TEMA 44

MOTOR ASÍNCRONO - FUNCIONAMIENTO INDUSTRIAL

44.1. CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR ASÍNCRONO.

En los motores asíncronos, el devanado del estator está alimentado con corriente alterna procedente de una línea de alimentación, y el devanado del rotor por inducción del estator.

Las corrientes polifásicas que alimentan el estator y las inducidas en el rotor crean sendas componentes de fuerzas magnetomotrices, de amplitud constante, las cuales giran en el entrehierro a la velocidad de sincronismo, manteniéndose de esta forma estacionarias unas respecto a las otras con independencia de la velocidad de giro del rotor. El conjunto de estas dos fuerzas magnetomotrices crea en el entrehierro una onda de densidad de flujo. Cuando sé interaccionan la onda de flujo y la fuerza magnetomotriz del rotor aparece un par. Con esto se cumplen todas las condiciones necesarias para la creación de un par de valor constante a cualquier velocidad distinta de la de sincronismo.

Lo mismo que en los transformadores de potencia, en un motor asíncrono pueden reducirse al primario las magnitudes del secundario[1].

44.1.1. MOTOR EN REPOSO.

Se parte de un motor asíncrono en reposo con el rotor abierto, es decir $\mathbf{I_2 = 0}$ y $\mathbf{N_2 = 0}$. En estas circunstancias, el motor se comporta como un transformador trabajando en vacío, es decir con el estator haciendo de primario y el rotor de secundario.

[1]La forma por la cual el estator sabe lo que está sucediendo en el rotor es mediante las ondas del flujo en el entrehierro y la fuerza magnetomotriz del rotor, por tanto, si el rotor fuese sustituido por otro con la misma fuerza magnetomotriz y el mismo factor de potencia a la misma velocidad, el estator no podría detectar el cambio. Esta posibilidad conduce a la idea de reducir al estator las magnitudes del rotor.

En el motor asíncrono vamos a considerar:

Primario:
m_1 fases.
n_1 espiras por fase.
K_{21} factor de arrollamiento.
Secundario:
m_2 fases.
n_2 espiras por fase.
K_{22} factor de arrollamiento.

Si se aplica una tensión $\mathbf{U_1}$ a cada fase del estator, aparece una intensidad $\mathbf{I_c}$, la cual al circular por las $\mathbf{n_1}$ espiras, que constituyen el arrollamiento de cada fase, produce una fuerza magnetomotriz $\mathbf{n_1.I_c}$. La fuerza magnetomotriz produce un flujo $\mathbf{\Phi_1}$, parte del cual atraviesa el devanado del rotor $\mathbf{\Phi_m}$, y otra parte se dispersa en el aire, $\mathbf{\Phi_{s1}}$.

El flujo concatenado entre el estator y el rotor $\mathbf{\Phi_m}$ induce en cada fase del estator y del rotor fuerzas electromotrices $\mathbf{E_1}$ y $\mathbf{E_2}$.

La relación de transformación para las fuerzas electromotrices en la máquina se denomina *relación de voltaje* y viene definida por la expresión[2]:

$$r_t = \frac{E_1}{E_2} = \frac{K_{21}.n_1}{K_{22}.n_2} \qquad (44.1)$$

La ecuación correspondiente del circuito del estator, considerado como el primario de un transformador es[3]:

$$\overline{U}_1 = -\overline{E}_1 + R_1\overline{I}_c + j.\omega_1 L_1\overline{I}_c \qquad (44.2)$$

Donde:

R_1 = Resistencia del arrollamiento de cada fase del estator.
L_1 = Coeficiente de autoinducción equivalente al flujo de dispersión en el aire $\mathbf{\Phi_{s1}}$

[2] El flujo común Φ_m induce por cada fase del arrollamiento del estator y del rotor fuerzas electromotrices definidas por:

$$E_1 = K.K_{21}.n_1.f_1.\Phi_m \quad \text{y} \quad E_2 = K.K_{22}.n_2.f_1.\Phi_m$$

[3] La fuerza electromotriz E_1, de naturaleza contraelectromotriz, figura con signo menos en la ecuación (44.2), de acuerdo con el mismo convenio que se siguió en el estudio de los transformadores estáticos.

Consideremos ahora que, estando el rotor en reposo, circulase por él una corriente $\mathbf{I_2}$, (corriente de cortocircuito). En este supuesto aparecerían dos corrientes; una $\mathbf{I_1}$ en el primario y otra $\mathbf{I_2}$ en el secundario, las cuales darían lugar a dos flujos magnéticos, $\mathbf{\Phi_1}$ y $\mathbf{\Phi_2}$, respectivamente. Cada uno de los flujos anteriores se pueden descomponer de la siguiente forma:

$$\left.\begin{aligned}\Phi_1 &= \Phi_m + \Phi_{s1}\\ \Phi_2 &= \Phi_m + \Phi_{s2}\end{aligned}\right\} \qquad (44.3)$$

Siendo $\mathbf{\Phi_{s1}}$ y $\mathbf{\Phi_{s2}}$ los flujos dispersos en estator y el rotor, respectivamente.

La ecuación correspondiente del circuito del rotor, supuesto en cortocircuito, considerado como el secundario de un transformador es:

$$0 = \overline{E}_2 - R_2\bar{I}_2 - j.\omega_1 L_2\bar{I}_2$$

o bien

$$\overline{E}_2 = R_2\bar{I}_2 + j.\omega_1 L_2\bar{I}_2 \qquad (44.4)$$

Donde:

R_2 = Resistencia de cada fase del rotor.
L_2 = Coeficiente de autoinducción equivalente al flujo de dispersión de cada fase del rotor ,$\mathbf{\Phi_{s2}}$

Por último la ecuación que relaciona las intensidades es:

$$n_1\bar{I}_1 + n_2\bar{I}_2 = n_1\bar{I}_c \qquad (44.5)$$

Ya que la fuerza magnetomotriz y el flujo permanecen constantes para cualquier régimen de funcionamiento.

44.1.2. MOTOR EN MOVIMIENTO.

Supongamos que el motor está en movimiento.

En esta caso la ecuación del primario es:

$$\overline{U}_1 = -\overline{E}_1 + R_1\bar{I}_1 + j.\omega_1 L_1\bar{I}_1 \qquad (44.6)$$

La situación del rotor ha cambiado respecto al caso anterior (motor en reposo), ya que la fuerza electromotriz, según vimos en la sección 43.5, es $\mathbf{gE_2}$, y la reactancia es $\mathbf{gX_2}$, según vimos en la sección 43.6. En consecuencia la ecuación correspondiente a cada fase de los arrollamientos del rotor es:

$$0 = g\overline{E}_2 - R_2\overline{I}_2 - j.g\omega_1 L_2.\overline{I}_2$$

o bien

$$\overline{E}_2 = (\frac{R_2}{g} + j.\omega_1 L_2).\overline{I}_2 \qquad (44.7)$$

La ecuación que liga las intensidades es:

$$\overline{I}_1.n_1 + \overline{I}_2.n_2 = \overline{I}_c.n_1$$

Si se compara (44.4) con (44.7) observamos que, la corriente en movimiento sería la misma que en reposo si el rotor tuviese como resistencia $\mathbf{R_2/g}$. La resistencia que habrá que sumar, a la que tiene el circuito equivalente en reposo, para convertirla en la correspondiente en movimiento es:

$$R_c = \frac{R_2}{g} - R_2$$

$$R_c = R_2.(\frac{1}{g} - 1) \qquad (44.8)$$

La conclusión es que, *el motor asíncrono en cualquier régimen de funcionamiento, puede asociarse a un transformador polifásico con su secundario conectado en cortocircuito, siempre que la resistencia del secundario sea* $\boldsymbol{R_2/g}$.

44.2. CIRCUITO EQUIVALENTE REFERIDO AL PRIMARIO. CIRCUITO EN T.

De forma análoga a como se hizo en el transformador estático polifásico, las magnitudes del rotor del motor (secundario del hipotético transformador) pueden reducirse al primario.

La corriente en el secundario referida al primario[4], $\mathbf{I'_2}$ tiene que producir la misma fuerza magnetomotriz circulando por el devanado del estator, que la corriente $\mathbf{I_2}$ circulando por la del

[4]La nomenclatura que se emplea es la misma que en el estudio de los transformadores, las letras con tilde indican magnitudes referidas al primario.

rotor[5].

En consecuencia, se tiene que cumplir:

$$m_1.n_1.K_{21}.I'_2 = m_2.n_2.K_{22}.I_2 \qquad (44.9)$$

De la ecuación (44.9) se obtiene la *relación de transformación de intensidades* r_i.

$$r_i = \frac{I_2}{I'_2} = \frac{m_1.n_1.K_{21}}{m_2.n_2.K_{22}} \qquad (44.10)$$

La resistencia $\mathbf{R_2}$ del secundario la podemos poner en la escala del primario $\mathbf{R'_2}$, considerando que las pérdidas por Joule, en el primario y en el secundario, sean las mismas. Para que se cumpla lo anterior se debe verificar que:

$$m_2.R_2.I_2^2 = m_1.R'_2.I'^2_2$$

$$R'_2 = \frac{m_2}{m_1}.\frac{I_2^2}{I'^2_2}.R_2 = \frac{m_2}{m_1}.\left(\frac{m_1.n_1.K_{21}}{m_2.n_2.K_{22}}\right)^2.R_2$$

$$R'_2 = \frac{n_1.K_{21}}{n_2.K_{22}}.\left(\frac{m_1.n_1.K_{21}}{m_2.n_2.K_{22}}\right).R_2 = r_t.r_i.R_2 \qquad (44.11)$$

El producto $\mathbf{r_t.r_i}$ se denomina *factor de resistencia.*

De forma análoga se demuestra que la reactancia del secundario $\mathbf{X_2}$ la podemos expresar en la escala del primario, en efecto:

[5]La ecuación de los amperios-vuelta es: $\frac{I'_2.m_1.n_1.K_{21}\sqrt{2}}{2p.\pi} = \frac{I_2.m_2.n_2.K_{22}\sqrt{2}}{2p.\pi}$

$$m_2.X_2.I_2^2 = m_1.I'^2_2.X'_2$$

$$X'_2 = \frac{m_2}{m_1}.\frac{I_2^2}{I'^2_2}.X_2 = \frac{m_2}{m_1}.\left(\frac{m_1.n_1.K_{21}}{m_2.n_2.K_{22}}\right)^2.X_2$$

$$X'_2 = \frac{n_1.K_{21}}{n_2.K_{22}}.\left(\frac{m_1.n_1.K_{21}}{m_2.n_2.K_{22}}\right).X_2 = r_t.r_i.X_2 \qquad (44.12)$$

Finalmente la impedancia del secundario $\mathbf{Z}_2$, también la podemos expresar en la escala del primario, en efecto:

$$Z'_2 = \frac{m_2}{m_1}.\frac{I_2^2}{I'^2_2}.Z_2 = \frac{m_2}{m_1}.\left(\frac{m_1.n_1.K_{21}}{m_2.n_2.K_{22}}\right)^2.Z_2$$

$$Z'_2 = \frac{n_1.K_{21}}{n_2.K_{22}}.\left(\frac{m_1.n_1.K_{21}}{m_2.n_2.K_{22}}\right).Z_2 = r_t.r_i.Z_2 \qquad (44.13)$$

Suponiendo el rotor en movimiento, y puesto que el devanado del rotor está cerrado en cortocircuito, la ecuación del circuito secundario referido al primario, es:

$$0 = g\bar{E}'_2 - (R'_2 + j.gX'_2).\bar{I}'_2$$

$$\bar{E}'_2 = \left(\frac{R'_2}{g} + j.X'_2\right).\bar{I}'_2 \qquad (44.14)$$

Ahora bien, la resistencia del rotor en movimiento $\mathbf{R'_2/g}$, se puede reducir al reposo añadiéndole a éste, una resistencia [6]

$$\bar{E}'_2 = (R'_2 + j.X'_2).\bar{I}'_2 + R'_c.\bar{I}'_2 \qquad (44.15)$$

La ecuación del primario es:

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1 + (R_1 + j.X_1).\bar{I}_1 \qquad (44.16)$$

[6] El valor de dicha resistencia es: $R'_c = R'_2.(1/g-1)$, según (44.8).

Si tenemos en cuenta que $\bar{E}'_2$ es de igual módulo y signo contrario que $\bar{E}_1$, sustituyendo (44.15) en (44.16) se tiene:

$$\bar{U}_1 = (R_1 + jX_1)\bar{I}_1 + (R'_2 + jX'_2)\bar{I}'_2 + R'_c\bar{I}'_2 \qquad (44.17)$$

Ahora bien, si tenemos en cuenta (44.8), resulta:

$$\bar{U}_1 = (R_1 + jX_1)\bar{I}_1 + (R'_2 + jX'_2)\bar{I}'_2 + R'_2\frac{(1-g)}{g}\bar{I}'_2 \qquad (44.18)$$

La ecuación (44.18) la podemos asociar al circuito de la Fig.44.1

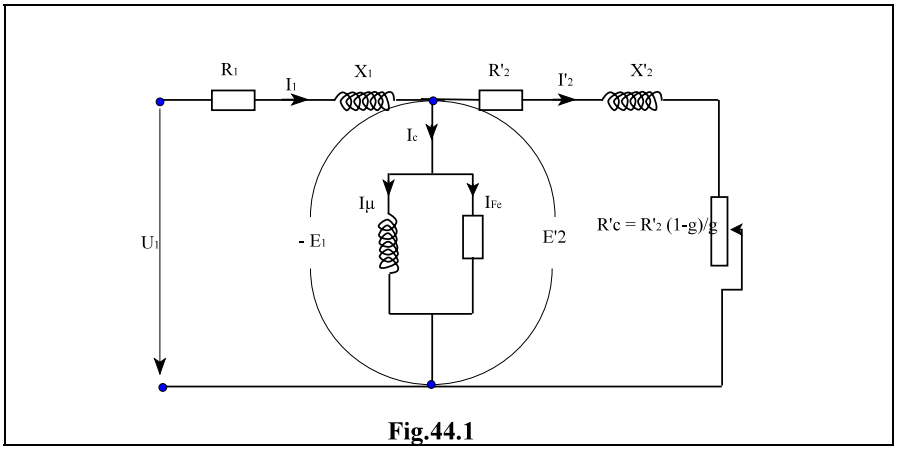


Fig.44.1

44.2.1 DIAGRAMA VECTORIAL DEL MOTOR ASÍNCRONO REFERIDO AL PRIMARIO.

Tomamos como origen de fases, en el semieje de ordenadas negativo, la fuerza electromotriz E_2. La ecuación (44.16), que se corresponde con la Fig.44.1, se puede representar según el diagrama de la Fig.44.2.

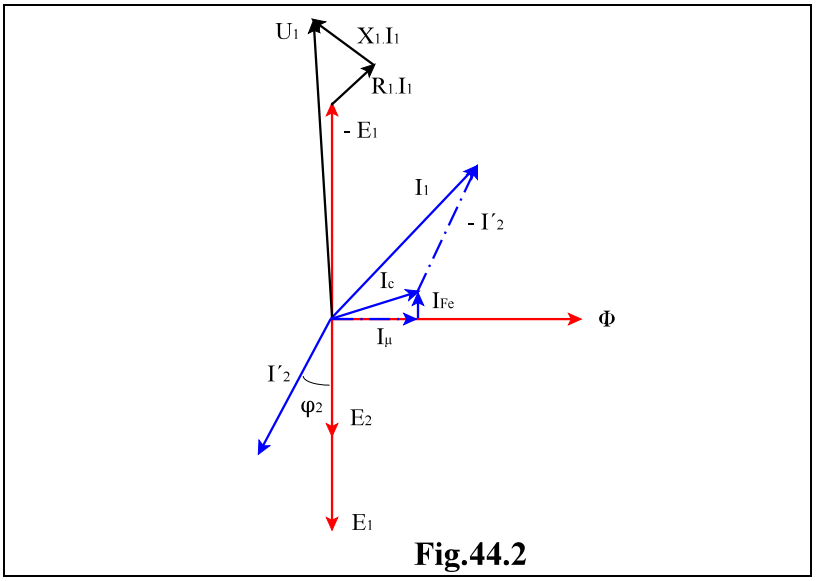


Fig.44.2

44.3. CIRCUITO EQUIVALENTE REFERIDO AL PRIMARIO. CIRCUITO EN Γ.

En el apartado 44.1 hemos estudiado el circuito equivalente del motor asíncrono de forma análoga a como se había hecho en las máquinas estáticas[7].

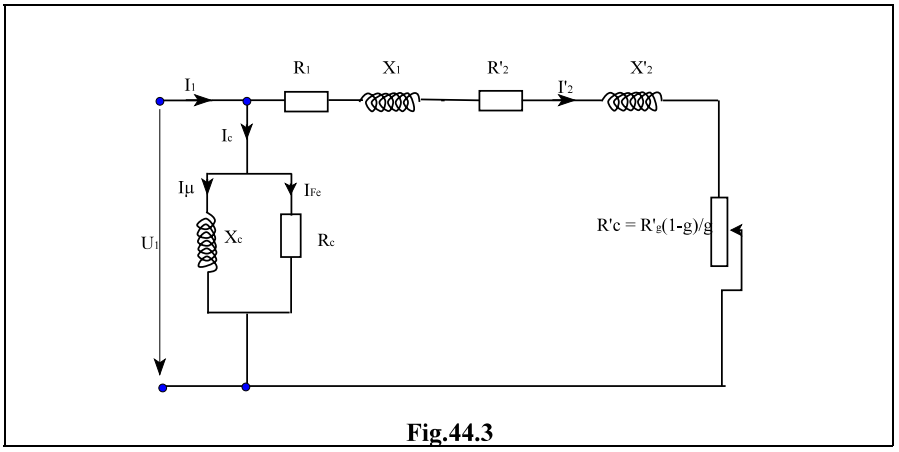


Fig.44.3

En el circuito de la Fig.44.1 vamos a considerar que las magnitudes del primario $\mathbf{R_1}$ y $\mathbf{X_1}$ están situadas en el secundario[8]. En consecuencia podemos establecer como circuito equivalente del motor en carga el de la Fig.44.3.

En el circuito de la Fig.44.3 se pueden establecer las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \overline{I_1} &= \overline{I_c} + \overline{I'_2} \\ \overline{U_1} &= \overline{I'_2}.[(R_1 + R'_2 + R'_c) + j.(X_1 + X'_2)] \\ \overline{U_1} &= \overline{I_c}.\overline{Z_c} \end{aligned} \qquad (44.19)$$

Despejando $\bar{\mathbf{I}}'_2$ de (44.19), resulta:

$$\bar{I}'_2 = \frac{\overline{U}_1}{(R_1 + R'_2 + R'_c) + j.(X_1 + X'_2)} \qquad (44.20)$$

---

[7] La corriente magnetizante es función de la fuerza contraelectromotriz E_1, ya que se cumple $\overline{U_1} = -\overline{E_1} + \overline{I_1}(R_1 + j.\omega L_1)$ y esta fuerza contraelectromotriz varía con la intensidad I_1. Esta variaci
que la que se produce en el transformador ya que a causa de la presencia del entrehierro, la suceptancia del campo inductor tiene un valor relativo mucho mayor y teniendo en cuenta que los arrollamientos están alojados en las ranuras en el hierro, las reactancias de fuga tienen un valor relativo mayor.

[8] Esto es posible hacerlo ya que las caídas de tensión en R_1 y X_1 son despreciables.

Cuyo módulo es:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R'_2 + R'_c)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \qquad (44.21)$$

El ángulo φ_2 que forma la tensión $\mathbf{U_1}$ y la intensidad $\mathbf{I'_2}$, se define por la expresión:

$$sen\ \varphi_2 = \frac{X_1 + X'_2}{\sqrt{(R_1 + R'_2 + R'_c)^2 + (X_1 + X'_2)^2}} \qquad (44.22)$$

Dividiendo miembro a miembro (44.22) y (44.21) y despejando $\mathbf{I'_2}$, resulta:

$$I'_2 = \frac{U_1}{(X_1 + X'_2)}.sen\ \varphi_2 \qquad (44.23)$$

44.4. DIAGRAMA DEL CÍRCULO.

La expresión (44.23) presenta la peculiaridad que el cociente $\mathbf{U_1/(X_1 + X'_2)}$, para una frecuencia determinada, es constante y se correspondería con el valor de la intensidad que circularía por el secundario si no existiese ninguna resistencia. En este supuesto el **sen** φ_2 valdría la unidad, esto implicaría que φ_2 valdría **90º**. Es decir que la intensidad iría retrasada en cuadratura con la tensión que alimenta el circuito, $\mathbf{U_1}$.

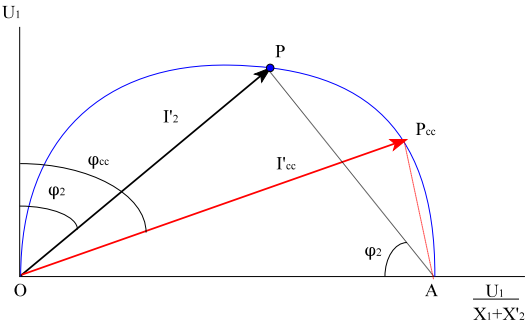


Fig.44.4

Podemos construir un diagrama en el cual situamos en ordenadas la tensión a la entrada del motor, $\mathbf{U_1}$, y en abscisas el valor $\mathbf{U_1/(X_1 + X'_2)}$, Fig.44.4.

Si trazamos una semicircunferencia cuyo diámetro sea $\mathbf{U_1/(X_1 + X'_2)}$, el radio vector **OP** define el valor de la intensidad $\mathbf{I'_2}$ para un ángulo de desfase φ_2.

El radio vector tomará su valor máximo **OA**, cuando la resistencia total sea

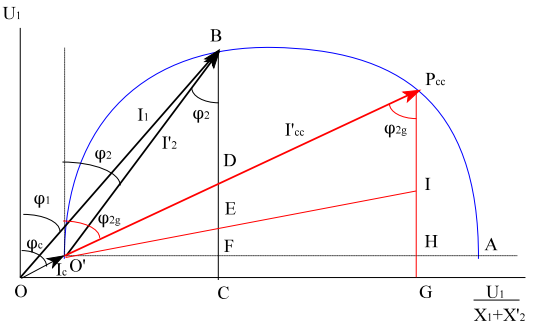


Fig.44.5

nula, pero esto no es posible ya que $\mathbf{R_1}$ y $\mathbf{R'_2}$ nunca son nulos. En consecuencia, cuando el motor esté completamente frenado ($\mathbf{N_2 = 0}$) el deslizamiento **g** valdrá la unidad, y la corriente será la correspondiente al cortocircuito, y tomará el valor máximo. En la Fig.44.5 se ha representado el radio vector $\mathbf{O'P_{cc}}$ que corresponde al valor máximo de la intensidad $\mathbf{I'_2}$.

En el circuito de la Fig.44.5, $\mathbf{I_c}$ representa la intensidad que absorbe el motor cuando la intensidad $\mathbf{I'_2}$ es nula, y se corresponde con las pérdidas en el núcleo y las fuerzas pasivas. La corriente $\mathbf{I_c}$ forma un ángulo φ_c con la tensión $\mathbf{U_1}$.

Si en la Fig.44.5 tomamos a partir de **O** un vector de módulo $\mathbf{I_c}$ que forme un ángulo φ_c con el eje de ordenadas, y por el extremo trazamos otro, de módulo $\mathbf{I'_2}$ que forme un ángulo φ_2 con la paralela al eje de ordenadas trazada por el extremo de $\mathbf{I_c}$, la suma de los dos vectores será $\mathbf{I_1}$, de acuerdo con la primera ecuación de (44.19).

Volviendo a la Fig.44.5, vemos que $\mathbf{BC = I_1.cos\varphi_1}$, por tanto, este segmento se corresponde con la potencia activa que toma el motor. El segmento $\mathbf{FC = I_c.cos\varphi_c}$ se corresponde con la potencia activa que toma el motor en vacío. El segmento $\mathbf{BF = I'_2.cos\varphi_2}$ se corresponde con la potencia útil del motor más las pérdidas en los devanados del rotor y del estator[9].

Suponiendo que el motor, conectado a la tensión $\mathbf{U_1}$, se encuentre en reposo (frenado perfecto), el segmento $\mathbf{P_{cc}G}$ representa la potencia total que absorbe el motor, siendo **HG = FC** las pérdidas en los núcleos ferromagnéticos [10]. Por tanto $\mathbf{P_{cc}H}$ se corresponde con la potencia de salida del motor. Al estar el rotor en reposo, la potencia de salida se corresponde con las pérdidas por efecto Joule en sus devanados.

En la Fig.44.5, los triángulos O'DF y O'P_{cc}H, son semejantes, por tanto se verifica:

$$\frac{\overline{DF}}{\overline{P_{cc}H}} = \frac{\overline{O'F}}{\overline{O'H}} \qquad (44.24)$$

[9]Conviene señalar que la proporcionalidad de todos los segmentos es la misma, de ahí que se hable de potencias en vez de valores proporcionales a dichas potencias.

[10] En este caso no existen pérdidas pasivas, pero las que ahora se producen por histéresis y corrientes de Foucault son mayores a las que se producían en el punto B por lo que se puede considerar que FC = HG.

Ahora bien, se verifica:

$$\begin{aligned} \overline{O'F} &= \overline{O'B}.sen\varphi_2 \\ \overline{O'H} &= \overline{O'P_{cc}}.sen\varphi_{2g} \\ \overline{O'B} &= \overline{O'A}.sen\varphi_2 \\ \overline{O'P_{cc}} &= \overline{O'A}.sen\varphi_{2g} \end{aligned} \qquad (44.25)$$

De (44.25) se deduce:

$$\begin{aligned} \overline{O'F} &= \frac{\overline{O'B}^2}{\overline{O'A}} \\ \overline{O'H} &= \frac{\overline{O'P_{cc}}^2}{\overline{O'A}} \end{aligned} \qquad (44.26)$$

Sustituyendo (44.26) en (44.24), resulta:

$$\frac{\overline{DF}}{\overline{HP_{cc}}} = \frac{\overline{O'B}^2}{\overline{O'P_{cc}}^2} = \frac{I'_2{}^2}{I'_{cc}{}^2} = \frac{I'_2{}^2.(R_1 + R'_2)}{I'_{cc}{}^2.(R_1 + R'_2)} \qquad (44.27)$$

De la expresión (44.27) se deduce:

DF = Pérdidas en las bobinas del inductor e inducido para un régimen de funcionamiento dado.
$P_{cc}H$= Pérdidas en las bobinas del inductor e inducido en cortocircuito.

Si en la Fig.44.5 dividimos el segmento $\mathbf{P_{cc}H}$ en dos partes de forma que sean proporcionales a la resistencia del estator, $\mathbf{R_1}$ y del rotor, $\mathbf{R'_2}$, respectivamente, se tiene:

$P_{cc}I$ = Pérdidas en las bobinas del rotor, en cortocircuito.
IH = Pérdidas en las bobinas del estator, en cortocircuito.

De forma análoga en el segmento **DF**, se tiene:

DE = Pérdidas en las bobinas del rotor en régimen de funcionamiento.
EF = Pérdidas en las bobinas del estator en régimen de funcionamiento.

Como resumen de todo lo que hemos estudiado se deduce que, en un régimen de funcionamiento dado del motor, representado por el punto **B** en el diagrama del círculo (Fig.44.5), se tiene:

BC = Potencia total absorbida por cada fase del motor, que también se denomina *potencia de entrada.*
FC = Pérdidas en vacío debidas a histéresis, corrientes de Foucault y rozamientos.
DF = Pérdidas por efecto Joule en las bobinas del inducido e inductor.
DB = Potencia útil que el motor transmite a su eje, que también se denomina *potencia de salida del motor.*

Para finalizar, sabemos que el par electromagnético, que hemos estudiado en el Tema 43, es proporcional a la potencia de entrada en el secundario, por tanto en la Fig.44.5, **BD** representa la potencia útil y **DE** las pérdidas en las bobinas del rotor. En consecuencia, el segmento definido por los puntos **E**, representa el par motor.

44.5. TRAZADO DEL DIAGRAMA DEL CÍRCULO MEDIANTE ENSAYOS.

Para el trazado del diagrama del círculo es preciso realizar dos tipos de ensayos:

* En vacío.
* En cortocircuito.

44.5.1. ENSAYO EN VACÍO.

Como su nombre indica, consiste en hacer que el motor asíncrono funcione sin que arrastre ningún dispositivo mecánico.

Mediante la utilización de los correspondientes aparatos de medida se registran los valores de la potencia, intensidad y tensión que toma el motor en este régimen de funcionamiento.

En la Fig.44.6 se ha representado el ensayo en vacío del motor asíncrono. En dicho ensayo se han dispuesto dos vatímetros, un voltímetro y un amperímetro.

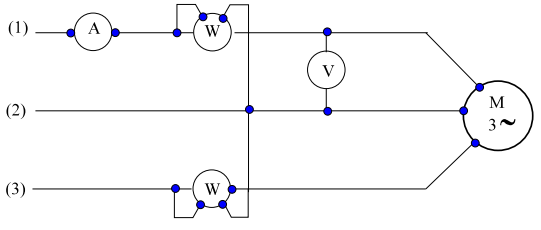


Fig.44.6

La potencia absorbida por el motor $\mathbf{P_c}$ es igual a la suma de las lecturas de los dos

vatímetros[11].

La intensidad que absorbe el motor $\mathbf{I_c}$ es igual al valor que registra el amperímetro.

La tensión de línea[12] que alimenta el motor $\mathbf{U_1}$ es igual al valor registrado por el voltímetro.

Sabemos que se verifica:

$$P_c = \sqrt{3}.U_1.I_c.\cos\ \varphi_c \qquad (44.28)$$

Siendo **cos** φ_c el factor de potencia del motor cuando trabaja en vacío. De (44.28) se deduce:

$$\cos\ \varphi_c = \frac{P_c}{\sqrt{3}.U_1.I_c} \qquad (44.29)$$

Por tanto, a partir de la lectura del amperímetro $\mathbf{I_c}$ y del **cos** φ_c, calculado según (44.29), podemos obtener el punto **O'** del diagrama del círculo (Fig.44.5).

La determinación de la resistencia $\mathbf{R_1}$ de cada bobina correspondiente a una fase del estator se hace mediante la utilización de un aparato de medida adecuado (puente, óhmetro, etc).

44.5.2 ENSAYO EN CORTOCIRCUITO.

El ensayo en cortocircuito se realiza mediante un frenado perfecto del rotor, es decir, inmovilizando el eje del rotor. Con ello se logra un deslizamiento igual a la unidad.

Con objeto de que la intensidad que circule por el rotor no sea excesiva, el ensayo se realiza con una tensión inferior a la nominal, y tal que la intensidad que absorba el motor sea igual a la intensidad nominal.

Dado que la tensión que se aplica en este ensayo es menor que la nominal, es preciso conocer el valor de la intensidad de cortocircuito que absorbe el motor cuando está conectado a la intensidad nominal. El valor de la intensidad de cortocircuito en régimen nominal y de la potencia correspondiente, se hace a base de tomar valores para diversas tensiones $\mathbf{U_{cc}}$, y siempre teniendo la precaución de que los valores de $\mathbf{I_{cc}}$ no sobrepasen el triple del valor nominal de la

[11] Los vatímetros se encuentran conectados según el método de los dos vatímetros

[12] Se supone que se trata de una línea equilibrada en tensiones.

corriente.

Ahora bien, en la hipótesis de no-saturación del circuito magnético, la reactancia del motor con el rotor en reposo es constante. Por tanto, el motor se comportará como una inductancia antes de la saturación, es decir su factor de potencia es constante e independiente de la tensión que alimente el estator, y la intensidad es proporcional a la tensión a la que está conectado el estator.

La potencia total que absorbe el motor, a la tensión de ensayo $\mathbf{U'_1}$ vendrá dada por la expresión:

$$P'_{cc} = \sqrt{3}.U'_{cc}.I'_{cc}.\cos\varphi_{cc} \qquad (44.30)$$

Por tanto:

$$\cos\varphi_{cc} = \frac{P'_{cc}}{\sqrt{3}.U'_{cc}.I'_{cc}} \qquad (44.31)$$

La ley de proporcionalidad establece que:

$$I_{cc} = I'_{cc}.\frac{U'_1}{U_1} \qquad (44.32)$$

Por tanto, a partir de (44.31) y (44.32) obtenemos los valores $\mathbf{\cos\varphi_c}$ e $\mathbf{I_{cc}}$, y por tanto $\mathbf{P_{cc}}$ mediante la expresión:

$$P_{cc} = \sqrt{3}.U_1.I_{cc}.\cos\varphi_{cc} \qquad (44.33)$$

Una vez que tenemos definidos los puntos **O'** y $\mathbf{P_{cc}}$ podemos trazar el diagrama del círculo. Para ello es necesario conocer el centro de la circunferencia. En la Fig.44.7 se indica la construcción.

A partir del semieje de ordenadas $\mathbf{U_1}$, llevamos, bajo un ángulo φ_{cc} el segmento $\mathbf{OP_{cc} = I_{cc}}$. Unimos **O'** con $\mathbf{P_{cc}}$ y trazamos la perpendicular en el punto medio del segmento $\mathbf{OP_{cc}}$ y en el punto de intersección de la paralela al eje de abscisas trazada desde **O'** con la anterior recta, tendremos el centro de la circunferencia, **K**.

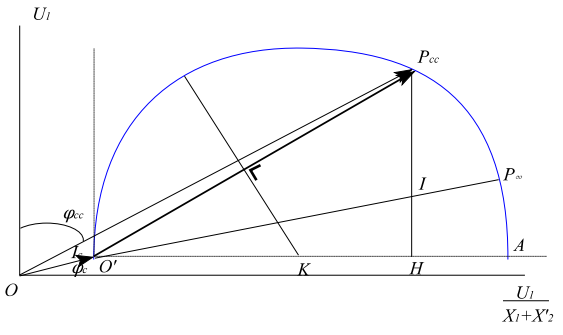


Fig.44.7

Una vez trazada la circunferencia, la línea $\mathbf{O'P_{cc}}$ representa la potencia de salida del motor. La línea del par motor se traza, una vez conocido el punto **I**. Ahora bien, el segmento **HI** representa las pérdidas en el primario por efecto Joule, que sabemos son:

$$P_{jes} = m_1.R_1.I_{cc}^2 \qquad (44.34)$$

Aplicando la escala conveniente se obtiene el segmento **HI**. El punto de corte de la recta que, pasando por **O'** e **I,** corta a la circunferencia es $\mathbf{P_{\infty}}$, y se corresponde con un deslizamiento igual a infinito, donde el par se anula[13].

El punto $\mathbf{P_{cc}}$ representa el funcionamiento del motor en cortocircuito, y se corresponde con el arranque directo del motor, a la tensión nominal.

El incremento de corriente en el arranque [14], a la tensión nominal, está dado por la relación $\mathbf{I_{cc}/I_n}$ y su valor oscila entre 4,5 y 6.

La relación $\mathbf{C_{cc}/C_n}$, entre el para en el arranque y el nominal es aproximadamente dos. Esto significa que no guarda relación con las intensidades.

44.6. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO.

Las principales curvas características que definen el funcionamiento de un motor, son:

- ☞ Curva característica de velocidad.
- ☞ Curva característica de consumo.
- ☞ Curva característica de factor de potencia.
- ☞ Curva característica del rendimiento.
- ☞ Curva característica mecánica.

A continuación vamos a analizar cada una de ellas.

44.6.1. CURVA CARACTERÍSTICA DE VELOCIDAD.

Se construye fijando la tensión de alimentación $\mathbf{U_1}$ y la frecuencia del motor en el estator $\mathbf{f_1}$, y se define mediante la expresión:

[13] En ese punto la velocidad rotórica se hace infinito.

[14] El valor de este incremento de corriente, también llamado *golpe de corriente*, alcanza seis veces la corriente nominal.

$$N = \xi (P_u) \qquad (44.35)$$

La Fig.44.8 establece la variación relativa de la velocidad en función de la potencia útil de motor.

En la Fig.44.8 se observa que, a medida que aumenta la potencia útil de motor, disminuye su velocidad.

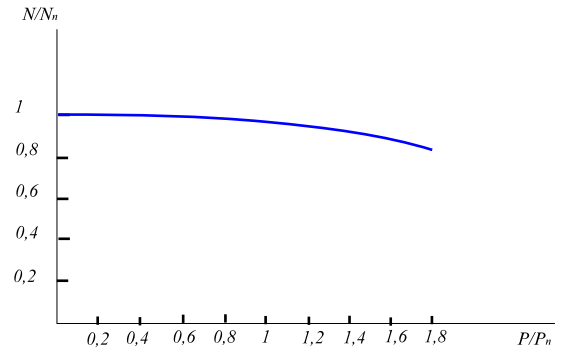


Fig.44.8

44.6.2. CURVA CARACTERÍSTICA DEL CONSUMO.

Se construye fijando la tensión de alimentación $\mathbf{U_1}$ y la frecuencia del motor en el estator $\mathbf{f_1}$, y se define mediante la expresión:

$$I = \xi (P_u) \qquad (44.36)$$

En la Fig.44.9 se ve la relación entre la corriente que absorbe el motor en función de su potencia útil.

Según se desprende de la Fig.44.9, la intensidad no crece de una forma lineal.

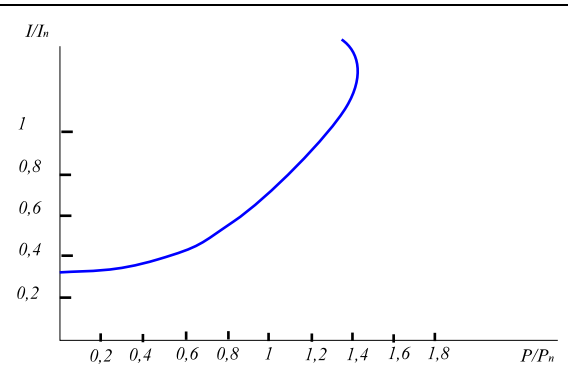


Fig.44.9

44.6.3 CURVA CARACTERÍSTICA DEL FACTOR DE POTENCIA.

Se construye fijando la tensión de alimentación $\mathbf{U_1}$ y la frecuencia del motor en el estator $\mathbf{f_1}$, y se define mediante la expresión:

$$\cos \varphi = \xi (P_u) \qquad (44.37)$$

En la Fig.44.10 se ve la relación entre el factor de potencia del motor y su potencia útil.

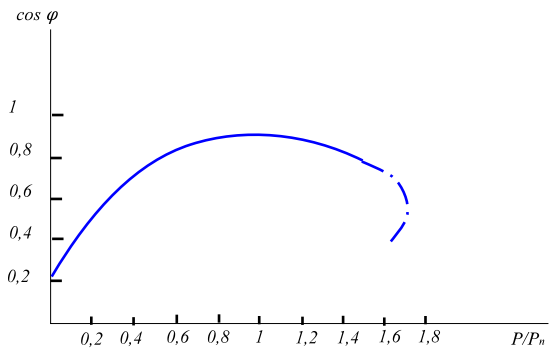


Fig.44.10

De la Fig.44.10 se deduce que el factor de potencia de un motor en vacío es muy pequeño, aumentando de forma importante con la carga, pero disminuyendo sensiblemente con la sobrecarga.

Según hemos visto en el diagrama del círculo, el factor de potencia alcanza el valor máximo cuando el radio-vector que define la intensidad absorbida por el motor, OB es tangente a la circunferencia.

44.6.4. CURVA CARACTERÍSTICA DEL RENDIMIENTO.

Se construye fijando la tensión de alimentación $\mathbf{U_1}$ y la frecuencia del motor en el estator $\mathbf{f_1}$, y se define mediante la expresión:

$$\eta = \xi\,(P_u) \qquad (44.38)$$

El rendimiento de un motor aumenta cuando lo hace la potencia útil del mismo.

El rendimiento es máximo cuando la pérdida de potencia en los núcleos ferromagnéticos es igual a la que se pierde, por efecto Joule, en las bobinas[15].

44.6.5. CURVA CARACTERÍSTICA MECÁNICA.

Se construye fijando la tensión de alimentación $\mathbf{U_1}$ y la frecuencia del motor en el estator $\mathbf{f_1}$, y se define mediante la expresión:

$$C = \xi\,(P_u) \qquad (44.39)$$

[15] Esta propiedad es la misma que tienen los transformadores estáticos.