

"CONTROL Y FUNCIONAMIENTO
DE MOTORES DE INDUCCION"

Tesis previa a la obtención del
título de Ingeniero en la espe-
cialización de Eléctrica, de la
Escuela Politécnica Nacional

Angel Ernesto Castillo Moreno

QUITO

Enero, de 1972

Certifico que:

el Sr. Angel Ernesto Castillo Moreno
ha realizado esta Tesis, bajo mi
control como Director de la misma.


Ing. Remigio Maldonado P.

QUITO

Enero, de 1972

M I S P A D R E S

I N D I C E G E N E R A L

	Pag.
GENERALIDADES DEL PROBLEMA.	1
Capítulo I.- TIPOS DE ARRANQUE COMUN PARA MOTORES DE INDUCCION.	4
I.1.- Arranque a pleno voltaje.	6
I.2.- Arranque a bajo voltaje con autotransformador.	9
I.3.- Arranque con resistencia primaria.	13
I.4.- Arranque con parte del devanado.	14
I.5.- Arranque en estrella-triángulo.	16
I.6.- Ventajas y desventajas de estos tipos de arranque.- Limitaciones.	18
Capítulo II.- PRUEBAS EN EL LABORATORIO SOBRE CADA TIPO DE ARRANQUE.	23
II.1.- Efecto de la resistencia y reactancia sobre las varias características.	31
Capítulo III.- TIPOS DE CONTROL DE LA ACELERACION.- VARIACIONES QUE SE PUEDEN INTRODUCIR.	44
III.1.- Control por corriente límite.	45
III.2.- Control por frecuencia secundaria.	48
III.3.- Control por tiempo definido.	50
Capítulo IV.- CONTROL DE LA VELOCIDAD.- METODOS COMUNES.	52
IV.1.- Control de la velocidad del motor a potencia constante.	53-61-64

IV.2.- Control de la velocidad del motor a torque constante.	57-59-62-65
IV.3.- Importancia del control de la velocidad del motor.	67
IV.4.- Comportamiento del motor con la variación de la velocidad: a torque constante y variable, y a potencia constante y variable.	69
Capítulo V.- CONTROL DE LA VELOCIDAD POR NUEVOS METODOS	74
V.1.- Control de la velocidad del motor por variación de la frecuencia.	74
V.2.- Esquema de un controlador de velocidad por variación de la frecuencia.	81
V.3.- Control de la velocidad del motor por variación del tipo de devanado.	89
V.4.- Comportamiento del motor bajo varias posibilidades de velocidad con los tipos anteriores	95
CONCLUSIONES.	103
BIBLIGRAFIA	106

GENERALIDADES DEL PROBLEMA

La palabra "control" significa gobernar o regular las funciones de una máquina. Aplicado a motores, el control se refiere a varias funciones tales como: arranque, aceleración, velocidad, potencia, protección, inversión y parada. A cada una de las partes que gobierna el funcionamiento de una máquina o motor es llamado un componente de control. El éxito de toda instalación de maquinaria accionada eléctricamente, depende de la adecuada selección y correlación de la máquina, del motor y del aparato de control. Cada una tiene su importancia y la inadecuada aplicación de un motor o de un aparato de control disminuirá el rendimiento de la instalación y podría ser motivo de un fracaso.

Es necesario una buena comprensión de las características del motor para la adecuada selección de éste, con el fin de que se obtengan los resultados deseados, requiriéndose asimismo un perfecto conocimiento de los aparatos de control, para asegurar que la aplicación del aparato escogido hará que el motor realice las funciones requeridas. Los constructores de maquinaria suministran a menudo, varios tipos de maquinarias completas, con motor y aparato de control, pero en el caso de que la maquinaria se suministre sin motor ni aparato de control, entonces nos enfrentamos con el problema de seleccionar los adecuados aparatos de control para que la instalación sea satisfactoria.

El control puede hacerse: a) manual, b) semiautomático, y c) automático. La diferencia básica entre estos tipos de control consiste en la flexibilidad de sus sistemas en cuanto a rapidez y precisión.

a) Con control manual, el operador debe ir al sitio de arranque para hacer cualquier cambio en la operación de la máquina; dentro de este tipo de control el más común, es el arranque a pleno voltaje pero solamente para motores de pequeña potencia, es usado frecuentemente donde la única función de control es arrancar y parar el motor, la razón principal de su uso es por el bajo costo comparado con un arrancador magnético equivalente. Pero si se usa un control manual para un motor grande de alto volaje, la colocación física del equipo de control presenta un problema, en este caso se requiere de un control semi-automático o automático.

b) Con control semi-automático el operador puede tener su punto de control en el sitio que le conviene, tal que pueda hacer cambios en la operación del motor desde la posición deseada; este control se caracteriza por usar un arrancador magnético y uno o más aparatos manuales tales como botones de arranque y parada, es usado mayormente para dar flexibilidad a las instalaciones en reemplazo del control manual. Probablemente hay mayor número de máquinas operadas por control semi-automático, que por control manual o automático.

c) Con control automático cada cambio de operación, es ac-

cionado por dispositivos electromagnéticos que eliminan la atención y el trabajo del operador. Comparado los varios tipos, el control automático tiene varias ventajas sobre los otros, que son: su mayor flexibilidad, su mayor seguridad y mayor facilidad para el operador, y además la ejecución de sus operaciones son eficientes y rápidas, aunque el costo de los aparatos de control es mayor en comparación a los dos anteriores.

En un principio el control industrial fue insignificante, pero en la actualidad ha llegado a tener una importancia considerable. Desde el punto de vista de la Ingeniería existen dos facetas importantes en el control a saber: el proyecto y la aplicación. Mientras el proyectista se concentra en un dispositivo o en un circuito, el Ingeniero de aplicación debe saber la capacidad de un sistema de mando determinado y que puede esperar del funcionamiento de los varios tipos de motores.

En esta Tesis se explicará el trabajo de los motores, características de los diferentes tipos de control que se emplean con frecuencia.

C A P I T U L O I

TIPOS DE ARRANQUE COMUN PARA MOTORES DE INDUCCION

Teóricamente, no hay ninguna razón por la cual un motor de inducción no pueda arrancar conectándolo directamente a la línea de alimentación. Si esto se efectuara, la corriente absorbida sería de cuatro a diez veces la corriente nominal del motor. Esta absorción no lo perjudicaría tanto, pero podría causar perturbación por sobrecarga demasiado grande en la línea de suministro. A menudo es necesario, por consiguiente, efectuar el arranque con tensión reducida.

Los problemas principales que presenta el arranque de los motores de inducción, están relacionados con las magnitudes del par y de la corriente en el momento del arranque. Para que la velocidad del motor aumente a partir del arranque, el par motor desarrollado debe ser mayor que el par resistivo presente en el eje, debido al mecanismo de acoplamiento. En la figura 1-1 se muestra a manera de ejemplo, las curvas del par motor y del resistivo de un motor cualquiera.

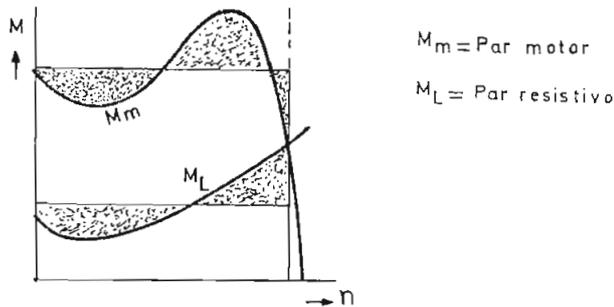


Fig. 1-1

Por otra parte, la intensidad de la corriente de arranque en un circuito dado no debe exceder de ciertos límites que dependan de la capacidad de potencia del circuito. En el caso de motores grandes y de circuito de baja potencia, la magnitud de la corriente de arranque debe ser reducida. La corriente de arranque de un motor de inducción tipo jaula de ardilla, puede ser disminuída reduciendo la tensión entre los bornes del motor durante el arranque, pero el par de arranque es reducido al mismo tiempo proporcionalmente al cuadrado de la tensión, por lo cual sólo se aplica este método en los casos en que las condiciones de arranque son fáciles, por ejemplo cuando se arranca con una carga ligera. Con una carga mayor, el motor de inducción de jaula puede no desarrollar el suficiente par de arranque, incluso cuando está conectado directamente a la línea (pleno voltaje).

En estos casos se puede hacer uso del motor con rotor bobinado o de motores de jaula con rotor de tipo especial, es decir, con dos jaulas o una jaula de barras profundas. En los motores con rotor bobinado se consiguen condiciones favorables de arranque (gran par de arranque con corriente pequeña de arranque), insertando un reóstato en el circuito secundario del rotor, pero estos motores son más caros que los de jaula y el reóstato de arranque hace que la instalación y el mantenimiento sean más costosos.

A continuación veremos los principales métodos de arranque de los motores de inducción.

I.1.- ARRANQUE A PLENO VOLTAJE.

Conectando el motor directamente a plena tensión por medio de un interruptor maniobrado manualmente o por un contactor magnético. El arrancar a pleno voltaje tiene el inconveniente, que el motor absorbe una corriente inicial que varía de cuatro a diez veces la corriente de plena carga; esta corriente transitoria tiene lugar hasta adquirir la velocidad nominal. Con un motor pequeño esto no tiene importancia, en cambio los motores grandes causan perturbaciones a las líneas al conectar directamente a ellas, siendo la mayor perturbación la bajada del voltaje del circuito secundario, originando el flicker en las lámparas.

En países industrializados, las compañías productoras de energía han preparado reglas y normas para hacer la conexión de los motores de jaula de ardilla a sus sistemas de distribución. Los límites de la corriente de puesta en marcha son generalmente tales que los dispositivos de arranque son ya necesarios para motores superiores a 5 HP. La corriente de arranque de un motor con rotor bobinado se puede reducir insertando una resistencia adicional en el circuito del rotor. En la figura 1.2 se representa el circuito equivalente aproximado de un motor de inducción en función de las magnitudes primarias.

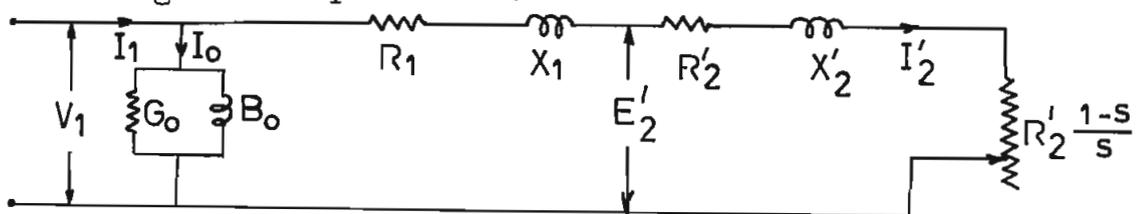


Fig. 1-2

La inserción de una reactancia inductiva originaría simultáneamente la reducción de la corriente del secundario I_2 y el aumento del ángulo de fase φ_2 entre la corriente y la f.e.m, E_2 . Como se muestra vectorialmente en la figura 1-3b, y daría lugar a una gran disminución del par. Pero cuando se conecta una resistencia activa en el circuito del rotor, el ángulo φ_2 es más pequeño (figura 1-3c) y por consiguiente el par aumenta. A pesar de la reducción de la corriente I_2 con reactancia inductiva, es aún mayor en ciertas condiciones, por cuya razón, sólo tiene importancia en la práctica la conexión de una resistencia activa en el circuito del rotor.

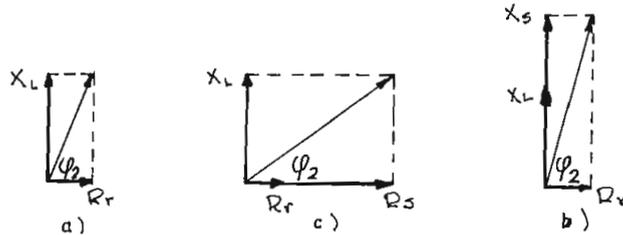


Fig. 1-3

Lo dicho anteriormente, se puede analizar desde la ecuación fundamental del par motor, como también de la ecuación de la corriente primaria.

$$M = K \frac{V_1^2 R_2' s}{n_1 (s R_1 + R_2')^2 + s^2 (X_1 + X_2')^2} \quad (1.1)$$

donde V_1 = voltaje primario

E_2' = voltaje secundario referido al primario

R_2' = resistencia secundaria referida al primario

R_1 = resistencia primaria

X_2' = reactancia secundaria referida al primario

X_1 = reactancia primaria

$m =$ número de fases

$$K = \frac{33.000 m_1}{2\pi \times 746}$$

y la ecuación de la corriente secundaria referida al lado primario es,

$$I_2' = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + R_2' + R_2' \frac{1-s}{s})^2 + (X_1 + X_2')^2}} = \frac{V_1}{Z'} \quad (1.2)$$

donde $s =$ deslizamiento de la máquina.

$Z' =$ impedancia equivalente referido al lado primario

El máximo par que el motor desarrolla es independiente de la resistencia del rotor (R_2), y queda determinado por la condición de que $dT/ds = 0$ y diferenciando la ecuación (1.1), vemos que la condición para el par máximo es,

$$s = + \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} \cong \frac{R_2'}{(X_1 + X_2')} \quad (1.3)$$

Debido a que, generalmente la resistencia del primario R_1 es muy pequeño en comparación con la reactancia, se omite. Por consiguiente el par máximo al arrancar, es decir cuando $s = 1$, la resistencia del rotor debe ser igual a la reactancia total de dispersión,

$$R_2' = X_1 + X_2'$$

En la figura A₈-c del capítulo II, se ha obtenido las curvas del par y corriente de arranque insertando resistencias de 3,3

6,6 , 9,9 ohmios en cada fase del circuito secundario. En las que se puede observar que el par máximo no depende de la resistencia del rotor. La ecuación del par máximo se obtiene reemplazando la ecuación (1.3) en la ecuación fundamental del par motor (1.1), quedando determinado en la siguiente ecuación,

$$M_{\max} = K \frac{V_1^2}{2(X_1 + X'_2)} \quad (1.4)$$

En la figura 2-1 del capítulo II, también se indica las curvas del par motor y de la corriente de arranque para un motor con rotor de jaula de ardilla, de 2 C V de potencia, también se indican las conexiones primarias del motor.

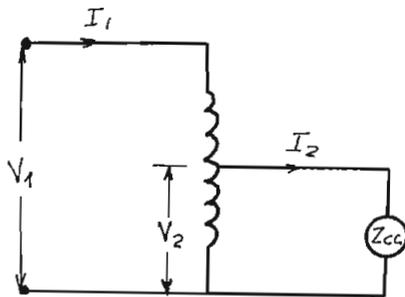
I.2.- ARRANQUE A BAJO VOLTAJE CON AUTOTRANSFORMADOR

El principio de arranque con autotransformador consiste en reducir la tensión en los terminales del motor al momento de arrancar, este tipo de arranque está formado por dos autotransformadores monofásicos conectados en triángulo abierto y el motor se conecta como se muestra en la figura 1-4. También se puede arrancar empleando un autotransformador trifásico, de esta manera se obtienen voltajes y par balanceados, pero el empleo de dos autotransformadores monofásicos es más general debido a su menor costo y además la corriente en la tercera fase es sólo aproximadamente un 15 % mayor que en las otras dos fases, lo que proporciona un desequilibrio aceptable.

Generalmente se dispone de tres tomas (taps) para el arranque

dando el 50%, 65%, y 80% de la plena tensión. En la figura 2-3 del capítulo II, se ha obtenido experimentalmente en el laboratorio de máquinas eléctricas las curvas de arranque para los diferentes voltajes, con un motor de 2 CV de potencia.

En las siguientes ecuaciones se demuestra como varía la corriente y el par,



$$K_a = \frac{V_1}{V_2} ; I_2 = \frac{V_2}{Z_{cc}} = \frac{V_1}{K_a Z_{cc}}$$

$$I_1 = \frac{I_2}{K_a} = \frac{V_1}{K_a^2 Z_{cc}} = \frac{1}{K_a^2} I_{cc} \quad (1.5)$$

- donde :
- V_1 = voltaje primario
 - V_2 = voltaje aplicado al motor
 - Z_{cc} = impedancia del motor en condiciones de cortocircuito
 - K_a = relación de transformación
 - I_1 = corriente primaria
 - I_2 = corriente secundaria
 - I_{cc} = corriente de cortocircuito del motor a plena tensión

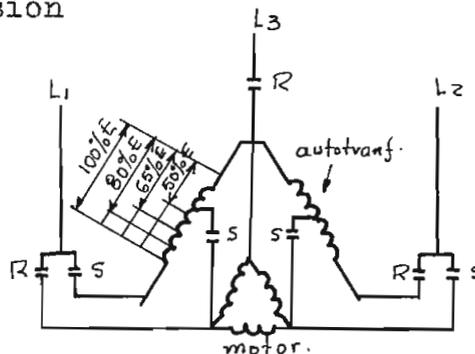


Fig. 1-4

Se observa pues que, cuando se emplea un autotransformador para el arranque de un motor, la corriente de línea disminuye siendo K_a^2 veces menor que la corriente de línea obtenida con conexión directa del motor al circuito, en consecuencia, el par de arranque varía directamente como la corriente del circuito, despreciando las pérdidas del autotransformador, como se indica en la siguiente ecuación

$$M_{ar} = V_2^2 \quad (1.6)$$

Así pues, este método de arranque sólo se puede utilizar en los casos en que el par de frenaje sea pequeño en el arranque. Consideremos a título de ejemplo⁺: un motor trifásico de 25 HP, 220 V, 60c/s y 1000 RPM que acciona un extractor de aire. Si estuviera conectado directamente a la línea, la corriente de arranque sería aproximadamente 500% de la corriente de plena carga. El par de arranque sería aproximadamente 180% del par de plena carga. Empleando la toma del 50% en un arrancador de autotransformador, la corriente de arranque tomada de la línea será 25% de plena carga y la correspondiente absorción del motor es de 250% de la corriente de plena carga y el par es el 25% del par de plena carga.

Las principales características de este tipo de arranque comparados con otros tipos son: la baja corriente de línea, la baja potencia absorbida de la línea y el bajo factor de potencia. Un inconveniente que tiene este método, es que el par varía sólo en un pequeño porcentaje del primer escalón de arranque al segundo escalón (ver figura 2-3 capítulo II). Otro inconveniente es que, al pa-

+ Datos tomados de la tabla, Motores eléctricos (Paisley)

sar directamente desde la última toma del autotransformador a la tensión de línea, el motor queda desconectado de ésta y la corriente momentáneamente baja a cero y cuando se conecta a pleno voltaje se produce por segundos un pico de corriente transitoria (ver figura 2-3.d), del capítulo II.

Por las dos razones indicadas la aceleración no es continua. La alta corriente transitoria producida en el momento de reconexión empleando autotransformador con circuito de transición abierto, como se indica en la figura 2-3.b del capítulo II; puede ser eliminado usando un autotransformador con circuito de transición cerrado como se indica en la figura 2-3.a del capítulo II, ésta forma de arranque mantiene el motor conectado a la fuente de potencia mientras se cambian las conexiones de arranque a las de marcha. (Circuito de transición abierto, es el cambio a plena tensión desconectando el motor, es decir es un paso manual y circuito de transición cerrado, es el cambio a plena tensión por medio de un contactor magnético, sin desconectar el motor)

El efecto del circuito de transición cerrado se ilustra en la figura 2-3.c del capítulo II, donde se observa que se ha eliminado el pico transitorio. Por las razones anteriores para arrancar motores pequeños y medios se emplea autotransformador con circuito de transición abierto y para motores grandes con circuito de transición cerrado, dependiendo todo del costo de cada arrancador.

I.3.- ARRANQUE CON RESISTENCIA PRIMARIA

Con este método se conecta el motor a la línea a través de una resistencia y la reducción de la tensión en los terminales del motor se obtiene gracias a la caída de tensión a través de la resistencia. En consecuencia, la corriente de línea, es la misma que la corriente del motor, y esta corriente y potencia tomadas de la línea son mucho más elevadas que, con el arrancador de autotransformador. Por lo tanto, la eficiencia de este método de arranque es menor que el arranque con autotransformador.

Con este método se consigue una aceleración suave, alto factor de potencia, debido a que la potencia activa absorbida es mayor, la aceleración suave se debe al hecho de que según va acelerándose el motor, la corriente tomada se hace más baja y por consiguiente la caída a través de la resistencia se hace también más baja y se eleva la tensión en los terminales del motor. El par cedido por el motor va en constante aumento a medida que se va eliminando la resistencia.

Este método tiene la ventaja de no desconectar el motor de la línea durante el período de arranque. Es evidente que para arrancar con carga ligera, el motor alcanzará la plena velocidad con la resistencia en el circuito, por esta razón es de práctica común tener un sólo escalón de resistencia; pero cuando los motores son grandes se emplean varios escalones de resistencias donde es necesario limitar la corriente absorbida de la línea.

En la figura 2-4b del capítulo II, se muestra pruebas de arranque realizadas en el laboratorio con un motor de 2 CV de potencia, y con resistencias de 3,3 ohmios cada una, las conexiones primarias se indican en la figura 2-4c del capítulo II.

I.4.- ARRANQUE CON PARTE DEL DEVANADO

Para emplear el método de arranque con parte del devanado, es necesario que el arrollamiento del estator esté dividido en varios caminos paralelos, con los terminales de cada sección para una conexión externa. El arranque con una parte del devanado permite reducir la corriente absorbida de la línea; las varias secciones del devanado del estator son conectadas a la línea en secuencia, con cierto intervalo de tiempo entre cada paso.

Pequeños y medianos motores están diseñados con dos caminos paralelos como se muestra en la figura 1-5, y grandes motores son construidos con tres caminos paralelos. Por consiguiente el método es aplicable a aquellos motores proyectados para emplear cualquiera de las dos tensiones, estando en paralelo los arrollamientos con la baja tensión y en serie con la alta tensión.

Al conectarse la mitad del devanado (estator) a la línea, la corriente y el par de arranque se reducen aproximadamente a la mitad de la que se necesitaría si ambas partes del arrollamiento fueran conectadas al mismo tiempo. (Este método no fue posible llevar a prueba en el laboratorio, por no disponer de un motor apropiado)

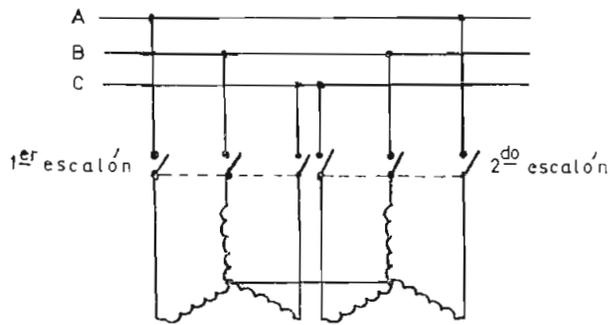


Fig.1.5_Conexiones del estator en dos etapas para el arranque de un motor de inducción

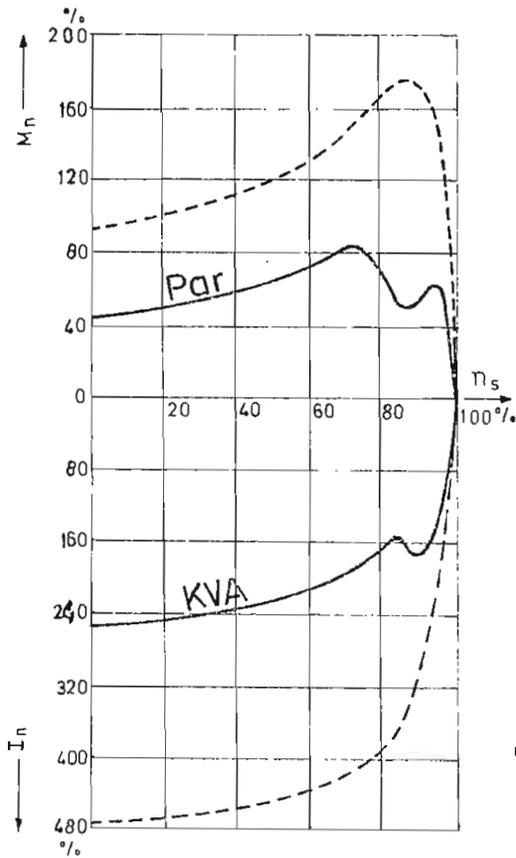


Fig. 1-6

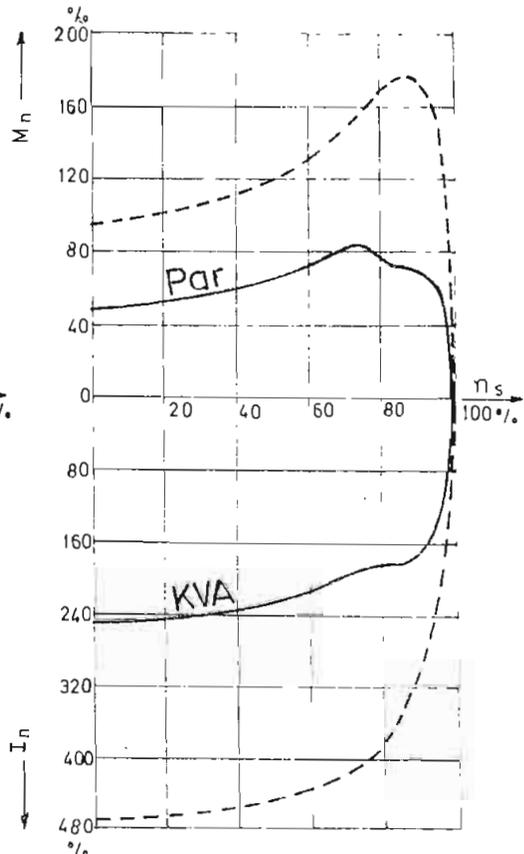


Fig. 1-7

----- Devanado completo
 ————— Devanado partido

En la figura 1-6 son dibujadas las características par-co -- rriente, obtenidas con parte del devanado. A causa de la influencia de la inductancia mutua entre ambos arrollamientos, la curva del par de arranque tiene una pronunciada caída entre el 50% y el 80% de la velocidad, la magnitud de esta caída varía con el tamaño de los motores, produciéndose siempre en todos los motores que se arranque con este método.

La caída del par durante el arranque, puede ser sustancialmente reducido empleando los dos tercios del devanado del estator, las conexiones son las mismas que se indica en la figura 1-5, y las nuevas características se ilustra en la figura 1-7, observándose que la caída en la curva del par es menor comparada con el arranque con medio devanado[†].

La magnitud del par es aproximadamente el mismo, que el obtenido con medio devanado; y puesto que el motor no es cargado simétricamente debido a que el número de espiras no es igual en cada ranura, consecuentemente la impedancia en cada ranura es asimétrica y las corrientes son desiguales, circulando por una fase aproximadamente el 78% y 55% en las otras dos fases, de la corriente de cortocircuito[†]; y justamente debido a que las corrientes no son iguales el flujo distribuido en el estator no es simétrico, razón por la cual se producen ciertas vibraciones y sonidos durante el arranque que tienden a reducir la vida del motor, por lo tanto, no es recomendable este método para motores que arrancan con mucha frecuencia.

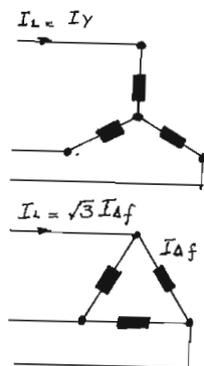
+ Control de motores industriales (G.Heuman pag 155)

I.5.- ARRANQUE EN ESTRELLA-TRIANGULO

Con este método la corriente de arranque y, simultáneamente, el par de arranque bajan a 1/3. Esto se consigue cuando el devanado del estator está en la posición "estrella" para el momento del arranque hasta alcanzar la velocidad de régimen y por medio de un conmutador, el estator es puesto rápidamente en la posición "delta" o de funcionamiento, esto completa la operación del arranque. Este arranque es, especialmente indicado para los motores de ranuras dobles, pues el par de arranque viene a resultar muy próximo al par nominal. Con otros tipos de rotor puede resultar el par de arranque demasiado bajo (caso de arranque pesado), lo que haría necesario un motor de mayor tamaño con un nuevo aumento de la corriente de arranque y empeoramiento del factor de potencia y del rendimiento.

En las siguientes ecuaciones se demostrará que la corriente y el de arranque se reducen a la tercera parte.

En efecto;



$$I_Y = I_L = \frac{V_Y}{Z_{cc}} = \frac{V_1}{\sqrt{3} Z_{cc}} \quad (1.7)$$

$$I_{\Delta f} = \frac{V_{\Delta}}{Z_{cc}} = \frac{V_1}{Z_{cc}}$$

$$I_{\Delta} = I_L = \sqrt{3} I_{\Delta f} = \frac{\sqrt{3} V_1}{Z_{cc}} \quad (1.8)$$

Comparando estas dos ecuaciones se ve que:

$$\frac{I_y}{I_\Delta} = \frac{V_1/\sqrt{3} Z_{cc}}{\sqrt{3} V_1/Z_{cc}} = \frac{1}{3} \quad (1.9)$$

Lo mismo ocurre con el par de arranque;

$$M_y = \frac{V_y^2}{3} \quad y \quad M_\Delta = V^2$$

Comparadas estas dos ecuaciones se ve que;

$$\frac{M_y}{M_\Delta} = \frac{V_1^2/3}{V_1^2} = \frac{1}{3} \quad (1.9)$$

donde : $I_y = I_L$ = corriente de línea o de fase en "estrella"

V_y = voltaje de fase en "estrella"

$V_1 = V_\Delta$ = voltaje de línea en "delta"

M_y = par de arranque en "estrella"

M_Δ = par de arranque en "delta"

Z_{cc} = impedancia/fase

Como se dijo anteriormente, que el método estrella-triángulo se emplea para arrancar motores de gran potencia, o también con carga pesada; pero si la carga es muy inferior a la nominal (menos de 1/3) es favorable cambiar la conexión en triángulo por la conexión en estrella, pues así, se mejora el factor de potencia ($\cos \varphi$) y el rendimiento (η) con carga débil. Sin embargo hay que vigilar el servicio, pues al aumentar la carga quedaría sobrecargado el motor. Puede preverse un contactor automático para la marcha en estrella a partir de una corriente de 0,58 veces la nominal.

Las curvas de rendimiento (η), factor de potencia ($\cos \varphi$)

y la corriente de arranque en función de la potencia mecánica con devanados del estator conectados en estrella-triángulo están representados en la figura (1.8), las cuales son obtenidas con un motor de 2 CV de potencia, en el laboratorio de máquinas eléctricas.

Se puede ver que la conmutación delta-estrella con pequeñas cargas tiene un efecto favorable sobre el factor de potencia ($\cos(\phi)$) y es uno de los posibles medios de mejorar el factor de potencia del circuito. Las curvas de rendimiento, factor de potencia y la corriente de arranque en función de la potencia mecánica, son obtenidas a partir de los diagramas circulares de las figuras 2-5 y 2-1 del capítulo II, que son pruebas realizadas en laboratorio para arranques con el devanado en "estrella" y en "triángulo".

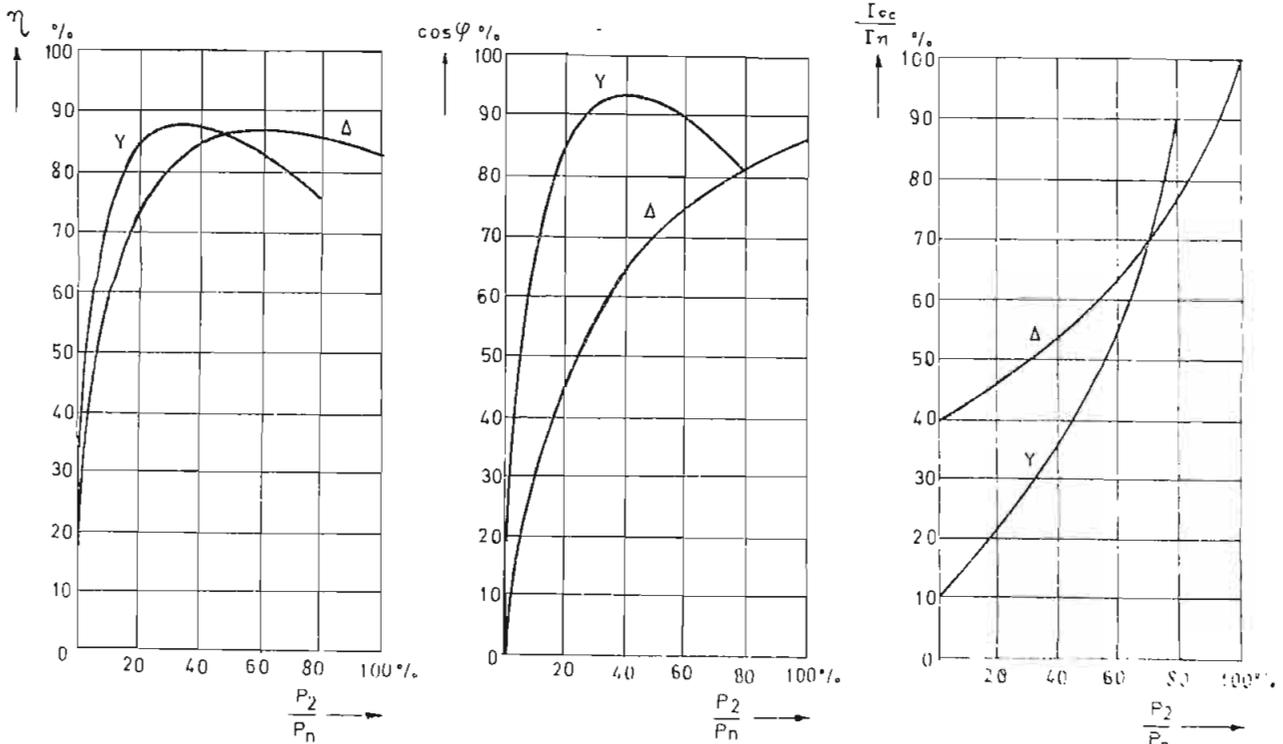


Fig. 1-8

I.6.- VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE ESTOS TIPOS DE ARRANQUE.-
LIMITACIONES.

PLENO VOLTAJE.-

Ventajas :

El arranque a pleno voltaje o directo, tiene algunas ventajas como: elevar el factor de potencia durante el arranque, dependiendo su valor del tamaño del motor. Lleva ventaja muy amplia sobre los demás métodos de arranque por ser el más económico, respecto al costo del equipo; además presenta gran facilidad para su operación, control y mantenimiento, por estar constituido sólo de dispositivos auxiliares que no consumen energía.

Desventajas:

Asimismo, este método presenta algunas desventajas como: La corriente que toma de la línea es sumamente elevada, si comparamos con los demás métodos; esta elevación de la corriente causa perturbación en la línea, como el flicker en el alumbrado. También la potencia absorbida de la línea es mayor y si el motor arranca varias veces al día, la energía consumida durante el arranque se convierte en una cifra muy importante. Debido al hecho de que al arrancar, directamente el motor toma más potencia y corriente de la línea, su rendimiento es más bajo. El par de arranque es más fuerte y por consiguiente la aceleración es muy brusca, causando grandes esfuerzos mecánicos en el motor y por lo tanto, reduciendo la vida del motor.

Limitaciones :

Este método, generalmente se emplea para arranques de motores de pequeña potencia, los cuales no causan mayor perturbación a la línea.

AUTOTRANSFORMADOR.

Ventajas :

La corriente absorbida de la línea es mucho menor comparada con el método anterior, especialmente para las tomas de 50% y 65% del pleno voltaje. También la potencia tomada de la línea es menor ya que el autotransformador es un dispositivo que sólo varía la tensión (despreciando las pérdidas en el devanado); además se consigue un alto rendimiento durante el arranque particularmente con las tomas de tensión reducida.

Desventajas :

El factor de potencia de arranque disminuye notablemente y puede variar de un 30 a 60%, dependiendo del tamaño del motor, y debido a esta disminución puede ocasionar mayor perturbación en la línea, aunque la corriente absorbida sea menor que los demás métodos. Además el costo de mantenimiento del equipo es mayor que los otros equipos externos equivalentes.

Limitaciones :

Para motores de gran tamaño (varios miles de H.P), donde es necesario reducir notablemente la intensidad de la corriente de arranque, frecuentemente es usado para arranques con carga ligera.

RESISTENCIA PRIMARIA.

Ventajas :

Reduce considerablemente la corriente absorbida de la línea (dependiendo del valor de la resistencia), pero si comparamos con el autotransformador para una misma tensión aplicada al motor, la corriente con resistencia primaria es mayor. Tiene un alto factor de potencia de arranque, todo depende del tamaño del motor; debido a esta razón la perturbación en la línea es menor si comparamos con el autotransformador, aunque la corriente absorbida sea mayor. El par motor aumenta paulatinamente a medida que el motor se acelera, siendo su ventaja principal la suavidad de la aceleración, como también no hay interrupción de la corriente de línea, cuando se pasa de la posición de arranque al de funcionamiento y además es menos complejo la reducción del voltaje de arranque.

Desventajas :

La potencia tomada de la línea es muy grande, debido a que, la resistencia primaria es un dispositivo que consume energía, por cuya razón, el rendimiento del arranque disminuye. La relación del par motor por corriente de línea es baja, es decir, decrece tanto como el voltaje decrece.

Limitaciones :

Se emplea donde las características de arranque son severas, es decir, donde se requiere una gran reducción de la corriente de arranque.

DEVANADO PARCIAL.

Ventajas :

Con este método de arranque, se puede aplicar un alto y bajo voltajes a los bornes del motor si las conexiones están en serie y paralelo respectivamente. No hay interrupción de la corriente de línea cuando se pasa de la posición de arranque (devanado parcial) al de funcionamiento (devanado completo). Respecto al equipo, es de menor costo que otro arrancador con reducción de voltaje, debido a que está constituido de pocos elementos; además su tamaño es menor que los otros arrancadores de igual capacidad. Tiene ventaja sobre los demás, por que no necesita equipo externo.

Desventajas :

El par de arranque es irregular debido al efecto mutuo entre las partes del arrollamiento, que pueden incluso evitar que el motor no se acelere a su máxima velocidad cuando está en conexión parcial. Este método no se puede utilizar para arrancar motores pequeños, por el elevado costo que resulta al diseñar un devanado especial.

Limitaciones :

Se emplea generalmente para arrancar motores de gran velocidad y tamaño (varios miles de H.P), que pueden llegar a tener intensidades de arranque superiores a las que permiten las compañías de electricidad.

ESTRELLA-TRIANGULO.

Ventajas :

Se obtiene mejor arranque y mayor tiempo de aceleración (para mayor tiempo de aceleración, la limitación es el calentamiento del motor), también tiene una alta relación de par motor motor por amperio de línea. Además de ser un método sencillo para el arranque, tiene un buen rendimiento de arranque y la corriente absorbida de la red es muchísimo menor que los demás métodos anteriores, de la misma capacidad. Respecto al equipo de arranque, éste no consume energía y su mantenimiento es mínimo.

Desventajas :

El par de arranque se reduce a la tercera parte durante el arranque, presentándose el problema de que el motor no arranque, (caso de arranque pesado); lo que haría necesario un motor de mayor tamaño con un nuevo aumento de la corriente de arranque y empeoramiento del factor de potencia y del rendimiento durante el arranque.

Limitaciones :

Se utiliza generalmente donde las características de arranque no son ajustables para cargas de alta resistencia y además se emplea, sólo para motores que tengan el devanado apropiado para este arranque.

C A P I T U L O I I

PRUEBAS EN EL LABORATORIO SOBRE CADA TIPO DE ARRANQUE

Todas las pruebas de los diferentes tipos de arranque común para motores de inducción, se ha obtenido en base del diagrama circular de Alexander Heyland. Este diagrama permite obtener por trazos gráficos las características más importantes (corriente y par de arranque) del motor de inducción, partiendo del conocimiento indirecto como órgano de transferencia de energía.

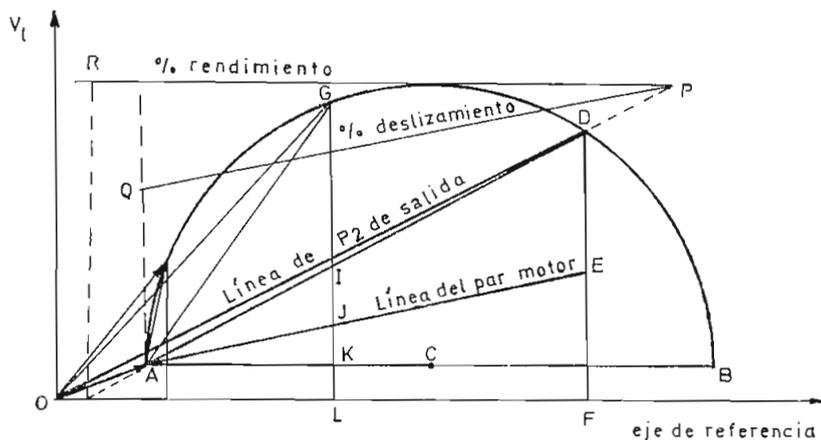


Fig. C-1. - DIAGRAMA CIRCULAR.

Así pues, refiriéndonos a la figura C-1, los puntos principales para determinar el centro del círculo son:

OA = corriente de vacío

OD = corriente de corto circuito a tensión nominal

AD = corriente secundaria

Como AD es una cuerda, se traza una perpendicular por la mitad de la misma hasta cortar a la línea horizontal que parte de A, en el punto C que es el centro del círculo. Con las siguientes relaciones se pueden encontrar todas las características del motor de inducción, desde la figura C-1.

GL = potencia de entrada al motor (eléctrica)

KL = pérdidas magnéticas + mecánicas (vacío)

JK = pérdidas en el cobre del estator (circuito primario)

IJ = pérdidas en el cobre del rotor (circuito secundario)

IL = pérdidas totales

GI = potencia de salida (mecánica)

GJ = potencia de entrada al rotor (par)

$\frac{GI}{GL} = \frac{\text{Potencia de salida (mecánica)}}{\text{Potencia de entrada (eléctrica)}} = \text{rendimiento}$

$\frac{IJ}{GJ} = \frac{\text{pérdidas en el rotor}}{\text{Potencia de entrada}} = \text{deslizamiento} = s$

$\frac{GI}{GJ} = 1 - s = \text{velocidad}$

$\frac{GL}{GO} = \text{factor de potencia}$

Las pruebas de los diferentes tipos de arranque, excepto el arranque con parte del devanado por no disponer de un motor propio para esta prueba, se realizó en el laboratorio de máquinas eléctricas con un motor de las siguientes características;

CETEL - BRUXELLES

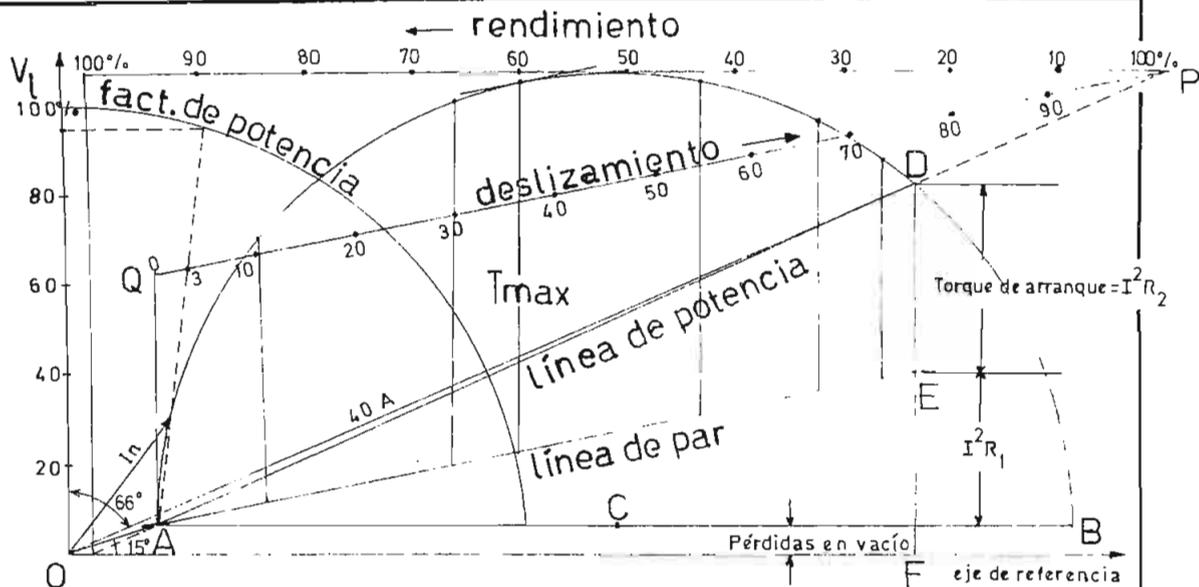
Δ/λ ; 220/380 V ; 7/4,04 A

1.800 RPM ; Potencia = 2 CV.

El mismo motor se empleó para realizar pruebas con rotor de jaula de ardilla, con doble jaula y con rotor bobinado intercalando resistencias de 3,3 ; 6,6 ; 9,9 ohmios en cada fase del circuito secundario.

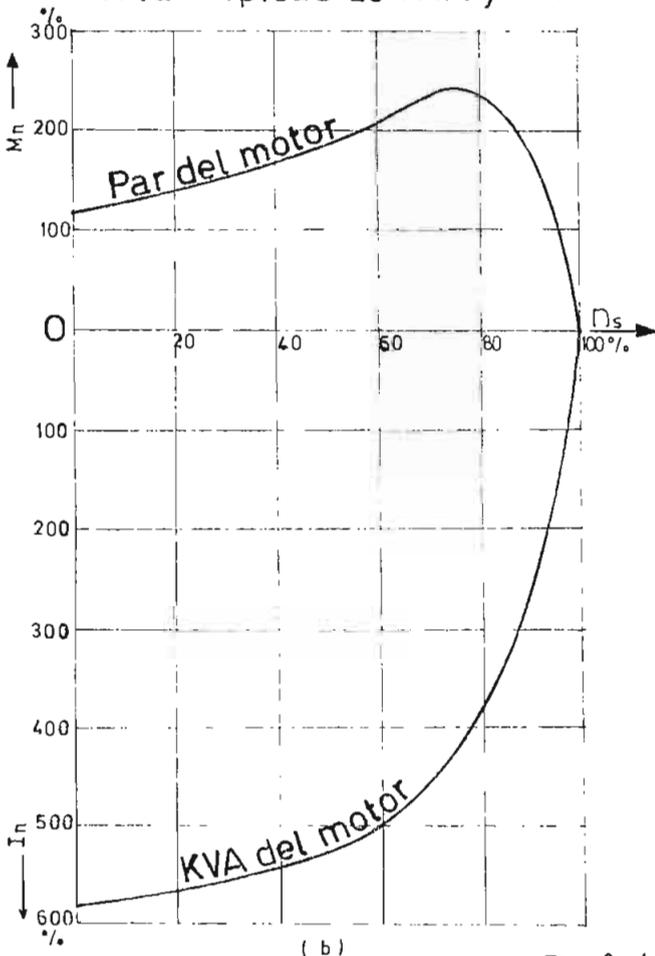
En cada una de las siguientes figuras se indica, las conexiones primarias y el tipo de arranque, el diagrama circular en base del cual se obtiene las curvas típicas de KVA y Par del motor durante el arranque.

001603



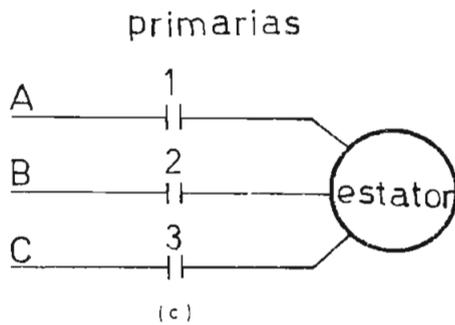
a) Diagrama Circular para arranque a pleno voltaje

Curvas típicas de KVA y Par



Escala: 10A

Esquema de conexiones



METODO DE ARRANQUE

Arranque a pleno voltaje

Arranque: se cierran 1-2-3

Marcha: sin variación

Fig. 2 - 1

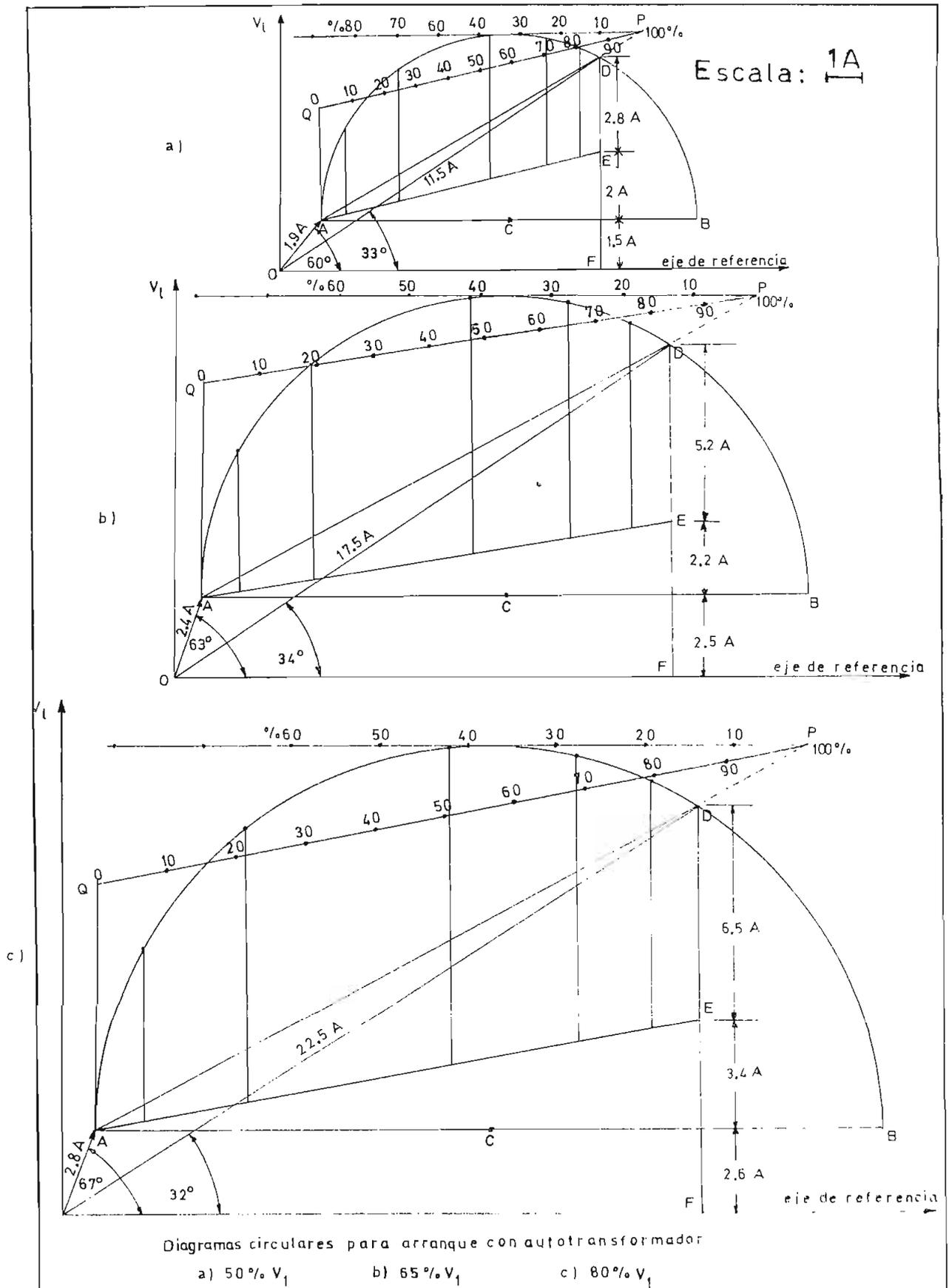
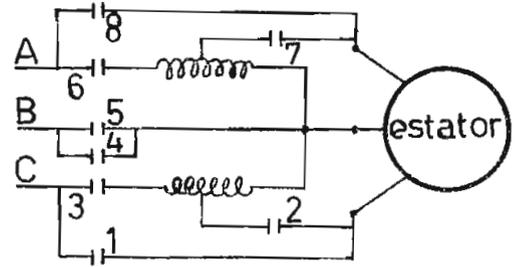
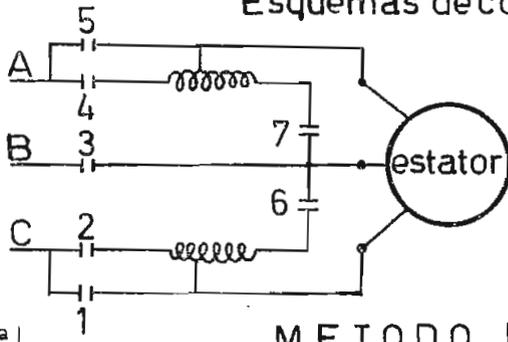


Fig. 2-2

Esquemas de conexiones primarias



METODO DE ARRANQUE

Arranque con autotransformador

Tipo transición cerrada.

Arranque se cierran: 6-7-2-3-4.

Transición: se abren 6-7.

Marcha: se cierran 1-5.

Tipo transición abierta.

Arranque se cierran: 2-3-5-6-7.

Marcha: se abren 2-3-5-6-7 se

cierran 1-4-8.

Curvas típicas de KVA y Par

Curvas típicas de KVA y Par

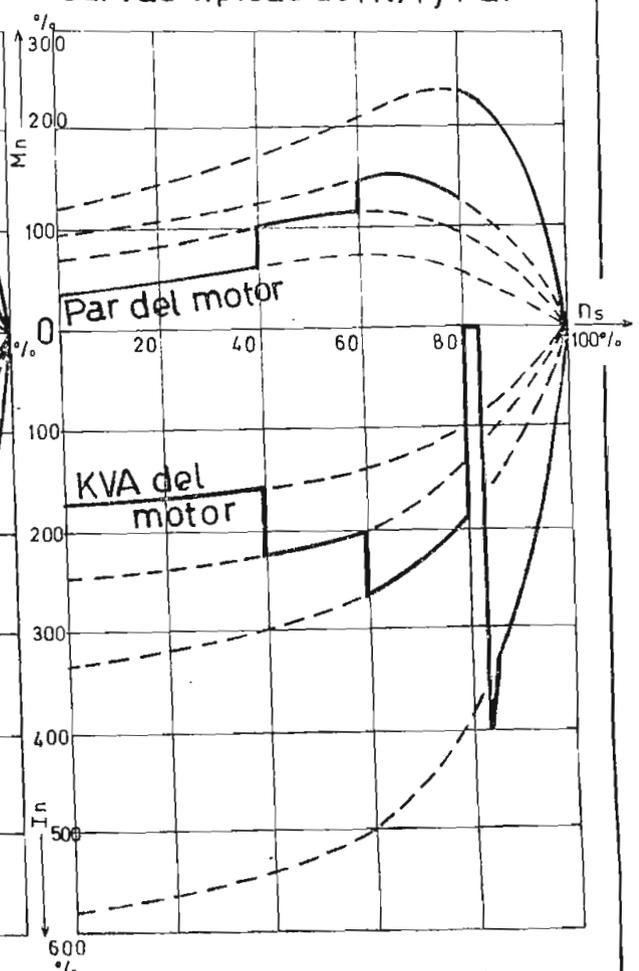
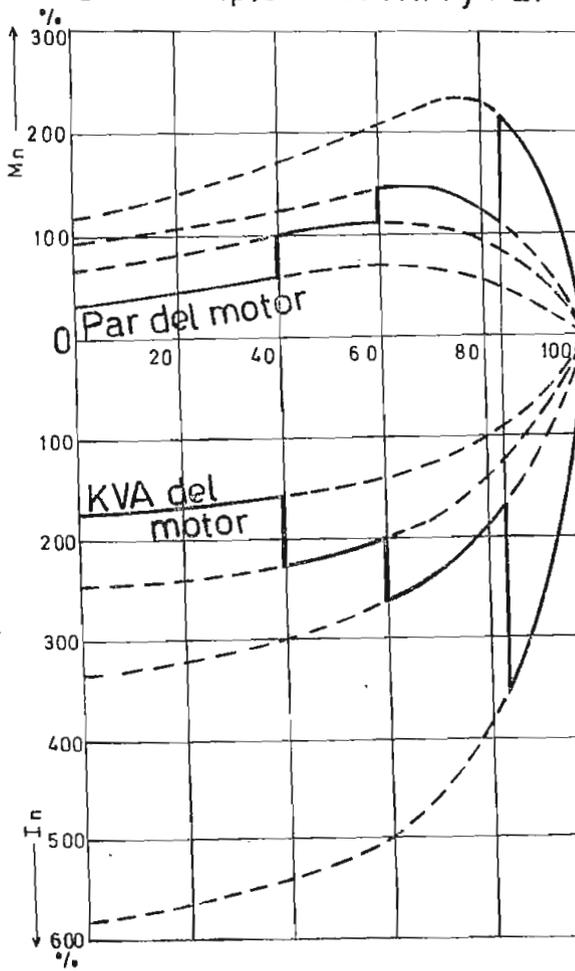
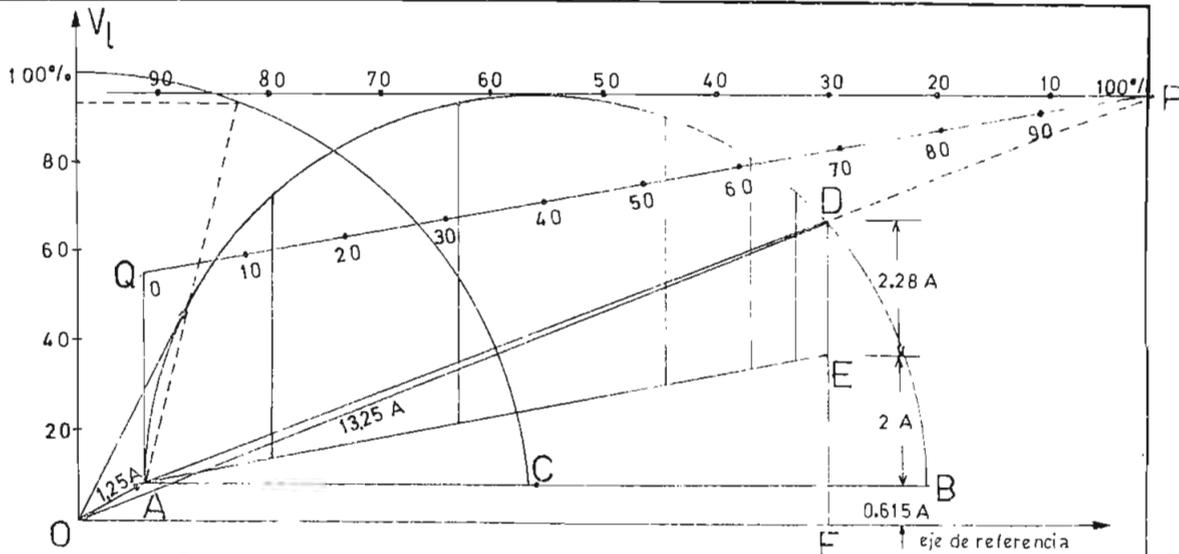


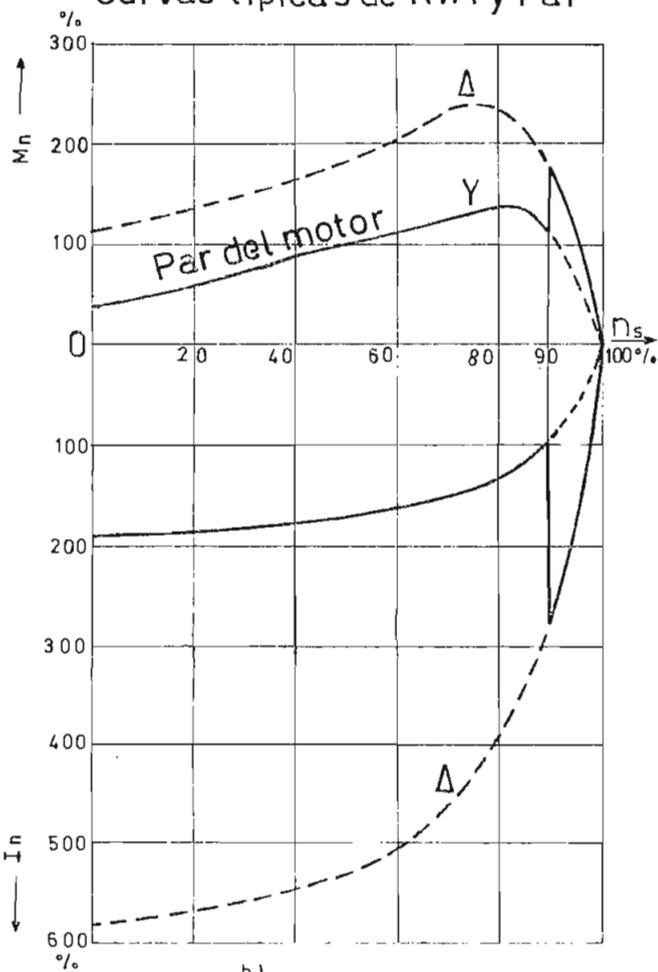
Fig. 2-3



a) Diagrama circular para arranque estrella-triángulo

Escala: $\overline{1A}$

Curvas típicas de KVA y Par

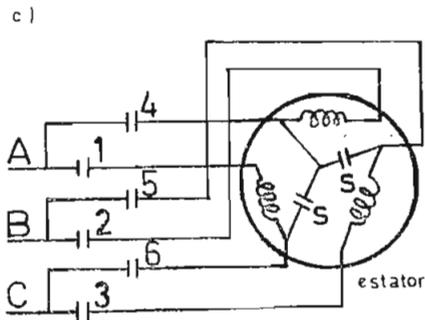


b)

Fig. 2-5

Esquema de conexiones

primarias



METODO DE ARRANQUE

Arranque estrella-triángulo

Arranque: se cierran 1-2-3-s

Transición: se abren "s"

Marcha: se cierran 4-5-6

II.1.- EFEECTO DE LA RESISTENCIA Y REACTANCIA SOBRE LAS VARIAS CARACTERISTICAS

La ventaja de los motores trifásicos con rotor de jaula de ardilla, es ante todo la seguridad de servicio, lo que obedece a la poca sensibilidad y a la simplicidad de la construcción del rotor. Variando la forma de la jaula y los materiales utilizados en la construcción del mismo, se pueden conseguir las más diversas condiciones de arranque y funcionamiento. Para la elección de la jaula resulta sobre todo esencial la variación del par motor con la velocidad. Durante el arranque tiene que ser lo suficientemente potente para vencer el par resistivo y, para alcanzar tras un período de aceleración que no sea excesivo, el número de revoluciones de funcionamiento.

Por otra parte, también ha de tenerse en cuenta que la corriente de arranque no exceda de los límites admisibles para la red. Además se exige un rendimiento favorable y un buen factor de potencia. Para lograr estos requisitos se construyen estas jaulas de distinta forma, es decir, variando la resistencia y reactancia para las diferentes condiciones de funcionamiento.

Sobre esta base, es importante la resistencia y la reactancia del rotor para la selección del tipo de motor para fines específicos, de tal forma que, se puede seleccionar desde un motor de jaula de ardilla corriente hasta motores con ranura profunda, de barra doble o de doble jaula y rotor bobinado, etc

El cambio de resistencia y reactancia se obtiene por el empleo de grandes o pequeñas barras y del material magnético que se utiliza en su construcción, tales como, el bronce que es de mayor resistencia que el cobre, así, un alto par por amperio puede ser obtenido sin disminuir la velocidad de plena carga.

Para analizar el efecto que produce la variación de la resistencia y reactancia del rotor sobre las características de arranque, consideremos varios motores similares en todo aspecto excepto en los valores de resistencia y reactancia del rotor. Un viejo problema en el motor de jaula de ardilla y control industrial, ha sido encontrar un camino para mantener baja la corriente de arranque sin sacrificar el par o el factor de potencia de operación.

En efecto, una reducción de la corriente de arranque y un incremento del par de arranque, puede obtenerse incrementando la resistencia R_2 o disminuyendo la reactancia X_2 del rotor, manteniendo constante los valores de resistencia R_1 y reactancia X_1 del estator. Para hacer una comparación de las condiciones de arranque y funcionamiento, resumiremos todos los rotores de jaula en los siguientes grupos :

- 1) de barra redonda
- 2) de barra oblonga (más largo que ancho) y
- 3) de barra doble o de doble jaula

Estos tipos de rotores se indica en los cuadros N°1⁺ y N°2⁺

Primeramente analizaremos el efecto de la resistencia R_2 , sobre las curvas velocidad-torque-corriente, considerando que la reactancia X_2 del rotor tiene el mismo valor óhmico cuando el motor está en reposo.

1) En el cuadro N°1 se muestra un rotor corriente de barra redonda, cuyas características de arranque se indica en la figura A₁, y para demostrar el efecto que produce la variación de la resistencia secundaria del rotor, sobre las curvas velocidad-torque-corriente, haremos uso de las relaciones del torque y la corriente primaria, que se indica en el capítulo I en la ecuación (1.1)

$$M = K \frac{V_1^2 R_2' s}{(s R_1 + R_2')^2 + s^2 (X_1 + X_2')^2}$$

y de la ecuación (1.2)

$$I_2' = \frac{V_1}{(R_1 + R_2' + R_2' \frac{1-s}{s})^2 + (X_1 + X_2')^2}$$

como también asumiremos que el flujo principal ϕ del motor, y consecuentemente la densidad del flujo B en el entrehierro permanece constante para todos los valores de resistencia R_2 ; por tanto, en el rotor de la figura A₁ se puede elevar la resistencia disminuyendo la sección o utilizando otro material de menor conductividad, de esta manera, se obtiene otras curvas característi-

cas para el par motor y la corriente de arranque, como la dibujada en la figura A₂. Empleando la ecuación (1.2), se deduce que la corriente de arranque disminuye a medida que se incrementa la resistencia del rotor y con la ecuación (1.1), se deduce que el par motor se incrementa al mismo tiempo, como la indicada en la línea a trazos y, aumentando todavía más la resistencia del rotor como la línea de trazos y puntos.

Al aumentar la resistencia del rotor el par máximo permanece invariable, sólo que, se produce a diferentes velocidades, esto es, cuando el deslizamiento está determinado por la siguiente ecuación, que se indica en el capítulo I con el número (1.3)

$$s \approx \frac{R_2^2}{(X_1 + X_2^2)}$$

El valor de R_2^2 comparado con $(X_1 + X_2^2)$ es muy pequeño, por tanto se desprecia. Reemplazando la ecuación (1.3) en la del par motor, obtenemos la ecuación del par máximo,

$$M_{\max} = \frac{v_1^2}{2(X_1 + X_2^2)}$$

con la cual podemos decir, que el par máximo es el mismo para cualquier valor de la resistencia del rotor, debido a su independencia de ella.

La ventaja de utilizar rotores de jaula de alta resisten-

cia, es la de conseguir bajas corrientes de arranque, elevar el par de arranque y mejorar el factor de potencia. Asimismo, tiene la desventaja de disminuir el rendimiento del motor, como también de tener una mala regulación de velocidad; pudiendo suceder que la resistencia R_2 sea mayor que la reactancia X_2 (motor en reposo), en estas condiciones el par y el deslizamiento tendrán valores negativos y el motor funcionará como generador, como se puede observar en la figura A_9^+ , que el par máximo es obtenido para deslizamientos mayores que la unidad. Esto se debe a que, la condición límite para obtener el par máximo a una velocidad positiva se requiere que la resistencia R_2 sea igual en valor óhmico a la reactancia X_2 del rotor.

La curva de variación del par motor y de la corriente de un rotor de barra redonda puede ser desplazada aún más, al aumentar o disminuir la dispersión del rotor, colocando los conductores en posición profunda como se indica en la figura A_3 .

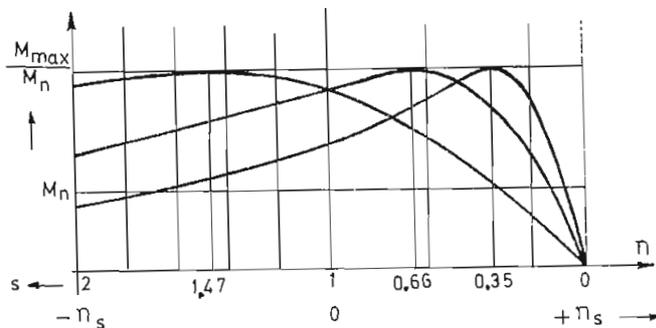


Fig.-A₉

Esto da lugar a que adquiriera un valor, especialmente elevado la resistencia inductiva durante el arranque, por consiguiente hace que la corriente disminuya considerablemente, pero al mismo tiempo decrecen el par de arranque y el par máximo, como también disminuye el factor de potencia al aumentar la dispersión del rotor. En la figura A₃, se muestra por medio de trazo continuo, la característica del par motor y de la corriente de arranque para un motor con rotor de dispersión. Está dibujada también para comprobación en trazo de líneas las curvas para el mismo motor con rotor de barra redonda en ejecución normal (Fig. A₁)

2) Las cualidades que el rotor de barra oblonga (más largo que ancho) ofrece en su servicio, se basan principalmente en el fenómeno de desalojamiento de la corriente. Las barras de estas jaulas se pueden considerar compuestas de varios conductores, entonces, se encontrarán enlazados por mayor número de líneas de fuerza de dispersión los que se encuentran en el fondo de la ranura que los conductores de la superficie de la ranura, como se indica en la figura A₄.

Sobre la corriente, que fluye por la jaula del rotor, interviene además de la resistencia óhmica, la reactancia inductiva, que depende de la frecuencia de la corriente y del número de líneas de fuerza que actúan. Como el número de líneas de fuerza es mayor en el fondo de la ranura y, por tanto, la resistencia inductiva es mayor que en la superficie de la ranura, es empujada la corriente hacia la superficie buscando el camino de menor re-

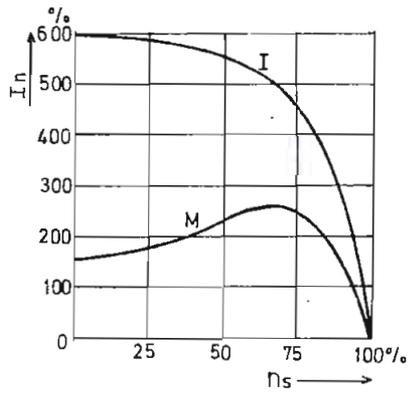
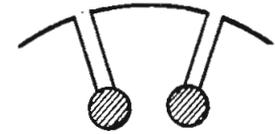


Fig. A₁

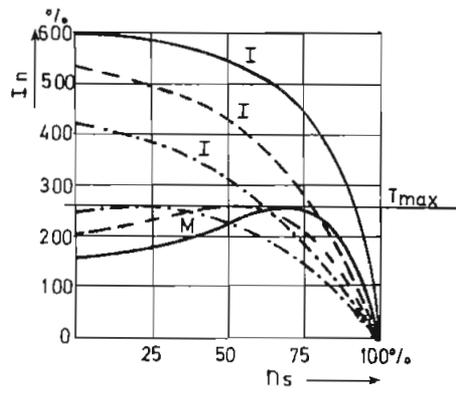


Fig. A₂

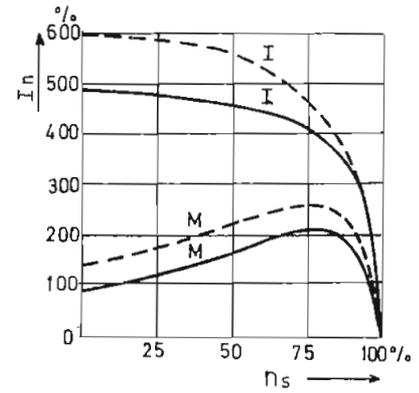


Fig. A₃

A₁, A₂, A₃. Rotores de barra redonda

A₁. Ejecución normal

A₂. Influencia de la resistencia del rotor

Con resistencia — normal, - - - - - aumentada

A₃. Influencia de la dispersión del rotor

— Rotor de dispersión, - - - - - Rotor normal de barra redonda

sistencia. Este reparto desigual de la corriente trae consigo un aumento aparente de la resistencia óhmica del rotor y, por tanto, el aumento del par de arranque, Figura A₄. Con el rotor de barra oblonga se consigue lo mismo que con el rotor de anillos rozantes por medio de la resistencia de arranque, sin que aumente las pérdidas del rotor durante el servicio normal. Al contrario que con el rotor de barra redonda, se consiguen con el rotor de barra oblonga buenas condiciones de servicio y arranque, incluso para grandes potencias.

3) Otra forma de rotor para mejorar las condiciones de arranque, resulta de la combinación de las formas de rotores indicados en las figuras A₁ y A₃, denominado rotor de doble jaula, como se indica en la figura A₅. El funcionamiento fundamental del rotor de barra doble se basa en el distinto comportamiento que tienen ambas jaulas, durante el servicio. En la figura A₅ es donde mejor se puede apreciar el distinto comportamiento de ambas jaulas.

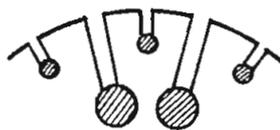
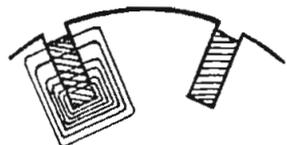
La jaula situada hacia el interior actúa como rotor de dispersión, como ya vimos en la ejecución especial de los rotores de barra redonda. Durante el arranque se mantiene pequeña la corriente y el par (trazo de rayas) en esta jaula, gracias a su alta resistencia inductiva (la frecuencia de deslizamiento es muy elevada); por tanto, la mayor parte de la corriente fluye por la barra externa que posee una alta resistencia óhmica, o sea que

es empleada como rotor de resistencia variable, y desarrolla un par de arranque elevado (trazo de punto y raya).

El desarrollo de los pares motores se puede explicar, como la actuación conjunta de los pares motores de cada jaula, pero en el eje del motor sólo se aprecia el par resultante (trazo lleno). El desarrollo del par motor de cada jaula puede ser variado dentro de amplios límites por medio de una distinta ejecución de cada jaula y utilización de barras con mayor o menor resistencia específica. Combinando las curvas de variación de la jaula interna y externa a voluntad, se pueden conseguir las más variadas características de arranque en los rotores de doble jaula, manteniendo siempre la corriente de arranque dentro de los límites soportables.

Finalmente, debido al hecho de que, en un motor de jaula de ardilla no es posible cambiar la resistencia R_2 después de construido, y si se requiere de mejorar las condiciones de arranque y funcionamiento se puede emplear el motor de rotor bobinado cuya resistencia puede ser cambiada rápidamente por variación de la resistencia externa conectada a los anillos rozantes y así, obtener las más diversas condiciones de operación.

Otro parámetro del circuito secundario es la reactancia X_2 que también influye notoriamente sobre las características de arranque y funcionamiento.



Con reactancia: $\frac{2X_2}{\quad}$ $\frac{X_2}{\quad}$

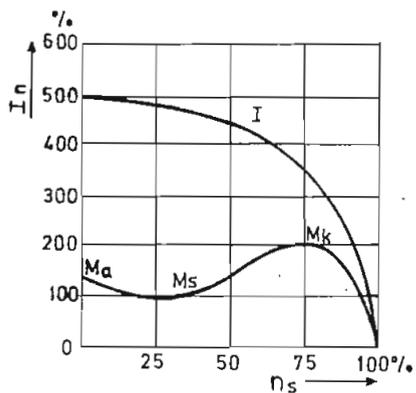


Fig. A4

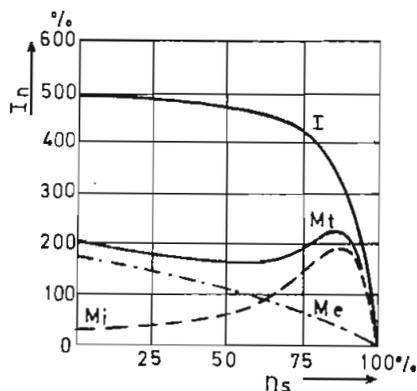


Fig. A5

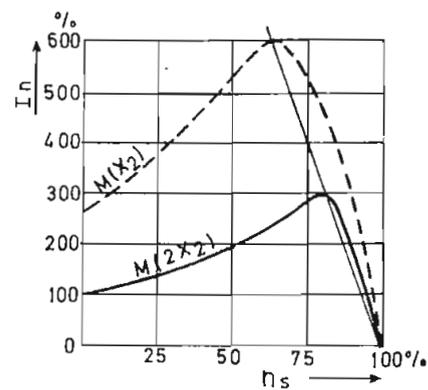


Fig. A6

A4. Rotor de barra oblonga (más largo que ancho)

M_a , Par motor de arranque. M_s , Par motor mínimo. M_k , Par motor máximo

A5. Rotor de doble jaula

----- Par motor de la jaula exterior. - - - - Par motor de la jaula Interior

— Par total del motor

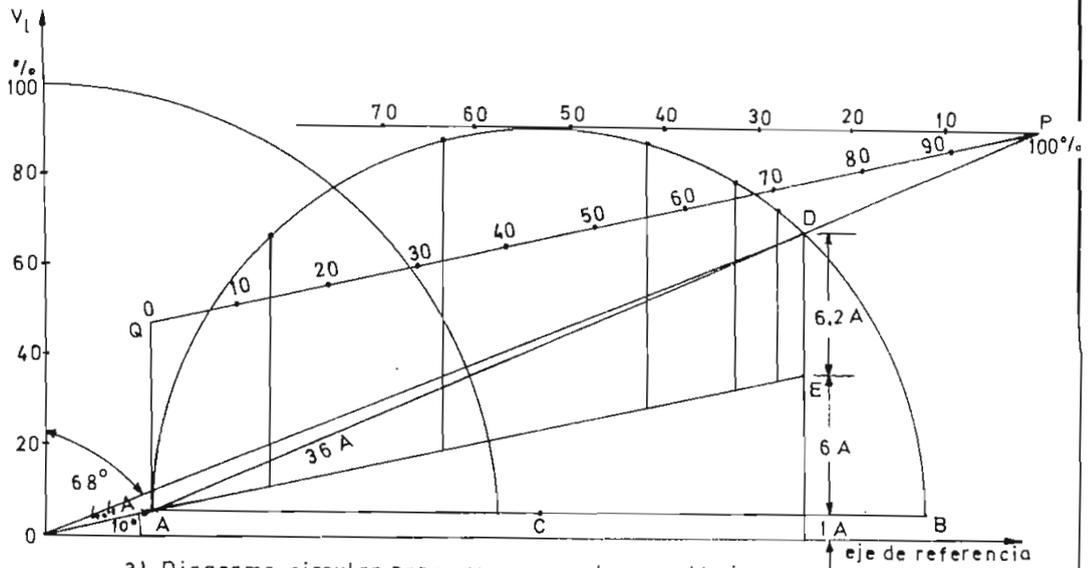
A6. Influencia de la reactancia del rotor

Con reactancia - - - normal. — aumentada

Para analizar el efecto que produce sobre las curvas velocidad-torque-corriente, haremos uso de las ecuaciones (1.1) y (1.2). Al aumentar la reactancia X_2 , asumiendo constante la resistencia R_2 , se produce una acentuada disminución del par de arranque y par máximo, como se muestra en la figura A₆.

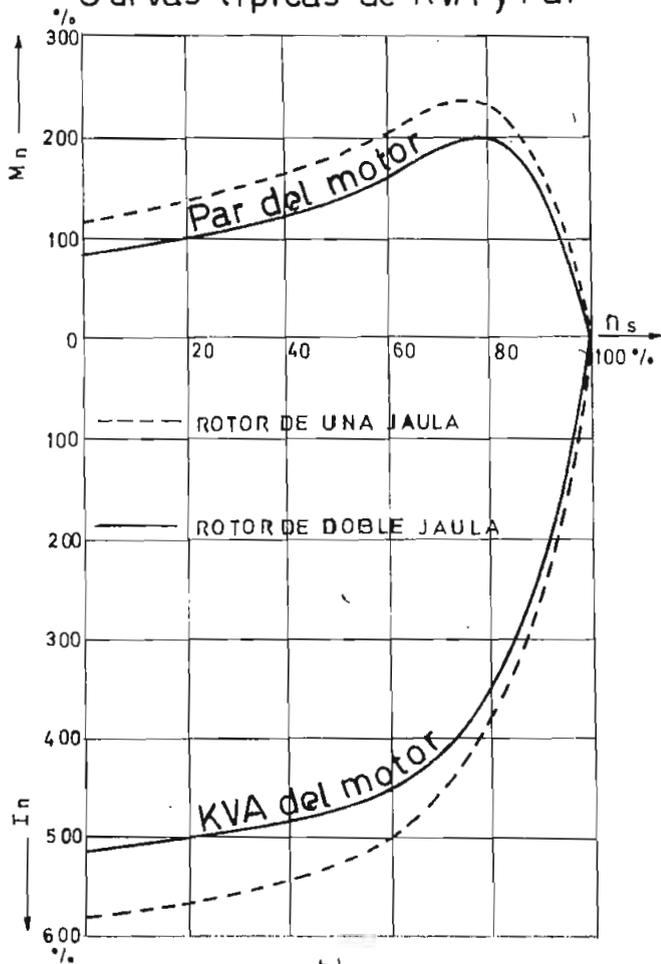
Como el par máximo depende de la reactancia, y si duplicamos su valor, el par máximo se reduce a la mitad (Fig. A₆). Como en el caso de variar la resistencia R_2 , los pares máximos se obtienen a diferentes velocidades, esto es, el deslizamiento varía inversamente con la reactancia. La ventaja fundamental de incrementar la reactancia, es la de lograr un gran desplazamiento de la corriente primaria, pero, concomitantemente el par de arranque y par máximo también disminuyen.

CONCLUSION : Al decir que tipo de motor se ha seleccionar para una instalación determinada ha de prestarse atención a las varias características tratadas anteriormente y la decisión debe basarse en la importancia de éstas para la instalación requerida. Sólo el factor de potencia y el rendimiento no son suficientes para influir en la decisión; pero, si el requisito vital durante el arranque es una baja corriente de línea, ~~pequeño~~ deslizamiento y un torque normal se puede usar un motor de jaula, cuyo rotor tiene baja resistencia y un alto rendimiento a plena carga. Si requerimos de un torque de arranque muy elevado y baja corriente de arranque, se emplearía un motor de doble jaula,



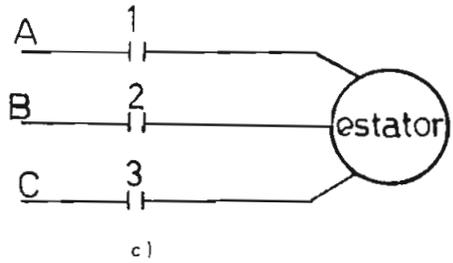
a) Diagrama circular para arranque a pleno voltaje.

Curvas típicas de KVA y Par



b)

Esquema de conexiones primarias



c)

METODO DE ARRANQUE

Arranque a pleno voltaje
con rotor de doble jaula

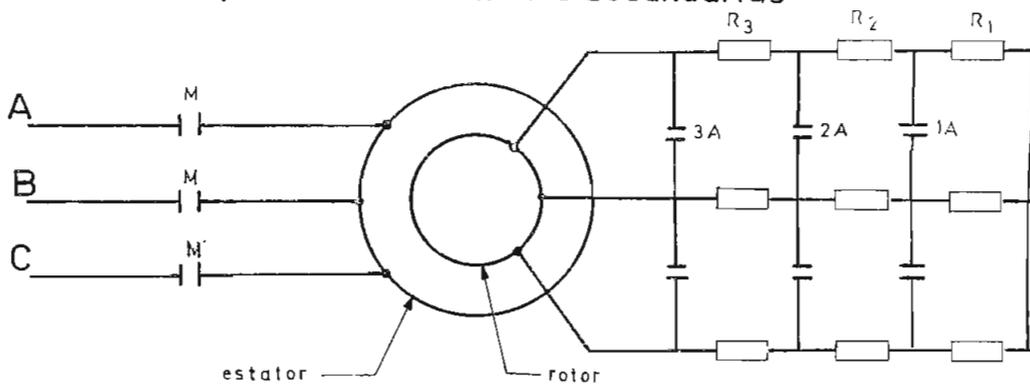
Fig. A7

con rotor de alta resistencia.

En el laboratorio de máquinas eléctricas, se realizó pruebas de arranque de un motor de inducción, con rotores de diferente resistencia, es decir, con rotor de una jaula, doble jaula y con rotor bobinado intercalando resistencias secundarias de 3,3 ; 6,6 ; 9,9 ohmios por fase.

En la figura A₇-b, se ve las curvas típicas de corriente y par de arranque de un motor con rotor de doble jaula; y en la figura A₈-b se compara las curvas típicas de arranque de los tres rotores anteriores; y en la figura A₈-c se muestra que el par máximo no se modifica, pues es independiente de la resistencia del rotor, pero se desplaza hacia las velocidades más bajas cuanto mayor sea la resistencia del rotor, hasta colocarse el par máximo en el punto donde el deslizamiento es igual a la unidad ($s = 1$), es decir, cuando el motor está en reposo, para un determinado valor de la resistencia exterior.

Esquema de conexiones secundarias



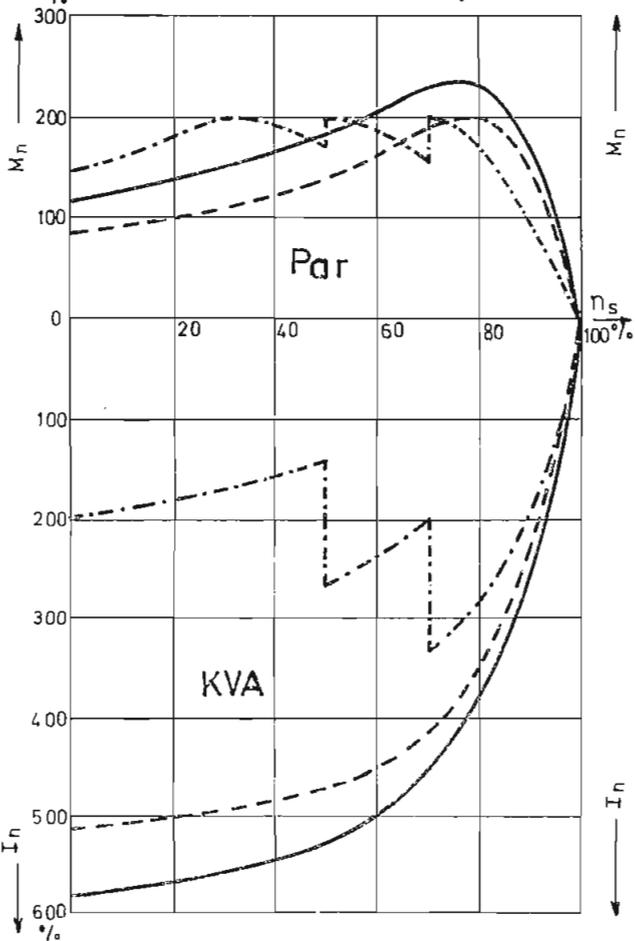
(a)

- ROTOR DE UNA JAULA
- - - ROTOR DE DOBLE JAULA
- · - · - ROTOR BOBINADO

— RESISTENCIA DE 3,3 OHMIOS

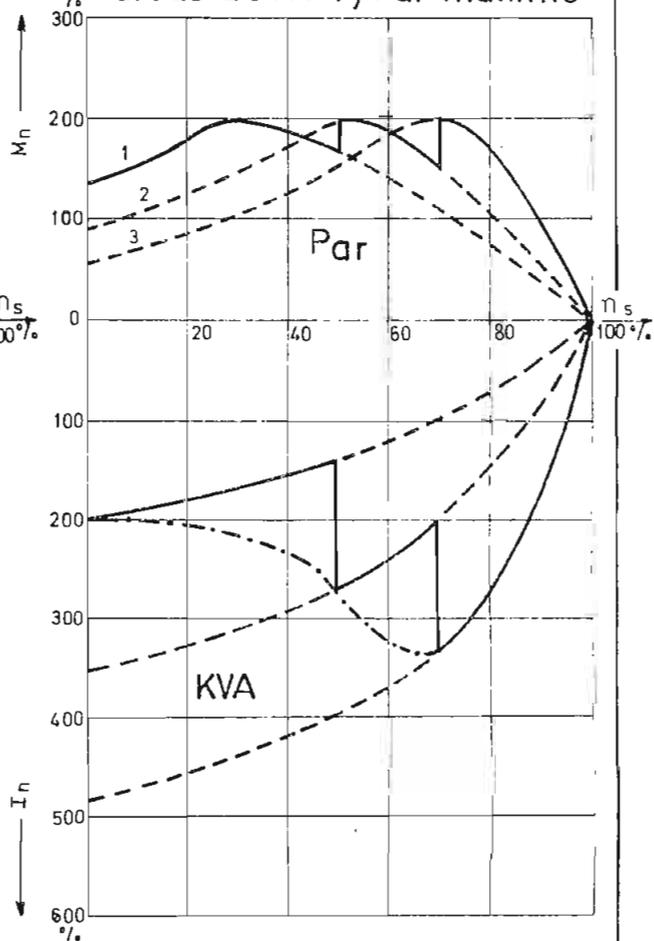
- CURVAS
- 1 CON 9,9 OHMIOS/FASE
 - 2 CON 6,6 OHMIOS/FASE
 - 3 CON 3,3 OHMIOS/FASE

Curvas típicas de KVA y Par



(b)

Curvas de KVA y Par máximo



(c)

Fig. A 8

C A P I T U L O I I I

TIPOS DE CONTROL DE LA ACELERACION

El control de la aceleración de un motor de inducción, comprende los medios para cerrar los contactores de aceleración en sucesión propia, después de haber cerrado el contactor M de línea, (fig.3-1a). Para obtener una aceleración suave, los contactores de aceleración deben cerrarse cuando el motor se ha acelerado en los escalones precedentes hasta una velocidad en la cual el cierre del hcontactor no ocasione, que el par exceda del valor predeterminado.

Los motores de jaula de ardilla, una vez conectados a la línea, se aceleran según sus propias características velocidad-par, las cuales no pueden variarse por medios externos. La aceleración de los motores de inducción de rotor bobinado, puede ser controlada según la manera de ponerse en cortocircuito la resistencia rotórica. Hablando de motores de inducción, el control de la aceleración es más común para motores de rotor bobinado. Según el criterio que se use para controlar el cierre de los contactores secundarios de aceleración, se utiliza los siguientes métodos:

- 1) Control por corriente límite
- 2) Control por frecuencia secundaria y
- 3) Control por tiempo definido

III.1.- CONTROL POR CORRIENTE LIMITE

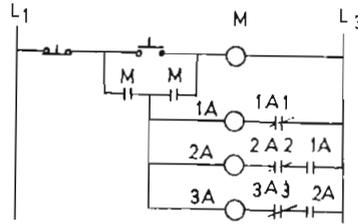
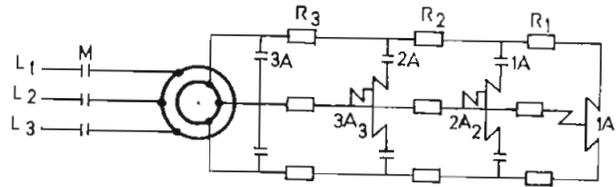
El método de aceleración del motor, por limitación de la intensidad de la corriente, emplea relés que miden la intensidad en el estator o rotor, y estos relés 1A1, 2A2, 3A3 etc, controlan el cierre de sus respectivos contactores 1A, 2A, 3A (fig.3-1a)

Funcionamiento.- Conjuntamente con la explicación de este tipo de aceleración véase las figuras 3-1. Al oprimir el pulsador de arranque se excita el contactor M de línea, y el motor desarrolla un par de arranque instantáneo igual a OH. La magnitud OX es el par a plena carga, y XY es el valor de la resistencia de arranque. En otras palabras, la resistencia total YG del circuito del inducido es la suma de la resistencia interna y externa con la cual se obtiene el par de arranque a plena carga. El valor YA representa la resistencia interna del motor y AG es el valor de la resistencia externa de arranque.

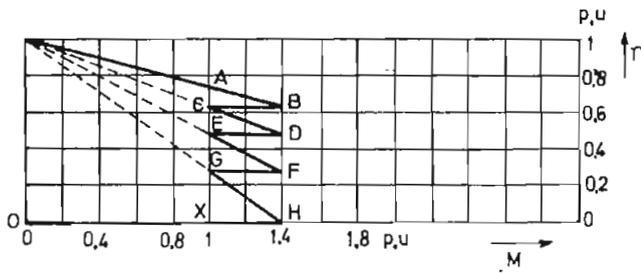
Entonces el par de arranque expresado en función de la resistencia total es,

$$M_{ar} = OH = \frac{1}{YG}$$

Como el par de arranque excede al par de carga, el motor aumenta su velocidad. Durante la aceleración el par disminuye y el motor se acelera a lo largo de la curva velocidad-par HG (fig.3-1b) hasta que el par del motor se hace igual al par de carga. En ese punto la velocidad del motor es XG.



A. Circuito del motor

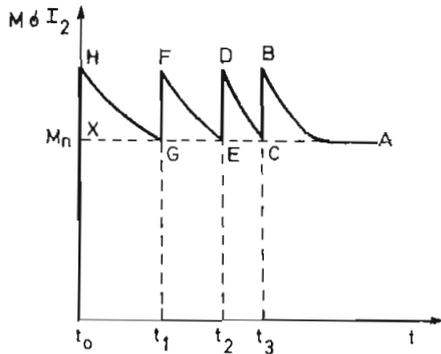


B. Curvas de velocidad-par

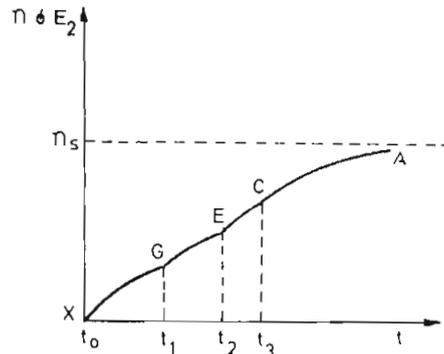
$R_1, R_2, R_3 =$ Resistencia de arranque

$1A_1, 2A_2, 3A_3 =$ Relés

$1A, 2A, 3A =$ Contactores



C. Diagrama par-tiempo



D. Diagrama velocidad-tiempo

Fig. 3-1. CONTROL DE LA ACELERACION DE UN MOTOR DE ROTOR BOBINADO, POR CORRIENTE LIMITE

Como la intensidad de la corriente en el inducido del motor, es proporcional al par del motor, la disminución del mismo corresponde a la disminución de la intensidad de la corriente en el inducido, la cual a su vez se refleja en la disminución de la caída de tensión a través de la resistencia de arranque.

Correspondientemente la fuerza contraelectromotriz del motor aumenta, como también su velocidad. Expresado en las nuevas magnitudes OH es la intensidad de la corriente de arranque, y OX es la intensidad de la corriente a plena carga. En la figura 3-1c se indica de una manera general como varían en función del tiempo el par y la intensidad de la corriente en el inducido. La forma exacta de la curva par-tiempo varía con las características mecánicas de la máquina, tales como la fricción y la inercia, y por lo tanto las curvas indicadas en la figura 3-1 intenta solamente ilustrar la forma general de las curvas. Correspondientemente, el esquema (d) muestra como la velocidad del motor aumenta durante el intervalo de tiempo $t_0 - t_1$

Cuando se ha llegado prácticamente al equilibrio entre el par motor y el par de carga, lo cual se alcanza en el momento t_1 , el primer contactor de aceleración LA se cierra poniendo en cortocircuito el primer escalón de resistencia de arranque, que es igual a EG . El par y la intensidad aumentan instantáneamente hasta el punto F a lo largo de la línea GF , y como el par excede al par de carga el motor se acelera a lo largo de la línea FE ; luego el par disminuye y la velocidad aumenta hasta el tiempo t_2 , igualando prácticamente el par motor y el de carga en el punto E (fig. 3-1b)

Entonces se cierra el contactor de aceleración 2A, y nuevamente el par aumenta instantáneamente hasta el punto D, y el motor se acelera a lo largo de la línea DC hasta el punto C, donde el par motor es igual al de carga en el momento t_3 . Cuando se cierra el último contactor de aceleración 3A y queda toda la resistencia de arranque en cortocircuito, el motor queda conectado a la línea y en este instante el par crece hasta el punto B, y el motor se acelera hasta el punto A, el cual indica su velocidad nominal a plena carga.

Los gráficos de la figura 3-1, son dibujados en función del par máximo de arranque, que es tomado de la figura A₃ del capítulo II, cuya resistencia externa es de 3,3 ohmios cada una.

III.2.- CONTROL POR FRECUENCIA SECUNDARIA

Al arrancar un motor de rotor bobinado, la tensión y la frecuencia, tienen un valor elevado en el circuito secundario, dependiendo sus valores del deslizamiento. A medida que el motor acelera, la tensión y la frecuencia disminuyen conjuntamente, hasta que a velocidad nominal están teóricamente en valor cero. Estas características pueden emplearse para controlar la aceleración del motor, empleando relés dispuestos a cerrar los contactores a determinados valores de frecuencia.

Cada bobina de relé está conectada en serie con un condensador y en derivación con una resistencia potenciométrica, que a su vez, es ta conectada a la resistencia de arranque de una fase, como se muestra en la figura 3-2.

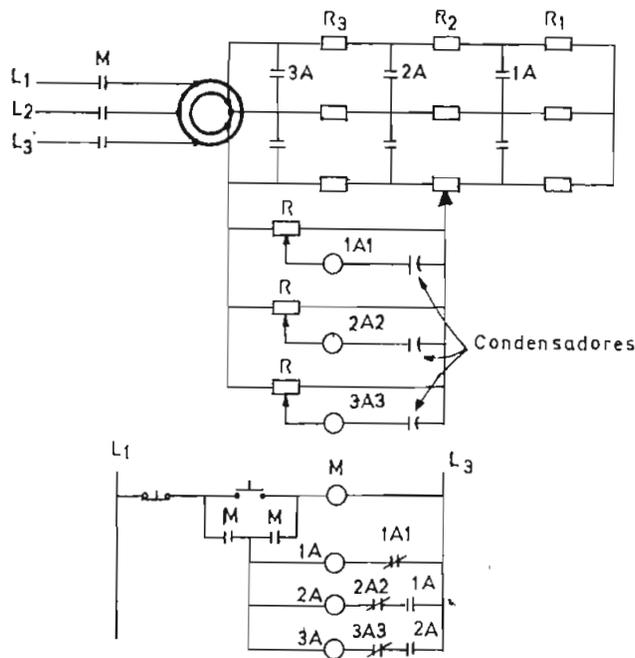


Fig. 3-2.- ACELERACION BASADA EN LA FRECUENCIA

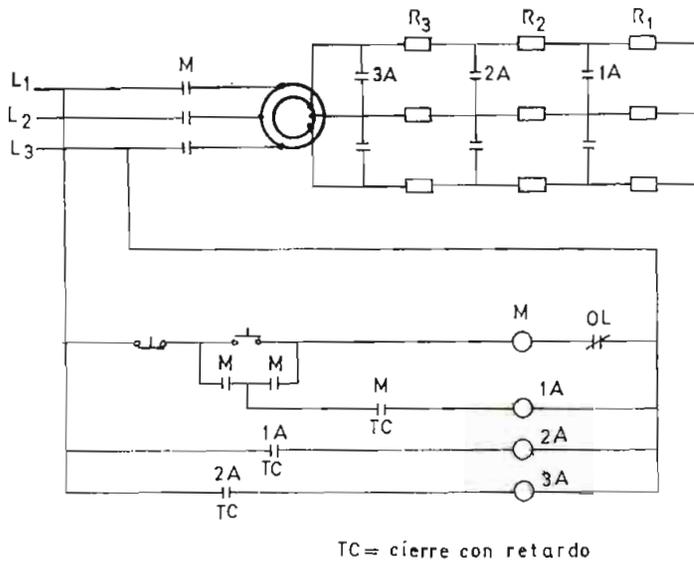


Fig. 3-3.- CONTROL DE LA ACELERACION POR RELES DE TIEMPO

La combinación de la resistencia, inductancia y capacitancia da origen a un circuito resonante, lo cual significa que hay un valor definido de frecuencia, para el cual circulará una gran intensidad de corriente en una cierta zona de frecuencia. El ancho de la banda de frecuencia, viene determinado por el ajuste de la resistencia, por consiguiente los relés pueden funcionar muy eficaz y exactamente para una frecuencia deseada.

Funcionamiento. - Inicialmente con el motor desconectado, los relés de aceleración están cerrados. Al poner en marcha el motor, se cierra el contactor M, y la frecuencia en las bobinas de aceleración en el instante del arranque es la misma que la frecuencia de la línea, en este momento circula una gran intensidad de corriente y se abren inmediatamente sus contactores. Cuando se acelera el motor, la intensidad de corriente en el circuito secundario y la bobina del relé disminuye, consecuentemente, también disminuye la frecuencia por debajo de la zona de resonancia y con un ajuste de la resistencia potenciométrica R, los relés 1A1, 2A2, 3A3, operan con frecuencias predeterminadas, esto es, a velocidades predeterminadas del motor, produciéndose así, con el cierre de los contactores la sucesión deseada para cortocircuitar toda la resistencia de arranque.

III.3.- CONTROL POR TIEMPO DEFINIDO

Los métodos de la limitación de la corriente y de la frecuencia secundaria, determinan el instante en el cual se cierran los contactores de aceleración, midiendo alguna cantidad operatoria del cir

cuito del motor. La sucesión de cierre de contactores está supeditada a las condiciones de carga, y cuando la carga es grande el tiempo de cierre es mayor y la corriente en el inducido no disminuye lo suficiente para la actuación de los relés; en estas condiciones los contactores no pueden cerrarse, consecuentemente, el motor no arranca quedándose sólo en tensión, pudiendo llegar a quemarse la resistencia del inducido y la externa de arranque.

Se evita este problema utilizando el control de aceleración por tiempo definido, como se indica en la figura 3-3. Con este sistema, el cierre de los contactores es función del tiempo y los intervalos de cierre se ajusta de forma que se obtenga bajo las condiciones de carga promedio, una aceleración suave y además que los picos del par sean uniformes.

Concluyendo podemos decir, que los métodos de control de la aceleración por limitación de la corriente y por frecuencia secundaria, no nos ofrecen la seguridad de un arranque normal e incluso el motor no puede arrancar debido a que los elementos que controlan la aceleración dependen de las condiciones de carga. Esto no sucede con el control de aceleración por tiempo definido, ya que los relés actúan en función del tiempo, es decir no depende de la carga del motor ni de ninguna otra magnitud operatoria del mismo.

C A P I T U L O I V

CONTROL DE LA VELOCIDAD.- METODOS COMUNES

El motor de jaula de ardilla no se presta facilmente por simismo a variaciones de velocidad. No hay manera de hacer ningún cambio en los circuitos del rotor, y con el empleo de una resistencia en el circuito primario no se consigue los resultados deseados. El único método satisfactorio de controlar la velocidad es variar la frecuencia, y esto raras veces se intenta, debido al gasto del grupo generador-motor necesario. El motor más versátil para el control de la velocidad es el de rotor bobinado con anillos rozantes, empleando un control secundario, este tipo de motor puede tener muchos pasos de velocidad, como se desee.

Las máquinas de inducción conectadas en cascadas constituyen sistemas destinados a la regulación de velocidad uniforme y económica, el principio general se basa en la introducción de una fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m) en el circuito del rotor del motor, para aumentar el deslizamiento para cualquier carga y velocidad. La energía de deslizamiento que se pierde con un control de resistencia, se aprovecha con estos sistemas de control, siendo devuelta a la línea en forma de energía eléctrica o bien convertida en potencia mecánica y aplicada al eje del motor principal.

El costo de las máquinas auxiliares, limita el empleo de estos sistemas a los grandes motores, en donde la energía ahorrada justi-

fica su costo. Los varios tipos de control de la velocidad de los motores de inducción, se emplea generalmente en las grandes industrias donde los motores tienen varios miles de caballos de potencia. En los siguientes párrafos se describen algunos sistemas de regulación de velocidad, que hasta en la actualidad tienen bastante uso.

SISTEMA KRAEMER

IV.1.- CONTROL DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR A POTENCIA CONSTANTE

La figura 4-1A es el esquema de circuito de montaje en cascada Kraemer con conexión mecánica. La cascada se compone de un motor de inducción MI con rotor bobinado, al que se controlará su velocidad, un motor de corriente continua Mcc y un convertidor rotativo, CR. El Mcc está acoplado mecánicamente al eje del motor MI. Durante el funcionamiento normal de la cascada los anillos rozantes del motor MI, están conectados eléctricamente a los del convertidor rotativo CR, y las escobillas del colector están conectadas a las escobillas del motor de corriente continua Mcc.

Veamos el proceso de regulación de velocidad y el factor de potencia de la cascada. El motor MI arranca como un motor de anillos rozantes corriente empleando una resistencia en el circuito del rotor; cuando el motor tiene ya velocidad se desconecta la resistencia de arranque y el rotor se acopla eléctricamente, al arrollamiento de corriente alterna del convertidor rotativo CR, que fun

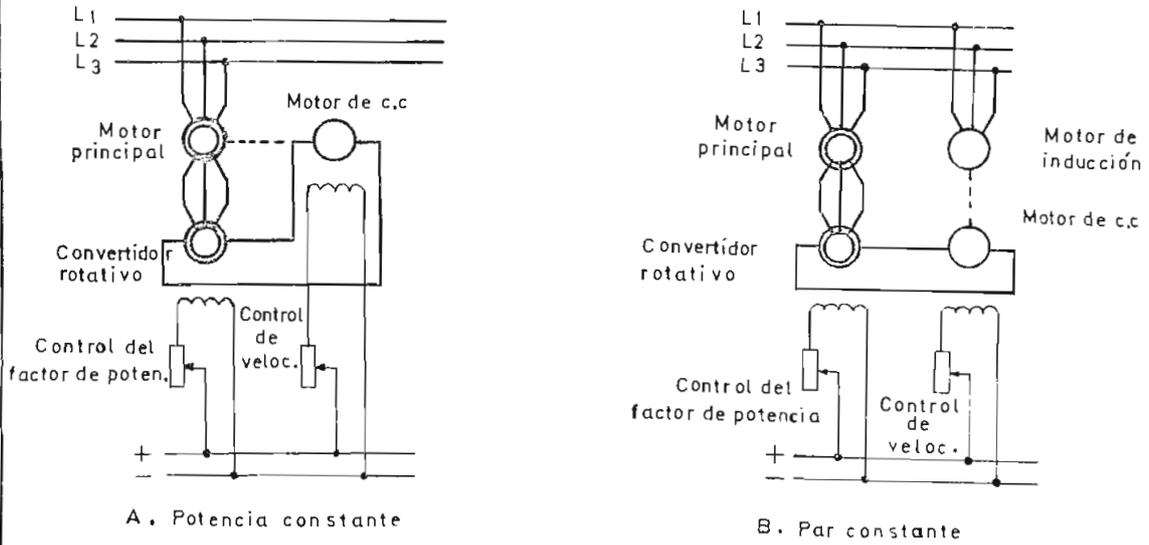


Fig. 4-1 Conexiones del grupo KRAEMER de regulación de velocidad.

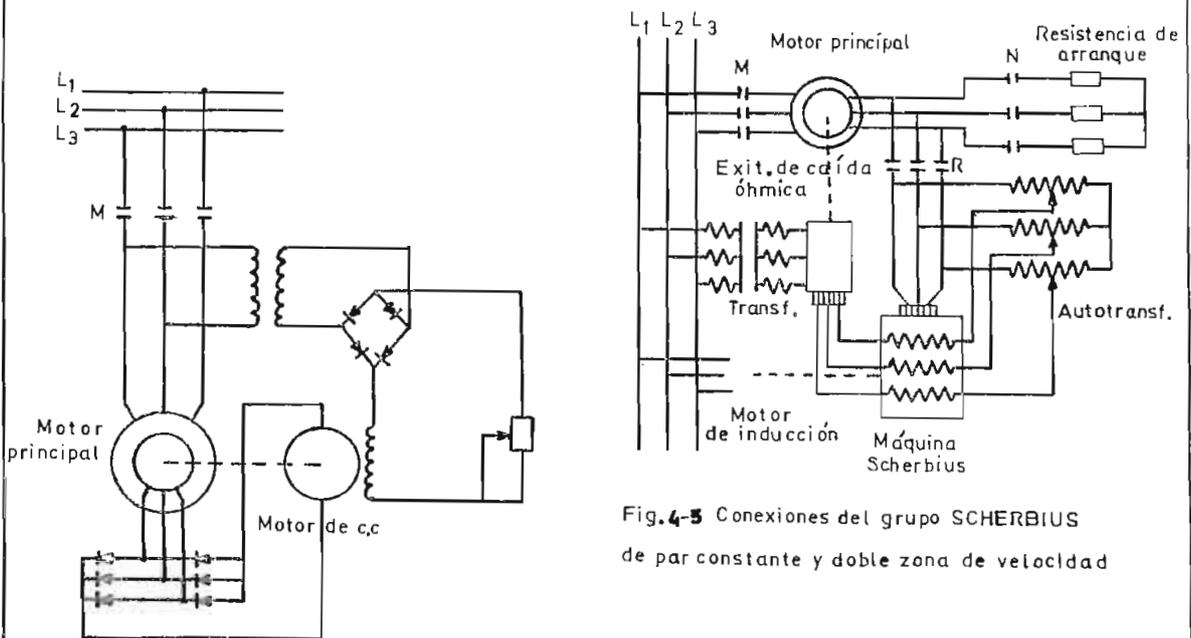


Fig. 4-5 Conexiones del grupo SCHERBIUS de par constante y doble zona de velocidad

Fig. Conexiones del grupo KRAEMER reformado de regulación de velocidad

ciona convirtiendo la potencia de deslizamiento, en potencia de corriente continua. La función del motor de corriente continua Mcc, es convertir la potencia eléctrica en potencia mecánica que se devuelve al eje de la cascada, la potencia de deslizamiento menos las pérdidas en las máquinas auxiliares. Si aumentamos la corriente de excitación del motor Mcc, variando el reóstato de campo, en este instante la fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.) del motor Mcc, aumenta, debido a esto la corriente que el motor Mcc toma del convertidor rotativo CR y, la corriente que el CR toma del motor MI también disminuyen. De todo ello resulta la reducción del par, del motor MI lo cual a su vez da lugar a la creación de un par dinámico negativo en el eje de la cascada, y la velocidad del motor principal MI también disminuye.

Si disminuimos la corriente de excitación del motor Mcc, su (f.c.e.m.) disminuye y el proceso se invierte en relación con el anterior. Por tanto, la velocidad del motor MI aumenta y la frecuencia (f_2) de deslizamiento disminuye, en consecuencia se produce una disminución de la velocidad del convertidor rotativo CR. En el caso en que la velocidad n_k de la cascada sea aproximadamente igual a la velocidad sincrónica n_1 del motor MI, el convertidor CR funcionará con una velocidad muy baja determinada por la expresión :

$$n_{sc} = f_2 : p_{sc}$$

donde n_{sc} = velocidad sincrónica de la cascada. El convertidor CR, desempeña prácticamente la misión de una resistencia activa conectado al circuito secundario del motor MI. Por consiguiente, la cascada con conexión mecánica permite regular la velocidad del motor

MI, pero sólo en sentido descendente desde la velocidad sincrónica,
es decir, representa un sistema llamado de zona única.

De lo anterior se deduce que la regulación del motor principal MI, se realiza variando la corriente de excitación del motor de corriente continua Mcc. También se puede obtener una cierta corrección del factor de potencia de la cascada, sobreexcitando el campo del convertidor rotativo CR. La figura 4-2 es el diagrama del flujo de potencia de una cascada Kraemer con conexiones mecánicas

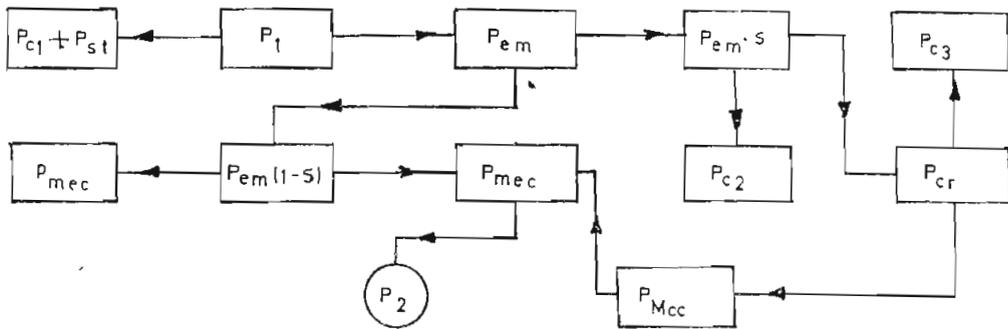


Fig. 4-2

P_1 es la potencia consumida por el motor MI, tomada del circuito de fuerza; $P_{em} = P_1 - p_{cl} - p_{st}$ es la potencia electromagnética del motor MI; $P_{em}(1-s)$ es la potencia transmitida por el motor MI al eje de la cascada; $P_{em}s$ es la potencia de deslizamiento; p_{c2} es la potencia que suplente las pérdidas en el cobre del rotor del motor MI; P_{cr} es la potencia entregada al convertidor CR; p_{c3} es la potencia que suplente las pérdidas debidas a las máquinas auxiliares CR y Mcc; P_{Mcc} es la potencia transmitida al eje de la cascada por medio del motor Mcc; p_{mec} es la potencia que suplente la ventilación y las pérdidas mecánicas del motor MI en el eje de la cascada MI-CR-Mcc, y P_2 es la potencia mecánica útil en el eje de la cascada.

De acuerdo con el circuito de la figura 4-1A y el diagrama de

flujo de potencia de la figura 4-2, el rendimiento de la cascada es

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + V_e I_e} \times 100\%$$

donde $V_e I_e$ es la potencia que suple las pérdidas en los circuitos de excitación de las máquinas auxiliares CR y Mcc.

IV.2.- CONTROL DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR A TORQUE CONSTANTE

En la figura 4-1B el motor de corriente continua Mcc en vez de estar acoplado al eje del motor principal MI, puede unirse mecánicamente a un motor de inducción Mi, que opera como un generador de inducción quien entrega la potencia deslizante a la línea, y está conectado eléctricamente al motor MI; este equipo es capaz de operar sobre un rango de velocidad con par constante.

La velocidad del motor principal MI es controlada, variando la excitación del motor de c.c. Mcc, el cual hace variar el voltaje aplicado a través del conmutador del convertidor rotativo CR, este voltaje a su vez hace variar el voltaje alterno aplicado sobre los anillos rozantes del motor principal MI. El sistema Kraemer con conexión eléctrica permite la regulación de velocidad también, sólo en sentido descendente desde la velocidad sincrónica.

La mayor parte de grupos Kraemer se emplean para proporcionar una reducción de velocidad del 25% al 35%, siendo el 50% el límite máximo práctico. El costo inicial del sistema es menor si se emplea una frecuencia de 60 c/s y grandes velocidades del motor.

La figura 4-3 es el diagrama de flujo de potencia de esta cascada para velocidades inferiores a la sincrónica. En este caso la potencia del primario del motor P_1 es igual a la suma de la potencia del circuito P_c y de la potencia secundaria P_a de la unidad reguladora, es decir, $P_1 = P_c + P_a$. La potencia P_1 menos las pérdidas $P_{cl} + P_{st}$ en el devanado del estator, es convertida en potencia electromagnética P_{em} , la cual se divide en la potencia $P_{em}(1-s)$ transmitida al rotor del motor MI y la potencia de deslizamiento $P_s = P_{em}s$ que es transmitida a la unidad de regulación, así, $P_{em} = P_{em}(1-s) + P_{em}s$.

La potencia $P_{em}(1-s)$ se convierte en la potencia mecánica total del motor, P_{mec} ; restando de esta potencia las pérdidas mecánicas y las pérdidas adicionales en el acero p_{mec} ; obtenemos la potencia mecánica útil del motor MI que, en lo que concierne a la conexión eléctrica entre este motor y la unidad reguladora, es la potencia P_2 en el eje de la unidad principal; así, $P_2 = P_{mec} - p_{mec}$. La potencia P_k obtenida por la unidad reguladora desde los anillos rozantes del motor MI es igual a la potencia de deslizamiento $P_{em}s$ menos las pérdidas p_2 en el circuito secundario del motor, es decir $P_k = P_{em}s - p_2$. Finalmente restando de la potencia P_k las pérdidas p_a en la unidad reguladora obtenemos la potencia P_a , que es devuelta a los bornes del circuito primario del motor; por consiguiente, $P_a = P_k - p_a$.

Comparando los diagramas de flujo de potencia de las figuras 4-2 y 4-3, se deduce que una cascada con conexión mecánica funciona

más económicamente con potencia constante en el eje, mientras una cascada con conexión eléctrica funciona más eficientemente con par constante.

SISTEMA SCHERBIUS /

IV.2.2.- CONTROL DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR A TORQUE CONSTANTE

La figura 4-5 es el esquema del circuito de la cascada eléctrica Scherbius para regulación de velocidad en dos zonas. El generador con colector compensado GC llamada máquina "Scherbius" que sirve como máquina reguladora y que está construida para excitación de estator, está conectada al circuito secundario del motor de inducción regulado MI. El arrollamiento de excitación AE del generador con colector está conectado a un lado a un lado a los bornes del generador principal a través de un autotransformador AT, y en el otro lado a las escobillas de la exitatriz de caída óhmica ECO que está montado en el mismo eje que el motor de inducción y conectado al mismo circuito de fuerza que el motor MI, a través de un transformador T con tomas en el secundario.

El regulador recibe parte de su excitación desde los anillos rozantes del motor MI a través de un autotransformador AT, y parte desde la exitatriz de caída óhmica. El generador con colector GC y el autotransformador AT sirven para regular la velocidad y el factor de potencia de la cascada en condiciones de funcionamiento más o menos distintas de la velocidad sincrónica.

Cambiando las tomas del autotransformador AT, se varía la fuerza de campo de la máquina reguladora, determinando la fuerza de campo el valor de la tensión aplicada a los anillos rozantes del motor, MI. Cuando la velocidad de la máquina se aproxima a la de sincronismo, la tensión entre los anillos rozantes del motor de inducción disminuye continuamente y la acción del generador GC y del autotransformador resulta insuficiente. Así no es posible conseguir que la velocidad de la cascada aumente hasta el 95% o más de la velocidad sincrónica.

A velocidades por debajo del sincronismo, la potencia del rotor del motor principal MI pasa a la máquina reguladora, que hace funcionar al motor de inducción Mi, como un generador y devuelve potencia a la línea. Para pasar por el sincronismo, es decir, para obtener un sistema en cascada con regulación de velocidad de dos zonas, es necesario introducir una f.e.m, en el devanado de la excitación AE del generador con colector GC, esto se logra invirtiendo el campo de la máquina reguladora, por lo tanto, la dirección de la potencia también se invierte y todo el sistema funcionará por encima del sincronismo.

Para este propósito se monta la excitatriz en la prolongación del eje del motor principal MI, que tiene el mismo número de polos que el motor principal, de forma que su frecuencia de rotación es la misma. Entrega una tensión constante desde su conmutador a los

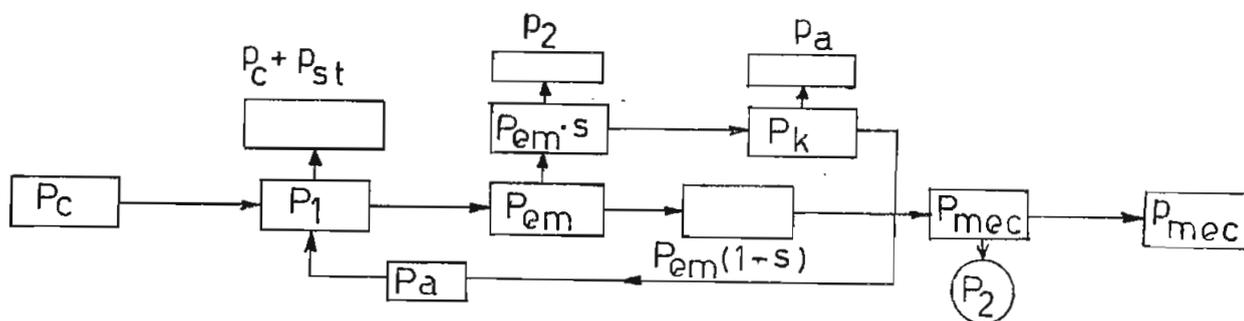


Fig. 4-3

arrollamientos de campo de la máquina reguladora. A velocidades próximas al sincronismo cuando la frecuencia tiende a cero, la excitatriz proporciona excitación suficiente para que la máquina reguladora pueda suministrar corriente al rotor del motor principal MI, de esta manera actúa sobre la velocidad o sobre el factor de potencia de la cascada. La corriente suministrada es superior a la necesaria para accionar la carga y proporcionar el par necesario, para atravesar la zona inestable hasta las velocidades estables por encima del sincronismo.

IV.1.1.- CONTROL DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR A POTENCIA CONSTANTE

El circuito de la figura 4-5 en lugar de la conexión eléctrica, se hace una conexión mecánica para controlar la velocidad manteniendo constante la potencia en el eje. Así, la máquina Scherbius está conectada rígidamente al eje del motor principal MI; en este sistema la potencia deslizante será transmitida como potencia mecánica al eje del motor principal, operación que se realiza sobre cierto rango de velocidad.

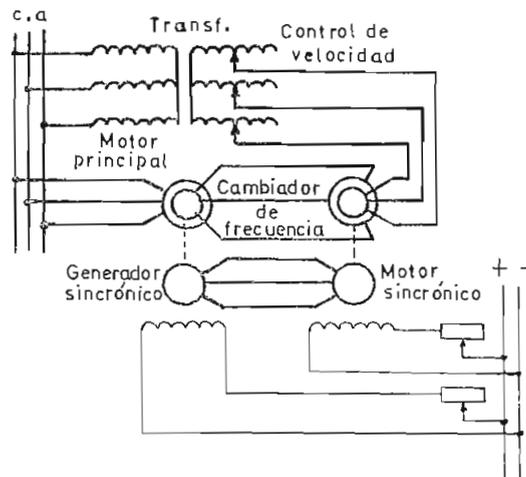
CONCLUSION : comparado el sistema Kraemer con el sistema Scherbius éste, tiene la ventaja de funcionar fácilmente por debajo y por encima del sincronismo. Asimismo, tiene la desventaja de necesitar dos máquinas de tipo especial sólo empleadas para este propósito. No es necesaria excitación con corriente continua, siendo tomada toda la potencia de una sola fuente de alimentación. El sistema trabaja bien, tanto para 60 c/s como para 25 c/s, siendo mayor el costo de las máquinas reguladoras para 60 c/s. La gama máxima de velocidades para 60 c/s es de 2:1, mientras que para 25 c/s es de 5 ó 6:1.

SISTEMA CON CONVERTIDOR DE FRECUENCIA

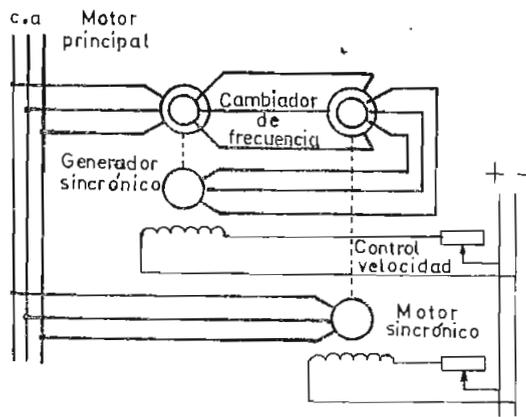
IV.2.3.- CONTROL DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR A TORQUE CONSTANTE

La figura 4-6A muestra los circuitos básicos para controlar la velocidad manteniendo el par constante. Los anillos rozantes del motor principal MI están conectados al conmutador del convertidor de frecuencia CF, que es una máquina similar en construcción a la excitatriz de caída óhmica del sistema Scherbius, los anillos rozantes del convertidor CF son conectados a la línea a través de los taps de un transformador T.

Acoplado al eje del motor principal MI está un pequeño generador sincrónico GS, quien produce una frecuencia correspondiente a la verdadera velocidad del motor; a este generador se conecta eléctricamente un pequeño motor sincrónico Ms, quien impulsa al convertidor de frecuencia y compensa sus pérdidas mecánicas.



A. Par constante



B. Potencia constante

Fig. 4-6 Conexiones de un grupo regulador de velocidad por cambio de frecuencia

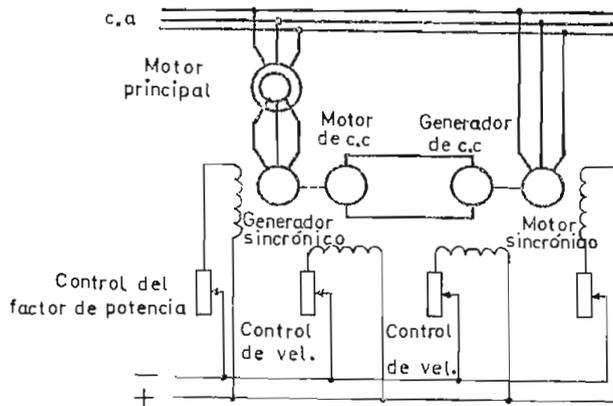


Fig. 4-7 Conexiones de un grupo regulador de velocidad con doble alimentación

Gira a una velocidad que corresponde a la verdadera velocidad del motor sincrónica M_s , y la frecuencia a través de los anillos rozantes del convertidor de frecuencia es igual, a la frecuencia de la línea. La potencia deslizante fluye desde los anillos rozantes del motor principal MI a través del convertidor de frecuencia CF, hacia la línea. Este paso se opera con par constante sobre cierto rango de velocidades; cambiando los taps del transformador varía el voltaje a través de los anillos rozantes del convertidor de frecuencia, este nuevo voltaje afecta al voltaje del conmutador del convertidor de frecuencia y por consiguiente se regula la velocidad del motor principal MI.

IV.1.2.- CONTROL DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR A POTENCIA CONSTANTE

La figura 4-6B muestra la disposición del sistema con cambio de frecuencia, manteniendo la potencia mecánica constante. El convertidor de frecuencia está accionado por un pequeño motor sincrónico que suministra sus pérdidas mecánicas. El motor sincrónico tiene el mismo número de polos que el convertidor de frecuencia. Los anillos rozantes del convertidor de frecuencia están conectados al estator de otro motor sincrónico, el cual va unido al eje del motor principal y tiene el mismo número de polos que el motor principal. La función del convertidor de frecuencia es variar la frecuencia del motor sincrónico en la del rotor del motor principal sin variar la tensión. Como gira a velocidad sincrónica, con la frecuencia del deslizamiento aplicada a su conmutador, la frecuencia de los anillos rozantes será la misma que la del motor

sincrónico, o sea la diferencia entre la frecuencia de línea y la frecuencia de deslizamiento. La tensión terminal del motor sincrónico puede pues variarse aumentando o disminuyendo la fuerza de su campo. Esto hará variar igualmente la tensión aplicada al rotor del motor principal, dando como resultado el cambio de la velocidad de todo el accionamiento. Este método es limitado a los sistemas de suministro de 25 c/s y a gamas de velocidades relativamente pequeñas (10 a 15% a cada lado del sincronismo), si bien permite pasar a través de la velocidad sincrónica, el costo y tamaño de las máquinas auxiliares es mayor con bajas velocidades sincrónicas y aumenta con el grado de control de velocidad que se requiere.

SISTEMA CON DOBLE ALIMENTACION

IV.2.3.- CONTROL DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR A TORQUE CONSTANTE

La regulación de velocidad de un motor de inducción, puede ser obtenida por conexión del estator del motor principal MI, a una línea de frecuencia constante y los anillos rozantes a un generador sincrónico GS supliendo una frecuencia ajustable, tal arreglo se indica en la figura 4-7.

El generador sincrónico es impulsado por un motor de c.c, de velocidad regulable. Variando la velocidad del motor de c.c, por ajuste del voltaje del generador de c.c, varía la frecuencia del generador sincrónico y consecuentemente la velocidad del motor principal MI.

El factor de potencia del motor principal MI, puede ser corregido variando la excitación del generador sincrónico. La potencia deslizando fluye desde el motor principal MI a través del generador sincrónico y el grupo motor-generador hacia la línea, constituyendo esencialmente un sistema a par constante.

CONCLUSION : Este método, comparado con los otros sistemas de control de velocidad, emplea más máquinas rotativas y sin embargo varias operaciones que aventaja el sistema compensa a otras que desaventaja. Así, ninguna máquina de tipo conmutador son usadas en el circuito secundario del motor principal MI, el rango de velocidad no es limitado siendo posible reducir a cero la velocidad del motor principal MI; por consiguiente este sistema puede ser usado para el arranque de motores grandes teniendo capacidades del orden de 10 a 1.000 H.P, con una mínima perturbación de la línea.

La operación del sistema se debe iniciar con el estator del motor principal MI desconectado de la línea, luego se arranca el motor impulsador Mcc de velocidad regulable, para igualar la frecuencia del generador sincrónico a la frecuencia de la línea; luego de estar sincronizadas las dos frecuencias se conecta el estator a la línea y la velocidad del motor MI es controlada por el generador sincrónico.

IV.3.- IMPORTANCIA DEL CONTROL DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR

El control de la velocidad de los motores eléctricos en general y del motor de inducción en particular, es de vital importancia especialmente en la vida industrial. En numerosas industrias, los motores deben satisfacer requisitos de características de velocidad muy estrictos, tanto en lo que respecta a la uniformidad de control como al funcionamiento en condiciones económicas. En lo que respecta a las características de control de la velocidad, los motores de inducción son inferiores a los de corriente continua, siendo esto más acusado cuanto más amplio es el margen de control.

Se han realizado muchas investigaciones, para hallar los medios de mejorar las características de control de la velocidad de los motores de inducción, pero todavía no se ha conseguido que estos superen a los de corriente continua en aplicaciones en que los requisitos de control de la velocidad del motor son rigurosos. Cuando se desea un control muy fino de la velocidad se recurre generalmente a un circuito cerrado, con la intervención de máquinas de c.c con las cuales se obtiene el rendimiento deseado y la uniformidad del producto, si se trata de un control industrial.

En la actualidad, para solucionar aún más, el problema del control de la velocidad se emplean sistemas modernos con sus tiempos de operación más rápidos y su control más preciso, que permite a la instalación industrial mantener la velocidad requerida en régimen

permanente;por lo tanto,resulta indispensable la incorporación de un circuito que corrija las perturbaciones transitorias,como la variación del voltaje y frecuencia que ocurre dentro del sistema de potencia.

Finalmente,como resultado de un buen control de la regulación de velocidad,la instalación trabaja con el mínimo de contratiempos con el más alto rendimiento,teniendo como respuesta un producto mejor y más abundante a un costo más bajo,por estas razones el control preciso de la velocidad de los motores ejerce una importante influencia sobre el proceso industrial.

IV.4.- COMPORTAMIENTO DEL MOTOR CON LA VARIACION DE LA VELOCIDAD :
A TORQUE CONSTANTE Y VARIABLE, Y A POTENCIA CONSTANTE Y VA-
RIABLE

El comportamiento de un motor de inducción de rotor bobinado, con la variación de la velocidad por introducción de una resistencia externa en el circuito del rotor, lo observé en el laboratorio de máquinas eléctricas con un motor de las siguientes características :

CETEL - BRUXELLES

Δ/λ ; 220/380V ; 7/4,04 A

1800 RPM ; Potencia = 2 CV

En los siguientes párrafos se describe el comportamiento del motor, para cada una de las condiciones mencionadas.

Torque constante :- El comportamiento del motor bajo condiciones de par constante, para cualquier velocidad inferior a la nominal está grafizado en la figura 4-4.1. Cuando varía la velocidad n del motor, la potencia mecánica en el eje del mismo también varía en la misma proporción, como se ve desde la ecuación,

$$M = \frac{P_2 \times 60}{2 \pi n} \text{ (Kg-m)} \quad ($$

la razón, de la disminución de potencia en el eje se debe a que, las pérdidas en el circuito del rotor varían inversamente con la velocidad, debido al incremento de la resistencia externa para regular la velocidad. Consecuentemente también varía el rendimiento del

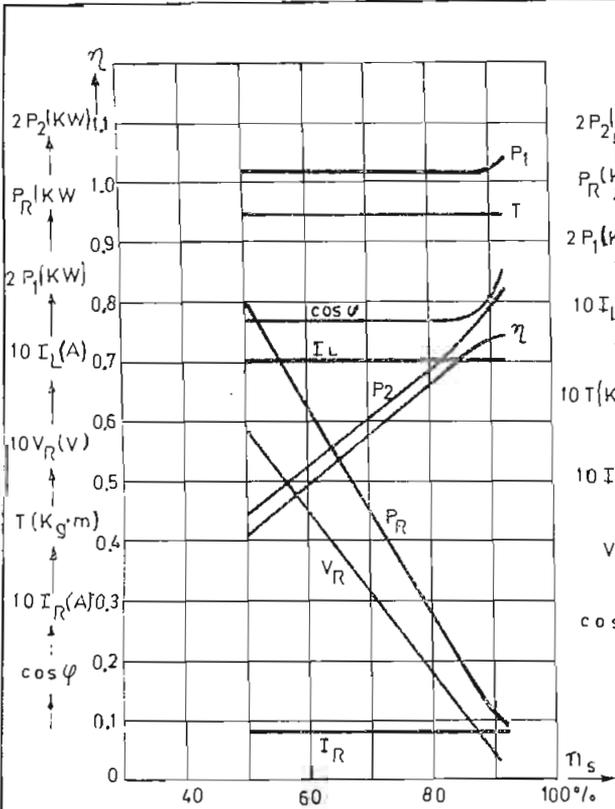


Fig. 4-4.1

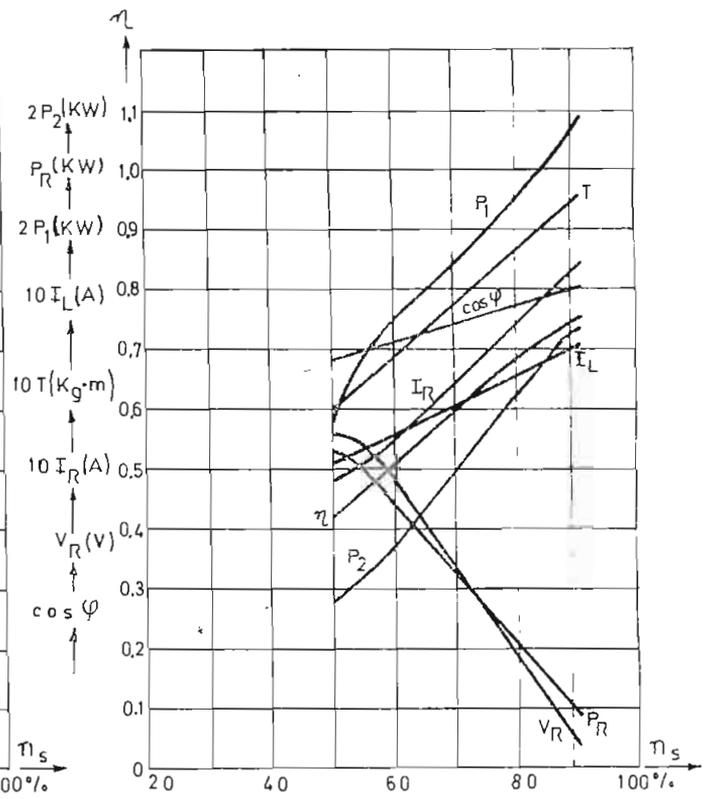


Fig. 4-4.2

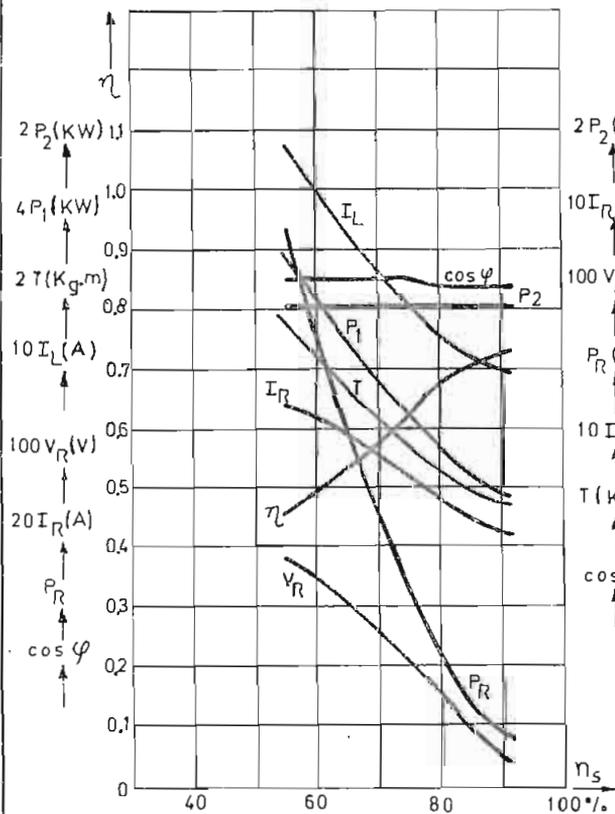


Fig. 4-4.3

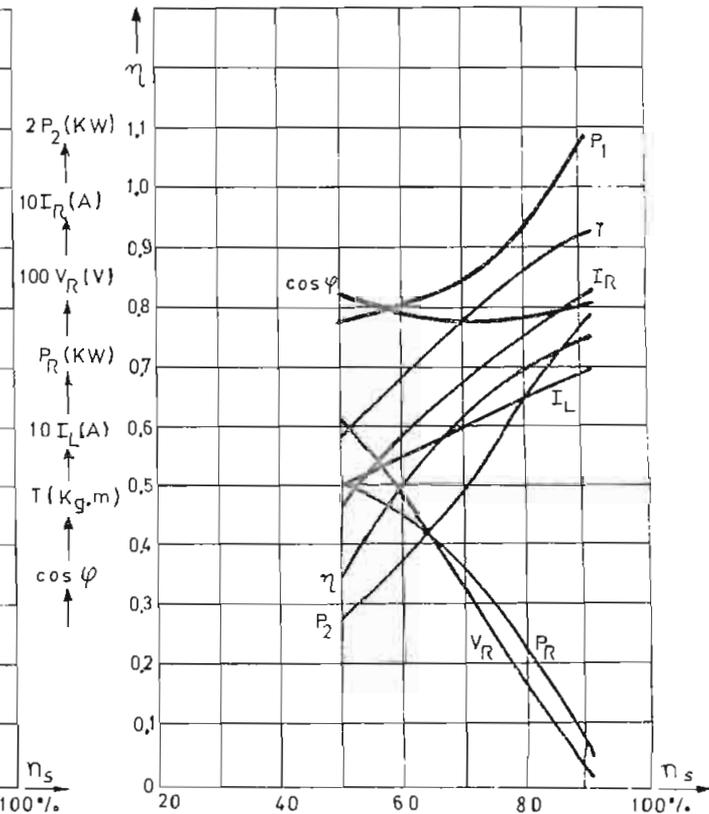


Fig. 4-4.4

motor en proporción a la velocidad. La razón para esto es, que la potencia eléctrica P_1 requerida permanece prácticamente constante para todas las velocidades. Con la siguiente ecuación se obtiene el rendimiento del motor

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%$$

Debido al hecho de que la potencia eléctrica P_1 y la corriente de línea no varía, el factor de potencia también permanece constante. También la corriente secundaria de fase permanece constante para cualquier velocidad y el voltaje secundario también varía inversamente con la velocidad.

Torque variable :- En la figura 4-4.2 se demuestra el comportamiento del motor cuando desarrolla par variable, para cualquier velocidad por debajo de la nominal. Al variar la velocidad del motor, la potencia mecánica P_2 en el eje y el par también varían proporcionalmente con el cambio de velocidad. La disminución de la potencia P_2 , se debe a que las pérdidas en el circuito del rotor se incrementan por la introducción de una resistencia externa para variar la velocidad, y como el par depende de la potencia P_2 , éste también disminuye.

Como consecuencia de la disminución de potencia en el eje, se produce variación del rendimiento del motor en proporción directa con el cambio de la velocidad. Y además, como la potencia eléctrica P_1 varía proporcionalmente con la velocidad, consecuentemente el factor de potencia y la corriente de línea experimenta una va-

riación proporcional a la velocidad. Refiriéndonos a las magnitudes secundarias, la corriente varía proporcionalmente con el cambio de la velocidad y el voltaje inversamente.

Potencia constante :- En la figura 4-4.3, se representa el comportamiento del motor, cuando la potencia mecánica P_2 es constante para cualquier velocidad inferior a la nominal. Al variar la velocidad del motor, el par desarrollado por el mismo varía inversamente; las curvas del par y potencia eléctrica P_1 son más pronunciadas a medida que la velocidad disminuye. El rendimiento del motor también varía en forma proporcional con la variación de la velocidad, debido a que, la potencia P_2 en el eje permanece constante y la potencia eléctrica P_1 varía inversamente con la velocidad.

Refiriéndonos a la corriente de línea, su magnitud varía rápida e inversamente con el cambio de velocidad; por lo tanto, la potencia P_1 y la corriente de línea varían proporcionalmente entre sí, y en forma inversa a la velocidad, consecuentemente, el factor de potencia permanece prácticamente constante. Respecto a la corriente y voltaje secundario, varían inversamente con la velocidad, por lo tanto, la potencia en el rotor se incrementa mayormente con la disminución de la velocidad.

Potencia variable :- En la figura 4-4.4, se muestra el comportamiento del motor cuando la potencia mecánica en el eje es variable para velocidades inferiores a la nominal.

La potencia mecánica P_2 varía proporcionalmente con la velocidad, lo mismo sucede con la potencia eléctrica P_1 , diferenciándose únicamente en que la potencia P_1 tiende a permanecer constante a partir del 60% de la velocidad, por lo tanto, el factor de potencia resulta ser mayor para velocidades menores que la nominal.

En cuanto a las demás características del motor, como el rendimiento, el par, y la corriente absorbida de la línea cambian proporcionalmente con la velocidad. En cuanto a la corriente secundaria del rotor, varía proporcionalmente y el voltaje inversamente con la velocidad. Finalmente, podemos decir basándonos en los cuatro casos de comportamiento del motor, que: el rendimiento del motor varía en forma proporcional con el cambio de velocidad, pero, prácticamente permanece constante para cada paso de velocidad de las condiciones anteriores; y referente al factor de potencia, éste permanece constante con el cambio de la velocidad, para las condiciones de par y potencia mecánica constantes; en cambio para las condiciones de par y potencia mecánica variables, el factor de potencia también varía. En síntesis podemos concluir diciendo que, el motor trabaja más económicamente cuando la potencia mecánica es constante en el eje y trabaja más eficientemente cuando el par que desarrolla es constante.

C A P I T U L O V

CONTROL DE LA VELOCIDAD POR NUEVOS METODOS

V.1.- CONTROL DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR POR VARIACION DE LA FRECUENCIA.

La velocidad de un motor de inducción es directamente proporcional a la frecuencia, y viene expresada en la siguiente ecuación $n=120f/p$, donde n es la velocidad sincrónica, f es la frecuencia y p es el número de polos. Cambiando la frecuencia en un amplio margen es posible controlar la velocidad de un motor de inducción, pero este método tiene el inconveniente de requerir un generador sincrónico separado que funcione a velocidad variable, por cuya razón el sistema es aplicable sólo, cuando el motor es alimentado por instalaciones especiales.

Los principales casos de regulación de velocidad posibles son:

- a) con par constante, es decir, M constante;
- b) con potencia mecánica constante, es decir, P_2 constante;
- c) cuando el par es directamente proporcional al cuadrado de la frecuencia, es decir, $M \approx f_1^2$.

(el comportamiento del motor para diferentes velocidades y las condiciones anteriores, se observó experimentalmente en el laboratorio de máquinas eléctricas y está explicado en el punto IV-4 del capítulo IV).

En la investigación de este problema⁺, se ha demostrado que, si se desea que el motor funcione a diferentes frecuencias con valores prácticamente constantes del rendimiento (η), factor de potencia ($\cos \phi$), la capacidad de sobrecarga $k_m = \frac{M_{max}}{M_n}$, (M_{max} = par máximo y M_n = par nominal) y el deslizamiento (s) durante el cambio de frecuencia (f_1) se debe variar simultáneamente la tensión primaria (V_1), ya que, como un motor de inducción es un transformador, el flujo de cualquier voltaje fijo varía inversamente proporcional como la frecuencia f_1 aplicada, y si los motores que funcionan con frecuencia variable se desea que trabajen en todo momento con el flujo óptimo (ϕ_m), la tensión aplicada que da lugar al campo principal debe cumplir con la siguiente relación,

$$\phi_m = \frac{V_1}{f_1} = \text{constante}$$

El voltaje primario se varía en la misma proporción, que la frecuencia f_1 , en razón de prevenir el incremento de la densidad de flujo, trayendo como consecuencia el incremento de: pérdidas en el núcleo magnético, corriente magnetizante y reactancia de dispersión cuando la frecuencia es disminuída. Esto no implica ninguna dificultad si se emplea un generador sincrónico separado, el cual provee potencia al motor.

a) El cambio de frecuencia se debe variar debe variar simultáneamente con la tensión V_1 y de acuerdo con la siguiente ley;

$$\frac{V_1'}{V_1} = \frac{f_1'}{f_1} \sqrt{\frac{M'}{M}} \quad (5.1)$$

Aquí V_1' y M' son la tensión y el par correspondientes a la frecuencia f' , y V_1 y M corresponden a la frecuencia f_1 .

$$\text{Cuando el par, } M = \frac{33.000m_1 p V_1^2}{2 \times 746 \times 120 f} \frac{R_2'}{(R_1 + R_2')^2 + 4\pi^2 f^2 (L_1 + L_2')^2}$$

que es la ecuación (1.2) del capítulo I, pero expresada en función de la frecuencia, sea constante y desde la ley anterior podemos deducir que,

$$\frac{V_1'}{V_1} = \frac{f_1'}{f_1} \quad (5.2)$$

es decir, la tensión aplicada al motor debe variar proporcionalmente a la frecuencia. Al variar la frecuencia es incrementado o disminuido el par en el término,

$$\frac{R_2'}{f [(R_1 + R_2')^2 + 4\pi^2 f^2 (L_1 + L_2')^2]}$$

por variación de la reactancia de dispersión, pero es balanceado por el término,

$$V_1^2$$

por la variación del voltaje en la misma proporción que la frecuencia.

b) Para potencia constante, el par del motor varía inversamente a la velocidad y por lo tanto a la frecuencia, es decir,

$$\frac{M'}{M} = \frac{f_1}{f_1'} \quad (5.3)$$

de donde,
$$\frac{V_1'}{V_1} = \sqrt{\frac{f_1'}{f_1}} \quad (5.4)$$

Desde estas condiciones, se puede decir que el efecto del cambio de frecuencia puede ser balanceado por el propio voltaje, en la misma proporción, como la raíz cuadrada del cambio de frecuencia, en lugar de ser directamente proporcional a la potencia. A continuación ilustraremos con un ejemplo, que el cambio de frecuencia en la misma proporción que el voltaje, no altera la potencia mecánica P_2 . Tenemos un motor de 280 V y 25 c/s, queremos que opere sobre una línea de 440 V y 60 c/s.

La raíz cuadrada de las frecuencias es: $\sqrt{\frac{60}{25}} = 1,55$

El nuevo voltaje será: $1,55 \times 280 = 434$ V

La densidad del flujo magnético en el entrehierro es cerca de:

$$\frac{1}{1,55} = 0,645 \text{ p.u. } \quad \text{ó } 64,5 \%$$

El par será: $(\frac{280}{434})^2 \times \frac{1}{100} = 42 \%$ del valor correspondiente al de 25 c/s.

La nueva velocidad será: $\frac{60}{25} = 2,4$ veces la que corresponde a la de 25 c/s.

La potencia resultante será: $\frac{60}{25} \times \frac{42}{100} = 1,01$ veces de la potencia a 25 c/s, es decir, prácticamente el mismo valor.

Para saber como varía el par, en función de la frecuencia haremos uso de la ecuación del deslizamiento con la cual se obtiene el par máximo, tomada de la ecuación (1.3) del capítulo I; y se puede decir que, varía en orden inversamente proporcional a la frecuencia debido a que la reactancia de dispersión también varía proporcionalmente a la frecuencia.

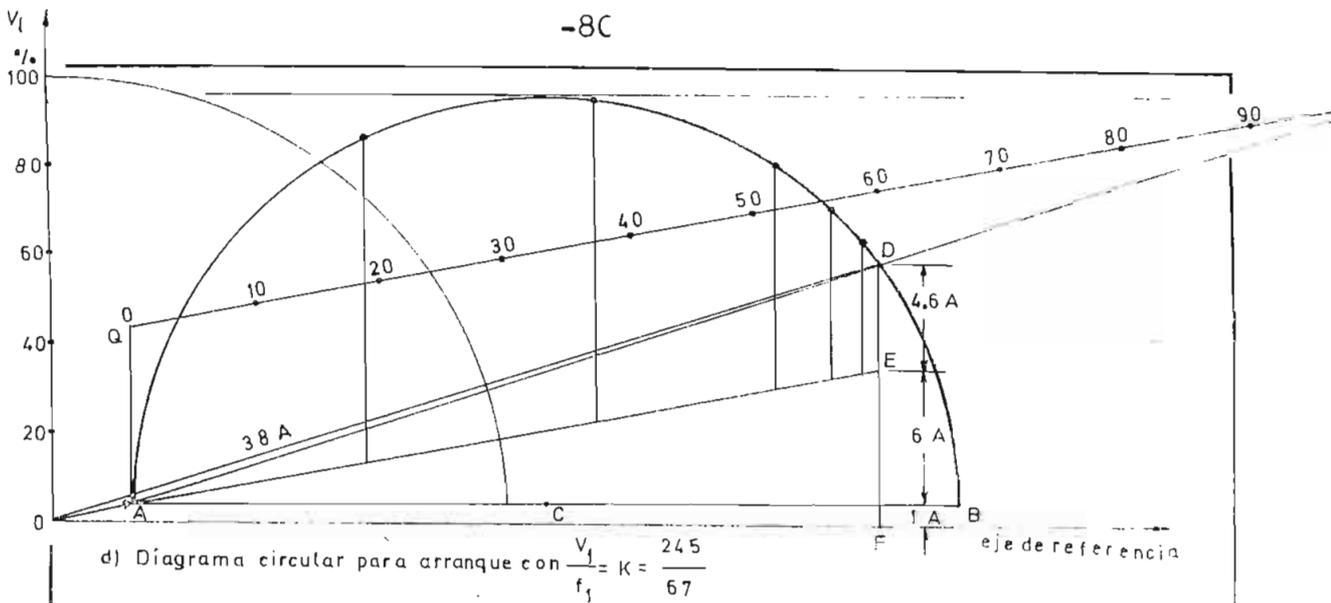
+ Conexión de motores de inducción (A.M.Dudley)

Si la frecuencia f_1 , varía proporcionalmente al v V_1 del circuito, es decir manteniendo la misma condición magnética original $\frac{V_1}{f_1} = \text{constante}$, el par pasa por un valor máximo con un cierto deslizamiento, que es tanto mayor cuanto menor es la frecuencia f_1 . En el laboratorio de máquinas eléctricas se realizó pruebas para frecuencias de (10-25-50-67 c/s) véase figura 5-1.

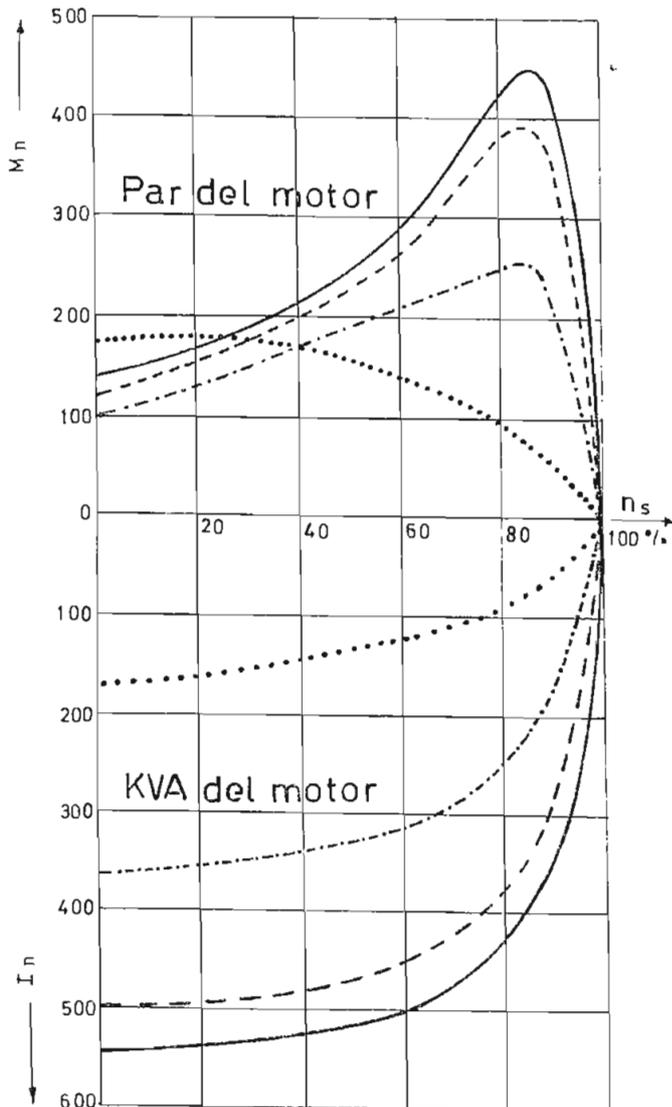
Entonces el par es directamente proporcional al cuadrado de la frecuencia, por lo tanto,

$$\frac{V_1^2}{V_1} = \left(\frac{f_1^2}{f_1}\right)^2$$

es decir, la tensión del motor debe variar como el cuadrado de la frecuencia. Sin embargo, en la práctica hay que apartarse algo de estas deducciones, primero porque el núcleo de acero de la máquina siempre está más o menos saturado y, segundo porque las condiciones de refrigeración de la máquina varían con el cambio de velocidad.



Curvas típicas de KVA y Par



CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE UN MOTOR CUANDO SE VARIA EL VOLTAJE PRIMARIO (V_1) Y LA FRECUENCIA (f_1) EN LA MISMA PROPORCION

- $V_1 = 36.6 \text{ V}$ $f_1 = 10 \text{ c/s}$
- · - · - $V_1 = 92 \text{ V}$ $f_1 = 25 \text{ c/s}$
- - - $V_1 = 183 \text{ V}$ $f_1 = 50 \text{ c/s}$
- $V_1 = 245 \text{ V}$ $f_1 = 67 \text{ c/s}$

$$\frac{V_1}{f_1} = K = \frac{36.6}{10} = \frac{92}{25} = \frac{183}{50} = \frac{245}{67} = 3.66$$

Fig. 5-1

V.2.- ESQUEMA DE UN CONTROLADOR DE VELOCIDAD POR VARIACION DE LA FRECUENCIA.

En la técnica de los accionamientos, se presenta muy frecuentemente el problema de realizar operaciones basadas en un determinado número de revoluciones. Hasta ahora se empleaban exclusivamente para tal fin, aparatos que se acoplan mecánicamente al eje de accionamiento para el control de la velocidad; sin embargo, estos métodos no siempre ofrecen condiciones satisfactorias en lo que a las posibilidades de montaje y mantenimiento se refieren.

El avance que ha experimentado la técnica de los transistores, ha permitido el desarrollo de elementos constructivos sencillos, con los cuales se ha creado un aparato de control del número de revoluciones que cumple las funciones requeridas sin necesidad de montajes adicionales en el accionamiento motoriz.

En la actualidad existen dispositivos para la regulación de la velocidad de un motor.

V.2.- ESQUEMA DE UN CONTROLADOR DE VELOCIDAD POR VARIACION DE LA FRECUENCIA .

En la técnica de los accionamientos, se presenta muy frecuentemente el problema de realizar operaciones basadas en un determinado número de revoluciones. Hasta ahora se empleaban exclusivamente para tal fin, aparatos que se acoplan mecánicamente al eje de accionamiento para el control de la velocidad; sin embargo, estos métodos no siempre ofrecen condiciones satisfactorias en lo que a las posibilidades de montaje y mantenimiento se refieren.

El avance que ha experimentado la técnica de los transistores, ha permitido el desarrollo de elementos constructivos lógicos, con los cuales se ha creado un aparato de control del número de revoluciones en función de la frecuencia, que por procedimientos eléctricos cumple las funciones requeridas sin realizar montajes adicionales en el accionamiento ni en la máquina motriz.

En la actualidad existen dispositivos estáticos que permiten la regulación de la velocidad de los motores trifásicos por medio de rectificadores con circuito intermedio, como se ilustra en la figura 5.2. Con rectificadores convertidores se logra el intercambio de energía entre dos redes de corriente alterna, sin necesidad de que el número de fases y la frecuencia sea la

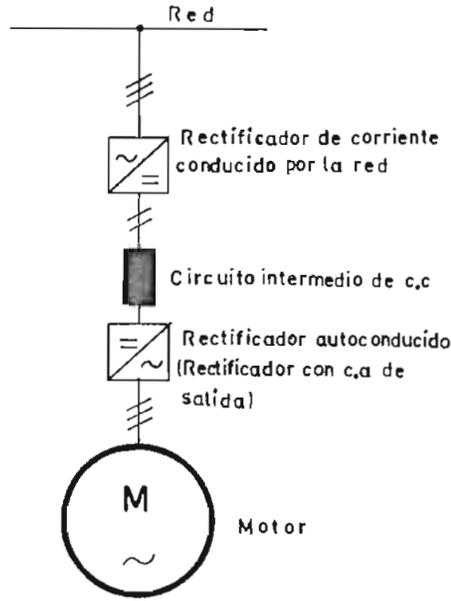


Fig. 5-2

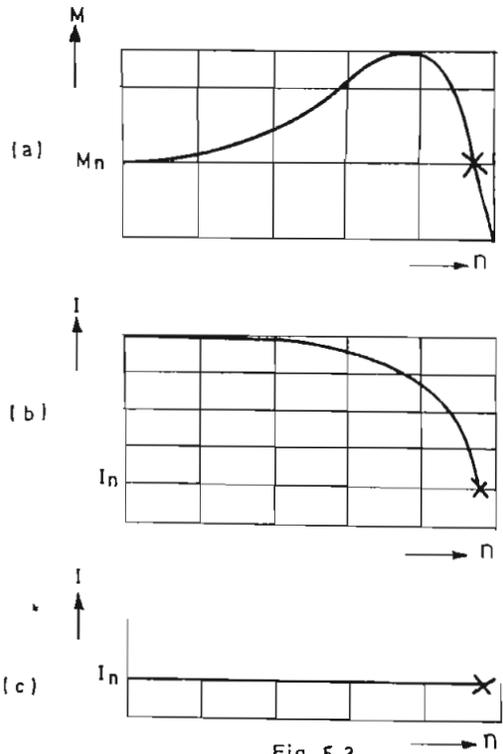


Fig. 5-3

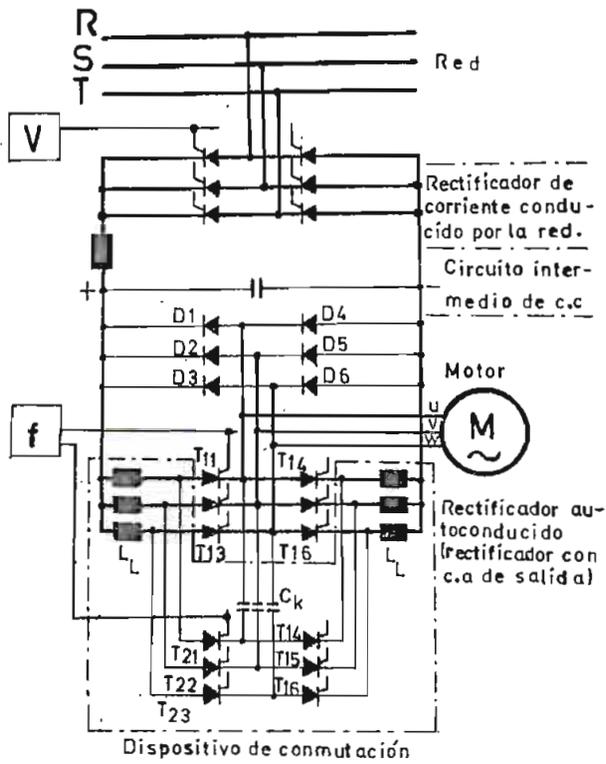


Fig. 5-4

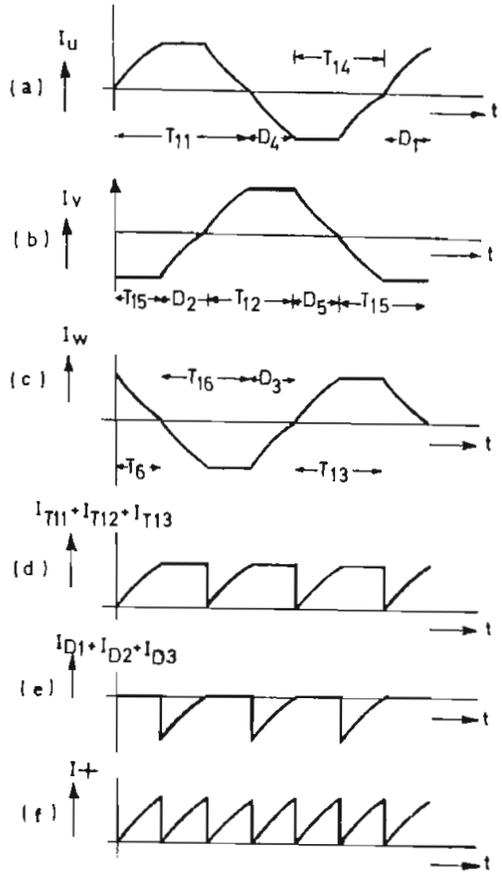


Fig. 5-5

misma. La relación de las frecuencias de uno y otro sistema es susceptible de variación dentro de un amplio margen. De lo dicho se deduce que, partiendo de una red de suministro de frecuencia constante (60 c/s, por ejemplo), un rectificador convertidor ofrece la posibilidad de alimentar motores trifásicos de diferentes frecuencias, con lo que se consigue regular la velocidad de giro. Un accionamiento de este tipo reúne las ventajas de los motores de corriente continua, cuya velocidad es regulable

En la figura 5.2 se representa el esquema unifilar de un rectificador convertidor, con circuito intermedio de corriente continua, para alimentar un motor de corriente alterna trifásica. Este motor puede ser sincrónico o asincrónico, independientemente; sin embargo, en la mayoría de los casos se adopta la ejecución del motor con rotor de jaula, por la gran sencillez de éste respecto a las demás máquinas eléctricas y por resultar particularmente favorable la regulación de su velocidad.

Exigencias que presenta el motor de rotor de jaula al rectificador convertidor.

Una parte considerable de la corriente absorbida por el estator de las máquinas eléctricas es reactiva; lo dicho es válido para cualquier estado de carga y es debido al fenómeno de magnetización y a la reactancia de dispersión de la máquina. Sin embargo, a través del circuito intermedio de corriente continua,

no se puede absorber de la red ninguna potencia reactiva para transmitirla al motor; por ésto, debe preverse el circuito de rectificador convertidor de forma que pueda ceder dicha corriente reactiva.

Contrariamente a lo que sucede en las máquinas sincrónicas, el motor en marcha no suministra por sí mismo tensión alguna. De ahí que al rectificador con corriente alterna de salida le falta la tensión de conmutación, indispensable para cortar la corriente de la válvula en conducción al quedar cebada la siguiente válvula. La tensión de conmutación debe, en consecuencia, obtenerse por otros medios y se hace de forma que genere el propio rectificador.

Es obligado que el motor asincrónico trabaje con el flujo magnético óptimo ϕ_m , cualquiera que sea su estado de carga, ya que su momento de giro es proporcional al cuadrado de dicho flujo. Sin embargo, este requisito no se logra por la simple conexión a una red estable, ya que el campo principal de la máquina del que se deduce el campo magnético, varía con la caída de tensión que tiene lugar en el estator en función de la carga. Si en los motores alimentados a frecuencia variable se desea trabajar en todo momento con el flujo óptimo ϕ_m , la tensión V_1 que dá lugar al campo principal debe cumplir con la siguiente relación

$$\phi_m = \frac{V_1}{f_1} = \text{constante}$$

Es de desear que en el arranque, para alcanzar una velocidad de trabajo determinada, el motor no absorba más corriente que la estrictamente necesaria para obtener el momento de giro preciso. Al arrancar con el momento de giro nominal un motor conectado a una red estable, cuya característica $M=f(n)$ sea la de la figura 5.3a absorbe la corriente que se deduce de la figura 5.3b.

Alimentándole con un rectificador convertidor, el margen de la variación de la frecuencia se puede hacer lo suficientemente grande para que la mínima coincida o sea inferior a la frecuencia de deslizamiento nominal del motor; de esta forma, en el arranque con el momento nominal la máquina absorba tan sólo, la corriente nominal como se observa en la figura 5.3c.

La corriente de alimentación de una máquina asincrónica debe carecer, en lo posible, de oscilaciones armónicas de la frecuencia fundamental debido a que los armónicos de tensión dan origen a mayores pérdidas en el hierro y los de corriente, a mayores pérdidas en el cobre.

Constitución y funcionamiento del rectificador convertidor.

Al desarrollar un rectificador convertidor con circuito intermedio, pueden seguirse en principio, dos caminos: la tensión continua del circuito intermedio permanece constante o bien se regula desde el lado del rectificador de corriente conducido por la red perteneciente al rectificador convertidor. En el primero de

estos casos, es necesario que la tensión de alimentación del motor sea la suficiente. En este caso, las válvulas del rectificador con corriente alterna de salida deben trabajar con frecuencias elevadas, lo que produce mayores pérdidas en el cobre y el hierro. Por ello, cuando se trata de alimentar accionamientos de marcha variable se adopta preferentemente el rectificador convertidor con la tensión del circuito intermedio variable. En la figura 5-4 se muestra un circuito en el que se han empleado únicamente válvulas de semiconductores (las controladas son tiristores y las no controladas, simplemente diodos de Silicio)

El rectificador convertidor consta de rectificador, circuito intermedio y rectificador con corriente alterna de salida Fig 5-4. En la etapa rectificadora, conectada en puente trifásico, se procede a la rectificación de la tensión de la red y se controla de forma que, cumpla la condición anotada anteriormente de mantener el flujo magnético del motor lo más constante posible. En el circuito intermedio se efectúa el aislamiento de la tensión, de esta forma se consigue que la frecuencia de ondulación de la tensión a la salida del rectificador no tenga ninguna influencia en el comportamiento del motor.

Por fin, como en el caso del rectificador conducido por la red, el rectificador con corriente alterna de salida está montado en puente trifásico (válvulas principales son las que aparecen en la figura 5-4, bajo la denominación T_{11} a T_{16}). Puesto que la carga conectada al rectificador con corriente alterna de salida, o

sea la máquina asincrónica, absorbe siempre una corriente inductiva, se hacen indispensables las válvulas sin controlar D_1 a D_6 a través de las cuales puede circular la corriente del motor, en caso de extinguirse una válvula principal. Por medio de la regulación de las válvulas principales se determina la frecuencia de la tensión de salida del rectificador con corriente alterna de salida y, con ello, la velocidad de giro de la máquina.

Como ya hemos dicho, la máquina asincrónica no suministra al rectificador con corriente alterna de salida ninguna tensión de conmutación. Se conmuta la corriente del motor de las válvulas principales a los diodos sin controlar, es preciso un dispositivo especial. A cada válvula principal se le asigna otra de conmutación (T_{21} a T_{26}) que, con uno de los tres condensadores de conmutación C_k , constituye un circuito en paralelo por el que circula la corriente del motor al producirse el cebado de la válvula de conmutación.

La carga de los condensadores últimamente citados suministra la tensión de conmutación necesaria. A este proceso de conmutación le sigue otro, instantes más tarde, en el que la corriente del motor pasa a circular a través de la válvula no controlada correspondientemente. Entre tanto se ha producido el cebado de la válvula principal de la fase siguiente del motor.

Puesto que también en el caso de ser bajo el número de revoluciones (tensión del circuito intermedio reducida) debe poderse

conmutar la máxima corriente del motor, la tensión del circuito intermedio no es suficiente para cargar los condensadores de conmutación. Este es el motivo por el cual se disponen bobinas de carga, por las que circula la corriente del motor, cuya energía magnética sirve para cargar los condensadores en función de la corriente, de forma que, incluso en el caso de ser reducida la tensión del circuito intermedio, la conmutación se efectúa correctamente.

Queda todavía por explicar como el rectificador convertidor suministra la corriente reactiva que el motor asincrónico absorbe cualquiera que sea su estado de carga. A través del rectificador conducido por la red no es posible transmitir potencia reactiva alguna. Supongamos que existe un desfase inducido de 60° entre las ondas fundamentales de la corriente y la tensión del motor. Las curvas a, b y c que aparecen en la figura 5.5 nos muestra las tres corrientes del motor.

En el dibujo se han señalado también los períodos de conducción de cada válvula del rectificador con corriente alterna de salida. Si a la suma de las corrientes de las válvulas principales (figura 5.5d) le restamos la suma de las corrientes de las válvulas sin controlar (figura 5.5e) obtendremos la corriente absorbida al circuito intermedio de corriente continua (figura 5.5f). Dicha corriente continua absorbida posee una ondulación de frecuencia seis veces mayor que la del motor.

El rectificador suministra el valor medio de esta corriente

continúa a través de la bobina de alizamiento. Para disminuir las oscilaciones de los valores instantáneos debe preverse un condensador alizador que actúa como un acumulador de energía.

Un rectificador convertidor estático, en que no existe ninguna pieza sometida a desgaste, puede sustituirse ventajosamente en lugar de un convertidor mecánico de cualquier tipo.

V.3.- CONTROL DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR POR VARIACION DE TIPO DE DEVANADO

La velocidad sincrónica n_1 está determinada por la relación

$$n_1 = \frac{120 f}{p}$$

donde: f es la frecuencia primaria

p es el número de polos

Si se dá la frecuencia f_1 , entonces, mediante la conmutación de las partes del devanado del estator se puede conectar para diferente número de polos, por el simple cambio del número de bobina

cada polo fase, consecuentemente, también varía la velocidad sincrónica y la velocidad del motor (n). Pero en este caso, el control de la velocidad del motor, no se efectúa continuamente sino por pasos o escalones, a menudo en dos pasos con una relación de velocidad de 2:1. Estos motores se llaman de dos velocidades. Aunque no sea práctica la regulación de la velocidad en los motores de jaula de ardilla, es posible tener dos, tres y cuatro velocidades constantes, con una especial disposición del arrollamientos del estator.

La conmutación del devanado o cambio del número de polos en el estator se puede realizar de la siguiente manera:

- a) colocando un devanado en el estator y luego cambiando el número de polos mediante la correspondiente conmutación de las partes del devanado;
- b) disponiendo dos devanados independientes en el estator, uno con conmutación y otro sin conmutación del número de polos de cada uno de ellos.

Con esta disposición, puede obtenerse cualquier combinación que se desee, dentro de las velocidades posibles del motor. Si el rotor tiene fases bobinadas, la conmutación de las partes del devanado o número de polos, debe ser simultánea en el estator y rotor. Esto complica la construcción del rotor, por lo que los motores con conmutación suelen tener un rotor en cortocircuito en forma de devanado de jaula.

Existen varios métodos para cambiar los pares de polos de un devanado. El que más se emplea, es el de cambiar el sentido de la

corriente en las mitades de cada devanado de fase. Las figuras 5-6 a,b,c,son esquemas de circuitos de las conexiones de las mitades del devanado para cambiar el número de polos en la relación de 2:1

Los esquemas a y b se llaman conexiones en serie y el c en paralelo. También se pueden cambiar las conexiones de los devanados de fase de estrella a triángulo y viceversa.

Así, cuando se cambia el devanado del estator, en el caso general, cambian todas las características del mismo y la densidad del flujo en el entrehierro.

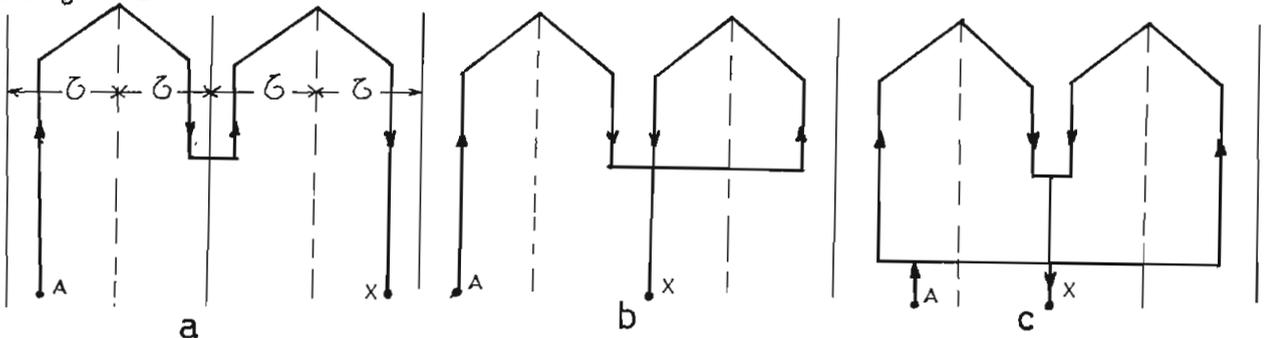


Fig. 5-6

Siendo, como es sabido que,

$$E = \pi \sqrt{2} f N_1 k_p \phi_m \quad (5.6)$$

si la densidad de flujo está distribuida sinusoidalmente en el entrehierro, tenemos,

$$\phi_m = B_m \frac{D}{p} L$$

donde: k_p = factor de paso

B_m = máxima densidad de flujo en el entrehierro

D = diámetro interior del estator

p = es el número de pares de polos

Con una tensión invariable V_1 , aplicada en los bornes del motor y despreciando la caída de tensión en el devanado, tenemos $E = V_1/\sqrt{3}$ para conexión en estrella y $E = V_1$ para conexión en triángulo. Variando el método de conexión de la mitad del devanado y el de conexión de los devanados de fase, es posible cambiar la relación B_2/B_1 en un margen más amplio, siendo B_1 densidad de flujo para el menor número de polos y B_2 para el mayor número de polos; entonces

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1 k_p B_1 p_2}{N_2 k_p B_2 p_1}$$

donde N es el número de espiras de una rama en paralelo o de fase. De aquí se deduce que existe una estrecha relación, entre el par y la densidad de flujo,

$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{B_2}{B_1}$$

La figura 5-7, muestra cinco diagramas de conmutación utilizados ordinariamente para devanados en estrella. Las relaciones de B_2/B_1 , obtenidas en las conexiones del devanado representadas en la figura 5-7, se indica en la tabla V-1⁺.

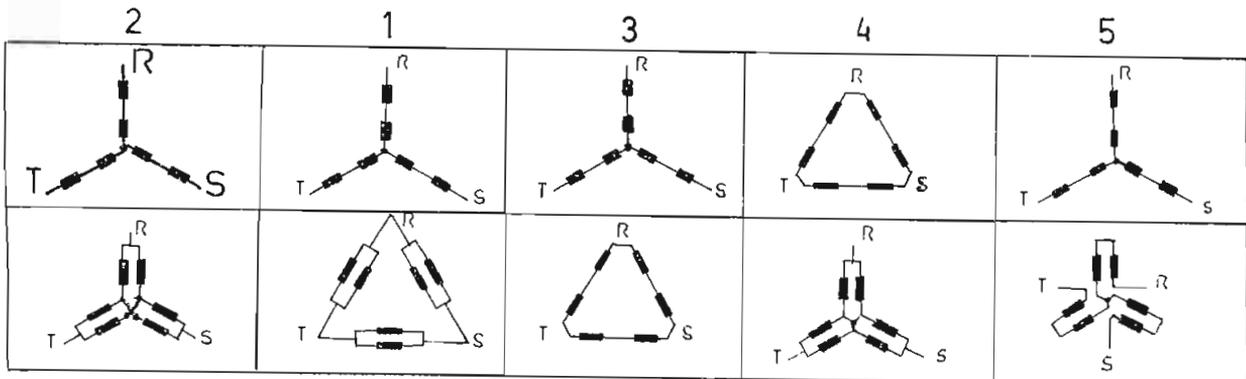


Fig. 5-7

Los motores de velocidades múltiples pueden ser bobinados para potencia constante, par constante y par variable, que podemos analizar a partir de la siguiente ecuación,

$$\text{Potencia (H.P)} = \frac{\text{Par (Kgm)} \times n \text{ (RPM)}}{716} \quad (5-7)$$

En muchos casos el par de frenaje de la máquina movida no depende de la velocidad, entonces el motor impulsor debe desarrollar aproximadamente pares iguales en ambas velocidades, es decir, $M_2=M_1$; a este motor se llama de par constante y en este caso debemos tener $B_2=B_1$, y la potencia variará directamente como la velocidad. La tabla V-1, indica que los esquemas 2 y 3 son adecuados para este fin.

Si el motor con conmutación de polos está proyectado para potencia constante, en este caso $M_2/M_1 = B_2/B_1 = 2$ (porque estamos considerando la relación de velocidad de 2:1). Con este diseño el par es inversamente proporcional a la velocidad y la potencia es aproximadamente igual para cada velocidad. Los esquemas 4 y 5 son adecuados para este fin. En cambio el esquema 1 corresponde a un valor mínimo de la relación de par y se puede utilizar para máquinas pequeñas como: un ventilador.

Cambiando el número de polos, también se puede tener par variable, para este fin el esquema 4 sería el apropiado; la condición necesaria para tener par variable es que el factor de paso del devanado reconectado debe tener una o dos ranuras más que el paso para mayor número de polos, pero siempre menor que los 2/3 del paso com-

pleto para alta velocidad, o menor número de polos.

T A B L A V-1†

Relación de densidad de flujo para devanados con conmutación de polos					
Nº ESQUEMA	doble Nº de polos (2x2P)		simple Nº de polos (2P)		relación B_2/B_1
	conexión mitad del devanado	conexión fase	conexión mitad del devanado	conexión fase	
1	serie	Y	paralelo	Δ	0,58
2	serie	Y o Δ	paralelo	Y Y o Δ	1,00
3	serie o paralelo	Y	como para doble Nº de polos	Δ	1,16
4	serie	Δ	paralelo	Y Y	1,73
5	serie o paralelo	Y o Δ	como para doble Nº de polos	Y o Δ	2,00

Sobre la conmutación de polos, ilustremos con un ejemplo tomado del libro: Conexión de motores de inducción, Edición 1960. Tenemos un motor de 100 H.P-60 c/s, trifásico, 440 V-1.160 RPM-6 polos-conectado en estrella paralelo. Deseamos reconectar para 8 polos.

Para la nueva reconexión se requiere 375 V, pero como este voltaje no existe (comercialmente), entonces se hará una nueva disposición de las bobinas del devanado, en este caso serie-delta que operará sobre un voltaje de relación $1,73/2$ o sea $375 \times 2/1,73 = 434$ V. Como la tolerancia de un motor de inducción es de $\pm 5\%$ del voltaje nominal, el valor antes indicado se puede aplicar perfectamente.

† Máquinas eléctricas, por M. Kostenko y L. Piotrosky.

V.4.- COMPORTAMIENTO DEL MOTOR BAJO VARIAS POSIBILIDADES DE VELOCIDAD CON LOS TIPOS ANTERIORES

V.4-1.- Variación de la frecuencia.-

Para regular la velocidad de los motores de inducción, se emplean frecuencias distintas de las que han servido de base para su proyecto. Bajo tales condiciones, el funcionamiento del motor será distinto del correspondiente a sus características nominales.

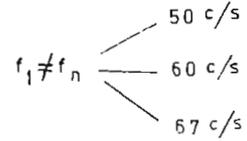
Primeramente analizaremos las características de funcionamiento del motor, cuando la frecuencia f_1 cambia a un valor de frecuencia f_n y el voltaje primario V_1 permanece constante. El comportamiento del motor bajo estas condiciones se experimentó en el laboratorio de máquinas eléctricas y está grafizado en las siguientes figuras.

- a) La corriente de arranque varía con la frecuencia en forma inversa, esto es, a mayor frecuencia menor corriente y viceversa, véase figura 5-8a.
- b) El deslizamiento cambia muy poco con la variación de la frecuencia, prácticamente se considera el mismo valor, véase figura 5-8b.
- c) Una frecuencia más elevada que la nominal, generalmente aumenta el factor de potencia, pero disminuye el par de arranque y el par máximo y aumenta la velocidad del motor, el roce y la ventilación, y viceversa, véase figuras 5-8a.b. Para ciertas clases de carga de los motores, por ejemplo los usados en fábricas textiles, es esencial la exacta regulación de la frecuencia.

CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE UN MOTOR DE INDUCCION CUANDO SE MANTIENE EL VOLTAJE PRIMARIO (V₁) CONSTANTE Y SE VARIA LA FRECUENCIA (f₁)

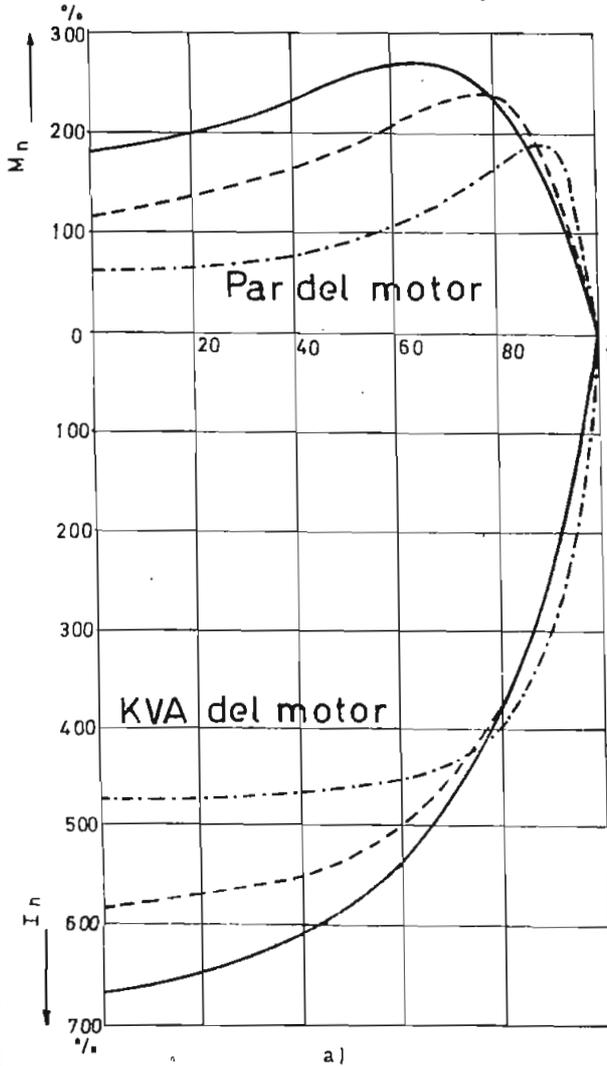
V₁ = V_n = 220 V

- 50 c/s
- - - 60 c/s
- · - · 67 c/s



$\frac{V_1}{f_1} \neq K$, $\frac{220}{67} = 3.28$, $\frac{220}{60} = 3.67$, $\frac{220}{50} = 4.4$

Curvas típicas de KVA y Par



Curvas de factor de potencia, rendimiento y deslizamiento

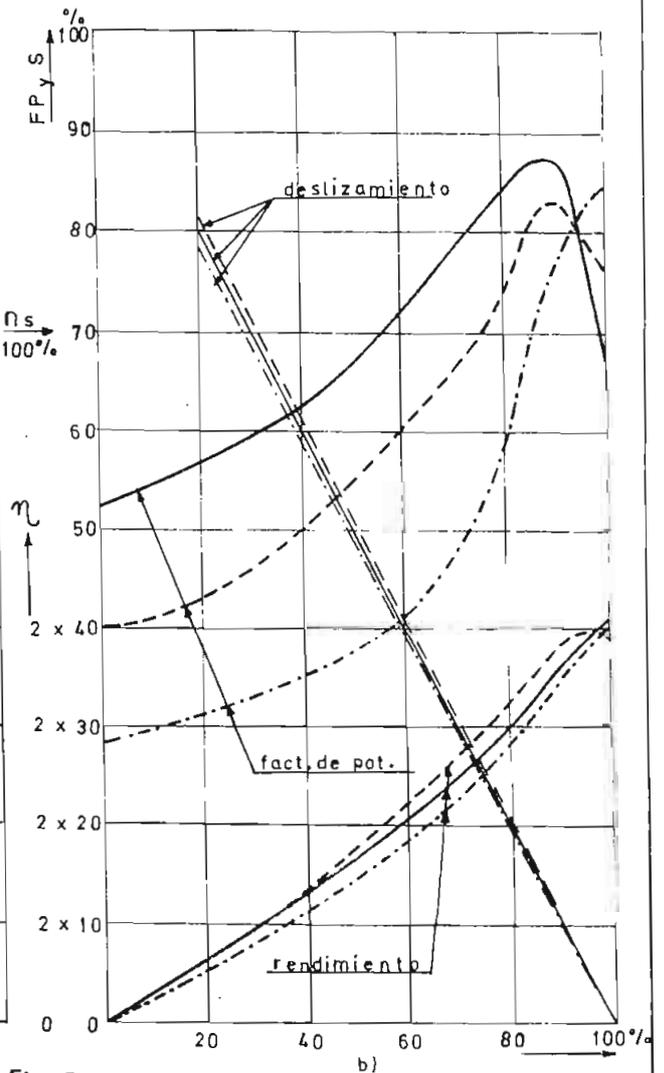


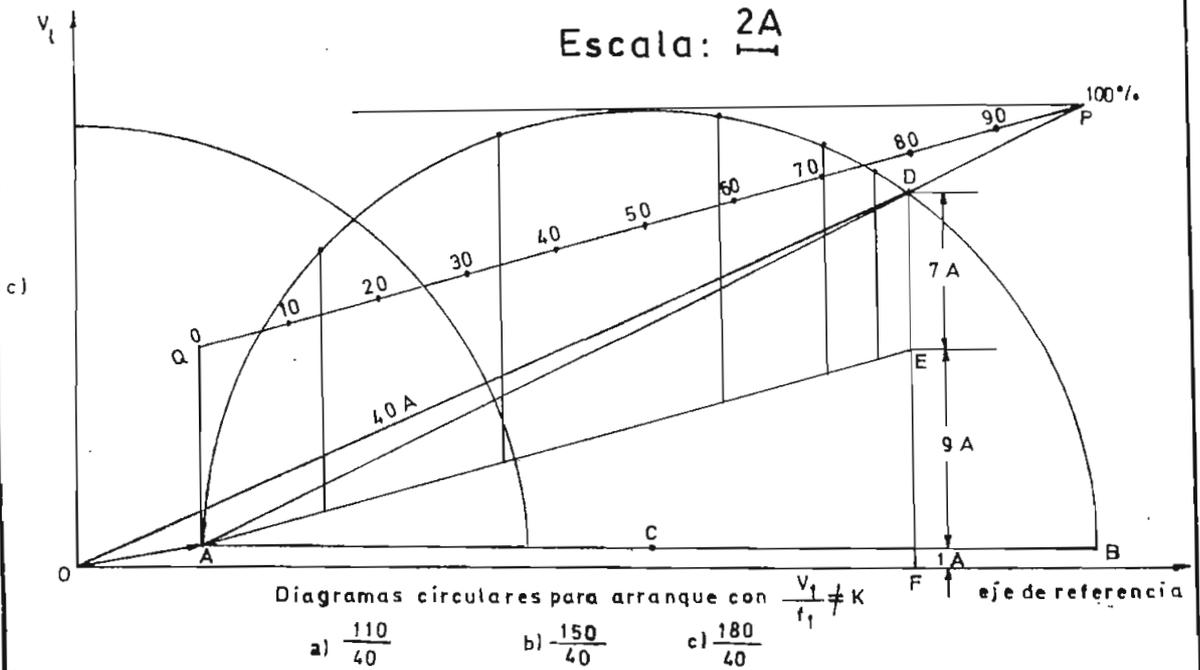
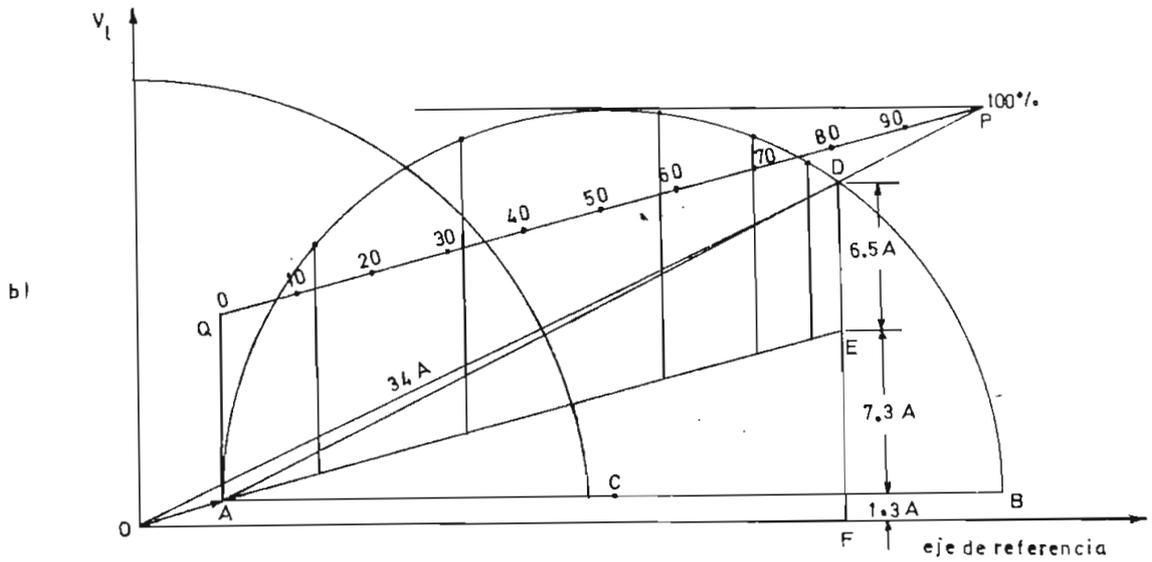
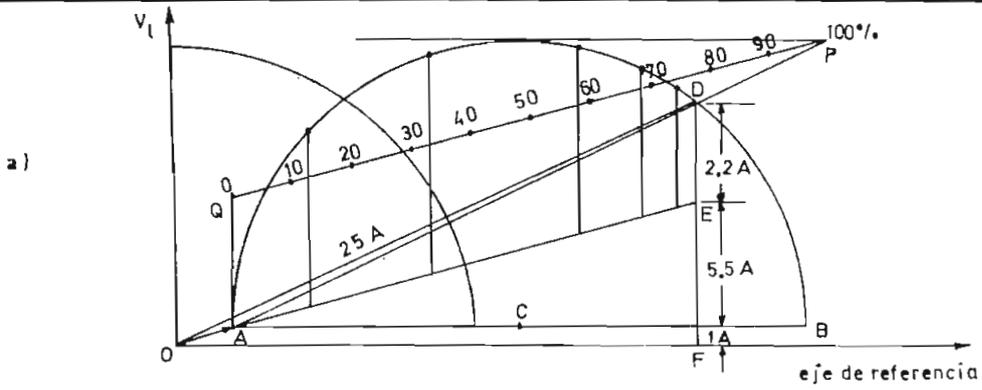
Fig. 5-8

- d) El rendimiento del motor cambia aunque poco con la variación de la frecuencia, véase figura 5-8b.
- e) La potencia nominal del motor, también varía en función de la frecuencia, pero si se desea que la potencia se mantenga constante para cualquier frecuencia, el par puede decrecer y la velocidad aumentar y viceversa.

V.4-2.- Variación del voltaje.-

Ahora veremos el comportamiento del motor, cuando varía el voltaje V_1 a un valor V_n y permanece constante la frecuencia f_1 . El comportamiento del motor bajo estas condiciones también se experimento en el laboratorio de máquinas eléctricas, y está graficado en forma de curvas.

- a) La corriente de arranque varía proporcionalmente al voltaje, véase figura 5-9a.
- b) En un motor de características normales trabajando a plena potencia nominal, un aumento de la tensión ocasiona generalmente un ligero aumento del rendimiento y un acusado descenso del factor de potencia y viceversa, véase figura 5-9b.
- c) El par de arranque varía proporcionalmente con el cuadrado de la tensión aplicada; el par máximo también disminuye cuando se reduce la tensión aplicada al motor, véase figura 5-9a.
- d) Un aumento en la tensión, ocasionará una disminución del deslizamiento, y viceversa; pero esta variación es muy ligera con la variación del voltaje, véase figura 5-9b.



CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE UN MOTOR DE INDUCCION
CUANDO SE VARIA EL VOLTAJE PRIMARIO (V_1) Y SE MANTIENE
CONSTANTE LA FRECUENCIA (f_1)

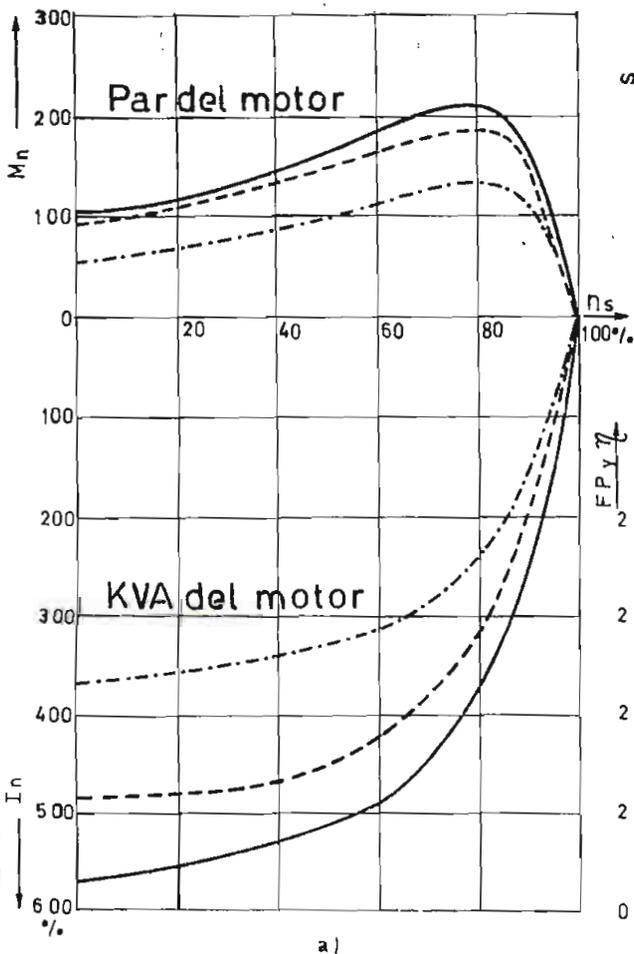
$$f_1 = f_n = 40 \text{ c/seg}$$

— 180 V
 - - - 150 V
 ····· 110 V

$V_1 \neq V_n$ $\begin{cases} 110 \text{ V} \\ 150 \text{ V} \\ 180 \text{ V} \end{cases}$

$$\frac{V_1}{f_1} \neq K, \quad \frac{180}{40} = 4.5, \quad \frac{150}{40} = 3.75, \quad \frac{110}{40} = 2.75$$

Curvas típicas de KVA y Par



Curvas de factor de potencia, rendimiento y deslizamiento

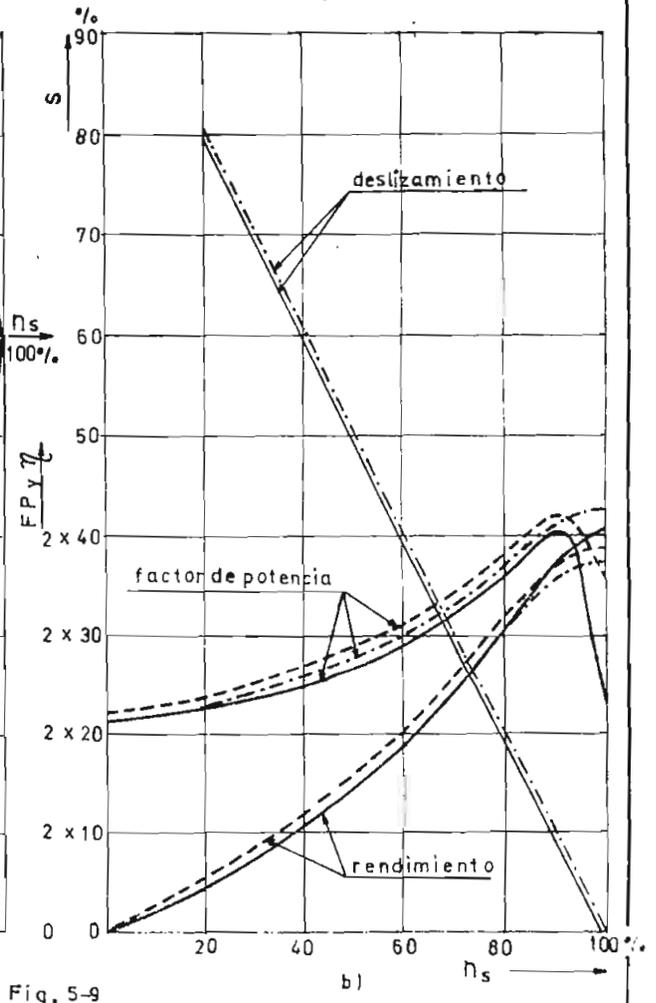


Fig. 5-9

También se realizó pruebas en el laboratorio, manteniendo constante la relación $\frac{V_1}{f_1} = \text{constante}$.

- a) La corriente de arranque varía en forma proporcional a la frecuencia o a la corriente, como se puede ver en la figura 5-le.
- b) El par de arranque varía inversamente a la frecuencia o al voltaje, pero el par máximo es mayor cuanto mayor es el voltaje aplicado a los bornes del motor, véase figura 5-le.

V.4-3.- Variación del tipo de devanado.-

Analizaremos los efectos producidos por el cambio de devanado sobre las varias características de funcionamiento de los motores de inducción. Como ya se dijo anteriormente, que con la variación del tipo de devanado se consigue varias velocidades para el mismo motor, por lo tanto de aquí en adelante sólo se hablará de alta y baja velocidad para tratar las siguientes características. Se explicará teóricamente, porque no se dispone de un motor apropiado para experimentar en el laboratorio.

- a) La corriente de arranque cambia muy ligeramente con las dos velocidades, cuando el voltaje y la frecuencia son constantes para ambas velocidades.
- b) El par de arranque cambia muy ligeramente con las dos velocidades, y el par máximo permanece prácticamente constante.
- c) El rendimiento es algo mayor con la velocidad más baja, pero el factor de potencia es considerablemente menor para la velocidad

más baja (con su menor número de polos)

d) También el deslizamiento es mucho menor para la velocidad más baja y, disminuye el deslizamiento gradualmente mientras más grande es el motor, manteniendo las mismas velocidades.

e) La relación entre las corrientes de arranque y la nominal, varía muy ligeramente entre las dos velocidades pero sólo, para motores de pequeña potencia; siendo la variación mayor e inversamente proporcional a la velocidad para motores de gran potencia.

f) En cuanto a la relación del par de arranque y el nominal, casi permanece constante para motores de pequeña potencia, variando inversamente con la velocidad para motores de mayor potencia.

g) El factor de sobrecarga M_{max}/M_n o momento de torsión del motor varía como el punto anterior.

h) Las demás características difieren muy poco, para ambas velocidades.

i) Los efectos antes mencionados, se refieren a motores que mantienen su potencia mecánica constante con ambas velocidades.

j) Para motores con par constante para ambas velocidades, la potencia mecánica y la velocidad varían proporcionalmente.

CONCLUSIONES.-

La técnica de control de motores de inducción, ha de prestar-se atención a las varias características tratadas, y la decisión debe basarse en cuáles de estas características son las más importantes para la instalación.

Servicio :- La selección de los equipos de control se basa fundamentalmente en los diferentes tipos de servicio (servicio permanente, servicio por períodos, etc.), siendo condición especial el par de arranque de los varios tipos de motores; si el requisito vital es un arranque suave, un elevado factor de potencia o un per-elavado, se seleccionará el arranque por resistencia y si se requiere de una baja corriente de línea, se escogerá el arranque por autotransformador, etc. Si el criterio es la perturbación de la línea no deben seleccionarse cuidadosamente otros métodos que satisfagan a este requerimiento.

Para tener un servicio uniforme, depende de la selección del tipo de motor, es decir, que el motor debe ceder mecánicamente el par de carga necesario sin llegar a rebazar el calentamiento límite, ni tan poco que se produzca un fuerte descenso del número de revoluciones. Para estos casos, el motor de jaula de ardilla ofrece estas ventajas y aún más el motor con rotor bobinado, con el cual se puede regular la velocidad del motor dentro de un amplio margen, como también obtener los pares deseados variando la resistencia secundaria.

Si la condición vital, es el número de revoluciones fijos, se puede seleccionar cualquiera de las cascadas ya que son similares diferenciándose únicamente por la forma de entregar energía al rotor del motor principal y además la eficiencia de estos grupos también son similares. Y si aún se requiere de una regulación más precisa se puede emplear el sistema rectificador convertidor, que en la actualidad va constituyéndose en el sistema más universal para la regulación de la velocidad automática; este sistema además es adaptable para motores de cualquier frecuencia y trabaja con un rendimiento satisfactorio. Si se trata de solucionar el problema de entre varias alternativas, que cumplen todas satisfactoriamente las condiciones requeridas para el control de los motores de inducción, la decisión deberá tomarse probablemente a base del costo.

Factor económico:- Existiendo varios métodos para la puesta en marcha de los motores y además varios métodos de regulación de los mismos, y por otra parte, sabiendo que características son necesarias en absoluto y de cuáles se podrá prescindir aunque sean relativamente deseables, habrá que ver si el costo de éstas justifica desde el punto de vista económico. El factor económico es de mayor importancia, en la selección de los equipos de control, por tal razón se deben buscar sistemas que cumplan satisfactoriamente las funciones deseadas, a un bajo costo; ya que la economía de un sistema de control no solamente depende del precio sino también de la eficiencia que preste para las diferentes condiciones de

carga. Sin embargo, en ciertos casos cuando las circunstancias lo requiriere se decide por el sistema más caro, siendo una causa principal las razones técnicas.

B I B L I O G R A F I A

- 1.- Magnetic Control of Industrial Motors.
HEUMANN GRHART W.- Parte 2^{da} - 1.961.
- 2.- Alternating Current Machines.
A.F.PUCHSIN - T.C.LLOYD - A.G.CONRAD.- 3^{ra} Edición.
- 3.- Equipos para control de Motores eléctricos.
PAISLEY BEARWOOD .- 3^{ra} Edición- 1.955.
- 4.- Principles of Alternating-Current Machinery.
RALPH R. IRENCE .- 4^{ta} Edición.
- 5.- Máquinas eléctricas Tomo II.
M. KOSTENKY L. PIOTROVSKY .- 1.968.

- 6.- Revistas SENS : Catálogo M 11.1 .- Enero 1.966.
Catálogo M 10.1 .- Enero 1.965.
Cuadro Didáctico CI/14 .- 1.961.

7.- Revistas BILBOVERI:

Vol.	Nº	mes	año
45	5	Mayo	1.958.
46	8	Agosto	1.959.
47	12	Diciembre	1.960.
49	7/8	Julio	1.962.
50	1/2	Febrero	1.964.
51	8/9	Septiembre	1.964
52	1/2	Febrero	1.965.

- 8.- Revistas AEVol 2 .- 1.964 y 1.967.

- 9.- Connecting Edison Motors.

A.M.DUDLEY, E.E - 4^{ta} Edición.- 1.960