

La potencia reactiva en los motores de inducción



RESUMEN

Los motores de inducción, especialmente los de gran potencia requieren para su funcionamiento del suministro de potencia reactiva desde la red. Durante el proceso de arranque esta potencia puede llegar a ser de valor considerable, coaccionando problemas de regulación de voltaje que pueden afectar a otros motores o equipos conectados a la misma red.

En este artículo se hace un estudio de la forma en que se presenta la potencia reactiva en el arranque de los motores de inducción y la importancia que esta tiene para la máquina. Finalmente se presenta un método para reducir la corriente reactiva en la red al momento del arranque del motor.

PALABRAS CLAVES

Motor de inducción, potencia reactiva, arranque.

ABSTRACT

This paper presents a study of the reactive powers in the induction motors and it important to the machine. Finaly expose a method to reduce the reactive current in the electrical net when the motor starts.

KEYWORDS:

Induction motors, reactive powers, start

□ **Miguel Osorio Pardo,**
Ingeniero Electricista
Profesor e investigador
Instituto Tecnológico
Pascual Bravo
mopardo@geo.net.co

□ **Gloria Bernal Tobón,**
Ingeniera Electricista.
Profesora e investigadora
Instituto Tecnológico
Pascual Bravo
gledbeto@geo.net.co

...

1. INTRODUCCIÓN

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

Si la potencia del motor no es despreciable al compararla con la capacidad de la red que la alimenta se presentará una fuerte disminución de voltaje en la fuente de alimentación y se aumentará la demanda de energía de la red.

Para reducir los efectos de esta caída de voltaje se recurre actualmente al uso de arrancadores electrodinámicos o a los llamados arrancadores suaves, los cuales reducen parcialmente la magnitud de la corriente de arranque pero no ejercen ningún control sobre la demanda de potencia reactiva de la red requerida para el arranque del motor.

En este artículo presentamos una nueva alternativa para el arranque de los motores de inducción que permite reducir la magnitud de la corriente de arranque y al mismo tiempo disminuir la potencia reactiva que el motor debe tomar de la red para ponerse en marcha.

Los cálculos son aplicables a cualquier motor de inducción de acuerdo a sus propias características y a la forma en que normalmente este sea operado.

2. 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 el circuito equivalente de la máquina es una herramienta de gran valor. En la figura 1 se representa el circuito equivalente más sencillo del motor de inducción por fase, tomando separadamente los parámetros del estator y del rotor.

En esta figura se definen los siguientes parámetros:

V_1 es el voltaje de fase aplicado al motor en voltios

R_1 es la resistencia del estator por fase en Ω

X_1 es la reactancia de dispersión del estator por fase en Ω

E_1 es la fuerza contraelectromotriz generada por el 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 Ω
 X_2 es la reactancia de dispersión del rotor por fase en Ω
 E_2 es la fuerza contraelectromotriz generada por el campo giratorio sobre el estator por fase.
 I_{2r} es la corriente del estator por fase

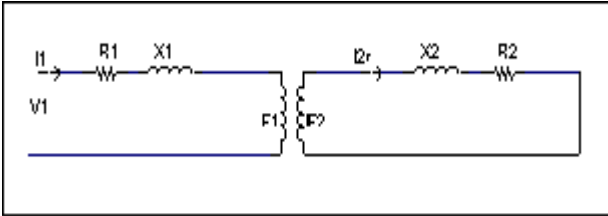


Figura 1: Primera representación circuital del motor por fase

Con los resultados de las pruebas de vacío a voltaje nominal, de rotor bloqueado a corriente nominal y la medición de la resistencia por fase del estator se pueden obtener todos los parámetros del motor y configurar el modelo circuital por fase mostrado en la figura 2; válido para cualquier tipo de motor de inducción de potencias mayores a 2 KW en los cuales el peso del alambre del bobinado comparado con el peso del hierro del núcleo es muy pequeño.

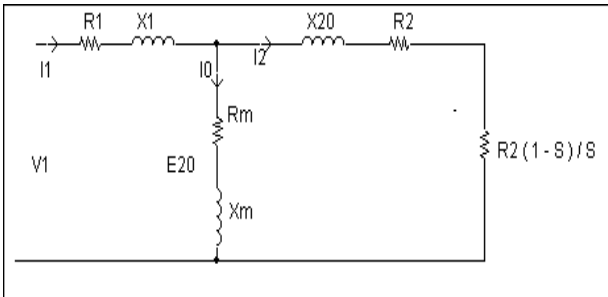


Figura 2: Modelo circuital del motor de inducción por fase referido al estator

En la figura 2 se definen los siguientes parámetros:
 V_1 es el voltaje de fase aplicado al motor en voltios
 R_1 es la resistencia del estator por fase en Ω
 X_1 es la reactancia de dispersión del estator por fase en Ω
 R_2 es la resistencia del rotor por fase referida al estator en Ω
 X_{20} es la reactancia de dispersión del rotor al momento del arranque, por fase y referida al estator en Ω
 R_m representa las pérdidas del núcleo por fase
 X_m es la reactancia magnetizante. Su corriente genera el campo giratorio en el estator

E_{20} es la fuerza electromotriz inducida por el campo giratorio sobre el rotor en el momento del arranque y referida al estator por fase.

I_1 es la corriente del estator por fase en amperios
 I_0 es la corriente magnetizante por fase en amperios
 I_2 es la corriente de carga por fase en amperios
 $R_2 (1 - S) / S$ representa la resistencia de carga, la cual se seguirá denotando como R_L y en la cual S se define como el deslizamiento de la máquina y esta dado por:

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

Donde:

n_2 es la velocidad de giro del rotor

n_g es la velocidad con que rota el campo giratorio de la máquina, llamada velocidad sincrónica y dada por:

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

Donde:

f es la frecuencia de alimentación de la red

p es el número de pares de polos de la máquina

3. ANALISIS DEL FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

3.1 Análisis del funcionamiento del motor en vacío

El motor de inducción en vacío toma una corriente de valor no despreciable que puede estar entre el 28% y el 38% de su corriente nominal (Para motores menores de 2 KW esta corriente puede estar entre el 40% y el 50% de la corriente nominal debido al criterio comercial que se aplica al diseño de estos motores) además esta corriente es muy atrasada con respecto al voltaje de alimentación del motor. Este ángulo de retraso puede estar entre 75° y 86° en la mayoría de los motores según los criterios con que este haya sido diseñado.

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

ϕ_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, la cual origina las pérdidas de vacío

E_2 es la fuerza electromotriz inducida por el campo giratorio en el rotor por fase

De acuerdo a la ley de Faraday el voltaje inducido en el rotor E_2 se atrasa 90° al campo giratorio, lo que puede verse de la siguiente manera: el campo giratorio es una función del número de espiras del estator N_1 y de la corriente de vacío I_0 , así:

$$\phi_g = \propto(N_1, I_0)$$

Dado que el voltaje aplicado al motor es senoidal entonces:

$$\phi_g = g(I_0 \text{ sen } \omega t)$$

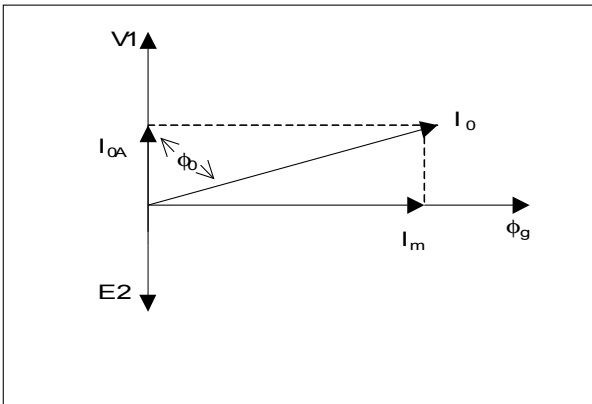


Figura 3: Diagrama fasorial del motor en vacío

Ahora, por la ley de Faraday, un campo induce un voltaje en un conductor cuando entre ellos existe un movimiento relativo, luego el campo giratorio del estator induce en los conductores del rotor un voltaje E_2 dado por:

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

La ecuación anterior muestra que la fuerza electromotriz inducida en los conductores del rotor E_2 esta retrasada 90° con respecto al campo giratorio ϕ_g tal como se representa en el diagrama fasorial de la figura 3.

Al funcionar en vacío la velocidad del rotor, n_2 , es muy aproximada a la velocidad del campo giratorio n_g , haciendo que el valor del deslizamiento sea muy pequeño, nunca cero debido a que el rotor debe girar siempre a velocidades inferiores a la sincrónica, por lo tanto se puede afirmar que en vacío el deslizamiento del motor tiende a cero y por consiguiente el valor de la resistencia de carga tiende a un valor muy grande que hace que en vacío la corriente que circula por el rotor sea tan

pequeña que comparada con la corriente de vacío pueda ser considerada como despreciable.

Según puede verse en el circuito equivalente de la figura 2, en el motor circulan tres corrientes diferentes que son: I_0 , I_1 e I_2 , pero, considerando que en vacío la corriente que circula por el rotor es despreciable, se puede afirmar para esta condición:

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

Así el circuito equivalente del motor cuando trabaja en vacío puede ser representado como se muestra en la figura 4

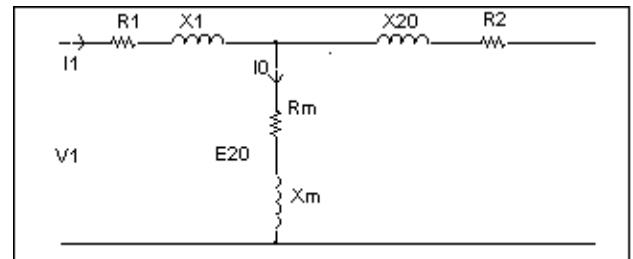


Figura 4: circuito equivalente del motor funcionando en vacío

3.2 Análisis del funcionamiento del motor con carga

El primer evento que se da en el motor cuando se le pone carga es la reducción de velocidad de giro del rotor, este evento conlleva a dos nuevas condiciones que determinan las características del funcionamiento del motor con carga. Primero al reducirse la velocidad de giro del rotor, la velocidad relativa entre los conductores del rotor y el campo giratorio se hace mayor y por consiguiente la fuerza electromotriz inducida en el rotor, E_2 , aumentará su valor. Segundo el valor del deslizamiento, S , se aumenta y por consiguiente el valor de la resistencia de carga R_L se disminuye. Estas dos condiciones conllevan a un aumento de la corriente del rotor y por consiguiente en el circuito de la figura 2 expresaremos en forma vectorial:

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

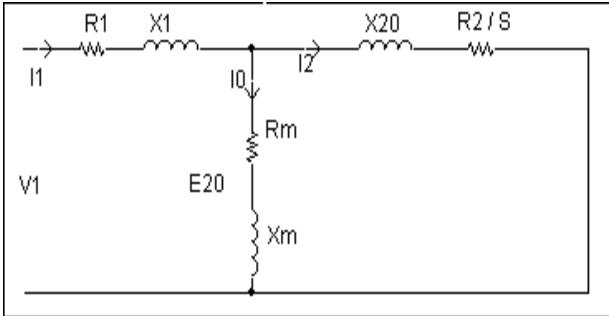
Por las condiciones expuestas el circuito equivalente que representa al motor funcionando con carga es el mostrado en la figura 2, el cual puede ser reducido sumando las dos resistencias de la rama del rotor así:

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

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

La figura 5 representa el circuito equivalente reducido del motor trabajando con carga.

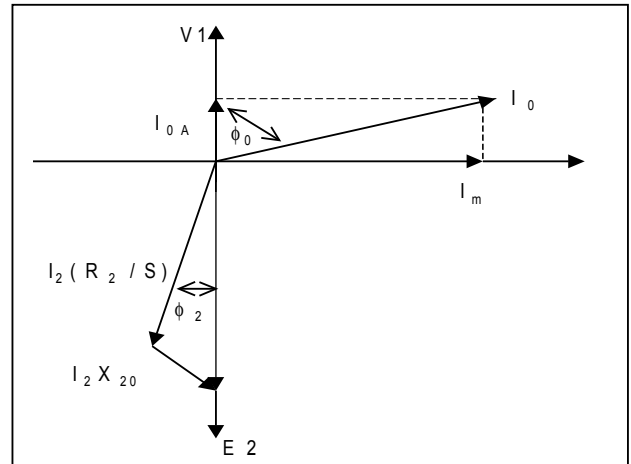
De esta ecuación se despeja la corriente de carga I_2 :



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

Figura 5: circuito equivalente reducido del motor con carga

De la figura 5 puede obtenerse el valor de la corriente de carga así:



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

Figura 6: primera aproximación del diagrama fasorial del motor con carga

Como el circuito es de la forma R- L esta corriente se atrasa un ángulo ϕ_2 con respecto a la tensión E_2 cuyo valor esta dado, según la figura 5, por:

Esta es la ecuación polar de una circunferencia cuyo diámetro coincide con el eje de las abscisas donde esta el campo giratorio, ϕ_g , cuyo diámetro es E_{20} / X_{20} y que pasa por el origen. Esto indica que para diferentes valores de carga la punta del fasor de la corriente de carga I_2 describe una circunferencia que es el lugar geométrico de I_2 y que se representa en la figura 7.

$$\phi_2 = \text{tang}^{-1} \left(\frac{X_{20}}{R_2/S} \right) = \text{tang}^{-1} \left(\frac{S X_{20}}{R_2} \right)$$

En la figura 7 las componentes de la corriente del rotor, I_2 , son: I_{2A} , la componente activa, en fase con la fuerza electromotriz E_2 e I_{2R} , la componente reactiva, 90° atrasada de la fuerza electromotriz E_2 . Cada una de estas dos componentes tiene su función específica en la marcha normal del motor.

De las dos ecuaciones anteriores es claro que al cargar el motor la corriente I_2 crece y se desfasa con respecto a E_2 un ángulo ϕ_2 que crece con el aumento del deslizamiento S .

En los motores eléctricos el par es proporcional al flujo magnetizante de la máquina y a la corriente que circula por los conductores del rotor. En el caso de los motores de inducción el par y la potencia solo pueden ser producidos por corrientes activas, es decir por la componente activa de la corriente del rotor, I_{2A} , así, en estos motores el par es proporcional a la corriente I_{2A} y al campo que actúa sobre el rotor que es el flujo magnetizante del estator o campo giratorio ϕ_g , así el par M para el motor de inducción esta dado por:

De las consideraciones anteriores se construye la primera aproximación del diagrama fasorial del motor con carga mostrado en la figura 6 en la cual se observa que $I_2 R_2 / S$ es mayor que $I_2 X_{20}$ haciendo que la corriente del rotor sea algo inductiva.

Del triángulo de voltajes del diagrama fasorial de la figura 6 se tiene:

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

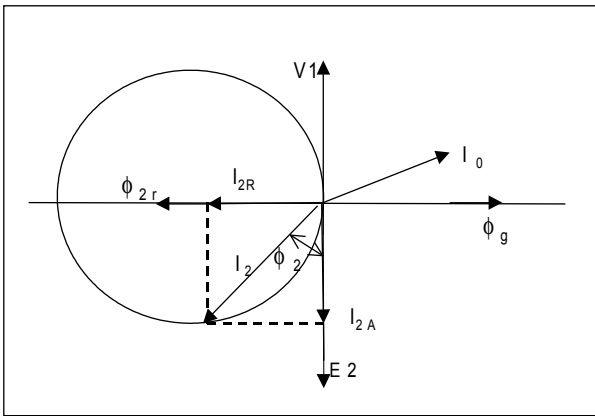


Figura 7: lugar geométrico de la corriente del rotor

Para conocer la importancia de la componente reactiva de la corriente del rotor es necesario analizar la función que esta cumple. La componente reactiva de la corriente del rotor I_{2R} circula por las N_2 espiras del rotor y produce el campo magnético ϕ_{2r} que es función del número de espiras del rotor y de la corriente que circula por ella:

$$\phi_{2r} = f(N_2, I_{2r})$$

En el diagrama fasorial de la figura 7 se observa que este campo se opone al campo giratorio y por consiguiente su efecto es producir una ligera desmagnetización del núcleo, así, el flujo neto del estator, ϕ_{Neto} , al momento de entrar la carga es:

$$\phi_{Neto} = \phi_g - \phi_{2r}$$

Para entender el efecto de esta desmagnetización se hace referencia a la figura 1; al desmagnetizar el núcleo la fuerza contraelectromotriz, E_1 , producida en el estator se disminuye debido a que esta es proporcional al flujo del núcleo y a la velocidad del campo giratorio, así:

$$E_1 = K \phi_{nucleo} n_g$$

Dado que la velocidad del campo giratorio, o velocidad sincrónica, es constante se afirma que la fuerza contraelectromotriz del estator es una función del flujo del núcleo:

$$E_1 = f(\phi_{nucleo})$$

Al disminuirse la fuerza contraelectromotriz E_1 , por la desmagnetización del núcleo al entrar la carga, la corriente del estator pasa de un valor I_0 (Corriente de vacío) a un valor mayor I_1 . Así queda claro que la función de la componente reactiva de la corriente de carga, I_{2R} , es producir el campo del rotor, ϕ_{2r} , que desmagnetiza el núcleo y hace que en el estator haya mas corriente. En conclusión, la corriente reactiva, aparentemente inútil en el motor, es la encargada de obligar al motor a pedir mas corriente a la fuente de alimentación y así obtener mas potencia de la red para mover la carga.

Un fenómeno inductivo como la desmagnetización del núcleo hace que el estator incremente su corriente y, según la ley de Lenz, el efecto de este incremento de corriente del estator debe estar en oposición con la causa que lo originó, así, al circular esta nueva corriente por las N_1 espiras del estator origina un nuevo campo magnético, denotado por ϕ_{1c} . que entrará en oposición con el que creó la corriente del rotor I_2 a fin de contrarrestar su efecto.

Se denota como I_{1c} al incremento de corriente en el estator, la cual al sumarse a la corriente de vacío, I_0 , da la corriente del estator, I_1 . Cuando el motor esta sin carga I_{1c} es cero, pero al poner carga 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:

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

En la figura 8 se presenta el diagrama fasorial de flujos magnéticos y corrientes del motor con carga. En esta figura:

I_2 es la corriente que circula por el rotor
 ϕ_{2c} es el campo generado por la corriente del rotor
 I_{1c} es la componente de carga, aparece en el estator por el efecto desmagnetizante
 ϕ_{1c} es el campo generado por la componente de carga. Por la ley de Lenz es de igual magnitud y esta en contrafase con ϕ_{2c} , contrarrestando los efectos de este mediante sus dos componentes: ϕ_{1R} que actúa sobre ϕ_{2R} y ϕ_{1A} que lo hace sobre ϕ_{2A} . De esta forma el núcleo puede volver a tener un grado

de saturación ligeramente menor que el inicial debido al flujo disperso.

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

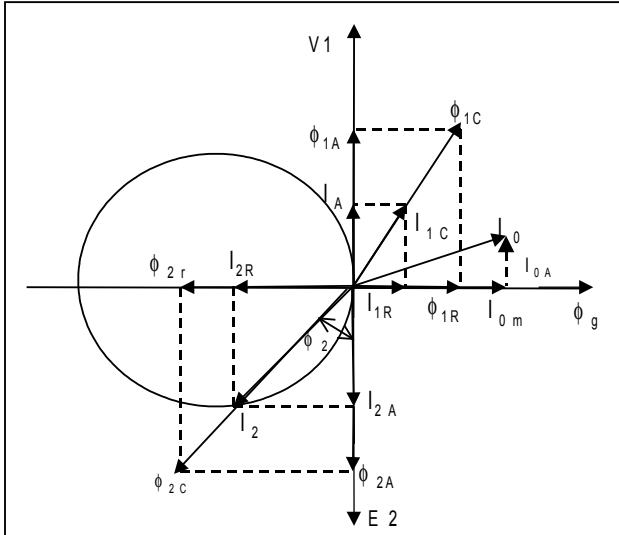


Figura 8: diagrama fasorial de flujos magnéticos y corrientes del motor con carga

Al observar el diagrama fasorial de corrientes en la figura 8 puede verse que cuando el motor tiene carga por el estator circulan dos corrientes; la corriente de vacío I_0 y la corriente debida a la carga I_1 , cada una de ellas tiene una componente activa y una componente reactiva, así en el estator se encuentran dos componentes activas y dos reactivas que son:

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 por motor cuando entra la carga

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

I_{1R} es la componente reactiva de la corriente exigida por el motor cuando entra la carga, su función es restablecer la densidad magnética del motor

También se observa en la figura 8 que la corriente que circula por el rotor 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 ϕ_{2R} que al actúa en contra del campo giratorio en calidad de solicitante de carga a la red.

En suma, las corrientes reactivas I_{0m} , I_{1R} e I_{2R} es muy importante para la máquina ya que si no existieran el motor no podría funcionar como tal, entonces es claro que el motor debe crear campos electromagnéticos para poder funcionar y estos son creados por las componentes reactivas de las corrientes que hacen que aparezcan los flujos de potencia reactiva en la red, así pues, la potencia reactiva es necesaria para que estos motores funcionen, pero es necesario buscar alternativas para evitar que estas circulen por la red de alimentación.

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

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

3.3 Construcción del diagrama fasorial completo de la máquina

3.3.1 Composición de la corriente 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 del estator. En la figura 9 se muestra la suma fasorial de estas dos corrientes. Debe recordarse que la corriente de vacío no cambia ni de magnitud ni de dirección y la componente de carga sigue fielmente a la corriente del rotor I_2 en todos sus cambios, así, cuando la corriente del rotor crece y se desfasa la componente de carga hará exactamente lo mismo.

Observe que en la figura 9.a el fasor I_{1C} , es idéntico al fasor I_A , por consiguiente para simplificar el diagrama se usará el esquema presentado en la figura 9b

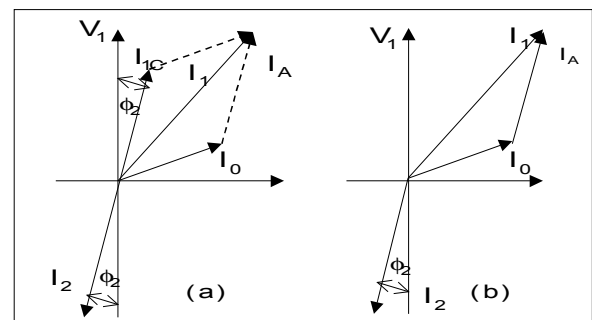


Figura 9: suma fasorial de las corrientes del estator

3.3.2 Análisis del comportamiento de la corriente del rotor con carga

Como se expresó anteriormente, al ponerle carga al motor la corriente del rotor crece y se desfasa con respecto a la fuerza contraelectromotriz E_2 un ángulo ϕ_2 dado por:

$$\phi_2 = \text{tang}^{-1} \left(\frac{S X_{20}}{R_2} \right)$$

La carga en el eje hace crecer el deslizamiento S ; si se aumenta paulatinamente la carga, la velocidad disminuirá hasta cierto valor en el que el motor se detendrá, llegando S a su máximo valor, 1. También en este momento el ángulo ϕ_2 llega a su máximo valor ϕ_{2K} dado por:

$$\phi_{2K} = \text{tang}^{-1} \left(\frac{X_{20}}{R_2} \right)$$

En la figura 10 se representa el cambio de magnitud y de ángulo de la corriente del rotor al variando la carga, en esta $I_2 < I_{21} < I_{22} < I_{23} < I_{2K}$.

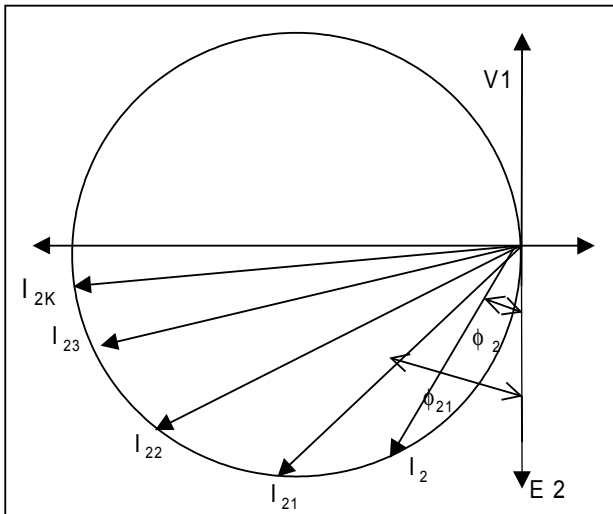


Figura 10: comportamiento de la corriente del rotor al tomar la carga

En la figura 10 la magnitud y el desfase de la corriente I_{2K} representan la corriente del motor durante el arranque. 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.

La figura 11 representa la corriente de arranque del motor con sus dos componentes: la componente activa, I_{2AK} , en fase con la fuerza electromotriz E_2 y la componente reactiva, I_{2RK} , a 90° de la fuerza

electromotriz. E_2 y en contrafase con el campo giratorio ϕ_g . En esta figura debe notarse el bajo valor de la componente activa, lo cual deja ver que los motores de jaula de ardilla son de bajo par de arranque.

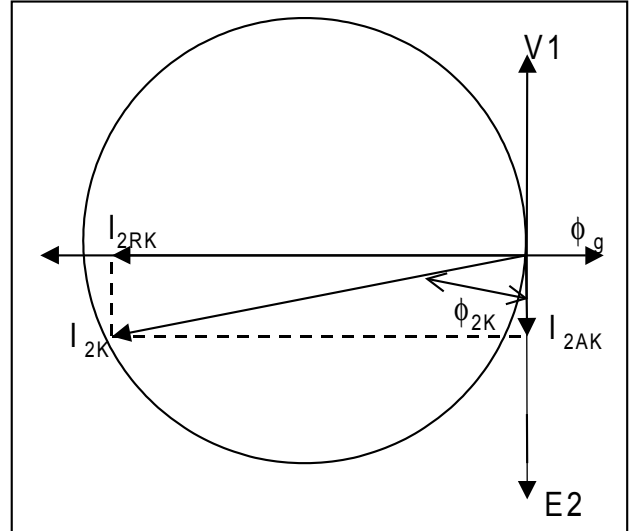


Figura 11: descomposición de la corriente de arranque del motor

Para completar el análisis de las corrientes del motor es importante notar lo que pasa con la corriente del estator en el momento del arranque. Como se explicó antes, la corriente del rotor refleja una corriente en el estator denotada en la figura 9b como I_A ; en el momento del arranque esta corriente es proporcional a la corriente del rotor I_{2K} , y al sumarla a la corriente de vacío, como se indica en la figura 9b, se obtiene la corriente de arranque en el estator a voltaje nominal.

En la figura 12 se representan todas las corrientes del motor al momento del arranque, incluyendo la suma fasorial de las corrientes en el estator. También, en esta figura se señalan algunos puntos importantes tales como:

OC es el valor de la componente reactiva de I_K . BC 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.

En el proceso de arranque la corriente del motor, I_2 , se mueve de tal forma que su punta describe una circunferencia; si la corriente I_A es un reflejo de la corriente del rotor describirá otra circunferencia. Según se representa en la figura 12, en el proceso de arranque, el punto Z del rotor se desplaza sobre la circunferencia acercándose al punto O a medida que su velocidad aumenta. Igualmente en el estator

el punto B se mueve sobre la circunferencia hacia el punto A. El punto B representa el instante del arranque cuando la velocidad es cero, el punto A es donde el motor alcanzó la velocidad de vacío.

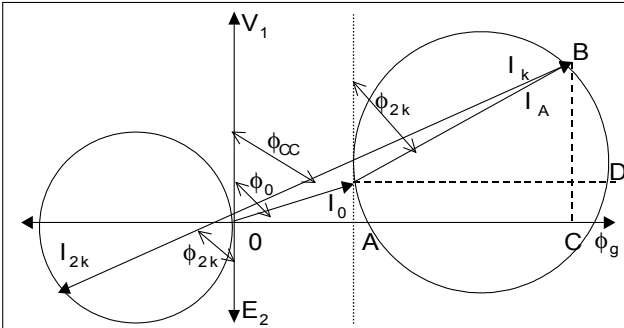


Figura 12:diagrama fasorial del motor al momento del arranque

4. CÁLCULO DE UN SISTEMA DE ARRANQUE CON CONDENSADORES

4.1 Cálculo del valor de la reactancia

Por la forma en que funciona el motor de inducción este requiere de corrientes reactivas. Estas corrientes son suministradas por la red de alimentación y produciendo caídas de voltaje muy nocivas debido a su elevado valor y su bajo valor del factor de potencia.

La figura 13 representa fasorialmente a la corriente de arranque del motor por fase y a su componente reactiva. En esta figura se tiene:

I_K es el valor de la corriente de arranque por fase

ϕ_{CC} es el ángulo de cortocircuito

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

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

Normalmente esta corriente es suministrada toda por la red de alimentación con los efectos nocivos para ella ya anotados, para evitar estos efectos puede ser suministrada por un banco de capacitores, sin embargo, no es conveniente que sea suministrada en su totalidad por estos, es preferible asignar al banco de capacitores una corriente menor para evitar que el factor de potencia de la red se vuelva capacitivo al acelerar el motor. 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 esta corriente activa I_{KA} , con esto se logra que el arranque para la red sea con menor corriente y con un mejor factor de potencia.

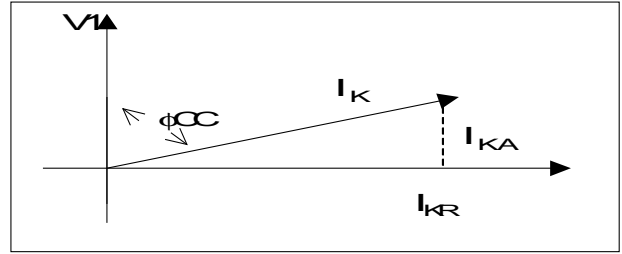


Figura 13: representación de la corriente de arranque a voltaje nominal

El cálculo del condensador por fase se lleva a cabo utilizando ecuaciones sencillas de circuitos eléctricos, tal como se indica a continuación.

Sea I_R la corriente que deben proporcionar los condensadores, V_{Fase} el voltaje de fase que se aplicará a cada uno de los condensadores y X_C el valor de la reactancia de cada condensador, entonces:

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

Y despejando se tiene:

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

En las ecuaciones anteriores si se elige un banco de condensadores en delta el voltaje de fase es igual al voltaje de línea, si se elige un banco en estrella el voltaje de fase será el de línea dividido por raíz de tres y por consiguiente con esta conexión los condensadores serán de menor voltaje, mayor corriente y mayor capacidad.

4.2 Configuración de los bancos de condensadores

En la figura 14 se presenta el esquema de la configuración de los bancos de condensadores que se deben utilizar; la figura 14 a para el caso que se use una configuración en delta y la 14b para el caso de una configuración en estrella. En esta figura L es una pequeña inductancia (De 10 a 50 μH) utilizada para suavizar la corriente de conexión de los condensadores. R es una resistencia que se usa para descargar el banco de condensadores cuando este sea retirado de la red, se debe calcular para que el voltaje de los condensadores sea del 50% a los tres minutos de haberse desconectado el banco.

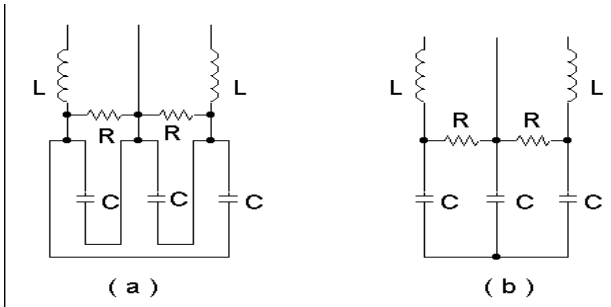


Figura 14: configuración del banco de capacitores

4.3 Operación de los condensadores

Para comprender el funcionamiento del sistema en la figura 15 se muestra esquemáticamente como debe ser conectado

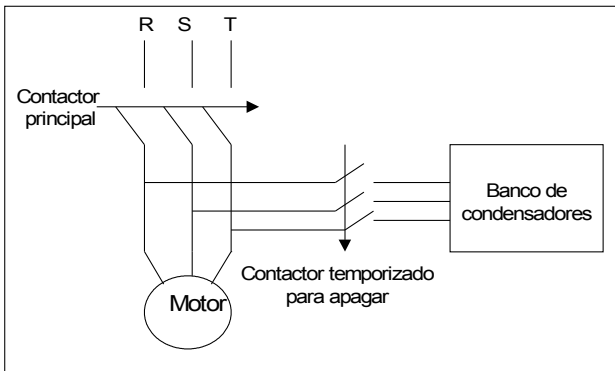


Figura 15: esquema de conexión del sistema

En la figura 16 se presenta la corriente de arranque que el motor toma de la red cuando se arranca a voltaje nominal sin condensadores, también se presenta la corriente que entregará la red cuando se coloquen los condensadores para compensar la corriente de arranque. En esta figura:

I_K es la corriente de arranque del motor a voltaje nominal y sin condensadores para compensar el arranque

I_{KA} es la corriente activa del motor a voltaje nominal y sin condensadores para compensar el arranque

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

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

I_{RR} es la corriente reactiva que suministrará la red y que, según se explicó en el ítem anterior, se tomó 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 este arranque compensado con el

banco de condensadores, según la figura puede ser calculado como:

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

ϕ_{CC} es el ángulo de arranque del motor a voltaje nominal y sin compensación con los condensadores

En la figura 16 es importante notar que:

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

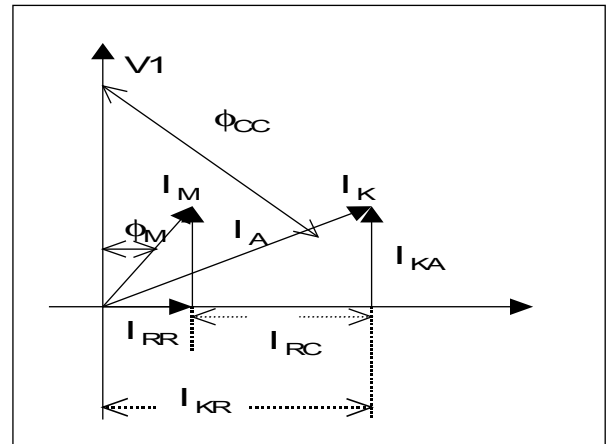


Figura 16: corriente de arranque del motor sin condensadores y con estos

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

Finalmente en la figura 17 se presenta la corriente de arranque y su evolución en el tiempo, en ella se señalan la corriente de arranque a voltaje nominal sin condensadores I_K y la corriente de arranque con condensadores I_M ; debe observarse que la corriente de arranque del motor a voltaje nominal para cualquier carga con la que el motor se arranque, lo que varía es el tiempo que demora esta corriente en reducirse pues la cantidad de carga en el eje del motor ocasiona un mayor tiempo de duración de las altas corrientes de arranque del motor en su bobinado 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 RPM. Cuando se trata de ventiladores, si este tiempo sobrepasa los 30 segundos el motor fue mal seleccionado.

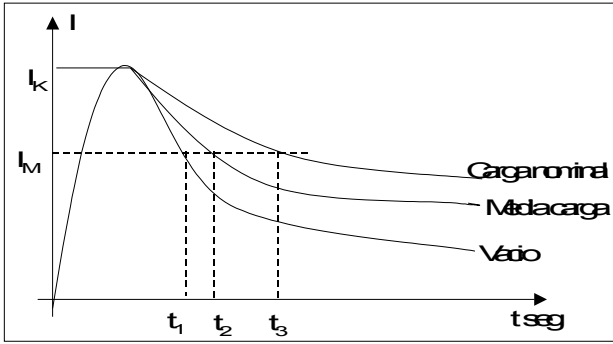


Figura 17: comportamiento en el tiempo de la corriente de arranque del motor

Finalmente, los condensadores no pueden permanecer indefinidamente conectados al sistema debido a que luego que el motor arranca y se empieza a acelerar la corriente de la línea empieza a bajar y a ser menos reactiva, por consiguiente, si los condensadores no se desconectan la línea se volverá capacitiva, lo cual no es deseable; así los condensadores deben permanecer solamente el tiempo necesario para que la corriente del motor haya alcanzado un valor I_M .

Para determinar el tiempo que debe permanecer el banco de condensadores conectado al sistema se debe tomar un registro de la corriente de arranque en la línea para las circunstancias en que el motor es arrancado normalmente y observar el tiempo que toma esta 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 15. Alternativamente, si el motor es arrancado siempre con diferentes condiciones de carga, es decir, si los tiempos normales de arranque son siempre diferentes, se puede usar un relé de sobrecorriente ajustado para la corriente I_M que controle el contactor de los condensadores; este sensor debe ser colocado entre el banco de capacitores y el motor.

5. EJEMPLO

A continuación se presenta el ejemplo del cálculo realizado para arrancar un motor con condensadores instalado en una empresa de plásticos de la ciudad de Medellín. Se trata de un motor de 50 HP, 440 V, 67 A, 1800 RPM, conectado en estrella.

En vacío, a voltaje nominal el motor toma de la red una corriente de 23 A con un factor de potencia del 24% y unas pérdidas de vacío de 4210 W. Al probarlo con rotor bloqueado, a corriente nominal,

con un voltaje de 154 V arroja unas pérdidas de cortocircuito de 8754 W.

Desarrollando las ecuaciones de la teoría de motores se llega al circuito equivalente por fase presentado en la figura 18 donde los parámetros calculados están en unidades de Ohmios.

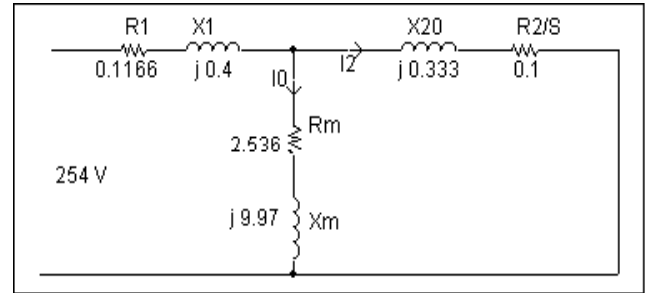


Figura 18: circuito equivalente del motor del ejemplo

Para calcular el arranque a pleno voltaje se debe simplificar el circuito sin desprestigiar la rama de vacío, obteniendo el modelo presentado en la figura 19.

El motor es alimentado por una red trifásica, con un alimentador de 30 m de longitud, calibre 1/0. De las tablas de conductores se tiene para este alimentador los siguientes valores: resistencia $0.696 \Omega / \text{Km}$ y reactancia $0.099 \Omega / \text{Km}$, así para 30 m los parámetros del alimentador serán: resistencia de 0.021Ω y reactancia 0.003Ω .

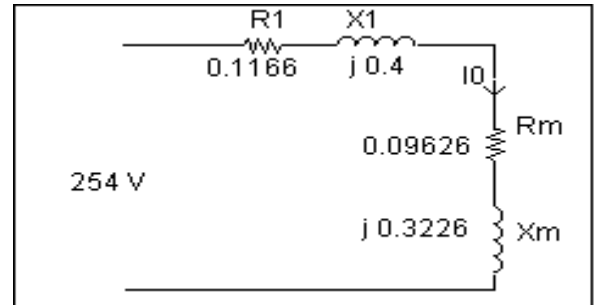


Figura 19: circuito reducido del motor del ejemplo

El motor es alimentado por un transformador trifásico de 75 KVA, 13200 / 440 V, conectado en Delta - estrella, cuyas pruebas de vacío y cortocircuito para aceptación de Empresas Públicas de Medellín fueron: corriente de vacío de 3.3 A ensayado por baja a voltaje nominal, pérdidas de vacío de 315 W. En cortocircuito a corriente nominal con μ_{cc} del 3.5% dio unas pérdidas de 1265 W. La corriente nominal es 98.5 A en baja.

La red de 13200 V de Empresas Públicas de Medellín se considera de potencia muy grande ante la del transformador, por consiguiente se desprecia la regulación de voltaje de dicha red. Para el efecto de los cálculos a realizar también se despreció la rama de vacío del transformador.

Resolviendo las ecuaciones tradicionales de la teoría de transformadores se obtienen, los siguientes valores para los parámetros del circuito equivalente del transformador por fase y referidos al lado de baja:, resistencia equivalente de 0.04346 Ω y reactancia de 0.07911 Ω.

El circuito equivalente completo, por fase, para el momento del arranque se presenta en la figura 20

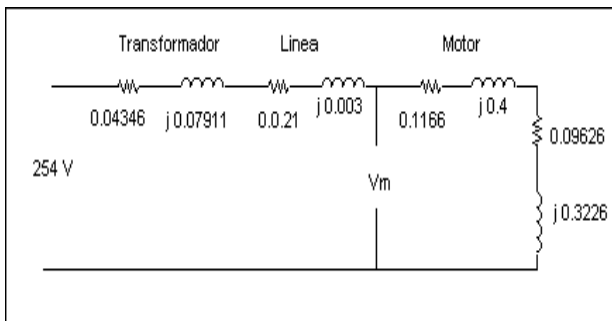


Figura 20: circuito completo por fase para el arranque del motor del ejemplo

Reduciendo la malla se obtiene: la resistencia total $R_T = 0.27732 \Omega$ y la reactancia total $X_T = j0.80471 \Omega$. De aquí se obtiene la impedancia total:

$$Z_T = 0.27732 + j 0.80471 \Omega$$

En forma polar:

$$Z = 0.85115 \angle 70.985^\circ$$

Con lo anterior, la corriente de arranque del motor será:

$$I_K = \frac{254 \angle 0}{0.85115 \angle 71} = 298.41 \angle -71$$

El voltaje sobre el motor por fase, usando la impedancia del motor Z_m será:

$$V_m = I_K Z_m$$

Donde la impedancia del motor es:

$$Z_m = (0.1166 + 0.09626) + j(0.4 + 0.3226)$$

En forma polar:

$$Z_m = 0.7533 \angle 73.586^\circ$$

Así:

$$V_m = 298.41 \angle -71^\circ * 0.7533 \angle 73.586^\circ$$

Que da como resultado el voltaje de fase en el motor:

$$V_m = 224.8 \angle 3^\circ$$

Como el motor esta conectado en estrella el voltaje de línea será de 389.4 voltios, lo que indica una regulación, al arrancar el motor sin condensadores, del 13%.

Ahora la potencia activa por fase al arrancar el motor a voltaje nominal esta dada por:

$$P_F = 254 * 298.41 * \cos 70.985 = 24.7 \text{ KW}$$

De la misma manera, la potencia reactiva por fase al arrancar el motor a voltaje nominal es:

$$Q_F = 254 * 298.41 * \sin 70.985 = 71.66 \text{ VAR}$$

Los KVA del arranque por fase serán

$$P_F = 254 * 298.41 * = 75.8 \text{ KVA}$$

Así sin condensadores, en el momento del arranque, el transformador entregará 24.7 KW/fase y 71.66 KVAR/fase. Usando el planteamiento de dejar al transformador una potencia reactiva igual al 50% de la activa al poner los condensadores, el transformador entregará por fase:

$$S = 24.7 + j12.35 \text{ KVA}$$

Esto significa que con los condensadores el transformador entregará 27.7 KVA por fase con un factor de potencia de 0.89. Además debe observarse que para 27.7 KVA por fase la corriente por el secundario del transformador es 109.21 Amperios, una corriente ligeramente mayor a la nominal del transformador.

Ahora, para esta nueva corriente en el transformador la caída de tensión en la impedancia de la línea y del transformador es de 11.4 V, lo que significa que el voltaje de alimentación que le llegará al motor por fase es de 243.7 voltios, es decir, 422.1 voltios de voltaje de línea, lo que significa una nueva regulación del 4.2%, mucho menor al 13% calculada para el arranque a voltaje nominal sin condensadores. Es así como al usar este método de arranque se mejora la regulación de la línea.

Ahora se calcularán los condensadores. Para el caso del ejemplo se eligió una configuración en delta.

La potencia reactiva que debe entregar cada condensador es:

$$71.66 - 12.35 = 59.31 \text{ KVAR}$$

Ahora: el valor de la reactancia de cada condensador es la división entre el voltaje nominal al cuadrado y la potencia reactiva del condensador, así:

$$X = \frac{V^2}{Q} = \frac{440^2}{59310} = 3.26 \text{ } \Omega$$

Teniendo el valor de la reactancia el valor del condensador se calcula fácilmente así:

$$C = \frac{1}{2 \pi f X} = \frac{1}{377 * 3.26} = 813.6 \mu f$$

Es decir que se requieren 3 condensadores de 813.6 microfaradios a 440 V. Este banco de condensadores se puede construir con condensadores comerciales en paralelo a un costo muy bajo sí se compara con los tipos de arrancadores usados en estos motores, con la ventaja de poder arrancar el motor a pleno voltaje lo que tiene la ventaja que así el motor puede desarrollar rápidamente el par requerido por la carga.

6. CONCLUSIONES

El análisis teórico sobre las componentes reactivas de la corriente del motor permiten comprender su comportamiento desde el momento que arranca hasta llegar a desarrollar su velocidad nominal en vacío. También es claro el aumento de la potencia reactiva al incrementar la carga en el eje del motor. Y se puede observar que el factor de potencia crece inicialmente con el aumento de carga y después de cierto valor inicia nuevamente su descenso si la carga sigue aumentando.

El planteamiento de este sistema de arranque, usando un banco de condensadores en forma transitoria, minimiza las fluctuaciones de voltaje que se producen en las redes eléctricas cuando se ponen en marcha motores de inducción de potencias elevadas a un costo muy bajo, además

de la facilidad y rapidez con que se puede implementar.

Como es sabido, los motores de inducción cuando se operan a potencias muy debajo de la nominal trabajan con factor de potencia bajo; cuando sea necesario trabajar algún motor en estas condiciones se puede arrancar el motor con los condensadores y luego dejar algunos de estos conectados para mejorar localmente el factor de potencia del motor.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1.] F Puchstein - T. C. Lloyd - A. G. Conrad. Alternating Current Machines. John Witig and Sons. New york, 1964
- [2.] LIWSCHITZ Garic. Electrical Machinery, Van Nostrand, Princeton. 1957.
- [3.] M. Dudley. Conecting Induction Motors. Mc Graw hill. New York 1936
- [4.] HANS. Teuchert. Fuerza Motriz y Tracción Eléctrica. Editorial Labor. 1961.
- [5.] A. VON Konigslow. Máquina de Corriente Alterna Asincrónica. Editorial Labor 1954

AUTORES



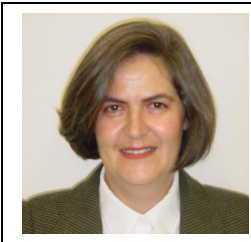
Miguel Osorio Pardo.

Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de Colombia, bogotá 1969. Profesor asociado de la Universidad Nacional de colombia, Medellín, 1971 – 1997. Director de proyectos

de desarrollo e investigación en el área de máquinas eléctricas y transformadores. Profesor de cátedra en el área de transformadores y máquinas eléctricas Universidad de Antioquia, 1974 – 1994, 1998 – 2002. Profesor investigador Instituto Tecnológico Pascual Bravo, Medellín, desde 1999.

MOPARDO@GEO.NET.CO

Tel. 234 21 37. Medellín.



Gloria Edilma Bernal T.

Ingeniera Electricista de la Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 1994.

Profesora Catedrática Universidad de Antioquia en el área de Máquinas Eléctricas y Laboratorios, 1998 – 2002. Profesora

Investigadora Instituto Tecnológico Pascual Bravo, Medellín, desde 1998. Diplomado en metodología de la Investigación, Instituto Tecnológico Pascual Bravo, 2001. GLEDBETO@GEO.NET.CO

Tel 217 – 35 – 57. Medellín.