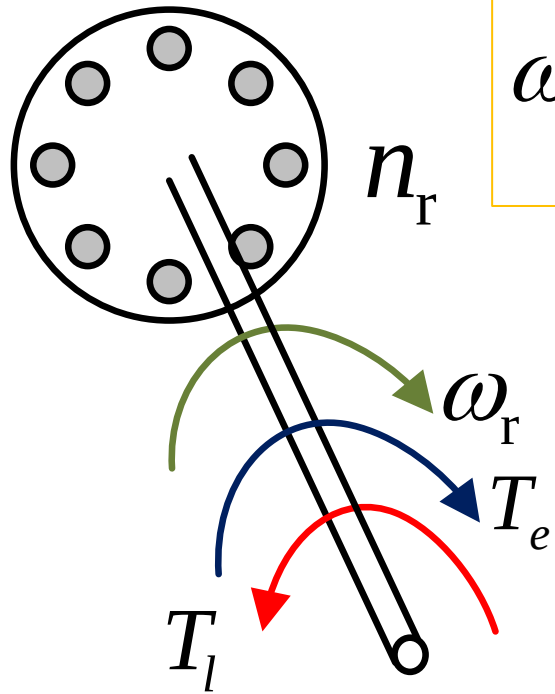


$$P_{3-\phi} = \sqrt{3}V_L I_L \cos \phi = \sqrt{3} \times 400 \times 30 \times 0.83 = 17251\text{ W} \approx 17.3\text{ kW}$$

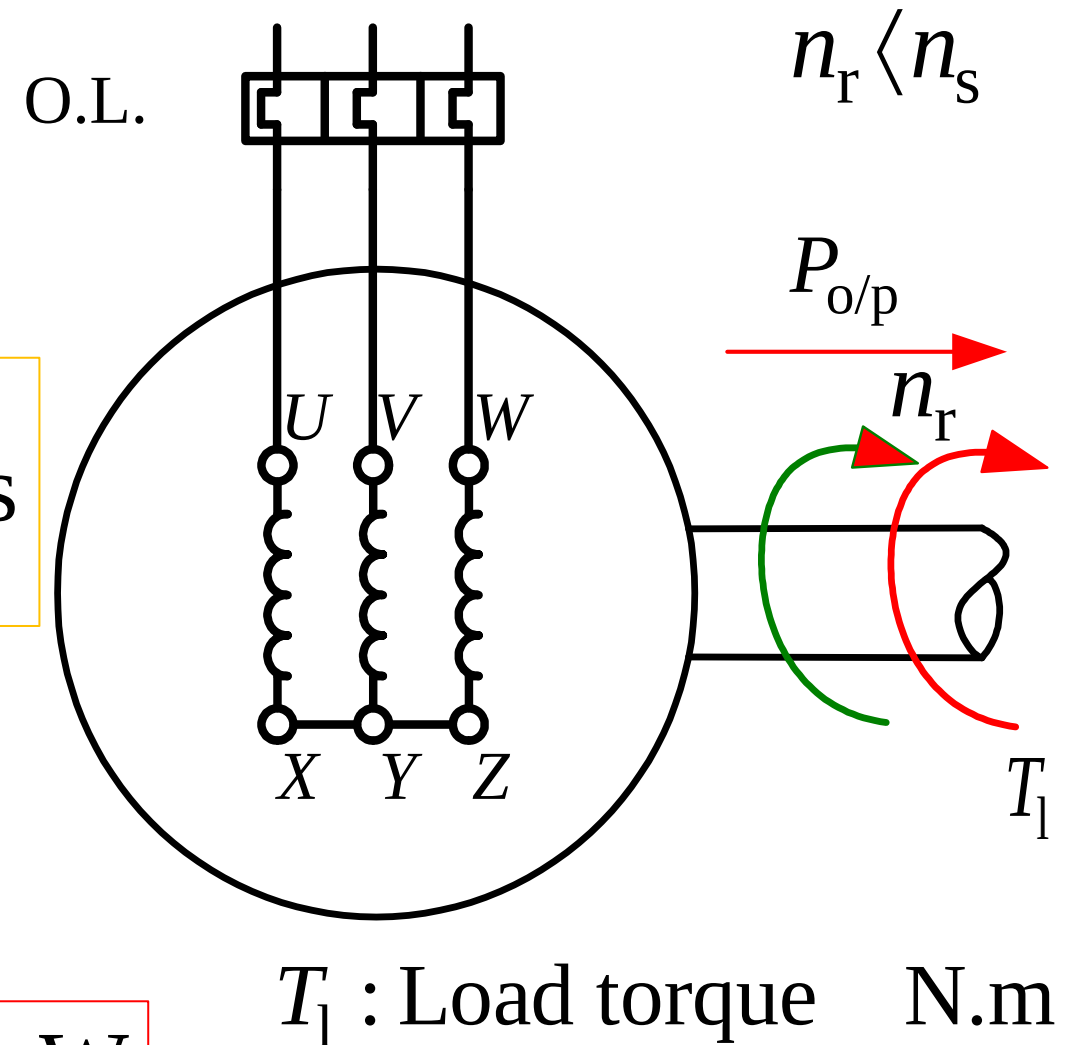
กำลังทางกล

n_r : Rotor speed rpm

$$\omega_r = \frac{2\pi n_r}{60} \text{ rad./s}$$

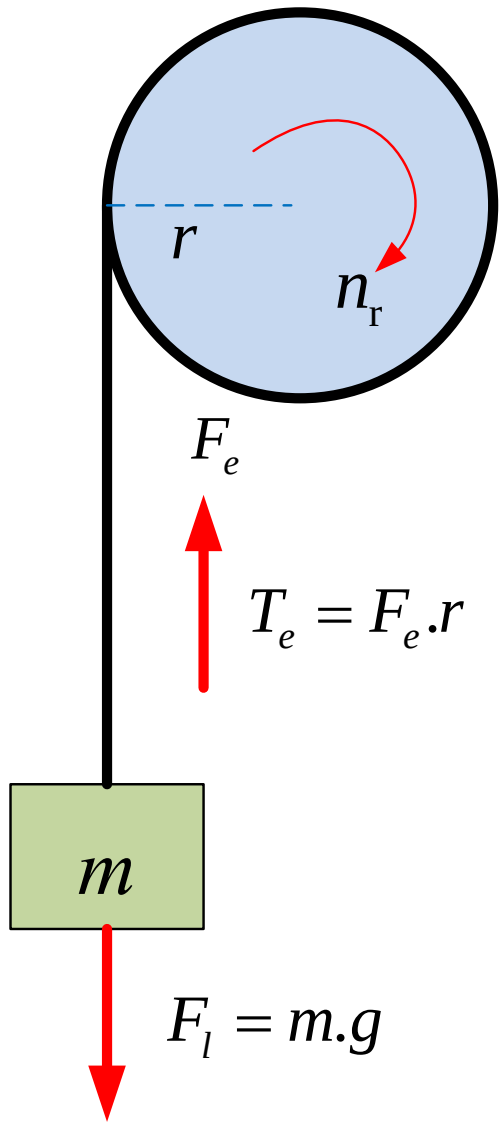


$$P_{o/p} = T_l \omega_r \text{ W}$$



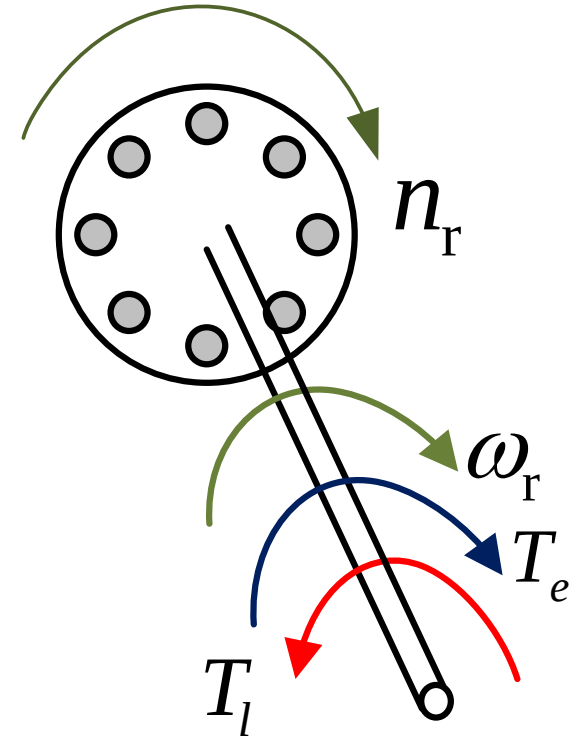
T_l : Load torque N.m

กำลังทางกล



$$\begin{aligned}n_r &= 1470 \text{ rpm} \\ \omega_r &= \frac{2\pi \times 1470}{60} = 153.9 \text{ rad./s} \\ m &= 20 \text{ kg} \quad r = 0.3 \text{ m} \\ T_e &= 20 \times 8.91 \times 0.3 = 58.9 \text{ N.m}\end{aligned}$$

$$P_{o/p} = 58.9 \times 153.9 = 9065 \text{ W} \approx 9.1 \text{ kW}$$



มอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ขนาด 1 แรงม้า

ทดสอบประสิทธิภาพทางกล

Input power

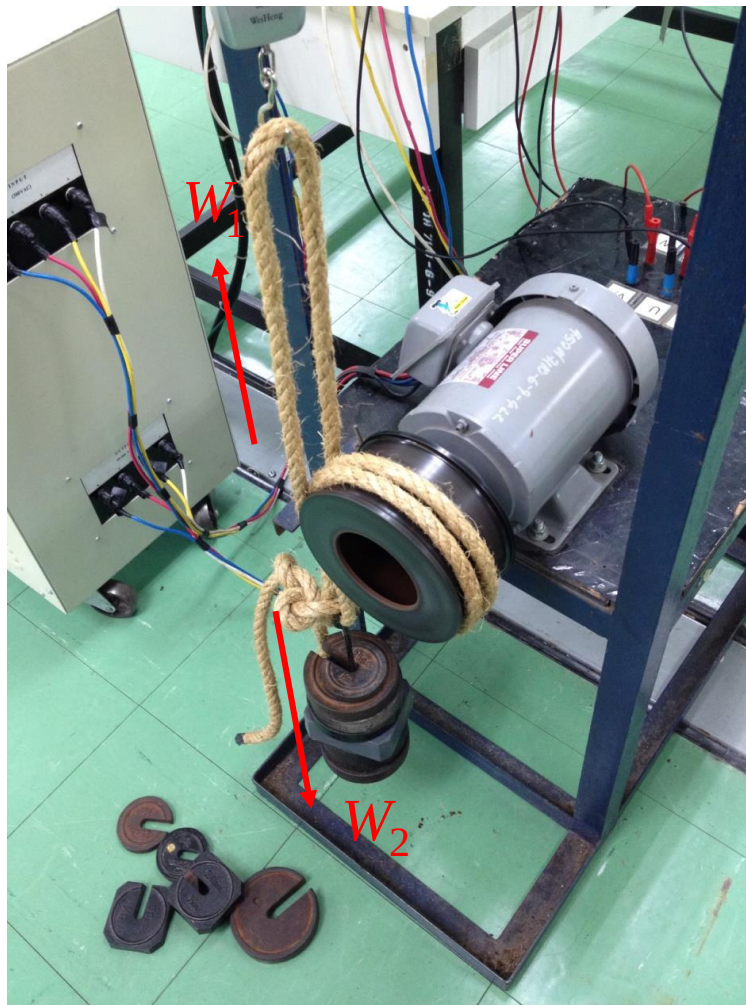
จ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

$$V_L = 380 \text{ V (line-to-line)}$$

$$I_L = 1.9 \text{ A (line)}$$

$$\cos \phi = 0.8 \text{ p.f. lagging}$$

$$\begin{aligned} P_{i/p} &= \sqrt{3} V_L I_L \cos \phi \\ &= \sqrt{3} \times 380 \times 1.9 \times 0.8 \\ &= 1,000 \text{ W} \end{aligned}$$



Output power

$$n_r = 1400 \text{ rpm}$$

$$\begin{aligned} \omega_r &= \frac{2\pi n_r}{60} \\ &= \frac{2\pi \times 1400}{60} = 146.6 \text{ rad./s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{o/p, \text{pulley}} &= 9.81(W_2 - W_1).R \\ &= 9.81 \times 5.8 \times 0.09 = 5.1 \text{ N.m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{o/p} &= T_{o/p, \text{pulley}} \cdot \omega_r \\ &= 5.1 \times 146.6 = 748 \text{ W} \end{aligned}$$

ความสูญเสียหลักในเครื่องจักรกลไฟฟ้า

1. ความต้านทานของขดลวด

$$I^2 R \Rightarrow P_{\text{cu,loss}}$$

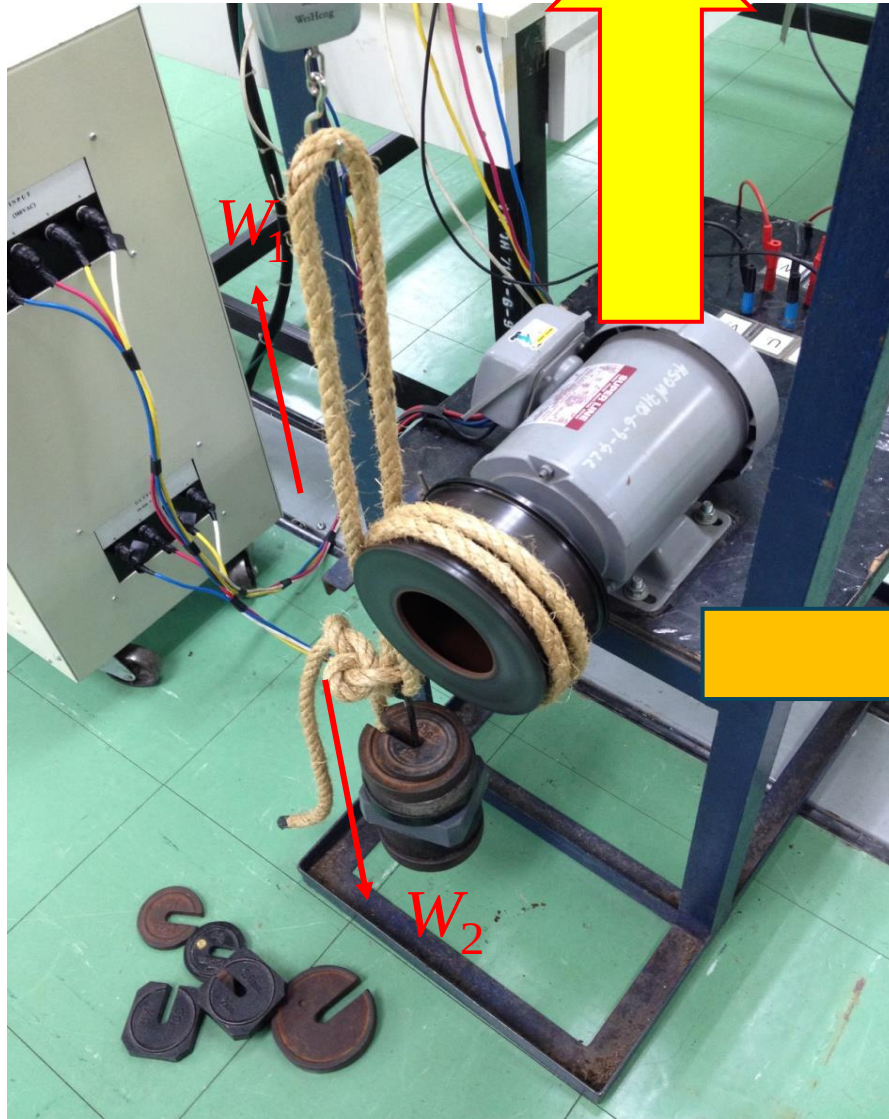
2. ในแกนเหล็กที่ใช้เป็นวงจรแม่เหล็ก

frequency, flux density, steel thickness & core material $\Rightarrow P_{\text{core,loss}}$

3. ความสูญเสียทางกล

bearing friction & fan cooling $\Rightarrow P_{\text{mech,loss}}$

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{i/p}} - P_{\text{o/p}} = 1000 - 748 = 252 \text{ W}$$



$$\% \eta = \frac{P_{\text{o/p}}}{P_{\text{i/p}}} \times 100 = \frac{748}{1000} \times 100 = 74.8 \%$$

กำลังทางกลจ่ายออก

$$P_{\text{o/p}} = T_l \omega_r = 748 \text{ W}$$

เครื่องจักรกลไฟฟ้า



หลักการทำงาน

Electromotive force

E_a E_{af} E_1

Electromagnetic torque

T_e

DC Machines หรือ Commutator Machines

สนามแม่เหล็กอยู่กับที่ (Stationary magnetic field)

AC Machines

Synchronous Machines

Induction Motor

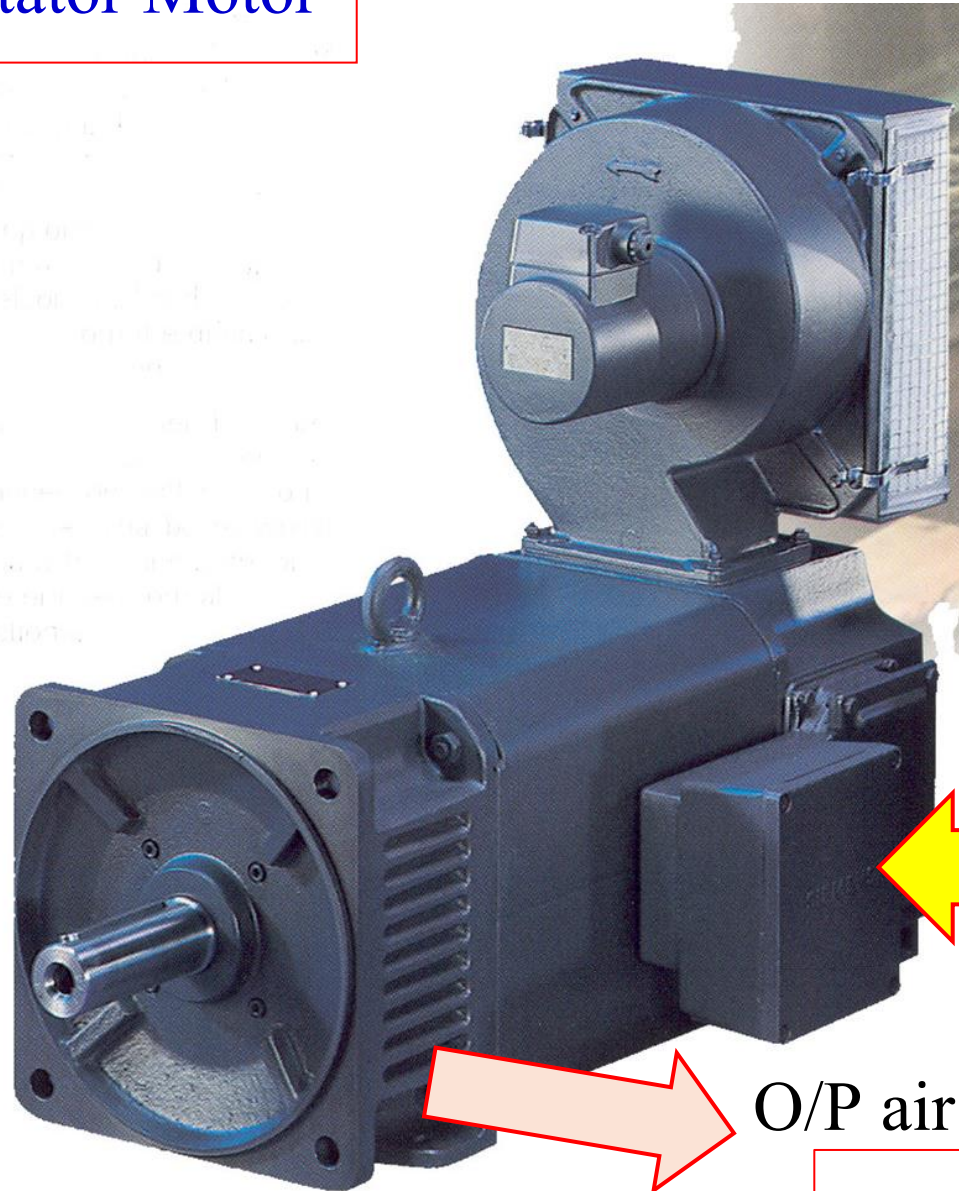
สนามแม่เหล็กหมุน (Rotating magnetic field)

DC Motor หรือ Commutator Motor

กำลังทางกลจ่ายออก

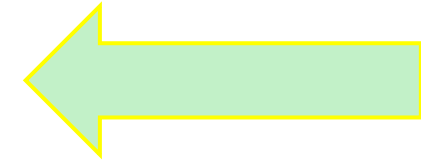


$$P_{o/p} = T_l \omega_r$$



อ.พิชิต ลำยอง

I/P air cooling



กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า
(ไฟฟ้ากระแสตรง)



$$P_{i/p} = VI$$

O/P air cooling

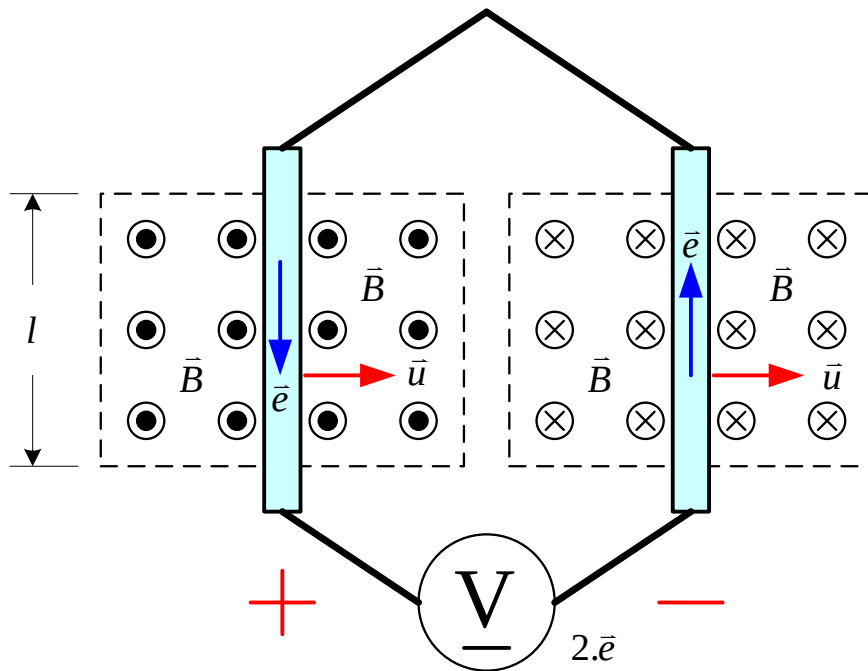


Power loss

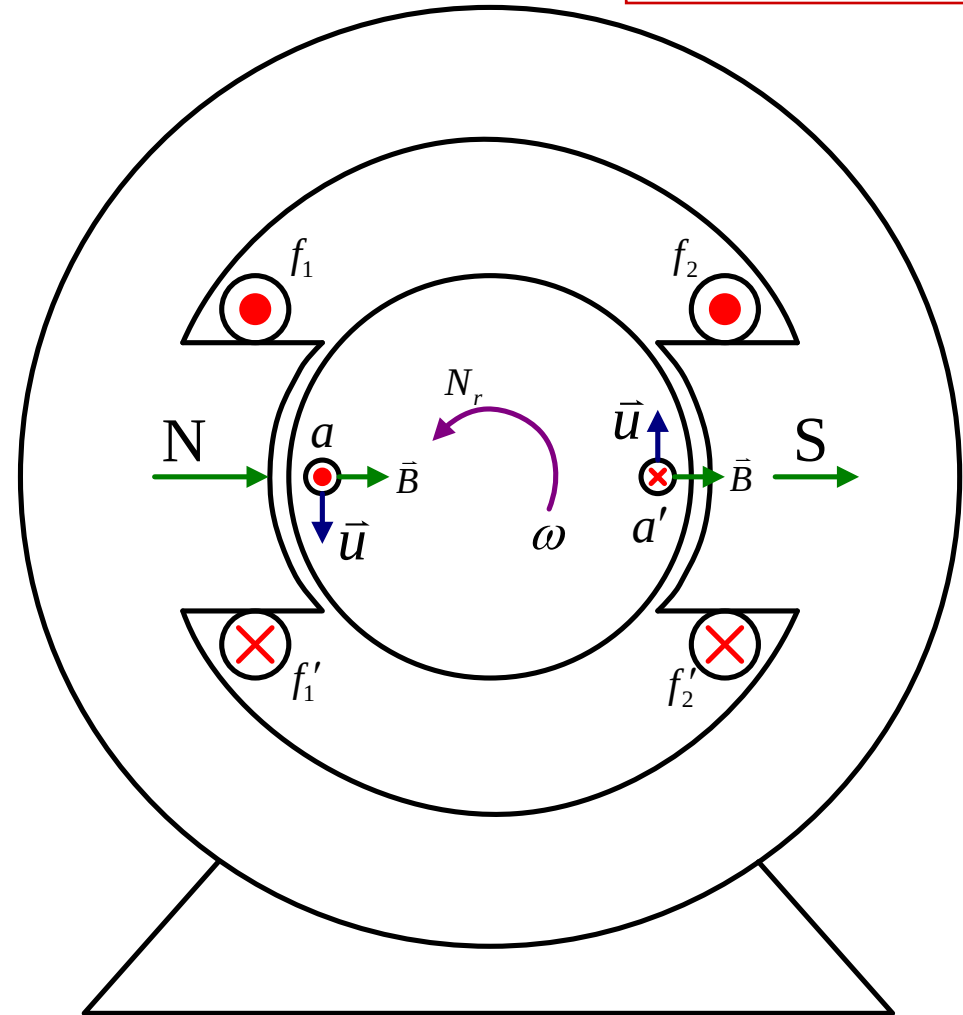
การเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Induced emf)

$$E_a = K_a \phi_p \omega$$

Motional induced electromotive force



$$\vec{e} = l.\vec{u} \otimes \vec{B} \Rightarrow e = ulB$$

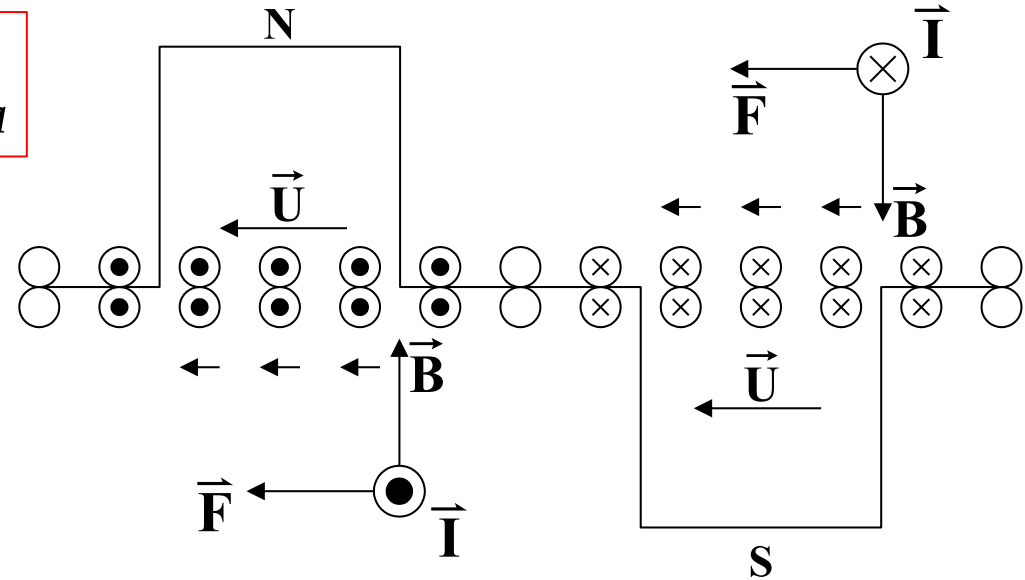


Electromagnetic Torque in DC Machines

$$\sin 90^\circ = 1$$

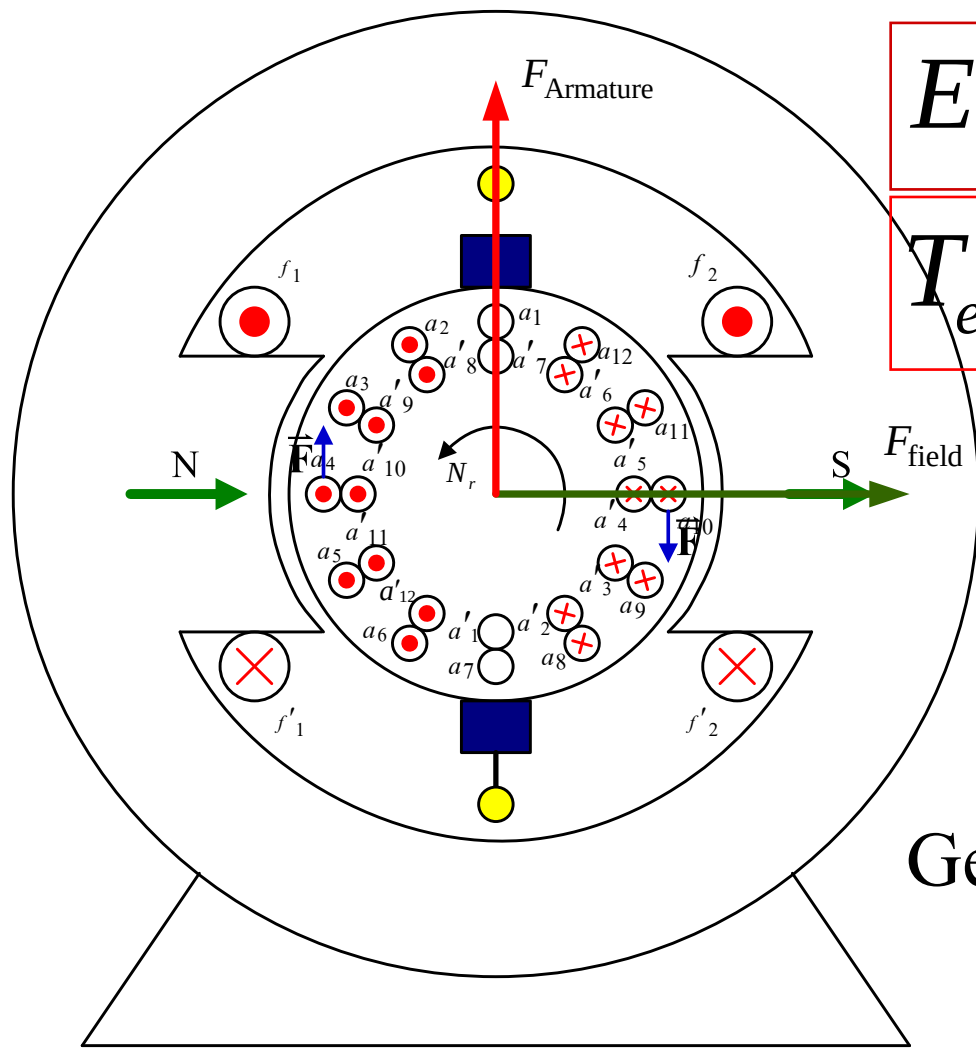
$$\vec{F} = \vec{I}l \otimes \vec{B} \quad \Rightarrow \quad F = IlB$$

$$T_e = F_e \cdot r_a$$



$$T_e = K_a \phi_p I_a$$

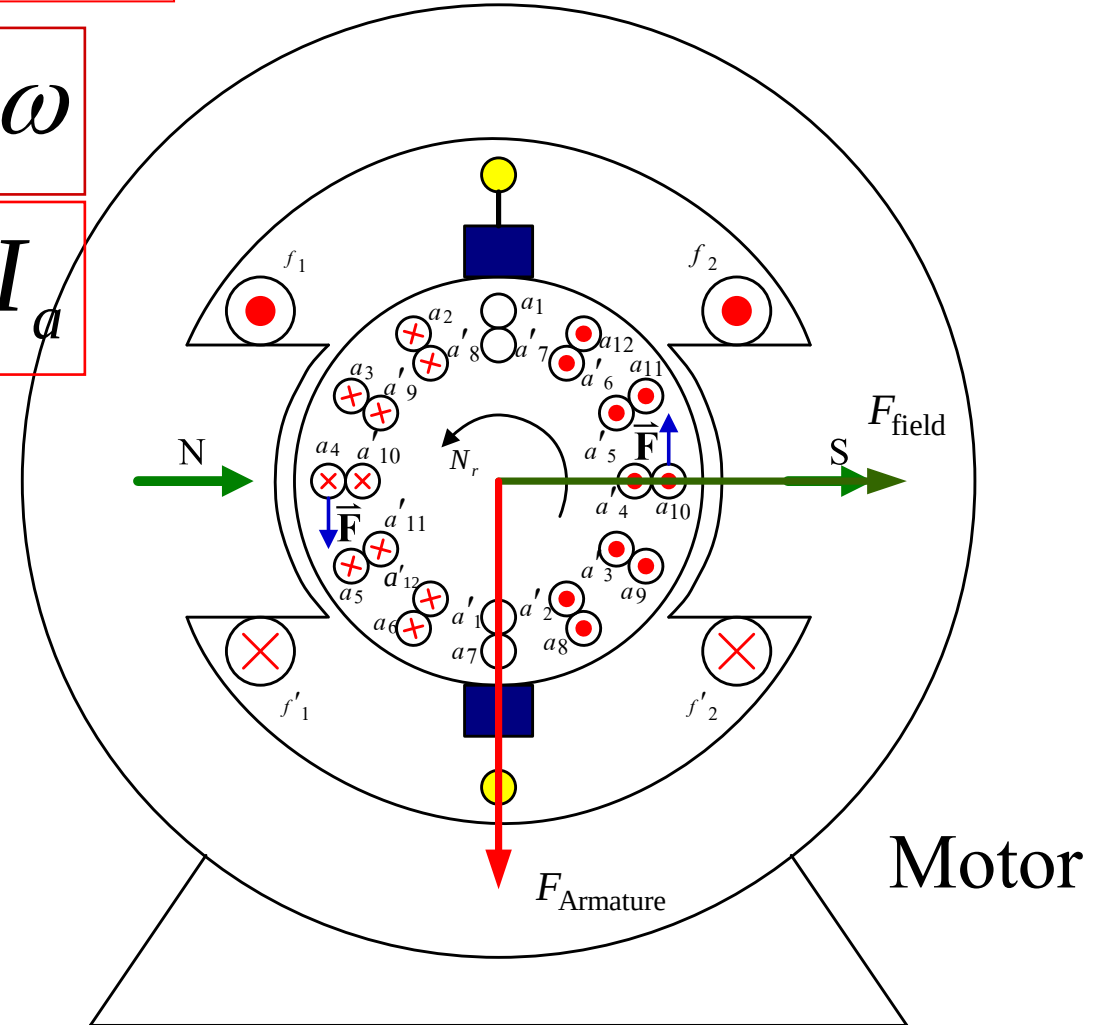
DC Machines หรือ Commutator Machines



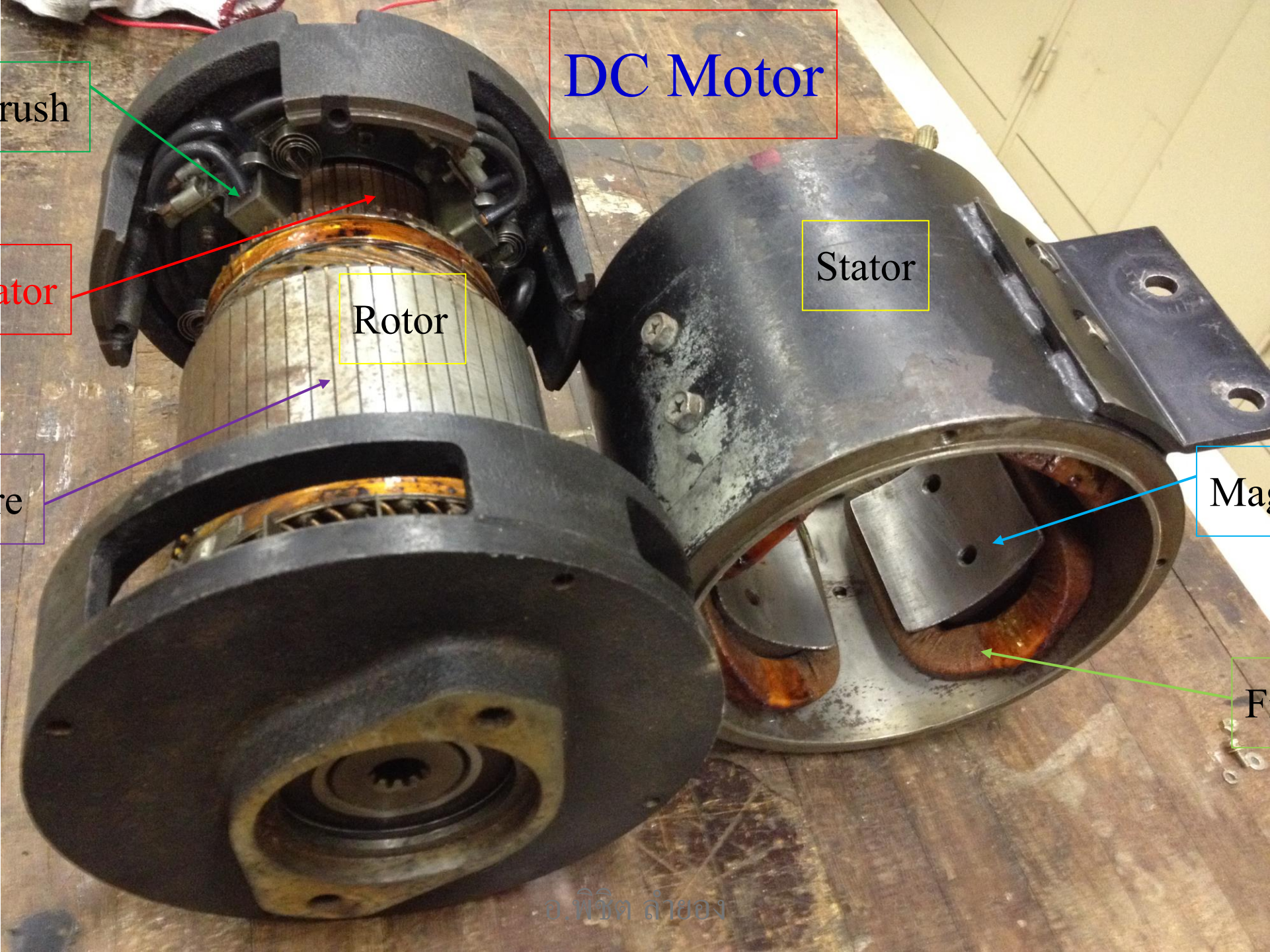
$$E_a = K_a \phi_p \omega$$

$$T_e = K_a \phi_p I_a$$

Generator



Motor



DC Motor

Carbon brush

Commutator

Rotor

Armature

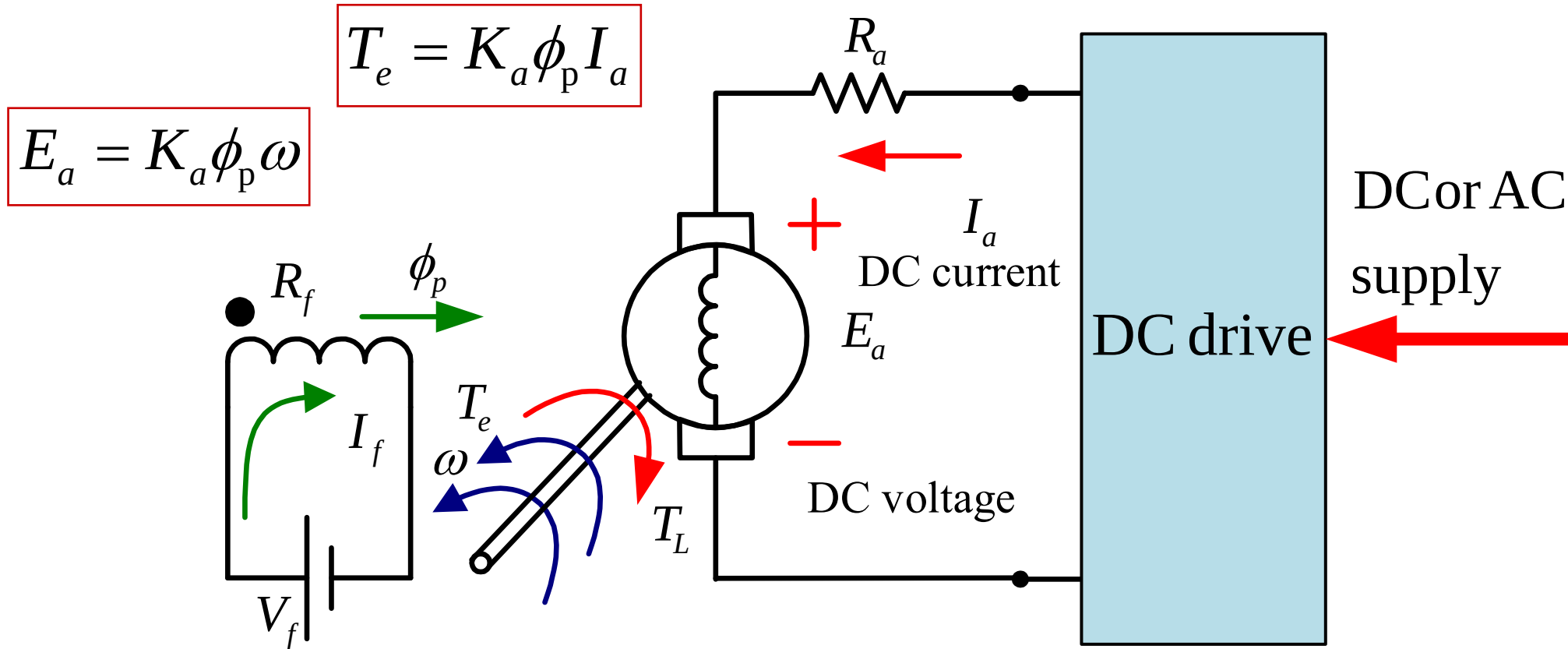
Stator

Magnetic pole

Field coil

การควบคุมความเร็วของ DC Motor หรือ Commutator Motor

DC drive : ควบคุมแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเพื่อควบคุมความเร็วรอบและแรงบิดของ DC motor



$$T_e = K_a \phi_p I_a$$

$$E_a = K_a \phi_p \omega$$

$$T_e \propto I_a$$

ลดกระแสเริ่มหมุนของมอเตอร์ โดยลดแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าขอลวดอาร์มาเจอร์

Synchronous Motor

ป้อนเข้าด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

$$n_s = \frac{120 f}{P}$$

$$n_r = n_s$$

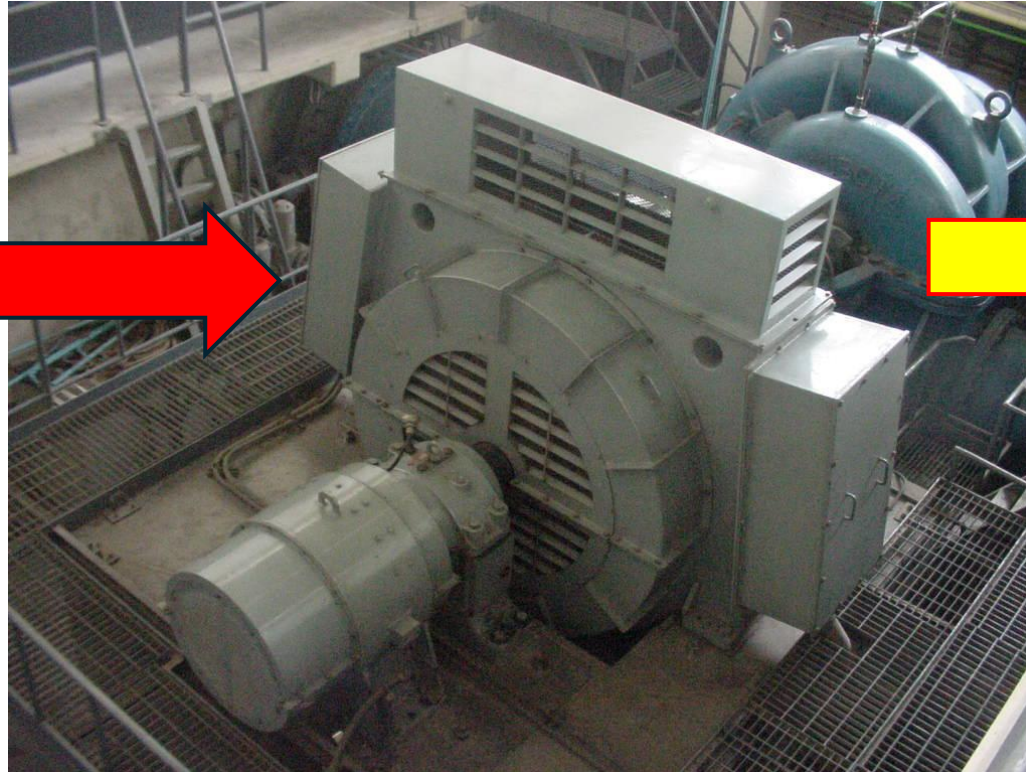
กำลังทางกลจ่ายออก

$$P_{i/p} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \phi$$

$$P_{o/p} = T_l \omega_r$$

$$\omega_r = \omega_s = \frac{4\pi f}{P}$$

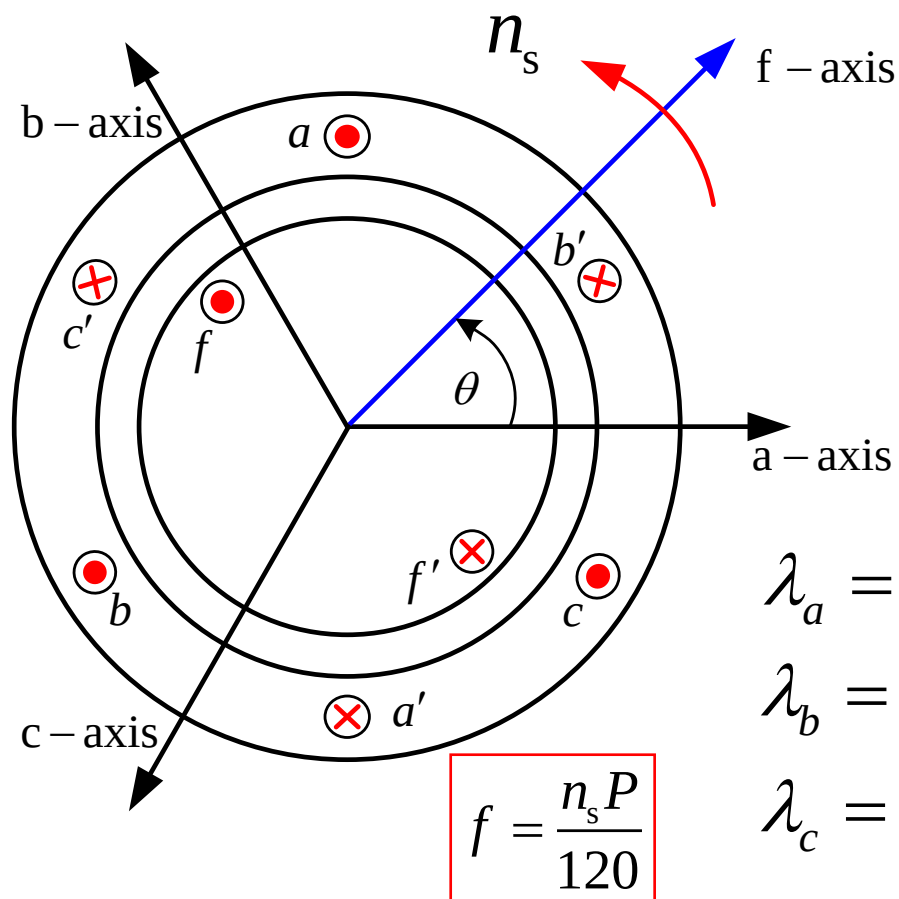
f : ความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับ



แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced emf)

ขดลวดอาร์มาเจอร์ 3 เฟส

$$e = \frac{d\lambda}{dt} \Rightarrow E = 4.44 f N_{ph} \phi_p K_w \quad n_s: \text{Synchronous speed (rpm)}$$



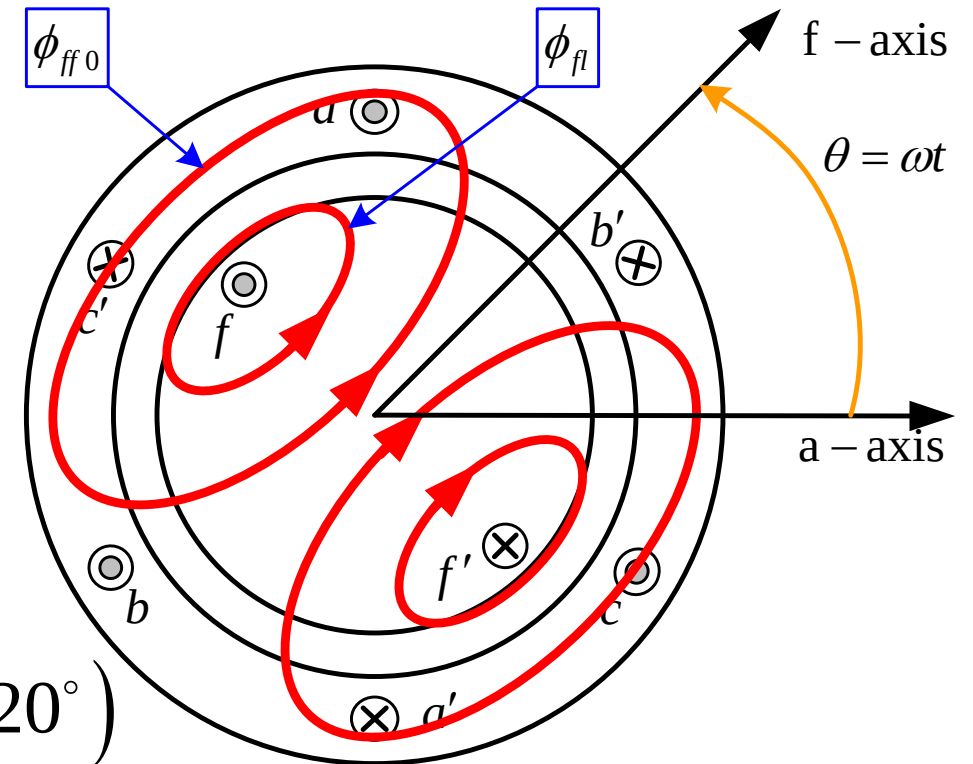
$$n_s = \frac{120 f}{P}$$

$$f = \frac{n_s P}{120}$$

$$\lambda_a = N \phi_p \cos \omega t$$

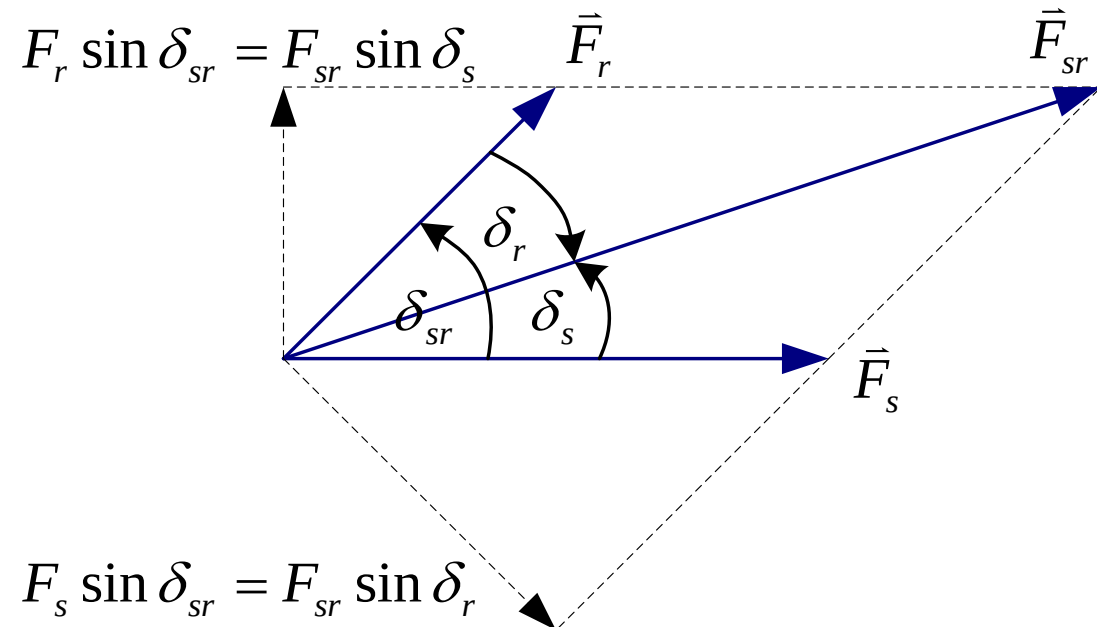
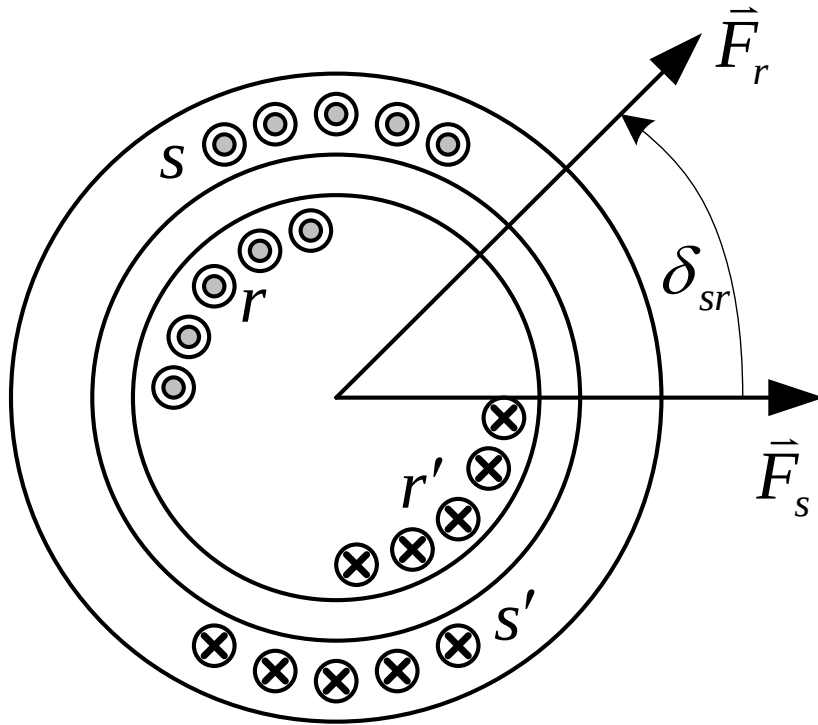
$$\lambda_b = N \phi_p \cos(\omega t - 120^\circ)$$

$$\lambda_c = N \phi_p \cos(\omega t - 240^\circ)$$

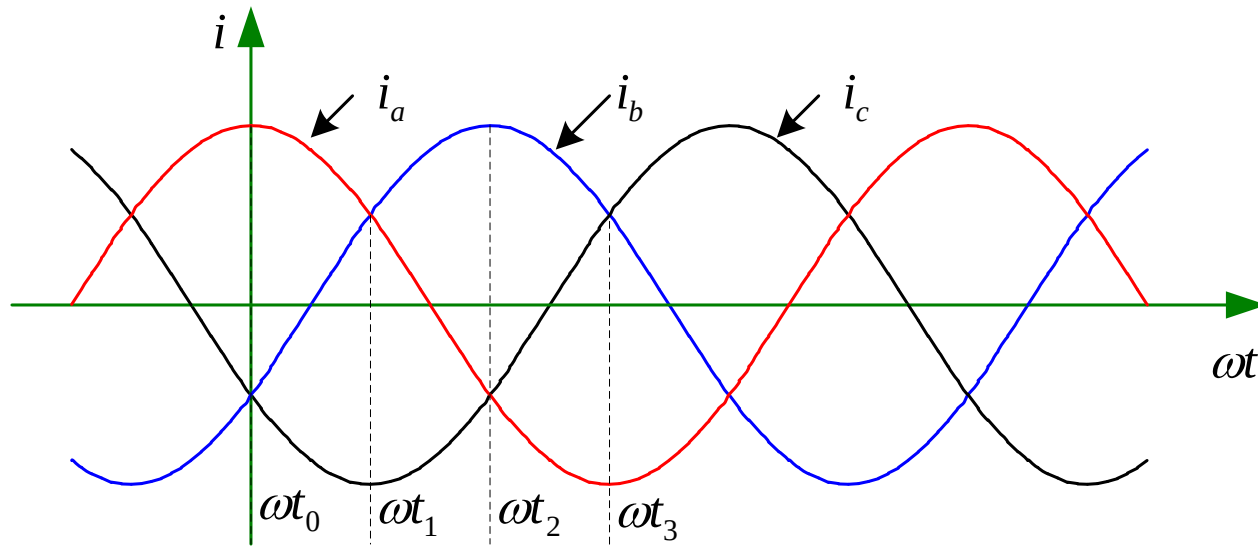


แรงบิดจากสนามแม่เหล็ก (Torque from magnetic field)

$$T_{\text{fld}} = -K_M F_s F_r \sin \delta_{sr}$$



ขดลวดอาร์มาเจอร์ 3 เฟส แต่ละเฟสวางห่างกัน 120 องศาไฟฟ้า



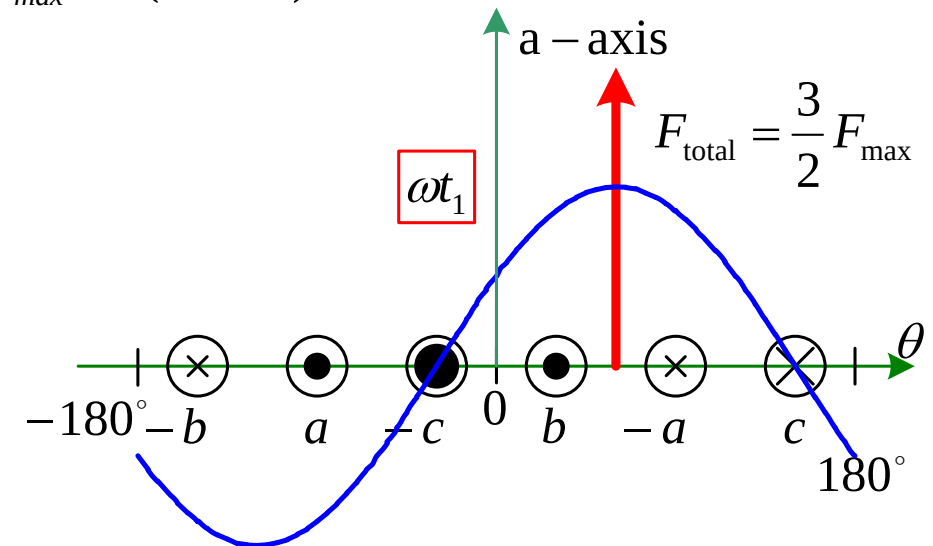
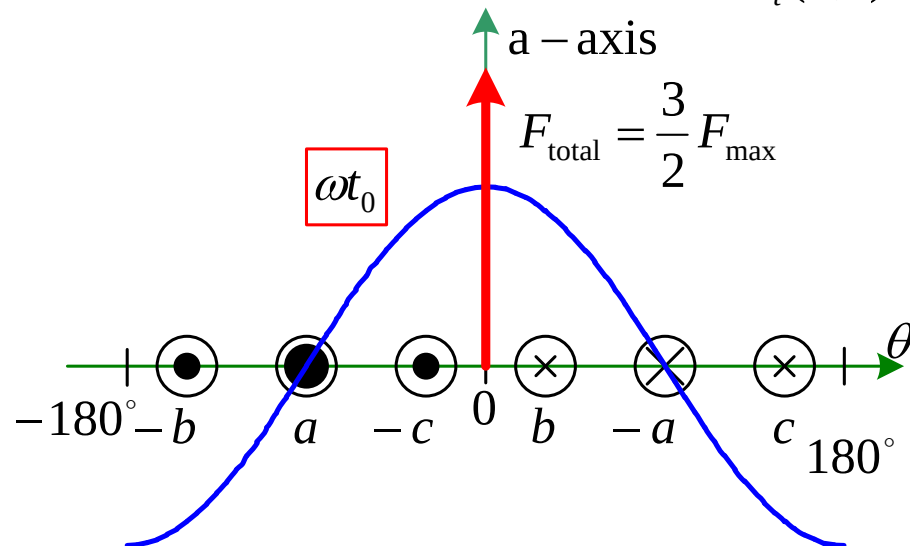
$$\omega t_0 = 0^\circ; i_a = I_m; i_b = -\frac{1}{2}I_m; i_c = -\frac{1}{2}I_m$$

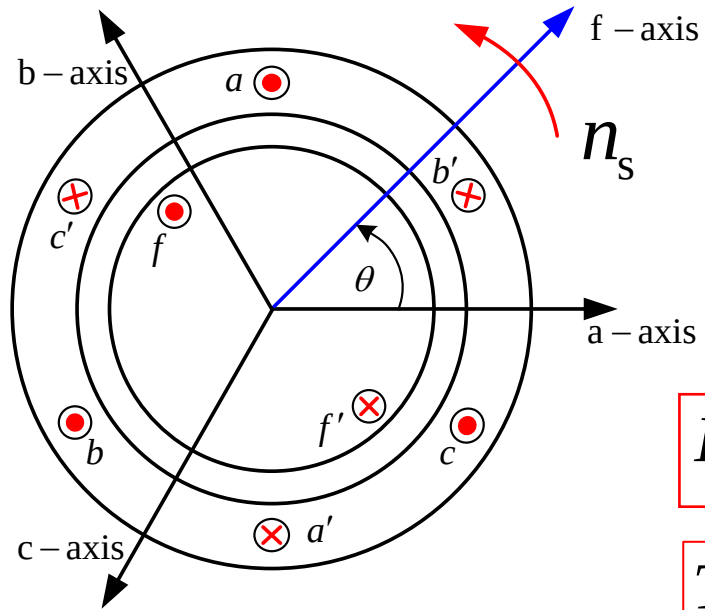
$$\omega t_1 = 60^\circ; i_a = \frac{1}{2}I_m; i_b = \frac{1}{2}I_m; i_c = -I_m$$

$$\omega t_2 = 120^\circ; i_a = -\frac{1}{2}I_m; i_b = I_m; i_c = -\frac{1}{2}I_m$$

$$\omega t_3 = 180^\circ; i_a = -I_m; i_b = \frac{1}{2}I_m; i_c = \frac{1}{2}I_m$$

$$F_t(\theta, t) = \frac{3}{2}F_{\max} \cos(\theta - \omega t)$$



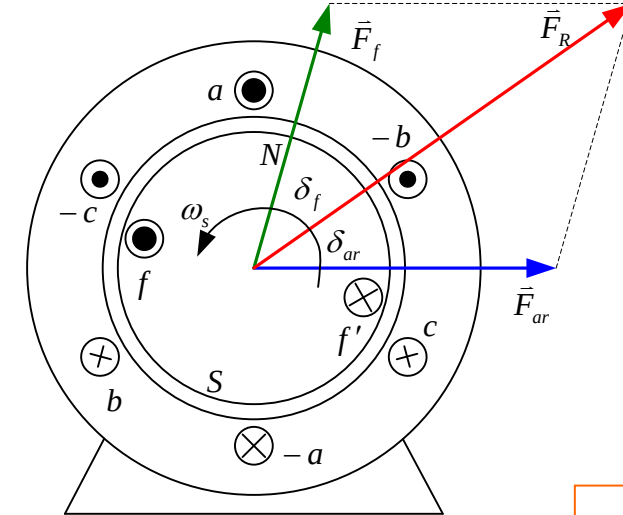


Synchronous Generator

$$n_s = \frac{120 f}{P}$$

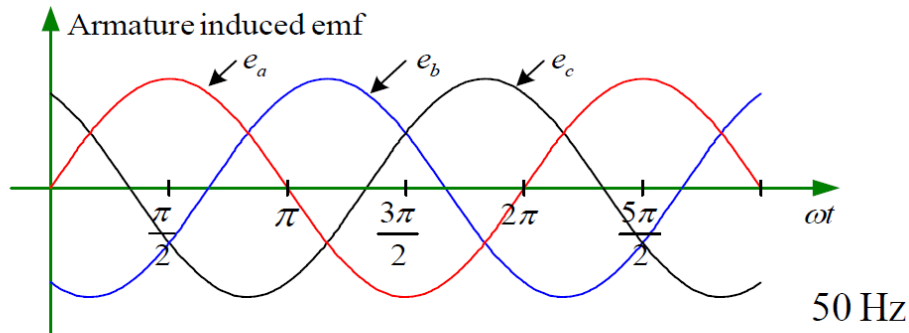
$$E_{af} = 4.44 f N_{ph} \phi_p K_w$$

$$T_{fld} = -K_e F_R F_f \sin \delta_f$$



$$n_r = n_s$$

Synchronous Motor



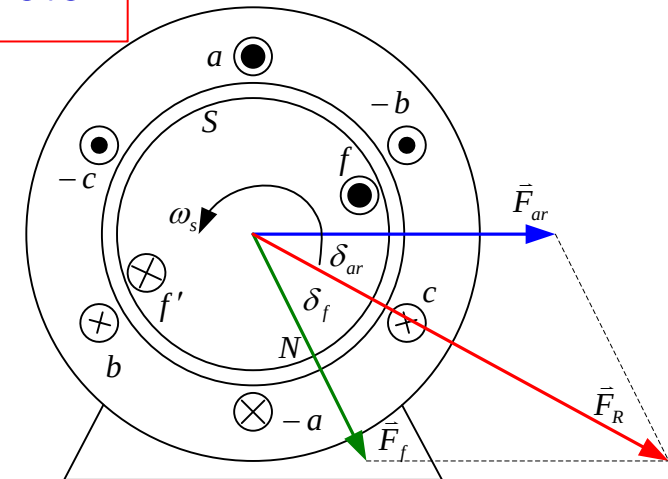
$$\begin{aligned} e_a &= 311 \sin 314t \\ e_b &= 311 \sin(314t - 120^\circ) \\ e_c &= 311 \sin(314t - 240^\circ) \end{aligned} \quad \left| \quad \begin{aligned} V_a &= 220 \angle 0^\circ \\ V_b &= 220 \angle (-120^\circ) \\ V_c &= 220 \angle (-240^\circ) \end{aligned} \right.$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

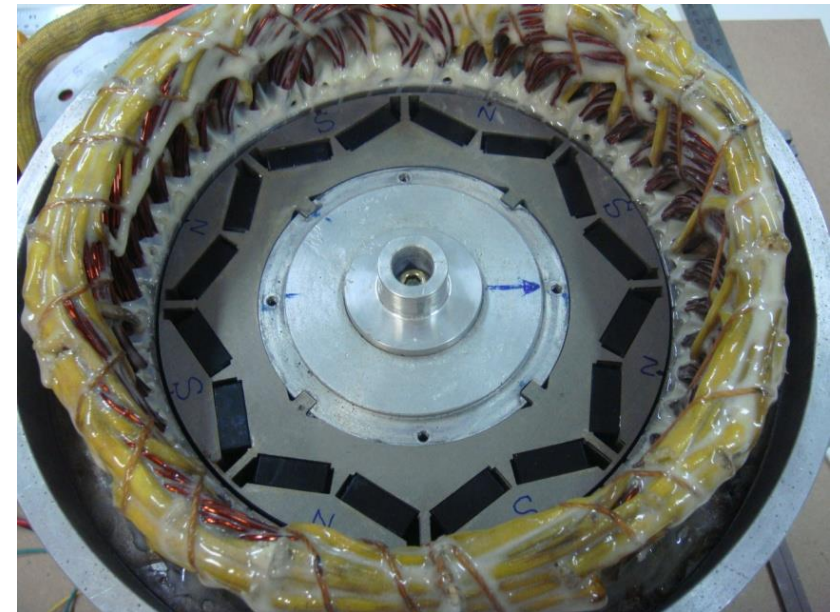
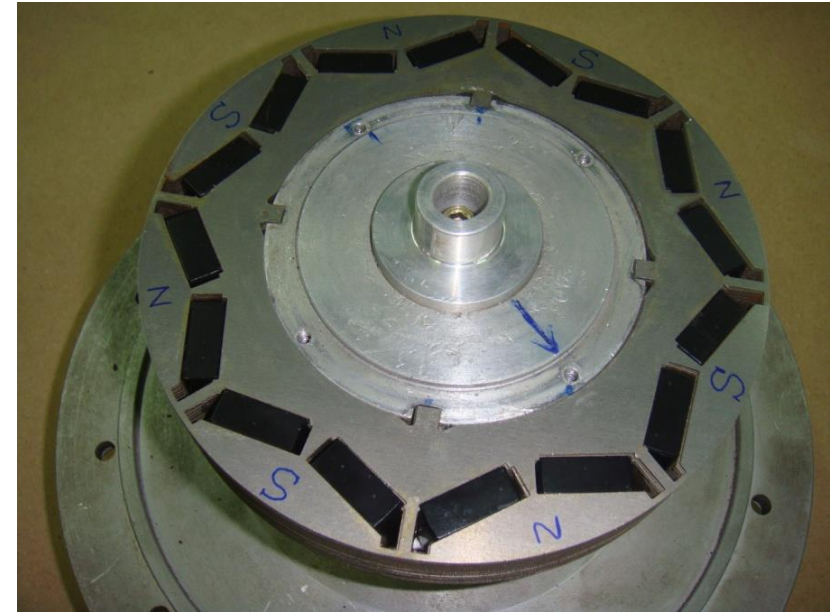
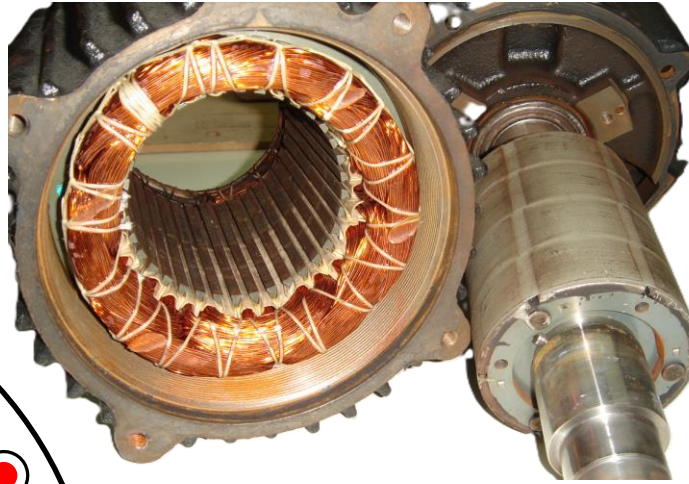
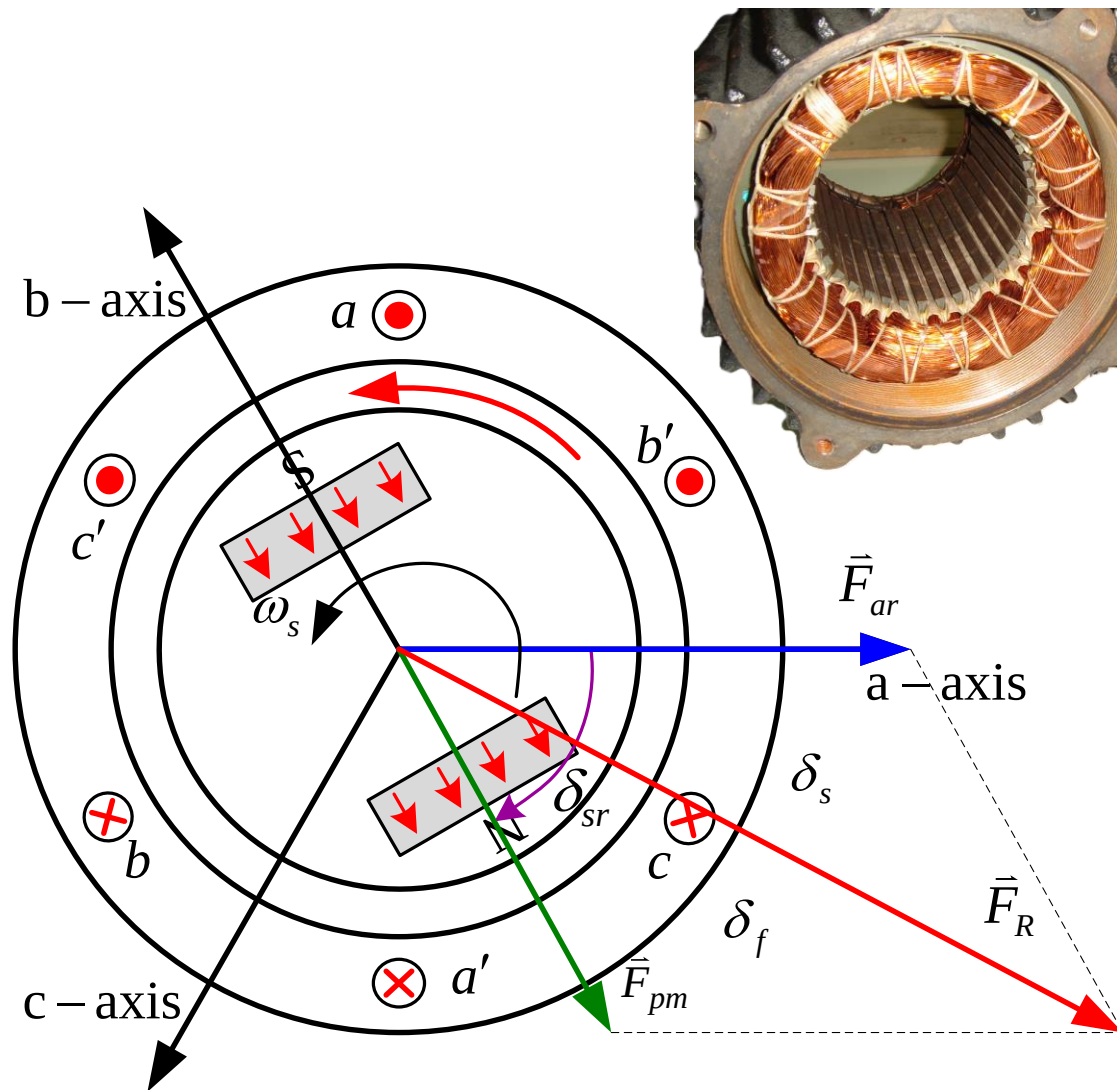
$$P = 2 \text{ poles}$$

$$n_s = \frac{120 \times 50}{2} = 3,000 \text{ rpm}$$

อ.พิชิต ถ้ายอง



Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)



มอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor)

n_s : Synchronous speed (rpm)

$$n_s = \frac{120 f}{P}$$

n_r : Rotor speed (rpm)

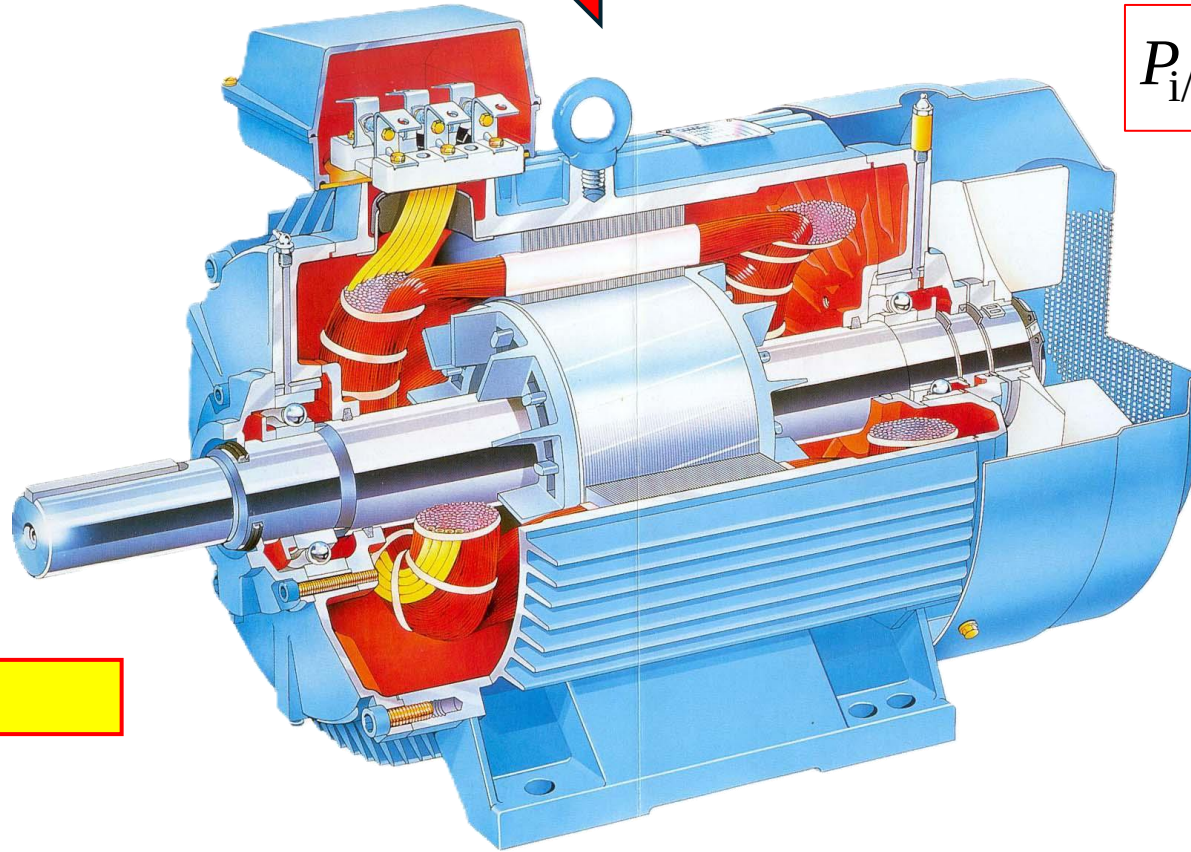
$$n_r < n_s$$

กำลังทางกลจ่ายออก

$$P_{o/p} = T_l \omega_r$$

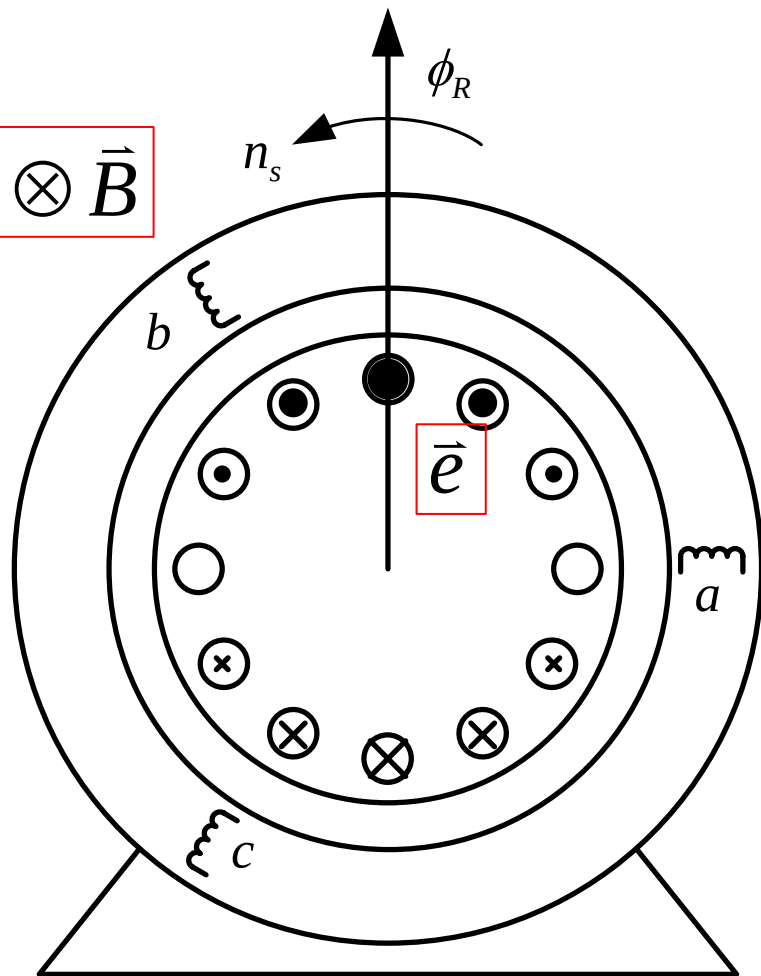
กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า

$$P_{i/p} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \phi$$



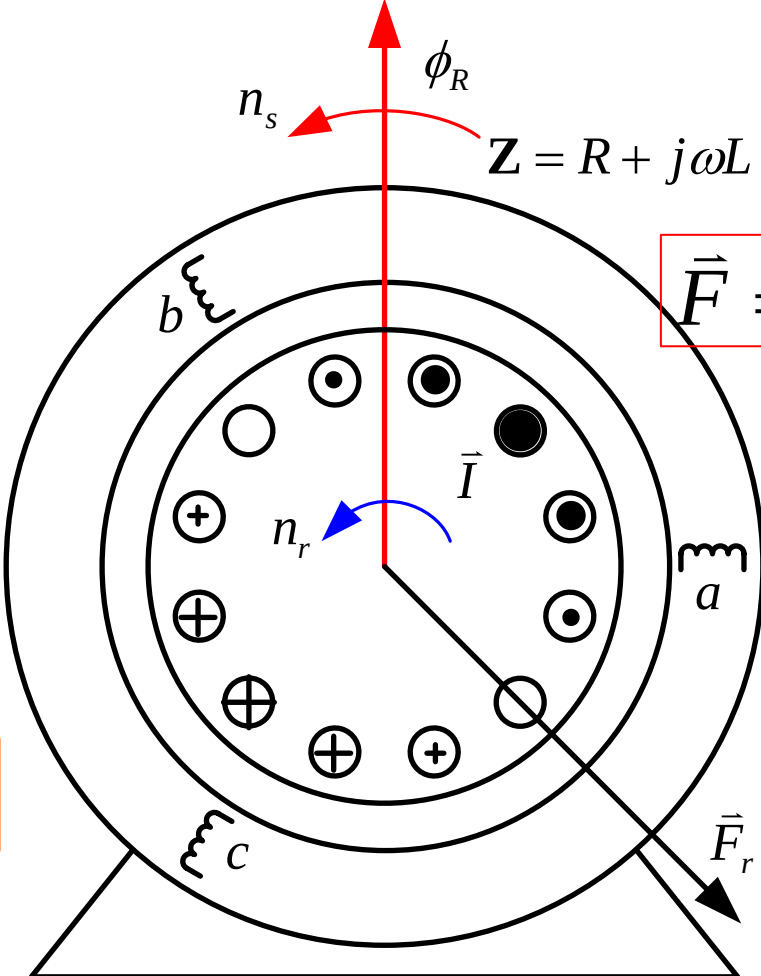
$$T_{\text{fld}} = -K_M F_R F_r \sin \delta_{sr}$$

$$\vec{e} = l \cdot \vec{u} \otimes \vec{B}$$



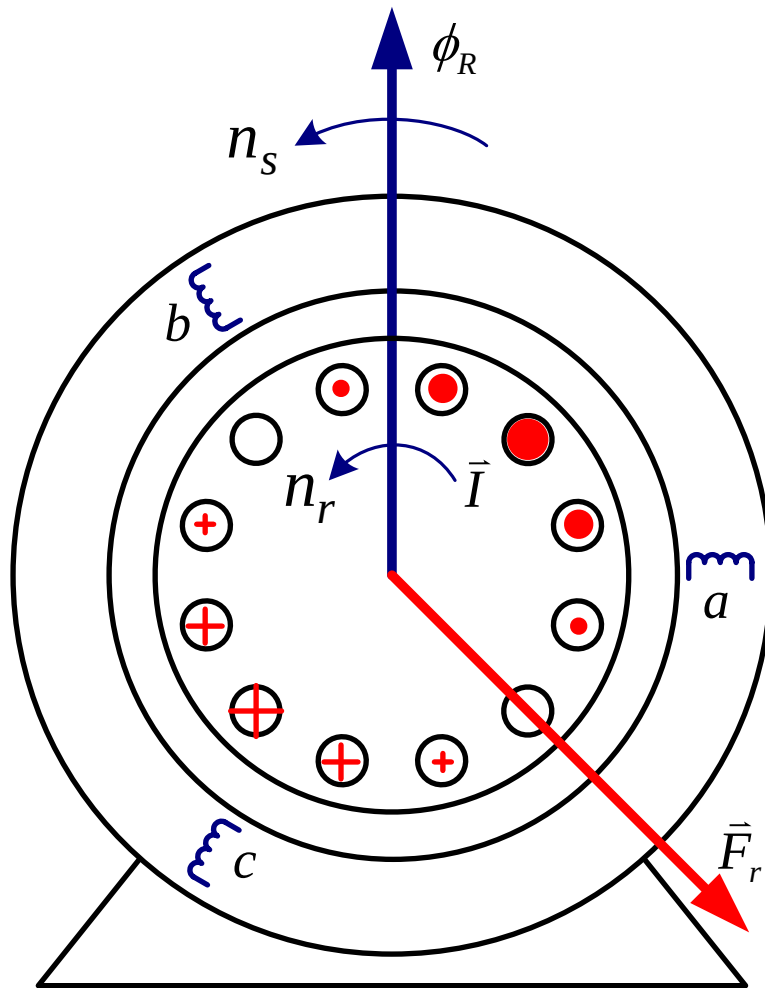
$$n_s = \frac{120 f}{P}$$

$$n_r < n_s : \text{motor}$$

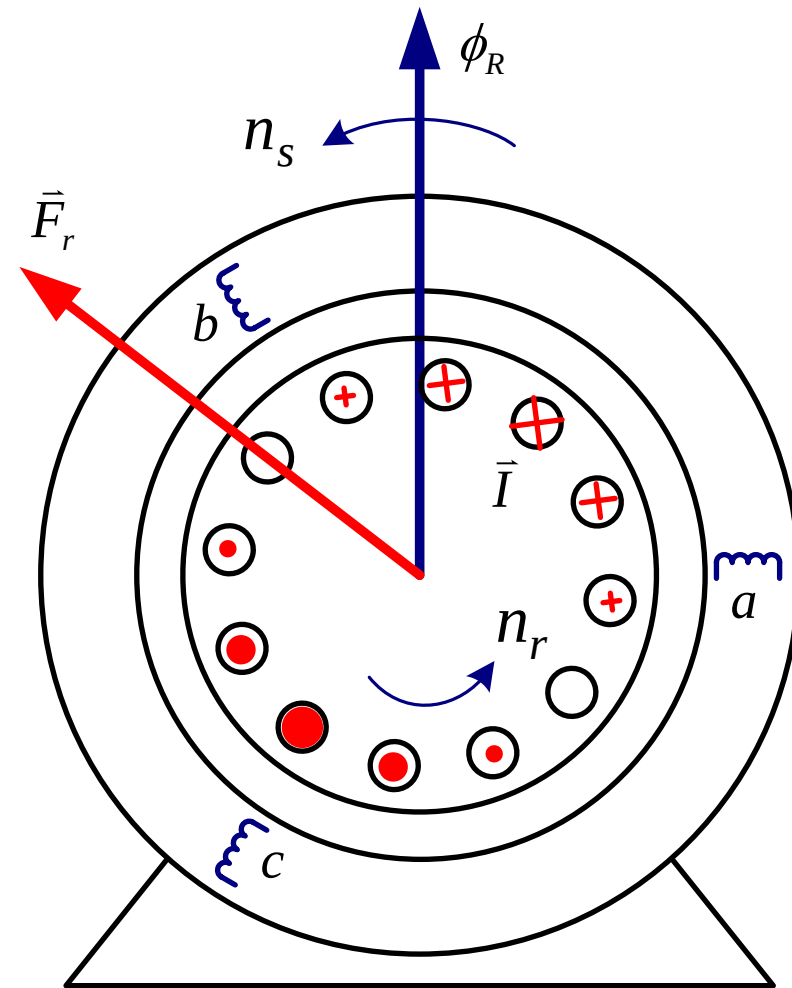


$$\vec{F} = \vec{I} l \otimes \vec{B}$$

ทิศทางการหมุนของ Rotor อยู่ในทิศเดียวกับสนามแม่เหล็กหมุน



$n_r < n_s$: Motor



$n_r > n_s$: Generator

ความเร็วรอบของสนามแม่เหล็กหมุนในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

n_s : Synchronous speed

Synchronous speed of Three-phase induction motor 400 V, 60 Hz, 4-poles

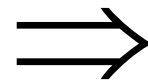
$$n_s = \frac{120 f}{P}$$

$$n_s = \frac{120 \times 30}{4} = 1800 \text{ rpm}$$

AC Machines in steady state

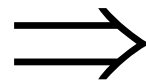
n_r : Rotor speed (rpm)

Synchronous motor & generator



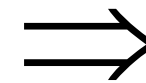
$$n_r = n_s$$

Induction motor



$$n_r < n_s$$

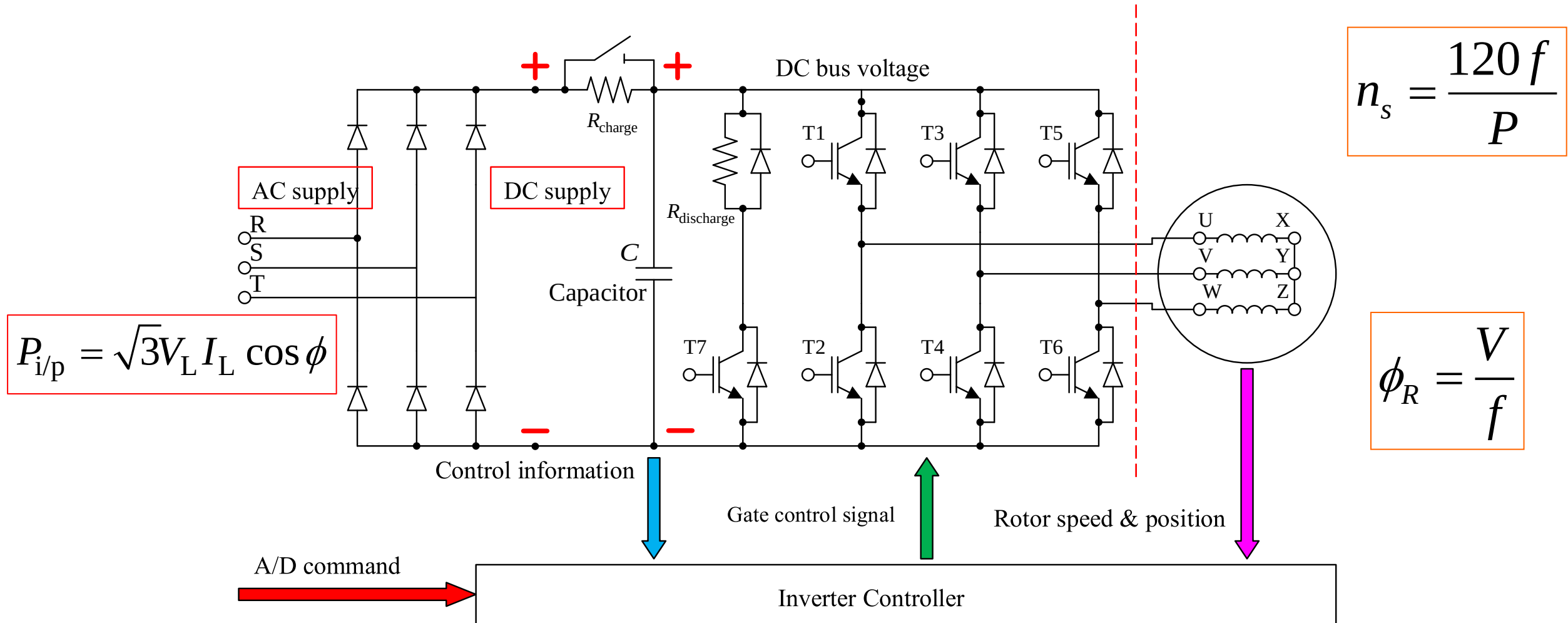
Induction generator



$$n_r > n_s$$

การควบคุมความเร็วของ AC Motor

AC drive : ควบคุมความถี่ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าเพื่อควบคุมความเร็วรอบและแรงบิดของ AC motor



$$n_s = \frac{120 f}{P}$$

$$\phi_R = \frac{V}{f}$$

$$P_{i/p} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \phi$$

การป้องกันมอเตอร์

- แรงดันที่สูงเกินที่ฉนวนจะทนได้
- กระแสสูงเกินจนทำให้เกิดความร้อน
- อุณหภูมิสูงเกินที่ฉนวนรับได้
- ความชื้นที่มีผลต่อคุณสมบัติหลักของฉนวนและวงจรแม่เหล็ก

สรุป

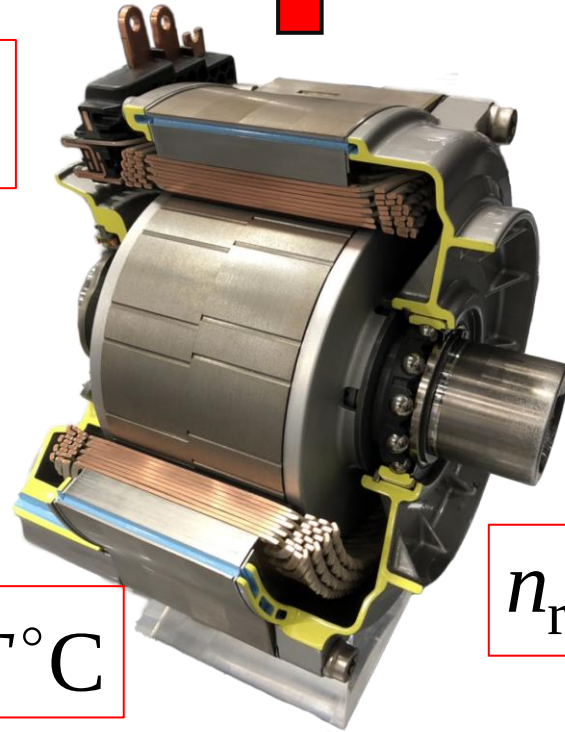
มอเตอร์ไฟฟ้า

กำลังไฟฟ้าป้อนเข้า

$I_{i/p}$

$$P_{i/p} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \phi$$

$T^{\circ}\text{C}$



$$P_{\text{loss}} = P_{i/p} - P_{o/p}$$

กำลังทางกลจ่ายออก

$$P_{o/p} = T_l \omega_r$$

n_r

กำลังไฟฟ้าป้อนเข้าเปลี่ยนแปลง “สืบเนื่องมาจากโหลดเปลี่ยนแปลง”

Q&A