

1725

U N I C O

F A C U L T A D D E I N G E N I E R I A

Cambio de Frecuencia en Equipo Industrial

T E S I S

Que para obtener el título de:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

p r e s e n t a n :

MARCO TULIO CARREON VAZQUEZ

CARLOS ENRIQUE CULEBRO SANCHEZ

ANDRES DOMINGUEZ MACIAS

JAVIER HERNANDEZ VEGA

MARTIN PLATA CRUZ





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



CAMBIO DE FRECUENCIA EN EQUIPO INDUSTRIAL

MARCO TULIO CARREON VAZQUEZ
CARLOS ENRIQUE CULEBRO SANCHEZ
ANDRES DOMINGUEZ MACIAS
JAVIER HERNANDEZ VEGA
MARTIN PLATA CRUZ

MEXICO, D. F.

1971

I N D I C E

	pág.
INTRODUCCION	1
CAPITULO I	
EFECTOS ELECTRICOS PRODUCIDOS POR EL CAMBIO DE FRECUENCIA	5
CAPITULO II	
TRANSFORMADORES	19
CAPITULO III	
MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA	43
CAPITULO IV	
EQUIPO ELECTRICO DE CONTROL Y PROTECCION	77
CAPITULO V	
INSTRUMENTOS Y MEDIDORES	107

I N T R O D U C C I O N

El hecho de que actualmente se tengan en México dos frecuencias diferentes en la alimentación de energía eléctrica, tuvo su origen en la acción inicial de las compañías mineras que operaban en el pasado. En un principio, se estableció en la zona central del país una compañía que instaló unidades generadoras con equipo europeo operando a 50 ciclos por segundo, y en el resto del país se instalaron compañías mineras que utilizaron equipos operando a 60 ciclos por segundo, fabricados en los Estados Unidos.

Inicialmente dichas compañías electrificaron sus campamentos y más tarde las poblaciones más cercanas: posteriormente se formaron las empresas de suministro de energía para servicio público, las cuales continuaron instalando equipo generador para las frecuencias diferentes e imperantes en las zonas que servían.

Esta situación continuó y se incrementó en el transcurso de los años, y así, en la actualidad tenemos que el Sistema Central, en el cual se encuentra el D. F., tiene una frecuencia de 50 ciclos por segundo, mientras que el resto de los sistemas eléctricos del país tienen una frecuencia de 60 ciclos por segundo.

Al realizarse el cambio de frecuencia de 50 a 60 ciclos en el Sistema Central, se podrá lograr su interconexión con el resto de los sistemas, con todas las ventajas, y beneficios que esto proporciona.

Otras de las ventajas que se tienen con este cambio de frecuencia, son:

- a) Eliminar la doble línea de producción: una para 50 ciclos, y otra para 60 ciclos, en algunas empresas manufactureras de equipo eléctrico, lo que se reflejará necesariamente en la reducción de los costos de producción.
- b) Eliminar inconvenientes al consumidor en caso de traslado de un área a otra.
- c) Reducción de precios en ciertos equipos y aparatos tales como generadores, motores, bombas, transformadores, etc., por ser más baratos los diseñados y construidos para 60 ciclos que los de 50 ciclos.

El realizar el cambio de frecuencia tiene, desde luego, consecuencias sobre los aparatos eléctricos que actualmente trabajan a 50 ci-

culos. Algunos de ellos requerirán modificaciones para adaptarlos a la nueva frecuencia de 60 ciclos, y habrá otros que no necesitarán dichas modificaciones, puesto que su funcionamiento no se alterará de una manera crítica. Inclusive habrá algunos que funcionen mejor con el aumento de frecuencia.

El aumento de frecuencia de 50 a 60 ciclos tiene como uno de sus efectos más importantes, el producir un aumento de velocidad de 20% en los motores eléctricos, que es la máquina eléctrica de más utilización. Este aumento de velocidad puede provocar trastornos en las máquinas impulsadas. Eléctricamente algunas veces es posible modificar el motor para que conserve su velocidad original, como se verá en el capítulo correspondiente, pero la modificación más económica y más sencilla será en muchos casos de índole mecánica, por medio de una modificación en la relación de transmisión del motor a la máquina impulsada, o bien modificar ésta directamente, por ejemplo, recortar el impulsor de una bomba centrífuga, en caso de estar el motor directamente acoplado a la máquina impulsada.

En el presente trabajo se estudiará la forma en que el cambio de frecuencia afecta a los diversos aparatos y dispositivos eléctricos que actualmente trabajan a 50 ciclos, principalmente los que se encuentran en la industria, con el propósito de obtener conclusiones prácticas y señalar las modificaciones posibles que se les pueda hacer, en caso de necesitarse.

Las soluciones mecánicas mencionadas anteriormente, no serán analizadas por no concernir al trabajo, ya que la finalidad del mismo es estudiar los problemas eléctricos que produce el cambio de frecuencia, y no las soluciones mecánicas para subsanar dichos problemas. Sin embargo, dichas soluciones mecánicas serán mencionadas en todos los casos en que sean posibles, pero sin profundizar en ellas.

C A P I T U L O I

EFFECTOS ELECTRICOS PRODUCIDOS POR EL CAMBIO DE FRECUENCIA

Como primer paso para estudiar los efectos que el cambio de frecuencia de 50 a 60 ciclos por segundo produce sobre las diversas máquinas y dispositivos eléctricos, y poder analizar las posibles modificaciones que sea necesario efectuar en dichos componentes, es preciso -- hacer el estudio de los principales efectos eléctricos que dicho cambio de frecuencia produce. Esto es lo que se hará en el presente capítulo.

CAMBIO DE FRECUENCIA EN UN SISTEMA DE CORRIENTE ALTERNA

El aumento de frecuencia en un sistema de corriente alterna, de 50 a 60 ciclos por segundo, (aumento de 20%) significa que se tendrán - 10 alternancias por segundo más, en la corriente y el voltaje.

Una de las consecuencias de este hecho será que los motores - tendrán un aumento de velocidad de 20%, como se verá en el capítulo correspondiente.

La energía suministrada en 60 c. p. s., a un circuito que trabajaba con 50 ciclos, será la misma que dicho circuito recibía originalmente, si se conservan iguales los valores de voltaje y corriente efectivas y de factor de potencia, a pesar de que la nueva energía por ciclo suministrada será solo $\frac{50}{60}$, o sea 83.3%, de la energía por ciclo que recibía originalmente. Eso se debe a que la disminución por ciclo que se tiene es compensada por el aumento de 10 ciclos por segundo en la nueva frecuencia de 60 ciclos.

El aumento del 20% que se tiene en la frecuencia fundamental, al efectuar el cambio de 50 a 60 ciclos, va acompañado por un aumento de 20% en todas las frecuencias armónicas.

EFFECTO DEL CAMBIO DE FRECUENCIA SOBRE LA RESISTENCIA OHMICA.

Se sabe que como consecuencia del efecto superficial, la densidad de corriente en un conductor que transporta una corriente alterna no es uniforme en toda la sección del mismo, sino es mayor cerca de la periferia. Como consecuencia, la sección efectiva del conductor se reduce, y su resistencia aumenta, de modo que un conductor por el que circula una corriente alterna, no tendrá la misma resistencia que tendría si circulara por él una corriente continua.

La resistencia del conductor, tomando en cuenta el efecto superficial, se conoce como resistencia efectiva. El efecto superficial se hace más patente cuanto mayor sea la frecuencia de la corriente alterna que circule por el conductor, lo que significa que la resistencia efectiva

de un conductor aumenta con la frecuencia.

Eso quiere decir que un conductor por el que circule una corriente de 60 ciclos tendrá una resistencia efectiva mayor que la que tenía en 50 ciclos. Sin embargo, es muy poco el aumento de 50 a 60 ciclos y no tiene un efecto apreciable sobre la resistencia efectiva, por lo que, para fines prácticos, el aumento en la resistencia efectiva se considera despreciable.

Por consiguiente, se considera que la resistencia de un conductor en 60 ciclos, no varía con respecto a la que tenía en 50 ciclos.

EFFECTO DEL CAMBIO DE FRECUENCIA SOBRE LA INDUCCION MAGNETICA

La variación del flujo magnético en cualquier embobinado o núcleo magnético, es aumentada proporcionalmente con un aumento en la frecuencia. Si el voltaje aplicado se mantiene constante, la densidad de flujo en el núcleo se reduce, de modo que la fuerza electromotriz autoinducida se mantenga igual.

La reducción de la densidad de flujo con el aumento de la frecuencia en un embobinado y núcleo de hierro, se observa por medio de la fórmula:

$$B = \frac{V}{4.44 f AN} \times 10^8$$

que se deriva de la ecuación:

$$V = 4.44 Nf BA \times 10^8$$

aplicable a cualquier devanado con núcleo ferromagnético al que se le su

ministra una onda de voltaje senoidal.

En estas ecuaciones:

B = densidad de flujo máxima en Gauss (varía senoidalmente)

V = voltaje en volts

f = frecuencia en ciclos por segundo

A = área de la Sección del núcleo en cm^2

N = número efectivo de vueltas del devanado

Para una variación senoidal del flujo, y un núcleo y devanado determinado, los valores 4.44, A y N , son constantes, de modo que la ecuación puede escribirse:

$$B = K \frac{V}{f}$$

y se observa que B es directamente proporcional al voltaje aplicado e inversamente proporcional a la frecuencia.

Para una frecuencia de 50 c. p. s., B vale:

$$B_{50} = K \frac{V}{50}$$

y para una frecuencia de 60 c. p. s.:

$$B_{60} = K \frac{V}{60}$$

La relación entre ambos valores es:

$$\frac{B_{60}}{B_{50}} = \frac{K \frac{V}{60}}{K \frac{V}{50}} = \frac{50}{60} = 0.833 = 83.3\%$$

si se mantiene constante el voltaje.

Es decir, que la densidad de flujo en un embobinado y núcleo dado, tiene una disminución de 16.7% en la frecuencia de 60 ciclos, respecto a la densidad que tenía en 50 ciclos.

EFFECTO DEL CAMBIO DE FRECUENCIA SOBRE LA REACTANCIA INDUCTIVA.

Partiendo de la ecuación fundamental de la reactancia inductiva:

$$X_L = 2 \pi f L$$

en la que:

X_L = reactancia inductiva en ohms

L = inductancia en henries

f = frecuencia en ciclos por segundo

vemos que la reactancia inductiva es directamente proporcional a la frecuencia, por lo que si ésta es aumentada 20%, aquella también aumentará 20%, como se verá a continuación:

para una frecuencia de 50 ciclos, la reactancia inductiva vale:

$$X_{L_{50}} = 2 \pi \times 50 \times L$$

y para una frecuencia de 60 ciclos vale:

$$X_{L_{60}} = 2 \pi \times 60 \times L$$

de modo que:

$$\frac{X_{L_{60}}}{X_{L_{50}}} = \frac{2\pi \times 60 \times L}{2\pi \times 50 \times L} = \frac{60}{50} = 1.2 = 120 \%$$

o sea que X_L sufre un aumento de 20% cuando se aumenta la frecuencia de 50 a 60 ciclos, suponiendo que L se mantenga constante. Sin embargo, la inductancia sufre variación con motivo de la reducción en la densidad de flujo, por el aumento en la frecuencia. Pero debido a que los solenoides, motores y transformadores se diseñan normalmente para operar cerca o debajo de la "rodilla" de la curva de saturación, la disminución de la densidad de flujo tiene como resultado un pequeño cambio en la

permeabilidad que produce solo una variación muy reducida de la inductancia, por lo que se puede considerar que la reactancia inductiva aumenta 20%, al aumentar la frecuencia de 50 a 60 ciclos.

EFFECTO DEL CAMBIO DE FRECUENCIA SOBRE LA REACTANCIA CAPACITIVA

Partiendo de la ecuación fundamental de la reactancia capacitiva:

va:

$$X_c = \frac{1}{2 \pi f C}$$

en donde:

X_c = reactancia capacitiva en ohms

C = capacitancia en farads

f = frecuencia en ciclos por segundo

vemos que la reactancia capacitiva es inversamente proporcional a la frecuencia.

Si tenemos una frecuencia de 50 ciclos, la reactancia capacitiva valdrá:

$$X_{c\ 50} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times C}$$

y con una frecuencia de 60 ciclos, valdrá:

$$X_{c\ 60} = \frac{1}{2\pi \times 60 \times C}$$

la relación entre ambas será:

$$\frac{X_{c\ 60}}{X_{c\ 50}} = \frac{\frac{1}{2\pi \times 60 \times C}}{\frac{1}{2\pi \times 50 \times C}} = \frac{50}{60} = 0.833 = 83.3\%$$

lo que significa que la reactancia capacitiva disminuye 16.7% cuando se aumenta la frecuencia de 50 a 60 ciclos.

EFEECTO DEL CAMBIO DE FRECUENCIA SOBRE LA IMPEDANCIA

Analicemos la ecuación de la impedancia:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

en donde:

Z = impedancia en ohms

R = resistencia en ohms

X_L = reactancia inductiva en ohms

X_C = reactancia capacitiva en ohms

Como X_L y X_C varían con la frecuencia, según se vió, la impedancia también variará, y la proporción en que lo haga, así como si será aumento o disminución de la misma, depende de las propiedades predominantes del circuito, es decir, dependerá del predominio de la inductancia o de la capacitancia en dicho circuito.

La tabla 1-1 muestra un resumen de los efectos que la frecuencia produce sobre la reactancia inductiva, la reactancia capacitiva, y la resistencia óhmica, de acuerdo con los resultados del estudio anterior.

T A B L A 1-1

Elemento	efecto del cambio de 50 a 60 ciclos en la magnitud en la resistencia o reactancia	
R	permanece igual	permanece igual
L	permanece igual	aumenta 20%
C	permanece igual	disminuye 16.7%

EFFECTO DEL CAMBIO DE FRECUENCIA SOBRE LA CORRIENTE DE -- EXCITACION

La corriente de excitación se tiene en cualquier aparato electromagnético cuando está trabajando sin carga (un transformador trabajando en vacío, o un motor girando sin carga).

Esta corriente de excitación tiene 2 componentes en cuadratura, la componente de pérdidas en el núcleo, y la componente magnetizante, y se representa con la fórmula:

$$I_e = \sqrt{I_c^2 + I_m^2}$$

en donde:

I_e = corriente de excitación

I_c = componente de pérdidas en el núcleo

I_m = componente magnetizante

La componente I_c , de pérdidas en el núcleo, se encuentra en fase con el voltaje y representa la pérdida en watts W_c , que se tiene en el hierro, debido a las corrientes de Eddy y a la histéresis.

Si la densidad de flujo permanece constante, la pérdida en watts W_c , por ciclo, también permanece constante. En este caso, al aumentar la frecuencia a 60 ciclos, las pérdidas en el núcleo aumentarían 20% respecto a las que se tenían en 50 ciclos. Sin embargo, ya se ha visto que la densidad de flujo para un determinado núcleo y devanado, disminuye - 16.7% al aumentar la frecuencia a 60 ciclos. Como resultado de la operación a esta nueva densidad de flujo reducida las pérdidas W_c disminuirán también, dando por resultado una reducción en la corriente I_c .

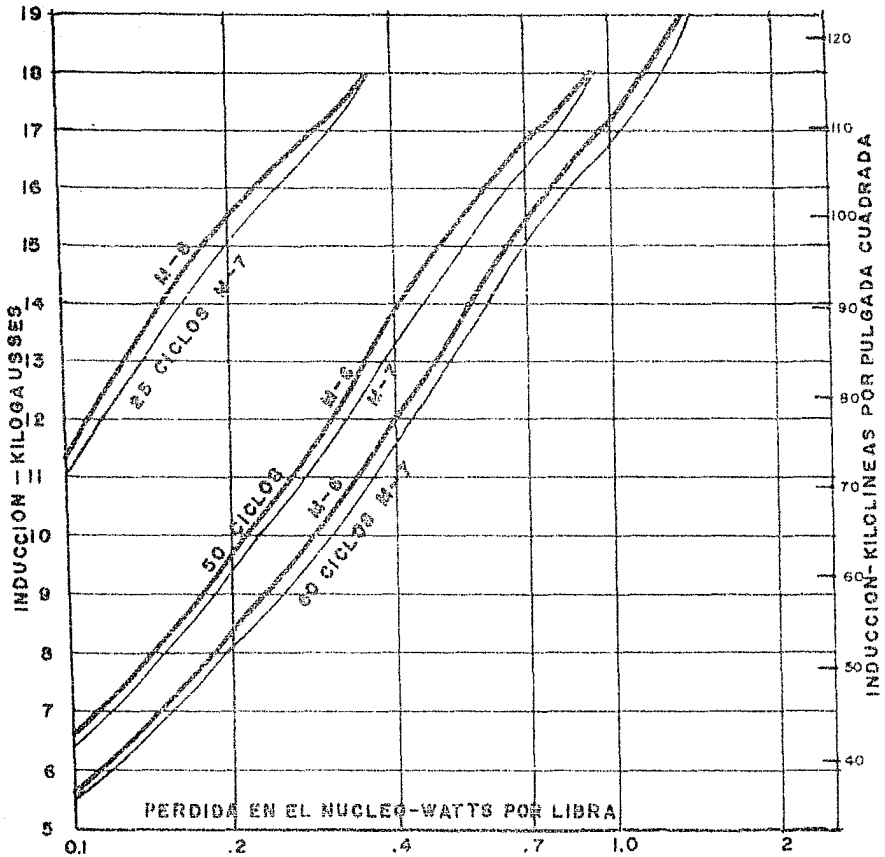
La proporción en que ocurre esta reducción, depende de la densidad de flujo original que se tenía a 50 ciclos, y del tipo de acero usado. Se tienen gráficas para distintos aceros, llamadas curvas de pérdidas en el núcleo, que proporcionan la pérdida en watts por libra en el núcleo, para diferentes valores de densidad de flujo y según sea la frecuencia en que trabajen. El cálculo de las pérdidas en el núcleo se realiza fácilmente por medio de estas curvas. Un ejemplo ilustrará su uso y nos permitirá determinar la variación de las pérdidas con el cambio de frecuencia.

La figura 1-1 de la siguiente hoja, muestra las curvas de pérdidas en el núcleo para el acero ARMCO orientado, tipos M-6 y M-7, para las frecuencias de 25, 50 y 60 ciclos.

Se tomará como ejemplo el acero M-6. Si se tiene una densidad de flujo de 14 kilogauss en 50 ciclos, a 60 ciclos esta densidad de flujo disminuirá al 83.3%, o sea tendrá un nuevo valor de 11.7 kilogauss. En la gráfica vemos que en 50 ciclos, y con la densidad de flujo de 14 kilogauss, las pérdidas en el núcleo son de 0.42 watts/libra. En 60 ciclos, y por consiguiente con la nueva densidad de flujo de 11.7 kilogauss, las pérdidas son ahora de 0.385 watts/libra. Se tiene entonces una reducción en las pérdidas, de aproximadamente 8.5%, con el cambio de frecuencia de 50 a 60 ciclos.

Como la pérdida en watts W_c , varía con el cuadrado de la corriente de pérdidas en el núcleo I_c , la disminución de esta corriente será de aproximadamente 4.5%.

CURVAS DE PERDIDAS EN EL NUCLEO



PERDIDA EN EL NUCLEO DE ACERO ARMCO ORIENTADO, A INDUCCIONES ALTAS M-6 y M-7, 0.014" DE GRUESO.

FIGURA 1-1

La componente magnetizante I_m se encuentra 90° atrasada respecto al voltaje, y el valor requerido de la misma para producir en el hierro la densidad de flujo necesitada, disminuye en un grado mayor que el de la componente I_c con el aumento de frecuencia, como se verá a continuación.

Por medio de las curvas de saturación se encuentra el valor en volt-amperes efectivos de excitación, por libra de acero, requeridos para producir determinada densidad de flujo, según la frecuencia en que se trabaje, y el tipo de acero de que se trate. La figura 1-2 de la página siguiente muestra la gráfica para acero ARMCO orientado M-6 y M-7, para 50 y 60 ciclos.

Calculemos los volt-amperes efectivos de excitación que se requieren para producir en el acero M-6 la densidad de flujo mencionada anteriormente para la corriente I_c .

En la gráfica vemos que la densidad de flujo de 14 kilogauss -- que se tiene en 50 ciclos corresponde a 0.52 volt-amperes efectivos de excitación por libra. La densidad de flujo disminuye en 60 ciclos a 11.7 kilogauss, para la cual corresponden 0.44 volt.-amperes efectivos de excitación por libra. Estos disminuyen de 0.52 a 0.44 como resultado del aumento de frecuencia de 50 a 60 ciclos. Es decir, se tiene una disminución de aproximadamente 15%.

Como la componente magnetizante varía directamente con los volt-amperes efectivos de excitación por libra, la disminución de éstos será la disminución de la corriente magnetizante, o sea que I_m disminu-

VOLT-AMPERES EFECTIVOS DE EXCITACION POR LIBRA DE ACERO

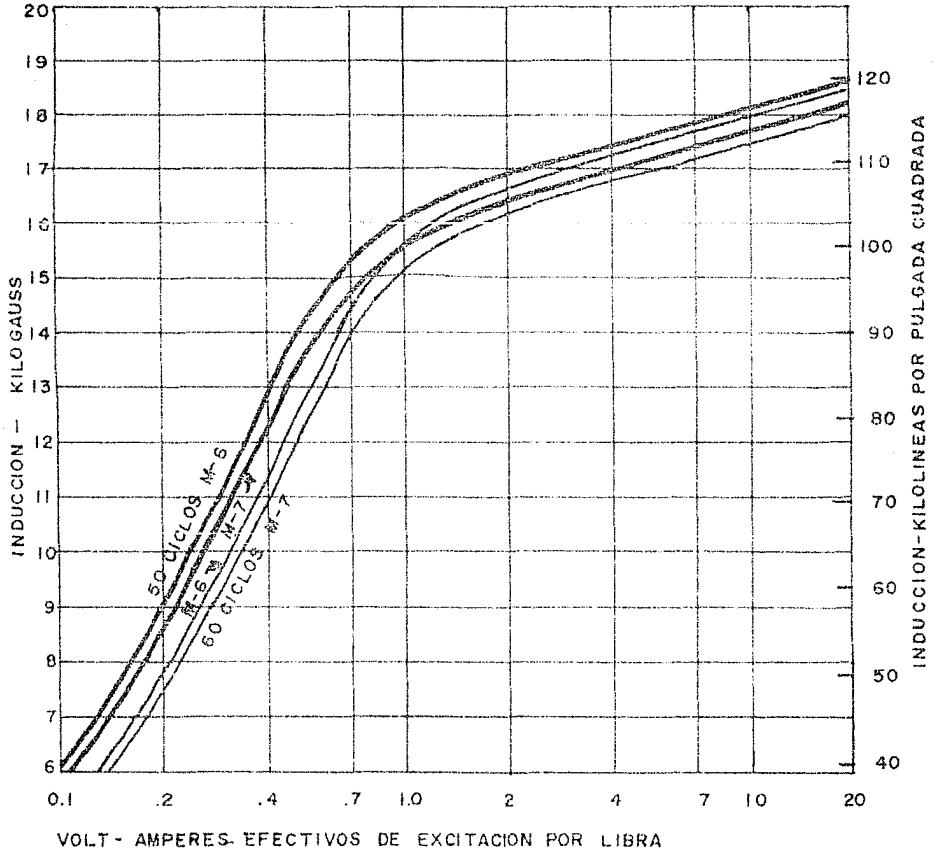


FIG. 1 - 2

ye aproximadamente 15% con el cambio de frecuencia y siempre que el voltaje aplicado se mantenga constante.

La componente magnetizante I_m de la corriente de excitación, es mucho mayor que la componente de pérdidas en el núcleo I_c , por lo que puede considerarse que el valor de la disminución de la corriente de excitación I_e , será casi igual al valor de la disminución de la componente magnetizante I_m , es decir aproximadamente 15%.

El hecho de que disminuya la corriente de excitación presenta grandes ventajas que serán analizadas en los capítulos siguientes.

CAMBIO EN EL VOLTAJE APLICADO

En el estudio anterior se ha dicho que el voltaje aplicado se mantiene constante, y solo se ha realizado un cambio en la frecuencia. Pero se ha dejado señalado que un cambio en el voltaje aplicado a un aparato inductivo, da por resultado un cambio equivalente en la fuerza electromotriz autoinducida, así como en la inducción magnética y en la corriente de excitación.

Se puede observar por ejemplo en la ecuación:

$$B = K \frac{V}{f}$$

que un aumento en el voltaje dará por resultado un aumento proporcional en la densidad de flujo. Esto significa que es posible restablecer en 60 ciclos la densidad de flujo que se tenía en 50 ciclos, aumentando el voltaje aplicado 16.7%. Este hecho es aplicable por ejemplo en el caso de relevadores electromagnéticos, como medio para restablecer su fuerza de atracción magnética que se verá disminuida por el cambio de fre-

cuencia de 50 a 60 ciclos, como se estudiará más adelante.

En los capítulos siguientes serán estudiados otros efectos derivados del cambio de voltaje y se verá la posibilidad de compensar los efectos negativos que pueda producir el cambio de frecuencia sobre las diversas máquinas y dispositivos eléctricos, por medio de un cambio en el voltaje aplicado.

C A P I T U L O II

T R A N S F O R M A D O R E S

El transformador es la máquina eléctrica de mayor rendimiento, ya que debido a la ausencia de piezas giratorias sus pérdidas son mínimas. Esto lo hace un elemento sumamente valioso en la transmisión y distribución de energía eléctrica, teniendo además un gran número de aplicaciones, tanto en la industria como en otros campos.

El cambio de frecuencia afecta a todos los transformadores, y es preciso analizar los efectos producidos sobre ellos para determinar si son lo suficientemente adversos como para requerirse una conversión.

CLASIFICACION DE LOS TRANSFORMADORES

Por su uso, se clasifican en:

I. - Transformadores de Potencia y Distribución

Usados en subestaciones elevadoras o reductoras de voltaje, y en la red de distribución urbana a fin de proporcionar energía eléctrica a

tensiones usuales en servicios industriales y residenciales.

2. - Transformadores de Voltaje Constante.

También conocidos como reguladores de voltaje, mantienen el voltaje constante en la fuente de alimentación. Se usan en receptores de televisión, proyectores de cine, instalaciones de microondas, circuitos de medición, etc.

3. - Transformadores de Corriente Constante

Proporcionan una corriente de salida constante, aunque la carga sea variable. Se utilizan generalmente en circuitos de alumbrado tipo serie.

4. - Transformadores de potencial y corriente, para corriente alterna

Se utilizan en los instrumentos de medición y protección por lo que también se les conoce como Transformadores de Instrumento.

5. - Transformadores de Potencial y corriente, para Corriente Directa.

Usados para medición de corriente o voltaje directos muy elevados. Proporcionan una señal de salida de corriente alterna proporcional a la corriente o voltaje directos de entrada.

EFFECTO DEL CAMBIO DE FRECUENCIA SOBRE EL TRANSFORMADOR

Analicemos el transformador elemental, o sea aquel cuyas partes fundamentales son:

- a) el núcleo magnético
- b) los embobinados primario y secundario

según se muestra en la siguiente figura:

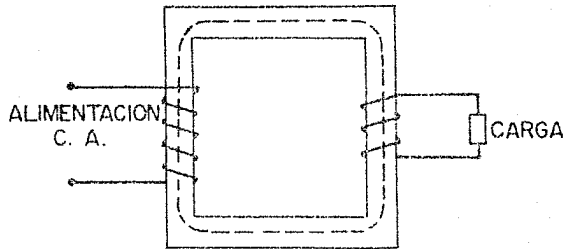


Fig. 2-1

Si en la alimentación se emplea un voltaje senoidal, o sea:

$$v_p = v_{\max} \text{ Sen } \omega t$$

obtendremos consecuentemente un flujo senoidal:

$$\phi = \phi_{\max} \text{ Sen } \omega t$$

Sabemos que:

$$v_p = N_p \frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8}$$

en donde:

ϕ = flujo instantáneo

v_p = valor instantáneo del voltaje

N_p = número de vueltas del devanado primario

Si consideramos que la resistencia en el devanado primario es despreciable, podemos considerar que la fuerza contra-electromotriz instantánea e_p es igual al voltaje instantáneo v_p , o sea:

$$v_p = e_p$$

$$e_p = - N_p \frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8}$$

$$e_p = - N_p \frac{d}{dt} (\phi \max \sin \omega t) \times 10^{-8}$$

$$e_p = - N_p \phi \max \cos \omega t \times \omega \times 10^{-8}$$

como $\omega = 2\pi f$:

$$e_p = - N_p \phi \max \cos 2\pi f t \times 2\pi f \times 10^{-8}$$

considerando el valor máximo de e_p , o sea cuando:

$$\cos 2\pi f t = -1$$

$$e_p = N_p 2\pi f \phi \max \times 10^{-8}$$

para obtener el valor medio cuadrático E_p , o sea el voltaje efectivo inducido, dividiremos la ecuación anterior entre $\sqrt{2}$, y:

$$E_p = N_p \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \phi \max \times 10^{-8}$$

$$\therefore E_p = 4.44 N_p f \phi \max \times 10^{-8} \text{ --- (1)}$$

que es la ecuación general del transformador. Haciendo el mismo razonamiento para el devanado secundario, obtendremos:

$$E_s = 4.44 N_s f \phi \max \times 10^{-8} \text{ --- (2)}$$

En las ecuaciones (1) y (2):

E_p = fuerza electromotriz inducida en el primario en volts.

E_s = fuerza electromotriz inducida en el secundario en volts.

N_p = número de vueltas en el devanado primario

N_s = número de vueltas en el devanado secundario

f = frecuencia en ciclos por segundo

$\phi \max$ = flujo máximo en maxwells.

Se analizarán ahora los efectos que el cambio de frecuencia produce sobre el transformador, con el fin de obtener conclusiones prácticas -

cas para cada tipo de transformador.

1. - Densidad de Flujo.

Aplicando la ecuación (1) en 50 y 60 ciclos, de modo que E_p y N_p sean constantes en ambas frecuencias:

$$E_p = 4.44 N_p (50) (\phi \max)_{50} \times 10^{-8} \quad \text{--- (3)}$$

$$E_p = 4.44 N_p (60) (\phi \max)_{60} \times 10^{-8} \quad \text{--- (4)}$$

Igualando (3) y (4):

$$50 (\phi \max)_{50} = 60 (\phi \max)_{60}$$

$$(\phi \max)_{60} = \frac{50}{60} (\phi \max)_{50}$$

$$(\phi \max)_{60} = 0.833 (\phi \max)_{50}$$

lo cual quiere decir que en 60 ciclos, el flujo magnético mutuo disminuirá hasta un 83.3% del valor original de 50 ciclos.

La densidad de flujo B_{max} será:

$$B_{max} = \frac{\phi \max}{A}$$

en donde: $A =$ área de la sección transversal del núcleo en cm^2

Como A también es constante, la densidad de flujo en 60 ciclos disminuirá también a un 83.3% del valor original de 50 ciclos.

2. - Pérdidas Sin Carga.

Son las que se tienen cuando el transformador está trabajando en vacío. En estas condiciones, se tienen pérdidas en el núcleo debidas a la histéresis y a las corrientes de Eddy, y pérdidas en el cobre debidas a la corriente de excitación.

La forma en que estas pérdidas varían con el cambio de frecuencia puede observarse por medio de las curvas de las figuras 1-1 y 1-2 -

vistas en el capítulo anterior.

La figura 1-2 muestra las curvas de saturación a 50 y 60 ciclos de los aceros ARMCO orientado M-6 y M-7, los cuales son comúnmente empleados en la construcción de núcleos de transformadores de potencia y distribución. La corriente de excitación puede ser determinada por medio de los volt-amperes de excitación, ya que tanto éstos como la inducción electromagnética están referidos al voltaje aplicado.

Al operar en la frecuencia de 60 ciclos, habrá una disminución en la inducción electromagnética, y como el voltaje se mantendrá constante, se tendrá como consecuencia una disminución en la corriente de excitación. Esta disminución varía dentro de un amplio margen, dependiendo de la parte de la curva de saturación en que esté trabajando el transformador. Normalmente, los transformadores de potencia y distribución se diseñan con los aceros antes mencionados, para trabajar entre 15 y 16 kilogauss de capacidad, o en la "rodilla" de la curva de saturación.

Consideremos el caso concreto de un transformador con acero M-6, diseñado para una densidad de flujo de 15.5 kilogauss de capacidad en 50 ciclos. (ver fig. 1-2). Observamos en la gráfica que para este valor el transformador tendrá 0.8 volt-amperes de excitación por libra (valor efectivo). Posteriormente este transformador es conectado a una fuente de alimentación a 60 ciclos. La densidad de flujo del transformador disminuirá 16.7% del valor original de 50 ciclos, o sea que tendrá 12.9 kilogauss aproximadamente como nuevo valor, corres-

pondiendo ahora a este valor, 0.55 volt-ampères de excitación por libra, o sea se tiene una disminución de aproximadamente 31% en la corriente de excitación.

En la figura 1-1, tenemos las curvas de pérdidas en el núcleo - referidas a 25, 50 y 60 ciclos para los mismos aceros. Considerando - el mismo transformador del caso anterior, observamos que las pérdidas en el núcleo disminuyen de 0.545 watts por libra en 50 ciclos, a 0.47 - watts por libra en 60 ciclos, es decir, una disminución de aproximada - mente 14%. Como las pérdidas en el núcleo, en watts, varían con el - cuadrado de la corriente de pérdidas en el núcleo, la disminución de esta corriente será de aproximadamente 7.4%.

En el capítulo anterior se señaló que la corriente de excitación I_e , se puede expresar como:

$$I_e = \sqrt{I_c^2 + I_m^2}$$

Como la corriente de magnetización I_m es considerablemente - mayor que la corriente de pérdidas en el núcleo I_c , se puede considerar que en el ejemplo anterior, la corriente de magnetización disminuye un - valor muy cercano a 31%, con el cambio de frecuencia de 50 a 60 ciclos.

3. - Pérdidas con Carga.

Son principalmente las pérdidas I^2R , o pérdidas en el cobre de - los devanados, debidas a la corriente de carga. También existen pérdi - das por dispersión de flujo, pero por ser tan pequeñas comparadas con - las pérdidas en el cobre, pueden despreciarse para efectos de cálculo.

En esencia, las pérdidas I^2R en el cobre son independientes de la frecuencia, pero debido a que la corriente de excitación disminuye con un aumento en la frecuencia, bajo la misma condición de carga, las pérdidas I^2R disminuirán ligeramente con el cambio de frecuencia a 60 ciclos.

4. - Impedancia.

El cambio en la impedancia de un transformador, con el aumento de frecuencia, dependerá de los valores relativos de la resistencia efectiva y de la reactancia. El efecto de la resistencia es predominante en los transformadores pequeños; en el caso de transformadores de potencia y distribución, de 10 KVA o menores. En transformadores más grandes, predomina la reactancia.

Entonces, en transformadores pequeños, la impedancia aumentará un pequeño porcentaje, y en transformadores grandes de potencia y distribución, aumentará un 8% o más.

5. - Regulación.

La regulación de un transformador de potencial constante, es igual al cambio de voltaje de salida que ocurre cuando la carga es reducida de su valor nominal, a cero, manteniendo constante el voltaje aplicado al primario.

La regulación se expresa en porciento del voltaje secundario nominal a plena carga, por medio de la ecuación:

$$\% \text{ Reg} = \frac{V_2' - V_2}{V_2} \cdot 100$$

en donde:

V_2' = voltaje secundario sin carga

V_2 = voltaje secundario con plena carga.

El voltaje secundario sin carga puede ser expresado como una función de cantidades "secundarias", por la ecuación:

$$V_2' = \sqrt{(V_2 \cos \theta_2 + I_2 R_{o_2})^2 + (V_2 \text{ Sen} \theta_2 + I_2 X_{o_2})^2} \dots (5)$$

en donde:

I_2 = corriente secundaria a plena carga

R_{o_2} = resistencia equivalente del transformador referida al secundario

X_{o_2} = reactancia equivalente del transformador referida al secundario

θ_2 = ángulo de fase entre V_2 e I_2

Por medio de la ecuación (5) se observa que al aumentar la frecuencia de 50 a 60 ciclos, si se mantiene constante el voltaje sin carga V_2' , la reactancia equivalente aumentará, lo que producirá una reducción en el voltaje secundario a plena carga V_2 . Al disminuir este voltaje, la regulación aumentará. Sin embargo, la variación de la regulación en transformadores industriales y de distribución es lo suficientemente pequeña como para poder despreciarla.

6. - Eficiencia .

La eficiencia de un transformador es la relación entre la potencia útil de salida y la potencia total de entrada. Se puede representar por la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos \theta}{V_2 I_2 \cos \theta + W_c + I_2^2 R_{o_2}} \times 100 \dots (6)$$

en donde:

η = eficiencia

V_2 = voltaje secundario con carga.

I_2 = corriente secundaria con carga.

$\cos\theta$ = factor de potencia del secundario con carga

W_c = pérdidas en el núcleo

Ro_2 = resistencia equivalente del primario y secundario del transformador referida al secundario.

$I_2^2 Ro_2$ = pérdidas en el cobre

Como se vió, las pérdidas en el núcleo y en el cobre disminuyen con el cambio de frecuencia de 50 a 60 ciclos. Analizando la ecuación (6), podemos afirmar que la eficiencia aumentará en los transformadores cuando sean operados en 60 ciclos.

7.- Elevación de Temperatura

La elevación de temperatura en un transformador está definida por la magnitud de las pérdidas en el núcleo y en el cobre.

Con el aumento de frecuencia de 50 a 60 ciclos, y operando en las mismas condiciones originales, la elevación de temperatura en los transformadores será menor, debido a la disminución de las pérdidas en el núcleo y en el cobre.

8. - Capacidad Nominal de Diseño.

La capacidad nominal de diseño de un transformador, consiste de un valor de volt-amperes de salida junto con otras características, --

como el voltaje y frecuencia asignados por el fabricante.

Con el aumento de frecuencia de 50 a 60 ciclos, disminuye la elevación de temperatura, por lo que se podrá aumentar ligeramente el valor de la corriente nominal de diseño, sin exceder el aumento normal de temperatura garantizado. En otras palabras, podemos afirmar que en 60 ciclos tendremos capacidad extra en aquellos transformadores que hayan sido construidos para 50 ciclos.

9. - Conclusiones

En términos generales, los principales efectos producidos en la mayoría de los transformadores con el cambio de frecuencia, son:

- a) La densidad de flujo disminuye 16.7%
- b) La corriente de magnetización disminuye aproximadamente 10%.
- c) La corriente de excitación disminuye aproximadamente 10%.
- d) Las pérdidas en el hierro disminuyen aproximadamente 18%.
- e) Las pérdidas en el cobre disminuyen ligeramente
- f) La impedancia aumenta.
- g) La regulación aumenta.
- h) Disminuye la elevación de temperatura.
- i) La capacidad nominal de diseño aumenta ligeramente
- j) La eficiencia aumenta ligeramente

CONVERSION DE LOS DIFERENTES TIPOS DE TRANSFORMADORES

A) TRANSFORMADORES DE POTENCIA Y DISTRIBUCION

En este tipo de transformadores el cambio de frecuencia no producirá problemas, ya que los transformadores diseñados para operar en 50 ciclos, están contruidos con una mayor cantidad de hierro, en comparación con las unidades diseñadas para operar exclusivamente en 60 ciclos. Cuando funcionen en 60 ciclos, las unidades diseñadas para 50 ciclos tendrán una menor elevación de temperatura, lo que permitirá a estas unidades trabajar arriba de su capacidad de diseño, o sea que implícitamente se tendrán volt-amperes extra, sin necesidad de hacer ningún cambio en las unidades actuales.

B) REGULADORES DE VOLTAJE

Todo equipo eléctrico o electrónico ha sido diseñado para trabajar a un voltaje nominal. Debido a las fluctuaciones de carga, dicho voltaje no puede mantenerse siempre constante, provocando problemas de sobrevoltaje y bajo voltaje en los equipos. El sobrevoltaje reduce la vida de los tubos al vacío, de las lámparas incandescentes, y provoca fallas en los componentes electrónicos, además de otros problemas. El bajo voltaje aumenta los tiempos de acabado de ciertos procesos, reduce la intensidad luminosa y puede provocar la quema de los motores por exceso de temperatura.

Los reguladores de voltaje se utilizan para evitar las fluctuaciones de voltaje en la carga. Se tienen dos tipos de reguladores, de --

pasos y de inducción.

1. - Regulador de Pasos.

El elemento básico es un autotransformador de alto factor de potencia. Este tipo de regulador tiene un margen de variación de voltaje de aproximadamente $\pm 10\%$ del voltaje nominal, y no requiere de cambios para operar en 60 ciclos.

2. - Regulador de Inducción

Básicamente es semejante a un motor eléctrico, pero solo tiene libertad para girar un máximo de 180° . Los devanados son conectados como un autotransformador. El devanado primario es montado en el rotor y el secundario en el estator. La variación del voltaje es compensada por medio de la rotación del rotor, el cual induce un voltaje mayor o menor que el de línea en el secundario, dependiendo de la posición del rotor. El giro del rotor es proporcionado por un motor eléctrico controlado por relevadores.

Como en el caso del regulador de pasos, el elemento básico es un simple transformador de alto factor de potencia, por lo que su funcionamiento no se verá afectado con el cambio de frecuencia a 60 ciclos. Sin embargo, pueden requerirse pequeños ajustes en los valores del voltaje deseado y puede ser necesario tener que convertir el motor y los relevadores.

C) TRANSFORMADORES DE VOLTAJE CONSTANTE

Son reguladores estáticos usados para mantener el voltaje constante en receptores de televisión, proyectores de cine, y otras aplica --

ciones. La mayoría de ellos utiliza un transformador de núcleo saturable, junto con un circuito resonante en paralelo, capacitivo-inductivo. Ambos elementos son altamente sensibles a la frecuencia. Su conversión requiere de procesos complicados de taller, que implican reconstrucción de los transformadores, por lo que deberán reemplazarse por transformadores nuevos o reconstruidos para 60 ciclos.

Otro tipo de transformador de voltaje constante es el que consiste de un transformador diseñado para operar muy arriba de la "rodilla" de la curva de saturación de su núcleo. Tienen una capacidad muy baja y se emplean principalmente para proporcionar un voltaje constante en instrumentos de medición, como se verá en el capítulo correspondiente. El voltaje de salida es constante y no senoidal, y es rectificado para obtener un suministro de voltaje constante de corriente directa, relativamente uniforme.

Con el cambio de frecuencia, estos transformadores operarán más cerca de la "rodilla" de la curva de saturación, por lo que el voltaje secundario alterno será más senoidal y el voltaje rectificado de corriente directa será ligeramente mayor. El aumento en este voltaje puede ser compensado recalibrando el circuito del instrumento alimentado.

D) TRANSFORMADORES DE CORRIENTE CONSTANTE

Este tipo de transformadores trabaja según el principio de la fuerza de repulsión entre las bobinas primaria y secundaria. La bobina primaria se encuentra fija y la secundaria puede moverse de acuerdo

con la magnitud de la fuerza de repulsión. Esta fuerza es compensada por medio de contrapesos y su magnitud depende de la carga, a la que está conectada la bobina secundaria. La corriente proporcionada por esta bobina depende de la posición que tenga respecto a la bobina fija. Esta posición siempre será tal que la corriente suministrada permanezca constante.

El uso más frecuente de estos transformadores se tiene en el alumbrado de calles tipo serie. La conversión de este tipo de transformadores para trabajar en 60 ciclos, consiste en reducir el tamaño de los contrapesos.

Se tiene otro tipo de estos transformadores. Son muy semejantes al regulador de voltaje de inducción, solo que constan de un transformador de corriente y en vez de un relevador regulador de voltaje, se tiene un relevador regulador de corriente. El elemento básico, que es el transformador, no requiere conversión, y en la mayoría de las veces, tampoco la requiere el relevador.

E) TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTO

Los transformadores diseñados especialmente para usarse con medidores e instrumentos se conocen como transformadores de instrumento. Estos transformadores pueden ser de potencial o de corriente y se usan por dos razones:

- 1 Reducir voltajes y corrientes a valores que permitan un diseño práctico de medidores e instrumentos.
- 2 Como protección contra daños graves o pérdida de vidas a

consecuencia de contacto accidental con circuitos de alto voltaje.

Como práctica general, es deseable usar transformadores de corriente para corrientes mayores de 100 Amp. y transformadores de potencial para voltajes mayores de 240 volts.

Un transformador de instrumento ideal sería aquel que reuniera las siguientes características:

- Aislado adecuadamente del voltaje de línea
- Voltaje o corriente directamente proporcional al voltaje o corriente en el primario.
- Voltaje en el secundario o corriente a 180° con los del primario.

Actualmente el primer requerimiento se puede cumplir y los otros dos se pueden llevar a límites que excepto para mediciones muy exactas pueden aceptarse como cumplidos.

1. - Transformadores de Potencial

En un transformador de potencial la parte de errores en relación y en ángulo debida a la corriente de excitación, es constante para cualquier voltaje dado y la parte de errores debida a la carga del transformador varía directamente con la carga secundaria y se puede minimizar haciendo la resistencia y la reactancia del devanado muy bajas. La fig. 2-2 muestra errores típicos de relación y ángulo de fase para un transformador de potencial.

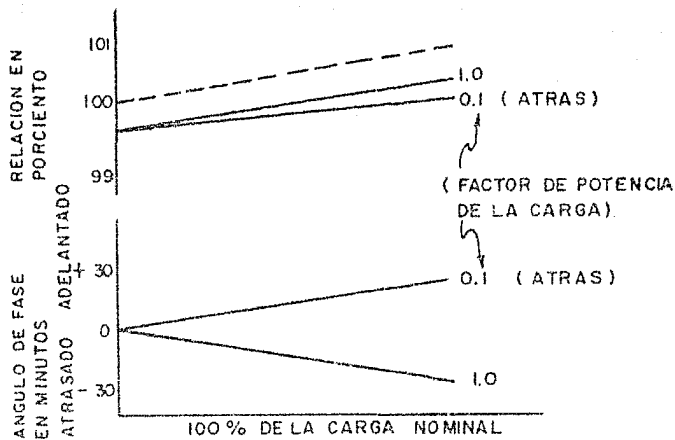


FIG. 2-2

Como se puede observar de la figura, el error de relación puede ser neutralizado para una determinada carga, compensando el transformador, es decir, cambiando la relación de vueltas de manera que esto se satisfaga. La línea punteada es la correspondiente a un transformador sin compensar.

El error en ángulo de fase, no podrá ser compensado. Este error se observa en medidas combinadas como en Wattmetros, Watthorímetros y aparatos similares, por lo que como es fácil concluir, el error en ángulo de fase no solo dependerá de las constantes del transformador, sino que también dependerá del factor de potencia de la carga que se mide.

Debido a lo anterior los transformadores tienen compensado el error de relación de tal manera que el error total para su campo de operación se reduzca al mínimo.

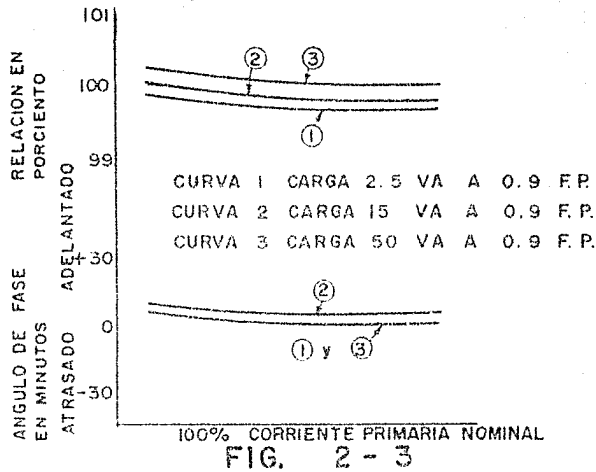
2. - Transformadores de Corriente

Las condiciones bajo las cuales opera el transformador de corriente son diferentes a aquellas del transformador de potencial, puesto que éste está conectado a un voltaje relativamente constante que hace, para un valor de carga secundaria constante, que la corriente primaria sea constante y por lo tanto los valores de las componentes magnetizantes y de pérdidas en el núcleo también relativamente constantes. Mientras que, en el caso de los transformadores de corriente la caída de potencial al través de las terminales primarias no es constante, sino que varía directamente con la corriente en la línea a la que está conectado el primario, haciendo que la corriente de magnetización, y por tanto las pérdidas en el núcleo, también varíen.

Ya que las variaciones en la corriente de línea y los cambios en la carga del secundario afectan la corriente de excitación, es de gran importancia hacer que la corriente magnetizante sea mínima.

Si la corriente de excitación cambiara exactamente en la misma proporción al cambio en la corriente primaria, el porcentaje de error en relación sería constante para cualquier valor de la corriente primaria. El error de relación real se minimiza trabajando el hierro en la parte recta de la curva de magnetización.

El error en ángulo de fase será también una función de la corriente de magnetización, por lo que variará ligeramente con la corriente primaria aunque se mantenga constante la carga secundaria. Esto se muestra en la siguiente figura:



El error en ángulo de fase solo será patente cuando se usen - - instrumentos tales como wáttmetros. Los transformadores de corriente se compensan alterando las vueltas del devanado secundario de manera que se obtengan errores combinados de relación y ángulo de fase mínimos.

3. - Efectos del Cambio de Frecuencia en los Transformadores de Potencial.

Debido a que los transformadores de potencial no están sujetos a grandes variaciones en el voltaje primario, se diseñan por razones de economía y peso, para trabajar bastante arriba de la curva de magnetización. Por esta razón no son permisibles grandes cambios en la densidad de flujo y ya que el flujo varía inversamente con la frecuencia, los transformadores de potencial no podrán ser usados en un amplio campo de frecuencias. Sin embargo para las pequeñas variaciones de circuitos comerciales de una frecuencia dada, la exactitud del aparato no se ve - -

afectada apreciablemente.

En un cambio de frecuencia de 50 a 60 Hz. el hierro trabajará -
mas abajo de la curva de magnetización reduciéndose la corriente de mag-
netización y con esto la parte correspondiente de error: además el traba-
jar en una parte mas lineal permitirá variaciones de frecuencia mas am-
plias.

4. - Efectos del Cambio de Frecuencia en los Transformadores de Corrien- te.

Los transformadores de corriente se diseñan para densidades -
de flujo en el núcleo tales, que mantengan al mínimo la corriente de ex-
citación haciendo que los cambios en la corriente de línea tengan un efec-
to mínimo en la exactitud. De esta manera es usual designar transforma-
dores de corriente para operación a 60 ciclos, como 25 a 60 ciclos.

Como se observa, la frecuencia afecta en menor grado al trans-
formador de corriente que al de potencial y un cambio de frecuencia pro-
porciona las mismas ventajas mencionadas en el párrafo anterior.

F) TRANSFORMADORES DE POTENCIAL Y DE CORRIENTE PARA C. D.

Son transformadores que se usan también con medidores e ins-
trumentos, por lo que también se les incluye en la categoría de transfor-
madores de instrumento.

Estos transformadores emplean reactores de núcleo saturable
en los cuales un suministro de corriente alterna es variado de acuerdo -
con el grado de saturación creado en un núcleo común con una corriente

o voltaje de C. D. variable.

1. - Transformadores de Corriente de C. D.

En la figura 2-4 se muestra en forma esquemática el transformador de corriente de C. D. Este transformador emplea 2 reactores de núcleo saturable para controlar la corriente en un circuito de C. A. de acuerdo con la magnitud de la corriente directa en un conductor acoplado magnéticamente a los 2 reactores.

Ya que la potencia de C. D. no puede ser transferida a través del circuito magnético, el transformador de corriente de C. D. requerirá una fuente de energía de C.A. en su lado secundario, así como un rectificador de onda completa para eliminar la pequeña señal de C.A. producida tanto por la fuente de excitación separada de C.A. como la producida por la magnitud de la corriente alta de C.D. de la barra colectora o cable.

La salida del transformador es una señal lineal de corriente alterna que es directamente proporcional a la magnitud de la corriente directa que pasa por la barra colectora.

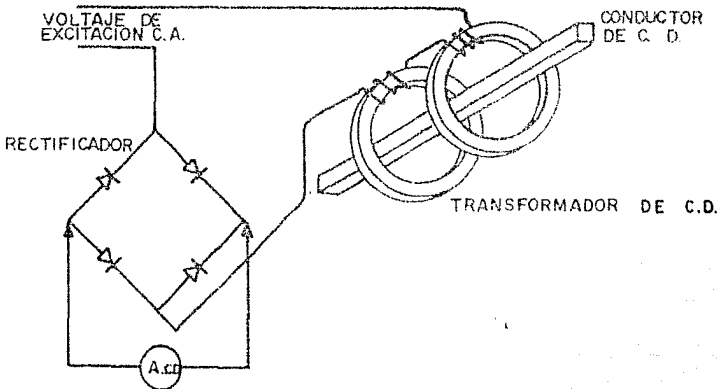


FIG. 2-4

2. - Transformadores de Potencial de C. D.

El transformador de potencial de C. D. es un aparato que aísla el equipo eléctrico integrado por el circuito de instrumentación, del equipo o fuente de alimentación de C. D.

Consiste, como puede observarse en la figura 2-5, de un reactor de núcleo saturable con un devanado de C. D., 2 devanados de C. A., y unas resistencias que hacen que se tenga mayor precisión. El devanado de C. D. produce un efecto de saturación en el núcleo. Los devanados de C. A., energizados por una fuente de energía separada, entregan una corriente promedio rectificadora proporcional al grado de saturación del núcleo.

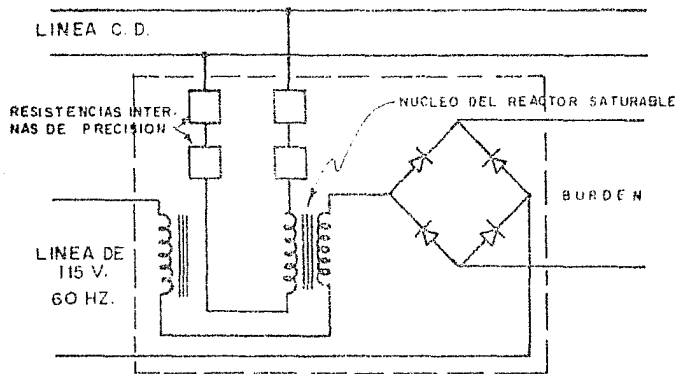


FIG. 2-5

3. - Conversión de los Transformadores de Corriente y Potencial, de C. D.

El voltaje de salida de C. A. de un reactor saturable disminuirá si es constante el voltaje de C. D. y se aumenta la frecuencia. Por lo tanto, la señal de salida de C. D. de estos transformadores indicará menos corriente y voltaje que el que realmente existe después del cam -

bio de frecuencia. Este error es lineal.

La capacidad de C. D. del transformador será reducida, dependiendo de las características del hierro usado por el fabricante en el reactor saturable.

La secuencia para efectuar la conversión será en términos generales la siguiente:

- 1o. Determinar si es permisible la reducción en la capacidad de C. D.
- 2o. Determinar si es posible efectuar una recalibración de todos los instrumentos que son operados por los transformadores de corriente y potencial de C. D.
- 3o. Si no es posible efectuar la recalibración, o no es aceptable la reducción en la capacidad de C. D., será necesario reemplazar los transformadores por unidades diseñadas para 60 ciclos.

C A P I T U L O I I I

MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

En este capítulo estudiaremos los efectos que produce un cambio en la frecuencia en los motores eléctricos más comúnmente usados. Además, analizaremos las posibles modificaciones, desde el punto de vista eléctrico, necesarias para que la variación producida por el cambio de frecuencia sobre determinadas características de los motores sea compensada.

El efecto más significativo en los equipos rotatorios cuando sufren un aumento en la frecuencia, es sin duda un aumento en la velocidad. Eléctricamente, un cambio en la frecuencia de 50 a 60 ciclos es relativamente pequeño y si no fuera por el cambio en la velocidad, la cantidad de adaptación requerida por las máquinas giratorias sería insignificante.

Al efectuar un aumento en la frecuencia sobre los motores eléctricos de corriente alterna se producen, además del aumento en la velocidad del rotor, ciertas variaciones en el comportamiento de sus caracte-

terísticas eléctricas como lo son la corriente magnetizante, el par, el factor de potencia, etc. Por lo tanto, los trabajos preliminares al efectuar un cambio en la frecuencia serán el analizar dichas características y el de determinar la posibilidad de que operen los motores a una frecuencia mayor.

Estos análisis se harán para motores de inducción trifásicos, para motores síncronos y para motores monofásicos que son los más usados tanto en la industria como en otros campos.

MOTORES TRIFASICOS DE INDUCCION

Primeramente diremos que el motor trifásico de inducción es el más comúnmente empleado en corriente alterna debido a su sencillez, a su construcción sólida y a su bajo costo de mantenimiento. Estas características se deben a que el rotor es independiente y no requiere fuente externa de tensión.

El motor eléctrico de inducción se llama así por el hecho de que el campo magnético giratorio del estator induce corrientes alternas en el circuito del rotor.

El rotor de inducción consta de un cilindro laminado con ranuras en su superficie. Los devanados que se localizan en esas ranuras pueden ser de dos tipos: el más común es el llamado "devanado en jaula de ardilla" el cual consiste en barras de cobre o aluminio conectadas entre sí en cada uno de los extremos mediante un anillo de cobre o bronce. No hace falta aislamiento entre el núcleo y las barras debido a que los

voltajes generados en las barras del rotor son sumamente bajos.

El otro tipo de devanado contiene bobinas colocadas en las ranuras del rotor llamándosele a este como "rotor devanado".

Cualquiera que sea el tipo de rotor que se emplee, el principio básico de funcionamiento es el mismo; el campo magnético giratorio generado en el estator induce corrientes en el devanado del rotor, las cuales crean un campo magnético en este; estos dos campos reaccionan entre sí produciendo de esta manera movimiento en el rotor.

A) EFECTOS DEL CAMBIO DE FRECUENCIA

Analicemos los efectos que produce un aumento en la frecuencia, permaneciendo constante el voltaje, sobre las características eléctricas de los motores trifásicos de inducción.

1. - Variación de la Velocidad

Sabemos que la velocidad de rotación del campo magnético está dada por:

$$N = \frac{120 f}{p}$$

en donde

N = velocidad síncrona en r. p. m.

f = frecuencia en c. p. s.

p = número de polos.

De la expresión anterior vemos que si hay variación en la frecuencia, permaneciendo constante el número de polos, también la habrá en la velocidad.

Consideremos una frecuencia de 50 ciclos en la expresión anterior permaneciendo constante el número de polos, tenemos:

$$N_1 = \frac{120 \times 50}{p}$$

Ahora consideremos un aumento en la frecuencia, de 60 ciclos, bajo las mismas condiciones. Tenemos:

$$N_2 = \frac{120 \times 60}{p}$$

Y la relación entre las velocidades anteriores será:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{60}{50}$$

$$N_2 = 1,20 N_1$$

Por lo tanto, podemos decir que un cambio en la frecuencia de 50 a 60 ciclos produce un aumento en la velocidad del 20%.

2 - Deslizamiento. - Si un inducido cuyos conductores forman circuitos cerrados se coloca en un campo giratorio, desarrollará un par porque las corrientes inducidas actúan conjuntamente con el campo magnético en rotación.

El inducido no puede alcanzar la velocidad de rotación del campo debido a su inercia y a la carga que tenga conectada. Por otra parte, si el rotor alcanza la velocidad del campo giratorio, los conductores no cortarían el flujo, por lo que no existiría corriente en el rotor, no se forma el campo y por lo tanto no se produce el par.

La diferencia entre la velocidad de rotación del campo y la velocidad del rotor se llama "deslizamiento" y queda expresada como:

$$S = \frac{N - N_1}{N}$$

en donde:

S = deslizamiento

N = velocidad de sincronismo

N_1 = velocidad del rotor.

Hagamos una comparación entre los efectos que produce un aumento en la frecuencia, de 10 ciclos, en el deslizamiento.

Supongamos que tenemos un motor de 50 ciclos cuyo deslizamiento es del 5%, o sea, que tiene una velocidad de régimen de 2850 r. p. m.

Ahora, al aumentar la frecuencia en 10 ciclos, tenemos un aumento del 20% en la velocidad, tanto en la síncrona como en la de régimen, como ya se determinó con anterioridad, y su deslizamiento será:

$$S_2 = \frac{3600 - 3420}{3600}$$

$$S_2 = \frac{180}{3600} = 0.05$$

$$S_2 = 5\% = S_1$$

Por lo tanto, vemos que el deslizamiento teóricamente no varía con el aumento de la frecuencia, pero en la realidad el deslizamiento se afecta ligeramente al afectarse la impedancia del motor, pero esta variación es insignificante considerándose por lo tanto el deslizamiento, como constante.

3. - Densidad de Flujo

Sabemos que la densidad de flujo queda definida por:

$$B = \frac{e \times 10^9}{L \times V} \text{ --- (1)}$$

en donde

B = densidad de flujo en gauss.

$e = f_{cem}$. en volts.

$L =$ longitud del conductor en cm.

$v =$ velocidad del conductor en cm/seg.

Ahora sabemos que:

$$v = \frac{3.14 \times D \times 120 \times f}{60 p} \frac{\text{cm}}{\text{seg}} \quad \text{----- (2)}$$

en donde

$D =$ diámetro del rotor

$f =$ frecuencia en c. p. s.

$p =$ número de polos.

sustituyendo (2) en (1) tenemos

$$B = \frac{e \times 10^8 p}{6.28 \times L \times D \times f}$$

en forma más general podemos escribir

$$B = K \frac{e}{f}$$

ya que se pueden considerar los demás terminos como constantes.

De la expresión anterior vemos que la densidad de flujo es directamente proporcional al voltaje e inversamente proporcional a la frecuencia.

Ahora obtengamos la relación de densidades al efectuar un cambio en la frecuencia de 50 a 60 ciclos sin variar el voltaje de alimentación para que la f_{cem} permanezca constante, por lo tanto tenemos que:

$$y \quad B_1 = \frac{K}{50}$$
$$B_2 = \frac{K}{60}$$

la relación será

$$\text{por lo tanto } \frac{B_2}{B_1} = \frac{50}{60}$$

$$B_2 = 83.3\% \text{ de } B_1$$

De lo anterior vemos que, a un aumento del 20% en la frecuencia, permaneciendo constante el voltaje, la densidad de flujo baja aproximadamente un 16.7% con respecto a su valor a una frecuencia de 50 -- ciclos.

4. - Par Máximo y Par de Arranque

El par de un motor de inducción viene expresado por:

$$T = \frac{K (E_2 S R_2)}{R_2^2 - (S X_2)^2}$$

donde

E_2 = voltaje del rotor.

K = constante

S = deslizamiento

R_2 = resistencia del rotor.

X_2 = reactancia del rotor

Considerando que el voltaje permanece constante, el par máximo se presenta cuando aproximadamente se tenga que

$$R_2 = S X_2$$

Substituyendo tenemos

$$T_m = \frac{K (S^2 X_2)}{2 S^2 X_2^2}$$

$$T_m = \frac{K}{X_2}$$

En estas condiciones, obtengamos la relación existente entre el par máximo a una frecuencia de 60 ciclos, con respecto al par máximo a una frecuencia de 50 ciclos:

$$T_{m2} = \frac{50}{60} T_{m1}$$

$$T_{m2} = 83.3\% T_{m1}$$

Vemos que el par máximo sufre una disminución de aproximadamente 16.7% a una frecuencia de 60 ciclos con respecto a su valor a una frecuencia de 50 ciclos.

El par de arranque se obtiene aproximadamente cuando en la expresión general se tiene que X_2 sea mucho mayor que R_2 . Por lo tanto, substituyendo y simplificando llegamos a la siguiente expresión:

$$T_a = \frac{K}{X_2^2}$$

Ahora obteniendo la relación del par de arranque a una frecuencia de 60 ciclos respecto a una frecuencia de 50 ciclos llegamos a:

$$T_{a2} = \frac{(50)^2}{60^2} T_{a1}$$

$$T_{a2} = (0.833)^2 T_{a1}$$

$$T_{a2} = 70\% T_{a1}$$

Vemos que el par de arranque disminuye un 30% a una frecuencia de 60 ciclos respecto a su valor obtenido a una frecuencia de 50 ciclos.

En general, tanto el par máximo como el par de arranque, varían un poco más de lo establecido, ya que el par varía también con el deslizamiento y éste a su vez sufre una variación debido a su impedancia como ya se mencionó en el análisis del deslizamiento.

5. - Corriente de excitación. - La corriente de excitación al efectuar un aumento de 50 a 60 ciclos en la frecuencia permaneciendo constante el voltaje de alimentación, disminuirá aproximadamente un --

30% debido al gran aumento que se tiene en la reactancia magnetizante - del motor eléctrico de inducción al ser éste excitado.

6. - Pérdidas en el Núcleo. - Debido a la disminución de la corriente de excitación y por ende a la disminución de la corriente magnetizante que se obtiene al efectuar un cambio de 50 a 60 ciclos en la frecuencia, las pérdidas en el núcleo disminuirán un 20% aproximadamente.

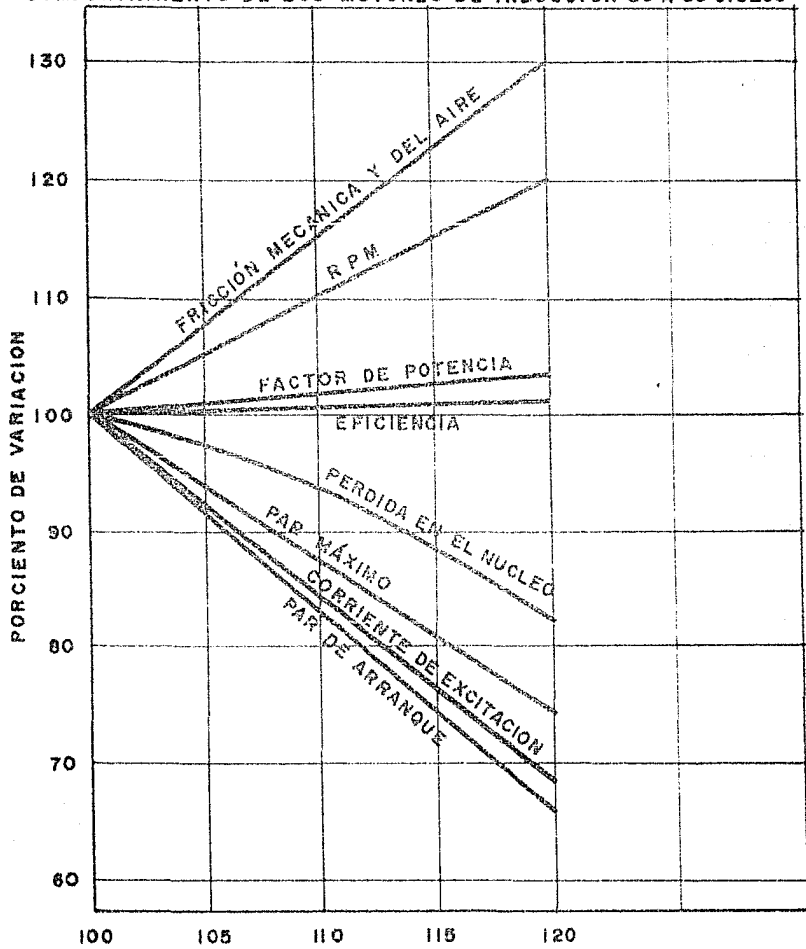
7. - Fricción y Ventilación. - La fricción y ventilación serán incrementadas aproximadamente un 30% al efectuar un cambio de 50 a 60 ciclos en la frecuencia debido a que el rotor sufre un aumento en su velocidad produciéndose así mayor ventilación y mayores fuerzas de inercia en las partes integrantes del motor.

8. - Variación de la Temperatura. - Debido a la disminución de la corriente se obtiene una disminución en las pérdidas por efecto Joule, y por consiguiente una disminución en la temperatura. Esta disminución depende, además, con las condiciones a las que se encuentra sometido el motor - ya que también debe considerarse el aumento de temperatura que por pérdidas por fricción, compensadas éstas con la disminución de la temperatura por ventilación, se obtienen al efectuar un aumento del 20% en la velocidad del rotor del motor eléctrico de inducción.

9. - Eficiencia. - La eficiencia a plena carga en general mejorará ligeramente al producirse un aumento de 10 ciclos en la frecuencia debido a que las pérdidas totales tienden a disminuir.

10. - Factor de Potencia. - El factor de potencia tiende a mejorar al efectuar un aumento de 50 a 60 ciclos en la frecuencia debido a que la eficiencia aumenta ligeramente.

EFFECTOS DEL INCREMENTO DE FRECUENCIA EN EL
COMPORTAMIENTO DE LOS MOTORES DE INDUCCION 50 A 60 CICLOS



PORCIENTO DE FRECUENCIA

FIG. 3-1

Graficando lo anteriormente expuesto tenemos las curvas que --
se muestran en la figura 3-1.

B) VARIACION DEL VOLTAJE CONJUNTAMENTE CON EL CAMBIO DE -- FRECUENCIA.

Si las condiciones de los circuitos eléctrico y magnético deben
ser mantenidas en el mismo estado primitivo, al tenerse un aumento en --
la frecuencia, también debe de efectuarse un aumento en el voltaje de ali
mentación.

Suponiendo que el valor del campo magnético rotatorio debe ser
mantenido igual y que la frecuencia se aumenta, éste campo girará más
aprisa y cortará un mayor número de conductores en un tiempo dado, de
lo que resultará un aumento en el voltaje inducido o fuerza contraelec --
tromotriz como podrá observarse en el análisis de la densidad de flujo -
anteriormente vista.

En otras palabras, el aumento de frecuencia da por resultado -
que el motor engendre una fuerza electromotriz mayor que será necesi --
ario contrarrestar por medio de un voltaje aplicado más alto para que --
así se obtengan las mismas condiciones magnéticas que existían en el --
motor original.

En estas condiciones tendremos también un aumento proporcio --
nal en la potencia, ya que ésta se considera como el producto del par por la
velocidad angular que expresada en términos generales tenemos:

$$P = TW$$

en donde

P = potencia

T = par

w = velocidad angular.

De aquí vemos que efectivamente al producirse un incremento proporcional entre la frecuencia y el voltaje, la velocidad que depende de la frecuencia aumentará y el par permanecerá prácticamente constante debido a que el aumento en el voltaje tiende a compensar la variación del flujo y por ende, la potencia variará en la misma proporción con que la velocidad varía.

Además, un aumento proporcional de voltaje con respecto a un aumento en la frecuencia puede ser conveniente para restituir el par de arranque del motor siendo esto a veces más económico que el de reconectar o el de reembobinar como posteriormente se verá.

Para llegar a tomar una decisión favorable a la cual se mencionó, es necesario tener en cuenta la manera en que son afectadas también bajo estas condiciones, las demás características ya mencionadas con anterioridad y que a continuación se representarán en una forma gráfica en la figura 3-2, al producir variación solo en el voltaje.

MOTORES SINCRONOS

Los motores síncronos constan fundamentalmente de un estator trifásico el cual genera un campo magnético giratorio y de un rotor electromagnético el cual es excitado con corriente continua. El rotor en es-

EFFECTO DE VARIACIONES DE VOLTAJE EN MOTORES DE INDUCCION

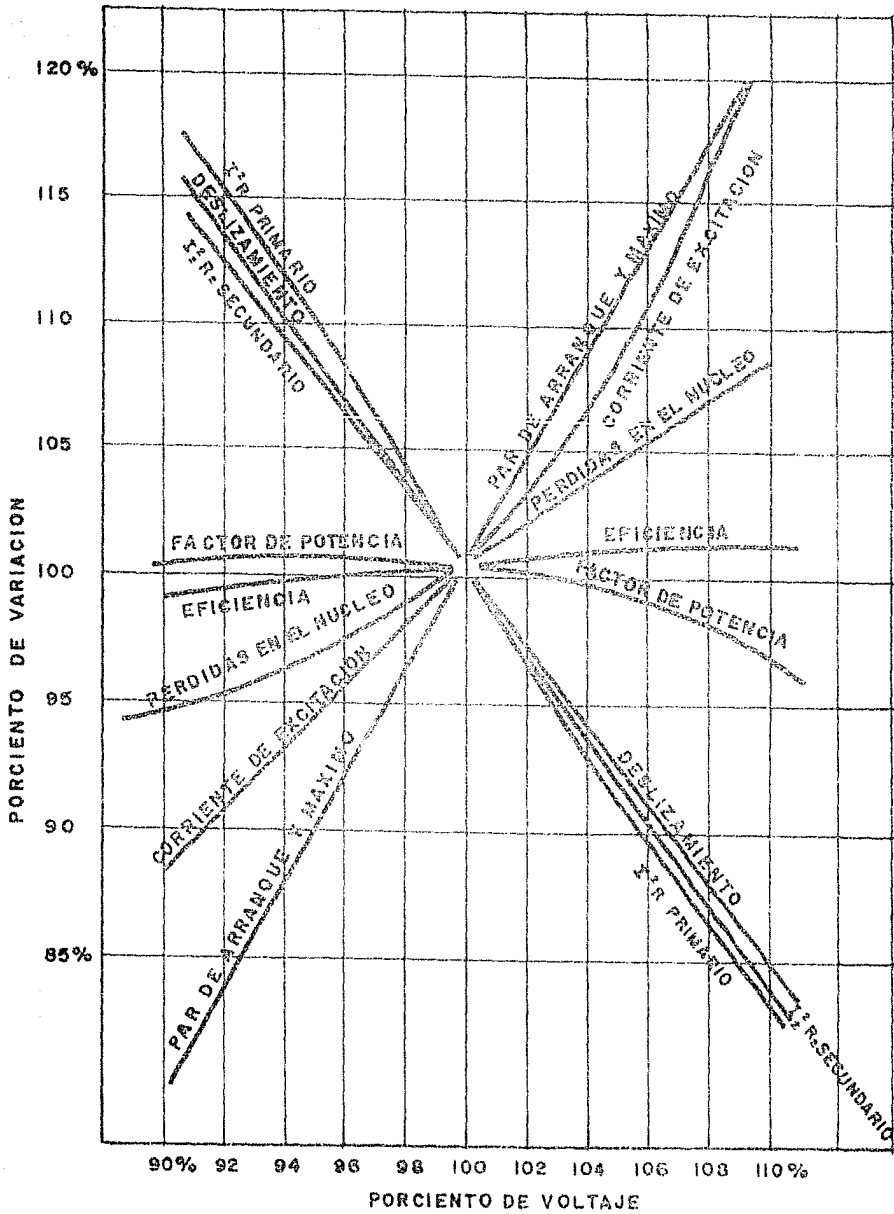


FIGURA 3-2

tas condiciones, es atraído por el campo magnético giratorio generado por el estator efectuándose en esta forma el movimiento giratorio en el rotor.

La forma como se produce un campo magnético giratorio en el estator es mediante la combinación de los campos magnéticos creados en las bobinas del estator.

El rotor del motor síncrono debe ser llevado inicialmente a una velocidad cercana a la velocidad síncrona mediante la excitación de campo para que posteriormente tome la velocidad síncrona.

En cuanto a la estructura de los motores síncronos hay que considerar que las flechas y rotores están sujetos a esfuerzos mecánicos y de torsión. Esto es muy importante tenerlo en cuenta ya que en nuestro caso, al tener un aumento en la frecuencia, se tiene un aumento en la velocidad de rotación, aumentando así las fuerzas centrífugas con el cuadrado de la velocidad. Debe por lo tanto comprobarse la estructura de los rotores de las máquinas giratorias en general para los factores de seguridad usados en su diseño y reforzarla o cambiarla si los factores de seguridad obtenidos con el aumento de la velocidad no son los adecuados.

Vamos a analizar ahora los efectos que produce un cambio de 50 a 60 ciclos en las características eléctricas más importantes de los motores síncronos.

1. - Velocidad. -De acuerdo con la fórmula de la velocidad síncrona:

$$v = \frac{120 f}{p}$$

donde

V = velocidad síncrona

f = frecuencia

p = número de polos

podemos ver que ésta varía directamente con la frecuencia y que cuando hay un aumento en la frecuencia de 50 a 60 ciclos, manteniéndose constante los polos, el rotor del motor aumenta su velocidad un 20% como sucede en los motores trifásicos de inducción.

2. - Par de Arranque. - Los motores síncronos de arranque automático arrancan sin corriente de excitación como los motores de inducción, por lo que el par de arranque variará inversamente con el cuadrado de la frecuencia, como ya quedó establecido en los motores trifásicos de inducción.

Cuando se aumenta la frecuencia de 50 a 60 ciclos, el par de arranque disminuirá un 30% aproximadamente con respecto a su valor obtenido a 50 ciclos.

3. - Par de Ajuste a Sincronismo (Pull-In).- Este par queda definido por NEMA como el par constante máximo con el que el motor lleva su carga de inercia conectada a sincronismo, operando a voltaje y frecuencia nominales cuando la excitación del campo es aplicada.

El par de ajuste a sincronismo varía también inversamente con el cuadrado de la frecuencia y su valor depende de la inercia de la car-

ga conectada.

4. - Par del Motor Síncrono a Plena Carga. Si la corriente del estator es la misma y se mantiene constante el factor de potencia, este par variará inversamente con la frecuencia.

5. - Par Máximo del Motor Síncrono (Pull-Out). El par máximo con excitación normal en un motor síncrono, variará inversamente con la potencia de la frecuencia, como sucede con los motores trifásicos de inducción.

6. - Potencia del Motor. - La potencia del motor síncrono a plena carga varía con el producto del par a plena carga y la velocidad. Por lo tanto, con el mismo factor de potencia y corriente del estator, la potencia del motor a plena carga permanecerá constante cuando en la frecuencia se efectúe un cambio de 50 a 60 ciclos, ya que en estas circunstancias las pérdidas del par son compensadas con el aumento de velocidad.

7. - Factor de Potencia.- Cuando la frecuencia se aumenta de 50 a 60 ciclos, el factor de potencia para corrientes de campo y estator nominales estará más adelantado ya que una excitación dada producirá un voltaje de armadura mayor a 60 ciclos que a 50 ciclos.

8. - Excitación del Motor. - Para una potencia de salida dada, un motor síncrono necesitará más corriente adelantada a una frecuencia de 60 que a una frecuencia de 50 ciclos.

9. - Potencia de Sincronización del Motor. - Es el cambio en la potencia de salida en la flecha por unidad de cambio en el ángulo de desplazamiento del rotor. Mientras la potencia en la flecha aumenta, el án-

gulo de desplazamiento del rotor aumenta.

El valor de la potencia de sincronización para un motor, depende de las siguientes características:

- La potencia de sincronización aumenta cuando hay un aumento de carga aplicada a un factor de potencia constante.

- La potencia de sincronización aumenta cuando se produce un aumento en la excitación del campo o cuando hay un aumento en el factor de potencia para una carga constante.

- La potencia de sincronización aumenta con el aumento de la frecuencia de pulsación del par o frecuencia natural.

- La potencia de sincronización es directamente proporcional al voltaje e inversamente proporcional a la frecuencia.

MOTORES MONOFASICOS

A) CLASIFICACION GENERAL. - Los motores monofásicos pueden ser divididos en dos tipos principales a saber: con fase auxiliar -de jaula de ardilla- dentro de los cuales se encuentran los de fase dividida; y de una sola fase-, con rotor bobinado-.

El devanado primario de los motores con fase auxiliar consiste en un devanado principal y un devanado de arranque conectado este en serie por lo general con un condensador para que sea desplazado 90 grados eléctricos del devanado principal el cual usualmente es puesto fuera del circuito por medio de un interruptor de fuerza centrífuga.

El devanado primario de los motores monofásicos con rotor bobinado es igual al devanado principal de los motores con bobinado auxiliar. En estos motores no es necesario un devanado de arranque porque arrancan por sí solos.

En general, a estos motores se les denomina como motores de corriente alterna en serie de repulsión y universales.

Se ha determinado que casi todos los motores de inducción monofásicos a 50 ciclos con 4 o más polos operan satisfactoriamente a una velocidad mayor proporcionada por el aumento de frecuencia a 60 ciclos. Sin embargo, una velocidad mayor en la unidad impulsada puede ser aceptable, o puede sobrecargarse el motor y en la mayoría de estos casos un cambio simple en la transmisión resolverá el problema.

No es práctico reconectar o reembobinar un motor monofásico para un número mayor de polos, además, requerirán un ajuste o reemplazo de sus dispositivos centrífugos.

B) MOTORES DE INDUCCION DE FASE DIVIDIDA Y DE CAPACITOR --

Muchos motores de éste tipo están equipados con un dispositivo centrífugo que abre el circuito del devanado de arranque cuando el motor alcanza una cierta velocidad.

Se ha encontrado práctico tratar todos los motores de inducción de fase dividida y de capacitor, como artículos "SIN CAMBIO" eléctrico al efectuar un aumento en la frecuencia, cuando hay posibilidad de efectuar el cambio mediante una polea u otra conversión en la transmisión.

Al efectuar un cambio de frecuencia, algunos motores monofásicos no desarrollarán el par suficiente, por lo tanto, estos tipos de motores deben ser reembobinados ó deben ser reemplazados.

Las velocidades a las cuales deben ser ajustados los dispositivos centrífugos para operar en motores a 50 ciclos se muestra en la tabla 3-1.

Estos valores deberán ser usados cuando los dispositivos son ajustados antes del cambio de frecuencia a 60 ciclos.

Las velocidades se han tomado en base a las experiencias previas para dar una operación satisfactoria en ambas frecuencias.

Cuando se nota que los dispositivos revisados están operando incorrectamente después del cambio de frecuencia, se usarán para su corrección los valores dados en la tabla 3-2.

T A B L A 3-1

DISPOSITIVO CENTRIFUGO DE OPERACION A 50 CICLOS

Polos	Velocidades a Plena Carga (RPM aproximados)	Velocidad a la cual debe Operar el Dispositivo
2	2 900	2 580 - 2 625
4	1 450	1 280 - 1 350
6	970	840 - 860

T A B L A 3-2

DISPOSITIVO CENTRIFUGO DE OPERACION A 60 CICLOS

Polos	Velocidades a Plena Carga (RPM aproximados)	Velocidad a la cual debe Operar el Dispositivo
2	3 500	2 680 - 2 720
4	1 740	1 320 - 1 350
6	1 160	875 - 900

Algunos motores, especialmente motores sellados en servicio de refrigeración, emplean un relevador externo operado por corriente en el embobinado principal en lugar de un dispositivo centrífugo para desconectar el embobinado de arranque cuando el motor se ha acelerado a una velocidad adecuada. Estos relevadores deben ser recalibrados o reemplazados por unidades de 60 ciclos.

Los dispositivos centrífugos son generalmente ajustados, mediante resortes de compresión, quitando vueltas al resorte de tensión o reemplazando resortes. Algunos dispositivos están equipados con tuercas de ajuste.

En algunos casos la solución más económica es reemplazar el dispositivo completo por uno diseñado para 60 ciclos.

En la figura 3-3 se muestran las curvas par-velocidad a 50 y 60 ciclos de un motor típico de 4 polos de fase dividida y la operación del dispositivo centrífugo.

En la figura puede observarse que el par se reduce y en algunos casos puede ser insuficiente para llevar la carga a velocidad plena. En estas condiciones, el motor se desacelera hasta que el dispositivo centrífugo vuelva a cerrarse, repitiéndose de esta manera el ciclo hasta que el devanado de arranque se queme.

C) MOTORES DE REPULSION.

El dispositivo centrífugo en un motor de repulsión generalmente toma la forma de un resorte al que se le unen pesos centrífugos los cua

les vuelan hacia afuera de tal manera que este movimiento pone los devanados del motor en corto circuito cuando el motor llega a la velocidad de funcionamiento.

Algunos dispositivos de motores antiguos levantan las escobillas del conmutador al mismo tiempo.

La operación de dispositivos centrífugos de motores de repulsión es a menudo más crítica que en motores monofásicos de inducción, ya que los motores de repulsión son generalmente usados donde los requerimientos del par de arranque son indispensables.

La figura 3-4 muestra las curvas par-velocidad para 50 y 60 ciclos de un motor de repulsión típico de 4 polos.

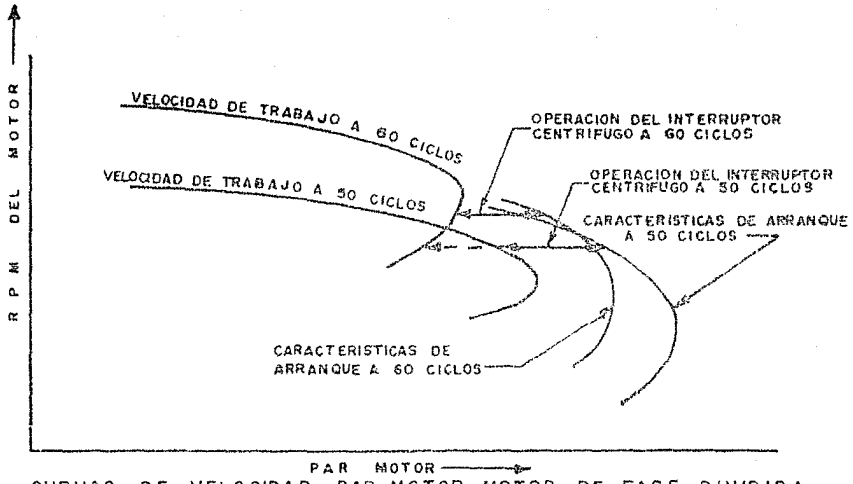
Comparando estas curvas vemos que hay mayor pérdida de par en las curvas del motor de repulsión que en los motores de fase dividida si el dispositivo centrífugo no es ajustado o reemplazado para operación a una frecuencia de 60 ciclos.

D) MOTORES UNIVERSALES

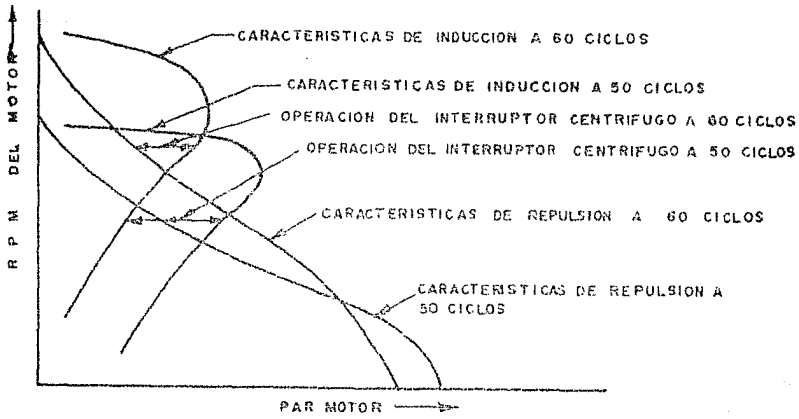
Los motores universales son motores monofásicos con embobinado en serie con o sin devanado de campo compensador.

Estos motores por lo general son diseñados para operar satisfactoriamente tanto en corriente alterna como en corriente directa. Debido a esto podemos decir que al efectuar un cambio en la frecuencia, no se afectan sus características.

Los motores universales se usan generalmente en aparatos do-



CURVAS DE VELOCIDAD-PAR MOTOR, MOTOR DE FASE DIVIDIDA
 FIG. 3-3



CURVAS DE VELOCIDAD-PAR MOTOR, MOTOR DE ARRANQUE CON REPULSION

FIG. 3-4

mésticos como son máquinas de coser, herramientas portátiles, etc.

Todos estos aparatos podemos decir por lo tanto, que son conceptos sin cambio.

CONVERSION DE LOS MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

Los motores deben de modificarse cuando es esencial mantener aproximadamente la misma velocidad de rotación o cuando es necesario mantener el par de arranque con el que opera a una frecuencia de 50 ciclos. Para obtener lo anteriormente dicho deberán hacerse la o las siguientes modificaciones:

- Reconexión del motor.
- Reembobinado del motor.
- Reemplazo del motor.

A) RECONEXION DEL MOTOR

Para una reconexión en los motores trifásicos de inducción hay que tener en cuenta que solo es posible efectuarla cuando el embobinado es del tipo imbricado.

El embobinado del tipo imbricado con bobinas de devanado moldeado, no puede ser reconectado en los siguientes casos:

- Embobinado con conexiones entre bobinas encapsuladas.
- Embobinados con aislante viejo o quebradizo.
- Embobinados de solo dos polos.
- Cuando el motor es muy pequeño y no hay el suficiente espacio para efectuar la reconexión.

Hay dos motivos para reconectar un motor; el primero es para incrementar el par motor cuando se incrementa la velocidad para operar a 60 ciclos, y el segundo es para mantener aproximadamente la velocidad dada a una frecuencia de 50 ciclos cuando se opera a una frecuencia de 60 ciclos.

Para reconectar un motor y mantener su par, el devanado del estator debe reconectarse de tal manera que aumente el voltaje efectivo en las bobinas, como por ejemplo, reconectando los devanados de estrella a delta.

Cuando se reconecta un motor para mantener su par original a 50 ciclos, sin cambiar el número de polos ni el voltaje de alimentación, solo cambiando la frecuencia de 50 a 60 ciclos, se debe escoger un factor de reconexión (C_f) tal que nos de el voltaje requerido a 60 ciclos para restablecer el par mediante la siguiente relación:

$$E_2 = 1.2 \times E_1 \times C_f$$

en donde

E_2 = voltaje a 60 ciclos

E_1 = voltaje a 50 ciclos.

C_f se obtiene de la tabla 3-3

E_2 no debe variar perceptiblemente de E_1 lo cual indica que el factor de reconexión debe ser lo más cerca posible a 0.833.

Cuando se reconecta un motor para mantener su velocidad correspondiente a una frecuencia de 50 ciclos operando a 60 ciclos, debe aumentarse el número de polos aunque el inconveniente es que se caiga en es -

TABLA 3.3

FACTOR DE RECOHEXION (C_f)
(Conexiones trifásicas solamente)

Devanado de 50 Ciclos Original	DEVANADO DE 60 CICLOS RECONECTADO											
	1	2	3	4	5	6	Delta en Serie	2	3	4	5	6
Estrella en Serie	1.00	.60	.43	.25	.25	.17	.50	.29	.19	.15	.12	.10
2 Estrella en Paralelo	2.00	1.00	.67	.50	.60	.42	1.16	.22	.19	.29	.23	.19
3 Estrella en Paralelo	3.00	1.50	1.00	.75	.60	.50	1.73	.67	.58	.43	.35	.29
4 Estrella en Paralelo	4.00	2.00	1.33	1.00	.80	.67	2.37	1.16	.77	.58	.46	.39
5 Estrella en Paralelo	5.00	2.50	1.67	1.25	1.00	.83	2.89	1.44	.96	.77	.58	.48
6 Estrella en Paralelo	6.00	3.00	2.00	1.50	1.20	1.00	3.46	1.73	1.15	.87	.69	.58
Delta en Serie	1.73	.86	.58	.43	.35	.29	1.00	.50	.35	.25	.20	.17
2 Delta en Paralelo	3.46	1.73	1.15	.87	.69	.58	2.00	1.00	.67	.50	.40	.33
3 Delta en Paralelo	5.19	2.59	1.73	1.30	1.04	.87	3.00	1.50	1.00	.75	.60	.50
4 Delta en Paralelo	6.92	3.46	2.31	1.73	1.38	1.15	4.00	2.00	1.33	1.00	.80	.67
5 Delta en Paralelo	8.65	4.33	2.89	2.16	1.73	1.44	5.00	2.50	1.67	1.25	1.00	.83
6 Delta en Paralelo	10.38	5.19	3.50	2.60	2.08	1.73	6.00	3.00	2.00	1.50	1.20	1.00

Fig. 3.3.1. Este motor conectado originalmente como se muestra en cualquier columna vertical tiene un voltaje de 1.00. Su voltaje cuando es reconectado, como se indica en cualquier columna horizontal, es mostrado en la intersección de las dos columnas.

T A B L A 3 - 4

VELOCIDADES SINCRONAS A 50 Y 60 CICLOS

50 CICLOS		60 CICLOS	
Número de Polos	Velocidades Sincronas (RPM) *	Velocidades Sincronas más cercanas (RPM) *	Número de Polos
2	3000	3600	2
4	1500	1800/1200	4/6
6	1000	900	8
8	750	720	10
10	600	600	12
12	500	514	14
14	428	450 / 400	16/18
16	375	400 / 360	18/20
18	333	327	22
20	300	300	24
22	273	277	26
24	250	257	28
26	231	240 / 225	30/32
28	214	212	34
30	200	200	36
32	188	189	38
34	177	180	40
36	168	171 / 164	42/44
38	158	156	46
40	150	150	48
42	143	144	50
44	136	139 / 133	52/54
46	131	133 / 129	54/56
48	125	124	58
50	120	120	60
52	115	116	62
54	111	113	64

* Las velocidades a plena carga son 2 a 5 por ciento menor que las velocidades sincronas.

tos casos, en un número fraccionario de polos.

Solo es posible mantener exactamente la misma velocidad cuando se produce un cambio de 50 a 60 ciclos en la frecuencia, si el cambio se hace de 10 a 12 polos respectivamente.

La tabla 3-4 muestra la velocidad de sincronismo junto con el número de polos para una operación a 50 y 60 ciclos.

No es práctico efectuar un cambio de 2 a 4 polos. El primer cambio práctico es de 4 a 6 polos teniéndose como resultado una diferencia hasta cierto punto considerable como podrá observarse en la tabla.

A continuación se dará una descripción de los puntos de más importancia que se deben tener en cuenta para el cálculo de una reconexión en motores trifásicos de inducción:

Primeramente se determinará si podrá ser realizado un devanado balanceado con el nuevo número de polos ya que no se permitirá un desequilibrio en los circuitos serie-delta, entre dos deltas paralelas, o entre las terminales de cualquier circuito en paralelo.

Un desequilibrio de un 10% puede ser permitido en el circuito serie-estrella o entre dos o más conexiones en estrella siempre y cuando no sean conectados sus neutros.

Posteriormente se determinará un factor denominado factor de cuerda, el cual nos relaciona el ancho real de la bobina y el ancho de una bobina de paso completo. Este factor podrá ser determinado mediante el uso de la tabla 3-5 dada en este capítulo, o mediante la siguiente relación:

$$K_p = \text{Sen} \left(90 \frac{S_1}{S_2} \right)$$

F A C T O R D E C U I D A (K_p)

Mo. Total de Ramas.
No. de Pulos

GANARAS POR PULO =

	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	
PASC del Escribano	1.000	.998	.996	.975	.957	.915	.856													
1.25																				
1.24																				
1.23																				
1.22																				
1.21																				
1.20																				
1.19																				
1.18																				
1.17																				
1.16																				
1.15																				
1.14																				
1.13																				
1.12																				
1.11																				
1.10																				
1.9																				
1.8																				
1.7																				
1.6																				
1.5																				
1.4																				

TABLA 3.5

en donde

K_p = factor de cuerda.

S_1 = ancho real de bobina.

S_2 = ancho de una bobina de paso completo.

Con este factor podemos determinar el voltaje requerido a 60 -
ciclos para restablecer el par mediante la siguiente relación:

$$E_2 = \frac{60 \times K_2 \times P_1 \times E_1}{50 \times K_1 \times P_2}$$

en donde

E_2 = voltaje requerido a 60 ciclos para restablecer el par.

E_1 = voltaje correspondiente a 50 ciclos.

K_2 = factor de cuerda a 60 ciclos

K_1 = factor de cuerda a 50 ciclos.

P_2 = número de polos a 60 ciclos.

P_1 = número de polos a 50 ciclos.

Si este voltaje requerido a 60 ciclos no está cerca del voltaje --
correspondiente a 50 ciclos en un $\pm 10\%$, no será satisfactoria la reco -
nexión propuesta y en estas condiciones el motor deberá ser analizado -
para un reembobinado o en su defecto, un reemplazo de dicho motor, ne -
ro si se encuentra dentro de esta tolerancia, será necesario determinar
la potencia requerida a 60 ciclos mediante las siguientes relaciones para
tener más seguridad en cuanto a una posible reconexión. Dichas relacio -
nes serán:

$$1) \quad W_2 = W_1 \frac{RPM_2}{RPM_1}$$
$$2) \quad W_2 = W_1 \left(\frac{RPM_2}{RPM_1} \right)^3$$

$$3) \quad W_2 = \frac{1.2 \times W_1 \times P_2 \times V_2^2}{P_1 \times V_1^2}$$

$$\text{ó } W_2 = \frac{1.2 \times W_1 \times P_1 \times V_2}{P_2 \times V_1} \text{ para motores síncronos}$$

Nota. - En estas expresiones, los subíndices 1 indican que son términos a una frecuencia de 50 ciclos, y los subíndices 2 indican a una frecuencia de 60 ciclos.

La primera relación se usa en el caso de que la carga varíe directamente con la velocidad (carga constante).

La segunda relación se usa cuando la carga varíe con el cubo de la velocidad (carga variable).

La tercera relación se usa cuando hay un cambio en el voltaje de línea a 60 ciclos.

En los tres casos la potencia requerida a 60 ciclos no debe variar arriba de un $\pm 10\%$ con respecto a la potencia dada a 50 ciclos para que la reconexión sea satisfactoria.

B) REEMBOBINADO DEL MOTOR. La mayoría de los motores de 50 ciclos pueden ser reembobinados para operar a 60 ciclos manteniendo aproximadamente ya sea su par o su velocidad.

Al reembobinar un motor para mantener su par, el nuevo devanado del estator deberá tener un voltaje diferente por bobina, y al reembobinarlo para mantener su velocidad, el número de polos deberá ser aumentado de la misma manera que cuando el motor es reconectado.

Cuando un motor es reembobinado para un nuevo número de polos y su velocidad a 60 ciclos resulta menor que la velocidad original a -

50 ciclos y se requiere la misma potencia original, es necesario incrementar la densidad de flujo en los dientes del estator. La densidad de flujo en el diente para el nuevo embobinado debe ser incrementada proporcionalmente a la raíz cuadrada de la relación de las velocidades, pero normalmente no debe ser elevada arriba de 18 600 gauss.

En general, los motores se reembobinarán con el mismo tipo de devanado original, por ejemplo: un estator con devanado imbricado se reembobinará con devanado imbricado. La mayoría de los estatores de los motores son de devanado imbricado y prácticamente todos los rotores devanados tienen devanado ondulado.

También en este caso de reembobinado, como en el caso de reconexión, no se admite desbalanceo en una conexión serie-delta, entre dos deltas paralelas o entre los lados de cualquier circuito en paralelo. Hasta un 10% de desbalanceo puede ser aceptable en una conexión serie-estrella ó entre dos o más estrellas si sus neutros no están interconectados. Además el número de bobinas fuera de servicio no debe exceder del 8% del número total de bobinas ya que de serlo así, el motor no podrá operar satisfactoriamente a la potencia de diseño.

C) REEMPLAZO DEL MOTOR

Cuando un motor no pueda trabajar a una frecuencia de 60 ciclos, ni pueda ser reconectado ni reembobinado desde el punto de vista técnico y económico, entonces debe de ser reemplazado.

Los motores cerrados a prueba de explosión y a prueba de polvo, deberán ser revisados cuidadosamente para determinar que la potencia

cia original de diseño pueda ser obtenida a 60 ciclos sin exceder el aumento de temperatura para la cual está diseñado dicho motor.

D) CONVERSION DE LOS MOTORES SINCRONOS.

Los motores síncronos al efectuar un aumento del 20% en la frecuencia, pueden considerarse sin cambio si se cumplen las siguientes condiciones:

- Que no se desarrollen esfuerzos mecánicos excesivos al aumentar la velocidad.

- Que los pares característicos de este motor sean los adecuados para arrancar, acelerar e impulsar la carga a 60 ciclos.

- Las pulsaciones de corriente de alimentación no excedan los límites aceptables.

Cuando se determina que será imposible operar un motor síncrono a 60 ciclos sin cambio alguno, se deberá adoptar una de las siguientes alternativas:

- Cambiar de polos tanto el estator como el rotor.
- Cambiar de polos el estator y cambiar el rotor
- Reemplazar el motor.

El proceso del reembobinado y la reconexión de los motores síncronos es parecido al proceso efectuado en los motores trifásicos de inducción.

E) MODIFICACION DE LOS MOTORES MONOFASICOS. Si un motor de inducción monofásico no desarrolla el par suficiente en 60 ciclos, el estator deberá ser reembobinado con 9% menos de vueltas efectivas.

C A P I T U L O I V

SISTEMAS ELECTRICOS DE - CONTROL Y PROTECCION.

EQUIPO DE CONTROL.

La gran variedad de circuitos electrónicos en uso y de sus aplicaciones industriales hacen imposible un estudio particular para su cambio de frecuencia. Los circuitos electrónicos que contienen amplificadores, elementos lógicos y osciladores están por lo general alimentados con corriente directa proveniente de rectificadores que no son en sí mismos, sensibles a la frecuencia. Ciertos dispositivos de tiempo y circuitos energizados a frecuencia de línea pueden ser sensibles a la frecuencia. En general se deberá analizar todo dispositivo electrónico para determinar los componentes sensibles a la frecuencia.

A) RELEVADORES DE CONTROL.

Los relevadores de control son pequeños dispositivos usados en los sistemas eléctricos para funciones de control y de "interlock". La

corriente que los alimenta puede ser alterna o directa, proveniente de bobinas de voltaje de 6 a 600 Volts. Las capacidades de los contactos generalmente no exceden los 20 Amperes a 600 Volts. Algunos relevadores tienen contactos de mercurio y algunos están herméticamente sellados. Otros, están equipados con un diafragma neumático y un orificio, operando con un retraso de tiempo fijo o ajustado.

B) CONTACTORES.

Los contactores son parecidos a los relevadores excepto que están construidos para soportar corrientes mayores. Se usan para conexión, desconexión y control de motores, así como de circuitos eléctricos de todas clases, por ejemplo: circuitos de condensadores, de alumbrado, de calefacción o circuitos auxiliares.

Se emplean para mandos eléctricos o como aparatos de control remoto, especialmente en los casos en que sea necesaria una elevado número de operaciones. Están normalizados para varias capacidades hasta 1200 Amperes. Los contactores sostenidos mecánicamente están arreglados de tal manera que las bobinas del contactor se energizan sólo momentáneamente durante la apertura y cierre del contactor.

C) ARRANCAIDORES.

Existen 4 métodos de arranque fundamentalmente que se emplean de acuerdo con el motor empleado, las características de la carga y las condiciones de operación de la industria de que se trate:

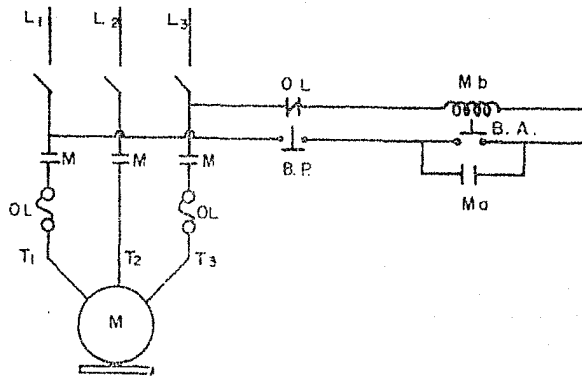
- 1) Arranque a Voltaje Pleno.
- 2) Arranque con Autotransformador.
- 3) Arranque Estrella Delta.
- 4) Arranque con Resistencia en el Primario.

A cada uno de estos métodos de arranque corresponderá un tipo básico de arrancador.

1. - Arranque a Voltaje Pleno. - Este tipo de arranque se efectúa directamente sobre la línea mediante arrancadores de línea, siendo el método de control más económico, pero está limitado por las compañías que suministran la energía eléctrica para motores de baja capacidad.

Un arrancador a voltaje pleno contiene el número requerido de contactores y relevadores de sobre carga del motor en una sola unidad (fig. 4-1) Los arrancadores para motores síncronos incluyen también dispositivos para aplicar y quitar la excitación de campo.

Normalmente un motor tipo "jaula de ardilla" cuando se arranca desarrolla un par de 150 a 250% del par de plena carga, y toma una corriente de arranque durante este periodo de tres a siete veces la corriente nominal. Debido a estas razones en aquellos casos en que el arranque no se puede efectuar directamente por que la corriente alcance un valor muy elevado, es necesario aplicar un voltaje inferior al normal, reduciendo así la corriente de arranque y el par.



M. - Contactos de línea (principales o maestros)

M_b. - Bobina de sello que acciona y mantiene cerrados M y M_a

OL. - Seguridad contra sobrecorriente

M_a. - Interruptor de sello del botón de arranque

FIG. 4 - 1

La corriente se podrá reducir lo más que permita el par, es -- decir, que el valor mínimo del par deberá determinar el voltaje que pue -- de aplicarse. El arranque a voltaje reducido se logra de varias formas:

2. - Arranque con Autotransformador. - Se logra con un auto -- transformador reductor con derivaciones. La mayoría de los autotrans -- formadores están provistos de tres derivaciones de tal manera que se -- pueda aplicar el 50%, 65% y 85% del voltaje nominal (Se arrancan moto -- res con mas de 100 HP).

3. - Arranque en Estrella Delta. - Consiste en conectar en es -- trella el devanado del estator durante el arranque y en delta durante la ope --

ración. Tiene la desventaja de que solo es aplicable a motores de 6 terminales y de pequeña capacidad.

4. - Arranque con Resistencia en el Primario. - Este método - - consiste en conectar el estator del motor a través de una resistencia en serie trifásica regulable de tal forma que cuando el motor se acelera la resistencia se pone en corto circuito en una o varias etapas quedando el motor conectado a pleno voltaje.

D) SOLENOIDES Y VALVULAS DE SOLENOIDE

Estos dispositivos usan la acción magnética de las bobinas de solenoide para mover émbolos que realizan trabajo mecánico, tal como abrir y cerrar válvulas. Se fabrican en una gran variedad de tamaños, -- capacidades y configuraciones.

E) FRENOS MAGNETICOS.

Los frenos magnéticos se usan principalmente en grúas, malacates y elevadores. Se utiliza un solenoide o el par de un motor para comprimir un resorte y soltar el freno. El enfrenado se consigue por la presión de un resorte sobre la zapata y de ésta sobre el tambor del freno.

EQUIPO DE PROTECCION ELECTROMAGNETICO

Los dispositivos de protección electromagnéticos son relevadores que actúan durante condiciones anormales o fallas, sacando del servicio al circuito, actuando sobre una alarma o ambas cosas a la vez. Deben ser altamente confiables por lo que se fabrican bajo estrechas toleran

cias y se calibran cuidadosamente.

Los relevadores de protección consisten de una o mas unidades básicas de detección de fallas, siendo éstas de dos tipos: magnéticas y de inducción.

A) UNIDADES MAGNETICAS

Las unidades magnéticas son generalmente de operación instantánea aunque a veces puede introducirse un retraso de tiempo con el uso de amortiguadores, resortes u otros dispositivos. La fuerza que opera se obtiene con un solenoide y un émbolo, una viga balanceada o un mecanismo del tipo de armadura articulada en el cual la acción magnética que causa la operación del dispositivo se balancea con la tensión de un resorte o por la acción magnética en oposición de una bobina de restricción. Ajustando la tensión del resorte o cambiando las derivaciones en las bobinas de operación o de restricción, la unidad puede calibrarse para cerrar sus contactos para cualquier valor deseado de la variable en cuestión (tal como corriente o voltaje) dentro de su campo de operación. Las mas comunes aplicaciones industriales son en relevadores de sobrecorriente, diferenciales y de sobre y bajo voltaje.

B) UNIDADES DE INDUCCION

El mecanismo de una unidad de inducción consiste en un disco de metal, copa o cilindro girando en un campo magnético y en contra de la tensión de un resorte; el arrastre es producido por imanes permanentes. El par de operación se obtiene por la interacción de la corriente en

el elemento giratorio y el flujo magnético producido por la variable en cuestión. Siempre existirá un retraso de tiempo. El valor de la variable al cual el mecanismo empieza a operar puede alterarse cambiando derivaciones en la bobina de operación y la cantidad de retraso de tiempo ajustada variando el ángulo que el elemento giratorio debe cubrir para cerrar los contactos de la unidad.

Añadiendo elementos tales como polos magnéticos adicionales, circuitos cambiadores de fase, filtros de secuencia y bobinas de polarización o de restricción el mecanismo puede responder a una gran variedad de variables de circuito, incluyendo corriente, voltaje, potencia, impedancia y potencia reactiva: tanto como el valor direccional diferencial y de secuencia de estas cantidades. Las aplicaciones industriales están generalmente limitadas a relevadores de sobre corriente, sobre y bajo voltaje, sobre-corriente diferencial y balanceo de fase.

EFFECTOS DEL AUMENTO DE FRECUENCIA EN EQUIPOS ELECTROMAGNETICOS DE CONTROL Y PROTECCION.

Los efectos del aumento de frecuencia en dispositivos electromagnéticos son debido a una combinación de :

- Aumento de la reactancia inductiva
- Disminución de la reactancia capacitiva
- Disminución de la densidad de flujo en un núcleo magnético.

A) ELECTROIMANES

La figura 4-2 muestra un dispositivo basado en la fuerza tractiva

va de un electroimán usado como mecanismo para operar contactos y es propio de dispositivos usados en muchas operaciones de control. Para su operación se hace pasar corriente por la bobina y la armadura es jalada magnéticamente cerrando el entrehierro.

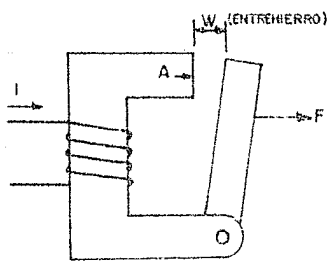


FIG. 4 - 2

Para calcular la fuerza ejercida por la armadura usaremos el método de desplazamientos virtuales y haremos las siguientes suposiciones:

- El flujo se mantiene constante -
- El movimiento es lento (restringido por la fuerza F)

Haciendo un balance de energía :

$$F dw + Ri^2 dt = \underbrace{0}_{v \approx 0} + \frac{B^2}{2 \mu_0} A dw + Ri^2 dt$$

$$F dw = \frac{B^2}{2 \mu_0} A dw \quad F \frac{A B^2}{2 \mu_0} = a B^2$$

Donde podemos observar que "B" es la densidad de flujo en el entrehierro y "a" es una constante que depende de los parámetros de diseño del dispositivo en particular. Esta fuerza es con la que el dispositivo empieza a operar; al ir cerrándose la armadura el entrehierro disminuye, la densidad de flujo crece y por tanto la fuerza será mucho mayor.

Cuando la frecuencia se aumenta a 60 ciclos el flujo en el núcleo magnético que se eslabona con la bobina disminuirá 16.7% y la componente magnetizante de la corriente en la bobina también disminuirá 16.7%. La corriente total de la bobina disminuirá en una cantidad que depende de la relación reactancia-resistencia de la bobina. Como un contactor o relevador de control se opera a voltaje de línea, un aumento en la frecuencia tendrá como efecto cambiar el voltaje al cual la bobina se energizará y desenergizará. La capacidad de máximo voltaje continuo de la bobina, basado en el calentamiento de la misma, también cambiará.

Como prácticamente toda la fuerza magnetomotriz Ni es usada en producir la diferencia de potencial magnético:

$$Ni = Hw = \frac{Bw}{\mu_0}$$

$$B = \frac{\mu_0 N i}{w}$$

Que sustituido en la ecuación anterior para la fuerza:

$$F = \frac{\mu_0}{2} \frac{A N^2 i^2}{w^2} = b N^2 i^2$$

Y si se desprecia la resistencia de la bobina la acción magnética de la bobina variará inversamente con el cuadrado de la frecuencia, como se muestra a continuación:

$$F = bN^2 \left(\frac{E^2}{X^2} \right) = cN^2 \frac{E^2}{f^2 L^2} = \frac{K}{N^2} \frac{E^2}{f^2}$$

Donde:

F - Fuerza magnética en Kg.

a, b, c, k- Constantes que dependen de la característica del circuito

f- Frecuencia

N- Número de vueltas en la bobina

I- Corriente en la bobina (Amp).

E- Voltaje en la bobina (Volts).

X- Reactancia de la bobina (Ohms).

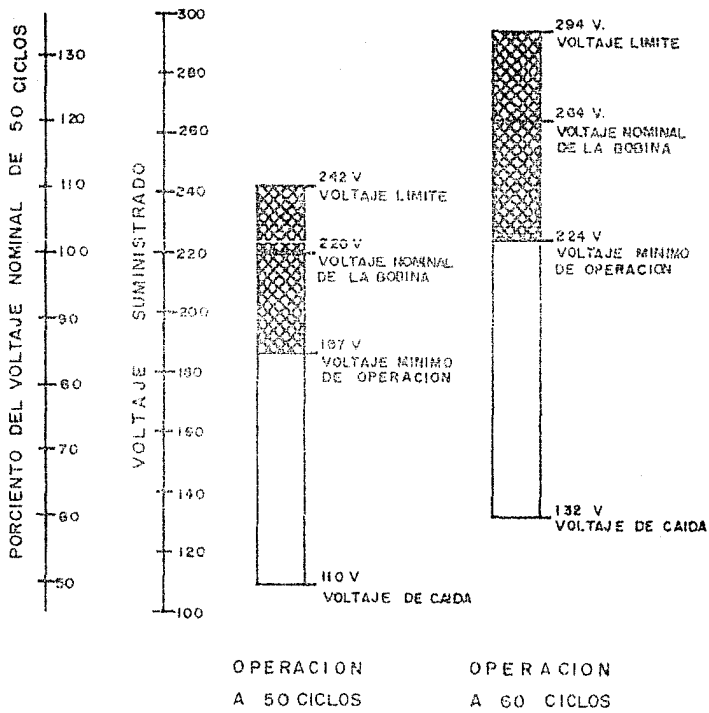
L- Inductancia de la bobina (Henries)

La figura 4-3 muestra los efectos de operar un contactor con -- una bobina diseñada para 50 ciclos, cuya relación reactancia-resistencia es mayor a 60 ciclos.

La unidad magnética de un relevador de protección instantáneo de sobrecorriente, sin embargo, opera con corriente de un transformador en el circuito protegido y el valor de ésta corriente no es afectado -- por un cambio de frecuencia. Un relevador de este tipo, por tanto, no - se verá afectado por el aumento de frecuencia.

B) SOLENOIDES

La fuerza tractiva de un solenoide blindado consiste en dos componentes. Esta fuerza queda expresada en la siguiente fórmula en la - - que la resistencia de la bobina se desprecia.



OPERACION A 50 CICLOS OPERACION A 60 CICLOS

CARACTERISTICAS DE OPERACION DE UNA BOBINA DE C. A., 220 VOLTS, EN 50 Y 60 CICLOS

FIG. 4 - 3

$$F = a' I^2 + a'' I$$

$$F = k' \frac{E^2}{f^2 N^2} + k'' \frac{E}{f N}$$

Donde:

F - Fuerza magnética en Kg.

a', k', a'', k'' - Constantes que dependen de las características del solenoide

I - Corriente en la bobina del solenoide

E - Voltaje en la bobina del solenoide

f - Frecuencia

N - Número de vueltas en el solenoide

El primer término del lado derecho de la ecuación anterior, es la fuerza en el entrehierro de los solenoides y es de importancia cerca del fin de la carrera del émbolo. Esta componente de la fuerza varía inversamente con el cuadrado de la frecuencia y es la misma expresión que para la acción de un imán de un contactor se vió en el párrafo anterior.

El segundo término es debido a la fuerza de atracción desarrollada entre el devanado del solenoide y el émbolo. es importante al principio de la carrera del émbolo y varía inversamente con la primera potencia de la frecuencia. Las magnitudes relativas de estas componentes dependen del diseño del solenoide, que afecta las constantes k' y k''. Si el solenoide no es blindado puede despreciarse el primer término.

Si el solenoide es el dispositivo de operación de un relevador de protección instantánea de sobre corriente en el solenoide es independiente del cambio de frecuencia. Consecuentemente la operación del relevador no se verá afectada por el aumento de frecuencia.

C) UNIDADES DE INDUCCION

Las unidades de inducción son las más ampliamente usadas para propósitos de protección en corriente alterna. Un relevador del tipo de inducción es un motor de inducción de fase partida con contactores. La fuerza que actúa es desarrollada en un elemento móvil, u otra forma de rotor de material conductor no magnético, por la interacción de flujos electromagnéticos con corrientes parásitas que se inducen en el rotor por estos flujos.

La figura 4-4 muestra como se desarrollo la fuerza en una sección de un rotor que es atravesado por dos flujos adyacentes. Se muestran varias cantidades en un instante cuando ambos flujos están dirigidos hacia abajo y están aumentando su magnitud. Cada flujo induce voltaje alrededor de sí mismo y fluyen corrientes bajo la influencia de estos dos voltajes. La corriente producida por un flujo reacciona con el otro flujo y viceversa, para producir fuerzas que actúan en el rotor.

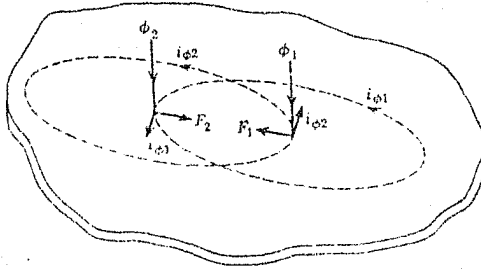


FIG. 4 - 4

Las cantidades involucradas en la figura pueden ser expresadas como sigue:

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_1 \text{ sen } \omega t \\ \phi &= \phi_2 \text{ sen } (\omega t + \theta) \end{aligned}$$

Donde θ es el ángulo de fase por el cual ϕ_2 adelanta a ϕ_1 .

Puede considerarse con un error despreciable que las trayectorias por las que circula la corriente del rotor tienen una autoinductancia despreciable y de ahí que las corrientes del rotor estén en fase con sus voltajes.

$$i_{\phi_1} \sim \frac{d\phi_1}{dt} = \phi_1 \omega \cos \omega t$$

$$i_{\phi_2} \sim \frac{d\phi_2}{dt} = \phi_2 \omega \cos (\omega t + \theta)$$

Se puede observar de la figura que las fuerzas están en oposi-

ción por lo que podemos escribir la ecuación para la fuerza neta como sigue:

$$F = (F_2 - F_1) \sim (\phi_2 i \phi_1 - \phi_1 i \phi_2)$$

Substituyendo valores:

$$F \sim w \phi_1 \phi_2 [\text{sen}(wt + \theta) \cos wt - \text{sen} wt \cos(wt + \theta)]$$

O sea:

$$F \sim w \phi_1 \phi_2 \text{sen } \theta$$

$$F = K w \phi_1 \phi_2 \text{sen } \theta \text{ ----- (1)}$$

Los diferentes tipos de estructuras usados se designan comúnmente como:

Estructura de Polo Sombreado

Estructura de Watthorímetro

Estructura de Copa de Inducción

Estructura de Bobina de Inducción Doble o Sencilla

Un relevador de una sola cantidad es actuado de una sola fuente de corriente o voltaje. Cualquiera de las estructuras pueden ser empleadas. La estructura de polo sombreado se usa solamente en relevadores de una sola cantidad. Cuando se usa cualquiera de las otras estructuras, sus dos circuitos se conectan en serie o en paralelo, y el ángulo de fase requerido entre los dos flujos se obtiene dando a los dos circuitos diferentes relaciones de X/R por medio de resistencia y/o capacitancia en combinación con uno de los circuitos.

De la ecuación (1) podemos deducir que el par desarrollado por la unidad de inducción de un relevador de protección con un solo devanado de operación para sobrecorriente es:

$$T = kf I^2$$

Y para sobrevoltaje:

$$T = kf \left(\frac{E^2}{f^2} \right) = k \frac{E^2}{f}$$

Donde:

T- Par de operación

K- Constante dependiente de las características del relevador

E- Voltaje de la bobina del relevador

I - Corriente de la bobina del relevador

f - frecuencia aplicada

El ángulo de fase es una constante de diseño por lo que se considera incluido en la constante K.

En el caso de sobrecorriente la corriente I se obtiene de un transformador de corriente y es proporcional a la corriente en el circuito protegido siendo independiente de la frecuencia. Por tanto el par de operación del relevador aumentará en un 20% y el tiempo de cierre de sus contactos disminuirá para cualquier disposición en particular. Habrá además un pequeño cambio adicional en los tiempos de operación del relevador debido a las diferencias a 50 y a 60 ciclos de la impedancia de la bobina del relevador y del devanado compensador del par, las cuales afectan a la constante K.

En el caso de sobrevoltaje el voltaje es obtenido de un transformador de potencial y es proporcional al voltaje del circuito protegido e independiente de la frecuencia. Por lo tanto el valor de E para el cual el relevador empieza a operar (pick-up) en 60 ciclos es aproximadamente 110% de su valor a 50 ciclos. Para cualquier valor de E dentro de su campo de operación, el tiempo de operación del relevador para una colocación dada a 60 ciclos será 120% de su tiempo a 50 ciclos, ya que un relevador de inducción opera a una velocidad directamente proporcional al par T.

En general si se usan devanados separados, el par de operación del relevador está dado por :

$$T = Kf I_1 I_2 \text{ sen } A$$

Donde

T- Par de operación.

k- Constante dependiente de las características del relevador

I_1, I_2 - Corriente en las respectivas bobinas

A- Angulo de fase entre los flujos producidos por I_1 e I_2

El efecto de un aumento de frecuencia en el tiempo de operación de un relevador de este tipo depende de la manera como las corrientes I_1, I_2 y el ángulo de fase A se obtienen. El efecto en el par T, y por tanto en el tiempo de operación, pueden encontrarse de la fórmula anterior determinando el efecto del aumento de frecuencia en I_1, I_2 y sen A separadamente. Esto puede hallarse de diagramas de circuito que muestren

el alambrado interno del relevador y su conexión a circuitos externos.

CONVERSION DE EQUIPO DE CONTROL ELECTROMAGNETICO

Los relevadores de control y los contactores de menor tamaño, arrancadores, solenoides, válvulas de solenoide y frenos electromagnéticos normalmente no requieren conversión para operar a 60 ciclos. La operación de un relevador de control a 60 ciclos será algo mas lenta que a 50 ciclos debido a la fuerza de atracción magnética reducida. Cuando el tiempo de operación es crítico el relevador puede tener que ser convertido.

A) CONVERSION DE RELEVADORES, CONTACTORES Y ARRANCADORES.

La conversión de relevadores, contactores y arrancadores será necesaria cuando su bobina no desarrolle la suficiente fuerza tractiva a 60 ciclos.

Como se vió anteriormente está dada por :

$$F = \frac{KE^2}{f^2 N^2}$$

Cuando la resistencia de la bobina se desprecia.

Esta fórmula muestra que cuando se aumenta la frecuencia a 60 ciclos la fuerza F puede ser restituida a su valor de 50 ciclos en las formas siguientes :

- Aumentando el voltaje 20%
- Reembobinando la bobina con 16.7% menos vueltas

- Quitando 16.7% de las vueltas de la bobina
- Reemplazando la bobina por una diseñada a 60 ciclos

Los dispositivos pequeños tendrán generalmente suficiente fuerza de atracción magnética para operar satisfactoriamente a 60 ciclos sin cambio.

Si se duda de la necesidad de una conversión se deberá realizar una prueba a voltaje reducido.

La tabla 4-1 muestra los procedimientos recomendados para -- convertir contactores y arrancadores de las capacidades mas comunes:

TABLA 4-1

Tamaño NEMA	00	0	1	2	3	4	5	6	7
Corriente Nominal	10	15	25	50	100	150	300	600	1200
Capacidad máxima Trifásica en HP									
110 V	3/4	1.5	3	7.5	15	25			
220 V	1	2	5	15	30	50	100	200	400
440 V	1	3	7.5	25	50	100	200	400	750
	sin cambio			Prueba y cambio - si es necesario		Reemplazar capas vueltas o derivación.			

El método de aumentar el voltaje es algunas veces deseable para la conversión de una máquina con controles complejos (tal como un -- elevador). Un autotransformador de la capacidad necesaria se usará para elevar el voltaje. Este método es rara vez la elección mas económica para una sola unidad.

La elección entre quitar vueltas, reembobinar o reemplazar bobinas se basará en razones económicas. Se deberá tomar en cuenta la construcción de la bobina, número de unidades involucradas, costo del trabajo y disponibilidad de bobinas de reemplazo.

En la práctica se usa generalmente 15% menos vueltas en vez del valor teórico de 16.7% ya que el efecto de la resistencia se despreció al desarrollar la fórmula.

Los arrancadores están provistos de relevadores de sobrecorriente que protegen al motor contra sobrecargas sostenidas. Estos relevadores son generalmente térmicos y no son sensibles a la frecuencia. Sin embargo cuando un motor se reconecta, reembobina o reemplaza para aumentar su par, o es reemplazado por otro de capacidad mayor, su corriente nominal quedará aumentada consecuentemente y las bobinas de calentamiento de los relevadores de sobrecorriente en el control de arranque pueden tener que ser reemplazadas con bobinas de capacidad mayor.

Todos los fabricantes de arrancadores proporcionarán una lista de sus bobinas de calentamiento disponibles, con el intervalo de corrientes del motor que cada una de ellas protegerá.

Los reactores usados para limitar la corriente de arranque de un motor en algunos arrancadores de voltaje reducido pueden tener que ser convertidos. La reactancia de tales unidades aumentará aproximadamente 20% cuando se aumenta la frecuencia a 60 ciclos. Esto reduci-

rá el par de arranque del motor en un 40% adicional mas allá de la reducción en par debida al efecto del aumento de frecuencia en el motor mismo. Si esto no es aceptable el reactor puede ser convertido quitando 15% de las vueltas, reembobinando con 15% menos vueltas o reemplazandolo con un reactor diseñado para operación a 60 ciclos.

B) CONVERSION DE SOLENOIDES Y VALVULAS DE SOLENOIDE.

El método de conversión es esencialmente el mismo que para los relevadores y contactores descritos en el párrafo anterior. Los dispositivos pequeños por lo general no requerirán conversión para operar a 60 ciclos. En casos dudosos se deberá efectuar una prueba a voltaje reducido.

Debe tenerse cuidado que las válvulas de solenoide sean probadas a la máxima presión de línea de los requerimientos de operación. Los métodos de conversión son los mismos que para los contactores, esto es: quitar 15% de la vueltas de la bobina, reembobinar con 15% menos a vueltas o reemplazar la bobina por otra diseñada para operación a 60 ciclos. La elección se hará en bases económicas.

C) CONVERSION DE FRENOS MAGNETICOS

Los mecanismos de freno operados por solenoides se convierten como se describió anteriormente. Algunos mecanismos de freno están actuados por motores de inducción, estos pueden ser convertidos por los métodos descritos para este caso.

CONVERSION DE EQUIPO DE PROTECCION ELECTROMAGNETICO

Los relevadores de protección están generalmente dispuestos para proporcionar protección y coordinación bajo cierta cantidad de condiciones específicas y estas condiciones pueden ser alteradas cuando se aumenta la frecuencia debido a la diferencia de impedancias del sistema a ambas frecuencias. Por esta causa los relevadores de protección deberán ser calibrados para satisfacer estas nuevas condiciones.

Los dispositivos de disparo de sobrecorriente en serie dados como parte integral de interruptores de bajo voltaje, son artículos sin cambio. Sin embargo, los accesorios de disparo en derivación deberán ser sometidos a una prueba de voltaje reducido en 50 ciclos para determinar si operarán satisfactoriamente a 60 ciclos.

REACTORES SATURABLES Y AMPLIFICADORES MAGNETICOS

Los reactores de núcleo saturable y amplificadores magnéticos son dispositivos de control usados extensamente en la industria moderna. Son medios eficientes de calentamiento resistivo tales como hornos de vacío, hornos infrarrojos y calentadores de proceso, así como para control de velocidad de motores de rotor devanado, arranque de motores de inducción y control de velocidad de transmisiones de velocidad ajustable.

A) TEORIA DE OPERACION

La siguiente descripción y teoría de operación de los reactores saturables y amplificadores magnéticos, puede ser de ayuda para enten-

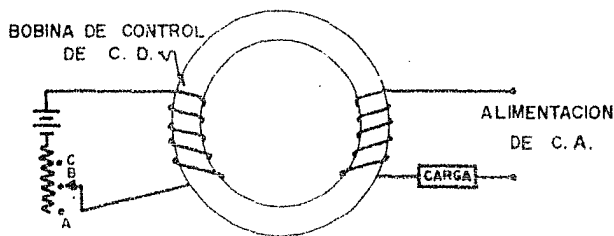
der el efecto del aumento de frecuencia en estos dispositivos.

1. - Reactores Saturables

La variación de la permeabilidad del núcleo con la densidad de flujo provee el principio del reactor saturable. Este dispositivo hace posible el control eficiente de grandes cantidades de potencia de c. a.

Un reactor saturable consiste de un núcleo magnético, una bobina de control de c. d. y una bobina de potencia de c. a.

El propósito de la bobina de control es proporcionar grados de variación en la saturación del núcleo. Como consiste de muchas vueltas de alambre, una corriente relativamente pequeña de c. d. introduce un aumento considerable de flujo en el núcleo, por lo que es necesario solamente variar el voltaje en la bobina de c. d. para hacer que la bobina de potencia de c. a. se comporte como una impedancia serie variable, proporcionando cantidades variables de voltaje a la carga de c. a.



REACTOR SATURABLE

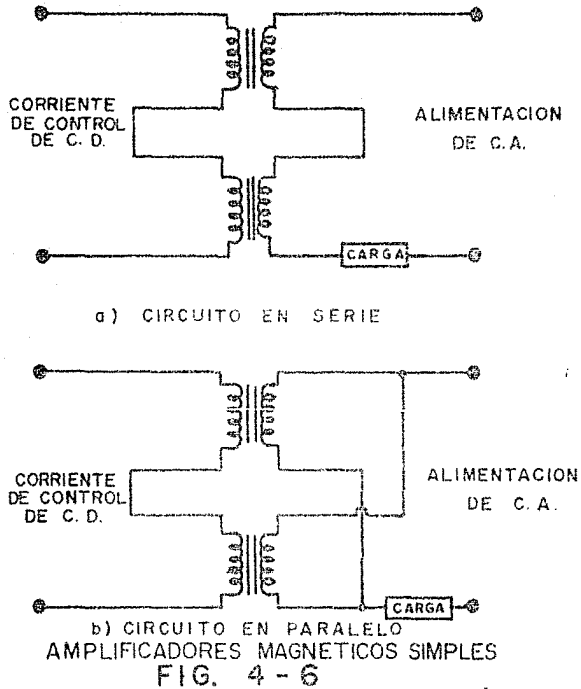
FIG. 4 - 5

La fig. 4.5 ilustra un reactor saturable simple cuando el reóstato se coloca en la posición A no hay voltaje o corriente disponible para la bobina de control de c.d. por lo que esta bobina no produce flujo. Si la máxima corriente de c.d. fluye en la bobina de control, el núcleo estará saturado con un flujo de c.d. Esto da como resultado una impedancia muy pequeña para el flujo de corriente alterna. La permeabilidad del núcleo es tan baja en esta región de saturación que la bobina de c.a. ofrece prácticamente la misma impedancia que una bobina con núcleo de aire de dimensiones similares.

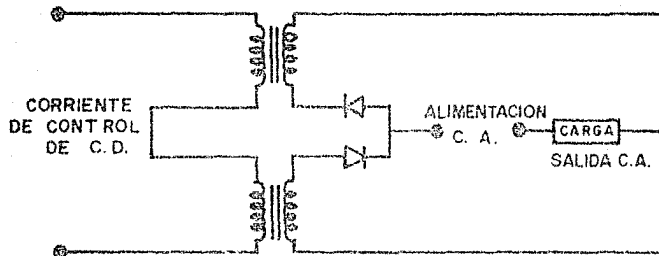
2. - Amplificadores Magnéticos

El amplificador magnético más simple consiste de dos reactores saturables con sus devanados de salida de c.a. conectados ya sea en serie en paralelo y sus devanados de control conectados en oposición serie para que los voltajes de c.a. inducidos en estos devanados se cancelen (fig. 4.6).

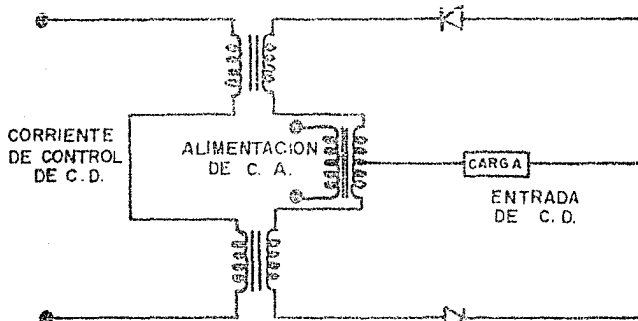
Este arreglo se usa principalmente en atenuadores de lámparas y control de cargas resistivas operando en corriente alterna y en algunas aplicaciones de medición. El voltaje de salida de la carga depende de la impedancia de los reactores saturables y por tanto del grado de saturación de sus núcleos como se describió en el párrafo anterior.



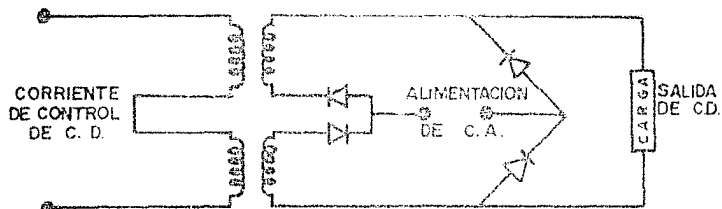
Un amplificador magnético auto saturable consiste de 2 reactores saturables de material magnético especial que tiene sus devanados de salida conectados al circuito de c. a. a través de rectificadores de tal manera que la corriente en la carga tiende a saturar los núcleos. Se usan varios arreglos de circuitos dependiendo de las características deseadas y de si la carga requiere potencia de ca. o de c. d. (fig. 4.7). Los amplificadores auto saturables son usados como componentes en sistemas de control especializados donde son importantes una alta ganancia y una baja respuesta de tiempo.



a) CIRCUITO EN PARALELO AUTOAJUSTABLE



b) CIRCUITO DE ONDA COMPLETA CON DERIVACION CENTRAL.



c) CIRCUITO DE ONDA COMPLETA TIPO PUENTE AMPLIFICADORES MAGNETICOS AUTOSATURABLES

FIG. 4 - 7

B) EFECTOS DEL AUMENTO DE FRECUENCIA DE 50 A 60 CICLOS

Los efectos del aumento de frecuencia de 50 a 60 ciclos son como sigue:

1. - Reactores saturables.

La reactancia inductiva de una bobina de c. a. esta dada por la ecuación:

$$X_L = 2 \pi f L$$

Cuando se aumenta la frecuencia a 60 ciclos la reactancia inductiva de la bobina de potencia de c. a. aumenta aproximadamente 20% debido al aumento en reactancia inductiva. Asi la caída de voltaje en la bobina de potencia también aumenta aproximadamente 20%. Consecuentemente el voltaje disponible para la carga será aproximadamente 20% menos a 60 Hz que a 50 Hz para cualquier condición dada hasta el punto de saturación.

2. - Amplificadores Magnéticos

El efecto de aumentar la frecuencia de 50 a 60 Hz en un amplificador magnético no saturable sencillo será el de disminuir el voltaje de salida en aproximadamente 20% para cualquier valor dado de la corriente de control de c. d. como se describió en el párrafo anterior. Este efecto básico es también cierto en el caso de amplificadores autosaturables. Sin embargo estos amplificadores tienden a operar con menos estabilidad y linealidad y mas alta ganancia que los amplificadores sencillos, y son generalmente, si no siempre, usados como componentes en sistemas de control mas o menos complejos. Por tanto, otros factores además del voltaje de salida pueden ser de importancia, tales como --

forma de onda, respuesta de tiempo y relaciones de fase que deben ser evaluados en relación con el comportamiento de todo el sistema de control.

C) CONVERSIONES

Las conversiones de reactores saturables y amplificadores magnéticos puede lograrse por uno de los siguientes métodos:

1) El voltaje máximo de salida puede restituirse a su valor original a 50 ciclos aumentando la corriente de c. d. en la bobina de control. Si se puede hacer ésto el núcleo estará más saturado y la impedancia de la bobina de potencia disminuirá. Consecuentemente el voltaje máximo disponible para la carga aumentará.

Sin embargo los reactores saturables y amplificadores magnéticos son generalmente diseñados de tal manera, que el máximo voltaje de salida se obtiene con el núcleo completamente saturado y la máxima corriente de c. d. que la bobina de control puede soportar, por lo tanto se obtiene una ganancia muy pequeña en la salida de voltaje con relativamente grande aumento de la corriente de c. d. en la bobina de control. Consecuentemente se debe consultar al fabricante o probar el equipo antes de recomendar este método de conversión.

2) El máximo voltaje de salida puede ser restituido a su valor original de 50 ciclos quitando aproximadamente 15% de las vueltas de la bobina de potencia. Esto restituirá la densidad de flujo, así como la permeabilidad a aproximadamente su valor original de 50 ciclos.

En ocasiones los núcleos de reactores saturables y amplificadores magnéticos son construidos con la bobina de control de c. d. devanada sobre la bobina de potencia. En este caso es prácticamente imposible quitar vueltas de la bobina de potencia.

Los métodos anteriores de conversión deberá analizarse cuidadosamente bajo bases técnicas y económicas para determinar sus ventajas. Muchas veces cuando el primer método no es aplicable, será más económico reemplazar los reactores que quitar vueltas.

C A P I T U L O V

INSTRUMENTOS Y MEDIDORES

Para comodidad los dividiremos en dos partes, una los instrumentos y medidores propiamente dichos, y otra que llamaremos sensores y dispositivos accesorios, además la primera parte la clasificaremos de acuerdo con su utilización en cinco diferentes tipos.

INSTRUMENTOS Y MEDIDORES

De acuerdo con su utilización se clasifican en:

- 1.) Indicadores
- 2.) De registro
- 3.) De control
- 4.) Integradores
- 5.) Telemedidores

Es imposible cubrir todos los diferentes tipos por ser muy numerosos, y particularmente en lo que concierne a controladores especial

les, diseñados para funciones específicas. Por otra parte el uso de las palabras "Instrumentos" y "Medidores" se traslapa y se presta a confusión, por lo que para nuestros propósitos les llamaremos simplemente medidores. Todos los sistemas de medición se deben examinar como unidad. A menudo los medidores o dispositivos externos a un sistema no son afectados en sí mismos por el cambio de frecuencia, pero pueden requerir un ajuste, para compensar los cambios sufridos en dispositivos externos al sistema.

De acuerdo con la clasificación anterior se hará una descripción de los medidores y posteriormente se darán las instrucciones para los cambios requeridos :

A) MEDIDORES INDICADORES.

Los medidores indicadores de cantidades eléctricas generalmente son calibrados en Volts, Watts, etc., y sus mecanismos de operación o movimiento dependen del flujo de corriente, estando la mayoría montados en tableros.

I. - Movimientos del Medidor

Los movimientos normales de los medidores de corriente alterna son :

a). - Medidores de hierro móvil.

El instrumento de hierro móvil, está basado en la repulsión magnética entre polos iguales: la corriente a medir se hace pasar a través de una bobina, la cual produce un campo magnético, que es directa-

mente proporcional a la intensidad de la corriente. Dentro del campo así formado se encuentran suspendidas dos armazones de hierro, una fija en una posición dada, y otra libre susceptible de moverse en determinada dirección, estando montada en ésta última la aguja del instrumento. El campo magnético energiza las armazones de hierro con igual polaridad, independientemente del sentido del flujo de la corriente en la bobina. Como polos iguales experimentan un rechazo, la armazón móvil se aleja de la armazón fija, lo que se traduce en un desplazamiento de la aguja del instrumento. El movimiento de rechazo ejerce una fuerza de rotación sobre un resorte y el desplazamiento será proporcional a la intensidad del campo magnético, la cual a su vez es función de la corriente en la bobina, es decir, la corriente por medirse.

b) Medidores de Bobina Móvil e Imán Permanente.

Estos están caracterizados por un imán permanente, estacionario, o un electroimán excitado con corriente directa. En un espacio cilíndrico entre las piezas polares, se encuentra un cilindro de hierro dulce, coaxialmente entre los polos norte y sur. La corriente a medir pasa a través de una bobina móvil muy ligera (tipo D'Arsonval) colocada en el entrehierro entre el magneto y el cilindro coaxial o a través de alambres tensados colocados dentro del campo magnético. Las líneas de fuerza son radiales perpendiculares a ellas y paralelas al eje se encuentran los conductores por los que circula la corriente. El par electromagnético resultante es balanceado por el par de un resorte.

c) Electrodinamómetros.

Estos instrumentos están basados en el mismo principio que el de la bobina móvil para corriente directa, excepto que el imán permanente es reemplazado por bobinas fijas. Constan de una bobina móvil, en la cual se encuentra montada la aguja indicadora, suspendida entre dos bobinas de campo conectadas en serie con ella. Las tres bobinas (dos de campo y la móvil) están conectadas en serie con los terminales del instrumento, de manera que la corriente a medir pase por las tres bobinas.

d) Medidores de Alambre Caliente.

Este tipo de instrumento utiliza el efecto de calentamiento que produce el paso de una corriente a través de una resistencia, este calentamiento produce a su vez la desviación de la aguja indicadora.

La desviación experimentada, depende del grado de dilatación de un alambre de alta resistencia, motivada por el efecto de calentamiento del alambre mismo cuando la corriente a medir pasa a través de él.

e) Medidores Termoeléctricos.

Estos constan de un termopar en un circuito secundario el cual es calentado por la corriente a medir, y por medio de un galvanómetro colocado en el circuito mencionado se mide la corriente.

Esencialmente, consta de un alambre de resistencia montado entre dos terminales, el cual se calienta en proporción directa con la intensidad de la corriente. A esta resistencia de calentamiento, se encuen-

tra conectado un pequeño termopar bimetálico, conectado a su vez con un dispositivo móvil para corriente continua muy sensible. La aguja experimenta una desviación proporcional con la cantidad de calor generado por el alambre de resistencia, la cual a su vez depende de la corriente que circula por él, es decir, la corriente a medir.

f) Medidores de Tipo de Inducción.

En los instrumentos de este sistema, para el desplazamiento del sistema móvil, se aprovecha el fenómeno de interacción de uno o varios flujos con las corrientes inducidas en el sistema móvil. Según el principio de funcionamiento, los instrumentos de inducción sólo pueden trabajar en corrientes alternas y se utilizan prácticamente en circuitos de corriente alterna de frecuencia industrial.

g) Voltímetros Electrostáticos.

Sus elementos de medición son superficies metálicas, aisladas, las cuales se cargan eléctricamente por el potencial que actúa entre ellas. Las cargas eléctricas ejercen fuerzas entre las superficies causando el desplazamiento de los elementos móviles provocando una contrareacción (de naturaleza elástica) en la estructura del instrumento. El desplazamiento es una medida de la fuerza de origen eléctrico e indirectamente de su fuerza de voltaje o carga.

h) Voltímetros de tubo al vacío

Esencialmente están constituidos por un puente de wheatstone en

el cual se encuentran un tubo al vacío de tres electrodos y un ampérmetro. El ampérmetro se localiza en la diagonal del puente, teniendo como función, medir el cambio en la corriente de placa, cuando la diferencia de potencial o magnitud a medir se aplica entre la rejilla y el filamento del tubo.

Los medidores pertenecientes al tipo de hierro móvil, y los de movimiento de inducción, son los únicos que pueden necesitar una recalibración debido a un cambio a 60 Hz. Todos los tipos restantes, están diseñados para una amplia banda de frecuencias, debido a lo cual se puede considerar que son insensibles a la frecuencia.

2. - Conversiones

Trataremos de considerar a los medidores que son más frecuentemente encontrados, y daremos las instrucciones necesarias tanto para convertir el equipo de medición como para su accesorio.

a) Ampérmetros :

Tipo de hierro móvil. - Para este tipo de ampérmetro, no se necesitará conversión, ya que estos medidores están normalmente diseñados para una banda suficiente de frecuencias. Sin embargo, los medidores que tienen escalas de 250⁰ tienen hierro adicional y si están diseñados específicamente para 50 Hz, se verán afectados por el cambio de frecuencia.

b) Voltímetros :

Tipo hierro móvil. - El error adicional de estos instrumentos debido al cambio de frecuencia es de un máximo de 3%. Esto depende del fabricante, y si los instrumentos están diseñados solo para 50Hz, no se han convertido y son conectados a la línea de 60Hz. Se recalibran solamente aquellos en los que un error de 3% más allá de la exactitud de diseño no es aceptable.

c) Wátímetros :

Tipo electrodinámico. - No se necesitará conversión, puesto que el movimiento está normalmente diseñado para una banda suficiente de frecuencias. Sin embargo, los medidores con escalas de 250⁰ y los cuales están específicamente diseñados para 50Hz deberán ser convertidos.

Tipo de bobina móvil e imán permanente (movimiento de C. D.).-

El movimiento del medidor no es afectado por el cambio de frecuencia, pero no sucede así con los transductores conectados externamente, debiendo ser reemplazados si están diseñados específicamente para 50Hz únicamente.

d) Vármetros:

Los vármetros son wátímetros calibrados en Vars, usando un transformador o reactor cambiador de fase externo en el circuito de potencia. El cambio de fase del potencial puede hacerse con conexiones del secundario del transformador de potencial.

Tipo electrodinamómetro. - Reemplazar el reactor conectado externamente si el dispositivo está específicamente diseñado para 50Hz. - Como en el wáttmetro, los medidores con escala de 250⁰ y específicamente diseñados para 50Hz. deben ser convertidos.

Tipo de bobina móvil e imán permanente. - Si el transductor y el reactor conectados externamente, están diseñados específicamente para 50Hz. hay que reemplazarlos.

e) Frecuenciómetros :

Tipo bobina móvil e imán permanente (movimiento de C. D.) : Reemplazar el transductor conectado externamente y la escala del medidor con una banda de frecuencias adecuada (por ejem. 55 a 65 Hz).

f) Medidores de factor de Potencia :

Tipo hierro móvil. - Los medidores Trifásicos de factor de potencia, normalmente, no requieren modificaciones. Se recalibran solo los medidores monofásicos, específicamente diseñados para 50Hz.

g) Sincronoscopios de corriente alterna :

Tipo hierro móvil. - Estos medidores, están siempre específicamente diseñados y calibrados para una sola frecuencia. Recalibre todos los medidores para operación a 60Hz. , y reemplazar cualquier reactor externo, diseñado para 50Hz. únicamente.

Las cantidades no eléctricas medidas con medidores pueden ser:

Presión, flujo, nivel, P H (concentración de iones de hidrógeno), densidad, temperatura, etc., de materiales. Color, par y muchas otras can-
tidades.

Muchos tipos diferentes y diseños de éstos medidores están en uso hoy en día, aún para mediciones idénticas. Todos ellos, sin embargo, pueden ser clasificados debido a su forma de operar como mecánicos y eléctricos.

h) Medidores indicadores mecánicamente operados.

Este tipo de medidores de parámetros no eléctricos, tienen mo-
vimientos operados mecánicamente y utilizan sensores externos (por ejemplo un sistema de medición neumático). Naturalmente, los medido-
res y dispositivos asociados, no son afectados por el cambio de frecuencia, por lo que no necesitan conversión.

i) Medidores indicadores eléctricamente operados.

Estos medidores de parámetros no eléctricos, normalmente uti-
lizan una bobina móvil o imán permanente, en combinación con un sensor externo ya que el movimiento es para corriente directa; debido a esto último, se necesita conversión. El sensor tiene la función de convertir el parámetro, en una señal en milivolts o de regular una señal eléctrica aplicada.

Los requerimientos de conversión serían únicamente en los sen-
sores, los cuales se tratarán posteriormente.

B) MEDIDORES REGISTRADORES:

En la práctica de las mediciones eléctricas, especialmente durante los estudios de distinto género, frecuentemente es necesario conocer no sólo el valor de la magnitud variable, medida en un determinado instante, sino además el carácter de su variación en el tiempo. Esta necesidad, también se presenta durante el control de diferentes procesos tecnológicos. Debido a todo lo anteriormente expuesto, se hace uso de instrumentos de medida especiales, que reciben el nombre de registradores. Estos medidores, son instrumentos que registran permanentemente, mediciones de cantidades eléctricas, y cantidades no eléctricas, tales como temperatura, presión, flujo, u otras variables de producción en industrias de manufacturas y procesos. Pueden clasificarse de muy variadas formas, para nuestros propósitos los clasificaremos atendiendo a la manera en que la medición es registrada:

1. - DE ESCRITURA DIRECTA
2. - CAMARA - OSCILOSCOPIO
3. - MAGNETICOS

1. - Medidores Registradores de Escritura Directa.

Estos registradores se diferencian de los indicadores por la presencia de dispositivos especiales, mediante los cuales llevan a cabo un registro gráfico, de señales eléctricas o no eléctricas, como una función del tiempo. Están compuestos esencialmente, del mecanismo de medición interna, el impulsor de la gráfica, sensores, y dispositivos externos.

a) Conversión del mecanismo de medición interna.

Generalmente los mecanismos más comúnmente usados para registradores de escritura directa son:

El que usa una estilográfica o pluma unida al movimiento de bobina móvil e imán permanente. En éstos instrumentos la variación de la magnitud a medir, se registra sobre papel diagramado especial, mediante una pluma solidaria al sistema móvil del elemento de medida.

El que usa un pequeño espejo unido a la bobina móvil, con un magneto permanente. En el entrehierro de las piezas polares del imán permanente se encuentra una bobina de una sola espira, formada de cinta elástica de bronce fosforoso ésta se encuentra tensada por un resorte y se apoya sobre dos prismas de material aislante. El espejuelo fijado sobre la bobina, sirve para la lectura luminosa y el registro fotográfico de la variación de la magnitud estudiada. Mediante el espejuelo y el dispositivo óptico, un pequeño desplazamiento lineal da como resultado otro desplazamiento considerable del rayo luminoso sobre la pantalla y la película fotográfica.

Al circular la corriente continua por la bobina móvil, se origina un par motor, bajo la acción del cual la bobina se desvía un cierto ángulo y, correspondientemente, el rayo luminoso reflejado por el espejo se desplaza sobre la pantalla (película). Si por la bobina circula corriente alterna, actuará sobre la misma un par motor alterno. Dado que la bobina

na posee una inercia muy pequeña, entonces por efecto del par motor --
alterno, oscilará a la frecuencia de la corriente alterna que circula por
él. En correspondencia, se desplaza linealmente también el rayo lumi-
noso reflejado por el espejo, el cual deja las marcas sobre la pantalla -
en forma de segmento recto, proporcional al doble de la amplitud de la
corriente.

El que usa un elemento sensible a la presión (fuente o tubo de --
Bourdon) que mueve una pluma. - Por ser sus dispositivos y movimientos
puramente mecánicos es decir no eléctricos solo lo mencionaremos.

Un Osciloscopio. - Esencialmente consta de una ampolla cónica
de vidrio con un ligero abombamiento en la base ensanchada. Dentro --
del tubo en el que se encuentran los electrodos metálicos se crea un al-
to vacío. La superficie interior de la base ensanchada de la ampolla es-
tá cubierta de una substancia especial luminiscente, que sirve de panta-
lla y tiene la propiedad de iluminarse en los puntos donde chocan los --
electrones libres emitidos por el cátodo al calentarse debido a la corrien-
te que circula por una espiral. Según la naturaleza de la substancia lu-
miniscente, cambia el color de fluorescencia de la pantalla. En los osci-
lógrafos se emplean luminóforos que provocan una fluorescencia de co-
lor verde cómoda para la observación visual, o de color violáceo, el - -
más conveniente para fotografiar la imagen.

El que usa una estilográfica o pluma unida a un potenciómetro -
en un servomecanismo de balanceo de voltaje. - Este utiliza un servome-

canismo que recibe la señal amplificándola, para que el medidor la registre mediante un balanceo de voltaje.

Solo los mecanismos de medición que reciben una señal de corriente alterna requerirán conversión.

b) Conversión del impulsor de la gráfica.

Los impulsores de gráficas para medidores registradores de escritura directa, son movidos, ya sea eléctricamente o mediante cuerda. Un impulsor de gráfica de cuerda no se verá afectado por un cambio de frecuencia. Los impulsores de gráficas por cuerda, se diseñan también acoplados con motores eléctricos, que tienen la función de darles cuerda. En general no se necesitará conversión ya que el aumento en velocidad en el motor que da cuerda no tiene ningún efecto en el funcionamiento del impulsor de la gráfica.

Los impulsores de gráficas eléctricos, pueden ser movidos por motores síncronos o universales. Los registradores de escritura directa con impulsores de gráficas, utilizan motor universal, cuando las magnitudes de las cantidades medidas son de importancia y el tiempo exacto en relación a las horas del día no es necesario. Como la velocidad de un motor universal no depende de la frecuencia sino del voltaje aplicado, en este caso no se requerirá ningún cambio.

Los registradores de escritura directa, utilizan un motor síncrono cuando el tiempo exacto en relación a las horas del día es necesari-

rio; en este caso deberá cambiarse el motor, ya que es necesario man tener la velocidad del papel de registro, en su valor original a 50Hz. Al Al gunos registradores de este tipo están fabricados de tal manera que so- lo los engranes necesitan ser reemplazados.

Los registradores de escritura directa, están hechos para grá- ficas circulares y para gráficas de tiras. Las primeras se utilizan pa- ra los casos de lentas variaciones de la magnitud a medir, como, por - ejemplo en los termógrafos. Al reemplazar el impulsor de medidores que usan gráficas circulares, el tiempo completo empleado en una revo- lución, de la gráfica del nuevo impulsor a 60Hz. debe mantenerse igual al tiempo empleado originalmente en 50Hz. El mismo requerimiento - - existe para los impulsores de gráficas de tiras.

Pueden encontrarse también, medidores registradores diseñados para 60Hz. , operando en sistemas de 50Hz. , en este caso las gráficas - de tiras han sido adaptadas mediante la reducción de la escala de tiempo, por lo cual para su correcta operación en 60Hz. solo deberán utilizarse gráficas normales para dicha frecuencia.

c) Conversión de sensores y dispositivos accesorios.

Esta conversión la trataremos posteriormente.

2. - Medidores Registradores Cámara - Osciloscopio.

• Estos medidores esencialmente constan de una cámara, el os--

ciloscopio y algún sensor externo y dispositivos accesorios. Estos medidores hacen un registro fotográfico de cantidades eléctricas. Las cantidades no eléctricas también pueden registrarse de esta manera, si previamente son convertidas a cantidades eléctricas mediante dispositivos accesorios.

a) Cámara.- Las cámaras cuya función es fotografiar la pantalla del osciloscopio, no son afectadas por el cambio de frecuencia.

b) Osciloscopio.- Estos tampoco son afectados por el cambio de frecuencia.

c) Sensores y dispositivos accesorios.- Los registradores - Cámara - Osciloscopio, frecuentemente tienen Timers u otros dispositivos accesorios, que sirven para iniciar automáticamente la operación de la cámara, y éstos dispositivos sí requieren conversión para cualquier cambio de frecuencia.

3. - Medidores de Registro Magnéticos.

Estos registradores, están compuestos del impulsor de la cinta, la cabeza de registro y equipo electrónico asociado. Estos medidores, tienen la función de registrar y guardar cantidades eléctricas y no eléctricas en cinta magnética, para después reproducir esta información, por ejemplo, conectados con registradores de escritura directa adecuados, para registrar cantidades no eléctricas.

a) Conversión del impulsor de la cinta

Generalmente éstos impulsores, son motores síncronos o de co rriente directa. Como ya se vió solo los motores síncronos son afecta- dos por el cambio de la frecuencia, en este caso la velocidad de la cinta magnética en operación a 60Hz. debe ser la misma que la original a --- 50Hz, lo cual se logra reemplazando el motor.

b) Conversión de sensores y dispositivos accesorios.

Esta conversión la trataremos al final, con el objeto de anali- - zarla más ampliamente por ser de bastante importancia.

C) MEDIDORES DE CONTROL

Estos reciben el nombre de controladores, los cuales son medi- dores diseñados para iniciar la regulación de cantidades eléctricas a ni- veles dados, o dentro de límites aceptables. Muchos de los controlado- res encontrados serán usados para controlar cantidades no eléctricas -- (tales como temperatura, flujo, PH, presión, etc.) regulando la posición de válvulas, arrancando y parando bombas etc. Los controladores pue- den ser, indicadores, de registro, o sin mecanismos de indicación o re- gistro, un ejemplo de éste último tipo es el medidor de tensión usado pa- ra regular la misma en los rollos de papel, textiles, etc. Estos tipos - de controladores constan de un transformador diferencial, en el cuál el núcleo de hierro móvil se varía de acuerdo a la tensión del rollo y la se- ñal eléctrica variada, salida del Transformador, se utiliza para contro-

lar la velocidad de los impulsores de los rodillos. El circuito utilizado para el control o la regulación de los controladores puede ser mecánico, neumático o eléctrico. En todos los casos, una señal de error para cualquier desviación en el punto de operación de la cantidad medida se transmite a un elemento externo de control final, el circuito de control eléctrico dentro del medidor puede constar de :

a) Interruptores de mercurio. - Estos actúan relevadores externos, válvulas de solenoide, equipo de calentamiento eléctrico etc. , y constan esencialmente de una ampollita de vidrio al vacío, en cuyo interior se encuentran los electrodos y el mercurio.

b) Relevador o relevadores. - Estos hacen que el elemento final, (tal como una válvula o transformador regulador de voltaje) se mueva en una dirección determinada hasta que sea obtenida la posición correcta, con el objeto de eliminar la señal de error.

c) Señal de salida, generada o regulada dentro del medidor, la cual varía con la cantidad medida y la cual es además amplificada, y, ó, utilizada para regular un elemento de control final cuya función es eliminar la señal de error.

C o n v e r s i ó n

El mecanismo indicador interno, impulsores de gráficas, sensores externos, y equipo accesorio son del mismo tipo que para medidores indicadores y de registro. La conversión de estas partes es como se detalla en las secciones correspondientes. El circuito de control asocia-

do con el controlador, se debe investigar para asegurar que su operación a 60Hz. será la misma que a 50Hz.

D) MEDIDORES INTEGRADORES

Los wathorímetros de corriente alterna, son los medidores integradores más extensamente usados. Estos integran la energía consumida en un circuito eléctrico en un periodo de tiempo específico.

1. - Teoría de Operación.

Su funcionamiento está basado en el principio de inducción y son esencialmente motores de inducción. El estator consiste de un electroimán; el rotor es un disco metálico montado en un eje: su dispositivo de amortiguamiento está formado por dos imanes permanentes en forma de U, estando de tal manera colocado, que el flujo de su entrehierro pasa a través del disco o rotor, conectándose un tren de engranes y carátulas al eje, cuya función es indicar la energía. El electroimán se encuentra montado cerca de una orilla del disco y está formado por dos devanados, uno de potencial y otro de corriente; el par se produce en el disco si los dos campos están fuera de fase entre ellos. El devanado de corriente es resistivo principalmente, y el de potencial es altamente inductivo, con su corriente atrás del voltaje aplicado por aproximadamente 90° , dando como resultado la condición de los campos fuera de fase. Como se necesita una fuerza retardatoria para el disco, ya que de otra manera el disco giraría, más y más rápido al aplicársele un par, hasta

que se desbocara, dando entonces una indicación errónea, se montan -- imanes permanentes de amortiguamiento en la orilla opuesta del imán de campo, cuya fuerza es proporcional a la velocidad del disco.

La fuerza impulsora ejercida por el electroimán, es proporcional a la potencia en el circuito externo. El disco gira a una velocidad -- que es proporcional a la potencia consumida; cada revolución que da el disco representa un número definido de watts segundos consumidos en el circuito, siendo el número total de revoluciones para cada período de -- tiempo una medida de los KWH totales usados.

Los wathhorímetros pueden tener un registrador de demanda. Es te generalmente funciona por transmisión directa al movimiento del watt-horímetro y a un motor síncrono de tiempo, teniendo además una aguja, - la cual se mueve sobre una escala graduada mientras el disco gira, quedando en la posición máxima cuando, al final de un intervalo de tiempo, - normalmente 15 ó 30 minutos, el mecanismo registrador de demanda se desengrana momentáneamente por medio del motor de tiempo y regresa a su posición inicial. El mecanismo de demanda realmente mide la ener-- gía en KWH ó WH consumidos durante el intervalo y la escala de demanda convierte ésta energía con el objeto de que el registrador indique la de-- manda promedio ya sean en KW ó en Watts durante el intervalo de tiempo. También se utilizan medidores que incorporan un registrador de deman- da al movimiento del wathhorímetro, para medir demanda únicamente, re biendo el nombre de medidores de demanda.

2. - Efectos del Cambio de Frecuencia.

Quando se eleva la frecuencia a 60Hz, la reactancia, de la bobina de potencial y el ángulo de desplazamiento aumentan. Se dice que un wathorímetro está "Sobreatrasado", cuando su velocidad es muy rápida con cargas de factor de potencia atrasado, y su velocidad es demasiado lenta con cargas de factor de potencia adelantado. Los errores son - despreciables para cargas con factor de potencia cuyo valor es o está - muy cerca de la unidad; sin embargo, con cargas cuyo factor de potencia es bajo, los errores son excesivos. El registrador de demanda, como se encuentra engranado con el movimiento del wathorímetro, se ve afectado, y la velocidad de su motor de tiempo aumentará en un 20%; debido a lo anterior la indicación de demanda sería demasiado alta para -- cargas con factor de potencia atrasado, y demasiado baja para cargas -- con factor de potencia adelantado, además, la demanda leería demasiado bajo pues el intervalo de tiempo será de solo 83% del normal.

3. - C o n v e r s i ó n

Estos medidores requerirán una recalibración con el objeto de - corregir cualquier error en el registrador de demanda, excepto el causado por el motor de tiempo, por lo que éste último deberá ser reemplazado o si es posible solo se reemplazarán sus engranes, para mantener el intervalo de tiempo a 60Hz. igual que el original a 50Hz.

E) TELEMEDIDORES

La Telemetría es un sistema para transmitir medidas, donde la indicación en el registro de la cantidad medida, se produce en un lugar lejano al punto donde se toma la lectura. Mediante este sistema se pueden medir diferentes magnitudes, tales como corriente, voltaje, potencia, presión, posición, flujo y muchas otras cantidades eléctricas y no eléctricas, en cuyos casos la información de una o más fuentes se mide en un punto de la central de control. Un sistema simple de telemetría lo podemos dividir en las siguientes cuatro partes :

a) Sensor.- Se le llama así, al detector de medición primario, localizado en, o cerca del punto en el que se va a efectuar la medición.

b) Transmisor.- Recibe este nombre, un aparato intermedio -- cuya función es, transformar los datos del sensor a una señal adecuada, y enviarla a un lugar remoto por medio de un sistema de transmisión.

c) Sistema de Transmisión.- Este está formado por el portador de onda, o el medio por el que los datos se transfieren de un lugar a otro alejado de éste.

d) Receptor.- Es el dispositivo final, el cuál debe ser adecuado para su función, que es la de registrar o indicar los valores de la cantidad medida o la iniciación del control.

1. - Generalidades

Los sistemas Motor - Generador autosincrónicos excitados monofásicamente, son ampliamente usados en sistemas de telemetría para -

medir presión, movimiento, Tensión, peso, nivel del líquido y otras cantidades no eléctricas, por medio del uso de enlaces mecánicos apropiados al generador o transmisor. Las máquinas autosincrónicas son más comúnmente conocidas por varios nombres comerciales como Selsyn, Synchro y Autosyn. En la siguiente discusión, la palabra específica "Servo" la usaremos para describir a éstas máquinas. En un sistema de telemedición, una unidad servo es operada mecánicamente en el punto de envío como un generador, recibiendo el nombre de transmisor, la otra unidad servo se opera en el punto de recepción como motor y se le llama receptor. El devanado de los polos de campo de las unidades servo, es conectado a una fuente de excitación monofásica de corriente alterna; los devanados secundarios trifásicos del transmisor se conectan con los correspondientes del receptor. Cuando al rotor del transmisor se le da un giro manual o mecánicamente, el rotor del receptor lo sigue a la misma velocidad y en la misma dirección.

2. - C o n v e r s i ó n

a) Conversión del servo

Las unidades servo son diseñadas para un alto par de arranque, ya que normalmente están siempre operando bajo condiciones de arranque. Al convertir la excitación de campo a 60Hz., las unidades diseñadas para 50Hz., perderán aproximadamente 30% de su par de arranque por las razones vistas en el capítulo de motores. Normalmente una reducción de ésta magnitud en el par no afecta a un sistema de telemetría ser-

vo, debido a que la carga en el receptor generalmente es muy pequeña. -
Todos los sistemas de telemetría servo se deberán analizar cuidadosa- -
mente, pues, cuando la carga es grande, el receptor puede no ser capaz
de poder seguir el movimiento del transmisor debido a la reducción su-
frida por el par. Lo mismo puede suceder cuando la cantidad medida es
tá sujeta a cambios rápidos. El cambio más económico para un siste--
ma de telemetría servo, es aumentar el voltaje de excitación del campo,
en un 20%, por medio de un cambio en las derivaciones del transforma--
dor, reemplazando el transformador, o instalando un autotransformador.

b) Conversión del equipo de telemetría

La conversión de los sensores o cualquier dispositivo accesorio
es tal como se indica en la sección correspondiente. Si un transmisor -
requiere una fuente de corriente alterna, se requerirá generalmente un -
reajuste o reemplazo dentro del mismo: por ejemplo, se pueden trans- -
mitir datos de un sistema de dos hilos, por una señal pulsante de corrient
te directa. La cantidad medida se transmite como una función del tiemp
o en forma de impulsos sucesivos de corriente directa. El tiempo utiliz
ado por cada pulso dentro de cada período en que la señal es transmitid
a, determina el valor de la lectura y el período del pulso está dado por
un motor de tiempo, el cual se debe reemplazar. En general, el sistema
de transmisión no se ve afectado por el cambio de frecuencia, debido a ---
que los circuitos utilizados son telefónicos, microondas, corriente por--
tadora, o circuitos de corriente directa.

SENSORES Y DISPOSITIVOS ACCESORIOS:

Un sensor es cualquier dispositivo que convierte un parámetro en una señal eléctrica o no eléctrica de tal manera que el parámetro pueda ser medido o controlado por un sistema de instrumentación. Los dispositivos accesorios son elementos intermedios dentro de un sistema de instrumentación.

Los sensores eléctricos, pueden convertir parámetros eléctricos en otra señal también eléctrica, pero más adecuada para efectuar la medición. Los transformadores de instrumento y transductores son sensores de éste tipo, siendo de los que necesitan conversión.

A) INSTRUCCIONES GENERALES DE CONVERSION

En primer lugar, determinar si un sensor o dispositivo accesorio, es afectado adversamente por el cambio de frecuencia (solo los dispositivos con alimentación de corriente alterna pueden ser afectados). Los sensores y dispositivos accesorios en sistemas de corriente directa, pueden también ser afectados, si requieren alimentación de potencia de corriente alterna.

En seguida, analizar todos los dispositivos involucrados con el objeto de determinar si habrá un error en la señal de medición después del cambio de frecuencia. Si no hay error en la señal, el dispositivo no necesita ser reemplazado.

Finalmente, cuando exista una señal con error después del cambio de frecuencia, hay que determinar si la señal con error será lineal -

o no lineal. Los dispositivos que causan una señal con error no lineal -- con el cambio de frecuencia, deben reemplazarse con unidades diseñadas para 60Hz. Generalmente se puede hacer un ajuste para corregir -- señales con error lineal, que no es necesariamente realizado sobre -- el dispositivo que causa el error, sino que se puede hacer en alguna otra parte dentro del sistema de instrumentación.

B) CONVERSION

1. - Sensor Generador.

Los sensores que generan su propia señal eléctrica, son usados para medir ciertos parámetros de gases específicos (PH por ejemplo). - El parámetro a medir no es eléctrico y hace que el sensor genere una señal eléctrica. Los sensores generadores no se ven afectados por el cambio de frecuencia ya que no requieren fuente externa de potencia eléctrica.

2. - Sensores Reguladores

Estos sensores varían una señal eléctrica aplicada cuando son -- actuados por el parámetro a medir. Los sistemas de instrumentación -- que incluyen un sensor regulador, pueden depender de una señal de entrada de voltaje constante. La corriente directa es usada a menudo por su confiabilidad. Cuando se aplica un voltaje de corriente directa, el medidor y sus componentes externos no se verán afectados por el cambio de frecuencia; en el caso de empleo como fuente de alimentación, el sistema de instrumentación se deberá investigar para cualquier cambio ---

en la frecuencia. Un transformador de voltaje constante y un rectificador pueden estar conectados en el circuito dentro del sensor o el medidor, siendo su conversión como se indicó en sus respectivos capítulos.

a) Resistores

Estos elementos se utilizan como sensores reguladores para medir temperaturas límites. El resistor sensible se encuentra localizado físicamente dentro o cerca del líquido, gas, etc. cuya temperatura se desea medir, estando conectado eléctricamente en un puente de wheatstone con movimiento para medidor. Las variaciones en la magnitud de la resistencia debidas a la temperatura son indicadas por el movimiento del medidor. Un sensor regulador, de resistencia, no se verá afectado por la frecuencia.

Los medidores indicadores de temperatura comerciales tienen un movimiento de medidor de corriente directa, conectado en un puente de wheatstone, todo lo cual es interno al medidor. El resistor sensible es externo, y el voltaje de la alimentación de potencia de corriente alterna es mantenido constante mediante un transformador de voltaje constante y un rectificador. Cuando la alimentación de potencia de corriente alterna se convierte a una frecuencia de 60Hz., el medidor se deberá recalibrar con el objeto de compensar el aumento sufrido en el voltaje de corriente directa de la alimentación, o también se puede reemplazar el transformador.

b) Celdas Conductivas

Estas celdas se usan como sensores reguladores en el mismo circuito que el del medidor de temperatura mencionado anteriormente, para medir la concentración de ácidos, contenido de sal en los alimentos y jugos, contenido de ceniza en el azúcar, concentraciones de detergente, y para otras aplicaciones industriales. La resistencia de la celda varía en función de la conductividad electrolítica de la solución. Las celdas conductivas en sí mismas no se ven afectadas por el cambio de frecuencia.

c) Transformadores diferenciales

Este transformador es otro tipo de sensor regulador. Es un transductor electromecánico, el cual produce una corriente alterna de salida variable, proporcional al desplazamiento de un núcleo móvil dentro de un campo electromagnético. El núcleo móvil puede usarse con una plomada para medir densidad de líquidos, o con uniones mecánicas adecuadas para medir desplazamiento, espesor, movimiento, fuerza, etc. Los sensores de éste tipo diseñados específicamente para 50Hz., deberán reemplazarse por unidades diseñadas para 60Hz.

3. - Transformadores de Instrumento

Estos transformadores son usados para reducir voltajes y corrientes primarios de corriente alterna y corriente directa a valores secundarios que puedan usarse sin peligro en un sistema de instrumentación.

a) Transformadores de corriente y potencial para corriente alterna.

Como se indica en la sección correspondiente, los transformadores de corriente y potencial, no se ven afectados suficientemente por el cambio de frecuencia, como para necesitar un cambio físico.

b) Transformadores de corriente y potencial para corriente directa.

Estos transformadores sí se ven afectados suficientemente en la mayoría de los casos, como para ser convertidos como se vio en el capítulo correspondiente.

4. - T r a n s d u c t o r e s

Su función es convertir señales eléctricas de corriente alterna a pequeñas señales de corriente directa, para determinar su magnitud, en medidores de corriente directa. La mayoría de los transductores son circuitos magnéticos sintonizados para una sola, o para una banda limitada de frecuencia, debiendo ser reemplazados con unidades de 60Hz. Esto es especialmente cierto para transductores de frecuencia.

5. - Dispositivos Accesorios.

Generalmente se usan transformadores de voltaje constante, los cuales pueden ser utilizados en circuitos para medición, con medidores indicadores de cantidades no eléctricas, registradores y controladores. Los transformadores mencionados se encuentran conectados externamenu

te al circuito de medición, con el objeto de proporcionar un voltaje constante de corriente alterna, y pueden ser de dos tipos:

a) Transformadores estáticos de voltaje constante sintonizados

Estos contienen un circuito sintonizado capacitivo e inductivo, su voltaje secundario de corriente alterna es constante y relativamente senoidal. Estas unidades generalmente son usadas en fuentes de potencia externas, donde éstas condiciones son un prerequisite.

b) Transformadores sencillos de baja potencia.

Este tipo de transformador, es diseñado para operar bastante arriba de la "rodilla" de la curva de saturación de su núcleo de hierro. Su voltaje de salida de corriente alterna es constante, aunque no es senoidal, es simétrico y se rectifica con el objeto de formar una fuente de voltaje de C. D. para funciones de medición.

Ambos transformadores son afectados por el cambio de frecuencia. Para su conversión, ver el capítulo correspondiente.

C A P I T U L O VI

EQUIPO DE ILUMINACION

TIPOS DE LAMPARAS ELECTRICAS

Se pueden clasificar las lámparas eléctricas en 2 tipos principales :

Lámparas Incandescentes

Lámparas de Descarga Eléctrica

Estas últimas se subdividen a su vez en :

Lámparas Fluorescentes

Lámparas de Vapor de Mercurio

Lámparas de Neón

Lámparas de Arco Abierto y Arco de Carbón

Lámparas de Arco Corto

Lámparas de Vapor de Sodio

Cada uno de estos tipos se estudiará para determinar las conversiones que sean necesarias efectuar en esos equipos con el cambio de frecuencia.

ILUMINACION CON LAMPARAS INCANDESCENTES

La lámpara eléctrica incandescente produce energía luminosa mediante un filamento metálico calentado a incandescencia por el paso de corriente eléctrica a través de él. Este filamento constituye una resistencia óhmica, por lo que se concluye que la lámpara no es afectada por el cambio de frecuencia.

Sin embargo, la lámpara generalmente se encuentra trabajando conjuntamente con otro tipo de aparatos, auxiliares, para lograr su funcionamiento correcto según el uso que se le quiera dar. Por ejemplo, la instalación puede incluir relevadores, contactores, medidores de tiempo, etc. Algunos de estos aparatos auxiliares pueden variar su funcionamiento con la frecuencia, alterando el de la instalación completa.

Al realizar el cambio de frecuencia, es preciso efectuar las conversiones necesarias en los aparatos auxiliares que contenga la instalación, de acuerdo con lo dicho para ellos en los anteriores capítulos.

Las instalaciones más importantes que usan lámparas incandescentes conjuntamente con equipo auxiliar, son las siguientes:

1. - Iluminación de Avenidas

a) en serie

Las lámparas se conectan en serie y son alimentadas por un transformador de corriente constante. De esa forma, reciben siempre la corriente nominal que es mantenida en forma constante por el transformador. Este transformador es controlado por medio de un contactor magnético, el cual a su vez es activado por medio de una célula fotoeléctrica o un control de tiempo (timer) situados junto o remotamente al transformador. Pueden tenerse también relevadores de protección.

Al efectuar el cambio de frecuencia, el transformador debe ajustarse modificando los contrapesos y realizando el ajuste preciso por medio de los tornillos de ajuste micrométrico dispuestos para ello, conforme a lo visto en el capítulo de transformadores. El contactor magnético y los relevadores son convertidos de acuerdo a lo señalado en capítulos anteriores. Los controles de tiempo deben reemplazarse o reajustarse. La célula fotoeléctrica, de haberla, no requiere conversión, pues no es sensible a la frecuencia.

b) en paralelo

Las lámparas se conectan en paralelo y pueden ser controladas solo por un interruptor, en cuyo caso no se requiere conversión, o pueden tenerse relevadores y controles de tiempo que deben ser modificados o reemplazados.

2. - Iluminación de Aeropuertos

El sistema de iluminación usado para señalamientos, envío de

mensajes, iluminación de pistas, etc., constituye una parte vital en el funcionamiento de un aeropuerto.

Los tipos de sistemas que pueden tenerse, así como su complejidad, varían con la clase de aeropuerto, pero los más importantes son éstos :

a) Sistemas que usan lámparas conectadas en serie.

El circuito de iluminación de las pistas de aterrizaje normalmente es del tipo serie, con un transformador de aislamiento en la base de cada lámpara y con el control del primario del transformador de corriente constante operado desde la torre de control.

Las señales de aproximación que se encuentran en las pistas, consistentes en luces de diferentes colores según la distancia en que están instaladas, son lámparas de alta intensidad conectadas en serie.

La conversión de estos sistemas es igual a la de la iluminación en serie de avenidas. Es preciso modificar el transformador de corriente, constante, los relevadores y bobinas de operación de contactores.

b) Faros rotatorios y unidades intermitentes

Son unidades que tienen como elemento auxiliar principal un motor síncrono. Son de este tipo los siguientes equipos :

Las lámparas intermitentes de arco corto de Xenon instaladas a ciertos intervalos en las pistas, usadas también como señales de apro

ximación. Los interruptores de intermitencia son controlados por motores síncronos.

Los interruptores de destello, usados para encender y apagar los faros señalamientos de peligro a una secuencia determinada. Constan de una leva impulsada por un motor síncrono, que tiene cierto número de lóbulos para activar los interruptores.

Los faros exploradores rotatorios, impulsados por un motor síncrono.

Estos equipos son convertidos a 60 ciclos, reemplazando el motor o efectuando modificaciones en las transmisiones mecánicas para conservar la misma velocidad original de 50 ciclos.

c) Unidades de intensidad variable

Son lámparas de alta intensidad que emplean un reactor de núcleo saturable accionado desde la torre de control, para variar su luminosidad. El reactor de núcleo saturable debe ser convertido de acuerdo con lo visto en el capítulo respectivo. Pueden encontrarse relevadores y contactores magnéticos que también requerirán conversión.

Generalmente las lámparas se encuentran montadas en un sopORTE móvil de modo que el haz luminoso pueda ser orientado por medio de la acción de algún mecanismo de control, que quizá necesite modificaciones.

3. - Señales de Tránsito y Anuncios Luminosos

Las señales de tránsito (semáforos), requerirán modificaciones en los controles de tiempo de las lámparas, que pueden ser accionados por motores síncronos o pueden ser controles electrónicos, a fin de conservar los mismos tiempos de encendido.

Los anuncios luminosos normalmente incluyen equipo como motores, relevadores, relojes, controles de tiempo, etc., para lograr efectos especiales, que necesitarán ajustes y modificaciones.

4. - Otras Instalaciones

Las instalaciones de iluminación de campos deportivos, patios de estacionamiento, edificios, talleres, etc., requerirán conversiones en los equipos de control, protección o auxiliares que incluyan, como relevadores, contactores, controles de tiempo, etc.

Los cines y teatros incluyen diversas instalaciones como anuncios luminosos e iluminación de la sala y el escenario. Se requiere de un control que permita atenuar gradualmente la luminosidad de la sala. Este control puede ir desde simples resistencias para lámparas individuales, que no necesitan cambios, hasta tableros de control provistos de reactores saturables que deben ser convertidos. La iluminación especial del escenario puede incluir también aparatos auxiliares diversos que sean sensibles a la frecuencia.

ILUMINACION CON LAMPARAS DE DESCARGA ELECTRICA

La energía luminosa en una lámpara de descarga eléctrica se produce por el paso de una corriente eléctrica a través de un vapor o gas, y no a través de un filamento como en el caso de las lámparas incandescentes. Se requiere de la aplicación de un potencial eléctrico que ionice el gas y permita que la corriente fluya entre 2 electrodos que se encuentran en los lados opuestos de la lámpara.

La lámpara de descarga eléctrica no es afectada en su funcionamiento por un cambio en la frecuencia de 50 a 60 ciclos (aunque algunas podrían presentar problemas al funcionar en frecuencias muy bajas, como 25 ciclos por segundo, por ejemplo). Sin embargo, estas lámparas presentan la variante de que requieren para su funcionamiento de un aparato auxiliar, un transformador o un reactor o balastro que suministre el voltaje adecuado y limite la corriente a través de la lámpara. Esto se debe a que las lámparas de descarga eléctrica tienen una característica negativa de resistencia, como se sabe, es decir, que al aumentar su temperatura disminuye su resistencia dando lugar a un aumento indefinido en la corriente que destruiría la lámpara, de no existir el reactor que la limitara. Tanto los reactores como los transformadores son afectados por la frecuencia, y su conversión se verá más adelante, al estudiar los circuitos especiales de funcionamiento de cada lámpara.

A) LAMPARAS FLUORESCENTES

La lámpara fluorescente consiste de un bulbo tubular con un

electrodo en cada extremo y en su interior tiene vapor de mercurio a baja presión, con una pequeña cantidad de gas inerte, Argón o Kriptón. Las paredes del tubo se hallan recubiertas con polvos fluorescentes. El - -electrodo es un filamento recubierto con un material emisor de electrones. Al aplicar el voltaje apropiado, el electrodo se calienta y emite - -electrones, que son lanzados con una gran velocidad, de un electrodo a otro de la lámpara. Este flujo de electrones atraviesa el vapor de mercurio, produciéndose energía luminosa.

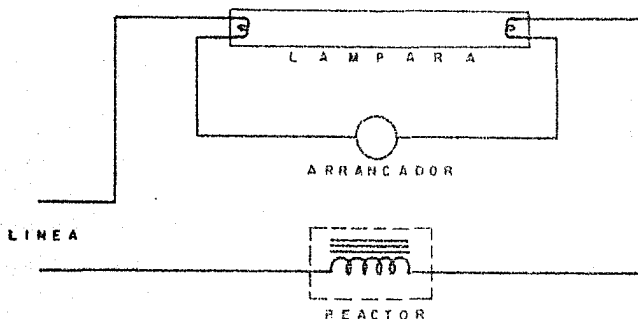
Estas lámparas se diseñan para operar en uno de los 3 tipos generales de circuitos de operación, que son:

1. - Circuito de precalentamiento
2. - Circuito de encendido rápido
3. - Circuito de encendido instantáneo

1. - Circuito de Precalentamiento

Las lámparas en este circuito requieren de un breve tiempo de precalentamiento antes de encender. El circuito externo a la lámpara - consta del reactor para limitar la corriente y un interruptor automático llamado arrancador. Inicialmente el interruptor automático cierra un - -circuito que permite que una corriente de calentamiento fluya a través de los electrodos en cada extremo de la lámpara. Después el interruptor se abre automáticamente y por la acción de la fuerza contraelectromotriz desarrollada en la inductancia del reactor, un pulso de alto voltaje es enviado a través de la lámpara, iniciándose el arco y el funciona- - -

miento de la misma. El circuito se muestra en la fig. 6-1:



CIRCUITO DE PRECALENTAMIENTO PARA UNA LAMPARA

FIG. 6-1

Existen varios tipos de arrancadores, pero todos ellos se basan en la acción de un elemento bimetálico que abre y cierra el circuito al calentarse o enfriarse. Incluyen un capacitor en paralelo con el bimetálico para eliminar la radio - interferencia. Su funcionamiento no es afectado por el cambio de frecuencia, porque el bimetal no es sensible a la frecuencia y el capacitor por la función que desempeña, no requiere de un mantenimiento estricto de determinada frecuencia.

El reactor o balastro usado puede ser de diversos tipos. En general, todos los reactores pueden consistir de una simple reactancia inductiva si el voltaje de la línea es suficiente para encender por si solo la lámpara, pero si se requiere de un voltaje de encendido alto, mayor que el de la línea, el reactor debe incluir además un autotransformador elevador.

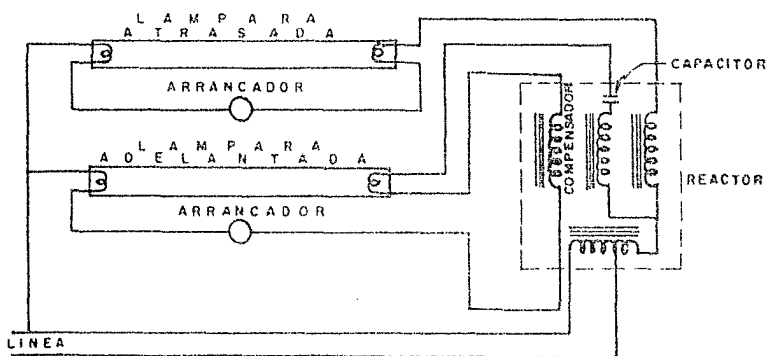
Las características eléctricas de los reactores, al trabajar con lámparas de descarga eléctrica son tales que producen un bajo factor de

potencia. Esta situación normalmente se corrige añadiendo capacitores en serie o en paralelo con la reactancia, generalmente interconstruidos dentro del balastro. También puede ser usado un reactor de bajo factor de potencia con un capacitor a través de la línea de suministro de voltaje para mejorar el factor de potencia.

Un reactor de bajo f. p. normalmente tiene 50 ó 60% de factor de potencia. Uno con corrección de f. p. proporciona 90% o más de f. p. atrasado, aunque habrá algunos corregidos para proporcionar f. p. adelantado.

Existen reactores para lámpara sencilla, y reactores multi-lámpara. En el circuito de precalentamiento, las lámparas pueden ser operadas con reactor para una sola lámpara o con reactor multilámpara. El reactor para una sola lámpara puede ser de bajo o alto f. p.

Cuando se conectan 2 lámparas, se hace con un reactor del tipo adelantado-atrasado, el cual proporciona un alto f. p. (entre 90 y 100%). Esta conexión en circuito adelantado-atrasado se muestra en la figura 6-2, a continuación:



CIRCUITO DE PRECALENTAMIENTO PARA DOS LAMPARAS

FIG. 6-2

Cada lámpara se conecta a un reactor separado, y un capacitor se conecta en serie con uno de los reactores para producir una corriente adelantada en una de las lámparas. Este tipo de reactor disminuye el efecto estroboscópico, debido a que las corrientes de las 2 lámparas están aproximadamente 115° fuera de fase y las fluctuaciones en la luz no ocurren simultáneamente.

Se requiere de una inductancia compensadora que proporcione la corriente de precalentamiento adecuada a la lámpara "adelantada". Esta inductancia se conecta en serie con el arrancador de la lámpara "adelantada" y solo funciona cuando la lámpara está "arrancando", desconectándose cuando el interruptor de arranque se abre.

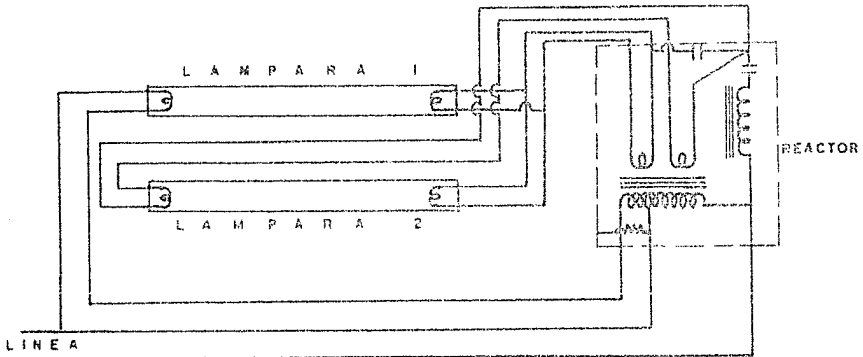
Todos los reactores son afectados por el cambio de frecuencia, pero muchas veces no de una manera crítica que amerite su reemplazo. Los reactores estudiados aquí y los que se vean en los siguientes circuitos serán analizados conjuntamente al final de la sección para determinar su funcionamiento con el cambio de frecuencia.

2. - Circuito de Encendido Rápido

En una lámpara de encendido rápido, los electrodos también son precalentados para poder iniciar el arco. El voltaje de precalentamiento es proporcionado por devanados especiales en el reactor y no existe ningún interruptor que abra el circuito de calentamiento cuando el arco se establece, de modo que una pequeña cantidad de corriente fluye por los electrodos continuamente mientras la lámpara está encendida. El encen

dido de estas lámparas es más rápido que el de las de precalentamiento.

Quando se tienen 2 lámparas de este tipo, se conectan en un circuito de encendido rápido de secuencia-serie, con un reactor de tipo secuencia-serie. Este circuito se muestra en la figura 6-3 siguiente :



CIRCUITO DE ENCENDIDO RÁPIDO PARA DOS LÁMPARAS
TIPO SECUENCIA-SERIE

FIG. 6 - 3

En éste circuito las lámparas encienden en secuencia y cuando alcanzan su brillantez luminosa, operan en serie.

Tan pronto como se tiene suficiente ionización por medio de la corriente de calentamiento de modo que el voltaje disponible del circuito aún abierto pueda establecer un arco, el encendido tiene lugar en 3 pa- - sos :

- a) El voltaje pleno del circuito abierto se aplica a la primera -- lámpara, iniciando el arco en esta lámpara.
- b) El flujo de corriente que se establece en esa lámpara es li- - mitado por una impedancia en paralelo con la segunda lámpara. El voltaje a través de esta impedancia en paralelo inicia el arco en la segunda -- lámpara.

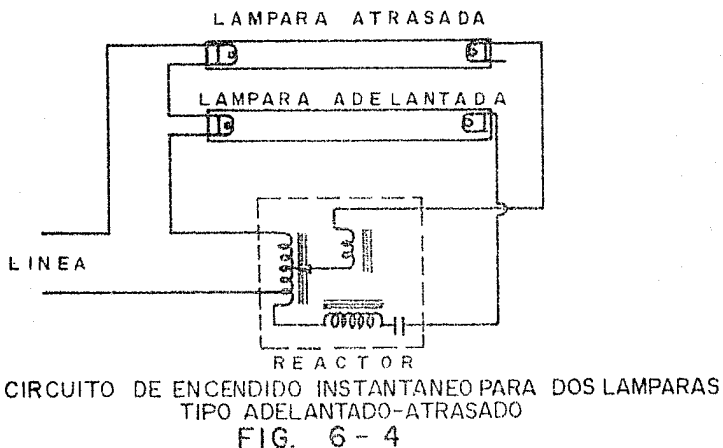
c) Las 2 lámparas trabajan en serie con corrientes sucesivamente mayores a medida que disminuye la impedancia de la lámpara, -- hasta que se establece la operación a cátodo caliente con la corriente no minal.

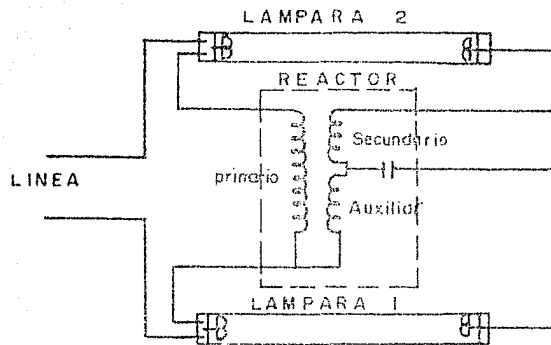
Existen también reactores para una sola lámpara en este tipo - de circuito.

3. - Circuito de Encendido Instantáneo.

Estas lámparas son encendidas directamente por la aplicación - de un voltaje suficientemente alto para iniciar el arco sin ningún preca-- lentamiento de los electrodos.

Cuando se usan 2 lámparas, se conectan en un circuito adelan-- tado-atrasado, como el de la figura 6-4, o en un circuito secuencia-se-- rie, mostrado en la figura 6-5:





CIRCUITO DE ENCENDIDO INSTANTANEO PARA
DOS LAMPARAS TIPO SECUENCIA-SERIE

FIG. 6 - 5

Quando se tiene un reactor del tipo secuencia-serie, la primera lámpara es encendida por el voltaje suministrado por el devanado auxiliar. El flujo de corriente resultante pasa a través del capacitor, cambiando la relación de fases entre el devanado auxiliar y el secundario, de modo que ahora los 2 voltajes se sumen. El voltaje resultante es suficiente para encender la segunda lámpara.

La descripción de los tipos de circuitos de la lámpara fluorescente y la breve explicación sobre su funcionamiento, permitirá analizar los reactores y determinar los métodos de conversión en cada caso, al realizar el cambio de frecuencia.

4. - Estudio de los Reactores

El reactor o balastro, como ya se ha dicho, puede ser una simple reactancia inductiva, o constar además de autotransformador elevador, dependiendo del voltaje requerido para el encendido, y del voltaje -

que suministre la línea.

Los tipos de reactores que pueden tenerse, según se desprende del estudio de los 3 circuitos, son:

Reactores para una sola lámpara, que pueden ser de alto o bajo factor de potencia, para cada uno de los 3 tipos de circuitos.

Reactores para dos lámparas, de tipo secuencia-serie, que pueden ser de alto o de bajo factor de potencia, y para circuito de encendido rápido o para circuito de encendido instantáneo.

Reactores para 2 lámparas, de tipo adelantado-atrasado de alto factor de potencia, para circuito de precalentamiento o para circuito de encendido instantáneo.

Todos los reactores son afectados por el cambio de frecuencia, debido a que su impedancia varía provocando un cambio más o menos fuerte en el flujo de corriente.

La lámpara fluorescente reduce su duración, y altera su luminosidad cuando se le suministra una corriente diferente de la nominal. El reactor puede sufrir daños si pasa por él una corriente mayor que la nominal. El modo como la frecuencia afecta a cada uno de los tipos de reactores se verá a continuación:

Los reactores de bajo factor de potencia constan solo de reactancia inductiva, por lo que ésta aumentará cuando la frecuencia sea aumentada. Un aumento en la reactancia provocará una disminución en el

flujo de corriente y por consiguiente en la intensidad luminosa de la lámpara. Sin embargo, el aumento de 50 a 60 ciclos por segundo no produce efectos críticos sobre la lámpara que ameriten un reemplazo del reactor, por lo que la instalación puede seguir funcionando en 60 ciclos sin ninguna modificación. Esto se aplica a circuitos que contengan reactor de bajo f. p. para lámpara individual, y a reactores para dos lámparas, de bajo f. p., tipo secuencia-serie para circuitos de encendido rápido o circuitos de encendido instantáneo.

Cuando se tienen reactores de alto f. p., el aumento de frecuencia provoca que el circuito inductivo del reactor disminuya el flujo de corriente y la intensidad luminosa, y que el circuito capacitivo aumente la corriente por disminuir su reactancia, aumentando la intensidad luminosa.

El resultado final que se tenga, aumento o disminución de la corriente, depende del balance de las reactancias inductiva y capacitiva dentro del reactor, de la conexión de ambos dentro del reactor, y de la conexión de la lámpara al reactor. En todos los casos, la impedancia se debe más a la inductancia que a la capacitancia. Los reactores originalmente corregidos para proporcionar un factor de potencia adelantado, pueden llegar a proporcionar un f. p. atrasado o unitario cuando trabajen a 60 ciclos.

Los reactores diseñados para 50 c. p. s., para operación en circuito adelantado-atrasado, no podrán trabajar en la frecuencia de 60 ci-

culos, debido a que la división de corriente en el circuito paralelo adelantado-atrasado se vuelve desbalanceada.

La parte "adelantada" del circuito disminuye su reactancia y -- aumenta la corriente, causando que esta sección del circuito se quemé. -- La parte "atrasada" aumenta su reactancia y la corriente disminuye, re -- duciendo la intensidad luminosa de la lámpara "atrasada"

Es necesario, entonces, al efectuar el cambio de frecuencia, -- cambiar los reactores de este tipo, por otros diseñados para operar en 60 ciclos. Esto se aplica a los reactores para circuito de precalenta -- miento adelantado-atrasado, y para circuito de encendido instantáneo -- adelantado-atrasado.

Los reactores de alto f. p. diseñados solo para una frecuencia -- de 50 c. p. s. , para una sola lámpara, y para 2 lámparas en circuito se -- cuencia-serie, se verán afectados por el cambio de frecuencia como se -- señaló antes. Debido a que los tipos de circuitos en estos reactores va -- rían con el fabricante, así como los materiales usados y las tolerancias que se tengan, el resultado del cambio de frecuencia sobre ellos podrá o no ser crítico para el funcionamiento del mismo y de la lámpara. En al -- gunos casos se verán menos afectados que los reactores no corregidos. Si el capacitor está en serie con la inductancia a fin de obtener un f. p. -- adelantado. puede llegar a tenerse una condición de resonancia en serie, impedancia mínima, y máxima corriente en la lámpara. Por el contra -- rio, si el capacitor está en paralelo con la inductancia, a fin de obtener

un f. p. atrasado, puede llegar a tenerse la condición de resonancia en paralelo, impedancia máxima y mínima corriente para la lámpara. Al aumentar la frecuencia, la caída de voltaje a través del capacitor será siempre igual o menor que la original, mientras que la caída de voltaje a través de la inductancia puede llegar a ser mucho mayor que la original.

La mejor forma de determinar si el cambio de frecuencia será crítico para cada modelo de reactor, es el efectuar una prueba de laboratorio sobre el mismo, y observar su comportamiento con la nueva frecuencia. Con los resultados de la prueba se sabrá si puede funcionar en 60 ciclos, o se requiere el reemplazo por otro diseñado para esta nueva frecuencia. El costo de realizar estas pruebas se justifica sobre todo si existe una gran cantidad de equipo cuyo costo de reemplazo sería muy elevado. Esto es aplicable a reactores de alto f. p. para una sola lámpara, para cualquiera de los 3 circuitos, y a reactores de alto f. p. para 2 lámparas de tipo secuencia-serie para circuito de encendido rápido o para circuito de encendido instantáneo.

En algunos casos en que la corriente y voltaje suministrados a la lámpara se vean reducidos por el aumento de frecuencia, quizá sea posible restablecer los valores originales por medio del uso de autotransformadores o capacitores especialmente diseñados instalados en el circuito externo al reactor y en serie con cada lámpara. El hacer esto, quizá pueda implicar un costo mayor que el de simplemente reemplazar el reactor.

Los arrancadores de un circuito de precalentamiento, no tienen problemas con el cambio de frecuencia, como ya se señaló.

En resumen:

Pueden trabajar en 60 ciclos, sin modificaciones, los reactores que no tengan corrección de factor de potencia, en cualquier circuito.

Los reactores diseñados solo para 50 ciclos del tipo adelantado atrasado usados en circuitos de precalentamiento o de encendido instantáneo, deben reemplazarse por unidades de 60 ciclos.

Los reactores con corrección de factor de potencia diseñados para 50 ciclos, para lámpara sencilla en cualquier circuito, o multilámpara tipo secuencia-serie en circuitos de encendido rápido o encendido instantáneo, deben someterse a pruebas de laboratorio para determinar su funcionamiento en 60 ciclos.

B) LAMPARAS DE VAPOR DE MERCURIO

La lámpara de vapor de mercurio consta también de 2 electrodos, uno a cada extremo de la misma. Estos electrodos son bobinas de tungsteno recubiertas con algún tipo de material emisor de electrones. En la lámpara se tiene mercurio vaporizado y una pequeña cantidad de gas Argón para facilitar la ignición.

También se requiere, para la operación de estas lámparas, de reactores para el control del voltaje y la corriente.

Algunas de ellas, como las lámparas solares de vapor de mercurio, tienen un reactor interconstruido, consistente en un filamento incandescente que actúa como elemento limitador de la corriente para el arco. Esto elimina la necesidad de usar otro equipo auxiliar, pero la eficiencia de la lámpara disminuye debido a la potencia consumida por el filamento. Este tipo de lámparas pueden trabajar indistintamente en 50 ó 60 ciclos, por constituir el filamento una resistencia óhmica.

La lámpara de vapor de mercurio puede trabajar o en una instalación en serie, o en una instalación en paralelo.

Para el caso de trabajar en serie, en vez de reactor cada lámpara o par de lámparas tienen un transformador, y todo se encuentra en un circuito en serie de C. A., alimentado por un transformador de corriente constante. Esta instalación es similar a la vista en lámparas incandescentes, y es preciso ajustar el transformador de corriente constante al efectuar el cambio de frecuencia, como se señaló en aquella parte.

Si las lámparas se conectan en paralelo, cada lámpara debe trabajar con un reactor. Estos, al igual que los reactores para lámparas fluorescentes, pueden o no tener corrección de factor de potencia, y pueden o no tener derivaciones de voltaje.

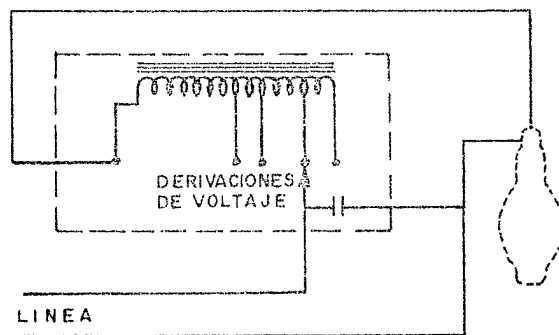
Se tienen también reactores para 2 lámparas, que son del tipo adelantado-atrasado y proporcionan un alto factor de potencia de aproximadamente 90%.

Se tienen 4 tipos principales de reactores para instalaciones en paralelo:

1. - Reactor Simple

Se usa en circuitos que proporcionan buena regulación y suficiente voltaje de línea para encender la lámpara, por lo que no necesita autotransformador elevador. Es el mas económico de todos y su función es solo limitar la corriente. Usualmente incluye un capacitor para mejorar el factor de potencia, y derivaciones de voltaje para distintos potenciales de línea.

En la fig. 6-6, a continuación, se muestra el diagrama del reactor y su conexión con la lámpara :



R E A C T O R S I M P L E

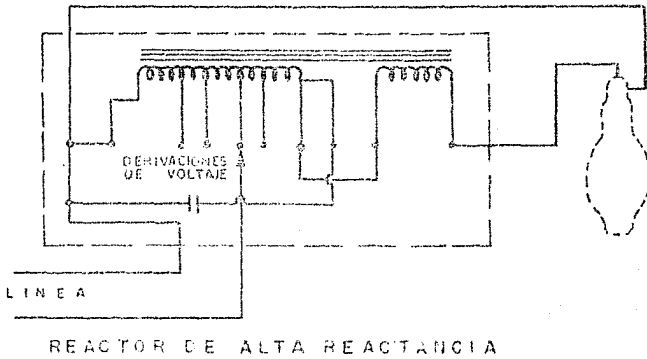
F I G . 6 - 6

2. - Reactor de Alta Reactancia

Se usa en circuitos que no tienen el suficiente voltaje de línea para poder encender la lámpara directamente. Incluye por lo tanto, un autotransformador elevador para proporcionar el voltaje necesario para el encendido, y una reactancia en serie para limitar la corriente. Reactores de este tipo con corrección del factor de potencia tienen unas pocas -

vueltas extras de alambre en el autotransformador y un capacitor en paralelo con el mismo.

Su diagrama y conexión se muestran en la figura 6-7:



REACTOR DE ALTA REACTANCIA

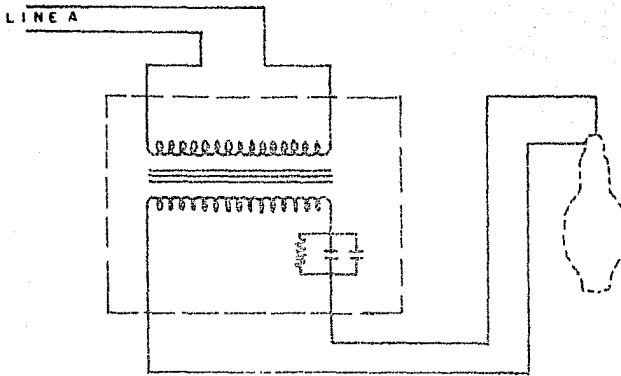
FIG. 6-7

3. - Reactor de Salida Regulada

Proporciona watts de salida constantes.

Se usa en instalaciones con baja regulación de voltaje, o en donde ocurren variaciones graduales de voltaje. Elimina la necesidad de escoger cuidadosamente una derivación de voltaje determinada según el voltaje de la línea. Permite que la lámpara reciba su corriente nominal, - aún cuando el voltaje de línea varíe tanto como un $\pm 13\%$.

Se muestra a continuación su diagrama, en la figura 6-8:

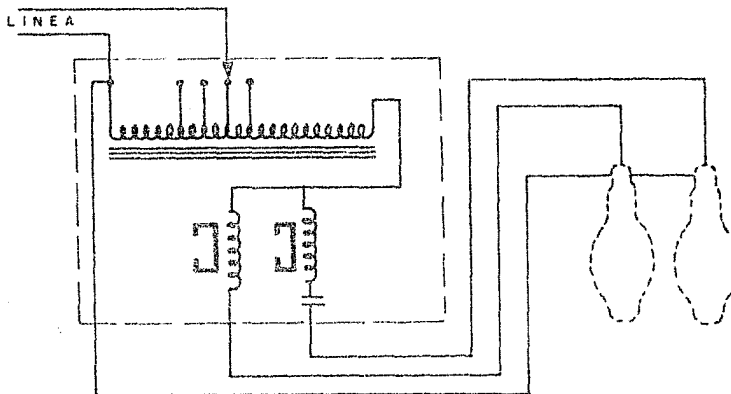


REACTOR DE SALIDA REGULADA (WATTS CONSTANTES)

FIG. 6-8

4 - Reactor para dos Lámparas, Adelantado-Atrasado

El uso de este reactor permite una instalación de bajo costo inicial. Suministra alto factor de potencia y reduce el efecto estroboscópico. Consiste, como se observa en la figura 6-9, de un autotransformador con derivaciones de voltaje y con su salida conectada a 2 circuitos - en paralelo, el primero es una inductancia en serie con una lámpara, y el segundo tiene una inductancia y una capacitancia en serie con la otra lámpara.



REACTOR PARA DOS LAMPARAS TIPO ADELANTADO-ATRASADO

FIG. 6-9

Todos los reactores son afectados por el cambio de frecuencia, pero debido a que la mayoría poseen derivaciones de voltaje, el ajuste de los mismos para trabajar en la nueva frecuencia, se simplifica.

La conversión del equipo de las lámparas de vapor de mercurio se indica a continuación:

Lámparas con Reactor Interconstruido - No son afectadas por el cambio de frecuencia, no requieren conversión.

Lámparas en serie - No poseen reactores. Su conversión consiste en modificar los contrapesos del transformador de corriente constante.

Reactores para una Lámpara con corrección de Factor de Potencia o sin Corrección - Los reactores que posean derivaciones de voltaje, se ajustan conectando a otra derivación para restablecer el voltaje requerido en la lámpara. Si el reactor no tiene derivaciones de voltaje, debe ser cambiado por otro diseñado para 60 ciclos. Esto se debe a que con el aumento de frecuencia aumentará su reactancia, alterando el funcionamiento de la lámpara, a diferencia del caso de la lámpara fluorescente, en que el cambio de frecuencia en un reactor de bajo f. p. no provocaba efectos críticos sobre la lámpara, que ameritaran su cambio.

Reactores multilámpara tipo Adelantado-Atrasado - Estos reactores deben ser reemplazados por unidades diseñadas para 60 ciclos, pues como ya se estudió, no soportan el cambio de frecuencia.

C) LAMPARAS DE NEON.

Este tipo de lámparas se usa extensamente en anuncios luminosos. Son operadas por transformadores de alto voltaje, que no requieren conversión. Sin embargo, normalmente trabajan conjuntamente con aparatos auxiliares propios de los anuncios luminosos que pueden ser afectados por el cambio de frecuencia, y requerir modificaciones.

D) LAMPARAS DE ARCO ABIERTO Y ARCO DE CARBON

Son lámparas usadas en los faros buscadores y proyectores de película. Operan con reactores o transformadores y no son sensibles a la frecuencia, pero pueden trabajar conjuntamente con equipo auxiliar que requiera conversión.

E) LAMPARAS DE ARCO CORTO

Proporcionan una fuente luminosa brillante, de alta intensidad. Pueden ser lámparas de Xenón, Argón o Mercurio-Xenón. Son usadas en faros buscadores, proyectores y servicios fotográficos. Utilizan un circuito que genera un pulso de alta frecuencia de aproximadamente 50 000 volts, capaz de encender o reencender la lámpara instantáneamente.

Estas lámparas se usan en los aeropuertos como unidades de destello en el sistema de señales de aproximación y trabajan con equipo auxiliar (relevadores, motores síncronos, etc.) que debe ser analizado y convertido.

F) LAMPARAS DE VAPOR DE SODIO

Son similares a las lámparas de vapor de mercurio y utilizan equipo semejante. Por consiguiente, lo estudiado para lámparas de vapor de mercurio es aplicable a las lámparas de vapor de sodio.

C A P I T U L O VII

EJEMPLOS DE CONVERSION DE EQUIPO

Como ya quedó establecido, con el cambio de frecuencia de 50 a 60 c. p. s. los motores eléctricos, que constituyen la máquina eléctrica de mayor utilización, aumentan su velocidad y disminuyen su par de arranque. Dependiendo del equipo impulsado, esto puede o no ser perjudicial. En la mayoría de las veces, la conversión mas económica con el propósito de mantener la velocidad, consiste en efectuar cambios mecánicos en la transmisión. Si ésta es transmisión por banda, cadena o engranes con centros móviles, por lo general es sencillo efectuar los cambios necesarios. Cuando se trata de equipos directamente acoplados al motor, o con transmisión a través de reductores de velocidad o por medio de engranes con centros fijos, resulta imposible o muy costoso efectuar cambios en la transmisión. En estos casos es preciso efectuar la reconexión, el redevando o el reemplazo del motor, como se señaló en el capítulo 3. Otras veces es factible efectuar la conversión en la

máquina impulsada, por ejemplo, recortando el impulsor de una bomba centrífuga. Solo cuando no sea posible realizar cambios mecánicos o -- modificar las máquinas impulsadas, deberá efectuarse la conversión del motor.

Cuando se requiera restablecer el par, será necesario reconectar o redevanar el motor, o aumentar el voltaje de alimentación.

En este capítulo se verán algunos ejemplos numéricos relativos a la conversión de motores eléctricos. Son casos en los que no es posible realizar cambios mecánicos en la transmisión o modificaciones en la máquina impulsada, o bien se requiere conservar el par de arranque, de modo que la conversión debe hacerse directamente en el motor, por medio de la reconexión o el redevando.

También se presenta un ejemplo, el número 5, que ilustra una forma económica y sencilla de efectuar la conversión de un grupo motor-generator, sin necesidad de reconectar o redevanar el motor, haciendo una modificación en la máquina impulsada, el generador.

Ejemplos numéricos sobre la conversión de los demás equipos tratados anteriormente no serán vistos debido a que basta con las indicaciones precisas de conversión dadas en cada capítulo para cada equipo (reemplazo de bobinas o reactores, eliminación de 15% de vueltas en los embobinados, reconstrucción o reemplazo de transformadores de voltaje constante, etc.).

EJEMPLO-1

Tenemos un motor-generador acoplado directamente el cual se usa para generar corriente directa. Los datos tanto del motor de corriente alterna como los del generador de corriente directa son :

MOTOR DE C. A.	GENERADOR DE C. D.
100 HP -----	Potencia ----- 60 Kw
440 volts -----	Voltaje ----- 250 volts
120 amp. -----	Corriente ----- 240 amp.
725 r. p. m. -----	Velocidad ----- 725 r. p. m.
3 fases -----	Fases ----- 3 fases
50 ciclos -----	Frecuencia -----

Se desea mantener en un $\pm 5\%$ la velocidad para que genere la misma potencia que produce a 50 ciclos cuando se efectúe un cambio a 60 ciclos en la frecuencia.

Como ya quedó establecido en la parte teórica correspondiente, la solución más adecuada y económica dado que no es posible efectuar cambios mecánicos por estar el motor y el generador directamente acoplados, será el efectuar la reconexión en los devanados del motor de C. A. Veamos si esta solución es factible de realizarse en este equipo: para esto son necesarios, además de los datos del motor de inducción de C. A. obtenidos anteriormente, los siguientes correspondientes al devanado del estator del motor de C. A. :

--Tipo de devanado -- Imbricado.

--Conexión -- Una rama paralela conectada en delta para un vol
taje de 440 v.

--Número de ranuras -- 135

--Lados de bobina por ranura -- 2

--Número de bobinas activas -- 135

--Paso del embobinado -- 1-14

--Además hay que observar las condiciones físicas y el estado -
en que se encuentra el material, como por ejemplo, si es resistente tan
to el enrollamiento como el aislamiento del conductor para ser utiliza-
do en caso de que sea incrementado considerablemente el voltaje.

Con los datos anteriormente mencionados estaremos preparados
para entrar a la obtención de la posible reconexión; para esto determine
mos primeramente el número de polos con los que está trabajando el mo-
tor a 50 ciclos.

Sabemos que

$$p = \frac{120 f}{r. p. m.}$$

substituyendo valores tenemos

$$p = \frac{120 \times 50}{725}$$

esto da un número de polos igual a 8

Como el motor se encuentra trabajando a una velocidad de 725
rpm correspondiente a una frecuencia de 50 ciclos y con 8 polos, ha - -

gamos las operaciones necesarias para que dicho motor sea reconectado a 10 polos y que su velocidad permanezca con las condiciones ya mencionadas pero ahora a una frecuencia de 60 ciclos. La velocidad en estas condiciones será;

$$\text{rpm}_1 = \frac{120 \times 60}{10}$$

$$\text{rpm}_1 = 720$$

pero tenemos un deslizamiento de

$$\frac{750 - 725}{750} = 0.03$$

por lo tanto la velocidad de régimen a una frecuencia de 60 ciclos tendrá un valor de

$$\text{rpm}_2 = 720 - 720 \times 0.03$$

$$\text{rpm}_2 = 720 - 21.60$$

$$\text{rpm}_2 = 698.40$$

Determinemos si esta velocidad cae dentro de la tolerancia que es de $\pm 5\%$.

$$\frac{\text{rpm}_2}{\text{rpm}} = \frac{698.4}{725}$$

$$\text{rpm}_2 = 0.96 \text{ rpm}$$

vemos que sí está dentro de tolerancia.

Una vez cumpliendo con esta condición, determinemos el voltaje requerido a 60 ciclos para restablecer el par mediante la siguiente relación:

$$E_2 = \frac{1.20 K_2 P_1 E_1}{K_1 P_2}$$

en donde K_1 y K_2 son factores de cuerda que se determinan por medio de la tabla 3-5 correspondiente a motores de inducción dada en la parte teórica. En nuestro caso estos factores tienen un valor de :

$$K_1 = 0.934$$

$$K_2 = 0.997$$

P_1 y P_2 son el número de polos a 50 y --
60 ciclos.

Substituyendo valores tenemos :

$$E_2 = \frac{1.20 \times 0.997 \times 8 \times 440}{0.934 \times 10}$$

$$E_2 = 450 \text{ volts}$$

Como ya quedó expuesto en la parte teórica, veamos si el resultado obtenido anteriormente está dentro de tolerancia con respecto al voltaje original.

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{450}{440} \quad ; \quad E_2 = 1.024 E_1$$

Vemos que sí está dentro de la tolerancia permisible.

Ahora, determinemos si la potencia desarrollada a 60 ciclos está dentro de tolerancia (también de un $\pm 10\%$ con respecto a la original) - cuando la carga varía directamente con la velocidad, que es nuestro caso.

$$W_2 = \frac{\text{rpm}_2 \times W_1}{\text{rpm}}$$

substituyendo valores tenemos

$$W_2 = \frac{698.4 \times 100}{725}$$

$$W_2 = 96$$

o sea que

$$W_2 = -4\% \text{ de } W_1$$

Por consiguiente como tanto el voltaje como la potencia requerida a 60 ciclos están dentro de tolerancia, la reconexión será satisfactoria.

En conclusión: este equipo podrá ser modificado para el cambio de frecuencia mediante una reconexión en delta y con un aumento de 8 a 10 polos en el motor de inducción de corriente alterna.

EJEMPLO-2

En este ejemplo se ilustra la conversión de un molino laminador, que como se sabe, básicamente consta de 2 rodillos a través de los cuales pasa la pieza por laminar. Esos rodillos son impulsados por un motor de inducción a través de un reductor de velocidad.

Con el cambio de frecuencia, el motor sufrirá un aumento de velocidad y una reducción del par de arranque. Como el equipo de que se trata requiere de un par de arranque considerable, no será aceptable la reducción del mismo, por lo que deberá efectuarse en el motor la con-

versión tendiente a conservar el par. El aumento de velocidad en el — equipo es tolerable, por lo que no se requerirá conversión para mante— ner la velocidad original, aunque si deberá efectuarse una prueba en el — motor para determinar si no sufrirá sobrecarga al trabajar en 60 ciclos.

Los datos del equipo son:

Molino:

Tamaño ----- 12 pulgadas

Motor:

Marca ----- Westinghouse

Potencia ----- 800 HP

Diferencia de Potencial ----- 2 200 volts

Corriente ----- 182 amperes

Fases ----- 3

Frecuencia ----- 50 Hz.

Velocidad ----- 730 rpm

Reductor de velocidad:

Marca ----- Reliance

Tipo ----- Herring-bone

Relación ----- 8. 3:1

El par puede ser restablecido aumentando el voltaje aplicado o — efectuando la reconexión del motor. A fin de ilustrar el método, se pre— ferirá la reconexión, considerando que por diversas razones sea más —

adecuado que aumentar el voltaje.

Para determinar si el motor se sobrecargará, se hace una prueba de carga en 50 ciclos, y luego se calculan los valores para 60 ciclos.

- 1) Obtención de los datos de prueba a 50 ciclos y 220 volts de la línea de C. A. del motor

Fases	Volts			Amperes			Watts	F. P.	r. p. m
	A y B	A y C	B y C	A	B	C			
Motor sin Carga	111	110.5	111	1.29	1.35	1.29	115	0.45	7.45
Motor a plena carga	108.5	108	108.5	3.5	3.7	3.5	550	0.84	7.30

Datos de los instrumentos usados en la medición:

Ampérmetro --- (0-5) Amp. --- R. T. C. -- 200/5

Vóltmetro ----- (0-150) Volts --- R. T. C. -- 2300/115

Wáttmetro ----- (0-1000) Watts -- R. T. C. -- 200/5,

R. T. P. -- 2300/115

Factorímetro -- (0-1) --- R. T. C. -- 200/5

R. T. P. -- 2300/115

R. T. C. = relación del transformador de corriente

R. T. P. = relación del transformador de potencial

2o.) Cálculo de la corriente de carga normal para 60Hz.

De los datos anteriores de lecturas y constantes de los transformadores de medición.

Datos de prueba a 50 Hz	Volts	Amperes	Kw	F. P.	
Condición en vacío	$E_o = 2216.6$	$I_o = 52.4$	$W_o = 92$	$\cos \theta_o = 0.445$	$\text{Sen} \theta_o = 0.894$
Condición de carga normal	$E_L = 2166.6$	$I_L = 142.4$	$W_L = 462.8$	$\cos \theta_L = 0.84$	$\text{Sen} \theta_L = 0.544$

$$\theta_o = 63.3^\circ$$

$$\theta_L = 33^\circ$$

en donde se usaron las siguientes fórmulas :

$$\cos \theta_o = \frac{W_o}{E_o I_o \times 1.2}$$

$$\text{Sen} \theta_o = \sqrt{1 - \cos^2 \theta_o}$$

$$\cos \theta_L = \frac{W_L}{E_L I_L \times 1.2}$$

$$\text{Sen} \theta_L = \sqrt{1 - \cos^2 \theta_L}$$

Consideremos la siguiente gráfica :

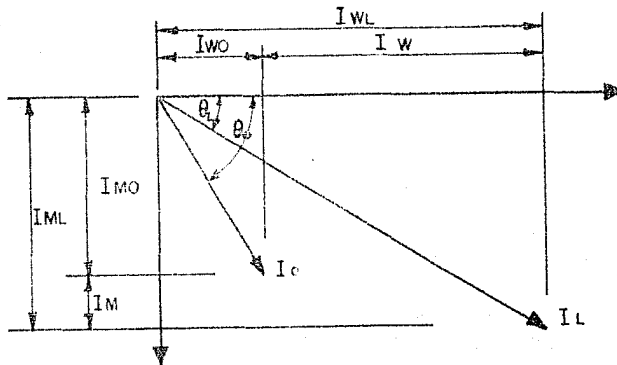


FIG. 7-1

De los valores de la tabla y de acuerdo con la figura 7-1 anterior :

Condición en vacío:

$$I_{M_0} = I_0 \text{ Sen } \theta_0 = 46.9 \quad \therefore \quad I_{M_0} = 46.9 \text{ Amp.}$$

$$I_{W_0} = I_0 \text{ Cos } \theta_0 = 23.6 \quad \therefore \quad I_{W_0} = 23.6 \text{ Amp.}$$

Condición con carga normal:

$$I_{M_L} = I_L \text{ Sen } \theta_L = 77.7 \quad \therefore \quad I_{M_L} = 77.7 \text{ Amp.}$$

$$I_{W_L} = I_L \text{ Cos } \theta_L = 127.7 \quad \therefore \quad I_{W_L} = 127.7 \text{ Amp.}$$

Calculando los valores de la corriente en 60 Hz:

$$I'_{M_0} = 0.8 I_{M_0} = 0.8 (46.9) = 37.5 \quad \therefore \quad I'_{M_0} = 37.5 \text{ Amp.}$$

$$I'_M = I_{M_L} - I_{M_0} = 77.7 - 46.9 = 30.8 \quad \therefore \quad I'_M = 30.8 \text{ Amp.}$$

$$I'_{M_L} = I'_M + I'_{M_0} = 30.8 + 37.5 = 68.3 \quad \therefore \quad I'_{M_L} = 68.3 \text{ Amp.}$$

$$I'_W = I_{W_L} - I_{W_0} = 127.7 - 23.6 = 104.1 \quad \therefore \quad I'_W = 104.1 \text{ Amp.}$$

$$I'_W = I'_W (1.2) \times \frac{V_{50}}{V_{60}} = 104.1 \times 1.2 \times 1 = 125 \quad \therefore \quad I'_W = 125 \text{ Amp.}$$

$$V_{50} = \text{volts de línea a 50 Hz.}$$

$$V_{60} = \text{volts de línea a 60 Hz.}$$

$$I'_{W_L} = I'_W + I_{W_0} = 125 + 23.6 = 148.6 \quad \therefore \quad I'_{W_L} = 148.6 \text{ amp.}$$

finalmente :

$$I'_{L60} = \sqrt{(I'_{W_L})^2 + (I'_{M_L})^2} = \sqrt{(148.6)^2 + (68.3)^2} = \sqrt{(2.21 + 0.469) \times 10^4}$$

$$I'_{L60} = 10^2 \sqrt{2.679}$$

$$I'_{L60} = 164 \text{ Amp. (corriente de línea a 60 Hz)}$$

De los datos de placa :

$$I'_{L50} = 182 \text{ Amp. (corriente nominal a 50 Hz)}$$

como $164 < 182$ es decir: $I'_{L60} < I'_{L50}$ el motor no se sobrecargará.

3o.) Sabiendo que el motor no se sobrecargará con el aumento de frecuencia a que va a ser sometido procederemos a Inspeccionar los devanados del estator para la reconexión del motor con objeto de restablecer el par.

Datos del devanado del estator :

Tipo del devanado -----	Imbricado
Conexión -----	2 Deltas en paralelo
Número de ranuras -----	144
Lados de bobina por ranura -----	2
Número de bobinas activas -----	144
Paso de bobina: ranuras	1-14
Número de Polos -----	8

Como el número de polos será el mismo, así como la magnitud de la diferencia de potencial de alimentación en 60 Hz, el factor de reconexión adecuado, con el objeto de restablecer el par debe ser;

$$E_{60} = 1.20 \times E_{50} \times C_F \quad \text{como} \quad E_{60} = E_{50} = 2200 \text{ Volts}$$

$$C_F = \frac{1}{1.20} = 0.833 \quad \therefore \quad C_F = 0.833$$

Con este factor y mediante la tabla 3-3 que relaciona las conexiones encontramos que el más cercano es $C_F = 0.87$ y relaciona 2 A en paralelo con 4 Y en paralelo. Es decir la nueva conexión para 60 Hz. será: 4 Y

Con la conexión mencionada para 60 Hz, $C_F = 0.87$, en consecuencia:

$$E_{60} = 1.2 \times 2200 \times 0.87 = 2300$$

$$E'_{60} = 2300 \text{ Volts (Alimentación en 60 Hz)}$$

Como $2420 > 2300 > 1980$, es decir, se encuentra dentro del límite $\pm 10\%$ de E'_{50} , la reconexión es satisfactoria.

Como la velocidad original en 50 Hz. es 730 r. p. m. y se incrementará 20% al cambiar la frecuencia de la alimentación a 60 Hz:

$$\text{Velocidad} = 730 \times 1.20 = 876$$

$$\therefore \text{Velocidad} = 876 \text{ r. p. m. (velocidad en 60 Hz)}$$

La potencia a 60 Hz será:

$$\text{de los datos de placa} \quad W_L = 462.8 \text{ KW} = \frac{462.8}{0.746} = 620 \text{ HP}$$

$$\therefore W_L = 620 \text{ HP (Potencia en 50 Hz)}$$

$$W'_L = W_L \times \frac{\text{r. p. m. } 60}{\text{r. p. m. } 50} = 620 \times \frac{876}{730} = 620 \times 1.2 = 744 \text{ HP}$$

$$\therefore W'_L = 744 \text{ HP (potencia en 60 Hz)}$$

Como $880 > 744 > 720$, es decir, está dentro del límite de $\pm 10\%$ de HP nominales a 50 Hz, la reconexión es satisfactoria.

Se recomienda poner junto a la placa original otra adicional con las nuevas características en el motor que para este ejemplo son:

800 HP

2300 Volts

60 Hz

876 r. p. m.

4 Y en paralelo

EJEMPLO-3-

Se tiene un compresor de aire impulsado por un motor de inducción tipo jaula de ardilla, de las siguientes características:

30 HP; 3 fases; 440 volts; 38 amps; 50 ciclos; 1460 r. p. m.

El compresor tiene señalado en su placa una velocidad nominal de 1200 r. p. m. y está acoplado directamente al motor, sin ninguna reducción mecánica entre ambos, lo que significa que actualmente trabaja a una velocidad mayor de la de régimen. Esto trae como consecuencia que se tenga un desgaste mayor que el normal y se requiere mantenimiento excesivo.

Cuando se efectúe el cambio de frecuencia, el problema se agudizará, pues el compresor no soportará el aumento de velocidad. Es imprescindible, por lo tanto, efectuar las conversiones necesarias para mantener la velocidad de 50 ciclos, o, mejor aún, para obtener en 60 ciclos la velocidad nominal del compresor. Debido a que el motor está acoplado directamente al compresor, no es posible efectuar la conversión por medios mecánicos, sino que es necesario efectuarla directamente en el motor.

La conversión mas económica será efectuar la reconexión del motor para aumentar el número de polos. Sin embargo, mediante una inspección del embobinado se observa que el devanado es de tipo ondulado, por lo que no es posible efectuar la reconexión, de modo que es preciso redevanar el motor para aumentar el número de polos.

De la tabla 3-3 de velocidades síncronas, se observa que el motor del compresor es de 4 polos. Reembobinando a 6 polos obtendremos la velocidad correcta en 60 ciclos.

La velocidad de sincronismo a 50 ciclos y con 4 polos es de 1500 r. p. m. La velocidad a plena carga es 1460 r. p. m. El deslizamiento (S) es :

$$S = \frac{1500 - 1460}{1500} = 0.0266 = 2.66\%$$

Con 6 polos y a 60 ciclos, la velocidad de sincronismo será de 1200 r. p. m. A plena carga, puesto que (S) es el mismo:

$$1200 \times 0.9734 \doteq 1170 \text{ r. p. m.}$$

Esa será la velocidad con que trabajará el compresor, es decir, rebobinando a 6 polos obtendremos la velocidad de régimen en 60 ciclos.

El rebobinado debe ser tal que se conserve la potencia original del motor, aumentando la densidad de flujo en los dientes del estator, como se indicó en el capítulo 3.

Inspeccionando el devanado original se obtienen los siguientes datos :

Número de ranuras (S) ----- 60
 Alambres por ranura (T₁) ----- 10
 Calibre (C₁) ----- 2 mm. diam, doble
 Devanado ondulado en delta para 440 volts.
 Paso de bobina de 15 dientes; bobina de ranuras 1 a 16.
 Dos lados de bobina por ranura.
 60 bobinas activas

Dimensiones del estator: (ver figura 7-2)

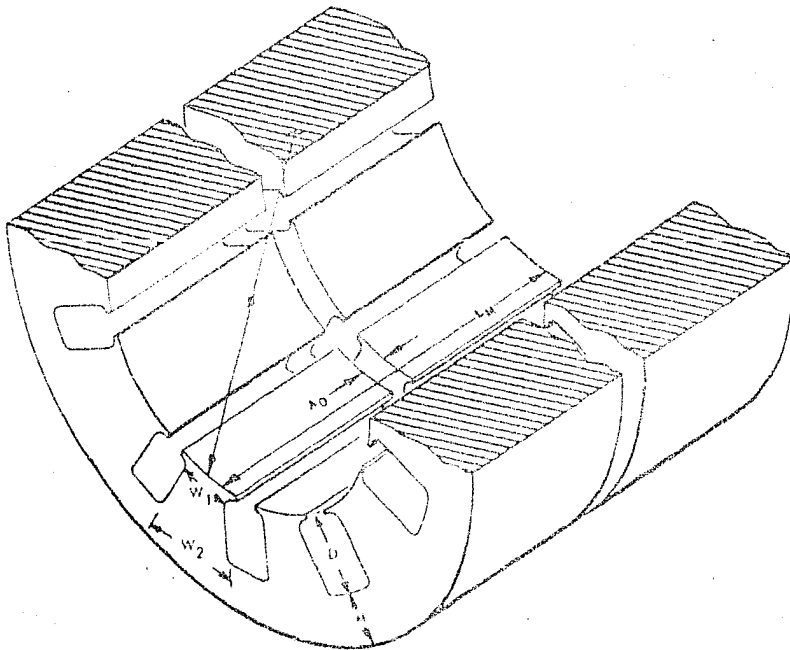
Diámetro interior ----- 25.4 cm
 Longitud total (L_M) ----- 13.4 cm
 Abertura para ventilación (A_O) ----- no tiene
 Longitud neta (L), con un factor
 de hacinamiento 0.95 (L_M - A_O) = 12.7 cm.
 Ancho mínimo de diente (W₁) ----- 0.56 cm.

Ancho máximo de diente (W_2) ----- 0.68 cm

Profundidad mínima del hierro

atrás de los dientes (M) ----- 3.18 cm

DIMENSIONES DEL ESTATOR PARA MOTOR DE C.A.



- ϕ = Diámetro interior
- W_1 = Ancho mínimo de diente
- W_2 = Ancho máximo de diente
- M = Profundidad mínima del hierro posterior
- L_M = Longitud total
- L = Longitud neta = $K_S (L_M - A_0)$
- A_0 = Abertura para ventilación
- K_S = Factor de agrupamiento = 0.95
- D = Profundidad de ranura

FIG. 7 - 2

Las especificaciones originales del motor son:

30 HP ; 4 polos (P_1) ; 1460 r. p. m. (N_1) ; 440 volts (E_1) ;

38 amps (I_1) ; 50 ciclos (f_1)

Una vez rebobinado, debe tener las siguientes especificaciones:

30 HP ; 6 polos (P_2) ; 1170 r. p. m. (N_2) ; 440 volts (E_2) ;

38 amps (I_2) ; 60 ciclos (f_2)

A fin de conservar la potencia original y la misma elevación de temperatura, el nuevo devanado debe cumplir varios requisitos, para lo cual se efectúan los siguientes cálculos :

A) DEVANADO ORIGINAL

1. - Factor de Fase (Y_1)

por estar el devanado en delta, $Y_1 = 1.0$

2. - Ranuras por Polo y Fase

$$\text{ranuras por polo} = \frac{S}{P_1} = \frac{60}{4} = 15$$

$$\text{ranuras por polo y fase} = \frac{15}{3} = 5$$

3. - Area de Dientes, por Polo (A_1)

$$A_1 = \frac{S}{P_1} L \times W \quad \text{cm}^2$$

$$A_1 = \frac{60}{4} \times 12.7 \times 0.56$$

$$A_1 = 107 \text{ cm}^2$$

4. - Densidad de Flujo Magnético Máxima en los Dientes (B_1)

$$B_1 = 1.11 \frac{E_1}{Y_1 \times f_1 \times T_1 \times A_1 \times S} 10^5 \text{ Kilogauss}$$

$$B_1 = 1.11 \frac{440}{1 \times 50 \times 10 \times 107 \times 60} 10^5 = 15.2 \text{ Kilogauss}$$

$$B_1 = 15\,200 \text{ gauss}$$

5. - Densidad de Flujo Magnético Máxima en el Hierro Atrás de los Dientes (B_3)

$$B_3 = 0.32 \frac{A_1 B_1}{L \times M} \text{ gauss}$$

$$B_3 = 0.32 \frac{15\,200 \times 107}{12.7 \times 3.18}$$

$$B_3 = 12\,900 \text{ gauss}$$

6. - Area de Cobre (a_1)

$$a_1 = 0.785 \times C_1^2 \times 2 \text{ mm}^2$$

$$a_1 = 0.785 \times 4 \times 2$$

$$a_1 = 6.28 \text{ mm}^2$$

7. - Densidad de Corriente (d_1)

$$d_1 = \frac{I_1 \times Y_1}{1.73 \times a_1} \frac{\text{amps}}{\text{mm}^2}$$

$$d_1 = \frac{38 \times 1}{1.73 \times 6.28}$$

$$d_1 = 3.5 \frac{\text{amps}}{\text{mm}^2}$$

B) NUEVO DEVANADO

El nuevo devanado debe cumplir las especificaciones indicadas anteriormente, y deberá estar conectado también en delta, por consiguiente, el nuevo factor de fase (Y_2) será igual también a 1.0

1. - Ranuras por Polo y Fase

ahora se tendrá :

$$\text{ranuras por polo} = \frac{S}{P_2} = \frac{60}{6} = 10$$

$$\text{ranuras por polo y fase} = \frac{10}{3} = 3 \frac{1}{3}$$

Se usarán 3 ranuras por polo y fase, de modo que se usarán:

$$3 \times 6 \times 3 = 54 \text{ ranuras}$$

y quedarán 6 ranuras vacías, sin uso.

El paso de bobina será ahora de la ranura 1 a la 11

2. - Nueva Densidad de Flujo Máxima (B_2)

de acuerdo con lo señalado en el capítulo 3,

$$B_2 = B_1 \sqrt{\frac{N_1}{N_2}}$$

$$B_2 = 15\,200 \sqrt{\frac{1460}{1170}}$$

$$B_2 = 17\,000 \text{ gauss}$$

3. - Area de Dientes, por Polo (A_2)

deberá ser proporcional a la original :

$$A_2 = A_1 \frac{P_1}{P_2}$$

$$A_2 = 107 \frac{4}{6}$$

$$A_2 = 71.5 \text{ cm}^2$$

4. - Densidad de Flujo Máxima en el Hierro Atrás de los Dientes (B_4)

$$B_4 = 0.32 \frac{B_2 \times A_2}{L \times M} \text{ gauss}$$

$$B_4 = 0.32 \frac{17000 \times 71.5}{12.7 \times 3.18}$$

$$B_4 = 9\ 630 \text{ gauss}$$

5. ⁴ Nuevo Número de Alambres por Ranura (T_2)

para obtener la nueva densidad de flujo, con las nuevas condiciones :

$$T_2 = 1.11 \frac{E_2}{Y_2 \times f_2 \times B_2 \times A_2 \times S} \cdot 10^5$$

S vale ahora 54, y B_2 debe estar en Kilogauss

$$T_2 = 1.11 \frac{440}{1 \times 60 \times 17 \times 71.5 \times 54} \cdot 10^5$$

$$T_2 = 12.4 \doteq 12$$

o sea, el nuevo valor es de 12 alambres por ranura

6. - Densidad de Corriente Permitida (d'_2)

para obtener la misma elevación de temperatura :

$$d'_2 = 3.5 \frac{\text{amps}}{\text{mm}^2}$$

7. - Area de Cobre Requerida para esta Densidad (a'_2)

$$a'_2 = \frac{I_2 \times Y_2}{1.73 \times d'_2} \text{ mm}^2$$

$$a'_2 = \frac{38 \times 1}{1.73 \times 3.5}$$

$$a'_2 = 6.28 \text{ mm}^2$$

8. - Area de Cobre con Alambre Doble de 2 mm Diámetro (a_2)

$$a_2 = 0.785 \times 2 \times (2)^2 \text{ mm}^2$$

$$a_2 = 6.28 \text{ mm}^2$$

9. - Densidad de Corriente que se tendrá (d_2)

$$d_2 = d'_2 \frac{a'_2}{a_2}$$

$$d_2 = 3.5 \frac{6.28}{6.28}$$

$$d_2 = 3.5 \frac{\text{amps}}{\text{mm}^2}$$

que es igual a la permitida

El calibre del conductor será el mismo debido a que no se ha --
cambiado la corriente por fase.

C) VERIFICACION DE RESULTADOS

Para comprobar, usamos las siguientes fórmulas:

1. - Nuevo Número de Alambres por Ranura

$$T_2 = T_1 \frac{N_1 \times E_2 \times Y_1 \times B_1}{N_2 \times E_1 \times Y_2 \times B_2}$$

$$T_2 = 10 \frac{1460 \times 440 \times 1 \times 15 \ 200}{1170 \times 440 \times 1 \times 17 \ 000}$$

$$T_2 = 11.1 \doteq 12 ; \text{ es correcto}$$

2. - Area de Cobre

$$a_2 = a_1 \frac{Y_2 \times d_1}{Y_1 \times d_2}$$

$$a_2 = 6.28 \frac{1 \times 3.5}{1 \times 3.5}$$

$$a_2 = 6.28 \text{ mm}^2 ; \text{ es correcto}$$

Por consiguiente, las especificaciones del nuevo devanado serán:

devanado ondulado en delta para 440 volts

12 alambres por ranura

Alambre de 2 mm de diámetro, doble

se usan 54 ranuras, dejando vacías, las

ranuras 10, 20, 30, 40, 50 y 60

Paso de bobina de 10 dientes

Bobina de ranuras 1 a 11

Con el nuevo devanado a 6 polos, de las características anteriores, el motor impulsará satisfactoriamente al compresor a su velocidad de régimen en 60 ciclos.

EJEMPLO-4

Se tiene una bomba centrífuga accionada directamente por un motor de inducción. La función de esta bomba es llevar agua de enfriamiento para un condensador. Se desea usar el mismo motor en 60 Hz.

Los datos correspondientes a la bomba y al motor son los siguientes:

BOMBA

Marca. -	Worthington
Modelo. -	3-CNFE-62
Velocidad de Régimen. -	1200 RPM
No. de Serie	MX 20178
Capacidad. -	420 GPM-96 ft.
Ciclo de Trabajo. -	Normal (8 horas-5 días)

MOTOR

Marca. -	GE.
Tipo. -	KR.
Modelo. -	5K365 COI
Carcaza (frame). -	365
Serie. -	5517767
HP	20
Volts. -	220/440
Fases. -	3
Ciclos. -	50
Velocidad. -	1465
Aumento de Temp.	50°C
Cubierta. -	Abierta

ARRANCADOR

Marca. -	GE
Tipo. -	KDr
Tamaño. -	3
No. de Cat. -	57234 Cr
HP. -	25
Volts. -	220
Amp. -	80
Control. -	mag.

Bobina

No. Cat. - 11372

Volts - 220

Ciclos - 50/60

De una inspección a la bomba se vió que ésta funciona con un impulsor mínimo, por lo que una conversión mecánica no sería factible.

Solución. -

De una prueba del motor (a 50 ciclos) se obtuvo: 220 Volts 53 - Amp., lo que nos indica que está trabajando a carga plena y aunque en este caso es aceptable un aumento de capacidad en la bomba (debido al aumento de velocidad) el motor no podría soportarlo. Por tanto tendríamos que cambiar el número de polos al motor de 4 a 6: consiguiéndose de este modo una velocidad a 60 Hz. de 1170 RPM. Esta conversión hará disminuir el gasto por lo que tendremos que cambiar también el impulsor de la bomba por uno de mayor tamaño (el No. 3-CNFE-76).

Para cambiar el número de polos de un motor se puede reconectar o reembobinar: obviamente se preferirá siempre una reconexión.

Los datos necesarios para determinar si es posible reconectar el motor son los siguientes:

DEVANADO DEL ESTATOR

Tipo de Devanado. -	Imbricado
Conexión. -	2/4
Pasos en paralelo. -	En estrella
Para. -	440/220
No. de Ranuras. -	60

Costado de bobinas	
por ranura	2
No. de bobinas activas	60

Cada bobina va de la ranura 1 a la 12.

Es lo suficientemente fuerte físicamente el devanado y el aislamiento para soportar la reconexión? Si.

Se observará si el devanado queda balanceado. No se permitirá desbalance en una delta-serie, entre dos deltas en paralelo o entre las ramas de circuitos en paralelo cualesquiera que sean. Se permitirá un 10% de desbalance en una estrella-serie o entre dos o más estrellas, si los neutros no están interconectados.

$$W_{50} = 20 \text{ HP}$$

$$E_{50} = \frac{54}{27}$$

$$P_{50} = 4 \text{ polos}$$

$$\text{Conexión } \frac{2}{4}$$

En seguida se calculará el factor de cuerda K_p para cincuenta y sesenta ciclos a partir de la siguiente fórmula:

$$K_p = \text{Sen} \frac{90 \times S_1}{S_2}$$

donde:

S_1 = Paso de bobina real

S_2 = Paso de una bobina de paso completo

El factor de cuerda del devanado reconectado no debe ser menor de 0.6.

Con estos datos es posible calcular el voltaje a 60 ciclos (E_{60}) requerido para restituir el par:

$$E_{60} = \frac{1.2 \times E_{50} \times KP_{60} \times P_{50}}{KP_{50} \times P_{60}}$$

$$E_{60} = \frac{1.2 \times 220 \times 0.988 \times 4}{0.914 \times 6} = 191$$

Si el resultado obtenido no está dentro del 10% de E_{50} , la reconexión no será satisfactoria. Sin embargo, es posible en ocasiones hacer que quede dentro del 10% haciendo un cambio de conexiones en las bobinas. De esta manera podremos hacer que quede dentro del 10% cambiando las dos estrellas en paralelo por una delta-serie.

Con este cambio de conexiones se obtiene:

$$E'_{60} = E_{60} \times CF = 191 \times 1.16 = 221 \text{ que queda dentro del } 10\%$$

Se calculará a continuación la potencia requerida por la carga a 60 ciclos. En este caso como se trata de una bomba, la potencia variará con el cubo de la velocidad. Debido a que también se cambiará el impulsor este dato lo proporcionó el fabricante: "La potencia requerida --

por el nuevo impulsor a 1170 RPM es de 14 bhp (W'_{60})''

Esta potencia deberá quedar dentro del 10% de la potencia calculada a 60 ciclos para una reconexión satisfactoria.

Potencia real desarrollada a 60 ciclos (voltaje de línea 220 Volts)

$$W_{60} = 1.2 \times W_{50} \left(\frac{V_{60}}{E'_{60}} \right)^2 \times \frac{P_{50}}{P_{60}}$$

$$W_{60} = 1.2 \times 20 \frac{220^2}{221^2} \times \frac{4}{6} = 16$$

Que resulta ser el 114% de W'_{60} por lo tanto no será satisfactoria la reconexión y se tendrá que reembobinar el motor. Para esto será necesario la siguiente inspección detallada:

DIMENSIONES DEL ESTATOR

(ver figura 7-2)

Diámetro interior. -	23 cm. (ϕ)
Longitud total. -	14.6 cm. (L_M)
Apertura para ventilación. -	- (A_O)
Longitud neta. -	0.95 ($L_O - A_O$) = 13.9 cm. (L)
No. de Ranuras. -	60 (M)
Ancho de ranura mínimo. -	0.53 (W_1)
Ancho de ranura máximo. -	- (W_2)
Profundidad de ranura. -	- (D)
Espesor mínimo de hierro en la parte de afuera de la ranura. -	2.86 cm. (M)

DEVANADO ORIGINAL

Conexión. -	2/4 (H_1)
Pasos en paralelo. -	En estrella
Para. -	440/220 (E)
Lados de bobina por ranura. -	2

Vueltas por bobina. -	10 (T_1)
Tamaño de alambre. -	1.6 $\frac{2}{2}$ mm. (doble)
Paso de bobina. -	11 dientes (U_1)
Bobinas van de ranura. -	1 a 12
Terminales. -	9

NUEVO DEVANADO

Conexión. -	1/2 (H_2)
Pasos en paralelo. -	En delta
Para. -	440/220
Costados de bobina por ranura. -	2
Vueltas por bobina. -	10 (T_2)
Calibre de alambre. -	1.6 $\frac{2}{2}$ mm. (doble)
Paso de bobina. -	9 dientes (U_2)
Bobinas van de ranura	1 a 10
Terminales. -	9

Cuando el número de ranuras es un múltiplo del número de fases multiplicado por el número de polos, todos los grupos polares correspondientes a cada fase tendrán el mismo número de bobinas. Los devanados con agrupaciones distintas deberán ser investigados para probar su balance.

La tabla 7-1 muestra agrupaciones de bobinas a las que se ha probado su balance.

Haciendo referencia a la tabla se obtuvo:

Fase A	4, 3, 3, 4, 3, 3,
Fase B	3, 3, 4, 3, 3, 4,
Fase C	3, 4, 3, 3, 4, 3,

Serán necesarias (para los cálculos) las siguientes pruebas en vacío al motor:

A 50 ciclos:	225 Volts, 7.8 Amp., 2.58 KW, 1490 RPM.
A 60 ciclos:	230 Volts, 7.7 Amp., 2.67 KW, 1193 RPM.

AGRUPAMIENTOS NO USUALES PARA DEVANADOS IMBRICADOS TRIFASICOS

Conexión de 1 a 4 solamente			
Polos	Revoluciones	Conexiones	Agrupamiento
4	34	1,2 Y.D	454, 545, 484, 545
4	90	1,2 Y.D	797, 878, 797, 878
6	34	1,2 Y.D	231, 112, 141, 211, 112, 121
6	48	1,2 Y.D	253, 332, 323, 233, 332, 323
6	60	1,2 Y.D	433, 334, 343, 434, 334, 433
6	96	1,2 Y.D	613, 566, 565, 616, 566, 616
6	120	1,2 Y.D	777, 775, 767, 767, 767, 767
6	132	1,2 Y.D	877, 778, 787, 867, 767, 867
8	36	1,2,4 Y.D	212, 121, 212, 121, 212, 121
8	54	1,2 Y.D	322, 232, 223, 222, 232, 223
8	60	1,2,4 Y.D	323, 233, 323, 232, 323, 232
8	90	1,2 Y.D	344, 434, 443, 444, 434, 443
8	108	1,2,4 Y.D	545, 454, 545, 454, 545, 454
8	132	1,2,4 Y.D	656, 565, 656, 565, 656, 565
10	48	1,2 Y.D	212, 122, 121, 221, 212, 122
10	54	1,2 Y.D	222, 212, 222, 122, 221, 221
10	72	1,2 Y.D	232, 322, 323, 223, 232, 323
10	96	1,2 Y.D	323, 343, 333, 433, 334, 323
10	108	1,2 Y.D	434, 344, 343, 434, 344, 434
10	132	1,2 Y.D	454, 544, 545, 445, 454, 544
10	144	1,2 Y.D	555, 545, 535, 455, 544, 544
12	48	1,2,4 Y.D	211, 112, 121, 211, 112, 121
12	54	1,2,4,6 Y.D	121, 212, 121, 212, 121, 212
12	50	1,2,4 Y.D	1,2, 221, 212, 122, 221, 212, 221
12	90	1,2,4,6 Y.D	323, 332, 323, 232, 323, 232
12	96	1,2,4 Y.D	233, 332, 323, 233, 332, 233
12	120	1,2,4 Y.D	433, 334, 343, 433, 334, 343
12	132	1,2,4 Y.D	344, 443, 434, 344, 443, 434
14	54	1,2 Y.D	112, 112, 111, 211, 211, 121, 121
14	60	1,2 Y.D	121, 212, 112, 121, 211, 212, 121
14	72	1,2 Y.D	221, 221, 222, 122, 122, 212, 212
14	90	1,2 Y.D	222, 222, 322, 222, 232, 222, 223
14	108	1,2 Y.D	323, 232, 322, 323, 233, 232, 323
14	120	1,2 Y.D	333, 333, 233, 333, 323, 333, 332
14	132	1,2 Y.D	333, 333, 433, 333, 343, 333, 334
14	144	1,2 Y.D	343, 434, 334, 343, 433, 434, 343
16	54	1,2 Y.D	111, 111, 111, 111, 111, 111, 112
16	60	1,2,4 Y.D	111, 211, 121, 112, 211, 121, 112
16	72	1,2,4,8 Y.D	121, 212, 121, 212, 212, 212, 212, 212
16	90	1,2 Y.D	222, 222, 212, 222, 222, 122, 222, 221
16	108	1,2,4 Y.D	222, 222, 322, 223, 222, 222, 223
16	120	1,2,4,8 Y.D	223, 232, 323, 232, 223, 232, 232
16	132	1,2,4 Y.D	333, 233, 323, 332, 233, 333, 332
16	144	1,2,4 Y.D	333, 233, 323, 332, 233, 333, 332

Nota: Bajo la columna "Conexiones" : -

"Y" Significa conexión estrella posible

"D" Significa conexión delta posible

"d" Significa delta PUEDE SER posible. El devanado debe ser checado para corrientes de circulación antes de usarse.

TABLA 7.1

T A B L A 7.1 (continuación)

AGRUPAMIENTOS NO USUALES PARA DEVANADOS IMBRICADOS TRIFASICOS

(Con bobinas muertas) conexión de 1 a 4 solamente			
Polos	Bobinas	Conexión:	Agrupamientos
6	48	3 Y.d	223.2x32.323.2x32.323.2x32
6	96	3 Y.d	5x55.5x55.5x55.5x55.5x55.5x55
6	120	3 Y.d	767.676x.767.676x767.676x
6	132	3 Y.d	7x77.7x77.7x77.7x77.7x77.7x77
8	90	4 Y.d	4x34.34x3.434.34x3.434.34x3.434.34x3
10	48	5 Y.d	212.1x21.212.121.212.121.212.121x.212.121
10	96	5,10 Y.d	3x33.33x.333.33x3.333.3x33.333.33x3.333
10	105	5 Y.d	434.3x43.434.343.434.343.434.343x434.343
10	144	5 Y.d	585.1.454.1.545.4x54.5x45.4x54.54x5.45x4.54x5.45x4
12	48	6 Y.d	1x11.211.121.112.1x11.211.121.112.1x11.211.121.112
12	90	4 Y.d	122.x222.222x222.222.222x222.222.222x222.222.222x222
12	96	3,6 Y.d	323.x232.232.x232.323.x232.323.x232.323.x232.323.x232
12	120	3 Y.d	3x33.333.333x333.333x333.333.333x333.333.333x333
12	132	3,6 Y.d	434.x343.434.x343.434.x343.434.x343.434.x343.434.x343
14	90	7 Y.d	2x22.222.22x2.222.22x2.222.222
14	105	7 Y.d	2x32.323.232.323.232x.323.232.323
14	132	7 Y.d	3x33.333.33x3.333.333x.333.333.333
16	90	4 Y.d	222.x122.212.22x1.222.122.2x12.221
			222.x122.212.22x1.222.122.2x12.221

Nota:

- x Denota bobinas adicionales no conectadas, tales como:
- 4 x 34 - teniendo 11 bobinas activas y una muerta.

Cálculos para el reembobinado. -
El nuevo diseño deberá de ser:

20 HP 6 polos (P₂) 1170 RPM (N₂) 220/440 Volts
54/27 Amp. 60 ciclos (F₂)

Para los siguientes cálculos se han hecho las siguientes suposiciones:

El factor de distribución 0.955

El " " agrupamiento (stacking factor) 0.95

El " " 1.11 se aplica a

devanados con dos costados de bobina por ranura. Si solo hay un costado de bobina se usará el valor de 2.22

El factor de fase "y" es 1.73

si las fases están conectadas en estrella, o 1.0 si lo están en delta.

A) DEVANADO ORIGINAL

Ranuras por polo _____ $\frac{S}{P_1} = \frac{60}{4} = 15$

S _____ No. de ranuras

Paso de bobina _____ 11

Factor de cuerda _____ 0.914 (K_1)

Area de Dientes

por polo $\frac{S}{P_1} L \times W = 15 \times 13.9 \times 0.53 = 110 \text{ cm}^2 (A_1)$

Densidad de flujo máxima en los dientes _____ 1.11 $\frac{H_1 \times E_1 \times 10^5}{Y_1 \times f_1 \times T_1 \times A_1 \times K_1 \times S}$

$$= 1.11 \frac{4 \times 220 \times 10^5}{1.73 \times 50 \times 11 \times 110 \times 0.914 \times 60}$$

$$= 170 \text{ Kilogauss } (B_1)$$

Densidad de flujo
máxima en el hierro posterior

$$0.32 \frac{B_1 \times A_1}{L \times M}$$

$$= 0.32 \frac{17 \times 110}{13.9 \times 2.86} = 15.05 \text{ Kilogauss } (B_3)$$

Area de cobre para un paso

$$3.53 \text{ mm}^2 \quad (a_1)$$

Corriente por paso

$$\frac{I_1 \times Y_1}{1.73 \times H_1} = \frac{54 \times 1.73}{1.73 \times 4} = 13.5 \text{ Amp. } (i_1)$$

Densidad de corriente

$$\frac{i_1}{a_1} = 3.82 \frac{\text{Amp}}{\text{mm}^2} \quad (d_1)$$

El cálculo de la densidad de flujo original en los dientes (B_1), en el hierro posterior (B_3) y la densidad de corriente (d_1) realmente no se necesitan para diseñar el nuevo devanado. Sin embargo, estas cifras se deberán tomar como valores de trabajo para el nuevo diseño y se usará para probar los cálculos de las vueltas de las bobinas nuevas (T_2) y el área de cobre (a_2).

B) NUEVO DEVANADO

Ranuras por polo

$$\frac{S}{P_2} = 10$$

Paso de bobina

$$9$$

Factor de cuerda

$$0.978 \quad (K_2)$$

Quando un motor se recombina para un nuevo número de polos, dando lugar a una velocidad menor a 60 ciclos que la original a 50 ciclos,

y los mismos HP máximos son requeridos, será necesario aumentar la densidad de flujo en los dientes del estator. La densidad de flujo en los dientes para el nuevo devanado deberá ser aumentada proporcionalmente a la raíz cuadrada de la relación de la velocidad original a la nueva. Sin embargo, esta densidad no deberá generalmente ser mayor de 18 600 gauss (B_2).

$$\begin{aligned} \text{Arca de dientes por polo} & \quad \frac{A_1}{A_2} \frac{P_1}{P_2} = \frac{110 \times 4}{6} \\ & = 73.4 \text{ cm}^2 \quad (A_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Densidad de flujo máxima} \\ \text{en el hierro posterior} & \quad 0.32 \frac{B_2 \times A_2}{L \times M} \\ & = 0.32 \frac{18.6 \times 73.4}{13.9 \times 2.86} \\ & = 10.95 \text{ Kilogauss} \quad (B_4) \end{aligned}$$

$$\text{Nueva conexión} \quad \frac{1}{2} \quad (H_2)$$

$$\text{Pasos en paralelo} \quad \text{en delta}$$

$$\text{Para} \quad \frac{440}{220} \quad (E_2)$$

$$\text{Factor} \quad 1.0 \quad (Y_2)$$

$$\begin{aligned} \text{Vueltas por bobina} & \quad 1.11 \frac{H_2 \times E_2 \times 10^5}{Y_2 \times I_2 \times B_2 \times A_2 \times K_2 \times S} \\ & = 1.11 \frac{2 \times 220 \times 10^5}{1.0 \times 60 \times 18.6 \times 73.4 \times 0.988 \times 60} \end{aligned}$$

$$= 10.05 \text{ Número especificado } 10 (T_2)$$

Densidad de corriente

$$\text{permitida} \text{ ————— } 3.82 \frac{\text{amp}}{\text{mm}^2} (d'_2)$$

$$\text{Area de cobre requerida} \text{ ————— } \frac{I_2 \times Y_2}{1.73 \times H_2 \times d'_2}$$

$$= \frac{54 \times 1}{1.73 \times 2 \times 3.82} = 4.1 \text{ mm}^2 (a'_2)$$

Calibre del alambre ——— 1.6 mm diam. doble

$$\text{Area de cobre real} \text{ ————— } 4.01 \text{ m m}^2 (a_2)$$

$$\text{Densidad real} \text{ ————— } d'_2 \frac{a'_2}{a_2} = d_2 \frac{\text{amp}}{\text{mm}^2} = 3.9$$

C) CALCULOS DE COMPROBACION

$$\text{Vueltas por bobina (nuevas)} - T_1 = \frac{N_1 \times K_1 \times E_2 \times Y_1 \times H_2 \times B_1}{N_2 \times K_2 \times E_1 \times Y_2 \times H_1 \times B_2}$$

$$= \frac{11 \times 1465 \times 0.914 \times 1 \times 1.73 \times 2 \times 17}{1170 \times 0.988 \times 1 \times 1 \times 4 \times 18.6}$$

$$= 10.06 \text{ que checa con } T_2$$

$$\text{Area de cobre} \text{ ————— } a_1 \frac{H_1 \times Y_2 \times d_1}{H_2 \times Y_1 \times d_2}$$

por paso

$$= \frac{3.53 \times 4 \times 1 \times 3.82}{2 \times 1.73 \times 3.9} = 4$$

(checa con a)
2

Con los cálculos anteriores podremos especificar el nuevo devanado de la siguiente manera:

Número de bobinas _____ 60 (S)
 vueltas por bobina _____ 10 (T₂)
 2 de ancho por 1 de profundidad

Bobinas de ranura _____ 1 a 10
 Calibre de alambre _____ 1.6 mm diam. doble
 Aislamiento _____ Standard
 Conectar grupos _____ 1 y 4
 Conexión _____ 1/2 (H₂)

Pasos en paralelo _____ en delta
 Para _____ 440/220 (E₂)
 Sacar _____ 9 terminales

La agrupación será la indicada con anterioridad.

EJEMPLO-5

Existen en la industria equipos que requieren para su funcionamiento, de alimentación de corriente directa, por lo que será muy fre-

cuenta encontrar grupos de motor-generador de corriente directa, para proporcionar dicha alimentación.

En el ejemplo 1 se ilustró la conversión de uno de estos grupos, consistente en efectuar la reconexión del motor con objeto de conservar la velocidad original de 50 ciclos. Es posible efectuar otro tipo de conversión en estos equipos, más práctica y más económica, que consiste en limitar o aumentar la resistencia al reóstato de excitación del generador de C. D. Este tipo de conversión proporciona la ventaja de que puede efectuarse en forma sencilla desde antes del momento en que se efectúe el cambio de frecuencia sin interferir con el funcionamiento del equipo. En este ejemplo se ilustrará esta conversión.

El grupo motor-generador que debe ser modificado tiene los siguientes datos de placa :

Motor de C. A.	Generador de C. D.
7.5 HP	5 HP
115 Volts	125 Volts
57 amps	40 amps
1000 r. p. m.	1000 r. p. m.

Primeramente deberá realizarse el estudio de la prueba de saturación en vacío, a fin de determinar que tan estable es el grupo, y que tan falto o sobrado está el reóstato, pudiendo determinar de las condiciones de operación en 50 ciclos, las condiciones en que operará a 60 ciclos.

Para tomar los valores de la prueba de saturación en vacío, se utilizan 2 voltímetros y 1 amperímetro de C. D. El diagrama de conexiones se muestra en la figura 7-3.

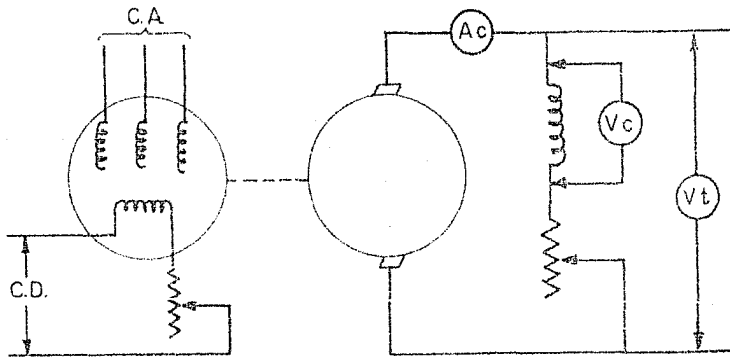


FIG. 7-3

Los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla :

% de - Voltaje	Volts teóricos	Volts reales	Volts de campo	Corriente de excitación
Max				
140	175			
120	150	150	148.5	3.81
105	131.5	132	118	2.49
100	125	126.5	98.5	2.27
95	118.5	116	81.5	1.89
85	106.5	105	69.5	1.64
75	93.8	88	54	1.30
60	75	79	48	1.14
50	62.5	62.5	35	0.9
Min	45	45.0	30.5	0.65

Por medio del siguiente procedimiento, se obtienen las curvas de saturación en vacío, el factor de estabilidad (γ) y las rectas ca--

racterísticas de resistencia:

Ver figura 7-4

- 1) Se traza la curva de saturación en vacío en por ciento, según los datos proporcionados por la tabla anterior, teniendo como abscisas las corrientes de excitación en por ciento, y como ordenadas los voltajes terminales en por ciento. En la figura, se indica la curva con trazo grueso,
- 2) Se traza la tangente a la curva por el punto de voltaje y corriente nominales (100%, 100%). La pendiente de la tangente nos proporciona el factor de estabilidad (γ).

En la figura se observa que:

$$\gamma = 0.5$$

- 3) Se traza la recta que pasa por el origen y el punto de valores nominales (100%, 100%), o sea una recta con pendiente de 45° . Esta recta nos representa el valor de la resistencia para condiciones nominales y la denominaremos

$$R_{N50}$$

$$R_{N50} = \frac{125}{2.25} = 55.5 \text{ ohms}$$

- 4) Se traza la recta que pasa por el origen y equivale a la resistencia del campo, o sea cuando el reóstato está en su va--

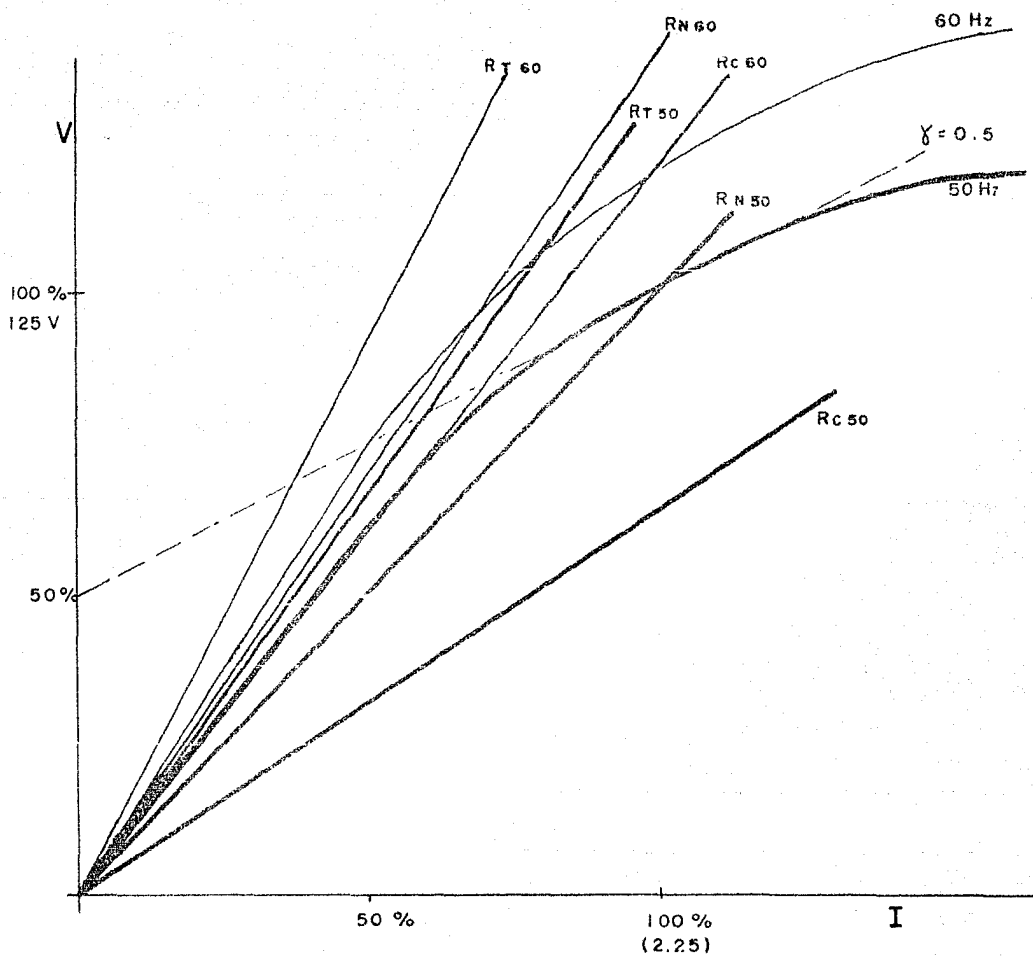


FIG. 7 - 4

lor mínimo o nulo. Dicha resistencia la denominaremos -

$$R_{C50} \quad R_{C50} = \frac{81.5}{2.27} = 35.9 \text{ ohms}$$

- 5) Se traza la recta que pasa por el origen y nos representa el valor de la resistencia del reóstato en su valor máximo mas la resistencia del campo, o sea la resistencia total --

$$R_{T50}$$

$$R_{T50} = R_{RE} + R_C = 40 + 35.9 = 75.9$$

El valor de R_{RE} , o sea la resistencia del reóstato, se obtuvo del propio reóstato.

- 6) Se traza la curva de saturación a 60 ciclos (trazo fino en la figura), la cual variará proporcionalmente con la frecuencia.

- 7) Se traza la recta que pasa por el origen y el punto de intersección de la curva de saturación a 60 ciclos con el valor del voltaje nominal. Dicha recta nos representa la resistencia nominal necesaria para 60 ciclos, y la denominaremos R_{N60} . El valor obtenido de la gráfica es :

$$R_{N60} = 78 \text{ ohms.}$$

- 8) Se traza la recta que pasa por el origen y el punto de inter-

sección de la curva a 60 ciclos con el valor del voltaje máximo, la cual nos representa la resistencia del campo cuando el reóstato esté en su valor mínimo. La denominaremos R_{C60} . El valor obtenido de la gráfica es:

$$R_{C60} = 63.7 \text{ ohms}$$

Es decir, que debe agregarse al reóstato una resistencia -- de valor:

$$R = R_{C60} - R_{C50}$$

$$R = 63.7 - 35.9 = 27.8 \text{ ohms.}$$

La resistencia total cuando el reóstato esté en su valor máximo será:

$$R_{T60} = R_{T50} + R$$

$$R_{T60} = 75.9 + 27.8 = 103.7 \text{ ohms.}$$

El valor comercial de R puede ser de 30 ohms.

- 9) Se traza la recta que pasa por el origen y nos representa el valor R_{T60} , es decir el valor de la resistencia total del -- reóstato mas la resistencia añadida.

Es necesario especificar también los watts de la resisten- - cia R, que se calculan mediante la expresión:

$$W = K I^2 \max R$$

en donde

K = factor de seguridad; por lo general igual a 1.5

I_{\max} = corriente máxima que circulará por la resistencia

R = valor en ohms de la resistencia

de modo que

$$W = 1.5 (3.81)^2 \times 30 = 65.2 \text{ watts}$$

el valor comercial puede ser 75 watts

Entonces, agregando al reóstato de excitación una resistencia de 30 ohms, 75 watts, el grupo motor-generador trabajará satisfactoriamente en 60 ciclos.

B I B L I O G R A F I A

MANUALES DE UNIFICACION DE FRECUENCIA

Comisión Federal de Electricidad

STATIC ELECTROMAGNETIC DEVICES

William T. Hunt
Robert Stein
Ed. Allyn and Bacon, Inc. 1958

INSTRUMENT TRANSFORMERS

Theory of Operation

Sangamo Electric Company
Springfield, Illinois

TRATADO DE ELECTRICIDAD

Tomo Segundo - Corriente Alterna

Chester L. Dawes
Ed. Gustavo Gili

LIGHTING HANDBOOK

Westinghouse - 1964

THE ART AND SCIENCE OF PROTECTIVE RELAYING

C. Russell Mason

Ed. John Wiley and Sons, Inc. 1967.