

2 - CÁLCULO PARAMÉTRICO DE MÁQUINAS LINEALES

2.1 - F.e.m de las máquinas de corriente alterna lineales planas

El valor medio de la f.e.m. inducida en una espira de paso diametral, independientemente de la forma espacial o de la variación temporal de la onda de flujo alterno, es:

$$\bar{e} = \frac{2\hat{\Phi}}{T} \quad (V)$$

$\hat{\Phi}$ = flujo máximo o total en el entrehierro por polo,

$2\hat{\Phi}$ = variación de flujo entre un máximo positivo y un máximo negativo durante el tiempo $T/2$ segundos de un semiperíodo.

Si f (Hz) es la frecuencia del flujo alterno, o sea el número de períodos por segundo, se tiene:

$$T = \frac{1}{f} \quad (s)$$

y resulta para la espira citada:

$$\bar{e} = 4 f \hat{\Phi} \quad (V) \quad (2.1.a)$$

La f.e.m. \bar{E} media inducida por fase debido a que en cada fase existen N_f espiras, independientemente de la forma del campo magnético en el entrehierro, vendrá dada por:

$$\bar{E} = 4 f \hat{\Phi} N_f \quad (V)$$

El coeficiente de distribución ($k_d < 1$) afecta a la \bar{E} si el devanado no es concentrado. Es decir, si el número de ranuras por polo y fase es mayor que 1, la distribución de las bobinas provoca un cierto desfase entre los valores instantáneos de la f.e.m. en las espiras de distintas ranuras; la resultante de las varias ondas de f.e.m. idénticas, pero desfasadas, da un valor medio siempre inferior al de las mismas ondas superpuestas

$$\bar{E} = 4 f \hat{\Phi} (N_f k_d) \quad (V) \quad (2.1.b)$$

El coeficiente de acortamiento (k_y) afecta a la \bar{E} si, además, el paso de bobina y_n no es diametral. El acortamiento produce un desfase adicional entre las f.e.m.s. de los conductores de ida y de vuelta en cada espira lo que hace necesario introducir un nuevo factor de corrección, llegándose así a la expresión de la f.e.m. media por fase:

$$\bar{E} = 4 f \hat{\Phi} (N_f k_d k_y) \quad (V) \quad (2.1.c)$$

Si bien la f.e.m. media por espira es por completo independiente de la forma espacial o del curso temporal de la onda magnética, vemos que no ocurre lo mismo en cuanto aparece algún desfase entre las f.e.m.s. de los distintos conductores o espiras conectados en serie. La forma de onda influye ya a través de γ_d y γ_y sobre el valor medio de la f.e.m. resultante por fase.

Los factores indicados son de difícil evaluación salvo que se trate de f.e.m. senoidal y en este caso hay que establecerlos separadamente para la fundamental y para los restantes armónicos superiores.

A los efectos operatorios, es cómodo reunir ambos factores de bobinado en uno solo γ_{18}

$$\gamma_{18} = \gamma_d \cdot \gamma_y \quad (2.1.d)$$

Debido a que el inducido de una máquina lineal es una lámina conductora, el número de ranuras por polo y fase es igual a 1, por lo que no hay ningún desfase entre los valores instantáneos de la f.e.m. de las distintas ranuras rotóricas (coeficiente de distribución $\gamma_d=1$). Además, si acortamos el paso de bobina γ_h , automáticamente también se produce un acortamiento en el inducido, sin producirse ningún desfase entre las f.e.m.s. de los conductores de ida y de vuelta en cada espira elemental ($\gamma_y=1$).

Como las magnitudes que más interesan en el tratamiento de las corrientes alternas son los valores eficaces, pasaremos de la expresión del valor medio \bar{E} al valor eficaz, E , multiplicando por el factor de forma k_f .

$$k_f = \frac{\text{valor eficaz}}{\text{valor medio}} = \frac{\sqrt{\frac{\int_0^T e^2 dt}{T}}}{\frac{\int_0^{T/2} e dt}{T/2}}$$

El número de espiras por fase N_f , puesto en función del número total de conductores Z del inducido y del número de fases m de la máquina, es:

$$N_f = \frac{Z}{m}$$

y

$$E = 2 k_f f \frac{Z}{m} \quad (V) \quad (2.1.e)$$

En ondas senoidales el factor de forma vale como es sabido

$$k_f = \frac{E}{E} = \frac{1}{2\sqrt{2}} = 0,707$$

El flujo ficticio Φ_f del entrehierro por polo sería una onda senoidal capaz de inducir la misma f.e.m. eficaz E que la onda real, facilitándose así el cálculo.

La relación entre Φ_f actual, y Φ_f , ficticio, se desprende de la condición

$$E = 2 k_f f \Phi_f \frac{Z}{m} = 2 \cdot 0,707 f \Phi_f \frac{Z}{m} \quad (V)$$

De aquí

$$E = 2,22 f \Phi_f \frac{Z}{m} \quad (V)$$

$$\Phi_f = \frac{m E}{2,22 f Z} \quad (Wb) \quad (2.1.f)$$

y

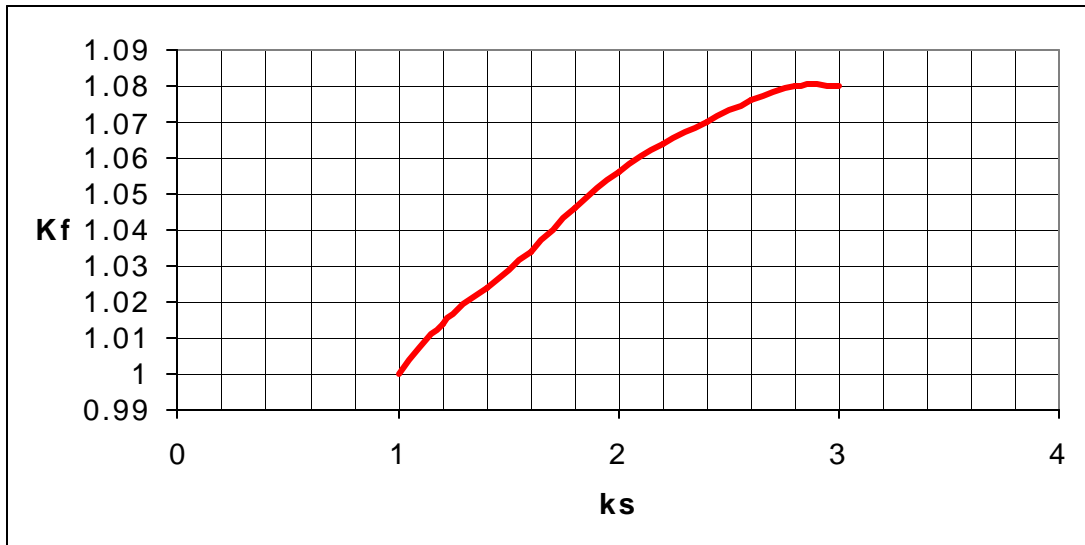
$$\Phi_f = \frac{1,11 \Phi_f}{k_f} = K_f \Phi_f \quad (2.1.g)$$

Siendo el factor relativo de forma

$$K_f = \frac{1,11}{k_f} \quad (2.1.h)$$

En máquinas lineales planas la expresión (2.1.h) es de difícil aplicación, pero puede usarse como orientación tablas y gráficos para máquinas convencionales rotativas. En sus valores influirá el tipo constructivo de la máquina, por lo que respecta a la configuración, proporciones del entrehierro y cabezas de bobina, muy importantes en máquinas lineales planas.

En las máquinas lineales planas, para poder determinar aproximadamente el valor K_f , podemos asimilar la forma del entrehierro a la misma forma que los motores de inducción.



$$k_s = \frac{F_{\delta} + F_{d(1)} + F_{d(2)}}{F_{\delta}}$$

F_{δ} = f.m.m. para el entrehierro, en A/polo

$F_{d(1)}$ = f.m.m. para los dientes del primario o estator en A/polo.

$F_{d(2)}$ = f.m.m. para los dientes del secundario o rotor en A/polo.

Fig.21 : Factor relativo de forma $K_f = f(k_s)$ para un sistema polar con rotor y estator ranurado (motores de inducción) [18].

Las máquinas lineales de inducción no tienen antecedentes de cálculo como los citados, para determinar K_f , debiéndose construir un prototipo previo o admitir errores considerables en las estimaciones. Estos errores solo podrán corregirse cuando la experiencia constructiva vaya dando más datos para diseños posteriores.

En los motores de inducción rotativos influye sobre la forma de la curva de campo el mayor o menor grado de saturación magnética, el cual se define numéricamente por el cociente de la f.m.m. consumida en el paso de dientes y entrehierro a la f.m.m. necesaria para el entrehierro sólo, cociente que recibe el nombre de "factor de saturación" k_s .

El factor de saturación no puede calcularse hasta conocer la excitación que precisamente se necesita. Es necesario, por tanto, admitir un valor previo y revisarlo a posteriori para cambiarlo si fuera necesario.

2.1.1 - Inducción máxima en el entrehierro

Al flujo senoidal Φ_f le corresponde una inducción máxima en el entrehierro, liso y sin canales de ventilación, que la podemos calcular a partir de los dos flujos, uno real Φ_f y otro ideal Φ_f^* de la onda senoidal ficticia capaz de inducir la misma f.e.m. eficaz E por fase.

Siguiendo paralelamente ambos caminos, tendremos:

Onda real:

$$\Phi_f = \frac{m E}{2 k_f f Z} = K_f \Phi_f^* \quad (\text{Wb}) \quad \text{con} \quad K_f = \frac{1,11}{k_f}$$

Onda senoidal:

$$\Phi_f^* = \frac{m E}{2,22 f Z} \quad (\text{Wb})$$

Inducción media:

Onda real

$$\bar{B}_f = \frac{\Phi_f}{\tau_p C} = K_f \bar{B}_f^* \quad (T)$$

Onda senoidal

$$\bar{B}_f^* = \frac{\Phi_f^*}{\tau_p C} \quad (T)$$

Inducción máxima:

Onda real

$$\hat{B}_f = k_M \bar{B}_f = k_M K_f \frac{\Phi_f}{\tau_p C} = K_M \hat{B}_f^* \quad (T)$$

Onda senoidal

$$\hat{B}_f^* = \frac{\Phi_f^*}{\tau_p C} = \frac{\Phi_f}{2 \tau_p C} \quad (T)$$

donde k_M es el factor de amplitud $\frac{\hat{B}_2}{B_2}$ de la onda real de inducción y K_M el coeficiente de corrección a aplicar a la inducción máxima senoidal B_2 para obtener el valor de la inducción máxima efectiva \hat{B}_2 . Al coeficiente citado:

$$K_M = \frac{\hat{B}_2}{B_2} = \frac{k_M K_f}{2} = \frac{k_M}{k_f} \frac{1,11}{2} = \frac{k_M}{\sqrt{2} k_f} \quad (2.1.1.a)$$

lo denominaremos propiamente "factor relativo de amplitud". De (2.1.1.a) deducimos

$$\hat{B}_2 = K_M B_2 \quad (T) \quad (2.1.1.b)$$

$$\hat{B}_2 = \frac{1,11}{2} \frac{k_M}{k_f} B_2 \quad (T) \quad (2.1.1.c)$$

El factor absoluto de amplitud k_M para la onda real de inducción depende de las mismas características del entrehierro que el factor absoluto de forma de la onda de f.e.m., k_f , y por tanto, el factor relativo de amplitud K_M que reúne a ambos coeficientes k_M y k_f podrá determinarse en función de las mismas variables que el factor relativo de forma K_f antes estudiado [18].



$$k_s = \frac{\sum_{d(1)} \sum_{d(2)} \mu_0 \mu_r \frac{N^2}{l}}{\sum_{\text{air gap}} \mu_0 \frac{N^2}{l}}$$

$$K_M = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{k_M}{k_f}$$

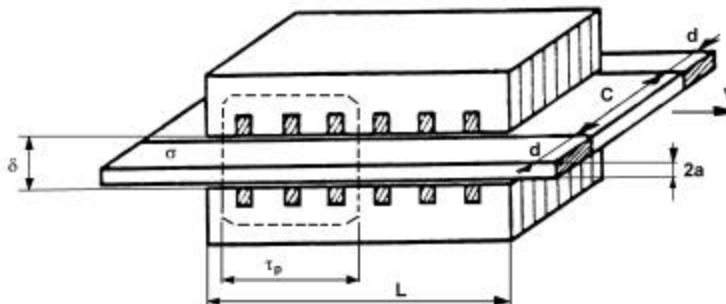
μ_0 = f.m.m. para el entrehierro, en A/polo

$\sum_{d(1)}$ = f.m.m. para los dientes del primario o estator en A/polo.

$\sum_{d(2)}$ = f.m.m. para los dientes del secundario o rotor en A/polo.

Fig. 22: Factor relativo de amplitud para motores de inducción

Debido al gran entrehierro que poseen los motores lineales, la excitación necesaria para estos motores será mayoritariamente para vencer la reluctancia magnética del entrehierro, por lo que el "factor de saturación" k_s será siempre próximo a 1, dándonos un valor aproximado de K_M por debajo de la curva de la fig.22.



C = ancho total o geométrico del inducido en el entrehierro.

d = ancho cabeza de bobina

L = longitud del inducido en el entrehierro

τ_p = paso polar del inducido .

$2a$ = entrehierro = grueso rotórico (2 a) + 2 holgura mecánica

μ_r = conductividad del material del rotor o inducido.

Fig. 23: Dimensiones físicas de un motor lineal plano.

Sea Z_n = número medio de conductores en serie por ranura. En las máquinas polifásicas, con devanado uniforme, Z_n es el número real de conductores alojado en cada ranura, o bien este número dividido por el de vías si hay varias de ellas en paralelo. En las máquinas monofásicas, donde el devanado no acostumbra a ser uniforme, es de todos modos:

$$Z_n = \frac{Z}{n} \quad \text{conductores medios / ranura} \quad (2.1.1.d)$$

con la misma salvedad respecto al número de vías
 n = número de ranuras de la máquina.

Pongamos también

$$l_p = \frac{L}{2p} \quad (m) \quad (2.1.1.e)$$

L = longitud del inducido en el entrehierro
 p = pares de polos de la máquina.

Si sustituimos en la expresión siguiente:

$$E = 2,22 f \frac{Z}{m} \quad (V) \quad (2.1.1.f)$$

las expresiones:

$$\hat{B}_g = \frac{2}{\pi} \frac{Z}{p} C (T)$$

$$Z_n = \frac{Z}{n} \quad \text{conductores medios / ranura}$$

$$l_p = \frac{L}{2p} \quad (m)$$

para \hat{B}_g y Z y teniendo en cuenta que

$$\frac{n}{m \cdot 2p} = n_{pf} \quad \text{ran./ polo y fase}$$

es el número de ranuras del inducido por polo y fase, resulta:

$$E = \sqrt{2} f n_{pf} Z_n (CL) \hat{B}_g \quad (V) \quad (2.1.1.g)$$

En esta ecuación

C = ancho total o geométrico del inducido en el entrehierro

L = longitud del inducido en el entrehierro

\hat{B}_g = inducción máxima en el entrehierro con inducido liso y onda de flujo senoidal

n_{pf} = ranuras por polo y fase.
 f = frecuencia en Hz.

Conclusiones

Fijada la frecuencia f , la f.e.m. por fase es directamente proporcional al número de ranuras e inversamente proporcional al número de polos de la máquina ya que el número de ranuras por polo y fase vale $n_{pf} \propto \frac{n}{m \cdot 2p}$. Este resultado es de esperar, ya que, una vez definida la frecuencia f , la velocidad lineal V ha de ser inversamente proporcional al número de pares de polos.

$$V \propto \frac{L f}{p} \quad (m/s) \quad (1.2.a)$$

Por lo demás, la tensión sigue siendo proporcional a la superficie del inductor o del inducido en el entrehierro ($C L$) y a la inducción máxima ideal \hat{B}_g , en el entrehierro.

Cuanto más pequeño sea el entrehierro, menos f.m.m. necesitaremos para tener una determinada inducción en el entrehierro \hat{B}_g . Con entrehierros pequeños la máquina es más fácil de magnetizar, y la dispersión es más pequeña.

2.2 - Potencia de una máquina de corriente alterna lineal plana

Podemos deducir las ecuaciones de la potencia aparente en bornes en función de las dimensiones principales del inducido (ancho y longitud) y de los parámetros electromagnéticos característicos: inducción máxima ideal en el entrehierro, densidad de corriente y carga lineal específica.

Partiendo de la expresión:

$$P_b \propto m U_f I_f \quad (VA) \quad (2.2.a)$$

y tomando el valor de la inducción máxima de onda senoidal en el entrehierro \hat{B}_g que correspondería a la tensión en bornes por fase, es decir, con la máquina en vacío, tendremos según:

$$E_f \propto \sqrt{2} f n_{pf} Z_n (CL) \hat{B}_g \quad (V) \quad (2.1.1.g)$$

(f en Hz, C y L en m $\hat{B}_?$ en T)

La corriente por fase en función de la sección del conductor y de la densidad de corriente

$$I_f = s \quad (A)$$

(s en m², ? en A/m²)

de donde:

$$P_b = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{f}{p} A_{cu} A_D \hat{B}_{?0} \quad (VA) \quad (2.2.b)$$

siendo:

$$A_{cu} = 2 p m n_{pf} Z_n s \quad (m^2)$$

$$A_D = CL \quad (m^2)$$

f = frecuencia de la tensión en Hz

p = pares de polos de la máquina

A_{cu} = sección transversal de cobre en las ranuras

$A_D = (C L)$ = sección longitudinal del inducido en el entrehierro

$\hat{B}_{?0}$ = inducción máxima en el entrehierro supuesta la curva de campo senoidal en

vacío (para la tensión en bornes U_f por fase)

? = densidad de corriente en los conductores

Análogamente, se deduce:

$$P_b = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{f}{p} CL^2 (q \hat{B}_{?0}) \quad (VA) \quad (2.2.c)$$

siendo:

$$q = \frac{Z I_f}{L} = \frac{2 p m n_{pf} Z_n s}{L} \quad (A/m)$$

Z = número total de conductores del inducido

Conclusiones

Las dos ecuaciones que expresan la potencia aparente en bornes de una máquina de inducción lineal plana son exactamente proporcionales a la densidad de corriente o a la carga lineal específica, así como a la inducción máxima ideal en el entrehierro. Manteniendo constante estos coeficientes de trabajo, existe también proporcionalidad entre la potencia y las secciones geométricas transversales del

cobre en las ranuras y la sección longitudinal del inducido en el entrehierro; así, la potencia a frecuencia f constante es inversamente proporcional al número de polos de la máquina.

Como designamos por V_s la velocidad sincrónica en m/s

$$V_s \propto \frac{L f}{p} \quad (m/s) \quad (1.2.a)$$

(L = longitud de la máquina lineal en m)

entonces P_b resulta proporcional a esta velocidad.

Podemos apreciar que en la segunda expresión de la potencia aparente en bornes (2.2.c), esta última es proporcional al cuadrado de la longitud de la máquina, y sólo proporcional de forma lineal a la anchura de la máquina. Sin embargo, hemos de tener en cuenta que esta expresión está en función de la carga lineal específica, y ésta es inversamente proporcional a la longitud L , por lo que **la Potencia aparente en bornes para una velocidad de sincronismo dada, es proporcional a la anchura y a la longitud de la máquina, o sea a la superficie del inductor en el entrehierro.**

2.3 - Fuerza ficticia en las máquinas lineales de inducción planas

Definimos la fuerza ficticia F_b como la relación entre la potencia en bornes de la máquina P_b y la velocidad lineal del campo o velocidad sincrónica V_s .

$$F_b \propto \frac{P_b}{V_s} \quad ?N? \quad (2.3.a)$$

Teniendo en cuenta que

$$V_s \propto \frac{L f}{p} \quad (m/s)$$

es muy fácil deducir F_b de las expresiones anteriores

$$F_b \propto \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{?}{L} ? A_{cu} A_D ? ? \hat{B}_{?0} ? ?) \quad ?N? \quad (2.3.b)$$

$$F_b \propto \frac{\sqrt{2}}{2} ? A_{cu} C ? \hat{B}_{?0} ? ?) \quad ?N?$$

$$A_{cu} = \text{en } m^2$$

$$A_D = (C L) = \text{en } m^2$$

$$\hat{B}_{?0} = \text{en } T$$

$$? = \text{en } A/m^2$$

o bien

$$F_b = \frac{\sqrt{2}}{2} CL (q \hat{B}_{\theta_0}) \quad (N) \quad (2.3.c)$$

Conclusiones

Aparece explícita la fuerza ficticia F_b como la característica determinante de las dimensiones fundamentales C y L de la máquina, a igualdad de coeficientes electromagnéticos de trabajo \hat{B}_{θ_0} , μ y q con exacta proporcionalidad entre el primero y cada una de las restantes magnitudes.

2.4 - Fuerza de atracción entre semiinductores

El esfuerzo mecánico que se desarrolla entre dos superficies imanadas dentro de un campo homogéneo de inducción B viene dado por [18]:

$$f = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (N / m^2) \quad (2.4.1.a)$$

B en T
 μ_0 en T.m/A.

2.5 - F.e.m de las máquinas de corriente alterna lineales tubulares

Partimos de la ecuación de la f.e.m. por fase con flujo senoidal [18]:

$$E = 2,22 f \mu_0 \frac{Z \Phi}{m} \quad (V) \quad (2.1.1.f)$$

Al flujo senoidal Φ le corresponde una inducción máxima en el entrehierro, liso y sin canales de ventilación \hat{B}_θ :

$$\hat{B}_\theta = \frac{\Phi}{2\mu_p D} (T)$$

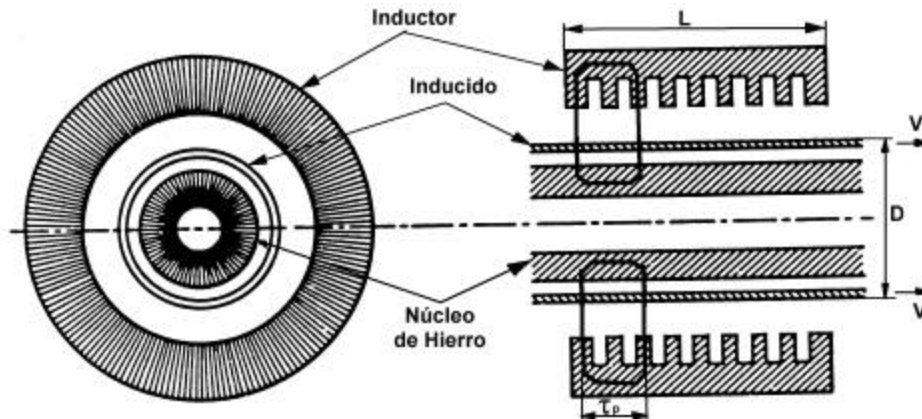


Fig. 24: Dimensiones físicas de un motor lineal tubular

Si hacemos:

$$Z_n \approx \frac{Z}{n} \quad \text{conductores medios / ranura}$$

$$\tau_p \approx \frac{L}{2p} \quad (m)$$

para τ_p y Z y teniendo en cuenta que

$$\frac{n}{m \cdot 2p} \approx n_{pf} \quad \text{ran./ polo y fase}$$

es el número de ranuras del inducido por polo y fase, resulta:

$$E_f \approx 4,44 f n_{pf} Z_n (LD) \hat{B}_g \quad (V) \quad (2.5.a)$$

En esta ecuación

D = diámetro del inducido en el entrehierro.

L = longitud del inducido en el entrehierro.

\hat{B}_g = inducción máxima en el entrehierro con inducido liso y onda de flujo senoidal

n_{pf} = ranuras por polo y fase.

f = frecuencia en Hz.

Conclusiones

Fijada la frecuencia f , la f.e.m. por fase es directamente proporcional al número de ranuras e inversamente proporcional al número de polos de la máquina ya que el

número de ranuras por polo y fase vale: $n_{pf} = \frac{n}{m \cdot 2p}$. Este resultado es de esperar, ya que, una vez definida la frecuencia f , la velocidad lineal V ha de ser inversamente proporcional al número de pares de polos.

$$V = \frac{L f}{p} \quad (m/s) \quad (1.2.a)$$

Por lo demás, la tensión sigue siendo proporcional a la superficie del inductor o del inducido en el entrehierro ($D L$) y a la inducción máxima ideal \hat{B}_g , en el entrehierro.

2.6 - Potencia de una máquina de corriente alterna lineal tubular

Podemos deducir las ecuaciones de la potencia aparente en bornes en función de las dimensiones principales del inducido (diámetro y longitud) y de los parámetros electromagnéticos característicos: inducción máxima ideal en el entrehierro, densidad de corriente y carga lineal específica.

Partiendo de la expresión:

$$P_b = m U_f I_f \quad (VA) \quad (2.2.a)$$

tomando el valor de la inducción máxima de onda senoidal en el entrehierro \hat{B}_g que correspondería a la tensión por fase en bornes, es decir, con la máquina en vacío, tendremos según:

$$E_f = 4,44 f n_{pf} Z_n (LD) \hat{B}_g \quad (V) \quad (2.5.a)$$

(f en Hz, D y L en m, \hat{B}_g en T)

La corriente por fase en función de la sección del conductor y de la densidad de corriente, será:

$$I_f = s j \quad (A)$$

(s en m^2 , j en A/m^2)
de donde:

$$P_b = 2,22 \frac{f}{p} A_{cu} A_D j \hat{B}_{g0} \quad (VA) \quad (2.6.a)$$

siendo:

$$A_{cu} = 2pmn_{pf} Z_n s \quad (m^2)$$

$$A_D = DL \quad (m^2)$$

f = frecuencia de la tensión en Hz

p = pares de polos de la máquina

A_{cu} = sección transversal de cobre en las ranuras

$A_D = (DL)$ = sección longitudinal del inducido en el entrehierro.

\hat{B}_{20} = inducción máxima en el entrehierro supuesta la curva de campo senoidal, en

vacío (para la tensión en bornes U_f por fase)

q = densidad de corriente en los conductores

Análogamente, se deduce:

$$P_b = 2,22 \frac{f^2}{p} DL^2 (q \hat{B}_{20}) \quad (VA) \quad (2.6.b)$$

siendo :

$$q = \frac{ZI_f}{L} = \frac{2pmn_{pf} Z_n s}{L}$$

Z = número total de conductores del inducido

Conclusiones

Las dos ecuaciones que expresan la potencia aparente en bornes de una máquina de inducción lineal tubular son proporcionales a la densidad de corriente o a la carga lineal específica así como a la inducción máxima ideal en el entrehierro. Manteniendo constante estos coeficientes de trabajo, existe también proporcionalidad entre la potencia y las secciones geométricas transversales del cobre en las ranuras y la sección longitudinal del inducido en el entrehierro; así, la potencia a frecuencia f constante es inversamente proporcional al número de polos de la máquina.

Como, designamos por V_s la velocidad sincrónica en m/s,

$$V_s = \frac{L f}{p} \quad (m/s) \quad (1.2.a)$$

(L = longitud de la máquina lineal en m)

entonces P_b resulta proporcional a esta velocidad.

Podemos apreciar que en la segunda expresión de la potencia aparente en bornes (4.6.b), esta última es proporcional al cuadrado de la longitud de la máquina, y sólo

proporcional de forma lineal al diámetro del inducido de la máquina. Sin embargo, hemos de tener en cuenta que esta expresión está en función de la carga lineal específica, y ésta es inversamente proporcional a la longitud L. Lo anterior nos permite afirmar también que **la potencia aparente en bornes es proporcional al diámetro y a la longitud de la máquina, o sea a la superficie del inductor en el entrehierro.**

2.7 - Fuerza ficticia en las máquinas lineales de inducción tubulares

Definimos la fuerza ficticia F_b como la relación entre la potencia en bornes de la máquina P_b y la velocidad lineal del campo o velocidad sincrónica V_s .

$$F_b = \frac{P_b}{V_s} \quad [N] \quad (2.3.a)$$

Teniendo en cuenta que

$$V_s = \frac{L f}{p} \quad (m/s) \quad (1.2.a)$$

es muy fácil deducir F_b de las expresiones anteriores

$$F_b = 2,22 \frac{A_{cu} D}{\pi} (\hat{B}_{\pi_0}) \quad [N] \quad (2.7.a)$$

$$A_{cu} = \text{en } m^2$$

$$A_D = (D L) = \text{en } m^2$$

$$\hat{B}_{\pi_0} = \text{en } T$$

$$q = \text{en } A/m^2$$

o bien

$$F_b = 2,22 \frac{DL}{\pi} (q \hat{B}_{\pi_0}) \quad [N] \quad (2.7.b)$$

(D y L en m, q en A/m, \hat{B}_{π_0} en T)

Conclusiones

Aparece explícita la fuerza ficticia F_b como la característica determinante de las dimensiones fundamentales D y L de la máquina, a igualdad de coeficientes electromagnéticos de trabajo \hat{B}_{γ_0} , γ y q , con exacta proporcionalidad entre el primero y cada una de las restantes magnitudes.

2.8 - Eficacia relativa de los diferentes tipos de máquinas

Es interesante comparar el grado de utilización posible del material empleado en la construcción, según el tipo de máquina a considerar. De acuerdo con lo que acabamos de ver, esta comparación puede establecerse directamente basándose en las ecuaciones de la fuerza en bornes.

Antes de comparar las máquinas lineales planas con las máquinas lineales tubulares, deberíamos asimilar el ancho C de la máquina lineal plana a la longitud de la circunferencia del diámetro D de una máquina lineal tubular. Para ello, sustituiremos en las ecuaciones de la fuerza ficticia en las máquinas lineales tubulares D por C .

Para las máquinas lineales de inducción planas tenemos:

$$F_b = \frac{\sqrt{2}}{2} \gamma CL \gamma (q \hat{B}_{\gamma_0}) \quad (N) \quad (2.3.c)$$

Para las máquinas lineales de inducción tubulares tenemos:

$$F_b = 2,22 \gamma DL \gamma (q \hat{B}_{\gamma_0}) = \frac{\sqrt{2}}{2} \gamma CL \gamma (q \hat{B}_{\gamma_0}) \quad (N) \quad (2.7.b)$$

Observamos que la "fuerza en bornes" en las máquinas lineales de inducción planas y en las máquinas lineales de inducción tubulares tiene la misma expresión, estando en función de la superficie del inducido.

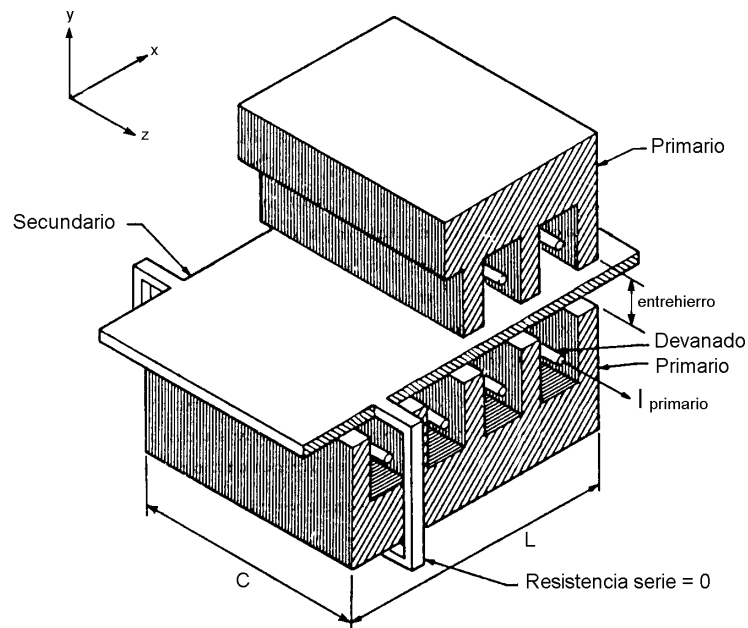


Fig. 25: Máquina lineal tubular bilateral (de doble cara) desarrollada.

La máquina tubular bilateral (fig. 24) se muestra desarrollada en la fig. 25. La anchura C es la circunferencia de la máquina tubular. El secundario, o inducido, ha sido desarrollado y sus extremos están conectados a través de una resistencia en serie de valor cero.

La longitud del motor lineal tubular es L . El inducido, o secundario, se mueve en la dirección del eje x .

Si la fuerza desarrollada por los motores lineales planos o tubulares depende de la superficie del inducido, **la ventaja de los motores lineales tubulares frente a los planos radica en que los tubulares no tienen cabeza de bobina ni en el inducido ni en el inductor. El rendimiento electromagnético de los devanados es, pues, superior.**

2.9 - Tiempo y fuerza aplicada a un motor lineal de traslación horizontal

A continuación se detallan las expresiones mecánicas y los criterios de signos empleados para el análisis de los resultados experimentales.

Contando en primer lugar con el arrastre lineal de una masa m , la fuerza que se precisa en cada instante para provocar una aceleración a es:

$$F_a = m.a \quad 2.9.a$$

$$\begin{aligned} F_a & : \text{N} \\ a & : \text{m/s}^2 \\ m & : \text{kg} \end{aligned}$$

Si la fuerza aplicada F_a se mantiene constante durante todo el tiempo de arranque T (s) hasta llegar a la velocidad de régimen V partiendo del estado de reposo, entonces:

$$F_a = m.(V/T) \quad 2.9.b$$

$$\begin{aligned} F_a & : \text{N} \\ V & : \text{m/s} \\ T & : \text{s} \\ m & : \text{kg} \end{aligned}$$

2.10 - Tiempo y fuerza aplicada a un motor lineal de movimiento vertical.

Sentido descendente

Con una masa m la fuerza que se precisa en cada instante para provocar una aceleración a en sentido descendente será:

$$F_a + m.g = m.a \quad 2.10.a$$

$$\begin{aligned} F_a & : \text{N} \\ a & : \text{m/s}^2 \\ m & : \text{kg} \end{aligned}$$

Si la fuerza aplicada F_a se mantiene constante durante todo el tiempo de arranque T (s) hasta llegar a la velocidad de régimen V partiendo del estado de reposo, entonces:

$$F_a = \frac{V}{T} + g.m \quad 2.10.b$$

$$F_a : \text{N}$$

V : m/s
 T : s
 m : kg

Sentido ascendente

Con una masa m, la fuerza que se precisa en cada instante para provocar una aceleración a en sentido ascendente será:

$$F_a = m \cdot a + m \cdot g \quad 2.10.c$$

F_a : N
 a : m/s²
 m : kg

Si la fuerza aplicada F_a se mantiene constante durante todo el tiempo de arranque T (s) hasta llegar a la velocidad de régimen V partiendo del estado de reposo, entonces:

$$F_a = m \left(\frac{V}{T} + g \right) \quad 2.10.d$$

F_a : N
 V : m/s
 T : s
 m : kg