TEMA 43

MOTOR ASÍNCRONO

43.1. PRINCIPIO DEL MOTOR ASÍNCRONO.

Para explicar el fundamento del motor asíncrono se recurre a la Ley de Lenz[1].

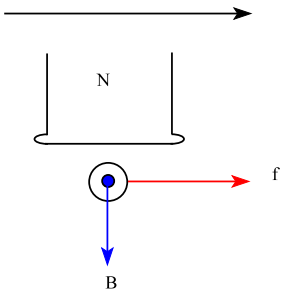


Fig. 43.1

Supongamos un polo de un imán que se desplaza delante de una espira, según se indica en la Fig.43.1. De acuerdo con la Ley de Lenz, en dicha espira se induce una fuerza electromotriz, la cual dará lugar a una corriente. Esta corriente tendrá un sentido tal, que al reaccionar con el campo magnético del polo inductor, producirá una fuerza que se opondrá a la causa que la produce (en este caso el desplazamiento relativo del imán), por tanto se desplazará en el mismo sentido del imán. En la Fig. 43.1 se ha representado esta circunstancia[2].

También se puede razonar el fundamento del motor asíncrono mediante consideraciones energéticas. En efecto, la corriente inducida en la espira produce una pérdida de energía en forma de calor por Joule, así como una transformación de energía eléctrica en mecánica. Existe un par electromagnético producido por la acción del campo magnético sobre la corriente en la espira. Este par aplicado a los polos en sentido inverso del movimiento, es aplicado a la espira en el sentido del movimiento, y dado que los pares tienen que ser iguales, la espira es arrastrada en el mismo sentido en que se desplaza el polo magnético.

[1] *Ley de Lenz: La fuerza electromotriz inducida tiende a oponerse a la causa que la produce.*

[2] La consecuencia como si el polo arrastrase al conductor en el mismo sentido en que se desplaza éste.

Para que se pueda aplicar el citado principio al motor de inducción, no hace falta más que colocar unas espiras cerradas sobre sí mismas en un rotor y hacer girar unos polos magnéticos alrededor de aquel.

Para obtener los polos giratorios, es suficiente disponer sobre el estator de la máquina, un arrollamiento polifásico alimentado por corrientes de pulsación **ω**, desfasadas **2π/p**. De esta manera se formarán **p** pares de polos ficticios que girarán a una velocidad **ω/p**[3].

En consecuencia, el estator de una máquina sincrónica puede servir para un motor de inducción[4].

El inducido o rotor del motor de inducción, está formado por un conjunto de barras conductoras de cobre, latón o aluminio, incrustadas en el hierro que constituye el rotor y cortocircuitadas en cada extremo mediante anillos conductores[5]. Estas barras forman un ligero ángulo con las generatrices del rotor.

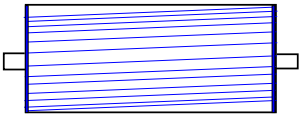


Fig.43.2

43.2. VELOCIDAD DEL ROTOR.

Si el rotor girase a la misma velocidad que los polos ficticios del estator (*velocidad de sincronismo*), no existiría ningún desplazamiento relativo de las espiras del rotor con relación a los polos ficticios del estator, por tanto no se induciría ninguna fuerza electromotriz, y en consecuencia ninguna corriente circularía por las espiras. En definitiva no existiría ninguna fuerza electromagnética que arrastrase al rotor, y el par motor sería nulo. Por tanto, debe existir una velocidad de rotación menor que la velocidad de sincronismo, es decir *el rotor debe deslizarse con relación a los polos ficticios del estator.*

Se define *deslizamiento*[6] a la relación:

$$g\% = \frac{velocidad\ de\ sincronismo\ -\ velocidad\ del\ rotor}{velocidad\ de\ sincronismo} \cdot 100 \qquad (43.1)$$

[3]En virtud del Teorema de Ferraris.

[4]Podemos definir un motor asíncrono como un convertidor de frecuencia en cortocircuito.

[5]Debido a esta disposición del sistema inducido, a estos motores se les conoce vulgarmente como *motores en jaula de ardilla.*

[6]En marcha normal, el deslizamiento es de un 6% para motores de pequeña potencia, y del 2% para motores de gran potencia.

Debido a que en este tipo de máquinas la velocidad de funcionamiento no puede ser igual a la velocidad sincrónica, reciben el nombre de *motores asíncronos*[7].

Sea $\mathbf{N_r}$ la velocidad relativa, en revoluciones por minuto, del rotor con relación a los polos ficticios del estator, y $\mathbf{N_s}$ la velocidad de sincronismo. Se verifica:

$$frecuencia\ del\ rotor = \frac{p.N_r}{60} = \frac{p \cdot g.N_s}{60} = g \cdot \frac{p.N_s}{60} = g.frecuencia\ del\ estator$$

$$g = \frac{frecuencia\ de\ las\ corrientes\ del\ rotor}{frecuencia\ de\ las\ corrientes\ del\ estator} \qquad (43.2)$$

43.3. PAR TRANSMITIDO.

Sea $\boldsymbol{\omega_1}$ la velocidad sincrónica del motor, $\boldsymbol{\omega_2}$ la velocidad de rotación del rotor y **R** la resistencia de los arrollamientos del rotor.

Con relación al flujo del inductor, el arrollamiento del rotor gira a velocidad $\boldsymbol{\omega_1 - \omega_2}$. Se puede asimilar al comportamiento que tendría el inducido de un alternador conectado en cortocircuito. Es decir, en el inducido se transformaría en calor toda la potencia eléctrica producida.

En consecuencia, si hacemos girar el rotor con relación al flujo del sistema inductor, que suponemos fijo, con una velocidad $\boldsymbol{\omega_1 - \omega_2}$, se debería desarrollar un par $\mathbf{C_t}$, definido por la relación:

$$C_t\ (\omega_1 - \omega_2) = Pérdida\ por\ Joule\ en\ el\ rotor$$

El par $\mathbf{C_t}$ recibe el nombre de *par total o par transmitido.*

El equilibrio energético del motor se representa en la Fig.43.3.

El motor asíncrono lleva en el rotor y en el estator conductores y piezas ferromagnéticas; en los primeros al ser recorridos por corrientes se experimentan pérdida por Joule, en los segundos al ser atravesados por flujos variables se experimentan pérdidas por histéresis y corrientes de Fouclault. Además como las piezas giran apoyadas en cojinetes se experimentan

[7] Se desprende de lo que se acaba de explicar que la máquina no puede exceder por sí misma la velocidad de sincronismo, aunque si cabría la posibilidad de que accionándola con un motor auxiliar podríamos lograr que girase a una velocidad *hipersincrónica*, lo que se correspondería con un deslizamiento negativo. En este caso la fuerza electromotriz del inducido cambia de sentido, así como la intensidad y por tanto el par debido al campo giratorio. En este supuesto hemos convertido el motor en un *generador asíncrono (0<g<1).*

pérdidas mecánicas, así como por ventilación.

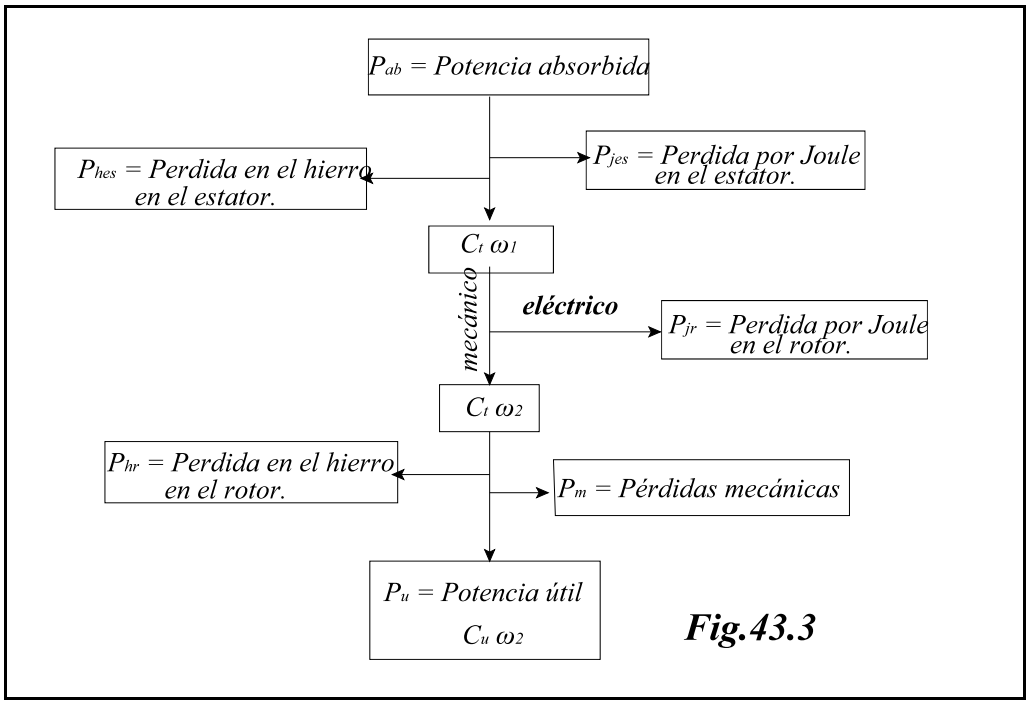


Fig.43.3

En el equilibrio se tiene que verificar, de acuerdo con el diagrama de la Fig.43.3:

$$P_{abs} = P_{hes} + P_{jes} + P_{jr} + P_{hr} + P_m + P_u \qquad (43.3)$$

O bien

$$P_{abs} = P_{hes} + P_{jes} + C_t(\omega_1 - \omega_2) + P_{hr} + P_m + P_u \qquad (43.4)$$

$$P_{abs} = P_{perdida\,en\,el\,estator} + C_t.(\omega_1 - \omega_2) + P_{hr} + P_m + P_u \qquad (43.5)$$

Las pérdidas por Joule en el rotor aparecen en (43.5) como la diferencia de dos potencias $\mathbf{C_t\,\omega_1}$ y $\mathbf{C_t\,\omega_2}$. De lo anterior se pueden deducir las siguientes consecuencias:

1ª) El estator transmite al rotor, una vez deducidas sus pérdidas, la potencia $\mathbf{C_t\ \omega_1}$ (producto de la velocidad de sincronismo $\boldsymbol{\omega_1}$, por el par $\mathbf{C_t}$).

2ª) La potencia $\mathbf{C_t\,\omega_1}$ se divide en dos partes; la primera se convierte en eléctrica (después en calor) en el arrollamiento del rotor, la segunda, $\mathbf{C_t\,\omega_2}$, se convierte en forma mecánica, y una vez deducidas las pérdidas en el hierro, por rozamiento y ventilación, constituye la potencia útil $\mathbf{P_u}$, que se transmite al eje de giro del motor. De todo ello se deduce que:

El par transmitido x velocidad de rotación del rotor

Expresa que fracción de potencia transmitida por el estator que se convierte en mecánica.

43.4. REPARTO DE LA POTENCIA TRANSMITIDA EN RÉGIMEN VARIABLE. PAR TRANSMITIDO Y PAR ÚTIL.

A partir del equilibrio energético del motor asíncrono expresado en la Fig.43.3, se deducen dos relaciones:

- Relación entre el deslizamiento y las pérdidas por Joule en el rotor.
- Relación entre par transmitido y par útil.

43.4.1. RELACIÓN ENTRE EL DESLIZAMIENTO Y LAS PÉRDIDAS POR JOULE EN EL ROTOR.

En efecto:

$$P_{jr} = C_t\,(\omega_1 - \omega_2) = C_t\omega_1\,\frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} = (P_{abs} - P_{jes} - P_{hes}).g \qquad (43.6)$$

Pérdidas por Joule en el rotor = Deslizamiento (Potencia abs. - pérd. en el estator)

De la relación anterior podemos extraer las siguientes conclusiones:

1ª) El motor asíncrono debe tener el menor deslizamiento posible[8].

2ª) Permite estudiar, con velocidad y par constante, el reparto de la potencia que se transmite por el estator.

La variación lineal de las pérdidas por Joule en el rotor y la potencia mecánica recibida por el rotor se representa en la Fig.43.4, en la que se aprecia, en función del deslizamiento, el reparto de la potencia $\mathbf{C_t\omega_1}$[9] transmitida por el estator, en eléctrica y mecánica.

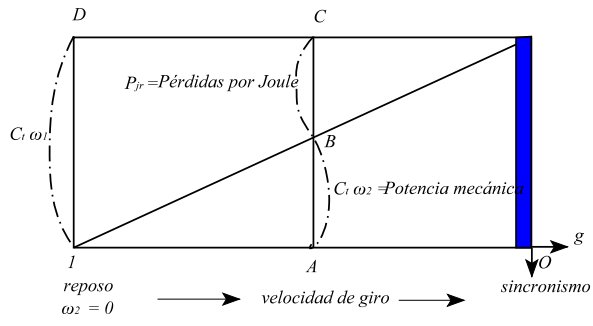


Fig. 43.4

[8] Con deslizamientos fuertes el rendimiento del motor es pequeño.

[9] La potencia $C_t\,\omega_1$ se supone constante, ya que C_t se supone constante por hipótesis.

43.4.2. RELACIÓN ENTRE PAR TRANSMITIDO Y PAR ÚTIL.

El equilibrio energético de la Fig. 43.3 conduce a la relación:

$$C_t = \frac{P_u + P_{hr} + P_m}{\omega_2} = C_u + \frac{P_{hr}}{\omega_2} + \frac{P_m}{\omega_2} \qquad (43.7)$$

Las pérdidas en el hierro del rotor son despreciables y las pérdidas mecánicas son casi independientes de la carga, luego para el estudio del par, se puede razonar sobre el par transmitido, en vez de sobre el par útil. La expresión de aquel, es más reducida y se puede discutir mejor.

43.5. VARIABLES DE LAS QUE DEPENDE EL PAR EN MARCHA INDUSTRIAL.

Vamos a considerar la fuerza electromotriz $\mathbf{E}_2$, como la inducida en el rotor cuando está en reposo y abierto. Se supone que esta fuerza electromotriz está inducida por el flujo $\mathbf{\Phi}_1$ del estator.

La fuerza electromotriz inducida en el rotor por el flujo $\mathbf{\Phi}_1$ del estator, cuando el estator está en marcha, es $\mathbf{g.E}_2$.

En efecto, se tiene[10]:

$$\frac{f.e.m.\ del\ rotor\ en\ marcha\ debida\ a\ \Phi_1}{f.e.m.\ del\ rotor\ en\ reposo (rotor\ abierto) debida\ a\ \Phi_1} =$$

$$\frac{frecuencia\ del\ rotor}{frecuencia\ del\ estator} = g\ (deslizamiento)$$

Si se designa:

✏ φ_2, el desfase entre $\mathbf{g.E}_2$ e $\mathbf{I}_2$ (intensidad en el rotor)

✏ $\mathbf{R}_2$, la resistencia del arrollamiento del rotor.

Las pérdidas por Joule del rotor, en un motor monofásico, están definidas por la expresión:

[10] Para flujos iguales, las fuerzas electromotrices son directamente proporcionales a las frecuencias.

$$P_{jr} = C_t .(\omega_1 - \omega_2) = R_2 .I^2_2 = g.E_2 .I_2 \cos\varphi_2$$

Despejando C_t:

$$C_t = \frac{g.E_2 .I_2 .\cos\varphi_2}{\omega_1 - \omega_2} = \frac{1}{\omega_1 - \omega_2}.\frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}.E_2 .I_2 .\cos\varphi_2 = \frac{E_2}{\omega_1}.I_2 .\cos\varphi_2$$

Ahora bien, como $\mathbf{E_2}$ (fuerza electromotriz del rotor en reposo), y $\boldsymbol{\omega_1}$ (velocidad de sincronismo), son constantes, se puede extraer la siguiente conclusión: *El par es proporcional a* $\boldsymbol{I_2.cos\varphi_2}$, es decir a la componente activa de $\mathbf{I_2}$, según puede apreciarse en la Fig.43.5

$$C_t = K.I_2 .\cos\varphi_2 \qquad (43.8)$$

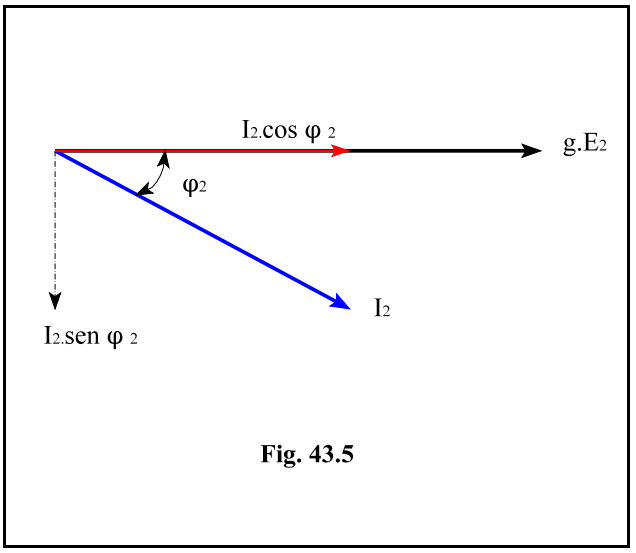


Fig. 43.5

43.6. VARIACIÓN DEL PAR EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD.

La intensidad que circula por el rotor $\mathbf{I_2}$, cuando se encuentra en reposo, crea un flujo, $\mathbf{\Phi_r}$ que lo atraviesa. Este flujo, al ser creado por la propia corriente que circula por el rotor, inducirá una fuerza electromotriz que tendrá el carácter de autoinducida, Una parte del flujo se dispersa en el aire $\mathbf{\Phi_{s2}}$, en consecuencia puede asociarse con un coeficiente de autoinducción $\mathbf{L_2}$ con la pulsación del estator $\boldsymbol{\omega_1}$. La reactancia equivalente al flujo de dispersión en el rotor, cuando está es reposo, será:

$$X_2 = \omega_1 .L_2 \qquad (43.9)$$

En marcha normal la reactancia será $\mathbf{gX_2}$, de acuerdo con lo establecido en (43.2).

Tomando $\mathbf{I_2}$ como origen de fases, construimos el diagrama vectorial de la Fig.43.6.

En marcha normal el segmento **AB** de la Fig.43.6 es igual a $\mathbf{gX_2I_2}$.

De la figura se obtiene el valor de $\mathbf{I_2}$:

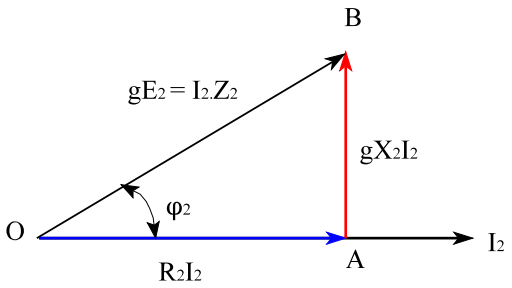


Fig.43.6

$$I_2 = \frac{f.e.m.\,del\,rotor}{Impedancia\,del\,rotor} = \frac{gE_2}{\sqrt{R_2^{\,2} + (gX_2)^2}} \qquad (43.10)$$

Por otra parte aplicando a la Fig. 43.6 una semejanza $\boldsymbol{1/I_2}$, resulta:

$$\cos\varphi_2 = \frac{resistencia\,del\,rotor}{Impedancia\,del\,rotor} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^{\,2} + (gX_2)^2}} \qquad (43.11)$$

Sustituyendo (43.10) y (43.11) en (43.8) resulta:

$$C_t = K.\frac{gE_2.R_2}{R_2^{\,2} + (gX_2)^2} \quad (K = Coeficiente\ de\ proporcionalidad) \qquad (43.12)$$

De la expresión (43.12) se deduce[11]:

1º) Si $\mathbf{g = 0}$, el par $\mathbf{C_t}$, es nulo.

2º) Hasta que se alcanza el sincronismo ($\mathbf{gX_2}$ es pequeña), el par $\mathbf{C_t}$, es proporcional al deslizamiento.

[11] En la expresión (43.12) $\mathbf{E_2}$, $\mathbf{R_2}$ y $\mathbf{X_2}$ son constantes.

La curva que define el par en función del deslizamiento está dada en la Fig. 43.7.

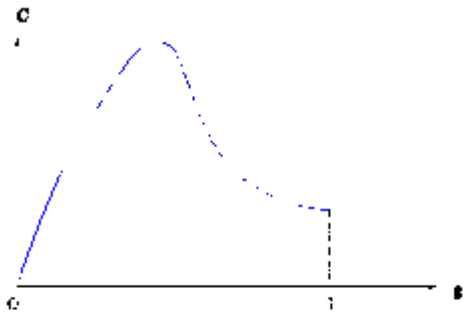


Fig. 43.7

El trazo continuo de la curva corresponde al funcionamiento estable del motor.

De la expresión (43.10), se deduce:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left[\frac{R_2}{g}\right]^2 + X_2^2}} \qquad (43.13)$$

La expresión (43.13) indica que el arrollamiento del rotor puede asimilarse de forma teórica a un arrollamiento secundario fijo con relación al estator ($\mathbf{E}_2$ y $\mathbf{X}_2$ son la fuerza electromotriz y la reactancia del rotor en reposo, respectivamente), siempre que se tome para la resistencia del secundario el valor $\mathbf{R_2/g}$.

Aplicando el anterior criterio, el estudio del motor asíncrono lo podemos hacer como si se tratase de un transformador estático.

Si al motor asíncrono, que parte de la *marcha en vacío*, se le aplica un par resistente creciente, el deslizamiento también crece, por tanto la fuerza electromotriz del rotor $\mathbf{gE}_2$ crecerá y también la intensidad $\mathbf{I}_2$. Luego el desfase φ_2 aumenta, al hacerlo

$$tang\,\varphi_2 = \frac{gX_2}{R_2} \qquad (43.14)$$

Por tanto el **cos** φ_2 *decrecerá*.

En un principio cuando **g** es pequeño, la influencia del deslizamiento sobre la intensidad $\mathbf{I}_2$ es mayor que la disminución sobre **cos** φ_2, en consecuencia el par crecerá, de acuerdo con (43.8). Pero cuando sigue creciendo el deslizamiento, el **cos** φ_2 decrece mucho más que aumenta $\mathbf{I}_2$, por lo que el par disminuirá. De todo lo que se ha dicho se deduce que existe un valor del deslizamiento que se corresponde con el par máximo, según se ha representado en la Fig.43.7.

43.7 RELACIONES FUNDAMENTALES DEL PAR Y DEL DESLIZAMIENTO.

1ª) El par es máximo cuando la reactancia del rotor se hace igual a la resistencia de este.

Para determinar el valor de **g** que hace el par máximo, se calcula la derivada de $\mathbf{C_t}$ con respecto a **g** (de 43.12) y se iguala a cero.

$$\frac{dC_t}{dg} = K.\frac{E_2.R_2.(R_2^2 + (gX_2)^2) - gE_2.R_2.2g.X_2^2}{(R_2^2 + g^2.X_2^2)^2} = 0$$

$$E_2.R_2.(R_2^2 + (gX_2)^2) = gE_2.R_2.2g.X_2^2$$

$$R_2^2 + g^2.X_2^2 = 2g^2.X_2^2$$

$$R_2 = g.X_2 \qquad (43.15)$$

Cuando el motor desacelera, como consecuencia de la aplicación de un par resistente creciente, la reactancia del rotor **g** $\mathbf{X_2}$ aumenta constantemente. En el momento en que dicho valor es igual al de su resistencia, se alcanza el par máximo. En ese instante la **tang** $\varphi_2 = \mathbf{1}$[12]

2º) El máximo del par es independiente de la resistencia del rotor.

Sustituimos (43.15) en (43.12)

$$C_{máx} = K.\frac{gE_2.gX_2}{(gX_2)^2 + (gX_2)^2} = K.\frac{E_2}{2X_2} \qquad (43.16)$$

En consecuencia, el par máximo $\mathbf{C_{máx}}$ es independiente de la resistencia del rotor $\mathbf{R_2}$.

3º) A igual deslizamiento, el par resistente es sensiblemente proporcional al cuadrado de la tensión de alimentación.

La expresión del par transmitido es:

$$C_t = \frac{E_2}{\omega_1}.I_2.\cos\varphi_2 \qquad (43.17)$$

[12] Basta sustituir (43.15) en (43.14)

Si multiplicamos por **m** la tensión **U** de alimentación, la fuerza electromotriz $\mathbf{E_2}$ (tensión en el secundario en reposo) queda multiplicada por **m**. Además (43.10) demuestra que, a igual deslizamiento, $\mathbf{I_2}$ queda multiplicada por **m**, sin embargo de (43.11) se deduce que **cos** φ_2 permanece constante. Con lo que queda demostrado.

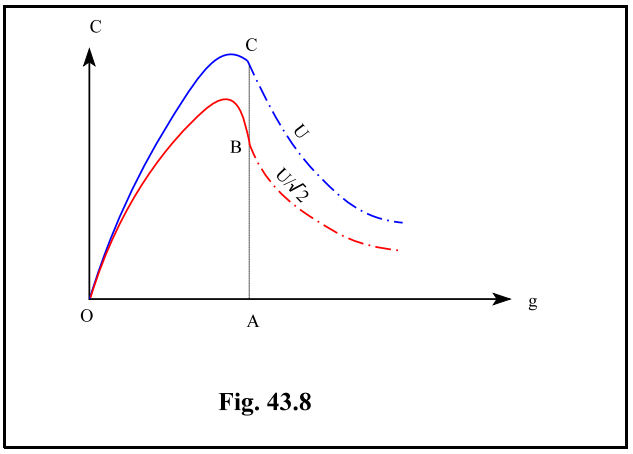


Fig. 43.8

Por tanto, se puede pasar de la curva $\mathbf{C = \Psi(g)}$ de un motor bajo la tensión **U**, (Fig.43.8), a la curva $\mathbf{C' = \zeta(g)}$ del mismo motor bajo la tensión U' multiplicando todas las ordenadas por la relación $\mathbf{(U'/U)^2}$.

4º) A igual par, en los límites corrientes de utilización, el deslizamiento es sensiblemente proporcional a la resistencia del rotor.

En efecto, en los límites normales de utilización del motor, los deslizamientos son pequeños y en consecuencia $\mathbf{g\ X_2}$ lo suficientemente pequeño frente a $\mathbf{R_2}$, para que se pueda considerar que:

$$\cos\varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (gX_2)^2}} \qquad (43.18)$$

varía entre límites muy [13]próximos. En consecuencia, el par (proporcional a la componente activa de la intensidad $\mathbf{I_2}$) es sensiblemente proporcional a la intensidad $\mathbf{I_2}$. Pero según (43.6) se cumple:

$$P_{jr} = \textit{Pérdidas por Joule en el rotor} = C_t\,(\omega_1 - \omega_2) = C_t\omega_1\,\frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} = \qquad (43.19)$$

$$= C_t\omega_1 g = R_2 I_2^2$$

Por tanto, a un par constante ($\mathbf{I_2} \approx$ constante) se tiene:

$$\frac{g}{R_2} = \frac{I_2^2}{C_t.\omega_1} \approx \textit{constante} \qquad (43.20)$$

[13] Si se supone $X_2 = 4.R_2$, entre $g_1 = 1$ % y $g_2 = 6$%, el factor de potencia cos φ_2 varía entre, cos $\varphi_1 = 0{,}999$ y cos $\varphi_2 = 0{,}972$, es decir una variación del 2,7 %.

5º) A igual par, en los límites corrientes de utilización, el deslizamiento varía en razón inversa del cuadrado de la tensión.

Según (43.20):

$$g = \frac{R_2.I_2^2}{C_t.\omega_1} \qquad (43.21)$$

Por otra parte, como **cos** φ_2 varía poco en los límites de utilización normal, la expresión (43.17) se puede escribir como:

$$C_t = \frac{E_2}{\omega_1}.I_2.\cos\varphi_2 = K_1.E_2.I_2$$

$$(K_1 = Constante)$$

$$I_2 = \frac{C_t}{K_1.E_2} \qquad (43.22)$$

De la expresión (43.22) se deduce que, a igualdad de par, $\mathbf{I_2}$ varía en razón inversa de $\mathbf{E_2}$, por tanto, de la tensión de alimentación **U**. Por tanto, **g** varía inversamente proporcional al cuadrado de la tensión, **U**.

Sustituyendo (43.22) en (43.21) resulta:

$$g = \frac{R_2.C_t^2}{K_1^2.E_2^2.C_t.\omega_1} = \frac{R_2.C_t}{K_1^2.\omega_1}.\frac{1}{E_2^2} \qquad (43.23)$$

43.8. BALANCE DE POTENCIAS DEL MOTOR ASÍNCRONO.

Según hemos visto en la Fig.43.3, el motor asíncrono absorbe una energía eléctrica del circuito al que está conectado, y la transforma en energía mecánica que transmite a la máquina o dispositivo que acciona.

La potencia absorbida, $\mathbf{P_1}$, es:

$$P_1 = m_1.U_1.I_1.\cos\varphi_1 \qquad (43.24)$$

De esta potencia, una parte se pierde en los devanados del estator debido al efecto de Joule, $\mathbf{P_{jes}}$:

$$P_{jes} = m_1.R_1.I_1^2 \qquad (43.25)$$

Además, en los núcleos ferromagnéticos del estator se pierde una potencia por histéresis y corrientes de Foucault, $\mathbf{P_{hes}}$.

La potencia que transmite el rotor es:

$$P_r = P_1 - P_{jes} - P_{hes} \qquad (43.26)$$

Sin embargo, no toda la potencia que entra en el rotor se convierte en potencia mecánica útil, ya que una parte se pierde en los devanados del propio rotor.

$$P_{jr} = m_2 . R_2 . I_2^{\,2} \qquad (43.27)$$

También se pierde potencia en los núcleos ferromagnéticos del rotor, $\mathbf{P_{hr}}$, pero al ser la frecuencia de las corrientes del rotor muy pequeña (menos de 3 Hz), esta pérdida se considera despreciable. Ahora bien, dado que el rotor gira apoyado en rodamientos y acciona la ventilación del motor, existen unas pérdidas mecánicas que hay que considerar, $\mathbf{P_m}$. En consecuencia, la potencia útil que transmite el rotor, $\mathbf{P_u}$, es:

$$P_u = P_r - P_{jr} - P_m \qquad (43.28)$$

Como consecuencia de todo lo que se acaba de exponer, el rendimiento total del motor es:

$$\eta_t = \frac{P_u}{P_1} \qquad (43.29)$$

La Fig. 43.8 representa el diagrama de flujo correspondiente al balance de potencias del motor.

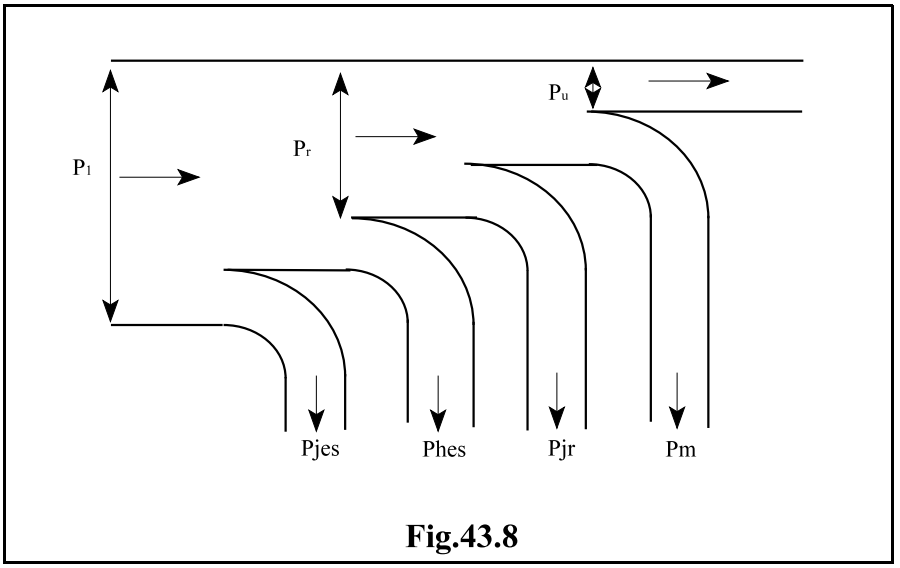


Fig.43.8