

MAQUINAS ASÍNCRONAS

La máquina asíncrona es el convertidor electromecánico mas usado en la actualidad, especialmente en su funcionamiento como motor, aunque, como toda máquina eléctrica, es reversible y puede trabajar como generador.

Como toda máquina eléctrica está constituida por dos circuitos eléctricos unidos por uno magnético. Uno de los circuitos eléctricos está alojado en el estator y consiste en un devanado trifásico distribuido de forma similar al de una máquina síncrona, y el otro está situado en el rotor, diseñándose ambos devanados con el mismo número de pares de polos (p). El circuito magnético está compuesto por dos núcleos (estatórico y rotórico) y un entrehierro.

Según la construcción del rotor se distinguen dos tipos: rotor bobinado, o de anillos rozantes, y rotor de jaula de ardilla. En el primero de ellos se tiene un devanado distribuido, generalmente trifásico y conectado en estrella, accesible eléctricamente a través del conjunto anillos-escobillas. En el segundo tipo, el devanado rotórico se reduce a una serie de barras conductoras con sus extremos en cortocircuito o jaula cilíndrica).

Su principio de funcionamiento como motor se basa en la ley de inducción de Faraday. Al alimentar el devanado estátórico desde una red trifásica se genera un campo magnético giratorio alterno-senoidal en el entrebierro, de manera que en las bobinas y barras que corten las líneas de campo se inducen f.e.m.. Si la corriente eléctrica tiene un camino para circular por los conductores del devanado rotórico, en éste se genera un campo magnético giratorio que reacciona con el estátórico creando un par de fuerzas que tiende a hacer girar al rotor. Si el par ejercido es superior al resistente el rotor girará siguiendo al campo magnético resultante a una velocidad inferior a la de sincronismo ya que si alcanzase dicha velocidad no se inducirían f.e.m. en el rotor y el par ejercido sería nulo.

Si mediante una máquina motriz acoplada al eje rotórico se lleva a éste a una velocidad superior a la de sincronismo, la máquina funciona como generador. Este funcionamiento se basa en los mismos principios ya descritos.

A diferencia de las máquinas síncronas, las máquinas asíncronas siempre absorben potencia reactiva en cualquier estado de funcionamiento, ya que es condición necesaria para crear el campo magnético. Además, funcionan a una velocidad que varía con la carga.

I.- PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR ASÍNCRONO

a) Velocidad de sincronismo del campo magnético giratorio:

$$n_1 = \frac{60f_1}{P} \quad (\text{r.p.m})$$

n_1 : Velocidad de sincronismo
 f_1 : frecuencia del estator;
 p : pares de polos.

b) Deslizamiento del rotor:

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

n_1 : Velocidad de sincronismo;
 n : velocidad del rotor.

c) Frecuencia del rotor:

$$f_2 = S f_1$$

f_2 : Frecuencia de las corrientes del rotor;
 f_1 : Frecuencia de las corrientes del estator.

d) F.e.m por fase del estator y del rotor (a rotor parado):

$$E_1 = 4,44 k_{w1} f_1 N_1 \phi_m \quad ; \quad E_2 = 4,44 k_{w2} f_1 N_2 \phi_m$$

E_1 : valor eficaz de la f.e.m por fase del estator,
 N_1 : número de espiras por fase;
 ϕ_m : flujo máximo;

$k_{w1} = k_{d1} k_{a1}$ coeficiente del devanado del estator (k_{d1} : coeficiente de distribución; k_{a1} : coeficiente de acortamiento);

E_2 : valor eficaz de la f.e.m. por fase del rotor,
 N_2 : número de espiras por fase;

$k_{w2} = k_{d2} k_{a2}$ coeficiente del devanado del rotor.

e) F.e.m por fase del rotor (con rotor móvil)

$$E_2 = 4,44 k_{w2} f_2 N_2 \phi_m$$

f) Relación entre las f.e.m por fase del rotor en reposo y en movimiento

$$E_{2s} = S E_2$$

E_{2s} : f.e.m. por fase del rotor en movimiento;

E_2 : f.e.m. por fase del rotor parado.

g) Velocidad de sincronismo del campo magnético del rotor respecto a sí mismo:

$$n_2 = \frac{60f_2}{P}$$

f_2 : Frecuencia del rotor en movimiento;

n_2 : Velocidad del campo magnético del rotor en r.p.m.

h) Ecuaciones de tensión en el estator y en el rotor:

$$V_1 = E_1 + R_1 I_1 + jX_1 I_1 ;$$

$$E_{2s} = R_2 I_2 + j X_{2s} I_2$$

V_1 : tensión aplicada al estator por fase;

E_1 : f.e.m. inducida en el estator por fase;

I_1 : corriente que circula en el estator por fase;

R_1 : resistencia por fase del estator;

X_1 : reactancia por fase del estator;

E_{2s} : f.e.m. inducida en el rotor por fase (rotor móvil);

I_2 : corriente que circula por el rotor por fase;

R_2 : resistencia por fase del rotor;

X_{2s} : reactancia por fase del rotor (rotor móvil).

II.- CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR ASÍNCRONO

a) Corriente del rotor (rotor móvil):

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{R_2 + jX_2}$$

E_{2s} : f.e.m. inducida en el rotor por fase (rotor móvil);

I_2 : corriente que circula por el rotor por fase;

R_2 : resistencia por fase del rotor;

X_{2s} : reactancia por fase del rotor (rotor móvil).

b) Corriente del rotor (rotor móvil):

$$I_2 = \frac{E_2}{R_2 + jX_2 + R_2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right)}$$

c) Resistencia de carga del rotor:

$$R_c = R_2 \left(\frac{1}{s} - 1 \right)$$

d) Relación de transformación de tensiones:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{k_{w1} N_1}{k_{w2} N_2} = m_v$$

E_1 : f.e.m. inducida en el estator por fase;

E_2 : f.e.m. inducida en el rotor por fase (a rotor parado);

k_{w1} : Coeficiente del devanado del estator

k_{w2} : Coeficiente del devanado del rotor.

N_1 : número de espiras por fase del estátor;

N_2 : número de espiras por fase del rotor.

e) Fe.m. del rotor en reposo reducida al estator:

$$E_2' = m_v E_2$$

E_2' : f.e.m. del rotor en reposo por fase reducida al estator;

E_2 : f.e.m. del rotor en reposo por fase;

m_v : relación de transformación de tensiones.

f) Relación de transformación de corrientes:

$$m_i = \frac{m_1 k_{w1} N_1}{m_2 k_{w2} N_2} = \frac{m_1}{m_2} m_v$$

m_1 : número de fases del estator (generalmente $m_1 = 3$)

m_2 número de fases del rotor.

g) Corriente del rotor reducida al estator:

$$I_2' = \frac{I_2}{m_i}$$

I_2' : Corriente del rotor reducida al estator;

I_2 : Corriente del rotor.

h) Impedancias del rotor reducidas al estator:

$$R_2' = m_v m_i R_2 \quad ; \quad X_2' = m_v m_i X_2 \quad ; \quad R_c' = m_v m_i R_c$$

R_2' : resistencia del rotor por fase reducida al estator;

R_2 : resistencia del rotor por fase;

X_2' : reactancia del rotor en reposo por fase reducida al estator;

X_2 : reactancia del rotor en reposo por fase;

m_v : relación de transformación de tensiones;

m_i : relación de transformación de corrientes.

i) Relación fasorial entre las corrientes del estator y del rotor:

$$I_1 = I_0 + I_2' = I_0 + \frac{I_2}{m_i}$$

I_0 : corriente de vacío.

j) Ecuaciones fasoriales de tensiones del estator y del rotor:

$$V_1 = E_1 + R_1 I_1 + jX_1 I_1 \quad ; \quad E_2' = R_2' I_2' + R_c' I_2' + jX_2' I_2'$$

III.- ENSAYO DE VACÍO O DE ROTOR LIBRE DEL MOTOR ASÍNCRONO

a) Potencia en vacío absorbida por el rotor:

$$P_o = P_{Fe} + P_m + P_{cu1}$$

P_o : potencia absorbida en vacío;

P_{Fe} : pérdidas en el hierro;

P_m : pérdidas mecánicas;

P_{cu1} : pérdidas en el cobre del estator en vacío.

b) Relación de potencias en vacío:

$$P_{Fe} + P_m = P_o - P_{cu1} = P_o - m_1 R_1 I_o^2$$

m_1 : número de fases del estator (generalmente $m_1 = 3$).

c) Factor de potencia en vacío:

$$\cos \varphi_o = \frac{P_{Fe}}{m_1 V_{1n} I_o}$$

d) Componentes de la corriente de vacío:

$$I_{Fe} = I_o \cos \varphi_o ; \quad I_{\mu} = I_o \sin \varphi_o$$

e) Componentes de la rama paralelo del circuito equivalente reducido al estator:

$$R_{Fe} = \frac{V_{1n}}{I_{Fe}} ; \quad X_{\mu} = \frac{V_{1n}}{I_{\mu}}$$

IV.- ENSAYO DE ROTOR BLOQUEADO DEL MOTOR ASÍNCRONO

a) Potencia absorbida por el motor con el rotor bloqueado:

$$P_{cc} = m_1 V_{1cc} I_{1n} \cos \varphi_{cc}$$

P_{cc} : potencia absorbida en cortocircuito con corriente nominal asignada;

V_{1cc} : tensión aplicada por fase al estator;

I_{1n} : corriente de cortocircuito igual a la nominal;

$\cos \varphi_{cc}$: f.d.p. en cortocircuito.

b) Factor de potencia del motor con el rotor bloqueado:

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{m_1 V_{1cc} I_{1n}}$$

c) Impedancia de la rama serie del motor asíncrono:

$$R_{cc} = R_1 + R_2' = \frac{V_{1cc}}{I_{1n}} \cos \varphi_{cc} ; \quad X_{cc} = X_1 + X_2' \sin \varphi_{cc}$$

V.- BALANCE DE POTENCIAS

a) Potencia eléctrica de entrada al estator:

$$P_1 = m_1 V_1 I_1 \cos \varphi_1$$

P_1 : potencia de entrada al estator (potencia eléctrica absorbida de la red);

m_1 : número de fases del estator; V_1 : tensión del estator por fase;

I_1 : corriente del estator por fase; $\cos \varphi_1$: f.d.p. del motor (f.d.p. del estator).

b) Pérdidas en el cobre del estator

$$P_{cu1} = m_1 R_1 I_1^2$$

P_{cu1} : pérdidas en el cobre del estator; R_1 : resistencia por fase del estator;

I_1 : corriente del estator por fase; m_1 : número de fases del estator.

c) Pérdidas en el estator:

$$P_{p1} = P_{cu1} + P_{Fe1}$$

P_{p1} : pérdidas en el estator;

P_{cu1} : pérdidas en el cobre del estator;

P_{Fe1} : pérdidas en el hierro del estator.

d) Pérdidas en el hierro del estator:

$$P_{Fe} = P_{Fe1} = m_1 E_1 I_{Fe} \approx m_1 V_1 I_{Fe}$$

P_{Fe1} : pérdidas en el hierro del estator (son las únicas pérdidas en el hierro del motor);

m_1 : número de fases del estator; E_1 : f.e.m. del estator por fase;

I_{Fe} : corriente de pérdidas en el hierro; V_1 : tensión del estator por fase.

e) Potencia que atraviesa el entrehierro:

$$P_a = P_1 - P_{p1} = P_1 - P_{cu1} - P_{Fe1}$$

P_a : potencia en el entrehierro;

P_1 : potencia de entrada al estator;

P_{p1} : pérdidas en el estator; P_{cu1} : pérdidas en el cobre del estator; P_{Fe1} : pérdidas en el hierro del estator.

j) Pérdidas en el cobre del rotor:

$$P_{cu2} = m_2 R_2 I_2^2 = m_1 R_2' I_2'^2$$

P_{cu2} : pérdidas en el cobre del rotor;

R_2 : resistencia por fase del rotor;

I_2 : corriente del rotor por fase;

m_2 : número de fases del rotor; m_1 : número de fases del estator;

R_2' : resistencia por fase del rotor reducida al estator;

I_2' : corriente del rotor por fase reducida al estator.

g) Potencia mecánica interna del motor:

$$P_{mi} = P_a - P_{cu2}$$

P_{mi} : potencia mecánica interna del motor;

P_a : potencia de entrehierro;

P_{cu2} : pérdidas en el cobre del rotor.

h) Expresión de la potencia mecánica interna del motor:

$$P_{mi} = m_1 R_2' \left(\frac{1}{s} - 1 \right) I_2'^2$$

P_{mi} : potencia mecánica interna del motor;

m_1 : número de fases del estator;

R_2' : resistencia por fase del rotor reducida al estator;

I_2' : corriente del rotor por fase reducida al estator.

s : deslizamiento del motor.

i) Potencia mecánica Útil del motor:

$$P_u = P_{mi} - P_m$$

P_u : potencia mecánica útil;

P_{mi} : potencia mecánica interna;

P_m : pérdidas mecánicas del motor.

j) Rendimiento del motor:

$$\eta = \frac{P_u}{P_1} = \frac{P_u}{P_u + P_m + P_{cu2} + P_{Fe} + P_{cu1}}$$

k) Relación entre la potencia de pérdidas en el cobre del rotor y la potencia mecánica interna:

$$\frac{P_{cu2}}{P_{mi}} = \frac{s}{1-s}$$

P_{cu2} : pérdidas en el cobre del rotor.

P_{mi} : potencia mecánica interna;

s : deslizamiento del motor.

l) Relación entre la potencia de entrehierro, la potencia de pérdidas en el cobre del rotor y la potencia mecánica útil:

$$P_a = P_{mi} + P_{cu2} = m_1 \frac{R_2'}{s} I_2'^2 = \frac{P_{cu2}}{s} = \frac{P_{mi}}{1-s}$$

P_a : potencia de entrehierro;

P_{mi} : potencia mecánica interna;

P_{cu2} : pérdidas en el cobre del rotor;

VI.-PAR DE ROTACIÓN

a) Expresión del par motor útil:
$$\tau = \frac{P_u}{\omega} = \frac{P_u}{2\pi \frac{n}{60}}$$

τ : par motor en N.m.;

ω : velocidad angular mecánica en rad/s;

P_u : potencia mecánica útil;

n : velocidad del rotor en r.p.m.

b) Expresión del par motor (sin pérdidas mecánicas):

$$\tau = \frac{P_{mi}}{2\pi \frac{n}{60}}$$

τ : par motor en N.m.;

P_{mi} : potencia mecánica interna del motor;

n : velocidad del rotor en r.p.m.

c) Expresión del par motor (sin pérdidas mecánicas):

$$\tau = \frac{P_{mi}}{2\pi \frac{n_1}{60}(1-s)}$$

τ : par motor en N.m.;

P_{mi} : potencia mecánica interna del motor;

n_1 : velocidad de sincronismo en r.p.m.;

S : deslizamiento del motor

d) Expresión del par motor en función de la potencia de entrehierro:

$$\tau = \frac{P_a}{2\pi \frac{n_1}{60}}$$

τ : par motor en N.m.;

P_a : potencia de entrehierro;

n_1 : velocidad de sincronismo en r.p.m.;

e) Expresión del par motor en función de los parámetros de la máquina:

$$\tau = \frac{m_1 \frac{R_2'}{s} V_1^2}{2\pi \frac{n_1}{60} \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + X_{cc}^2 \right]}$$

τ : par motor en N.m.;

m_1 : número de fases del estator;

I_2' : corriente del rotor por fase reducida al estator.

n_1 : velocidad de sincronismo en r.p.m.;

R_2' : resistencia por fase del rotor reducida al estator;

V_1 : tensión aplicada al estator por fase;

S : deslizamiento del motor.

f) Deslizamiento del motor para par máximo:
$$S_m = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2}}$$

S_m : deslizamiento del motor para par máximo;

R_2' : resistencia por fase del rotor reducida al estator;

X_{cc} : reactancia de cortocircuito del motor.

NOTA: el signo más se utiliza para funcionamiento como motor y el signo menos para el funcionamiento como generador.

g) Expresión del par máximo del motor:

$$\tau_{\max} = \pm \frac{m_1 V_1^2}{2\pi \frac{n_1}{60} 2 \left[\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2} \right]}$$

h) Relación entre los deslizamientos para par máximo con diversas resistencias en el circuito del rotor:

$$\frac{S'_m}{S_m} = \frac{R'_{\tau 2}}{R'_2}$$

S_m : deslizamiento del motor para par máximo y resistencia R'_2 por fase del rotor reducida al estator;

S'_m : deslizamiento del motor para par máximo y resistencia $R'_{\tau 2}$, por fase del rotor reducida al estator;

i) Fórmula de Kloss:

$$\frac{\tau}{\tau_{\max}} = \frac{2(1 + aS_m)}{\frac{S}{S_m} + 2aS_m + \frac{S_m}{S}}$$

S_m : deslizamiento del motor para τ_{\max} ; $a = R_1 / R'_2$

S : deslizamiento del motor para el par τ

j) Relación de deslizamientos para el mismo par y diversas resistencias en el circuito del rotor:

$$\frac{S'}{S} = \frac{R'_{\tau 2}}{R'_2}$$

Significado geométrico: a igualdad de pares en las curvas características artificiales y natural de un motor asíncrono, el deslizamiento en la característica artificial respecto a la natural, coincide con el cociente de resistencias totales en el rotor correspondientes a cada curva.

k) Expresión de la curva del par de un motor asíncrono para bajos deslizamientos:

$$\frac{\tau}{\tau_{\max}} = \frac{2S}{S_m}$$

NOTA: es la ecuación de una recta.

l) Expresión de la curva del par de un motor asíncrono para grandes deslizamientos:

$$\frac{\tau}{\tau_{\max}} = \frac{2S_m}{S}$$

NOTA: es la ecuación de una hipérbola.

VII.- ARRANQUE DE LOS MOTORES ASÍNCRONOS

Relación del par de arranque con autotransformador y el par de arranque en directo:

$$\tau_{a,aut} = X^2 \tau_a$$

$\tau_{a,aut}$: par de arranque con autotransformador;

τ_a : par de arranque directo (con tensión nominal);

X : relación de tensiones entre la tensión por fase del autotransformador y la tensión por fase en directo que llega al motor.

b) Corriente de arranque en directo:

$$I_{cc} = \frac{V_{1red}}{Z_{cc}} ; \quad Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}$$

V_{1red} : tensión por fase de la red;

I_{cc} : corriente de arranque en directo;

Z_{cc} : impedancia de cortocircuito del motor.

c) Corriente de arranque con tensión reducida:

$$I_{a\ motor} = \frac{xV_{1red}}{Z_{cc}} = xI_{cc}$$

d) Relación del par de arranque con la conmutación estrella-triángulo y el par de arranque en directo:

$$\tau_{a\lambda} = \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)^2 \tau_a = \frac{1}{3} \tau_a$$

e) Relación de al corriente de arranque con la conmutación estrella-triángulo y la corriente de arranque en directo:

$$I_{a\lambda} = \frac{1}{3} I_{cc}$$

f) Resistencia reducida al estator, necesaria para obtener el par máximo en el arranque (motores con rotor devanado)

$$R'_{adic} = \sqrt{R_1^2 + X_{cc}^2} - R'_2$$

VII.- DINÁMICA DEL MOTOR ASÍNCRONO

a) Par de aceleración:

$$\tau - \tau_r = J \frac{d\omega}{dt} \quad (\text{N.m})$$

τ : par motor;

τ_r : par resistente

J : momento de inercia del rotor;

ω : velocidad angular en rad/s.

b) Par de aceleración en función del deslizamiento:

$$\tau - \tau_r = J \omega_1 \frac{dS}{dt}$$

τ : par motor;

τ_r : par resistente;

J : momento de inercia del rotor;

ω_1 : velocidad angular del campo magnético giratorio en rad/s;

S: deslizamiento.

c) Tiempo de arranque:

$$t_A = -\frac{J\omega_1^2}{2\tau_{\max}} \left[\frac{S_1^2 - S_2^2}{2S_m} + S_m \ln \frac{S_1}{S_2} \right]$$

d) Pérdidas de energía en el arranque y en el frenado de un motor asíncrono:

$$\Delta W_a = \frac{J\omega_1^2}{2} + \frac{J\omega_1^2}{2} \frac{R_1}{R_2'}; \quad \Delta W_f = 3 \frac{J\omega_1^2}{2} \left[1 + \frac{R_1}{R_2'} \right]$$

ΔW_a : pérdida de energía en el arranque;

ΔW_f : pérdida de energía en el frenado.

XI.- MOTOR DE INDUCCIÓN MONOFÁSICO

a) Deslizamiento del campo giratorio directo:

$$S_d = S = \frac{n_1 - n}{n_1} = 1 - \frac{n}{n_1}$$

S_d : deslizamiento del campo giratorio directo;

n : velocidad de giro del motor (en r.p.m.);

n_1 : velocidad de sincronismo del campo giratorio (en r.p.m.).

b) Deslizamiento del campo giratorio inverso:

$$S_i = \frac{n_1 - (-n)}{n_1} = 1 + \frac{n}{n_1} = 2 - S$$

S_i : deslizamiento del campo giratorio inverso;

n : velocidad de giro del motor (en r.p.m.);

n_1 : velocidad de sincronismo del campo giratorio (en r.p.m.);

S : deslizamiento directo.

c) Resistencia de carga del circuito equivalente para el campo directo e inverso, respectivamente:

$$R'_{cd} = \frac{R'_2}{2} \left(\frac{1}{S} - 1 \right) = \frac{R'_2}{2} \left(\frac{1-S}{S} \right); \quad R'_{ci} = \frac{R'_2}{2} \left(\frac{1}{2-S} - 1 \right) = -\frac{R'_2}{2} \left(\frac{1-S}{2-S} \right)$$

R'_{cd} : resistencia de carga del campo directo;

R'_2 : resistencia del rotor reducida al estator;

R'_{ci} : resistencia de carga del campo inverso;

S : deslizamiento.

d) Potencia mecánica interna del motor asíncrono monofásico:

$$P_{mi} = (P_{mi})_d + (P_{mi})_i = \frac{R'_2}{2} (1-S) \left[\frac{I_{2d}'^2}{S} - \frac{I_{2i}'^2}{2-S} \right]$$

P_{mi} : potencia mecánica interna

I_{2d}' : corriente del rotor reducida al estator del campo directo

I_{2i}' : corriente del rotor reducida al estator del campo inverso

S : deslizamiento.

e) Par del motor asíncrono monofásico,

$$\tau = \frac{P_{mi}}{\omega_1 (1-S)} = \frac{1}{\omega_1} \frac{R'_2}{2} \left[\frac{I_{2d}'^2}{S} - \frac{I_{2i}'^2}{2-S} \right]$$