Miren Matias Alkaiaga

MAKINA ELEKTRIKOAK

2. URTEA

2. KAUHELEKOA

igor.albizu@ehu.eus

Elektromagnetismoaren oinarriak

Indukzio magnetikoa (B)

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (T)$$

Indar magnetoeragilea (F_{me})

$$F_{me} = N \cdot I = \Phi \mathcal{R} \quad (Ab)$$

I ≡ intentsitatea

N ≡ espira kop.

Eremu magnetikoaren intentsitatea (H)

$$H = \frac{F_{me}}{L} \quad (Ab/m)$$

Iragazkortasun magnetikoa (μ)

$$B = \mu H$$

Errelukutantzia ($\mathcal{R}$)

$$\mathcal{R} = \frac{L}{\mu \cdot A}$$

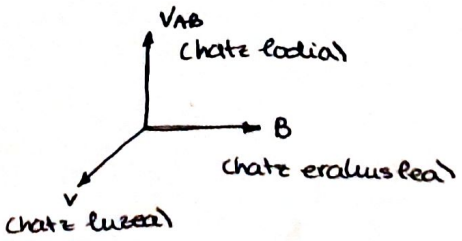
Lenz-en legea / indar elektroeragilea (e).

$$e(t) = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (ieee)$$

Faraday-en legea / tentsio diferentzia (V_{AB}).

$$V_{AB} = E = vBL \sin\theta$$

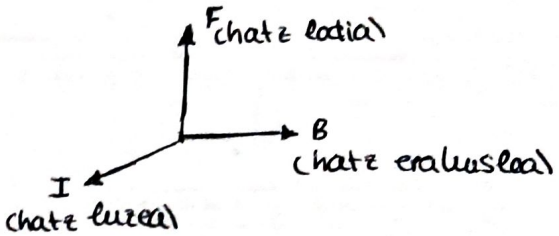
ezkerreko eskua



Laplace-ren legea

$F = BIL \sin\theta$

ezkerreko eskua
(FBI)



Transformadore monofasikoak

1. Transformadore errealaren hutsean

transformazio-erlazioa

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \simeq \frac{V_{10}}{V_{20}} \quad [-]$$

Karga indizea (i)

$$i = \frac{S}{S_N} = \frac{I_1}{I_{1N}} \quad [-]$$

Potentzia

$$P_0 = V_1 \cdot I_{10} \cdot \cos\varphi_0 = P_{Fe} = V_{10}^2 \cdot G_0 \quad [W]$$

induktiboa → $\varphi > 0$
I atzeratuta

kapazitibo → $\varphi < 0$
I aurreratuta

Burdinelo galerak

$$I_{Fe} = I_{10} \cdot \cos\varphi_0 \quad [A] \qquad I_{Fe} = G_0 \cdot V_{10} \quad [A]$$

Magnetizazio intentsitateak

$$I_m = I_{10} \cdot \sin\varphi_0 \quad [A] \qquad I_m = B_0 \cdot V_{10} \quad [A]$$

Hutseko intentsitatea

$$I_{10} = \sqrt{I_{Fe}^2 + I_m^2} \quad [A]$$

Admitantzia

$$Y_0 = \frac{I_{10}}{V_{10}} \quad [\Omega^{-1}]$$

2. Zirkuitu baliokidea.

Sekundarioko magnitudeak kontuan batetik adierazitako dira.

$$V_2' = a \cdot V_2 \quad [V]$$

$$I_2' = I_2 / a \quad [A]$$

$$Z_2' = a^2 \cdot Z_2 \quad [\Omega]$$

$$I_1 = I_2' \quad [A]$$

$$\rightarrow \vec{V}_1 = \vec{V}_2' + \vec{I}_2' (R_b + jX_b) \quad [V]$$

$$\searrow V_1 = V_2' + I_2' (R_b \cos\varphi + X_b \sin\varphi)$$

$$G_0' = \frac{G_0}{a} \quad [\Omega^{-1}]$$

$$B_0' = B_0 / a^2 \quad [\Omega^{-1}]$$

$$R_b' = R_b \cdot a^2 \quad [\Omega]$$

$$X_b' = X_b \cdot a^2 \quad [\Omega]$$

3. Zirkuitulaburrean.

$$R_b = \frac{P_{zl}}{I_{1zl}^2} \quad [\Omega]$$

$$Z_b = \frac{V_{1zl}}{I_{1zl}} \quad [\Omega]$$

$$X_b = \sqrt{Z_b^2 - R_b^2} \quad [\Omega]$$

$$I_2' = I_{2N}' = I_{1N}$$

Potentzia

$$P_{2L} = P_{JN} = I_{1N}^2 \cdot R_b \quad [W]$$

$$I_{1zL} = I_{1N} \quad [A]$$

Tentsio-erregulazioa

$$\varepsilon_R = \frac{R_b \cdot I_{1N}}{V_{1N}} \cdot 100 \quad [\%]$$

$$\varepsilon_x = \frac{X_b \cdot I_{1N}}{V_{1N}} \cdot 100 \quad [\%]$$

$$\varepsilon_{zL} = \sqrt{\varepsilon_R^2 + \varepsilon_x^2} \quad [\%]$$

4. Errendimendua (η).

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_J} = \frac{i \cdot S_N \cdot \cos\varphi}{i \cdot S_N \cdot \cos\varphi + P_{Fe} + i^2 \cdot P_{JN}} \quad [\%]$$

($P_1 = P_{me}$, $P_J = P_{me}$)

Karga-indizea

$$i_{\eta max} = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{JN}}} \quad [-]$$

errendimendu maximoa

$$\eta_{max} = \frac{i_{\eta max} \cdot S_N \cdot \cos\varphi}{i_{\eta max} \cdot S_N \cdot \cos\varphi + 2P_{Fe}} \quad [\%]$$

5. Tentsio-erregulazioa (ε)

$$\varepsilon = \frac{V_1 - V_2'}{V_1} \quad [\%]$$

Transformadore trifasikoak

Balio izendatua = linealoa

Izar konexioa (Y)

$V_f = U_L / \sqrt{3}$ [V]

$I_f = I_L$ [A]

Triangelu konexioa (Δ)

$V_f = U_L$ [V]

$I_f = I_L / \sqrt{3}$ [A]

Potentziak

$S = 3 V_f I_f$ [VA]

$P = 3 V_f I_f \cos\varphi$ [W]

$Q = 3 V_f I_f \sin\varphi$ [VAr]

Hutseluo saiakuntzak

Ezaugarriak:

$U_{2/L} = U_{1N/L}$

$I_{2/L} = 0$

Angelua (φ_0):

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{3 V_{1O/f} I_{1O/f}}$$ non $$P_0 = P_{Fe} = 3 V_{1O/f}^2 G_0 = 3 R_b I_{1O}^2 = 3 \frac{V_{1O/f}^2}{R_b}$$ [W]

Admitantzia (Y_0):

$$Y_0 = \frac{I_{1O/f}}{V_{1O/f}}$$ [1/Ω] ondorioz $$B_0 = \sqrt{Y_0^2 - G_0^2}$$

Intentsitateak (I):

$I_{Fe} = G_0 V_{1O/f} = I_{1O/f} \cdot \cos\varphi_0$ [A]

$I_m = B_0 V_{1O/f} = I_{1O/f} \cdot \sin\varphi_0$ [A]

2irkuitulaburreko saiakuntza

Ezaugarriak:

$U_{2/L} = 0$

$I_{1/L} = I_{1N/L}$

Potentzia (P_{ze}):

$$P_{ze} = P_{J1} + P_{J2} = 3 I^2_{1ze/f} (R_1 + R'_2) = 3 I^2_{1ze/f} Rb \quad [W]$$

ondorioz,

$$Rb = \frac{P_{ze}}{3 I^2_{1ze/f}} \quad [\Omega] \qquad P_{ze} = 3 V_{1ze/f} I_{1ze/f} \cos\varphi_{ze} \quad [W]$$

Inpedantzia (Z_b):

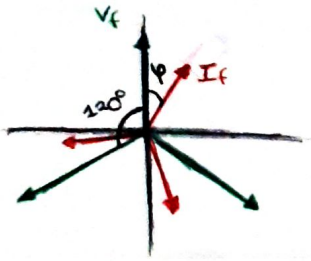
$$Z_b = \frac{V_{1ze/f}}{I_{1ze/f}} = \frac{S_{ze}}{3 I^2_{1ze/f}} \quad [\Omega] \qquad Xb = \sqrt{Z_b^2 - Rb^2} \quad [\Omega_i]$$

$$Rb = Z_b \cdot \cos\varphi_{ze} \quad [\Omega] \qquad Xb = Z_b \cdot \sin\varphi_{ze} \quad [\Omega]$$

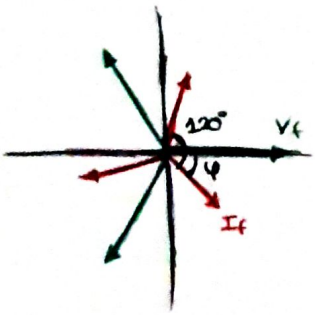
Grafikoak

Izar-konexioa (Y)

$$\varphi = \varphi_V - \varphi_I$$



Triangelu-konexioa (Δ)



Makina asinkronoak

Estatoreko abiadura (n_1):

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} \text{ (bira/min)}$$ non $f_1 \equiv$ sareko maiztasuna/estatoreko
$p \equiv$ polo pare kop.

Lerradura (s):

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \text{ (-)}$$ non $n_1 \equiv$ estatoreko abiadura
$n_2 \equiv$ errotoreko abiadura

$n_2 > n_1$ denean balaztatzen ariko da eta s(-).

Maiztasun errotoreko (f_s):

$$f_s = s \cdot f_1 \text{ (Hz)}$$

Erresistentziak:

aldakorra: $R_K = R_2\left(\frac{1-s}{s}\right)$ [Ω] filtrazioa da, efektu mekanikoa

konstanteak: $R_b = R_1 + R_2' = R_1 + a^2 R_2$ [Ω] erreala da

$$X_b = X_1 + X_2' = X_1 + a^2 X_2 \text{ [Ω]}$$

Saretik xurgatutako potentzia (P_1):

$$P_1 = 3 V_{1f} I_{1f} \cos\varphi \text{ [W]} \qquad P_1 = P_{mc} + P_H + P_{J2} + P_{J1} + P_{Fe} \text{ [W]}$$

Joule galerak (P_J):

$$P_{J1} = 3 R_1 I_{1f}^2 \text{ [W]} \qquad P_{J2} = 3 R_2 I_{2f}^2 \text{ [W]}.$$

Intentsitatea ($\vec{I}_{1f}$):

$$\vec{I}_{1f} = \frac{V_{1f}}{\sqrt{(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2}} = I_{1f} \angle\varphi \text{ [A]} \qquad \varphi = \varphi_V - \varphi_I$$

Barne-potentzia mekanikoa (P_{mb}):

$$P_{mb} = 3\, R'_2 \, I'^2_{2f} \quad [W] \qquad P_{mb} = \left(\frac{1-s}{s}\right) P_{J2} \quad ??$$

Potentzia mekaniko erabilgarria (P_{me}):

$$P_{me} = P_{mb} - P_H \quad [W]$$

non $P_H \equiv$ marrusiadura galerak

Motorraren errendimendua (η_{motor}):

$$\eta_{motor} = \frac{P_{me}}{P_1} \quad (\%)$$

Sorgailuaren errendimendua (η_{sorg}):

$$\eta_{sorg} = \frac{P_2}{P_{me}} \quad (\%)$$

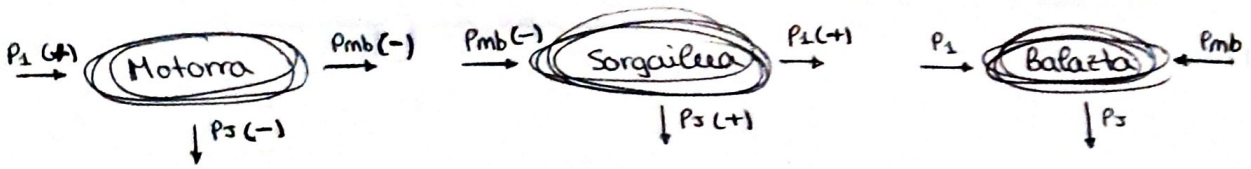
Momentu eragilea (C_e):

$C_{e,abi} \rightarrow s=1$

$$C_e = \frac{P_{me}}{\omega_2} = \frac{3 \cdot V_{1f}^2 \cdot R'_2}{2\pi (n_1/60) \cdot s \cdot [(R_1 + R'_2/s)^2 + (X_1 + X'_2)^2]} \quad [Nm]$$

Lerradura momentu eragile maximoaren (s_{max}):

$$s_{max} = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \quad (-)$$



Makina sinkronoak

Motorra: Energia elektrikoa → energia mekanikoa.

Sorgailua: Energia mekanikoa → energia elektriko.

Errotorea sinkronizatua dago estatoreko maiztasunarekin.

Errotorea ≡ indukitorea

Estatorea ≡ induzitua

Sorgailuan

Hutseko tentsioa (E_0).

Estatorean ez dagoenean intentsitaterik.

$$\vec{E_0} = \vec{V} + \vec{I}(R + jX_s) \quad [V]$$

$$\theta = \varphi_{E_0} - \varphi_V$$ positiboa

$\theta \equiv$ momentu- edo potentzia-angelua

Intentsitate eszitatzailea (I_e).

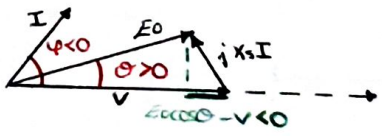
Intentsitate honek errotorean Fme indar magnetoeragilea sortzen du.

Abiadura (n_1), estatorean.

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} \quad (\text{bira/min})$$

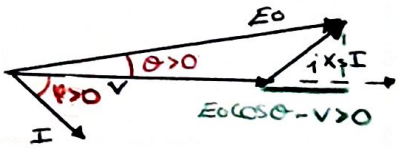
Aepieszitatua

$E_0 \cos\theta < V \rightarrow Q$ kontsumo (-)



Gaineszitatua

$E_0 \cos\theta > V \rightarrow Q$ sortu (+)



Potentzia aktiboa (P_{sor}).

$$P_{sor} = 3VI\cos\varphi \quad [W]$$

$$\varphi = \varphi_V - \varphi_I$$

$R \ll X_s$ denean $\longrightarrow$ $P_{sor} = 3\frac{VE_0}{X_s}\sin\theta$ [W]

Potentzia erreaktiboa (Q_{sor}).

$$Q_{sor} = 3VI\sin\varphi \quad [\text{var}]$$

$R \ll X_s$ denean $\longrightarrow$ $Q_{sor} = 3.\frac{V(E_0.\cos\theta - V)}{X_s}$ [var]

Errendimendua (η).

$$\eta = \frac{P_{elektrikoa}}{P_{mekanikoa}} \quad [\%]$$

Motorrean

Tentsioa (V).

$$\vec{V} = \vec{E_0} + \vec{I}(R + jX_s) \quad [V] \qquad \theta = \varphi_{E_0} - \varphi_V \text{ negatiboa}$$

Kontsumitutako potentzia (Pms).

$$P_{ms} = 3VI\cos\varphi \quad [W]$$

Potentzia erreaktiboa (Qms).

$$Q_{ms} = 3VI\sin\varphi \quad [var]$$

Errendimendua (η).

$$\eta = \frac{P_{mekanikoa}}{P_{elektrikoa}} \cdot 100 \quad [\%]$$

Momentu eragilea (Ce).

$$C_e = \frac{P_{ms}}{\omega_2} \quad [Nm]$$

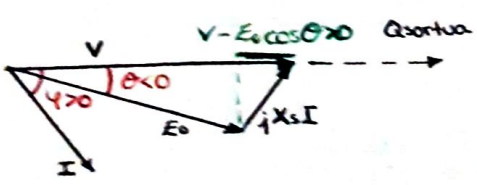
Momentu maximoa $\theta = 90°$ denean emango da.

$$C_{emax} = \frac{P_{max}}{\omega_2} \quad [Nm]$$

Motor azpieszitatua edo gaineszitatua.

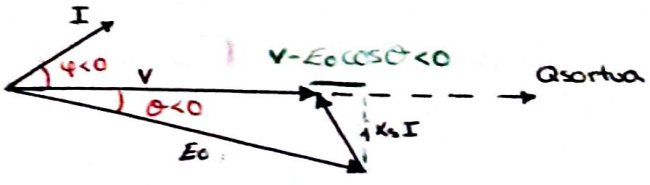
Azpieszitatua

$E_0\cos\theta < V \rightarrow$ Kontsumitu (+)



Gaineszitatua

$E_0\cos\theta > V \rightarrow$ Q sortu (-)



Korronte zuzeneko makinak

Estatorea induktorea eta errotorea induzitua.

Konexio-motak

- **Eszitazio independentekoak**: errotoreko eta estatoreko harilak **banandurik**.
- **Serie eszitazioduna**: harilak serian. **Intentsitate bera** daukate.
- **Eszitazio paraleloa**: harilak paraleloan. **Tentsio bera** daukate.
- **Eszitazio konposatua**: zati bat paraleloan beste zati bat serian.

Induzituriko sortutako indar elektroeragilea (E).

$$E = \frac{p}{c} \Phi N \frac{n}{60} \quad [V]$$

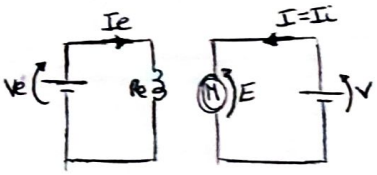
non

c ≡ paraleloan dauden zirkuitu kop.
Φ ≡ polotatako fluxua
N ≡ induzituko eroale aktibo kop.
n ≡ induzituaren abiadura (bira/min)

Eszitazio independentekoko motorra

Motorrak kontsumituriko potentzia elektrikoa (P)

$$P = P_i + P_e = VI_i + V_e I_e \quad [W]$$



Induzituak kontsumituriko potentzia elektrikoa (Pi)

$$P_i = P_{mb} + P_{ji} = EI_i + I_i^2 R_i \quad [W]$$

Barne-potentzia mekanikoa (Pmb)

$$P_{mb} = P_{me} + P_H \quad [W]$$

non

Pme ≡ potentzia mekaniko erabilgarria
PH ≡ marruskadura

Tentsioen arteko erlazioa

$$V = E + I_i R_i \quad [V]$$

$$\frac{n}{60} = \frac{V - I_i R_i}{\frac{p}{c} \Phi N}$$

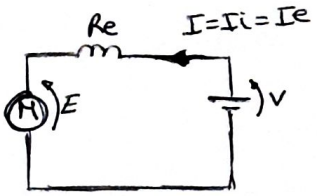
Ardatzeko momentu mekanikoa (Cmb)

$$C_{mb} = \frac{P_{mb}}{2\pi n/60} = \frac{P/c\ \Phi N\ n/60\ I_i}{2\pi n/60} = K_1 \Phi I_i \quad [Nm]$$

Serie estazioko motorra

Motorrak kontsumitutako potentzia elektrikoa (P)

$$P = VI = P_{mb} + P_{si} + P_{se} \quad [W]$$



Tentsioen arteko erlazioa

$$V = E + I(R_i + R_e) \quad [V]$$

Aurkako indar elektroeragilea (E).

$$E = \frac{P}{c} \Phi N \frac{n}{60} \quad [V] \qquad \frac{n}{60} = \frac{V - I(R_i + R_e)}{P/c \, \Phi \, N}$$

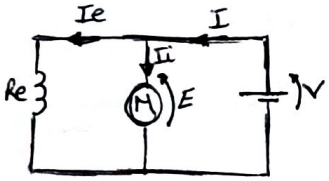
Ardatzeko momentu mekanikoa (Cmb)

$$C_{mb} = \frac{P_{mb}}{2\pi n/60} = \frac{EI}{2\pi n/60} \quad [Nm]$$

Eszitazio paraleloko motorra

Motorrak kontsumitutako potentzia elektrikoa (P)

$$P = P_i + P_e = V(I_i + I_e) \quad [W]$$



Tentsioen arteko erlazioa

$$V = E + I_i R_i \quad [V] \qquad \frac{n}{60} = \frac{V - I_i R_i}{P/c \, \Phi \, N}$$

Induzitutako potentzia (Pi)

$$P_i = P_{mb} + P_{si} = EI_i + I_i^2 R_i \quad [W]$$

Ardatzeko momentu mekanikoa (Cmb)

$$C_{mb} = \frac{P_{mb}}{2\pi n/60} = \frac{P/c \, \Phi N \, n/60 \, I_i}{2\pi n/60} \quad [Nm]$$

Eliadura bikoitzeko makina asinkronoak

Maiztasunak (f)

$f_1 = 50Hz > f_s$ izango da

non $f_1 \equiv$ estatoreko maiztasuna

$f_s \equiv$ errotoreko maiztasuna

Errotoreko abiadura (n_2)

$$n_1 = n_2 + n_s = n_2 + \frac{60 f_s}{p}$$

non $p \equiv$ polo pareak

errotoreak eta estatoreak noranzko berean biratzen badute, $n_s > 0$ eta ondorioz, $n_1 > n_2$. Aurkako noranzkoan bada $n_s < 0$ eta $n_1 < n_2$.

$n_1 > n_2$ → abiadura azpisinkronoa

$n_1 < n_2$ → errotoreko abiadura supersinkronoa

Potentziak (P)

1. Motorra.

Motor asinkronoak abiadura azpisinkronoan edo supersinkronoan (s>0). Eliadura bikoitzeko motor asinkronoak abiadura azpisinkronoan (s>0) edo supersinkronoan (s<0).

$P_{kontsumitzailea} = P_{kon,1} - P_{sor\ sare,2}$

$P_{sor\ sare,2} = P_{sor\ 2} - P_{bihur}$

$P_{kon,sare} = P_{kon,1} - (P_{sor\ 2} - P_{bihur})$

azpisinkronoa

supersinkronoan

$P_{kon,sare} = P_{kon\ 1} + (P_{kon\ 2} + P_{bihur})$

2. Sorgailua.

Sorgailu asinkronoak abiadura supersinkronoan (s<0). Eliadura bikoitzeko sorgailu asinkronoak abiadura azpisinkronoan (s>0) edo supersinkronoan (s<0).

supersinkronoan → $P_{sor,sare} = P_{sor,1} + (P_{sor,2} - P_{bihur})$

azpisinkronoan → $P_{sor,sare} = P_{sor,1} - (P_{kon,2} + P_{bihur})$