

## La potencia reactiva en los motores de inducción

Miguel Osorio Pardo\*  
Gloria Edilma Bernal Tobón\*\*

### Resumen

*Un motor de inducción en el momento del arranque exige una corriente alta de alimentación y al mismo tiempo exige una potencia reactiva elevada, lo cual implica para la red el suministro de una corriente alta con un bajo factor de potencia.*

*Si la potencia del motor no es despreciable al compararla con la red eléctrica que la alimenta, se presentará una disminución fuerte del valor de voltaje de la alimentación. Esta disminución en el voltaje puede originar problemas a otros motores y a los computadores y dispositivos electrónicos de control conectados a la misma red, lo cual obliga al uso de estabilizadores de voltaje en todos estos equipos. Además de la disminución de voltaje, la corriente de arranque de los motores aumenta la demanda de energía de la red.*

*Para reducir los efectos de esta caída de voltaje se ha recurrido al uso de arrancadores electrodinámicos o a los llamados "arrancadores suaves", con lo cual se reduce parcialmente el valor de la corriente de arranque pero no se ejerce ningún control sobre la potencia reactiva requerida para el arranque del motor.*

*La potencia reactiva que requiere el motor para ponerse en marcha, puede ser suministrada en parte por un banco de condensadores cuyo cálculo se lleva a cabo utilizando ecuaciones sencillas de circuitos eléctricos y cuyas condiciones de operación se exponen de acuerdo con la forma en que normalmente es operado cada motor en forma individual.*

### Introducción

Este artículo es el resultado de la experiencia investigativa de los autores. Presentamos aquí un análisis del comportamiento del motor de inducción y de la red de alimentación cuando en el arranque del motor toda la potencia activa es suministrada por la red y la potencia reactiva es entregada al motor por un banco de condensadores.

Se parte del circuito equivalente del motor por fase y se construyen paso a paso los diagramas fasoriales de corrientes y flujos magnéticos del motor en vacío y con carga hasta llegar a la construcción final del diagrama fasorial completo de la máquina. Es a partir de este análisis como se comprende la importancia de la potencia reactiva en el funcionamiento del motor de inducción.

\*Ingeniero Electricista (Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá). Docente investigador Instituto Tecnológico Pascual Bravo. Docente Universidad de Antioquia, Medellín. Veintiseis años de experiencia en la asesoría de proyectos de grado en el área de máquinas eléctricas en la Universidad Nacional, Medellín.

\*\*Ingeniera Electricista (Universidad Nacional de Colombia, Medellín). Docente investigadora Instituto Tecnológico Pascual Bravo. Docente Universidad de Antioquia, Medellín.

Comprendida la importancia de las corrientes reactivas en el motor de inducción y lo nocivas que ellas pueden ser para la red de alimentación, se muestra la manera de calcular un banco de condensadores que suministre parte de esta potencia reactiva al momento del arranque y la forma en que este deberá operarse.

No encontramos conveniente que este banco de condensadores suministre la totalidad de la potencia reactiva requerida por el motor, para ponerse en marcha, porque el sistema se hace muy costoso; sin embargo, si el banco de condensadores solo suministra una parte de ella y el resto se deja para que la red la suministre, el costo resulta mucho menor.

Este sistema de arranque ha sido probado por los autores de este artículo con motores de 7 KW y 60 HP y se observó que el motor puede ser puesto en marcha en vacío o con carga sin ocasionar grandes fluctuaciones en la red, además, si se complementa con un arrancador tipo electromagnético o por etapas, la red pasa como imperceptible al arranque del motor.

### El circuito equivalente del motor de inducción

Para comprender los fenómenos que ocurren en el motor de inducción cuando este se encuentra en cualquiera de sus etapas de funcionamiento, es una herramienta de gran valor el circuito equivalente de la máquina.

En la figura 1 se representa el circuito equivalente más sencillo del motor de inducción, tomando separadamente los parámetros del estator y del rotor.

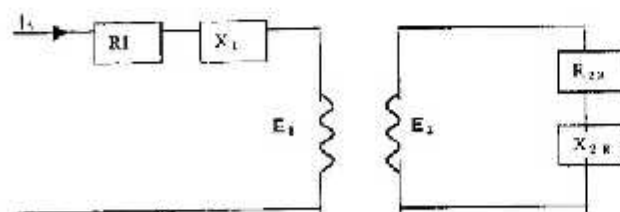


Figura 1. Primera representación circuital del motor de inducción

#### Donde:

$R_1$  es la resistencia del estator, por fase en  $\Omega$   
 $X_1$  es la reactancia de dispersión del estator, por fase en  $\Omega$   
 $E_1$  es la f.c.e.m. del campo giratorio sobre el estator, por fase

$I_1$  es la corriente del estator, por fase  
 $R_2$  es la resistencia del rotor, por fase en  $\Omega$   
 $X_2$  es la reactancia de dispersión del rotor, por fase en  $\Omega$   
 $E_2$  es la f.c.e.m. del campo giratorio sobre el rotor, por fase  
 $I_{2R}$  es la corriente del rotor, por fase

A partir de la teoría básica del motor y utilizando los resultados de las pruebas de vacío a voltaje nominal y del rotor bloqueado a corriente nominal, pueden obtenerse todos los parámetros del motor y configurar el circuito mostrado en la figura 2, válido para cualquier tipo, velocidad y potencia.

El modelo circuital presentado en la figura 2 es aplicable con mucha confianza a motores de potencias de más de 2 KW, debido a que el peso del alambre del bobinado comparado con el peso del hierro es muy pequeño.

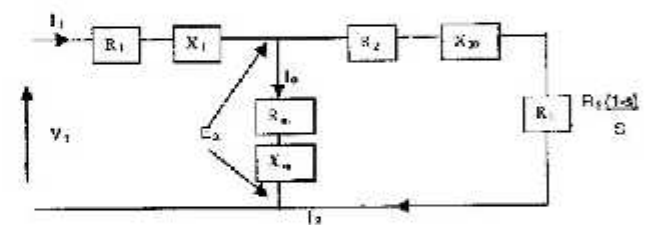


Figura 2. Modelo del motor de inducción por fase referido al estator

#### Donde:

$V_1$  es el voltaje aplicado por fase en voltios  
 $R_1$  es la resistencia del estator por fase en  $\Omega$   
 $X_1$  es la reactancia del estator por fase en  $\Omega$   
 $R_2$  es la resistencia del rotor por fase referida al estator en  $\Omega$   
 $X_2$  es la reactancia del rotor por fase referida al estator en  $\Omega$   
 $R_m$  representa las pérdidas del núcleo del motor  
 $X_m$  es la reactancia magnetizante. Su corriente genera el campo giratorio en el estator  
 $I_1$  es la corriente por fase en amperios  
 $I_0$  es la corriente magnetizante en amperios  
 $I_2$  es la corriente de carga en amperios  
 $E_2$  es el voltaje del rotor referido al estator

### Condiciones de marcha en vacío

El motor de inducción en vacío, a diferencia del transformador, toma una corriente  $I_0$  de valor no

despreciable que puede tener valores desde 0,28 hasta 0,38 veces la corriente nominal; un valor promedio muy común es de 0,35 con respecto a la corriente de carga nominal. Esta corriente es muy atrasada con respecto al voltaje aplicado  $V_1$ .  $\phi_0$  es el ángulo de atraso de la corriente de vacío con respecto al voltaje aplicado y oscila normalmente entre  $75^\circ$  y  $86^\circ$  en la mayoría de los motores de acuerdo con los criterios de diseño.

Para motores pequeños la corriente de vacío suele ser de valores comprendidos entre 0,4 y 0,5 veces la corriente nominal, debido al criterio comercial que se aplica al diseño de estos motores.

**Diagrama fasorial del motor en vacío**

El análisis de los resultados del ensayo de vacío del motor da como resultado el diagrama fasorial presentado en la figura 3.

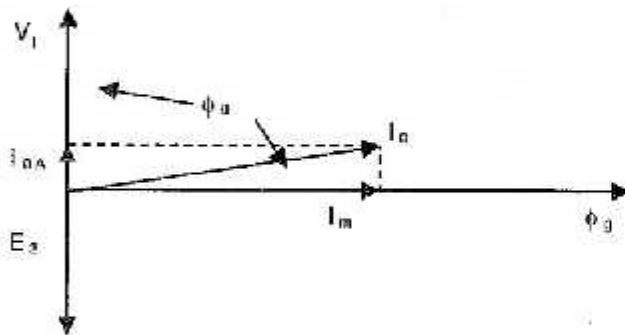


Figura 3. Diagrama fasorial del motor en vacío

Donde:

- $\phi_0$  es el ángulo de retraso de la corriente de vacío con el voltaje aplicado
- $I_m$  es la corriente magnetizante
- $I_{0A}$  es la componente activa de la corriente de vacío que "origina" las pérdidas de vacío
- $E_2$  es el voltaje inducido en el rotor por fase

De acuerdo con la Ley de Faraday el voltaje inducido en el rotor,  $E_2$  se atrasa  $90^\circ$  al campo giratorio:

El campo giratorio es una función del número de espiras del estator  $N_1$  y de la corriente de vacío  $I_0$  así:

$$\Phi_g = \alpha [N_1, I_0]$$

Dado que el voltaje aplicado al motor es senoidal, entonces:

$$\Phi_g = g [I_0 \text{ sen } \omega t]$$

Ahora, por la Ley de Faraday el voltaje inducido por un campo en un conductor cuando entre ellos hay un movimiento relativo se tiene:

$$E_2 = -N_2 \frac{d\Phi_g(t)}{dt} = h [\text{sen}(\omega t - 90^\circ)]$$

**Análisis de las corrientes del motor con carga**

El motor con carga tiene tres corrientes diferentes que son:  $I_0$ ,  $I_1$  e  $I_2$ , definidas en el circuito modelo presentado en la figura 2, de este circuito tenemos:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}_2$$

$I_2$  como puede verse en el circuito, recorre la llamada rama de carga correspondiente al rotor. También puede verse que al funcionar en vacío la velocidad del rotor es muy parecida a la del campo giratorio, así:

$$n_2 \approx n_g$$

Donde:

- $n_2$  es la velocidad de giro del rotor en RPM
- $n_g$  es la velocidad de giro del campo giratorio, llamada velocidad sincrónica y dada por:

$$n_g = \frac{60 f}{p} \text{ RPM}$$

Donde:

- $f$  es la frecuencia de la red de alimentación
- $p$  es el número de polos de la máquina
- Siendo  $n_2$  cercana en valor a  $n_g$ , el deslizamiento  $S$ , definido como:

$$S = \frac{n_g - n_2}{n_g}$$

Se acerca a un valor muy pequeño, pero no puede llegar a ser cero debido a que el rotor del motor debe girar a velocidades inferiores a la sincrónica.

Podemos afirmar que en vacío  $S = 0$  y por eso la resistencia de carga  $R_L$ , la cual está dada por:

$$R_L = R_2 \frac{1-S}{S}$$

tiende a un valor muy grande, así por ejemplo, con un deslizamiento en vacío  $S = 0,002$ , la resistencia de carga  $R_L$  tendrá un valor de:

$$R_L = R_2 \frac{1 - 0,002}{0,002} \approx 499 R_2$$

Este valor agregado a  $R_2$  da por resultado una resistencia de alto valor en el circuito del rotor y por consiguiente por las barras de la jaula de ardilla, o por las bobinas del rotor en el caso del rotor bobinado de anillos, circulará una corriente muy pequeña. Esta corriente es activa debido a que la parte resistiva del rotor es demasiado grande ante el valor de  $X_{20}$ . Esta corriente es necesaria en el rotor para mantener el par motor sin carga.

De otro lado, si comparamos esta corriente con la corriente de vacío  $I_0$  veremos que es despreciable, por consiguiente puede afirmarse que en vacío:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0$$

Esta condición cambia cuando tenemos al motor con alguna carga que esté dentro de los límites de carga de diseño.

El motor con carga sufre una pequeña pérdida de velocidad y por ello el deslizamiento  $S$  es de mayor valor. Debido al aumento del valor del deslizamiento  $S$  la resistencia de carga  $R_L$  baja de valor, pero no solo el valor de la resistencia de carga cambia su valor, también se da un aumento en el valor del voltaje inducido en el rotor  $E_2$  ya que este depende del deslizamiento  $S$ , así:

$$E_2 = S E_{20}$$

Donde:

$E_{20}$  es el voltaje inducido en el rotor al momento del arranque cuando la velocidad del rotor  $n_r$  es cero.

Debido a los hechos anteriores, al ponerle carga al motor aparece en el rotor una corriente  $I_2$  mucho mayor que la de vacío.

Luego de la toma de carga, la rama del rotor tiene una configuración diferente debido al cambio en la resistencia de carga  $R_L$ . En la figura 4a se representa la rama de carga del motor, la parte resistiva puede sumarse para reducir el circuito así:

$$R_2 + R_L = R_2 + R_2 \left( \frac{1-S}{S} \right)$$

Reduciendo la ecuación anterior se tiene:

$$R_2 + R_L = \frac{R_2}{S}$$

Así la rama de carga puede ser representada en la forma en que muestra la figura 4b y de esta figura puede obtenerse el valor de la corriente de carga así:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left( \frac{R_2}{S} \right)^2 + X_{20}^2}}$$

Como el circuito es de la forma R-L, esta corriente se atrasa un ángulo  $\phi_2$  con respecto a la tensión  $E_2$  cuyo valor está dado, según la figura 4b, por:

$$\phi_2 = \text{Tang}^{-1} \left[ \frac{X_{20}}{R_2 / S} \right] = \text{Tang}^{-1} \left[ \frac{S X_{20}}{R_2} \right]$$

Debe observarse que al "cargar" el motor, no solamente crece la corriente del rotor, también esta corriente se desfasa con respecto a  $E_2$  en un ángulo  $\phi_2$ , el cual crece con el aumento del deslizamiento  $S$ .

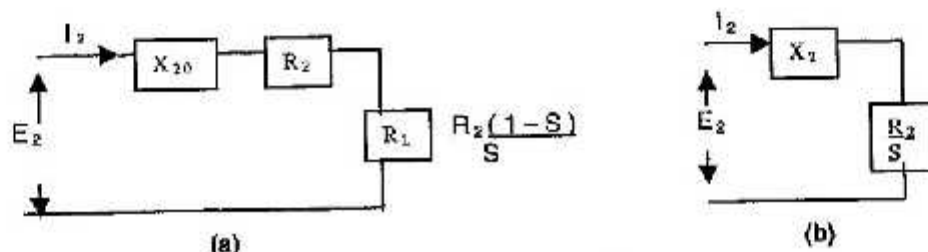


Figura 4. a. Circuito de la rama de carga  
b. La rama de carga reducida

Con todo lo anterior se construye la primera aproximación al diagrama fasorial del motor el cual se muestra en la figura 5.

En el diagrama de la figura 5 se observa que, aunque la corriente del rotor  $I_2$  está desfasada con respecto a  $E_2$ ,  $I_2 R_2 / S$  es mayor que  $I_2 X_{20}$  haciendo que esta corriente sea algo inductiva.

A partir del triángulo de voltajes representado en el diagrama fasorial de la figura 5 se tiene:

$$\text{sen } \phi_2 = \frac{I_2 X_{20}}{E_{20}}$$

De esta ecuación se despeja  $I_2$  y se tiene:

$$I_2 = \frac{E_{20}}{X_{20}} \text{sen } \phi_2$$

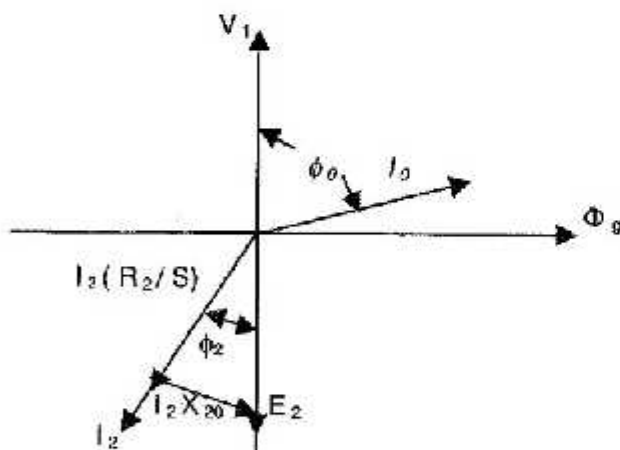


Figura 5. Primera aproximación del diagrama fasorial del motor.

La ecuación anterior es la ecuación polar de una circunferencia cuyo diámetro coincide con el eje de las abscisas donde está el campo giratorio  $\Phi_g$  cuyo diámetro es  $E_{20} / X_{20}$  y que pasa por el origen. Esto indica que la punta de la corriente  $I_2$  describe una circunferencia. Es el lugar geométrico de  $I_2$ . Esto se indica gráficamente en la figura 6.

Debe recordarse que el aumento de carga trae consigo un aumento en la corriente del rotor  $I_2$  y un aumento del ángulo  $\Phi_2$  al crecer el valor del deslizamiento  $S$ .

La figura 7 representa la descomposición de la corriente  $I_2$  sobre el eje de coordenadas, estas dos componentes de la corriente del rotor tienen una importancia fundamental en el funcionamiento del motor.

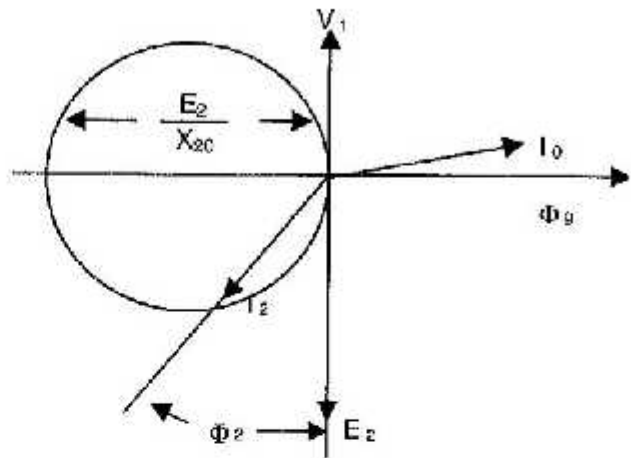


Figura 6. Lugar geométrico de la corriente del rotor

Como se representa en la figura 7 las componentes de la corriente del rotor  $I_2$  son  $I_{2R}$  e  $I_{2A}$ ; según su posición en el diagrama fasorial  $I_{2R}$  está  $90^\circ$  atrasada de la f.e.m.  $E_2$  luego es la componente reactiva de la corriente del rotor y  $I_{2A}$  está en fase con la tensión  $E_2$  y por lo tanto es la componente activa de la corriente del rotor.

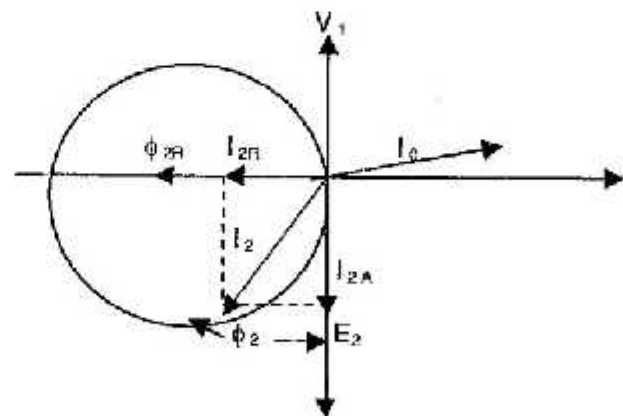


Figura 7. Descomposición fasorial de la corriente del rotor

En motores de corriente continua el par motor se expresa por la ecuación conocida:

$$M = K_m \phi_p I_i \quad \text{kg-m}$$

Donde:

$M$  es par motor

$K_m$  es una constante característica de cada motor



$\Phi_p$  es el flujo magnetizante de los polos actuando sobre el motor

$I_1$  es la corriente del rotor

En el caso de motores de corriente alterna, la potencia y el par motor solo pueden ser producidos por corrientes activas, por esta razón debe introducirse en la ecuación anterior el factor de potencia del rotor cuando el motor tiene carga. Además, el campo magnético que actúa sobre el rotor en el caso del motor de inducción es el flujo magnetizante del estator o campo giratorio  $\Phi_g$ . Así, para el motor de inducción la ecuación del par esta dada por:

$$M = K_m \phi_g I_2 \cos \phi_2 \text{ kg - m}$$

Ahora, de la figura 7 es claro que:

$$I_{2A} = I_2 \cos \phi_2$$

Por consiguiente, la componente activa de la corriente del rotor,  $I_{2A}$ , es la encargada de producir el par motor, luego para el motor de inducción se tiene:

$$M = K_M \phi_g I_{2A}$$

Se analiza a continuación la función de la corriente reactiva,  $I_{2R}$ . Como puede deducirse, los motores de inducción absorben potencia reactiva de la red, pero esta es absolutamente necesaria para el funcionamiento del motor.

La corriente  $I_{2R}$  circula por las  $N_2$  espiras del rotor y produce un campo magnético  $\phi_{2R}$  que es función del número de espiras del rotor y de la corriente que circula por ellas, así:

$$\phi_{2R} = \phi(N_2, I_{2R})$$

En el diagrama fasorial de la figura 7 se ve como el campo magnético del rotor  $\phi_{2R}$  se opone al campo giratorio  $\phi_g$  y por consiguiente su efecto es producir una ligera desmagnetización del núcleo. Así el flujo neto del estator,  $\phi_{\text{neto}}$ , al momento de "entrar" la carga es:

$$\phi_{\text{neto}} = \phi_g - \phi_{2R}$$

Para entender el efecto de este fenómeno en la figura 8 se representa nuevamente al circuito equivalente del motor.

Al desmagnetizar el núcleo la fuerza electromotriz  $E_1$  del estator disminuye en valor ya que esta es proporcional al flujo del núcleo y a la velocidad del campo giratorio o velocidad sincrónica  $n_g$  que es constante, así:

$$E_1 = K \phi_{\text{núcleo}} n_g$$

Así la fuerza electromotriz  $E_1$  es una función del flujo del núcleo:

$$E_1 = e(\phi_{\text{núcleo}})$$

Al descender  $E_1$  por la desmagnetización del núcleo al momento de "entrar" la carga la corriente del estator pasa de un valor  $I_0$  hasta otro valor  $I_1$  mayor.

Puede verse que la corriente  $I_{2R}$  a través del campo desmagnetizante que produce  $\phi_{2R}$  hace que en el estator se tenga mayor corriente.

Queda claro que la corriente reactiva, aparentemente inútil en el motor, es la encargada de obligar al motor a "pedir" más corriente a la alimentación y así poder pedir potencia para mover la carga.

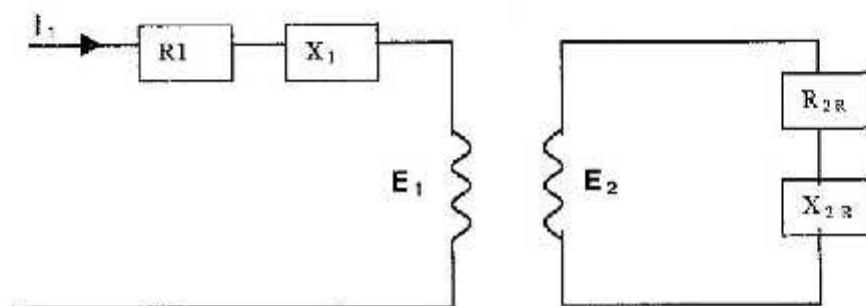


Figura 8. Representación circuital del motor de inducción

Un fenómeno de origen inductivo como la desmagnetización del núcleo es lo que hace que el estator incremente su corriente. Según la Ley de Lenz, este incremento de corriente debe estar en oposición con la causa que la originó. Al circular este incremento de la corriente sobre las  $N_1$  espiras del estator, origina un nuevo campo magnético  $\phi_{1c}$  que entrará en oposición con el que creó la corriente  $I_2$ .

Llamaremos  $I_{1c}$  al incremento de corriente en el estator, el cual al sumarse con la corriente de vacío  $I_0$  da la corriente del estator  $I_1$ . Si el motor está en vacío  $I_{1c}$  es igual a cero, pero al poner carga  $I_{1c}$  es mayor que cero. Por esto se llama a  $I_{1c}$  la componente de carga del motor.

Por la Ley de Lenz el campo generado por la corriente del rotor debe ser igual y estar en oposición con el campo generado por la componente de carga del motor, así:

$$N_2 I_2 = N_1 I_{1c}$$

Y por consiguiente:

$$I_{1c} = I_2 \left( \frac{N_2}{N_1} \right)$$

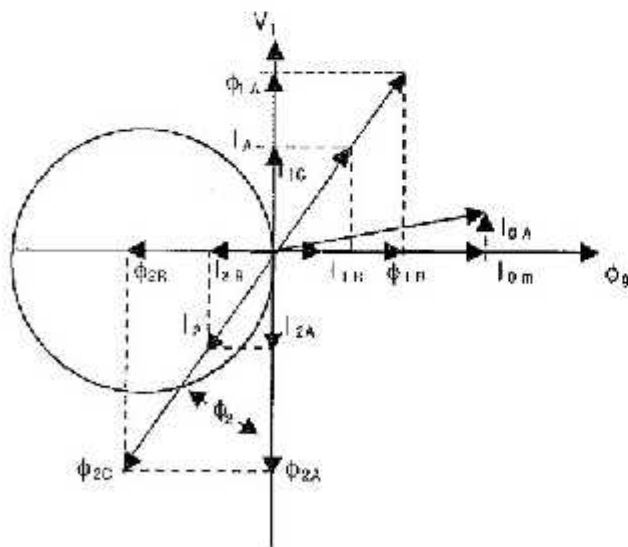


Figura 9. Diagrama fasorial de flujos magnéticos y corrientes del motor con carga

La figura 9 muestra el diagrama fasorial de flujos magnéticos y corrientes del motor con carga. En esta figura se tiene:

$\phi_{2c}$  es el campo generado por la corriente del rotor  
 $\phi_{2R}$  es la componente desmagnetizante en el rotor y se opone a  $\phi_{2A}$

$I_{1c}$  aparece en el estator por el efecto desmagnetizante. Es la componente de carga

$\phi_{1c}$  es el campo generado por la componente de carga. La Ley de Lenz lo ubica de igual magnitud y en contrafase con  $\phi_{2c}$ . Este flujo  $\phi_{1c}$  entra a "contrarrestar" los efectos generados por el campo  $\phi_{2c}$ , no a eliminarlos.

$\phi_{1c}$  a través de sus dos componentes  $\phi_{1R}$  y  $\phi_{1A}$  consigue lo anterior ya que  $\phi_{1R}$  actúa sobre  $\phi_{2R}$  y  $\phi_{1A}$  lo hace sobre  $\phi_{2A}$ . Con esta labor realizada por  $\phi_{1c}$  el núcleo puede volver a tener casi su grado de saturación original ya que la reactancia de dispersión del estator dispersa algo de la totalidad del flujo  $\phi_{1c}$ , además los problemas de regulación de la línea no permiten que el motor tenga con carga el mismo voltaje que en vacío.

Observando la figura 9 y en atención a lo dicho sobre los flujos, en la figura 10 se especifican las direcciones y magnitudes de  $\phi_{2R}$ ,  $\phi_{1R}$  y  $\phi_{2A}$ .



Figura 10. Representación de  $\phi_{2R}$ ,  $\phi_{1R}$  y  $\phi_{2A}$

Es así como el motor tiene un control perfecto sobre todos los efectos que el rotor introduzca en el estator. Esto es lo que permite que el motor funcione eléctrica y magnéticamente en forma perfecta si no hay daños que lo impidan.

### Análisis de las corrientes que circulan en el motor

Al observar el diagrama fasorial de corrientes presentado en la figura 9 se nota claramente que en el estator hay cuatro corrientes; dos de ellas activas y dos reactivas. Estas corrientes son las siguientes:

$I_{0A}$  es la componente activa de la corriente de vacío y genera las pérdidas de vacío.

$I_{1A}$  es la componente activa de la corriente exigida al motor cuando se "entra" la carga.

$I_{0R}$  es la componente reactiva de la corriente de vacío, genera el campo giratorio.

$I_{1R}$  es la componente reactiva de la corriente exigida al motor cuando "entra" la carga. Su función es restablecer la densidad magnética del motor.

En la misma figura 9 queda claro que por la corriente que circula por el rotor,  $I_2$ , tiene dos componentes:

$I_{2A}$  es la componente activa y su función es producir el par motor.

$I_{2R}$  es la componente reactiva, genera el flujo  $\phi_{2R}$  que al actuar en contra del campo giratorio  $\phi_2$  lo hace en calidad de "solicitante" de carga.

En suma, la existencia de las corrientes reactivas  $I_{1R}$ ,  $I_{2R}$  es muy importante para la máquina ya que si no existieran el motor no podría funcionar como tal.

El valor de la corriente reactiva  $I_R$  que debe ser suministrada desde la red de alimentación es la suma de las componentes reactivas del estator así:

$$I_R = I_{0R} + I_{1R}$$

### Construcción del diagrama fasorial completo de la máquina

#### • Suma de las corrientes del estator.

Cuando el motor toma carga, la corriente del rotor obliga al estator a tomar de la fuente de alimentación una corriente  $I_{1c}$  que se llamó la componente de carga. Esta corriente se suma a la corriente de vacío para dar la corriente  $I_1$  que es la corriente que circula por cada fase en el estator.

En la figura 11 a se muestra la suma fasorial de las corrientes de vacío y de carga para dar la corriente del estator  $I_1$ . Debe recordarse que la corriente de vacío no cambia de dirección ni de magnitud.

La corriente  $I_A$  es la misma corriente  $I_{1c}$  por lo tanto, para simplificar el diagrama fasorial pueden utilizarse solamente a las corrientes  $I_{1c}$  e  $I_A$  tal como se muestra en la figura 11b. Es necesario recordar que  $I_{1c}$  sigue fielmente a  $I_2$  en todos sus cambios y así cuando  $I_A$  crece y se desfasa  $I_{1c}$  hará lo mismo.

#### • Análisis completo de la corriente del rotor con carga.

Como se expresó anteriormente, al ponerle carga al motor la corriente en el rotor crece y se retrasa un ángulo  $\phi_2$  con respecto a la fuerza electromotriz  $E_{2c}$  ( $E_{2c} = S E_{20}$ ) dado por:

$$\phi_2 = \text{tg}^{-1} \left[ \frac{S X_{20}}{R_2} \right]$$

Donde  $X_{20}$  y  $R_2$  se definieron anteriormente, en el circuito equivalente.

La carga en el eje hace crecer a  $S$ ; si se aumenta paulatinamente la carga, la velocidad disminuirá y en cierto valor de carga el motor se detendrá, al detenerse la velocidad del rotor  $n_r$  se hace cero y por lo tanto  $S = 1$  y el ángulo  $\phi_2$  tomará su máximo valor  $\phi_{2K}$  cuyo valor estará dado por:

$$\phi_{2K} = \text{tg}^{-1} \left[ \frac{X_{20}}{R_2} \right]$$

En la figura 12 se representa como cambia la magnitud y el ángulo de la corriente del rotor al variar la carga.

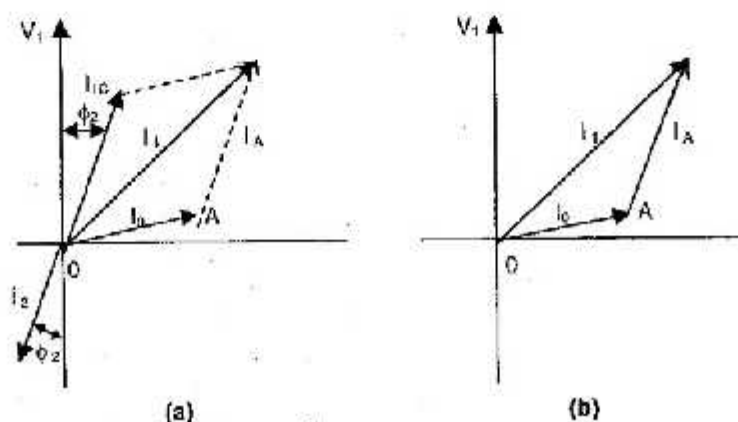


Figura 11. Suma fasorial de las corrientes del estator



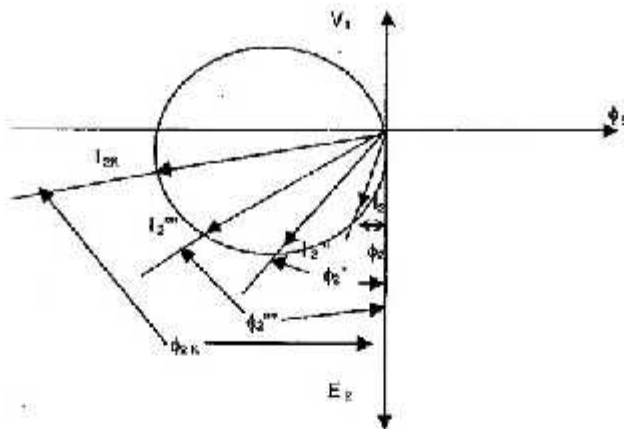


Figura 12. Comportamiento de la corriente del rotor al tomar carga

El comportamiento del motor al detenerse es igual al que tiene en el momento del arranque, esto es, la velocidad del rotor es cero y el deslizamiento es 1. Puede verse en la figura la posición y la magnitud de la corriente  $I_{2K}$  la cual representa la corriente en el rotor al momento del arranque.

En la figura 13 se representa la corriente de arranque del motor la cual tiene dos componentes señaladas en la figura;  $I_{2AK}$  es la componente activa que está en fase con la f.e.m.  $E_2$  e  $I_{2RK}$  es la componente reactiva a  $90^\circ$  de  $E_2$  y en fase con  $\phi_2$ .

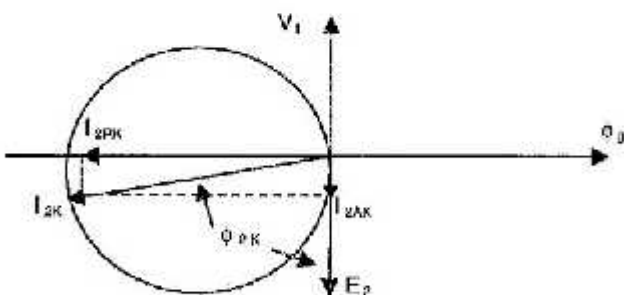


Figura 13. Descomposición de la corriente de arranque del rotor

Debe notarse en la figura 13 el alto valor de la componente reactiva y el bajo valor de la componente activa, lo cual deja ver que los motores de jaula de ardilla son de bajo par de arranque.

Para completar el análisis de las corrientes del motor se verá ahora lo que pasa con la corriente del estator en el momento del arranque. Como ya se explicó más atrás, la corriente del rotor refleja en el estator una corriente llamada  $I_A$  ( $I_A = I_{1c}$  en la figura

11). En el momento del arranque  $I_A$  es proporcional a  $I_{2K}$  y al sumarle la corriente de vacío se obtiene la corriente de arranque del motor a voltaje nominal en el estator.

En la figura 14 se representan las corrientes del motor al momento del arranque. También se presenta la suma fasorial de las corrientes del estator al momento del arranque, esto es:

$$\vec{I}_0 + \vec{I}_A = \vec{I}_K$$

También en la figura 14 se señalan algunos puntos importantes como:

OC es el valor de la componente reactiva de  $I_K$   
 BD es el valor de la componente activa de  $I_K$ ; esta corriente genera las pérdidas en la resistencia de los bobinados; también es la componente del par motor acelerante que lo pone en marcha.

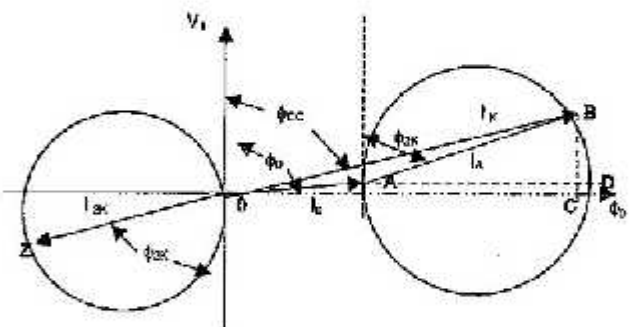


Figura 14. Diagrama fasorial del motor al momento del arranque

Debe observarse que si  $I_2$  se mueve de tal forma que su punta genera una circunferencia, el punto B extremo de la corriente  $I_A$ , está sobre otra circunferencia.

El punto Z se desplaza sobre la circunferencia del rotor y acercándose hacia el punto O a la medida que la velocidad aumenta. Lo mismo ocurre con el punto B al moverse hacia A sobre la circunferencia. La velocidad en B es cero y en A es la velocidad de vacío.

#### Cálculo de un sistema de arranque con condensadores

- *Cálculo del valor de la reactancia*  
 Por la forma en que funciona el motor de inducción debe tener siempre corrientes reactivas, especialmente

al momento del arranque. Estas corrientes reactivas deben ser suministradas por la red de alimentación y son nocivas para ella porque producen caídas de voltaje muy sensibles debido a su elevado valor y al bajo valor del factor de potencia.

La figura 15 representa fasorialmente por fase a la corriente de arranque del motor y a su componente reactiva.

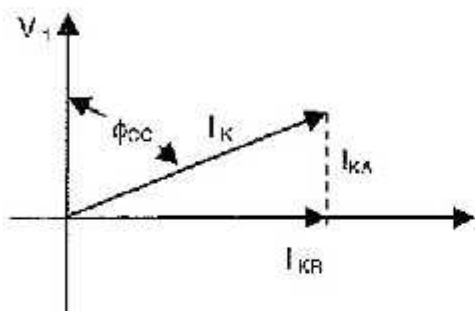


Figura 15. Corriente de arranque a voltaje nominal

En la figura 15 se tiene:

$I_K$  es el valor de la corriente de arranque a voltaje nominal

$\phi_{CC}$  es el ángulo de cortocircuito

$I_{KR}$  es la componente reactiva de la corriente de arranque y esta dada por:

$$I_{KR} = I_K \text{ sen } \phi_{CC}$$

Esta corriente debería ser suministrada en su totalidad por un banco de condensadores; sin embargo, no es conveniente hacerlo así, es preferible asignar a los condensadores una corriente menor para evitar que el factor de potencia de la red se vuelva capacitivo.

Lo más conveniente, desde el punto de vista económico es dejar en la red la corriente activa  $I_{KA}$  y

una corriente reactiva igual a la mitad de la corriente activa  $I_{KA}$  con esto se logra que el arranque para la red sea con menos corriente y un mejor factor de potencia.

El cálculo del condensador por fase se lleva a cabo utilizando ecuaciones sencillas de circuitos eléctricos.

Sea  $I_R$  la corriente que deben proporcionar los condensadores entonces:

$$I_R = \frac{V_{Fase}}{X_C}$$

Y despejando se tendrá:

$$X_C = \frac{V_{Fase}}{I_R}$$

En las ecuaciones anteriores  $V_{Fase}$  es el voltaje que se aplicará a cada uno de los condensadores; si se elige un banco de condensadores en delta el voltaje de fase es igual al voltaje de línea y si se elige un banco en estrella el voltaje de fase será el voltaje de la línea dividido por raíz de tres. Es importante resaltar que si se elige un banco de condensadores en estrella estos serán de menor voltaje, mayor corriente y mayor capacidad.

• *Configuración de los bancos de condensadores.*  
En la figura 16 se presenta el esquema de la configuración de los bancos de condensadores que deben utilizarse; la figura 16a para el caso que se use una configuración en delta y la figura 16b para el caso de una configuración en estrella. En la figura, L es una pequeña inductancia (de 10 a 50  $\mu\text{H}$ ) utilizada para suavizar la corriente de conexión de los condensadores. R es una pequeña resistencia calculada que se usa para descargar el banco de condensadores cuando este sea retirado de la red.

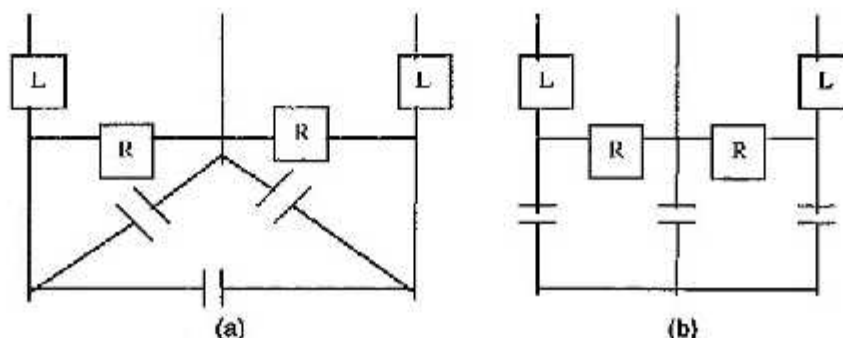


Figura 16. Configuración del banco de capacitores

**Operación de los condensadores.**

Para comprender completamente el fenómeno, en la figura 17 se presenta la forma de conectar el sistema.

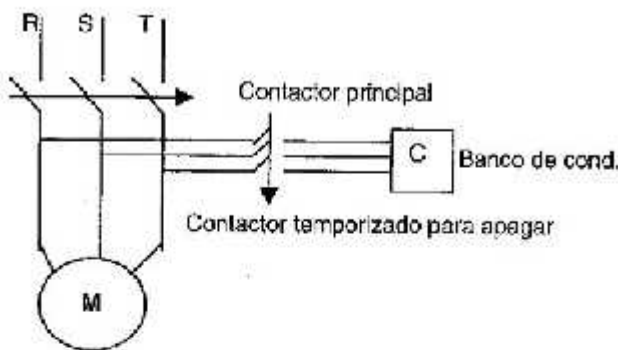


Figura 17. Esquema de conexión del sistema

En la figura 18 se presenta la corriente de arranque que el motor toma de la red sin condensadores para compensar la corriente de arranque y la corriente que entregará la red cuando se coloquen los condensadores para compensar esta corriente de arranque.

En esta figura 18 se tiene:

$I_K$  es el valor de la corriente de arranque del motor cuando este se arranca a voltaje nominal y sin condensadores para compensar el arranque.

$I_{KA}$  es la corriente activa de arranque del motor a voltaje nominal la cual será la misma que suministrará la red cuando se haga la compensación con el banco de condensadores.

$I_{KR}$  es la componente reactiva total de la corriente de arranque.

$I_{RC}$  es la corriente reactiva que suministrarán los condensadores.

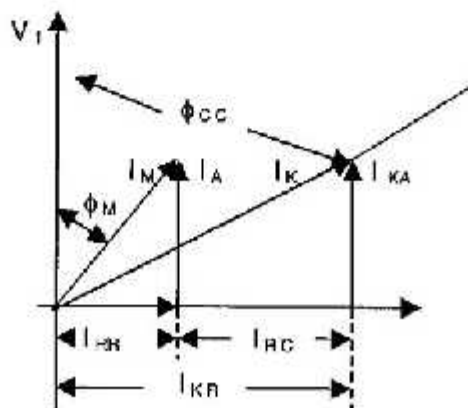


Figura 18. Representación de la corriente de arranque sin condensadores y con banco de condensadores

$I_{RR}$  es la corriente reactiva que suministrará la red y que, según se explicó en el ítem anterior, debe ser igual a la mitad de la corriente activa que suministra la red, esto es:

$$I_{RR} = I_{KR} - I_{RC} = \frac{1}{2} I_{KA}$$

$I_M$  es el valor de la corriente que la red entregará al motor cuando éste arranque compensado con el banco de condensadores y según la figura puede ser calculada como:

$\phi_{CC}$  es el ángulo de arranque del motor a voltaje nominal y sin compensación con los condensadores.

$$I_M = \sqrt{I_A^2 + I_{RR}^2}$$

$\phi_M$  es el nuevo ángulo para el arranque cuando este se hace compensado con el banco de condensadores.

En la figura 18 es importante notar que:

$$\phi_M \ll \phi_{CC} \quad I_M \ll I_K \quad I_{RR} \ll I_{KR}$$

Así queda claro que al poner los condensadores para el arranque se reduce el ángulo de arranque, la corriente total de la línea al momento del arranque y la corriente reactiva que deberá entregar la red.

En la figura 19 se presenta la corriente de arranque y su evolución en el tiempo. Debe observarse y recordarse que, tal como lo muestra la gráfica, la corriente de arranque a voltaje nominal tiene el mismo valor máximo  $I_K$  independientemente de la carga con la cual se arranque el motor. La cantidad de carga en el eje ocasiona un mayor tiempo de duración de las altas corrientes de arranque en el bobinado del motor y en la red.

Para motores seleccionados "ortodoxamente" el tiempo de arranque a plena carga es relativamente pequeño, menor de 30 segundos, aún en el caso de motores de 3600 R.P.M. En el caso de motores de 3600 R.P.M. para ventiladores, si este tiempo pasa de 30 segundos el motor fue mal seleccionado.

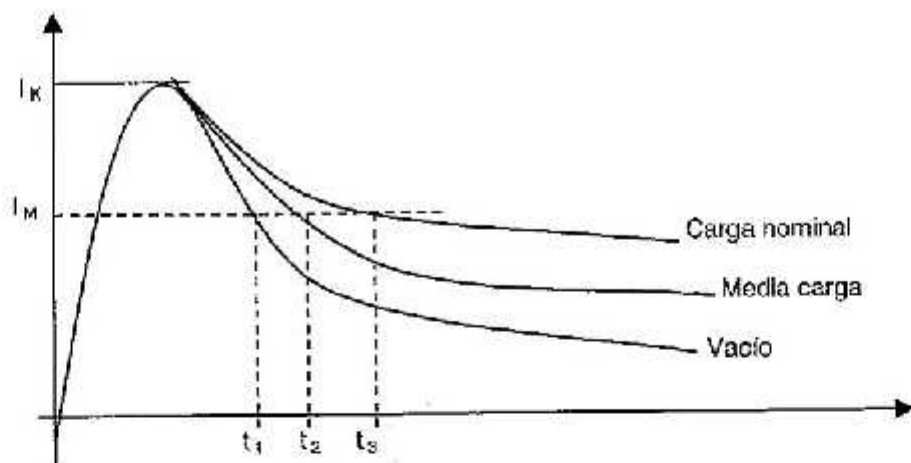


Figura 19. Corrientes de arranque del motor en el tiempo

Los condensadores no deben permanecer indefinidamente conectados al sistema debido a que luego que el motor arranca la corriente de la línea empieza a bajar de valor; por consiguiente, si los condensadores no se desconectan, la línea se volverá capacitiva, lo cual es indeseable. Así, los condensadores deben permanecer solamente el tiempo necesario hasta que la corriente haya alcanzado un valor determinado  $I_M$ .

En la figura 19 se presentan las formas típicas de las corrientes del motor como una función del tiempo para diferentes valores de carga puesta al motor en el momento del arranque y se señala el valor de la corriente de la línea  $I_M$  en el arranque, calculada para arrancar el motor con el banco de condensadores. También se señala la corriente de arranque  $I_K$  que tomaría el motor de la línea si este se arranca a voltaje nominal sin el banco de condensadores. Debe observarse que la corriente de arranque del motor a voltaje nominal es la misma para cualquier carga con la que el motor se arranque, lo que varía es el tiempo

que demora esta corriente en reducirse, así los tiempos que demora el motor para alcanzar la corriente  $I_M$  luego que ha arrancado y la corriente de arranque empieza a reducirse es diferente para cada una de las circunstancias mostradas en la figura 19.

Para determinar el tiempo que debe permanecer el banco de condensadores conectado a la red, debe tomarse un registro de la corriente de arranque de la línea para las circunstancias en que este es arrancado normalmente y observar el tiempo que toma la corriente para reducirse hasta el valor  $I_M$  después que ha alcanzado su valor máximo de arranque. Este es el tiempo que debe ajustarse en el temporizador de la figura 17. Alternativamente, si el motor es arrancado siempre con diferentes valores de carga, es decir, si los tiempos normales de arranque del motor son siempre diferentes, puede usarse un rele de sobrecorriente ajustado para la corriente  $I_M$  para controlar el contactor de los condensadores. Este sensor debe ser colocado entre el banco de capacitores y el motor.

### Bibliografía

1. F. Puchstein - T. C. Lloyd - A. G. Conrad. Alternating Current Machines. John Wiley and Sons, New York, 1964
2. Liwshitz - Garik. Electrical Machinery, Vol 2 AC machines. Van Nostrand, Princeton, 1957
3. A. M. Dudley. Connecting Induction Motors. Mc Graw Hill, New York 1936
4. Hans Teuchert. Fuerza motriz y Tracción Eléctrica. Editorial Labor 1961
5. Ing. A. Von Königsow. Máquina de Corriente Alterna Asíncronas. Editorial Labor 1954.