



FACULTAD DE INGENIERIA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



FACULTAD DE INGENIERIA

G- 612486

HUGO A. GRAJALES ROMAN

PRACTICAS DE LABORATORIO DE EQUIPO ELECTRICO

DIVISION DE INGENIERIA ELECTRICA,
ELECTRONICA Y EN COMPUTACION
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

PROLOGO

G- 612486

El desarrollo de la ciencia y en especial el arte de la ingeniería eléctrica, se ha visto reflejado en las escuelas de ingeniería, por un aumento en la importancia de la electrónica y temas afines, con la disminución del tiempo dedicado a la presentación de las máquinas eléctricas.

La teoría de los circuitos eléctricos, campos magnéticos y temas relativos, que anteriormente iban acompañados con la enseñanza de las máquinas actualmente se imparte en cursos preparatorios, dedicando tiempo a temas que se consideran de mayor importancia.

Por lo anterior, no se incluyen en éste, las teorías de los circuitos y campos, limitando la atención únicamente a las pruebas de las máquinas.

Como el tiempo disponible para el curso de laboratorio de máquinas eléctricas es limitado, la secuencia de las pruebas esta estructurada de forma que exista una distinción entre los principios básicos por una parte, y las características estructurales de diseño y trabajo, por otra.

El hecho de que se inicie con las pruebas en transformadores; no es porque sea la máquina más sencilla, sino que sus principios fundamentales son aplicables a todo tipo de motores y generadores.

Algunas experiencias han mostrado que el orden natural siguiente de la teoría del transformador es el estudio de la máquina de inducción, y por lo mismo, le siguen las pruebas de máquinas síncronas y máquinas de corriente directa, sin tener esta última un orden especial.

Finalmente, se concluye con pruebas especiales que se pueden o no incluir en el ordenamiento de pruebas.

Estas pruebas a máquinas eléctricas, son el resultado histórico de su comportamiento y por lo tanto se han elaborado instructivos de pruebas que muestran las características de diseño, fabricación y comportamiento a las que por norma deben sujetarse y cumplir satisfactoriamente.

El presente, es la compilación de esfuerzos realizados por los profesores del departamento de ingeniería eléctrica de esta Facultad, los que con su experiencia y espíritu de enseñanza se logro su realización



CONTENIDO DE LOS TEMAS

G.- 612486

1. Prueba en los transformadores

- 1.1 Resistencia OHMICA
- 1.2 Polaridad o secuencia de fases
- 1.3 Verificación del diagrama fasorial de conexiones y desplazamiento angular

2. Pruebas en motores de inducción

- 2.1 Saturación en vacío y con rotor bloqueado
- 2.2 Diagrama circular de Heyland
- 2.3 Curvas Par-velocidad
- 2.4 Otras aplicaciones del motor de inducción
- 2.5 Arranque de motores trifásicos y monofásicos

3. Pruebas en máquinas síncronas

- 3.1 Curvas de saturación en vacío y en corto circuito. Obtención de la impedancia síncrona no saturada.
- 3.2 Curvas de saturación con corriente nominal y factor de potencia cero. Saturación con corriente nominal y cualquier factor de potencia.
- 3.3 Sincronización
- 3.4 Regulación de voltaje
- 3.5 Arranque del motor. Curvas V.
- 3.6 Par, potencia y eficiencia del motor

APUNTE
71-A

FACULTAD DE INGENIERIA UNAM.



612486

G.- 612486

4. Pruebas en máquinas de corriente directa

- 4.1 Determinación de la posición del eje neutro
- 4.2 Curva de saturación en vacío
- 4.3 Curvas de regulación de voltaje de generadores
- 4.4 Acoplamiento
- 4.5 Curvas de regulación de velocidad y arrancadores
- 4.6 Arranque y control de velocidad de motores

5. Pruebas dieléctricas y generales

- 5.1 Rigidez dieléctrica del aceite. Resistencia dieléctrica de aislamientos
- 5.2 Tensión aplicada y tensión inducida
- 5.3 Impulso y descargas parciales
- 5.4 Balanceo de corrientes y voltaje en máquinas de corriente alterna.

1.1 Medición de la resistencia óhmica

Es necesario conocer el valor de la resistencia óhmica de cada uno de los devanados del transformador para determinar:

Pérdidas por efecto Joule (RI^2)

Es recomendable medir la resistencia óhmica en frío, antes que ninguna otra prueba, para garantizar que no ha habido causas de precalentamiento de los embobinados, y así el valor medido corresponderá a la de temperatura ambiente.

Es necesario para la primera medición de resistencia, verificar que el transformador:

- No ha sido excitado durante un tiempo de cuatro a ocho horas, de acuerdo al tamaño del transformador, antes de la prueba.
- Esté situado en un área donde la fluctuación de temperatura sea mínima.

Existen dos métodos para medir la resistencia óhmica:

1. Método de la caída de potencial (Ley de Ohm)
2. Uso del Puente Kelvin

Método de la caída de potencial

Este método consiste en hacer circular por el devanado una corriente directa y medir la caída de potencial entre sus extremos, y aplicando la Ley de Ohm se determina la resistencia correspondiente.

Es necesario tener en cuenta que bajo condiciones de corriente directa en estado permanente no existe reactancia en el devanado y la única limitante a su paso es la resistencia óhmica, por lo que la tensión aplicada puede ser muy pequeña, de modo que la corriente no exceda del 15% de la nominal, y así evitar calentamiento en el devanado.

Si la fuente de corriente directa tiene un voltaje elevado, se incluye en el circuito un reóstato limitador.

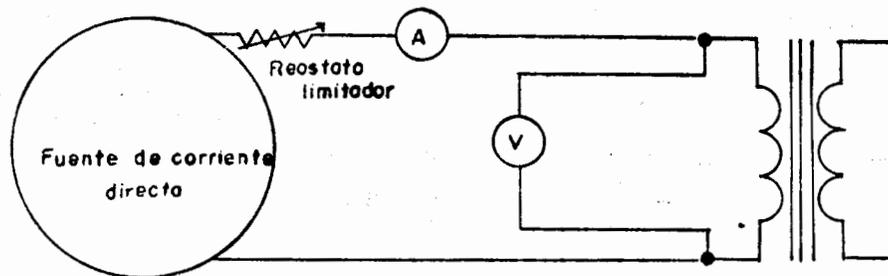


Fig. 1 Diagrama de circuito para la medición de la resistencia.

Este método no se recomienda para transformadores cuya corriente nominal sea de un ampere o menor.

De acuerdo con el diagrama de la Fig. 1, el equipo necesario para esta prueba es:

- fuente de corriente directa
- reóstato limitador de corriente

- Amperímetro con escala aproximada del 20% de la corriente nominal
- Voltímetro según el rango de resistencia por medir.

La resistencia se calculará por medio de la fórmula:

$$R = \frac{\text{Volts}}{\text{Amperes}}$$

Si el embobinado en prueba tiene derivaciones, es necesario medir la resistencia para cada una de ellas.

Para transformadores trifásicos en los cuales los embobinados se encuentran conectados en el interior del tanque, ya sea en circuito delta o en circuito estrella, se calcula la resistencia de una fase efectuando la medición entre dos terminales del circuito.

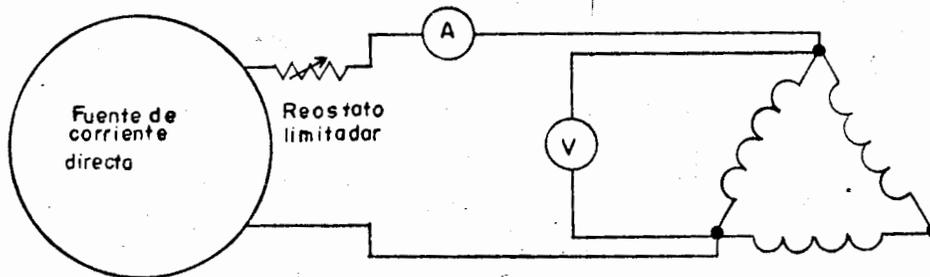


Fig. 2 Diagrama de circuito para la medición de la resistencia en transformador trifásico en circuito delta.

Para la medición mostrada en la Fig. 2, llamaremos R_1 al valor de la resistencia calculada de acuerdo a las lecturas, y R al valor de la resistencia de una fase.

$$R_1 = \frac{\text{Volts}}{\text{Amperes}}$$

$$R = \frac{3}{2} R_1$$

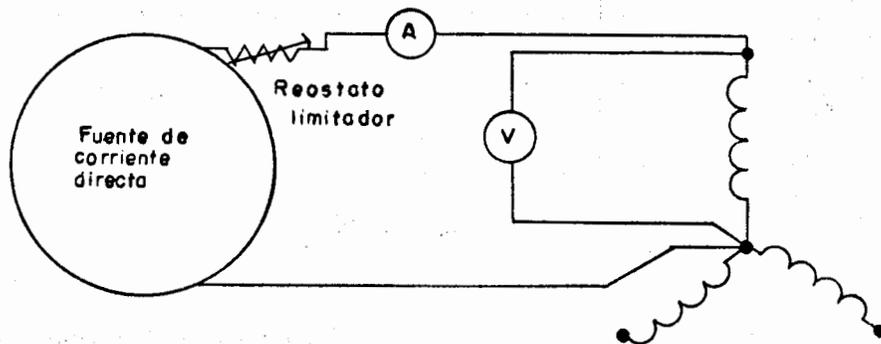


Fig. 3 Diagrama de circuito para la medición de la resistencia en transformador trifásico en circuito estrella con acceso al neutro.

Para la medición mostrada en la Fig. 3, el cálculo de acuerdo a las lecturas es el valor de la resistencia de una fase.

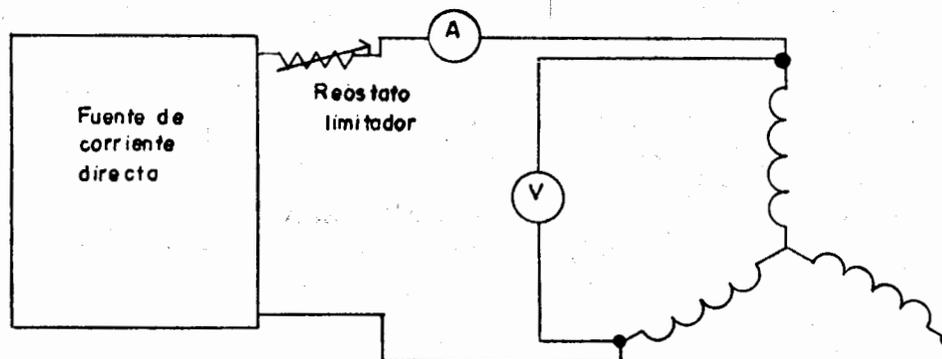


Fig. 4 Diagrama de circuito para la medición de la resistencia en transformador trifásico en circuito estrella sin acceso al neutro.

Para la medición mostrada en la Fig. 4, siguiendo la misma nomenclatura que la Fig. 2.

$$R = \frac{1}{2} R_1$$

a) Transformadores monofásicos

- Calcule la corriente nominal y la corriente de prueba para cada uno de los devanados. Devanado de alta tensión:

$$I_{nom} = \frac{\text{Capacidad}}{V_{nom}} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Amp.}$$

$$I_{pr} = 15\% I_{nom} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Amp.}$$

Devanado de baja tensión:

$$I_{nom} = \frac{\text{Capacidad}}{V_{nom}} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Amp.}$$

$$I_{pr} = 15\% I_{nom} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Amp.}$$

- Calcule la resistencia del reóstato limitador considerando que la resistencia de los devanados bajo prueba es cero

$$R = \frac{V \text{ fuente}}{I \text{ prueba}} = \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} \Omega$$

Para seleccionar voltímetro o milivoltímetro puede estimarse que los devanados cuya tensión nominal es menor de un ki-

- Calcule las resistencias correspondientes a cada par de lecturas, aplicando la Ley de Ohm y anótelas en la Tabla 2.
- Anote la temperatura ambiente.

Tabla 2. Resultados de la prueba de la resistencia óhmica

Resistencia óhmica			
Método de Prueba:		Caída de tensión	
Alta tensión		Baja tensión	
Terminales	Resistencia	Terminales	Resistencia
Temperatura ambiente			

b) Transformadores trifásicos

- Identifique las terminales de alta tensión y de baja tensión del transformador en prueba.

Número de terminales en alta tensión _____

Circuito de los devanados en alta tensión _____

Número de terminales en baja tensión _____

Circuito de los devanados en baja tensión _____

- Calcule la corriente nominal y la corriente de prueba para cada uno de los devanados

Lado de alta tensión

$$I_{\text{nom}} = \frac{\text{capacidad}}{\sqrt{3} V_{\text{nom}}} = \text{-----} = \text{-----} \text{ Amp}$$

$$I_{\text{fase}} = I_{\text{nom}} \text{ (si es circuito estrella)}$$

$$I_{\text{fase}} = \frac{I_{\text{nom}}}{\sqrt{3}} \text{ (si es circuito delta)}$$

$$I_{\text{fase}} = \text{-----} \text{ Amp}$$

$$I_{\text{pr}} = 15\% I_{\text{fase}} = \text{-----} \text{ Amp}$$

Lado de baja tensión

$$I_{\text{nom}} = \frac{\text{capacidad}}{\sqrt{3} V_{\text{nom}}} = \text{-----} = \text{-----} \text{ Amp.}$$

$$I_{\text{fase}} = \text{-----} \text{ Amp}$$

$$I_{\text{pr}} = 15\% I_{\text{fase}} = \text{-----} \text{ Amp.}$$

- Calcule la resistencia del reóstato limitador, considerando que la resistencia de los devanados bajo prueba es cero

$$R = \frac{V_{\text{fuente}}}{I_{\text{prueba}}} = \text{-----} \text{ Amp.}$$

- Conecte el circuito de prueba de acuerdo al diagrama de la Fig. 2 o 3 según el caso, primeramente para el lado de alta tensión.
- Para seleccionar voltímetro o milivoltímetro puede estimarse que los devanados cuya tensión nominal es menor de un kilovolt, la resistencia será de fracción de ohm, y si es de varios kilovolts, puede ser de algunos ohms.

Importante. Al efectuar esta prueba es necesario tener en cuenta que la circulación de corriente por el devanado almacena energía en el núcleo del transformador. Antes de cortar la corriente es necesario retirar el voltímetro o milivoltímetro del circuito para evitar que la energía almacenada se descargue a través de éste.

- Energice la fuente; tome las lecturas correspondientes y anótelas en la Tabla 3. Si los embobinados tienen derivaciones, repita la prueba para cada derivación desenergizando la fuente en cada cambio de conexión.
- Repita la medición para los demás pares de terminales de alta tensión y anote sus lecturas.
- Cambie las conexiones de prueba a dos terminales del lado de baja tensión, de acuerdo al diagrama de la Fig. 2 o 3 según el caso.
- Energice la fuente; tome las lecturas correspondientes y anótelas en la tabla. Si los embobinados tienen derivaciones, repita la prueba para cada derivación, desenergizando la fuente en cada cambio de conexión.
- Repita la medición para los demás pares de terminales de baja tensión y anote sus lecturas.
- Calcule las resistencias correspondientes a cada par de lecturas, aplicando la Ley de Ohm y anótelas en la Tabla 4.
- Calcule la resistencia de fase para cada renglón de la tabla.
- Anote la temperatura ambiente.

Método del puente Kelvin

El uso de puentes para la medición de resistencias presenta ventajas notables con respecto al método de caída de potencial y prácticamente ninguna desventaja.

Entre las ventajas sobresalientes podemos mencionar:

- Mayor precisión
- Conexión sencilla
- Circulación de corriente de muy pequeña intensidad
- Mayor rapidez en la prueba

Existen varios tipos de puentes de los cuales los más usuales son el de Wheatstone y el de Kelvin.

El puente de Wheatstone tiene un rango de medición desde fracciones de Ohm hasta Kiloohms. Este tiene el inconveniente de que la caída de potencial la detecta en la misma línea por la que circula la corriente, de manera que la lectura incluye la resistencia del devanado bajo prueba más la resistencia de los cables de conexión.

El puente Kelvin tiene un rango de medición desde fracciones de Ohm hasta unos cuantos Ohms. Tiene la ventaja de tener una línea por la que circula la corriente, y otra línea distinta para detectar la caída de potencial. Esta última línea se conecta a las terminales del devanado bajo prueba, lo cual hace que la medición no incluya la caída en los cables de conexión.

La circulación de corrientes de pequeña intensidad no provoca calentamiento del devanado, por lo que este método se recomienda para todos los casos, incluyendo transformadores cuya corriente nominal sea menor que un ampere.

La sencillez de las conexiones, y por lo tanto la rapidez para obtener una medición hace que éste sea el único método recomendable para la medición de la resistencia óhmica en caliente, es decir, al término de la prueba de temperatura.

Las conexiones para medición se realizan en forma similar a las indicadas en las Figs. 1 a la 4, sustituyendo la línea del amperímetro por la corriente, y la línea del voltímetro por la línea de potencial. En el caso de transformadores trifásicos, los cálculos para la resistencia de una fase son los mismos.

Desarrollo de la prueba

a) Transformadores monofásicos

- Identifique las terminales de alta tensión y baja tensión del transformador en prueba.
- Conecte el Puente Kelvin a las terminales del devanado de alta tensión, según la Fig. 5.

Importante. Debido a que la circulación de corriente en la bobina almacena energía en el núcleo del transformador, y esta energía se descarga en el momento de suspender la corriente, y si esta energía se descarga a través del galvanómetro puede causarle daño, de modo que se debe observar la siguiente secuencia en la medición.

1. Cerrar el interruptor de corriente y esperar el tiempo necesario de estabilización.
 2. Cerrar el interruptor del galvanómetro y ajustar la lectura.
 3. Abrir el interruptor del galvanómetro.
 4. Abrir el interruptor de corriente.
- Tome la lectura y anótela en la Tabla 5. La tabla incluye varios

renglones, por si el devanado en prueba tuviera derivaciones.

- Cambie las conexiones a las terminales de baja tensión
- Tome la lectura o las lecturas para el devanado de baja tensión y anótelas.
- Anote la temperatura ambiente

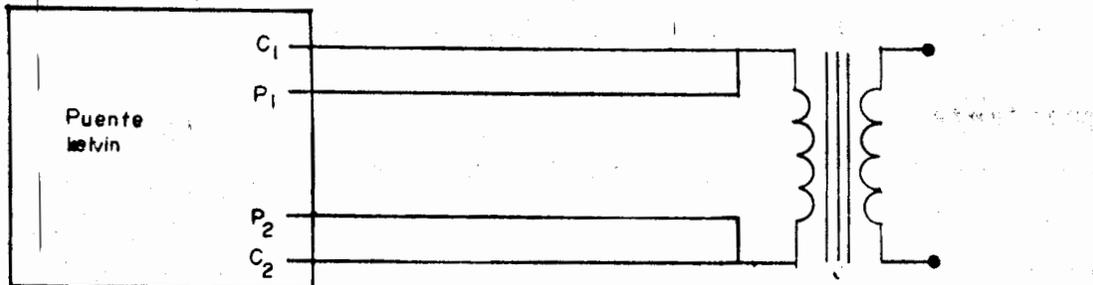


Fig. 5 Conexiones del Puente Kelvin para la medida de la resistencia óhmica.

Tabla 5 Resultados de la prueba de resistencia óhmica

Resistencia óhmica			
Método de prueba: Puente de Kelvin			
Alta tensión		Baja tensión	
Terminales	Resistencia	Terminales	Resistencia
Temperatura ambiente			

b) Transformadores trifásicos

- Identifique las terminales de alta tensión y baja tensión del transformador en prueba.

Número de terminales en alta tensión _____

Circuito de los devanados de alta tensión _____

Número de terminales en baja tensión _____

Circuito de los devanados en baja tensión _____

- Conecte el Puente Kelvin a dos de las terminales de alta tensión de acuerdo a la Fig. 6 o a la Fig. 7, según sea el caso.

Importante. Debido a que la circulación de corriente en la bobina almacena energía en el núcleo del transformador, esta energía se descarga en el momento de suspender la corriente, y si esta energía se descarga a través del galvanómetro, puede causarle daño, de modo que se debe observar la siguiente secuencia en la medición:

1. Cerrar el interruptor de corriente y esperar el tiempo necesario de estabilización.
2. Cerrar el interruptor del galvanómetro y ajustar la lectura.
3. Abrir el interruptor del galvanómetro.
4. Abrir el interruptor de corriente.

- Tome la lectura y anótela en la Tabla 6. La tabla incluye varios renglones por si los devanados en prueba tuvieran derivaciones.
- Repita la medición para los demás pares de terminales de alta tensión y anote sus lecturas.
- Cambie las conexiones a dos de las terminales de baja tensión de acuerdo a la Fig. 6 o la Fig. 7, según sea el caso.

- Tome la lectura o lecturas correspondientes a baja tensión y anótelas.
- Repita la medición para los demás pares de terminales de baja tensión y anote sus lecturas.
- Anote la temperatura ambiente.
- Calcule para cada renglón la resistencia de fase y anótelas en la Tabla 4.

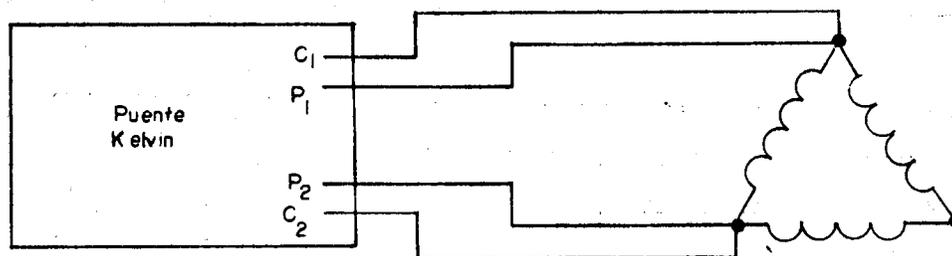


Fig. 6 Conexiones del Puente Kelvin para la medida de la resistencia óhmica en transformador trifásico con conexión delta.

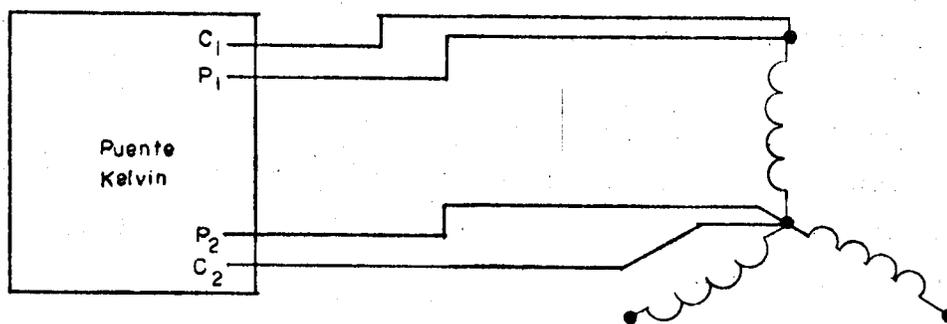


Fig. 7 Conexiones del Puente Kelvin para la medida de la resistencia óhmica en transformador trifásico con conexión estrella.

rían iguales a las fuerzas electromotrices inducidas, debido a que se producirían caídas de voltaje en las resistencias y reactivancias de dispersión.

Para determinar la relación de transformación en laboratorio existen tres métodos:

1. Método de los voltímetros
2. Método del transformador patrón
3. Método del potenciómetro de resistencia

Básicamente, los tres métodos consisten en aplicar a uno de los devanados una tensión alterna, y detectar el valor del voltaje inducido en el otro devanado.

En todos los casos es importante efectuar las conexiones respetando la polaridad de los devanados. Es por tanto necesario definir el concepto de polaridad.

Cuando se aplica a un devanado una onda senoidal de voltaje, en el otro devanado se induce otra onda proporcional a la aplicada. La onda aplicada y la inducida prácticamente se encuentran en fase, de manera que habrá una terminal de alta tensión y una de baja tensión que en cualquier instante tengan siempre la misma polaridad. Estas terminales se identifican en los diagramas con un punto, y en las terminales del transformador con mismos subíndices.

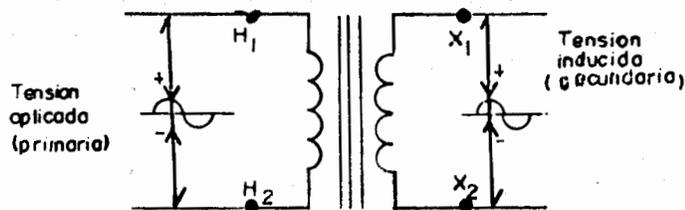


Fig. 8 Identificación de las terminales de misma polaridad

Método de los dos voltímetros

Consiste en aplicar a uno de los devanados del transformador una tensión alterna, incluyendo un voltímetro para medir la alta tensión (V_H) y otro para medir la baja tensión (V_X).

La razón de la alta tensión a la baja tensión nos dará la relación de transformación.

$$a = \frac{V_H}{V_X}$$

Por razones de confiabilidad, se recomienda tomar ocho pares de lecturas, divididas en dos grupos de cuatro, y la frecuencia de la tensión debe ser la nominal o mayor.

1. Lectura a voltaje nominal
2. Lectura al 90% del voltaje nominal
3. Lectura al 80% del voltaje nominal
4. Lectura al 70% del voltaje nominal

Posteriormente se intercambian los voltímetros para compensar errores de los aparatos, y se repite la serie de cuatro lecturas.

Cuando la relación por comprobar es de valor elevado, de tal manera que no se pueden conectar directamente voltímetros de la misma escala, debe conectarse un transformador de potencial, pues es requisito que los aparatos sean iguales para poderse intercambiar.

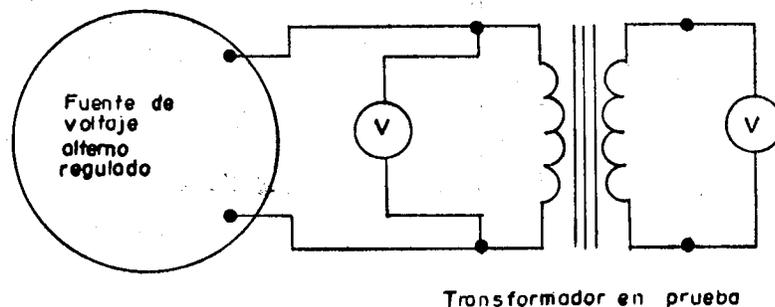


Fig. 9 Diagrama de circuito para el método de dos voltímetros

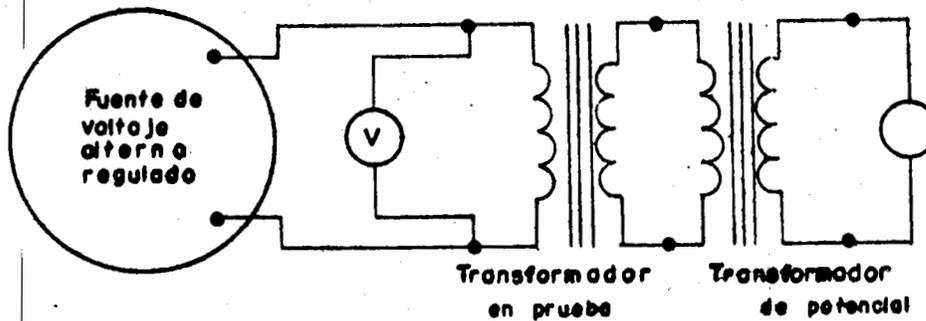


Fig. 10 Diagrama de circuito para el método de dos voltímetros con transformador de potencial.

Si los resultados no difieren más del 1%, la prueba es aceptable y se toma como relación de transformación, el promedio de todos los resultados.

Si la diferencia es mayor del 1%, es necesario repetir con otros instrumentos. Para asegurar la prueba.

Método del transformador patrón

Para este método se dispone de un transformador cuya relación de transformación es conocida, y por comparación, se obtiene la relación del transformador en prueba. Los transformadores patrón podemos clasificarlos en dos grupos:

- Transformador patrón de relación constante
- Transformador patrón de relación variable (TTR)

El transformador patrón de relación constante nos permite verificar que el transformador en prueba se apegue a la misma relación

del patrón.

Se aplica una tensión alterna, a voltaje nominal o menor y frecuencia nominal o mayor, a un devanado del transformador patrón y al correspondiente del transformador en prueba, conectados en paralelo. En la conexión en paralelo debe observarse la marca de polaridad.

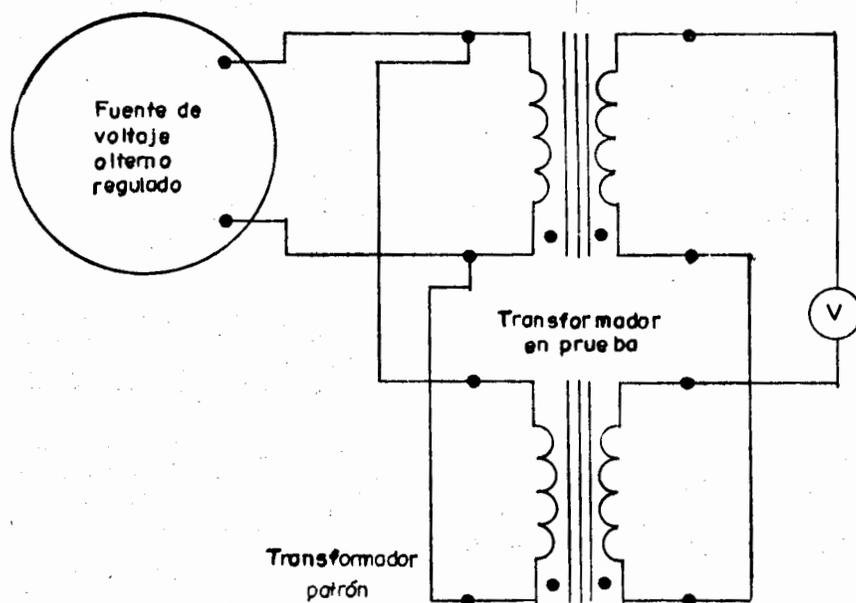


Fig. 11 Diagrama de circuito para la prueba de relación de transformación con transformador patrón.

Si el voltímetro marca cero, significa que la relación del transformador en prueba es la buscada.

Cuando la relación del transformador en prueba es diferente a la del transformador patrón, pero esta diferencia es pequeña se puede valorar haciendo una combinación de este método con el de los dos voltímetros, según muestra la Fig. 12.

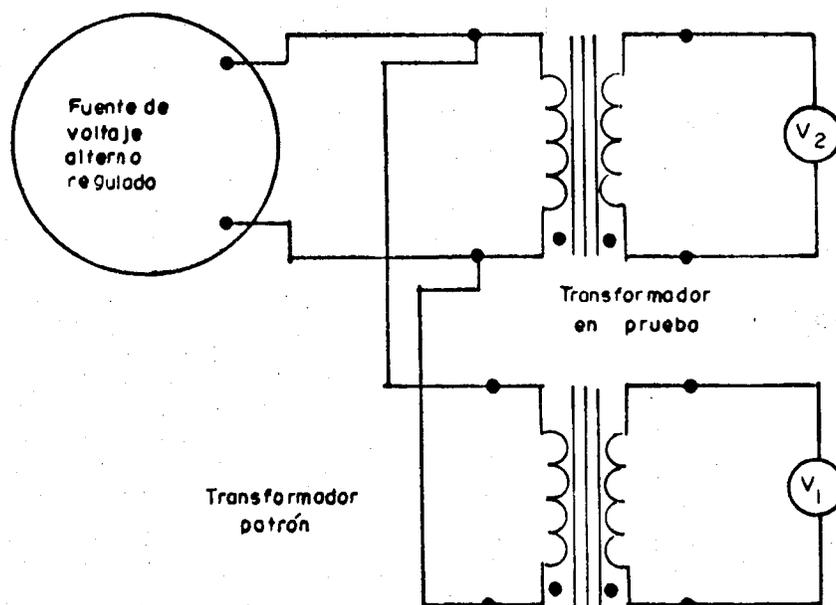


Fig. 12 Diagrama de circuito para otra alternativa del método del transformador patrón.

Si llamamos:

- V_1 = Lectura del voltímetro en el transformador patrón
- a_p = Relación del transformador patrón
- V_2 = Lectura del voltímetro en el transformador en prueba
- a_x = Relación del transformador en prueba.

En vista de que ambos transformadores tienen el mismo voltaje de excitación:

$$a_p V_1 = a_x V_2$$

De donde la relación en prueba será:

$$a_x = \frac{V_1}{V_2} a_p$$

Es necesario efectuar esta prueba con cuatro lecturas a diferentes tensiones y otras cuatro después de intercambiar instrumentos.

El transformador patrón con relación variable, conocido con las siglas TTR (Transformer Turn-Ratio), es un instrumento que nos permite medir cualquier relación de transformación.

Este equipo consta de:

- Un generador de corriente alterna accionado manualmente, para excitar los devanados de baja tensión.
- Voltímetro y amperímetro para medir los valores de excitación.
- Un selector para cambiar el número de espiras en el devanado de alta tensión del transformador patrón, con objeto de igualar su relación con la del transformador en prueba. Este selector tiene un cuadrante en el cual indica la relación del transformador patrón.
- Un amperímetro que detecta corriente cero en el momento que se han igualado las relaciones de transformación.

Al conectar el TTR al transformador en prueba es importante observar las marcas de polaridad pues en caso de una conexión equivocada, el instrumento no dará lectura.

Método del potenciómetro de resistencia.

Consiste en aplicar al devanado de alta tensión del transformador en prueba, un voltaje alterno, y mediante conexiones con el devanado de baja tensión a través de un potenciómetro, determinar una posición de éste en el que se anulen las corriente circulantes, como se muestra en la Fig. 14.

Se requiere un potenciómetro adecuado, que no sufra calentamiento con el voltaje aplicado y que tenga una graduación precisa de la resistencia variable.

Al deslizar el contacto móvil, debe aparecer una posición en donde el detector marque corriente cero. Para esta posición, la relación de transformación será:

$$a = \frac{R}{R_1}$$

Transformadores monofásicos

a) Método de los dos voltímetros

- Identifique las terminales de alta y baja tensión del transformador en prueba.

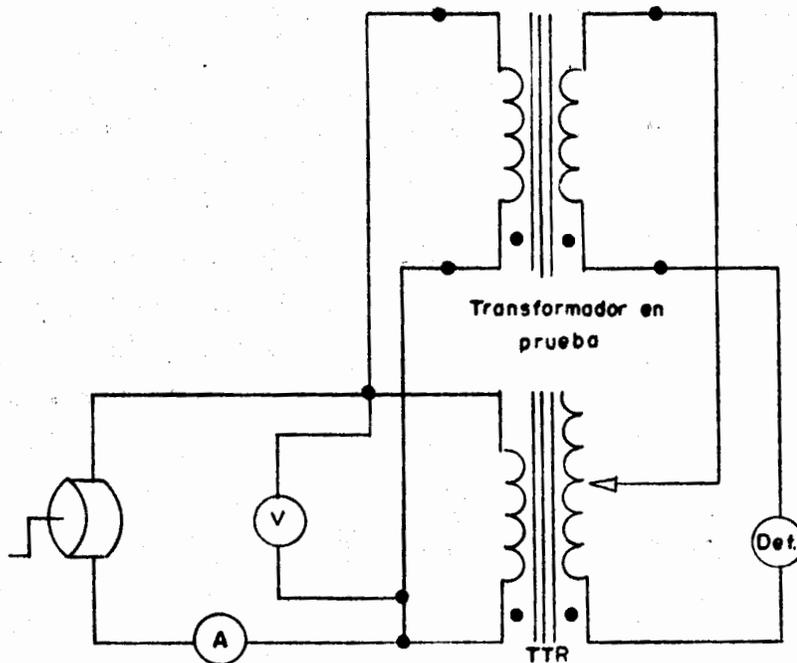


Fig. 13 Diagrama de circuito para la prueba de relación de transformación con TTR.

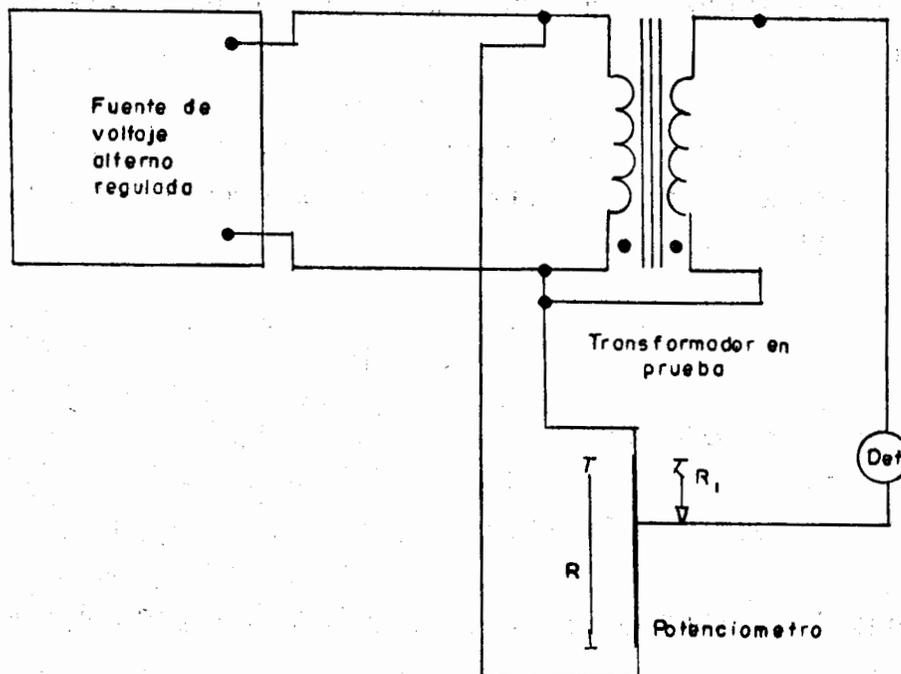


Fig. 14 Diagrama de circuito para el método de potenciómetro de resistencia.

- Verifique los rangos de voltaje de alta y baja tensión; de acuerdo a estos rangos seleccione la escala de los voltímetros a usar, y si es necesario, el transformador de potencial.
- Conecte el circuito de prueba de acuerdo al diagrama de la Fig. 9 o la 10.

Importante. En esta prueba se manejan altas tensiones. Coloque sus instrumentos de medición fuera de las áreas de peligro y mientras este energizado el circuito, por ningún motivo se acerque a estas áreas. Observe la protección de tierra en alta tensión.

- Energice la fuente, tome sus cuatro pares de lecturas a diferentes voltajes y anótelos en la Tabla 7.

- Desenergice la fuente e intercambie sus instrumentos de medición
- Energice la fuente, tome otros cuatro pares de lecturas y anótelas en la Tabla 7.
- Obtenga para cada renglón de la Tabla 7 la relación de transformación. Si la diferencia entre estos resultados no es mayor del 1%, obtengan el promedio y anótelo al final de la tabla.
- En caso de que los devanados tengan derivaciones, es necesario verificar la relación para cada una. Si es el caso, construya una tabla similar a la 7 para cada derivación repitiendo la misma secuencia de prueba.

Tabla 7. Resultados de la prueba de relación de transformación

Relación de transformación		
Método de Prueba: Dos voltímetros		
Alta tensión	Baja tensión	Relación
Relación promedio		

b) Método del transformador patrón de relación constante

- Identifique las terminales de alta y baja tensión, del transformador patrón y del transformador en prueba.
- Identifique las polaridades de los dos transformadores
- Conecte el circuito de prueba de acuerdo a la Fig. 11.

Importante. Es necesario observar las conexiones entre terminales de misma polaridad, pues una equivocación ocasionaría que los voltajes secundarios se sumen en vez de anularse. En caso de desconocer la polaridad del transformador en prueba, conviene utilizar en un primer intento un voltímetro cuya escala sea el doble del voltaje secundario. En caso de no dar lectura, significa que la polaridad ha quedado identificada correctamente, y se puede cambiar ésta por uno de escala pequeña.

- Energice la fuente. Tenga cuidado con las altas tensiones. Observe el voltímetro.

Relación del transformador Patrón: _____

¿Da lectura el voltímetro?

- NO. la relación del transformador en prueba es igual a la del patrón. Prueba terminada.
- SI. la relación del transformador en prueba difiere de la del patrón. Continúe con la segunda opción.
- Conecte el circuito de prueba de acuerdo al diagrama de la Fig. 12.

- Energice la fuente y tome la lectura de los voltímetros V_1 y V_2 a voltaje nominal y anótelos en la Tabla 8.
- Tome otros tres pares de lecturas al 90%, 80% y 70% y anótelos.
- Desenergice la fuente, intercambie los instrumentos y repita la prueba. Anote en la Tabla 8 sus cuatro pares de lecturas.
- Obtenga para cada renglón la relación de transformación con la fórmula:

$$a_x = \frac{V_1}{V_2} a_p$$

Si la diferencia de los resultados no es mayor del 1%, obtenga el promedio y anótelos.

Tabla 8 Resultados de la prueba de relación de transformación

Relación de transformación		
Método de prueba: Transformador patrón		
Relación del transformador patrón $a_p =$		
Lectura transf. patrón (V_1)	Lectura transf. prueba (V_2)	Relación
Relación promedio:		

c) Método del transformador patrón de relación variable (TTR)

- Identifique las terminales de alta y baja tensión, del transformador en prueba del TTR.
- Conecte el TTR con el transformador en prueba como lo indica la Fig. 13.

Importante. Es necesario observar las conexiones entre terminales de misma polaridad, puesto que en caso de equivocación el TTR no obtendrá relación. Si se desconoce la polaridad del transformador en prueba, puede conectarse arbitrariamente.

- Excite el TTR mientras opera los selectores, comenzando por el de mayor relación. Cuando obtenga cero corriente puede dejar de accionar la excitación, y la relación de transformación ha quedado indicada en los cuadrantes de los selectores.

Relación de transformación= _____

d) Método del Potenciómetro de Resistencia

- Identifique las terminales de alta y baja tensión del transformador en prueba, así como las terminales del origen del cursor y de la resistencia total del potenciómetro.
- Conecte el circuito de prueba de acuerdo al diagrama de la Fig. 14.

Importante. Es necesario observar las conexiones entre terminales de misma polaridad, a fin de poder obtener los valores R y R_1 que indica la Fig. 14.

- Energice la fuente, teniendo cuidado de no aplicar mayor voltaje del que requiere el potenciómetro
- Deslice el cursor hasta obtener cero corriente. Desenergice la fuente y tome las lecturas de las resistencias.

$$R_{\Omega} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$R_{\Omega} = \underline{\hspace{2cm}}$$

- La relación de transformación es:

$$a = \frac{R_{\Omega}}{R_1} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Transformadores trifásicos

La prueba de relación de transformación para transformadores trifásicos se efectúa para cada fase, conectando los instrumentos de prueba a dos terminales de alta y dos de baja tensión correspondientes a la fase en prueba, bajo los mismos criterios que se han establecido para transformadores monofásicos.

No es necesario desconectar los circuitos delta o estrella que el transformador tiene en su interior, sin embargo, la identificación de terminales es importante para garantizar que la prueba se está llevando a cabo entre devanados de la misma fase.

- a) Si conocemos el diagrama fasorial que representa las conexiones del transformador, la identificación de fases es sencilla.
- b) Si se desconoce el diagrama, entonces mediante todas las combinaciones posibles podemos identificar las fases, construir el diagrama y encontrar la relación buscada.

Las conexiones usuales son:

- a) Delta-delta
- b) Estrella-estrella
- c) Estrella-delta
- d) Delta-estrella

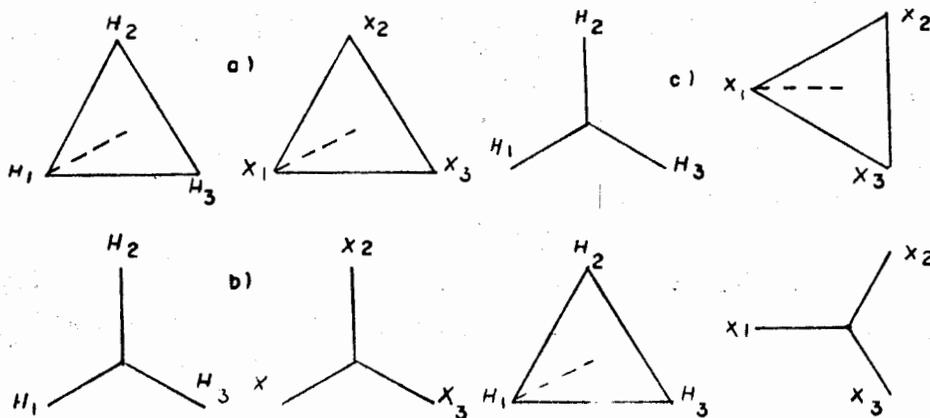


Fig. 15 Diagramas de fasores para la interconexión de devanados en transformadores trifásicos.

Al efectuar las conexiones de devanados delta-delta o estrella-estrella, hay la posibilidad de hacerlo de tal manera que la baja tensión quede en fase o a 180 grados con respecto a la alta tensión, y en los arreglos estrella-delta o delta-estrella, se puede obtener la baja tensión 30 grados adelante o atrás de la alta tensión.

Las normas establecen que en los casos delta-delta y estrella-estrella, la baja tensión debe estar en fase con la alta tensión, y en los casos estrella-delta y delta-estrella, la baja tensión debe de estar 30 grados atrás de la alta tensión.

Igualmente, el orden en que se identifican las terminales en los diagramas, así como la disposición física de las boquillas en el transformador están definidos por las mismas normas según lo muestran las Fig. 15 y 16.

Sin embargo, las normas no son impositivas, de manera que un consumidor con cierta necesidad específica puede solicitar un arreglo diferente a los que acabamos de mostrar.

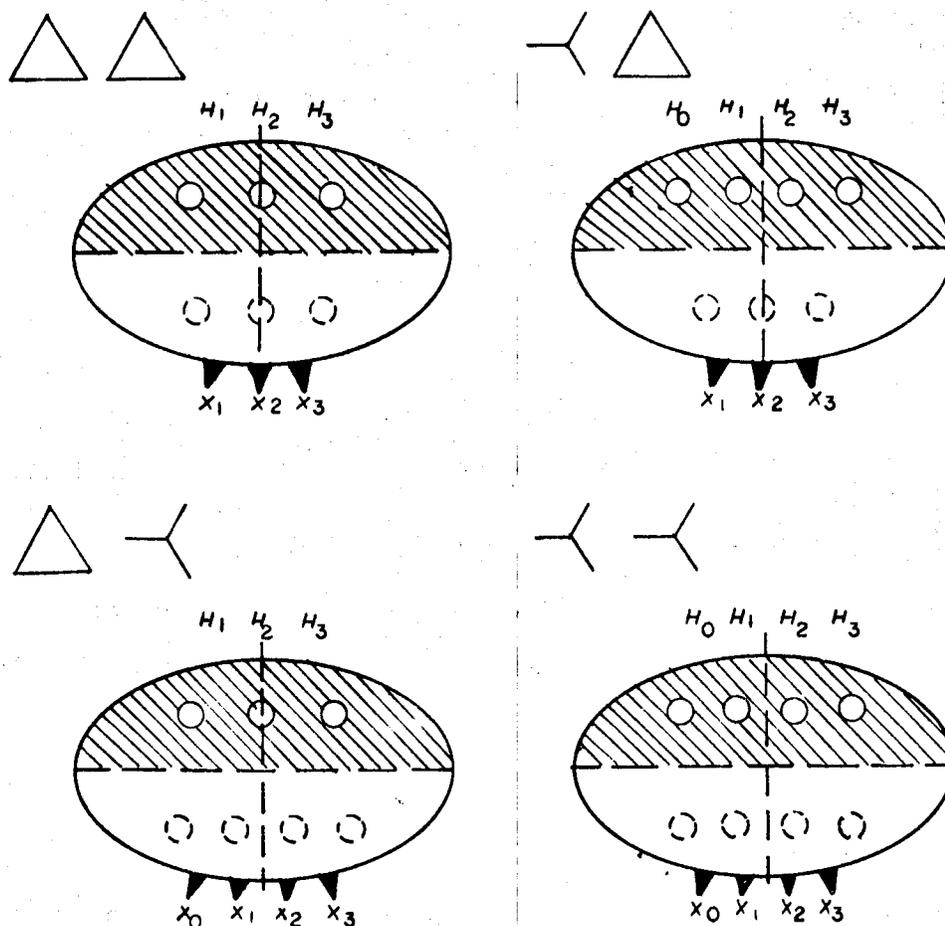
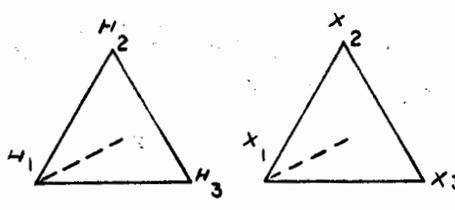
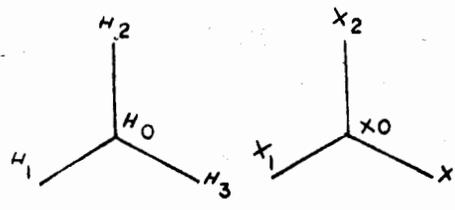
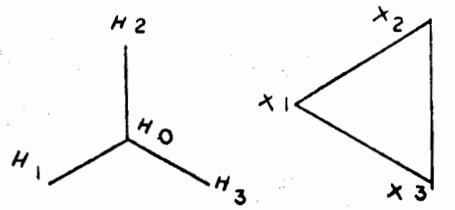
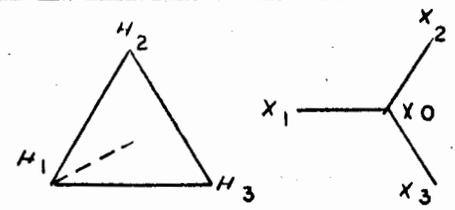


Fig. 16 Arreglo normalizado de terminales en transformadores trifásicos.

TABLA 9 Identificación de las terminales correspondientes a una misma fase

Diagramas de conexiones	Terminales de la misma fase	
	Alta tensión	Baja tensión
	$H_1 - H_3$	$X_1 - X_3$
	$H_2 - H_3$	$X_2 - X_3$
	$H_3 - H_1$	$X_3 - X_1$
	$H_1 - H_0$	$X_1 - X_0$
	$H_2 - H_0$	$X_2 - X_0$
	$H_3 - H_0$	$X_3 - X_0$
	$H_1 - H_0$	$X_1 - X_2$
	$H_2 - H_0$	$X_2 - X_3$
	$H_3 - H_0$	$X_3 - X_1$
	$H_1 - H_2$	$X_0 - X_2$
	$H_2 - H_3$	$X_0 - X_3$
	$H_3 - H_1$	$X_0 - X_1$

Teniendo a la vista el diagrama de conexiones resulta sencillo identificar las terminales, basándose en la siguiente

REGLA: en los diagramas de conexiones de transformadores trifásicos, los fasores de alta y baja tensión correspondientes a una misma fase son paralelos, y los extremos de misma posición relativa son de la misma polaridad.

Aplicando esta regla, podemos identificar las terminales de prueba en la Tabla 9.

En la Tabla 9, las terminales de mismo subíndice tienen la misma polaridad.

La prueba de relación de transformación se puede efectuar mediante cualquiera de los métodos para transformadores monofásicos, para cada una de las tres fases, eligiendo sucesivamente los tres pares de terminales mostrados en la Tabla 9.

Desarrollo de la prueba

- Elija uno de los métodos para llevar a cabo esta prueba y seleccione los instrumentos adecuados.
- Identifique con los datos de placa, el diagrama de conexiones y dibújelos en la Tabla 10. En caso de no tener los datos de placa, tentativamente identifique algunos de los cuatro casos de la Tabla 9, valiéndose del número de terminales en alta y baja tensión. Dibuje el diagrama.
- De acuerdo al diagrama, escriba en cada renglón de la Tabla los pares de terminales que corresponden a una misma fase.
- Identifique la posición física de cada una de las terminales se

En caso de no haber obtenido resultados congruentes, ya sea en cuanto a relación o a polaridades, puede deberse a conexiones equivocadas, o bien a conexiones y/o posición de terminales fuera de norma.

Si este es el caso, continúe con la siguiente prueba cuyo objeto es determinar el diagrama de conexiones e identificar las terminales del transformador. Si se trata de conexiones equivocadas, determinaremos que corrección es necesario hacer, o bien si se trata de algún arreglo fuera de norma.

La prueba consiste en excitar una fase, ya sea de alta o baja tensión, y determinar su relación de transformación y polaridad con respecto a cada una de las tres fases del embobinado opuesto.

Teniendo en cuenta que el flujo producido por la bobina excitada pasa íntegramente por su correspondiente secundario, pero en cambio se divide en dos partes, no necesariamente iguales, para las otras dos fases, las tres relaciones de transformación determinadas no serán iguales, pudiendo presentarse dos casos:

1. Si el método de prueba excita al devanado de alta tensión la bobina secundaria correspondiente a la fase excitada será la que presente la menor relación de transformación.
2. Si el método de prueba excita el devanado de baja tensión (caso del TTR), la bobina secundaria correspondiente a la fase excitada será la que presente la mayor relación de transformación.

Una vez identificados los tres pares de bobinas y su respectiva polaridad, se puede construir el diagrama de conexiones.

- Elija uno de los métodos que permita determinar al mismo tiempo relación de transformación y polaridad.

- Identifique las terminales de alta y baja tensión.
- Indique en el encabezado de la segunda columna de la tabla 11, si el método seleccionado excita por alta o por baja tensión, y de acuerdo con esto, escriba en la segunda columna las terminales de conexión. Para cada par de terminales de la segunda columna anote en la tercera columna los tres pares de terminales del embobinado opuesto.
- Determine sucesivamente las nueve relaciones de transformación como han quedado en el orden de la tabla, y anótelas. Anote un punto sobre una terminal de la segunda columna y un punto sobre una terminal de la tercera columna que sean de la misma polaridad.
- Marque en la quinta columna los renglones que corresponden a la relación propuesta en la primera columna, tomando como criterio el valor más bajo si excitó por alta tensión, o el valor más alto si excitó por baja tensión. Los tres valores elegidos deberán ser iguales.

Tabla 11 Mediciones para investigar la relación de transformación y el diagrama de conexiones.

Relación de transformación				
Método de prueba				
Fase	Terminales		Relación de transformación	misma fase
	Excitación () Alta tensión () Baja tensión	Baja tensión Alta tensión		
I				
II				
III				

Construcción del diagrama

- Aprovechando las guías de la Fig. 17, construya el diagrama de alta tensión, según sea delta o estrella.
- Junto a cada fasor escriba los números romanos I, II y III, investigando en la Tabla 11 a qué terminales va conectada cada fase.
- Aprovechando las guías de la derecha, construya el diagrama de baja tensión de acuerdo a las siguientes reglas.
- Si los devanados de baja tensión están en delta se utilizarán tres de los vértices, y si está en estrella se utilizará además el punto neutro.
- La fase I de baja tensión debe ser paralela a la fase I de alta tensión, y los extremos de misma polaridad deben guardar la misma posición relativa. Lo mismo debe observarse para las fases II y III.

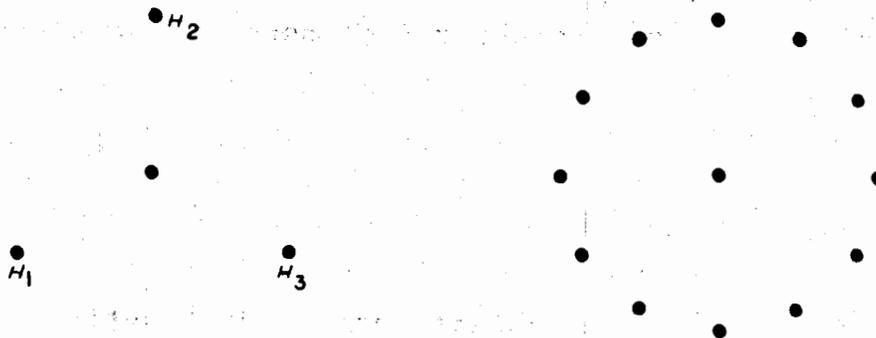


Fig. 17 Diagrama de conexiones.

Resultados

Conexiones _____

Relación de transformación _____

Las conexiones de consideran:

- correctas _____
- incorrectas _____
- de acuerdo a las normas _____
- fuera de norma _____

Anote si tiene alguna otra observación _____

1.2 Polaridad o secuencia de fases

En los transformadores monofásicos es factible identificar entre sus cuatro terminales, dos de alta tensión y dos de baja tensión, dos de ellas corresponden a la misma polaridad. En cambio en transformadores trifásicos que tienen de seis a ocho terminales según el tipo de conexiones, resulta bastante confuso identificar pares de terminales de misma polaridad, por lo que en este caso se recurre al concepto de secuencia de fases.

Por lo anterior podemos concluir que el concepto de polaridad se asocia a los transformadores monofásicos, y el de secuencia de fases a los transformadores trifásicos.

Prueba de polaridad

En los transformadores monofásicos, además de identificar una terminal de alta con una de baja tensión que tengan misma polaridad, la posición relativa de estas terminales en el arreglo global se identifica con la siguiente:

Regla: Cuando el observador se coloca frente a las dos terminales de baja tensión, si H_1 queda a su izquierda y X_1 a su derecha el transformador tiene polaridad aditiva, y si H_1 y X_1 quedan a su izquierda tiene polaridad sustractiva (H_1 y X_1 son terminales de misma polaridad).

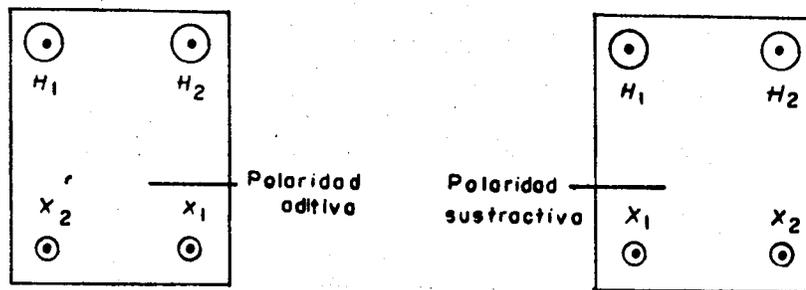


Fig. 18 Nomenclatura de polaridad de acuerdo a la colocación de las terminales.

Para verificar la polaridad de los transformadores se recomienda tres métodos:

1. Método del transformador patrón
2. Método de dos voltímetros
3. Método de descarga inductiva

Método del transformador patrón

El transformador patrón en cualquiera de sus dos modalidades vistas en la prueba anterior, además de proporcionarnos la relación

de transformación, debe tener la identificación de su polaridad, de manera que al interconectarlo con el transformador en prueba, también identificamos la polaridad de éste.

Método de dos voltímetros

Consiste en aplicar al devanado de alta tensión un voltaje alterno de valor nominal o menor. El observador colocado frente a las terminales de baja tensión, debe puentear previamente las dos terminales de su izquierda, y colocar dos voltímetros, uno entre las terminales de alta tensión y otro entre las terminales de su derecha, como muestra la Fig. 19.

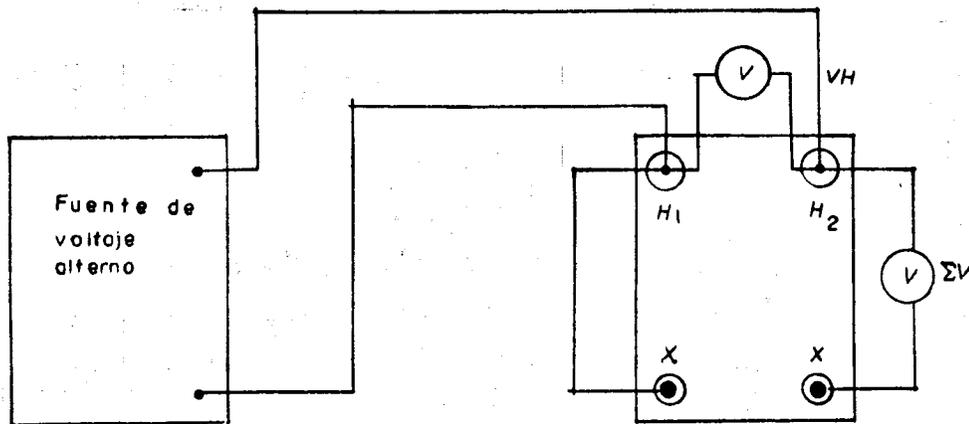


Fig. 19 Diagrama de circuito para la prueba de polaridad con dos voltímetros.

Si el voltímetro colocado en alta tensión da una lectura V_H , y el voltímetro colocado entre alta y baja tensión da la suma algebraica de voltajes ΣV , entonces:

Si $\Sigma V > V_H$ la polaridad es aditiva.

Si $\Sigma V < V_H$ la polaridad es sustractiva.

En la Fig. 19 hemos supuesto desconocidos, los índices en la identificación de baja tensión. Como resultado de esta prueba, debe identificarse la posición de estos índices de acuerdo a la Fig. 18.

Método de la descarga inductiva

Este método consiste en aplicar corriente directa a uno de los devanados, cuidando de no exceder el valor nominal. El observador, colocado frente a las dos terminales de baja tensión, por medio de un voltímetro de corriente directa debe averiguar la polaridad de la tensión aplicada, de tal manera que la aguja del instrumento se desvíe hacia la región positiva de la carátula, como muestra la Fig. 20a.

Posteriormente, sin suspender la corriente directa aplicada, se cambia la conexión del voltímetro como muestra la Fig. 20b. Después de esta operación se suspende bruscamente la corriente directa y se observa la deflexión momentánea de la aguja del voltímetro debida a la descarga inductiva.

Si la aguja se desvíe en sentido positivo, la polaridad es aditiva, y si se desvíe en sentido negativo, la polaridad es sustractiva.

Desarrollo de la prueba

a) Método del transformador patrón

- Colóquese según la regla de aplicación, frente a las dos terminales de baja tensión, e identifique la posición de sus terminales de misma polaridad, a qué caso de la Fig. 18 corresponde:

- () polaridad aditiva
- () polaridad sustractiva

- De acuerdo con la polaridad resultante y las indicaciones de la Fig. 18, verifique si las terminales están correctamente identificadas, o si no tienen póngalas de acuerdo a las indicaciones de la misma figura.

b) Método de dos voltímetros

- Seleccione sus instrumentos de prueba. La escala del voltímetro V_H debe estar de acuerdo a la tensión que se vaya a aplicar. Con esta tensión y la relación de transformación, obtenga el valor del voltaje que se inducirá en baja tensión.

Voltaje a aplicar en alta tensión: _____ volts.

Relación de transformación: $a =$ _____

Voltaje que se inducirá en baja tensión:

$$V_X = \frac{V_H}{a} = \text{---} = \text{---} \text{ volts.}$$

Previniendo que la polaridad pudiera resultar aditiva:

$$V_H + V_X = \text{---} + \text{---} = \text{---} \text{ volts.}$$

Este valor sirve para seleccionar el voltímetro ΣV .

- Conecte el circuito de prueba de acuerdo al diagrama de la Fig. 19.
- Energice la fuente, tome las lecturas y anótelas a continuación.

$V_H =$ _____ volts

$\Sigma V =$ _____ volts.

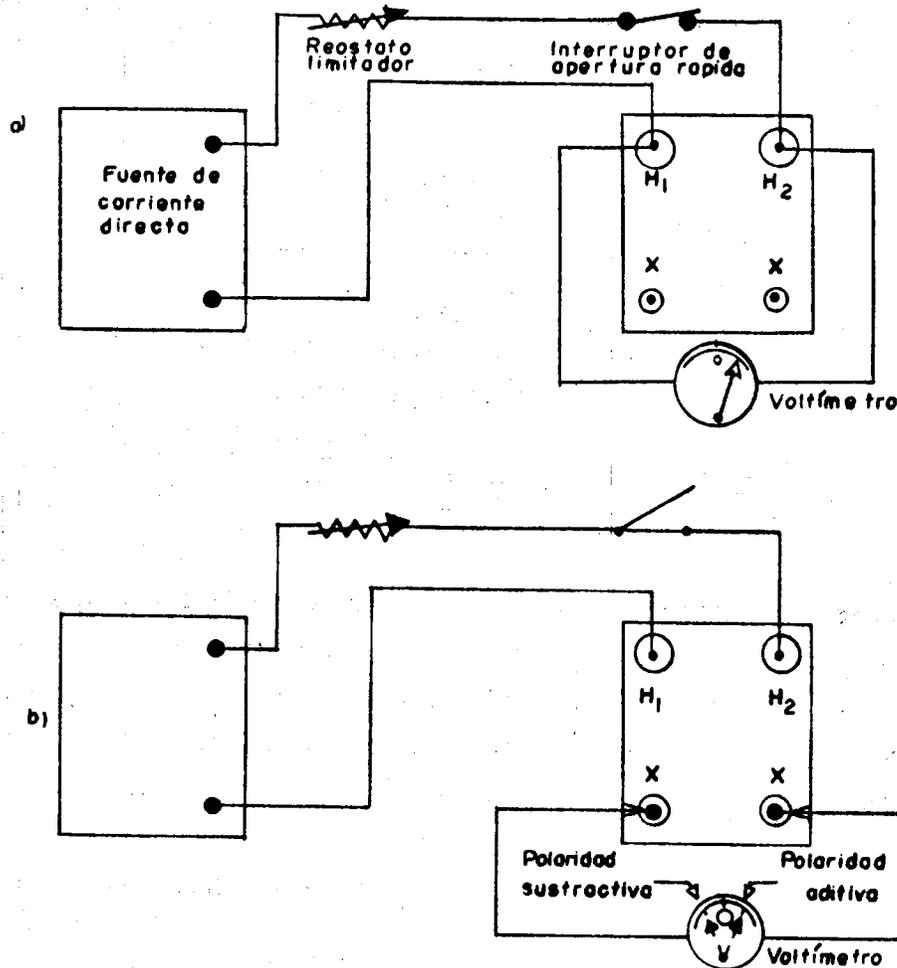


Fig. 20 Diagrama de circuito y observación de la desviación de la Aguja en la prueba de polaridad por descarga inductiva.

- Identifique la polaridad del transformador

() polaridad aditiva si $\Sigma V > V_H$

() polaridad sustrativa si $\Sigma V < V_H$

- De acuerdo con la polaridad resultante y las indicaciones de la Fig. 18, verifique si las terminales están correctamente identificadas, o si no tienen, póngalas de acuerdo a las indicaciones de la misma figura.

c) Método de la descarga inductiva

- Calcule la corriente nominal del devanado en el cual va a aplicar la corriente directa

$$I_{\text{nom}} = \frac{\text{capacidad}}{V_{\text{nom}}} = \text{-----} = \text{----- Amp.}$$

- Calcule la resistencia del reóstato limitador, considerando que la resistencia del devanado es cero

$$R = \frac{V_{\text{fuente}}}{V_{\text{nom}}} = \text{-----} = \text{-----} \Omega$$

- Seleccione los instrumentos adecuados para la prueba según la Fig. 20a. El voltímetro de corriente directa debe ser de pequeña escala y de preferencia con el cero al centro. Si no se dispone de un instrumento con cero al centro, es necesario estar pendiente de la deflexión de la aguja, puesto que si es negativa, rápidamente rebota, dando la impresión de que fue positiva, lo que sucede en fracciones de segundo.
- Conecte el circuito de pruebas de acuerdo al diagrama de la Fig. 20a. Los cables del voltímetro déjelos sueltos para conexión manual.

- Energice la fuente, cierre el interruptor y espere el tiempo necesario de estabilización.

Importante. Al hacer contacto manual con los cables del voltímetro, no toque los extremos metálicos.

- Apoye los cables del voltímetro en las terminales del devanado energizado.
- Cambie ordenadamente los cables del voltímetro al devanado opuesto.
- Ponga su atención en la aguja del voltímetro y abra rápidamente el interruptor. Anote su resultado.

() polaridad aditiva si hubo deflexión positiva

() polaridad sustractiva si hubo deflexión negativa

- De acuerdo a la polaridad resultante y las indicaciones de la Fig. 18 verifique si las terminales están correctamente identificadas, o si no tienen, póngala de acuerdo a las indicaciones de la misma figura.

Prueba de secuencia de fases

Un sistema trifásico de voltajes es un conjunto de tres tensiones alternas de misma magnitud y frecuencia y defasadas entre sí 120 grados.

La secuencia de fases es el orden en que aparece en las líneas un mismo valor instantáneo de voltaje.

Si identificamos las líneas con los nombres A, B y C la secuencia significa que el valor máximo de voltaje aparece primeramente en

la línea A, enseguida en la línea B y por último en la línea C.

Si conectamos los devanados de alta tensión de un transformador a las líneas trifásicas, de tal manera que se le aplique la secuencia $H_1 - H_2 - H_3$, en el lado de baja tensión se inducirán voltajes con una determinada secuencia y si esta secuencia es $X_1 - X_2 - X_3$, se dice que el transformador tiene secuencia normal.

Secuencímetro indicador. Es un instrumento de prueba que trabaja con el principio del motor de inducción. Sus tres conexiones están identificadas en orden y cuando la secuencia del sistema al que se conecta tiene ese mismo orden, se observa que el indicador de carátula gira en sentido positivo según indicaciones de la misma carátula.

Motor de inducción. Un motor trifásico de inducción sirve como secuencímetro si previamente se identifica el orden de sus conexiones con un sentido de giro.

Desarrollo de la prueba.

La prueba puede efectuarse energizando el transformador en las terminales de alta tensión o en las de baja tensión.

a) Energizando por alta tensión

- Conecte el circuito de prueba de acuerdo al diagrama de la Fig. 21a.
- Deje abierto el interruptor del secuencímetro
- Energice la fuente y verifique por medio del voltímetro que la tensión aplicada no exceda de la que requiere el secuencímetro.
- Cierre el interruptor del secuencímetro y verifique que la secuencia aplicada sea $H_1 - H_2 - H_3$. Si no es así, desenergice

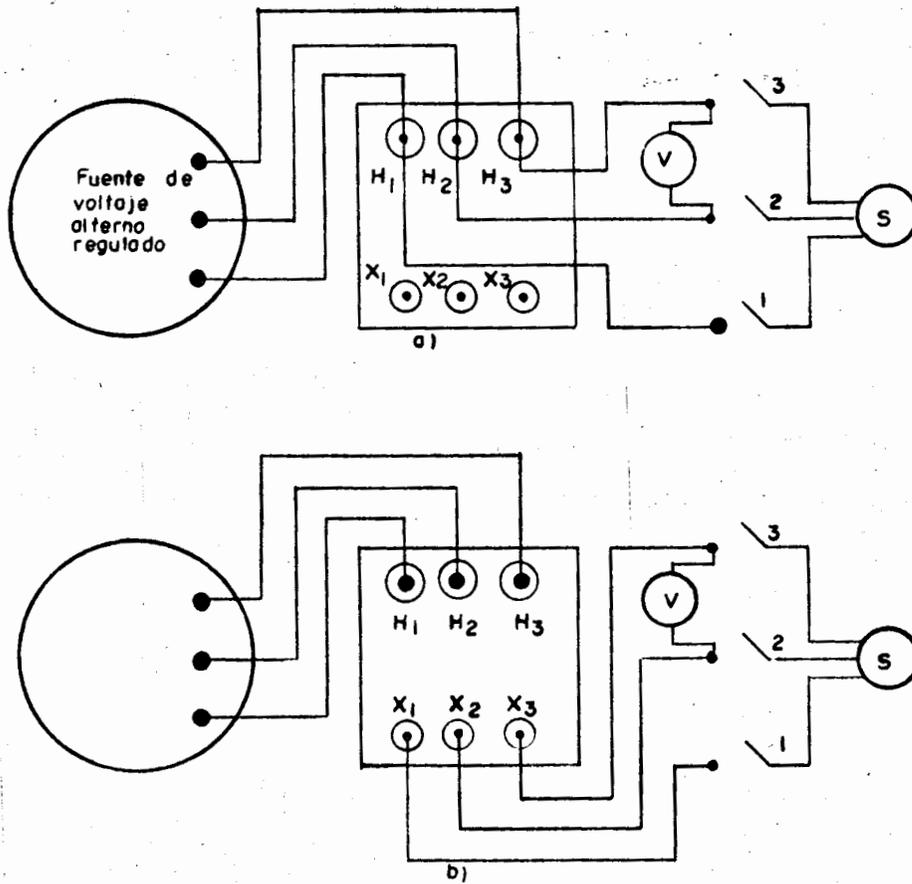


Fig. 21 Diagrama de circuito para la prueba de secuencia de fases energizando por alta tensión

- la fuente, intercambie dos de las conexiones de alimentación y verifique nuevamente.
- Desenergice la fuente y cambie las conexiones del secuencímetro de H₁ a X₁, H₂ a X₂ y H₃ a X₃. Abra el interruptor del secuencímetro.
 - Energice la fuente
 - Cierre el interruptor del secuencímetro y observe la secuencia de fases. Anote a continuación el resultado.

Secuencia de fases

$H_1 - H_2 - H_3$ -- $X_1 - X_2 - X_3$ (normal)

Si la relación de transformación es muy grande es posible que el voltaje de prueba disponible no haya trabajado el secuencímetro en baja tensión. Si es así, repita la prueba energizada por baja tensión, como se indica a continuación.

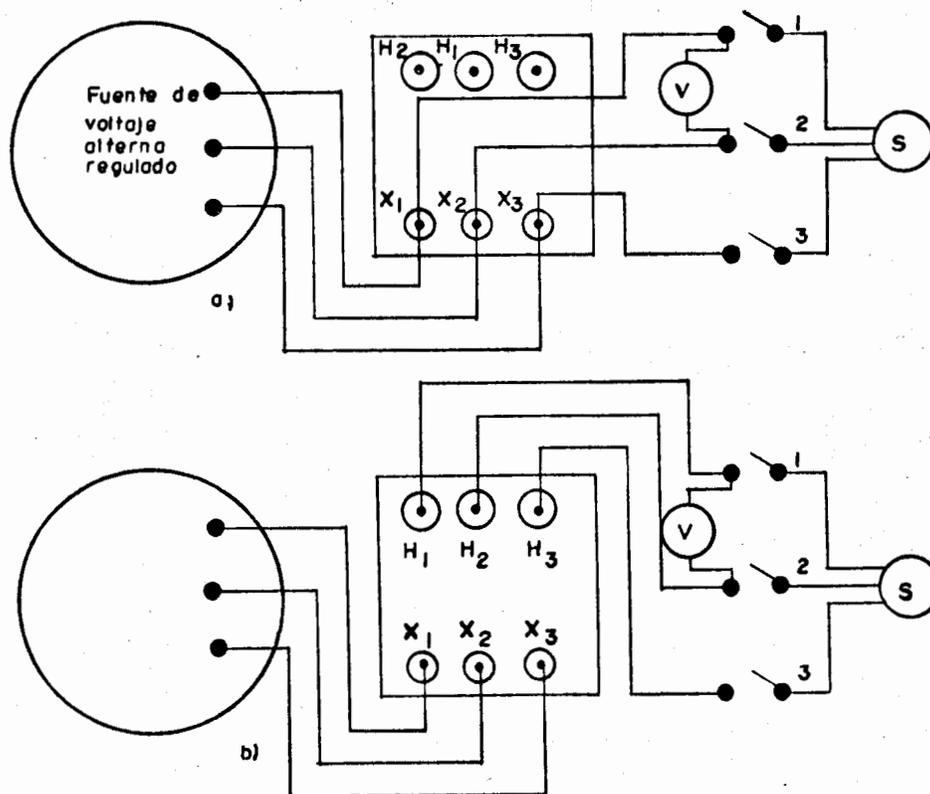


Fig. 22 Diagrama de circuito para la prueba de secuencia de fases energizando por baja tensión.

b) Energizando por baja tensión

- Conecte el circuito de prueba de acuerdo al diagrama de la Fig. 22a. Deje abierto el interruptor del secuencímetro.

Importante. En las terminales de alta tensión van a aparecer voltajes peligrosos. No se acerque a ellas.

- Energice la fuente y verifique por medio del voltímetro, que la tensión aplicada no exceda de la que requiere el secuencímetro.
- Cierre el interruptor del secuencímetro y verifique que la secuencia aplicada sea $X_1 - X_2 - X_3$. Si no es así, desenergice la fuente, intercambie dos de las conexiones de alimentación y verifique nuevamente.
- Desenergice la fuente y cambie las conexiones del secuencímetro de X_1 a H_1 , X_2 a H_2 y X_3 a H_3 . Abra el interruptor del secuencímetro.

Importante. Antes de energizar la fuente, cerciórese de que el control de voltaje está en el extremo cero y tenga cuidado al moverlo, pues en esta parte de la prueba se requerirán sólo unos volts.

- Energice la fuente y verifique por medio del voltímetro que la tensión inducida no exceda de la que requiere el secuencímetro.
- Cierre el interruptor del secuencímetro y observe la secuencia de fases. Anote a continuación su resultado.

Secuencia de fases

() $H_1 - H_2 - H_3$ -- $X_1 - X_2 - X_3$ (normal)

1.3 Verificación del diagrama fasorial y desplazamiento angular de transformadores trifásicos.

Las pruebas de relación de transformación y secuencia de fases se han llevado a cabo en base al diagrama fasorial de conexiones del transformador y son complementadas con esta prueba que tiene por objeto verificar el diagrama mencionado, y del mismo, obtener el desplazamiento angular. Para verificar el diagrama, se aplica al lado de alta tensión un sistema trifásico de voltajes, de un valor adecuado para tomar lecturas con un voltímetro, interconectando a la vez una terminal de alta tensión con una de baja tensión, como lo indican las tablas 12 y 13 para los diferentes diagramas.

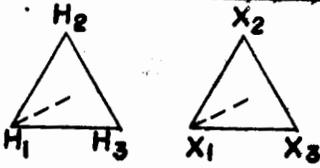
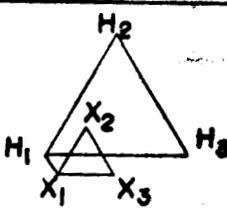
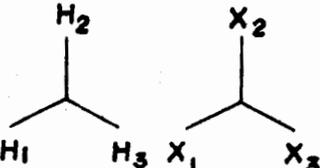
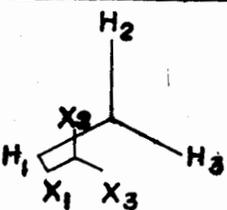
Se toman las lecturas indicadas en la columna derecha de las mismas tablas y se verifican las relaciones de tensión que ahí mismo aparecen. Si las relaciones se cumplen queda verificado el diagrama supuesto.

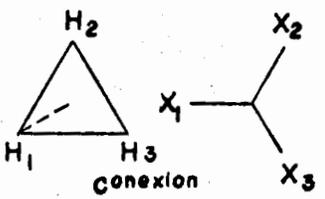
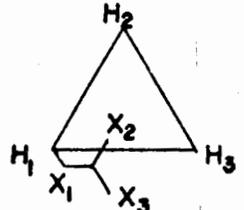
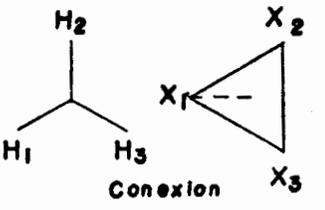
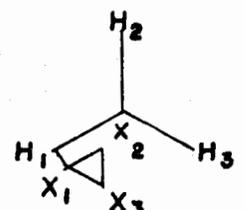
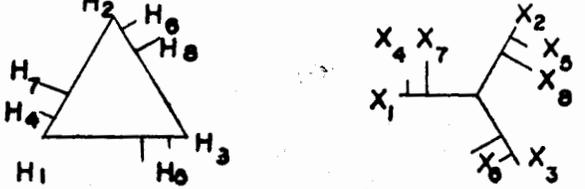
Por último, para obtener el desplazamiento angular, observamos que en todos los diagramas aparece un fasor de alta tensión H_0-H_1 y uno de baja tensión X_0-X_1 . En el caso de conexiones en delta se supone un neutro virtual y el fasor aparece con línea punteada.

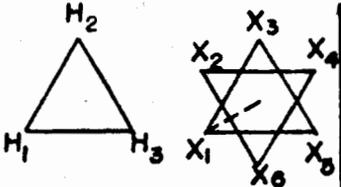
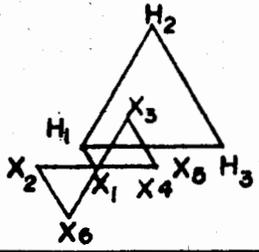
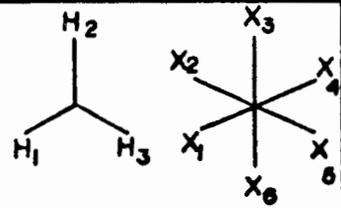
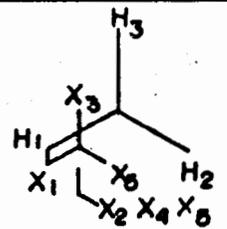
Si a un lado del diagrama de conexiones transportamos los fasores H_0-H_1 y X_0-X_1 con un origen común y suponemos que el sistema gira en el sentido convencional, contrario al movimiento de las manecillas del reloj, el segundo fasor que pase por un punto del plano, se dice que está atrasado con respecto al primero.

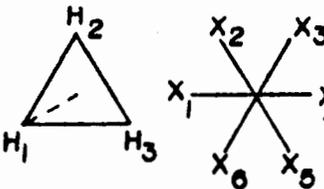
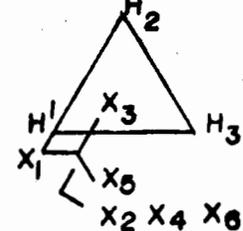
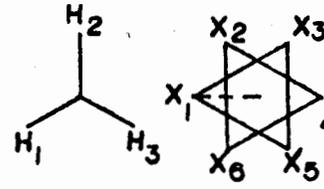
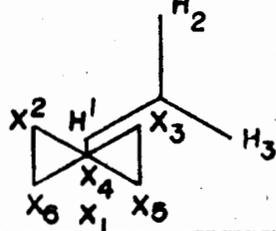
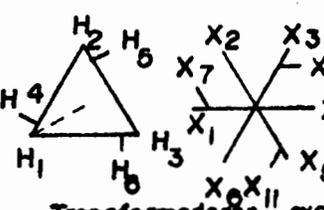
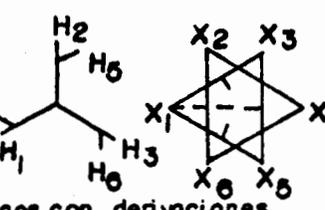
Los transformadores conectados bajo especificaciones de norma deben cumplir con los siguientes requisitos de desplazamiento angular.

Conexiones delta-delta y estrella-estrella, baja tensión en fase con alta tensión.

Grupo	Desplazamiento angular	Diagrama para mediciones de prueba	Mediciones de prueba
<p>Grupo 1</p> <p>Desplazamiento angular 0 grados</p>	 <p>conexión delta - delta</p>		<p>Conectar H_1 a X_1</p> <p>Medir $H_2 - X_2, H_3 - X_2, H_1 - H_2, H_2 - X_3$</p> <p>Relaciones de tensión</p> <p>(1) $H_2 - X_2 = H_3 - X_2$</p> <p>(2) $H_2 - X_2 < H_1 - H_2$</p> <p>(3) $H_2 - X_2 < H_2 - X_3$</p>
	 <p>conexión estrella - estrella</p>		

<p>Grupo 2</p> <p>Desplazamiento angular 30 grados</p>	 <p>conexión delta estrella</p>		<p>Conectar H_1 a X_1</p> <p>Medir $H_3 - X_2, H_3 - X_3, H_1 - H_3, H_2 - X_1$</p> <p>Relaciones de tensión</p> <p>(1) $H_3 - X_2 = H_3 - X_3$</p> <p>(2) $H_3 - X_2 < H_1 - H_3$</p> <p>(3) $H_2 - X_2 < H_2 - X_3$</p> <p>(4) $H_2 - X_2 < H_1 - H_3$</p>
	 <p>conexión estrella delta</p>		
 <p>Transformador trifásico con derivaciones</p>			

Grupo	Desplazamiento angular	Diagrama para mediciones para prueba	Mediciones de prueba
Grupo 1 Desplazamiento angular 0 grados	 <p>Delta doble delta</p>		Conectar H_1 o X_1 y o X_4 Medir $H_2 - X_3$ $H_1 - H_2$ $H_2 - X_5$ $H_2 - X_6$ $H_3 - X_2$ $H_2 - X_2$ $H_3 - X_3$ Relaciones de tensión (1) $H_2 - X_5 = H_3 - X_3$ (2) $H_2 - X_3 < H_1 - H_2$ (3) $H_2 - X_3 < H_2 - X_5$ (4) $H_2 - X_6 = H_3 - X_2$ (5) $H_2 - X_6 > H_2 - X_2$
	 <p>Estrella diametral</p>		Conectar X_2 o X_4 X_6 H_1 o X_1 Medir $H_2 - X_3$ $H_3 - X_5$ $H_1 - H_2$ $H_2 - X_5$ Relaciones de tensión (1) $H_2 - X_5 = H_3 - X_5$ (2) $H_2 - X_3 < H_1 - H_2$ (3) $H_2 - X_3 < H_2 - X_5$

Grupo 2 Desplazamiento angular 30 grados	 <p>Delta-diametral</p>		Conectar X_2 o X_4 y X_6 ; H_1 o X_1 Medir $H_3 - X_3$ $H_3 - X_6$ $H_1 - H_3$ $H_2 - X_3$ $H_2 - X_5$ Relaciones de tensión 1) $H_3 - X_3 = H_3 - X_6$ 2) $H_3 - X_3 < H_1 - H_3$ 3) $H_2 - X_3 < H_2 - X_5$
	 <p>Estrella-doble delta</p>		Conectar H_1 o X_1 y o X_4 Medir $H_3 - X_3$ $H_3 - X_5$ $H_1 - H_3$ $H_3 - H_2$ X_3 $H_2 - X_5$ $H_3 - X_2$ $H_3 - X_6$ $H_2 - X_2$ $H_2 - X_6$ Relaciones de tensión 1) $H_3 - X_3 = H_3 - X_5$ 2) $H_3 - X_3 = H_1 - H_3$ 3) $H_2 - X_3 = H_2 - X_6$ 4) $H_3 - X_2 = H_3 - X_6$ 5) $H_3 - X_2 = H_1 - H_3$ 6) $H_2 - X_2 = H_2 - X_6$
	 <p>Transformadores exofasicos con derivaciones</p>		Conectar H_1 o X_1 y o X_4 Medir $H_3 - X_3$ $H_3 - X_5$ $H_1 - H_3$ $H_3 - H_2$ X_3 $H_2 - X_5$ $H_3 - X_2$ $H_3 - X_6$ $H_2 - X_2$ $H_2 - X_6$ Relaciones de tensión 1) $H_3 - X_3 = H_3 - X_5$ 2) $H_3 - X_3 = H_1 - H_3$ 3) $H_2 - X_3 = H_2 - X_6$ 4) $H_3 - X_2 = H_3 - X_6$ 5) $H_3 - X_2 = H_1 - H_3$ 6) $H_2 - X_2 = H_2 - X_6$

Conexiones delta-estrella y estrella-delta, baja tensión 30 grados atrás de alta tensión.

Desarrollo de la Prueba

- Identifique en las Tablas 12 y 13 el tipo de conexión que se supone tiene el transformador.
- Dibuje el diagrama identificado en la Fig. 23, así como los diagramas interconectados para mediciones de prueba.
- Transporte los fasores $H_0 - H_1$ y $X_0 - X_1$ al origen común, a la derecha de la Fig. 23.
- Determine el desplazamiento angular según el diagrama anterior y anótelo al pie de la Fig. 23.
- Anote en la Tabla 14, las terminales que hay que interconectar, las tensiones que va a medir y las relaciones que espera obtener.
- Conecte al circuito de prueba, interconectando las terminales que indica en primer lugar la Tabla 14 y excitando el transformador por el lado de alta tensión, a un voltaje adecuado de acuerdo al voltímetro de prueba.
- Prepare el voltímetro para la prueba, dejando sus cables disponibles para apoyarlos sucesivamente en las terminales que marca la Tabla 14.

Importante. Evite tocar cualquier parte metálica.

- Energice la fuente, tome las lecturas que indica la Tabla 14 y anote sus valores.
- Anote si se verifican las relaciones esperadas.

2.1 Saturación en vacío y saturación con rotor bloqueado

Saturación en vacío

Esta prueba muestra las características de comportamiento del circuito magnético del motor. En la Fig. 24 se muestra una de estas curvas, que tiene como abscisa la excitación magnética y como ordenada de densidad de flujo.

Esta gráfica muestra el comportamiento de un cierto material ferromagnético, sin estar sujeta a la forma y dimensiones del circuito.

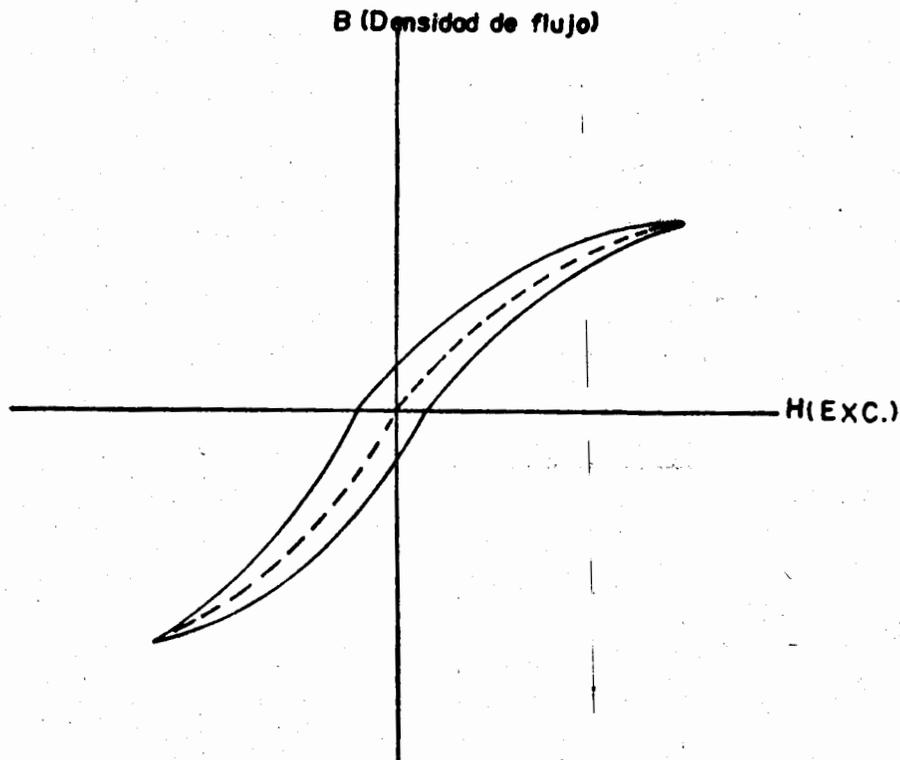


Fig. 24 Curva de magnetización de un material ferromagnético

Si con este material se fabrica un circuito magnético, se puede trazar una curva de magnetización particular, o sea, una curva válida solamente para la longitud y sección transversal del núcleo, así como para el número de vueltas de la bobina de excitación. La diferencia es que las coordenadas serían ahora la corriente de excitación y el flujo magnético, como se ve en la Fig. 25.

Si a este circuito se agrega ahora dos entrehierros pequeños, de tal modo que no se linealice la curva de magnetización, se esta cerca de un modelo ideal del núcleo del motor de inducción, como aparece en la Fig. 26.

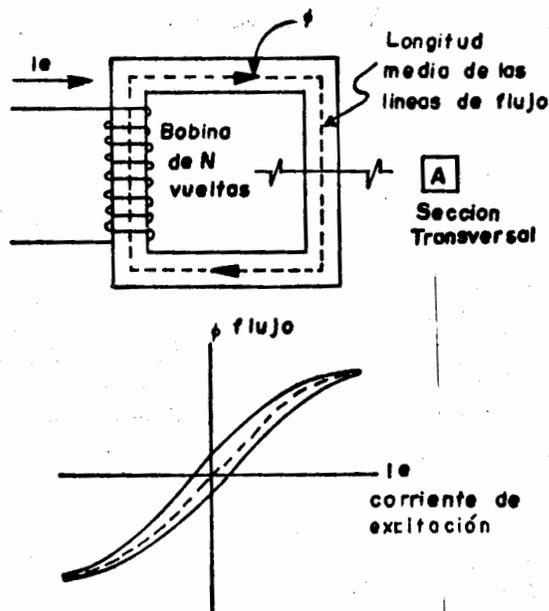


Fig. 25 Un circuito magnético y su curva de magnetización

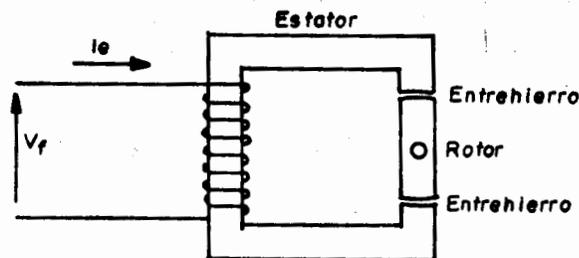


Fig. 26 Circuito magnético de una fase del motor de inducción

No obstante, si se tiene en cuenta que nuestra máquina es de corriente alterna, se puede aprovechar la propiedad de los circuitos magnéticos de corriente alterna, "el flujo es proporcional al voltaje aplicado, cuando la frecuencia se mantiene constante", por lo que se pueden cambiar nuevamente las coordenadas, tomando como abscisa el valor eficaz de la corriente de excitación, y como ordenada el voltaje eficaz aplicado.

Mientras la máquina no logra su velocidad síncrona, en la alimentación se manifiestan las corrientes de circuito-corto del rotor.

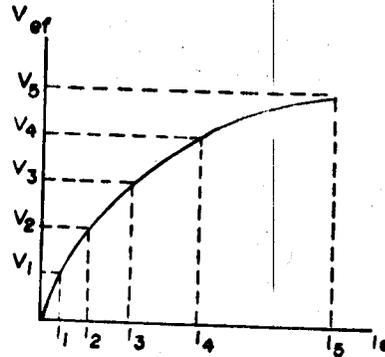


Fig. 27 Curva de saturación

Cuando estas corrientes bajan a un valor mínimo, el motor ha completado su etapa de arranque.

El valor de tensión con el cual el motor termina su arranque se llama Voltaje Mínimo de Arranque. A partir de este valor se pueden obtener datos para el trazo de la curva, como se muestra en la Fig. 28.

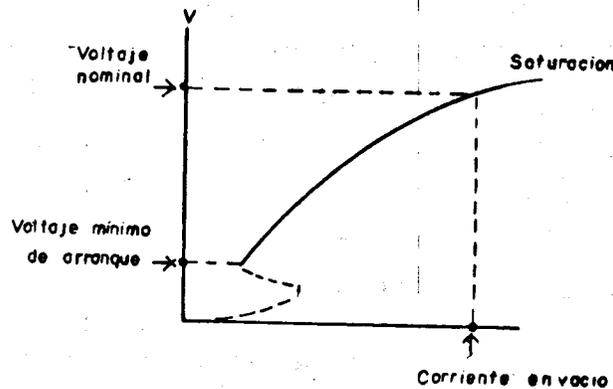


Fig. 28 Curva de saturación en vacío

Del análisis de las pruebas, se pueden obtener algunos resultados como:

- Estado de saturación del circuito magnético. La primera curva permite verificar el diseño del circuito magnético, si se recuerda que para un voltaje y una frecuencia dadas, a cada número de vueltas de la bobina de excitación corresponde una sección de núcleo. De manera que si la cantidad de fierro es adecuada a las bobinas, la saturación debe presentarse arriba del voltaje nominal.

Si el voltaje nominal queda en la región de saturación, significa que el núcleo es débil y el motor tendrá un alto índice de pérdidas magnéticas, que se manifiestan por sobrecalentamiento.

Si el voltaje nominal queda en la región inicial, antes de que la curva pierda su pendiente, significa que el núcleo es muy robusto, lo cual puede considerarse beneficioso para la operación de la máquina, pero en cambio aumenta su costo.

- Determinación de pérdidas mecánicas. El punto inicial de la segunda gráfica da para el voltaje mínimo de arranque, cierto número de Watts que disipan en pérdidas mecánicas por fricción y ventilación, y pérdidas eléctricas en los devanados.

$$W_{\min} = \text{pérdidas mecánicas} + \text{pérdidas eléctricas}$$

El valor de pérdidas mecánicas sería el nominal puesto que es cuando la máquina logra una velocidad.

Las pérdidas eléctricas, aunque no son las nominales, puesto que la corriente circulante no es la nominal, sí es un valor que se debe tener en cuenta, puesto que la corriente no es despreciable debido al bajo factor de potencia.

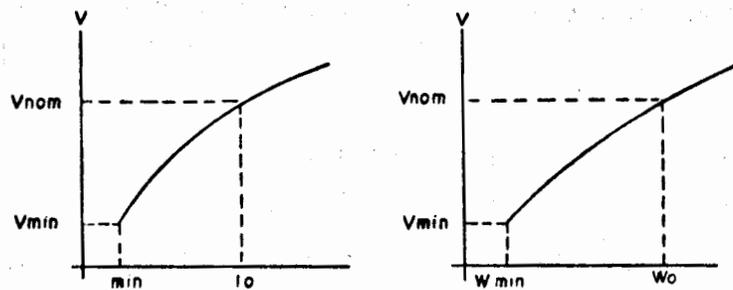


Fig. 29 Forma de las curvas de saturación en vacío

En cambio, las pérdidas magnéticas sí son de magnitud despreciable debido al valor pequeño del voltaje.

Las pérdidas mecánicas nominales pueden calcularse mediante:

$$\text{Pérdidas mecánicas} = W_{\min} - 3I_1^2 R$$

de donde "I₁" es la corriente de fase, que se obtiene de la I_{min}, según el embobinado del motor esté en circuito delta o estrella, y R es la resistencia efectiva de una fase.

- Determinación de las pérdidas magnéticas. Las pérdidas magnéticas nominales se presentan cuando el motor se excita a su voltaje nominal. La potencia W₀ es la segunda gráfica de la Fig. 29 se disipa en pérdidas mecánicas (nominales), pérdidas magnéticas nominales y pérdidas eléctricas, en vacío, debidas a la corriente I₀.

$$W_0 = \text{Pérd. mec.} + \text{Pérd. mag.} + \text{Pérd. eléct.}$$

de donde se obtienen las pérdidas magnéticas, despejándolas de esta última:

$$\text{Pérdidas magnéticas} = W_0 - \text{Pérd. mec.} - 3 I_2^2 R$$

en donde las pérdidas mecánicas ya se han obtenido anteriormente, la corriente de fase I_2 se obtiene de I_0 según el circuito del embobinado sea delta o estrella, y R es la resistencia efectiva de fase.

Procedimiento de prueba

Para llevar a cabo la prueba se necesita el siguiente equipo:

- Un puente Kelvin
- Un regulador de voltaje
- Un voltímetro
- Tres amperímetros
- Tres wattímetros

Antes de iniciar la prueba se mide con el puente, la resistencia óhmica de una fase. Es conveniente que la máquina haya permanecido en reposo durante varias horas, en un lugar exento de corriente de aire y de cambios bruscos de temperatura. Esto es para garantizar que los embobinados se encuentren a temperatura ambiente, ya que para algunos análisis habrá que corregir el valor medido, debido a los efectos de calentamiento.

Es frecuente que resulte imposible medir directamente la resistencia de una fase, ya que muchos motores tienen el circuito de su embobinado en estrella sin neutro accesible. En cualquiera de estos dos casos, se toman tres lecturas entre los tres posibles pares de conexiones de entrada al motor.

$$R_f = \frac{3}{2} \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3} \quad \text{delta}$$

$$R = \frac{1}{2} \left(\frac{L_1 + L_2 + L_3}{3} \right) \quad \text{estrella}$$

Practicamente la resistencia efectiva de la corriente alterna, fluctúa entre 1.1 y 1.25 veces el valor de la resistencia a la corriente directa.

Después de medir la resistencia, se procede a armar el circuito de prueba, como se muestra en la Fig. 30.

Las escalas de corriente de los amperímetros y wattímetros se seleccionan aproximadamente para la corriente nominal a plena carga del motor.

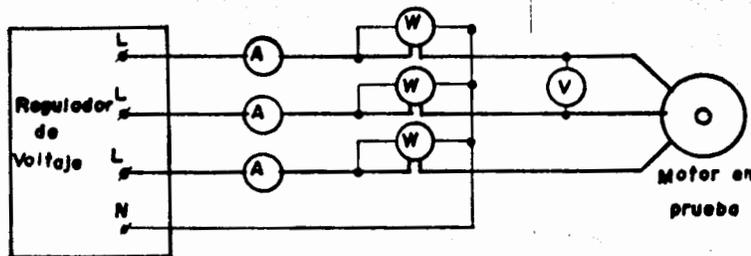


Fig. 30 Diagrama de circuito para prueba de saturación en vacío.

Las escalas del voltaje de los wattímetros para 135% del voltaje nominal al neutro.

La escala del voltímetro para 135% del voltaje nominal entre líneas.

En el caso de no disponer de un neutro, como en la Fig. 30, los wattímetros deben ser iguales, para tener un neutro flotante equilibrado.

Para calentar los cojinetes y normalizar su lubricación, se procede a arrancar el motor y dejarlo girar durante 30 minutos. El voltaje aplicado puede elevarse hasta 135% el valor nominal; para obtener una corriente cercana al valor nominal a plena carga y que será suficiente para calentar los devanados del estator.

Se incrementa lentamente el voltaje. Al principio se obtienen corrientes elevadas, comparativamente con los valores pequeños de las corrientes en vacío.

Cuando las corrientes bajan a un valor mínimo y se estabilizan, el rotor ha alcanzado su velocidad síncrona y se tiene el voltaje mínimo de arranque. Se toma la primera lectura.

Después se incrementa el voltaje, tomando varias lecturas hasta llegar a 125% o 135% del voltaje nominal, según el estado de saturación de la máquina.

Nota: Es conveniente que una de estas lecturas se tome a voltaje nominal de la máquina.

Desarrollo de la prueba

- Seleccione sus instrumentos y prepare todo el equipo necesario.
- Tome las tres lecturas de resistencia y anótelas en la Tabla 15.

La corriente de línea es el promedio de las lecturas,

$$I_L = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{3}$$

La potencia trifásica es la suma de las lecturas,

$$W_T = W_1 + W_2 + W_3$$

- Con las tres últimas columnas de la tabla 16, marque sus escalas y los correspondientes puntos de las curvas, en las Figs. 31 y 32. Trace las curvas continuas.

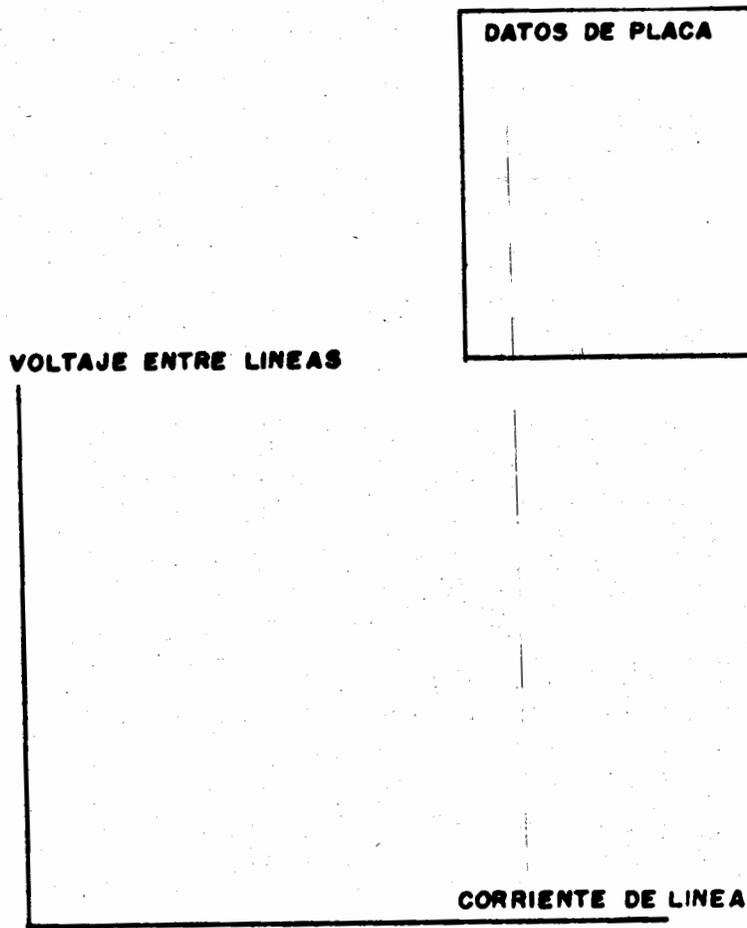


Fig. 31 Curva de saturación en vacío (corriente)

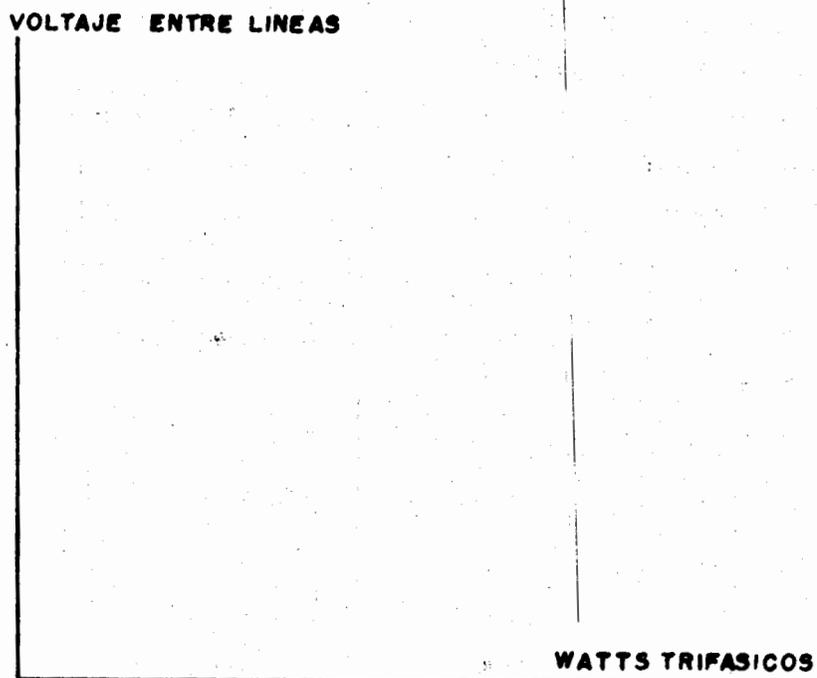


Fig. 32 Curva de saturación en vacío (potencia)

Resultados

De la observación podemos hacer

CONCLUSIONES SOBRE EL ESTADO DE SATURACION DEL NUCLEO

Saturación con rotor bloqueado

Esta prueba es una repetición de la prueba anterior pero ahora impidiendo el giro del rotor. Esto se logra mediante una palanca acoplada a la flecha, y descansando en su extremo sobre una báscula, para medir el par desarrollado.

Con el rotor bloqueado, el sistema electromagnético de la máquina opera como un transformador con el secundario en circuito-corto, por lo que las corrientes en los devanados se elevan, produciendo sobrecalentamientos rápidos.

Por estas razones, deben extremarse las precauciones al efectuar la prueba, para evitar cualquier daño a la máquina.

La prueba se efectúa a voltajes reducidos, ya que es posible extrapolar los resultados que se obtienen para saber cuál es el comportamiento del motor a voltajes más altos, inclusive al nominal.

En la Fig. 33 se presenta el diagrama de conexiones que se va a necesitar.

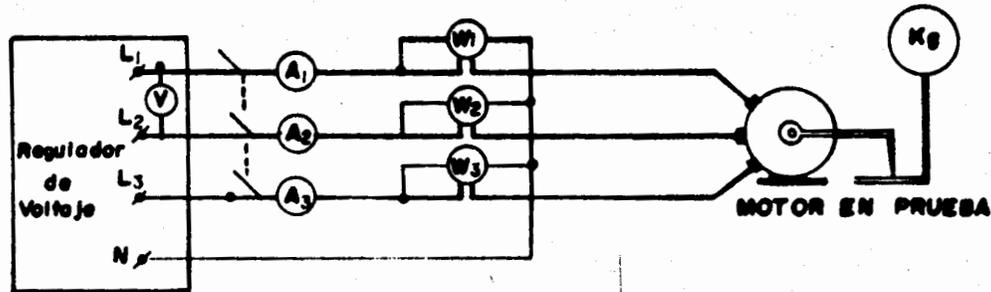


Fig. 33 Diagrama de circuito para prueba de rotor bloqueado

Aunque los diagramas de conexiones son los mismos que para la prueba anterior, seguramente hay que cambiar instrumentos debido a que se manejan valores diferentes, tanto de corrientes como de voltaje.

La Fig. 34 muestra la forma aproximada de las curvas que se obtendrán.

Para las operaciones de extrapolación, se parte de la consideración de que los parámetros del circuito eléctrico, resistencias y reactancias son variables, de modo que para dos voltajes diferentes, las respectivas corrientes serían:

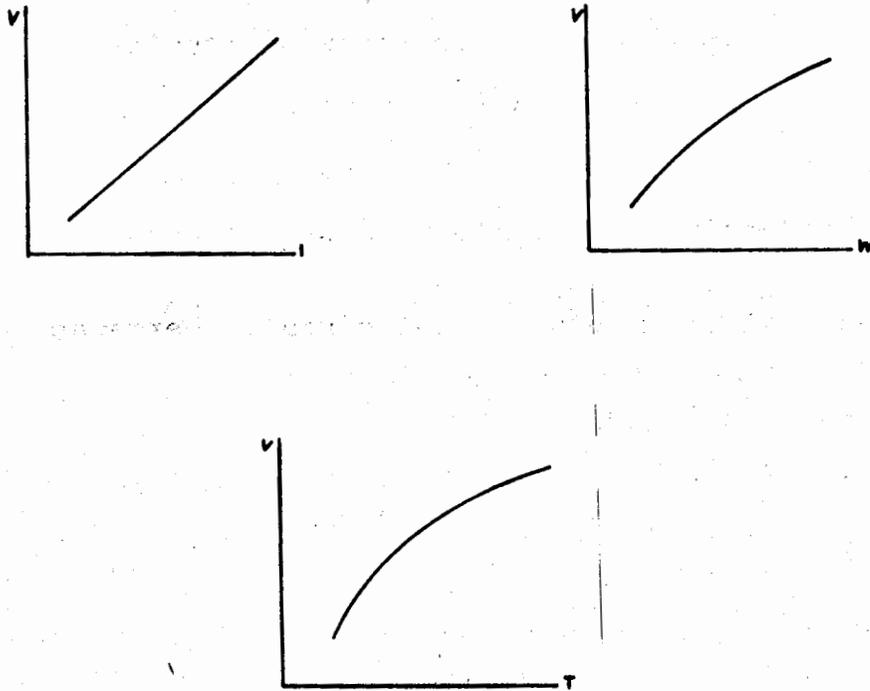


Fig. 34 Forma de las curvas de saturación con rotor bloqueado

$$I_e = \frac{v_e}{z}$$

$$I_p = \frac{v_p}{z}$$

de donde

$$\frac{I_e}{I_p} = \frac{v_e}{v_p}$$

o bien

$$I_e = \frac{V_e}{V_p} I_p$$

en donde

I_e = corriente extrapolada

V_e = voltaje para el cual queremos extrapolar

I_p = corriente obtenida en la prueba

V_p = voltaje aplicado en la prueba

Z = impedancia del motor con rotor bloqueado

Por otro lado, si la impedancia del circuito permanece constante, el factor de potencia también será constante:

$$W_e = V_e I_e \cos \theta$$

$$W_p = V_p I_p \cos \theta$$

de donde

$$\frac{W_e}{W_p} = \frac{V_e I_e}{V_p I_p}$$

y sustituyendo la relación que se obtuvo anteriormente:

$$\frac{W_e}{W_p} = \left(\frac{V_e}{V_p}\right)^2$$

$$W_e = \left(\frac{V_e}{V_p}\right)^2 W_p$$

en donde

W_e = potencia extrapolada

V_e = voltaje al cual queremos extrapolar

W_p = potencia obtenida en la prueba

V_p = voltaje aplicado en la prueba

El par es una función del deslizamiento y el cuadrado del voltaje, de manera que se considerarán los pares correspondientes a dos voltajes distintos, ambos a deslizamiento unitario, que es el valor correspondiente a rotor bloqueado:

$$T_e = K(s) V_e^2$$

$$T_p = K(s) V_p^2$$

de donde

$$\frac{T_e}{T_p} = \frac{V_e^2}{V_p^2}$$

La estructura de la función $K(s)$, se verá en el análisis del circuito equivalente. De la última se obtendrá:

$$T_e = \left(\frac{V_e}{V_p}\right)^2 T_p$$

en donde

T_e = par extrapolado

V_e = voltaje al cual se quiere extrapolar

T_p = par obtenido en la prueba

V_p = voltaje aplicado en la prueba

Esta prueba se efectúa para determinar la intensidad de corriente y el par desarrollado en el momento de arranque de la máquina. Los resultados estarán en las gráficas, y permiten observar el comportamiento del motor en el arranque, con cualquier tipo de arrancador que se utilice en su instalación.

Desarrollo de la prueba

Se requiere del siguiente equipo:

- Un regulador de voltaje
- Un voltímetro
- Tres amperímetros
- Tres wattímetros
- Palanca de bloqueo
- Báscula
- Tres transformadores de corriente

Elegidos los valores máximos con los que se trabajará, y haber seleccionado los instrumentos adecuados para esos valores, se procede a armar el circuito de la Fig. 33.

Antes de bloquear el rotor es necesario arrancar la máquina para verificar el sentido de rotación. Si el sentido de rotación no es el esperado, se corrige intercambiando dos de las líneas de alimentación al motor.

La prueba se lleva a cabo comenzando por los valores máximos elegidos, ya que las sobrecorrientes elevadas provocan una rápida elevación de temperatura.

Si existe calentamiento peligroso en la máquina, es necesario suspender la prueba y esperar que se enfríe, o dejar que la máquina gire en vacío para que accione su sistema de ventilación.

Lea en la báscula el peso de la palanca. Este representa una tara en las lecturas, que habrá que corregir. Anote:

Tara = _____ Longitud de la palanca = _____

Se recomienda tomar lecturas al 220, 150 y 100% de la corriente nominal aproximadamente. Las lecturas tomadas se anotarán en la Tabla 17.

Con los resultados de la Tabla 17 se llenará la Tabla 18, esta vez con lecturas y extrapolaciones en orden ascendente.

En la primera columna se notarán los tres voltajes leídos en la prueba, y se completará del cuarto al sexto renglón con el 80,60 y 40% del voltaje nominal de la máquina extrapolando.

Tabla 17 Lecturas de la prueba de rotor bloqueado

Prueba de rotor bloqueado								
	A ₁	A ₂	A ₃	W ₁	W ₂	W ₃	V	F
200% IN								
150% IN								
100% IN								

En la segunda columna se anotará la corriente de línea como el promedio de las lecturas tomadas para cada renglón.

$$I_L = \frac{A_1 + A_2 + A_3}{3}$$

$$I_L = K \frac{A_1 + A_2 + A_3}{3} \text{ (si se usaron TC)}$$

Del cuarto al sexto renglón, extrapole las lecturas de la prueba, según la fórmula

$$I_e = \frac{V_e}{V_p} I_p$$

En la tercera columna se anotará la potencia trifásica como la su ma de lecturas tomadas para cada renglón

$$W = W_1 + W_2 + W_3$$

$$W = K(W_1 + W_2 + W_3) \text{ si se usaron } T_c.$$

Del cuarto al sexto renglón extrapole las lecturas de la prueba, según la fórmula

$$W_e = \left(\frac{V_e}{V_p}\right)^2 W_p$$

En la cuarta columna se anotará el par desarrollado como el pro- ducto de la longitud de la palanca L por la diferencia de la lec- tura de fuerza F y la tara t

$$T = L(F-t)$$

Del cuarto al sexto renglón, extrapole las lecturas de la prueba, según la fórmula

$$T_e = \left(\frac{V_e}{V_p}\right)^2 T_p$$

Tabla 18 Coordenadas de las curvas de saturación con rotor bloqueado

CURVAS DE SATURACION CON ROTOR BLOQUEADO			
V	I_L	W	T

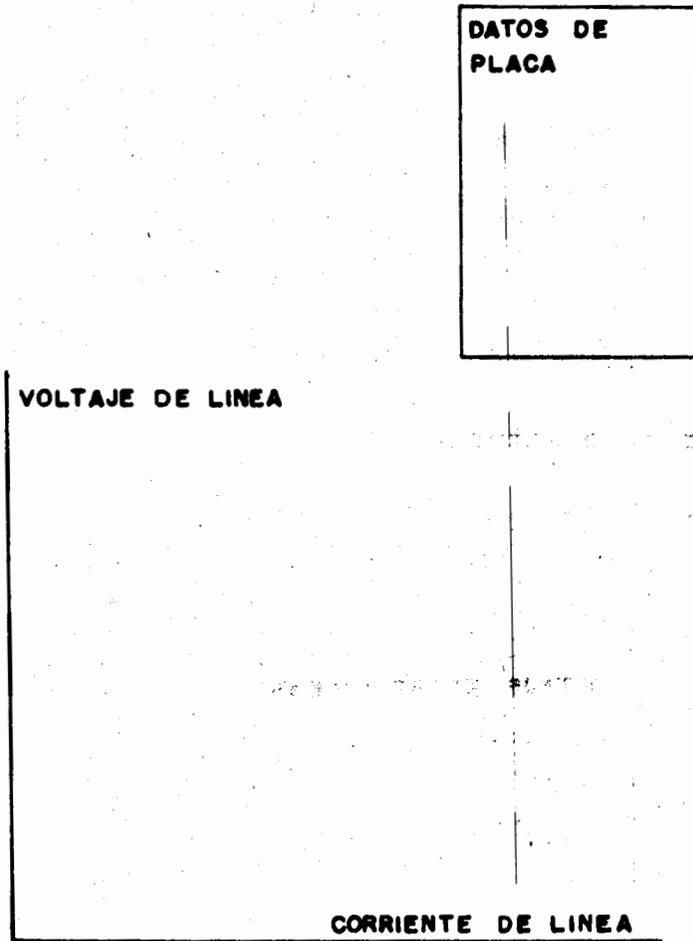


Fig. 35 Curva de saturación con rotor bloqueado
"corriente de arranque"

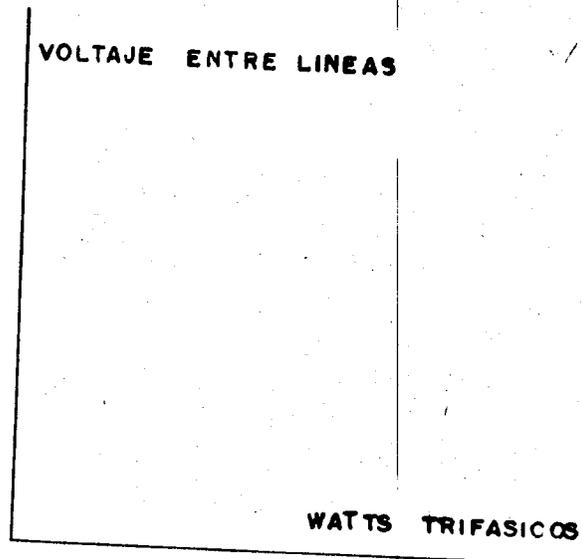


Fig. 36 Curva de saturación con rotor bloqueado "potencia"

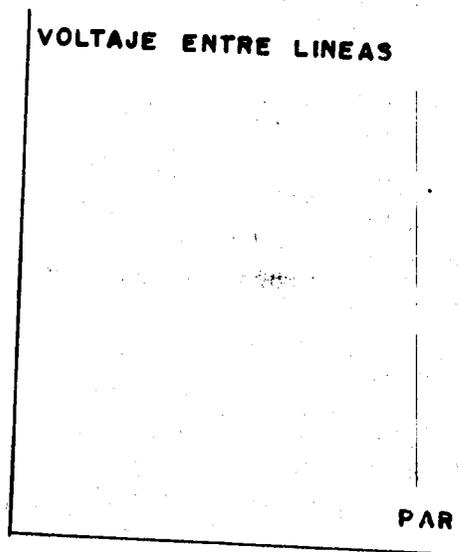


Fig. 37 Curva de saturación con rotor bloqueado "par de arranque"

2.2 Diagrama circular de Heyland

Las propiedades de un motor de inducción pueden determinarse con bastante aproximación por diagrama de "Heyland", que es fundamentalmente un diagrama circular de las corrientes por fase tomadas del motor de inducción con varias cargas a un voltaje constante. Los vectores de la corriente son proporcionales a la potencia aparente (volts-amperes), la parte de la corriente que está en fase con el voltaje será proporcional a la potencia real y la parte de la corriente en cuadratura con el voltaje es proporcional a la potencia reactiva.

En el diagrama de Heyland, para cargas que varían, el lugar de la intensidad del motor I es el arco de círculo $PIQM$. Este diagrama es aproximado; ya que se desprecian la caída por impedancia y las pérdidas en el cobre del estator debidas a las corrientes de imantación y a las parásitas en el núcleo.

El vector voltaje E se hace coincidir con el eje Y . Los datos para trazar el diagrama se obtienen por medio de ensayos en circuito abierto o en vacío y en cortocircuito o rotor bloqueado. Empleando los datos obtenidos en estos ensayos, se puede determinar el funcionamiento del motor con un grado de precisión aceptable.

Procedimiento

1. Se hace trabajar al motor al voltaje nominal en vacío, y se mide el voltaje de la línea (V) o E y la intensidad de la corriente en la misma así como la potencia por fase P_0 en watts. Luego el factor de potencia puede calcularse

$$FP_0 = \cos \phi_0 = \frac{P_0}{EI_0}$$

El voltaje normal por fase E se traza verticalmente (Figura) y la intensidad en vacío I_0 (por fase se traza retrazada un ángulo ϕ_0 con relación a E.

2. Se sujeta el rotor del motor y para que la corriente se pueda mantener dentro de límites razonables, se reduce la tensión de alimentación por fase a E' (aproximadamente 40 volts en nuestro caso), valor tal que de aproximadamente la intensidad en corto circuito igual a la nominal. La intensidad por fase I'_L , la potencia total por fase P' y la tensión por fase E' se miden en dichas condiciones.

La intensidad medida I'_L se multiplica por la relación que hay entre el voltaje nominal E (al neutro) y la reducida E' del motor, lo que da $I_L = OQ$, que es la intensidad por fase que correspondería si se aplicara la tensión nominal de la línea E con el rotor en corto circuito. La corriente tiene un retraso de fase ϕ con relación a E, siendo

$$FP_L = \cos \phi_L = \frac{P}{I_L E}$$

por ejemplo:

$$E = 120 \text{ v e}; \quad I \text{ nominal} = 13 \text{ Amp} \quad E' = 40 \text{ volts}$$

entonces:

$$I_L = \frac{I'_L}{\frac{E'}{E}} = 3I'_L \quad P = E \times I_L = \frac{E' \times I'_L}{\left(\frac{E'}{E}\right)^2} = 9E' I'_L$$

Se traza OL perpendicular a OE y a su derecha se traza $I_L = OQ$, formando un ángulo ϕ_L con OE, con lo que se determinan los puntos P y Q del círculo.

Se trazan PQ y PM paralela a OL. No es necesario conocer el punto M para construir el diagrama.

G- 612486

Formando PM como diámetro se traza una semicircunferencia que pase por los puntos P y Q. El centro N de la circunferencia se encuentra trabajando en el punto medio de PQ una perpendicular cuya intersección con PM da dicho centro. Con centro en N y radio NP se traza la circunferencia PIQM. PM es su diámetro y su longitud a escala da en amperes el valor de $\frac{E}{X_s + X_r}$ PM siendo E el voltaje por la fase nominal y X_s y X_r las reactancias del estator y del rotor por fase.

Desde Q se baja luego una perpendicular QC a OL. La recta QD se divide entonces en dos segmentos tales que $\frac{QF}{FD} = \frac{I_2 R_r}{I_1 R_s}$ es decir en la relación de las resistencias del secundario y del primario: luego se traza la recta PF.

Para el motor de jaula de ardilla, la distancia total QD se determina con el rotor bloqueado y FD se hace igual a $I_L^2 R_1$ siendo R_1 la resistencia efectiva del estator. El punto F queda así determinado.

Para cualquier corriente de carga de intensidad I, la del secundario es $\overline{DI} = I_2$ y vectorialmente es igual a $I - I_0 = I_2$. IG es la componente real de la I y la potencia total absorbida por fase es

$$P = GI \times E \text{ (por fase)}$$

Las pérdidas en el núcleo y por fricción son:

$$P_e = GH \times E \text{ (por fase)}$$

Construcción del diagrama circular

Para construir el diagrama es necesario hacer las siguientes medi



ciones:

1. Motor girando en vacío

E voltaje normal por fase

I₀ intensidad de la corriente en una fase (corriente de exc.)

W₀ potencia en watts por fase

Se calcula el factor de potencia

2. Motor con rotor bloqueado (haciendo la prueba con voltaje reducido)

E_r voltaje en la línea

I_r intensidad de la corriente en una fase

W_r potencia en watts por fase. De estos datos obtenidos con voltaje reducido hay que calcular los valores reales, en el concepto de que I, es proporcional a E, y de que P es proporcional a E². Calcular también el factor de potencia.

3. La resistencia R₁ de una fase del primario se mide y las pérdidas R₁ I² por fase se calculan.

Escalas

El voltaje en un valor fijo.

La escala de la intensidad de la corriente es arbitraria.

La potencia en watts es la de la corriente multiplicada por el voltaje.

La de los caballos de potencia es igual a la escala de los watts dividida entre 746.

El deslizamiento es una relación de la longitud de dos líneas y no una escala.

Valores por fase

E = F E M aplicada a una fase del motor

I_0 = corriente de excitación o corriente del motor sin carga

I_1 = corriente con el rotor bloqueado (calculada)

I = corriente nominal de placa

R_1 = resistencia de una fase del primario

$I \times E$ = volt amperes o potencia aparente por fase

OA = componente activa de la corriente que multiplicada por E da las pérdidas mecánicas de histerésis y corrientes parásitas.

Las pérdidas RI^2 del motor en vacío son muy pequeñas

OB = componente reactiva de la corriente que multiplicada por E da la potencia reactiva.

$CI \times E$ = pérdidas totales por fase incluyendo RI_1^2 con el primario y secundario cuando el rotor está bloqueado

$DF \times E = R_1 I_1^2$ en el primario con el rotor bloqueado

$CD \times E$ = pérdidas por histerésis y corrientes parásitas

GI = componente activa de la corriente

$GI \times E$ = potencia real por fase

$GH \times E$ = pérdidas por fase, mecánicas, de histerésis y corrientes parásitas

$HJ \times E = R_1 I^2$ en el primario o estator, por fase

$JK \times E = R_2 I^2$ en el secundario o rotor, por fase

$KI \times E$ = potencia mecánica que produce el motor por fase

$\frac{KI}{JI} \times n = n^1$ o velocidad del rotor (n = velocidad de sincronismo)

$\frac{JK}{JI} \times 100$ = deslizamiento en el rotor en por ciento

$\frac{KI}{GI} \times 100$ = eficiencia del motor en por ciento

$\frac{GI}{OI}$ = factor de potencia del motor o $\cos \phi$

$\frac{KI \times E}{746 \times 2 \pi n}$ = par motor por fase en HP

cuando el rotor está bloqueado

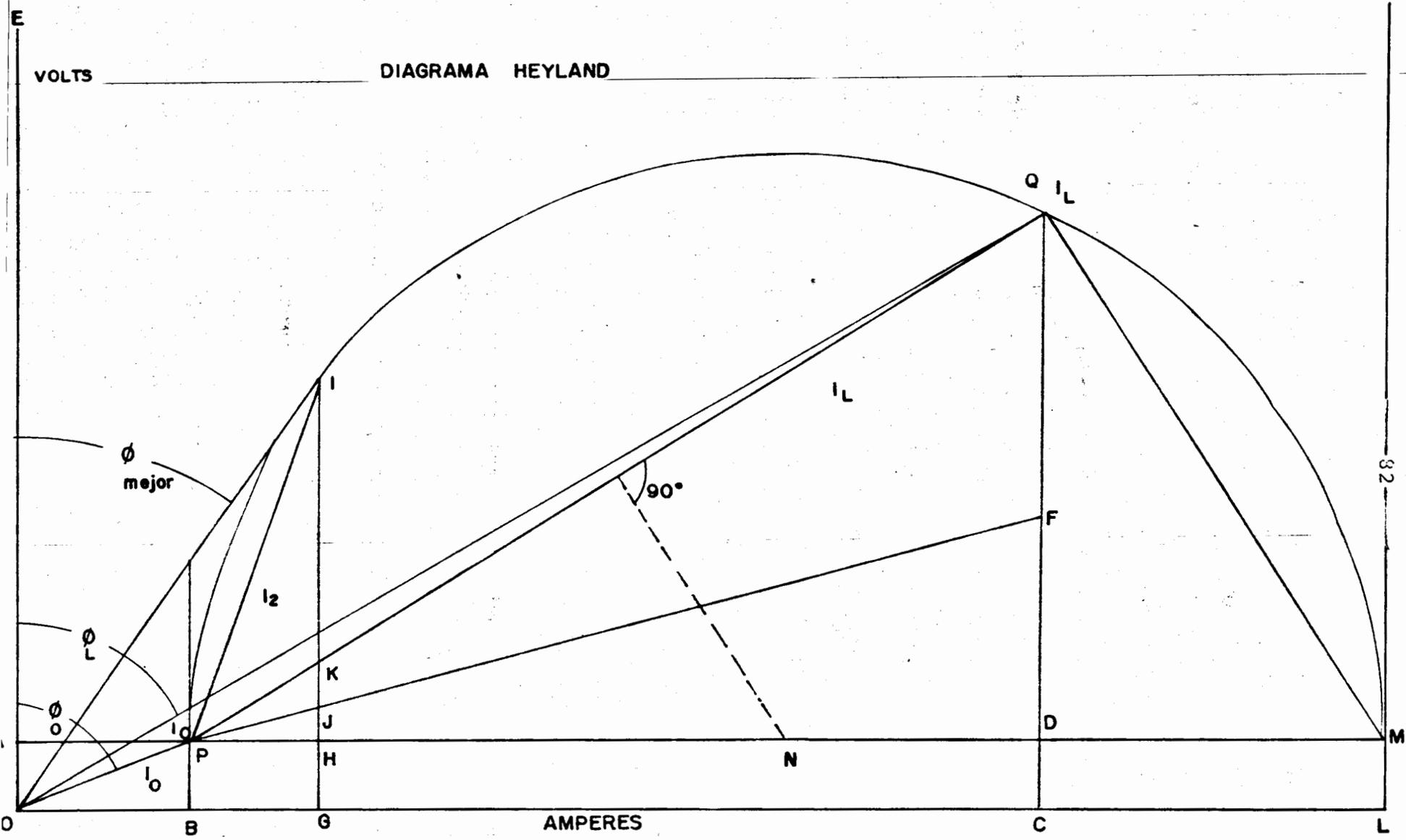


FIG. 38

Las pérdidas del cobre en el estator son $OI_1^2 \times R_1$

R_1 = resistencia Ohmica por fase en el estator

$I_L D \times E$ = Pérdidas totales en el cobre

$(I_L D \times E) - (OI_1^2 \times R_1) = I_L F \times E$ = pérdidas del cobre en el rotor

$$\text{Diámetro del círculo} = \frac{E}{X_s + X_r}$$

voltaje por fase en el estator dividido por la reactancia total.

2.3 Obtención de las curvas par-velocidad

En la práctica número 2.2 se obtuvieron las curvas características del motor en lo que sería su rango normal de operación. La obtención de estas curvas se efectuó por el método de análisis.

En esta práctica se obtendrá la curva par-velocidad, pero por el método de carga real, y en toda la gama de velocidades que puede dar el motor, o sea, desde la condición de rotor libre hasta la de rotor bloqueado. Gran parte de esta curva se obtendrá sobrecargando el motor.

El método de carga real consiste en acoplar el motor a un electro-dinamómetro el cual permite aumentar la carga aplicada medir el par correspondiente, mientras el motor se alimenta a voltaje y frecuencia nominales. La velocidad se mide con un tacómetro.

La forma de la curva presenta algunas variantes según el tipo de rotor con que esté equipado el motor. En la Fig. 39 se pueden apreciar las características de los diferentes diseños.

En las gráficas se tienen puntos de particular importancia, como son:

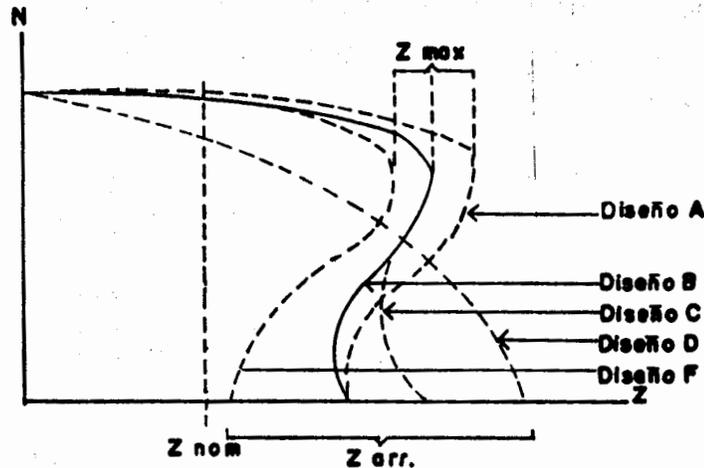


Fig. 39 Curvas típicas par-velocidad

Valores nominales. Es el punto correspondiente a la velocidad de placa - debe ser el par y la potencia nominales- la corriente debe ser también la nominal.

Par máximo. Corresponde al vértice de la curva. El diseño A es el que tiene valor más grande y le siguen en orden ascendente, los diseños B, C y F. El diseño D no presenta esta característica.

Par de arranque. Corresponde al punto donde cruzan al eje de las abscisas. El más grande corresponde al diseño D, y le siguen en orden descendente, los diseños C, A, B y F.

Los valores a que deben sujetarse los pares máximos y de arranque, se especifican como un porcentaje del par nominal (mayor del 100 %) y varían de acuerdo con la capacidad de la máquina. Al final de esta práctica se presentan las tablas de valores que recomienda la Norma Oficial Mexicana.

Objetivos

Con el motor acoplado a un electrodinamómetro, se trabajará a distintos regímenes de carga y sobrecarga, tomando lecturas escalonadas de velocidad, par y corriente, a fin de obtener datos para trazar la curva y compararla con la curva de diseño.

Procedimientos

La preparación de equipo para esta prueba es la que requiere más tiempo, ya que acoplar el motor al electrodinamómetro implica maniobras y precauciones muy rigurosas.

Si la velocidad del motor en prueba es igual o menor que la velocidad del electrodinamómetro, se puede hacer un acoplamiento directo (es el tipo de transmisión que tiene menos pérdidas).

Si la velocidad del motor es superior a la velocidad del electrodinamómetro, debe hacerse un acoplamiento por banda.

En el caso de acoplamiento por bandas, es importante tener en cuenta que se transmite una potencia mecánica, de modo que el par aumenta en la proporción que disminuye la velocidad. Por tanto, el par leído en el electrodinamómetro no es el par en el motor. Si se requiere una prueba muy rigorista habrá que tener en cuenta la eficiencia y el deslizamiento de las bandas; en caso contrario, se pueden despreciar.

Acoplado adecuadamente el motor al dinamómetro, se procede a seleccionar los instrumentos de prueba que son:

.Frecuencímetro

.Amperímetro

.Voltímetro

- .Tacómetro
- .Banco de resistencia variable para carga del electrodinamómetro
- .Regulador de voltaje

Estos instrumentos se conectan de acuerdo con el diagrama que se muestra en la Fig. 40.

Antes de proceder a la prueba, es necesario calcular el par nominal y el par máximo que se espera, de acuerdo con la potencia y velocidad de placa y las tablas anexas.

Se aplica carga al motor, por medio de los controles del electrodinamómetro en incrementos no mayores del 25% del par nominal, tomando en cada régimen las lecturas de velocidad, fuerza y corriente. Es necesario, verificar que el voltaje de alimentación esté en su valor nominal, o corregirlo por medio del regulador en caso necesario.

Las lecturas más importantes son cuando la velocidad tenga el valor marcado en la placa. En estas condiciones se determina la potencia y la corriente a plena carga.

A partir de este momento, la prueba continua en condiciones de sobrecarga, por lo que no hay que prolongar el tiempo más de lo necesario.

Al 90% del par máximo estimado, se debe incrementar el número de lecturas. Mientras se obtengan velocidades pares y corrientes que se estabilizan en un valor, todavía se estará en la región estable de la curva.

Al momento que se alcanza el par máximo la velocidad comienza a decrecer y la corriente se incrementa, hasta acercarse a las condiciones de rotor bloqueado.

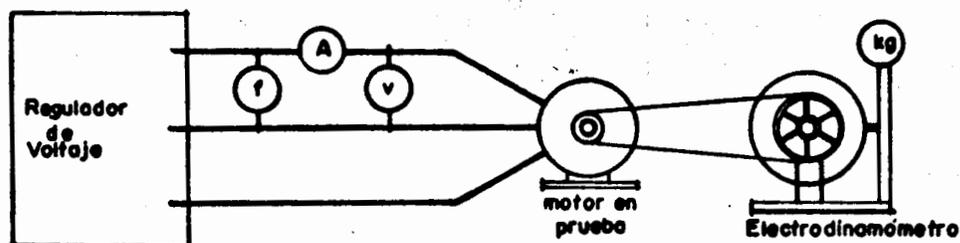


Fig. 40 Diagrama de conexiones y acoplamiento por banda para la prueba de Par-Velocidad.

Las últimas lecturas, que se puedan obtener, se considerarán como la correspondiente al par máximo, con lo que se puede construir la región estable de la curva. Y que se observa con línea continua en la Fig. 39. La línea punteada corresponde a una región inestable, practicamente imposible de obtener en la prueba.

La región es inestable, porque a un cierto par comprendido en este intervalo, corresponden dos velocidades del rotor, habiendo siempre la tendencia a tomar la velocidad más alta.

Sin embargo, la curva termina en un punto perfectamente definido, que es el par de arranque -a velocidad cero-, que se determina con el rotor bloqueado, exactamente como se describe en la prueba 3.1. Si se ha hecho la prueba de rotor bloqueado, no es necesario repetirla puesto que se pueden hacer uso de los resultados ya obtenidos.

Por último, partiendo de velocidad cero y permitiendo que ésta comience a aumentar, se puede determinar otra región pequeña de estabilidad, determinando un par mínimo posterior al arranque. Esto se consigue con el dinamómetro frenando al valor del par de arranque, y comenzando a disminuirlo en el momento que la velocidad aumenta bruscamente hasta la región superior de la curva, corresponde a este par.

Calentamiento de la máquina

Las pruebas deben efectuarse a la temperatura normal de operación de las máquinas.

Iniciar la prueba con la máquina precalentada permitirá una respuesta fiel de las condiciones de carga hasta los valores nominales, pero cuando se esta en regímenes de sobrecarga, las corrientes se elevan considerablemente por encima del valor de diseño, lo que provoca que la temperatura continúe en aumento, con el peligro de quemar rápidamente los aislamientos.

- 1) Determinación del par de arranque (si es que no se ha hecho antes la prueba del rotor bloqueado)
- 2) Determinación del par mínimo inmediato al arranque
- 3) Determinación del par máximo
- 4) Determinación de la región estable de la curva.

En caso de sobrecalentamiento, se debe ventilar la máquina, dejándola girar en vacío durante minutos, antes de continuar la siguiente

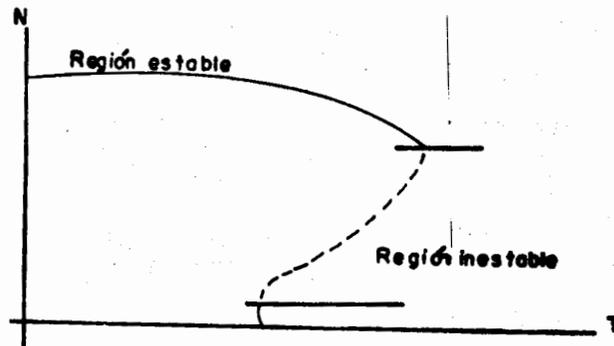


Fig. 41 Regiones de estabilidad e inestabilidad del motor

etapa de prueba.

Otro recurso, es aplicar voltaje reducido, y posteriormente extrapolar los resultados, siguiendo los mismos criterios planteados en la prueba número 3.1

Nota. En el caso en el que se tiene un motor sometido constantemente a pruebas, es importante recurrir siempre al voltaje reducido, procurando no exceder el 200% de la corriente nominal, y tomar las lecturas rápidamente, para conservar el equipo en buen estado.

Desarrollo de la prueba

Se ha comentado que existen ciertas recomendaciones para obtener ordenadamente los puntos de la curva, lo más conveniente en la práctica es comenzar por las condiciones más severas de prueba, a fin de controlar el sobrecalentamiento del motor.

De acuerdo con los procedimientos para controlar la temperatura, se debe comenzar por investigar el par y la corriente de arranque con rotor bloqueado, que se hizo en la prueba número 3.1. Si se le ha efectuado esta prueba al motor, no es necesario repetirla, simplemente anote el par y la corriente extrapolados a voltaje nominal en la Tabla 20.

Para la Tabla 18, extrapole solamente a voltaje nominal y transfiera los resultados de la tabla 20 de la prueba actual.

Al terminar el acoplamiento es conveniente seleccionar los instrumentos necesarios y conectarlos según la Fig. 40, arrancar el motor y darle carga por medio de los controles del dinamómetro, mientras se observa que no vibre.

En el caso de acoplamiento por banda, al llegar aproximadamente a la carga nominal, mida las velocidades del motor y del dinamómetro, anótelas a continuación y calcule la relación de transmisión.

Velocidad del motor	N_m _____
Velocidad del dinamómetro	N_D _____
Relación de transmisión	$R_T = \frac{N_m}{N_D}$ _____

Pare el motor, y siga ahora las instrucciones para el desarrollo de la prueba.

- Calcule previamente los valores de par, que supuestamente deben resultar en la prueba.

$$\text{Par nominal } T_{\text{nom}} = 746 \frac{\text{HP}}{N}$$

en donde HP es la potencia del motor y N su velocidad, ambos de los datos de placa.

Con el valor calculado de par nominal, y el tipo de diseño del motor, que también es dato de placa, busque en las tablas anexas los porcentajes normalizados de par máximo, y par de arranque. Calcule sus valores en Kg-m y anótelos:

Par nominal $T_{nom} =$ _____ Kg-m
Par máximo $T_{m\acute{a}x} =$ _____ Kg-m
Par de arranque $T_a =$ _____ Kg-m

Operar el motor a voltaje reducido, aproximadamente al valor que correspondió en la prueba de rotor bloqueado al 200% de la corriente nominal. Anote el valor de par de arranque obtenido a rotor bloqueado, con ese mismo voltaje reducido, y divídalo entre la longitud del brazo de palanca del dinamómetro, para obtener la lectura de la báscula en la siguiente prueba.

Par arranque a voltaje reducido $T'_a =$ _____ Kg-m
Lectura supuesta $F'_a =$ _____ Kg

Calcule el par máximo interpolado al mismo voltaje reducido, a partir del par máximo supuesto que anotó arriba y divídalo entre la longitud del brazo de palanca.

Par máximo interpolado $T'_{max} =$ _____ Kg-m
Lectura supuesta $F'_{max} =$ _____ Kg

Determinación del par mínimo inmediato al arranque

- . Coloque los controles del dinamómetro en posición de máxima carga.

Antes de arrancar el motor, organícese con sus compañeros, para que cada quien se haga cargo de un instrumento y se puedan tomar las lecturas lo más rápido posible.

- . Aplique al motor un valor de voltaje reducido, lo más aproximado

al de la prueba de rotor bloqueado para el 200% de la corriente nominal. Disminuya carga al dinamómetro hasta que la lectura de la báscula sea menor que la $F'a$. Si hay estabilidad en la corriente y la velocidad del motor, tome las lecturas y anótelas en la Tabla 19, midiendo las velocidades en el eje del motor.

Continúe disminuyendo lentamente la carga, y tomando lecturas mientras haya estabilidad. Cuando la velocidad aumente bruscamente, quite toda la carga del dinamómetro y déjelo girando en vacío para que su propia ventilación lo enfríe. Durante el enfriamiento se puede subir el voltaje al valor nominal.

Si el motor no responde a esta prueba, es posible que no tenga par mínimo, y el par característico será creciente desde el arranque hasta su valor máximo.

Determinación del par máximo.

Aquí también es importante tomar las lecturas con rapidez.

- . Con el dinamómetro sin carga, aplique nuevamente el mismo valor de voltaje reducido al motor. Comience a dar carga, aumentando lentamente hasta obtener en la báscula una lectura aproximada del 75% de la F'_{max} que calculó. A partir de este punto, comience a tomar sus lecturas, y anótelas en la Tabla 19. El incremento de carga entre una serie y la siguiente debe ser cada vez menor, conforme se acerca a la lectura máxima supuesta. La estabilidad termina cuando la velocidad comienza a bajar, y la corriente a subir, hasta cerca de las condiciones de rotor bloqueado.

Cuando ésto haya alcanzado, quite toda la carga al dinamómetro, y deje enfriar el motor.

Determinación de la parte superior de la curva

- . Con el dinamómetro sin carga, ajuste el voltaje aplicado al motor a su valor nominal y manténgalo así durante el resto de la prueba.
- . Comience a aumentar la carga, tomando lecturas aproximadamente al 25, 50, 75, 100 y 125% de la fuerza correspondiente al par nominal. Tome lecturas cuando la velocidad del motor sea igual a la marcada en su placa -idealmente, estas lecturas, deberán coincidir con el 100% de par nominal-. Anote los valores en la Tabla 19 y al terminar, desenergice el motor y déjelo enfriar en reposo.
- . Con los resultados de la Tabla 19, calcule las coordenadas de la Tabla 20, que deben corresponder a voltaje nominal.

Las velocidades se transfieren a la Tabla 20 sin modificación.

Los pares se calculan multiplicando las fuerzas leídas por la longitud del brazo de palanca del dinamómetro.

$$T = F \times r$$

Si el acoplamiento se hizo por banda, es necesario dividir el par del dinamómetro entre la relación de transmisión, para obtener el par del motor.

$$T_m = \frac{F \times r}{R_t}$$

Las corrientes y los pares calculados, correspondientes a los renglones en los que aparece el voltaje nominal, se anotan en la Tabla 20 sin modificación. En los demás casos, es necesario extrapolar a voltaje nominal.

do que presente continuidad con los trazos obtenidos.

Resultados

Para comparar los puntos importantes de la curva obtenida con valores supuestos, establecidos por norma, transfiera los resultados de la Tabla 20 y los cálculos previos, a la Tabla 21.

Tabla 21 Comparación de los resultados supuestos con los realmente obtenidos

	Valor normalizado	Valor de prueba
Par máximo		
Par de arranque		
Corriente de arranque		

Cálculo de la potencia útil y la corriente normal de carga plena.

La potencia útil se calcula mediante la fórmula

$$P_u = \frac{T \times N}{726}$$

en donde T y N son el par y la velocidad de la Tabla 20 que corresponden al renglón de velocidad de placa.

La corriente se obtiene directamente de ese mismo renglón

Potencia útil = _____

Corriente normal = _____

Conclusiones: _____

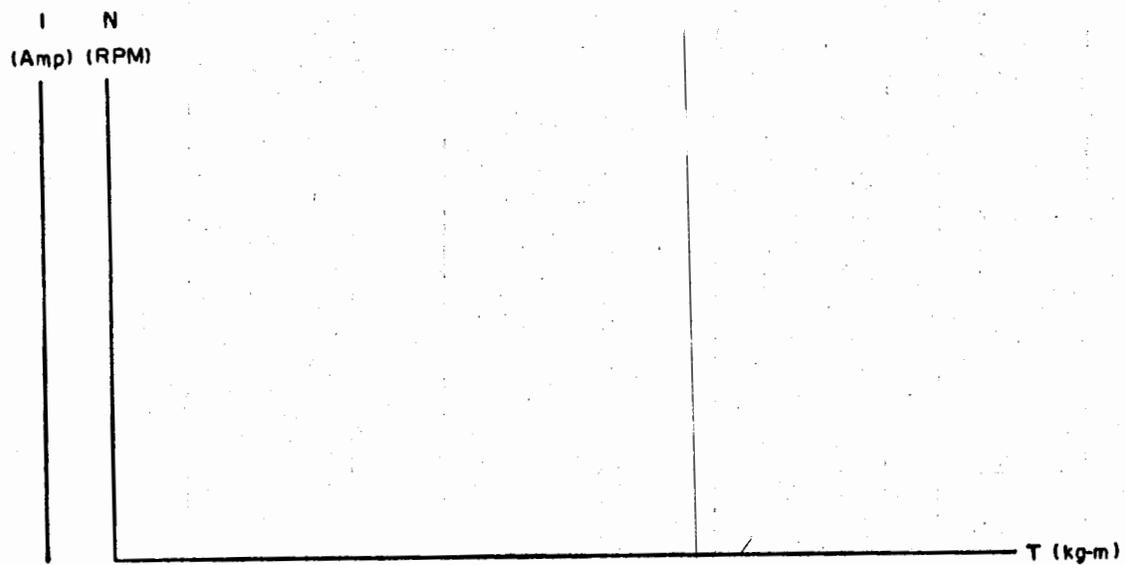


Fig. 42. Curvas par-velocidad y par-corriente del motor

Tabla A Norma sobre motores de inducción
 Valores mínimos de par de arranque para motores tri-
 fásicos: diseños "A" y "B" 50/60 Hz en porcentaje de
 par normal a carga plena.

C.P.	Velocidades síncronas en RPM con 50 o 60 Hz			
	3000 3600	1500 1800	1000 1200	750 900
1/4	190	190	190	170
1/3	190	190	190	170
1/2	190	190	190	140
3/4	180	190	175	135
1	180	190	170	135
1/2	175	190	165	130
2	170	190	160	130
3	160	190	155	130
5	150	185	150	130
7-1/2	140	170	150	125
10	135	165	150	125
15	130	160	140	125
20	130	150	135	125
25	130	150	135	125
30	130	150	135	125
40	125	140	135	125
50	120	140	135	125
60	120	140	135	125
75	105	140	135	125
100	105	125	125	125
125	100	110	125	120
150	100	110	120	120
200	100	100	120	120
250	70	80	100	100
300	70	80		

Motor Diseño "A". Motor trifásico que soporta la tensión nominal durante el arranque y desarrolla un par de arranque, y un par máximo según inciso 2.2.1.10, con una corriente de arranque que excede los valores de la Tabla D, y teniendo un deslizamiento a carga plena igual o menor al 5 por ciento.

Al respecto, el inciso 2.2.1.10 dice:

Par Máximo para Motores Trifásicos a Régimen Continuo diseño "A" 50/60 Hz. El par máximo para motores trifásicos diseño "A" a tensión y frecuencia nominales, debe ser igual o mayor al 110% de los valores obtenidos en la Tabla C para el diseño "B"

Tabla B Valores mínimos de par de arranque, para motores trifásicos diseño "C", 50/60 hertz, en porcentaje del par normal a carga plena.

C.P.	Velocidades síncronas en RPM 50/60 Hz.		
	1500 1800	1000 1200	750 900
3		250	225
5	250	250	225
7-1/2	250	225	200
10	250	225	200
15	225	200	200
20	200	200	200
25 y Mayores	200	200	200

Motor Diseño "B". Motor trifásico que soporta la tensión nominal durante el arranque especificado en la Tabla A, y un par máximo según la Tabla C, con una corriente de arranque normal que no exceda los valores de la Tabla D, teniendo un deslizamiento a car-

ga plena igual o menor al 5 por ciento.

Motor Diseño "C". Motor trifásico que soporta la tensión nominal durante el arranque y desarrolla un par de arranque especial para aplicaciones de alto par de arranque, según los valores de la Tabla B, su corriente de arranque no debe exceder los valores normales mostrados en la Tabla D, así como su par máximo normal, debe ser según los valores de la Tabla C, con un deslizamiento a carga plena igual o menor al 5 por ciento.

Motor Diseño "D". Motor trifásico que soporta la tensión nominal durante el arranque y desarrolla un alto par de arranque no menor de 275 por ciento del par de carga plena con una corriente normal de arranque que no exceda los valores de la Tabla D, y con un alto deslizamiento a carga plena mayor al 5 por ciento.

Motor Diseño "F". Motor trifásico que soporta y desarrolla un bajo par de arranque no menor de 125 por ciento del par a carga plena con un par máximo según la Tabla C y con una corriente normal de arranque que no exceda los valores de la Tabla D, con un deslizamiento carga plena igual o menor al 5 por ciento.

Las características de par de arranque, par máximo y deslizamiento a carga plena, a los que se refieren las definiciones anteriores, se pueden apreciar en forma comparativa en las Curvas Par-Velocidad de la Fig. 39.

Para los valores específicos de par de arranque, par máximo y corriente de arranque característicos de las diferentes potencias de motores, se transcriben las Tablas A, C y D de la norma.

Métodos de Prueba

La norma describe las siguientes pruebas y sólo se mencionará en

Tabla C Valores mínimos de par máximo, para motores trifásicos diseño "B" y "C" 50/60 Hz, en porcentaje del par normal a carga plena.

C.P.	Velocidades síncronas en RPM con 50/60 Hz			
	3000 3600	1500 1800	1000 1200	750 900
1/4	250	220	220	175
1/3	250	220	220	175
1/2	250	220	220	195
3/4	240	220	200	195
1	240	220	200	185
1-1/2	250	220	200	185
2	230	220	200	185
3	200	220	195	185
5	195	220	195	170
7-1/2	180	195	185	160
10	175	195	185	160
15	180	180	180	160
20	180	170	170	170
25	180	170	170	170
30	180	170	170	170
40	170	170	170	170
50	170	170	170	170
60	170	170	170	170
75	160	160	160	160
100	160	160	160	160
125	160	160	160	160
150	160	160	160	160
200	160	160	160	160
250	160	160	160	160
300	160	160	160	160

Notas:

- a) Para diseño "C" las potencias y velocidades deben ser de acuerdo con lo especificado en la Tabla B.
- b) Para diseño "F" los valores del par máximo deben ser aproximadamente del 70% de los valores especificados en esta Tabla.

qué parte del libro se tratan en detalle.

- . Determinación de la potencia útil y corriente normal a plena carga. Esta contenida en la prueba número 2.3 y es el punto de la curva correspondiente a la velocidad de placa.
- . Determinación de par y corriente de arranque. Está en la prueba número 2.1 y es el par y la corriente correspondiente al voltaje nominal.
- . Determinación del par máximo. Está en la prueba número 2.3 y es el par correspondiente a la última velocidad estable.
- . Prueba de alta tensión.
- . Determinación del incremento de temperatura.

Tabla D Valores máximos de la corriente de arranque en amperes, a 220 volts 50 y 60 Hz.

C.P.	50 Hz	60 Hz	Diseño		
1/4	16	14	B	D	
1/3	18	16	B	D	
1/2	23	20	B	D	
3/4	28	25	B	D	
1	34	30	B	D	
1 1/2	46	40	B	D	
2	58	50	B	D	
3	74	64	B	C	D
5	105	92	B	C	D
7 1/2	146	127	B	C	D
10	186	162	B	C	D
15	255	232	B	C	D
20	335	290	B	C	D
25	420	365	B	C	D
30	500	435	B	C	D
40	670	580	B	C	D
50	835	725	B	C	D
60	1000	870	B	C	D
75	1250	1085	B	C	D
100	1670	1450	B	C	D
125	2090	1815	B	C	D
150	2495	2170	B	C	D
200	3335	2900	B	C	
250	4190	3650	B		
300	5060	4400	B		

Notas:

- a) Para diseño "A" los valores máximos de la corriente de arranque, deben ser mayores a los estipulados en esta tabla

- b) Para diseño "F" los valores máximos de la corriente de arranque no deben ser mayores del 62% de los valores estipulados en esta tabla.

Por último, expone un método para medir la vibración de un motor, importante para conservar los cojinetes y elementos de equipo cercanos a la instalación de la máquina. Este método no se estudia en esta obra, así como la corrección de vibraciones que sería tema de un estudio mecánico sobre balanceo dinámico.

2.4 Otras aplicaciones del motor de inducción

Generador asíncrono

Las máquinas eléctricas rotatorias se caracterizan por su reversibilidad de operación, o sea, pueden trabajar como motores o como generadores sin necesidad de cambios en su estructura o en sus conexiones.

El motor de inducción no es una excepción entre estas máquinas, por lo tanto, puede hacersele trabajar como generador, con ciertas limitaciones, la máquina de inducción solamente puede generar acoplada a un sistema, contribuyendo a la generación de otras máquinas. En estas condiciones se dice que opera como generador de inducción o generador asíncrono.

La energía mecánica es aplicada mediante un par externo, la que acelera al rotor hasta una velocidad poco superior a la síncrona.

En la Fig.43a se observa el campo de estator girando a velocidad síncrona, debido a que el embobinado del estator esta conectado a un sistema que suministra una frecuencia determinada.

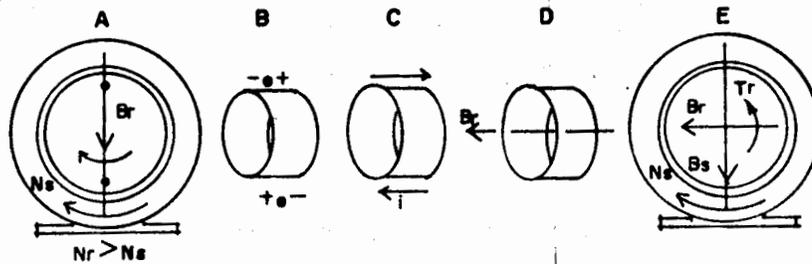


Fig. 43 Operación del generador síncrono

Dos barras del rotor se encuentran cruzando la línea de flujo a una velocidad mayor que la de sincronismo.

Teniendo en cuenta el desplazamiento relativo entre las barras y el campo para la aplicación de las reglas de Flemming, se obtienen las fuerzas electromotrices inducidas cuya polaridad se muestra en la Fig. 43b.

En las Figs., 43c y d se indican las corrientes en la jaula y el campo de rotor, respectivamente.

En la Fig. 43e se indica ahora la posición relativa entre los campos del estator y del rotor.

El par generador por interacción de los dos campos magnéticos es en sentido contrario al giro, tendiendo a bajar la velocidad a la de sincronismo.

Se puede observar que en ambas figuras los campos de rotor y el par que generan están en sentido opuesto, lo mismo que las fuer-

zas electromotrices (o contraelectromotrices) que el campo de rotor induce sobre el embobinado de estator.

Decimos que una velocidad de rotor superior a la síncrona significa un deslizamiento negativo;

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

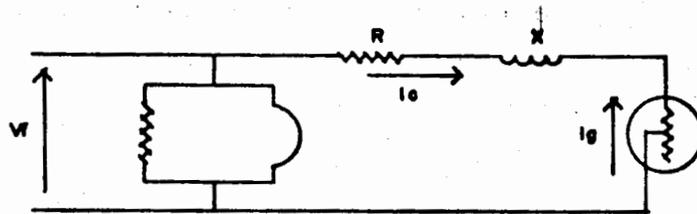


Fig. 44 Circuito equivalente del generador de inducción.

Por lo anterior tenemos que; la resistencia de carga:

$$R_c = a^2 r_r \frac{1-s}{s}$$

se vuelve también negativa

El producto de la resistencia por la corriente de carga $-R_c I_c$ se interpreta que, en vez de haber una caída de potencial hay una

elevación en ese elemento que provoca la inversión de la corriente de carga.

El elemento que se ha llamado "resistencia de carga", se convierte en una "fuente de energía".

Si incluimos la resistencia de carga con signo negativo en el análisis del circuito, se obtiene una corriente de fase con signo negativo;

$$I_f = | - I | \angle \theta$$

Esto quiere decir que la corriente en estas condiciones aparece en sentido contrario al convenido en el planteamiento original del circuito, es decir, de derecha a izquierda, y la máquina devuelve energía a la fuente.

En el análisis gráfico de la Fig. 45, la corriente está dibujada hacia abajo, un ángulo de fase respecto al voltaje, mayor de 90 grados.

Transportando los fasores voltajes y corriente a la Fig. 46 y teniendo en cuenta que la corriente es negativa, se ve que el ángulo de fase es en realidad menor de 90 grados y la corriente está en adelante respecto al voltaje.

Por lo que el generador de inducción siempre trabaja a factor de potencia adelantado.

En resumen, trabajando la máquina de inducción a deslizamiento negativo, eléctricamente se comporta como un generador siempre a factor de potencia adelantado y mecánicamente como un freno.

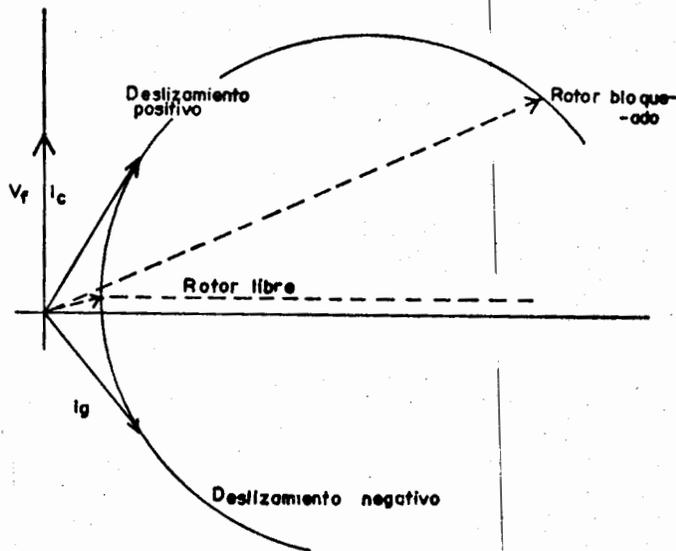


Fig. 45 Diagrama circular del generador de inducción.

No es usual utilizar la máquina de inducción como generador pero cuando se presenta el caso, lo más frecuente es por aprovechar su comportamiento mecánico. Por ejemplo, un elevador operado por motor de inducción, en movimiento ascendente trabaja como motor y en movimiento descendente trabaja como freno para evitar un desplazamiento acelerado.

En el laboratorio se puede realizar una práctica para observar la operación alternativa de la máquina de inducción.

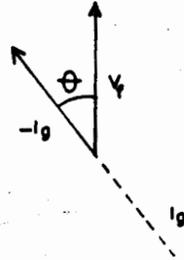


Fig. 46 Adelanto de la corriente

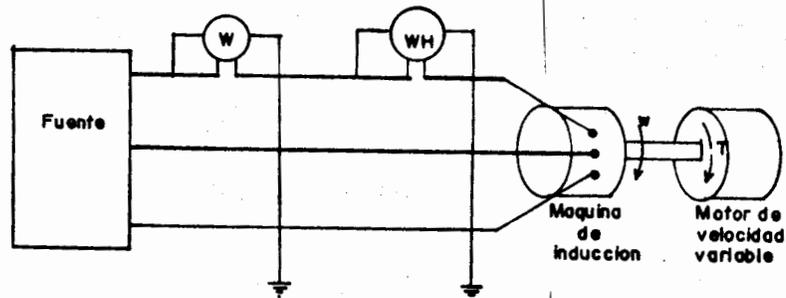


Fig. 47 Diagrama de conexiones para observar el cambio de motor a generador.

Consiste en acoplar la máquina a un motor de velocidad variable, cuyo valor se puede controlar por abajo y por arriba de la velocidad síncrona.

Se conecta al sistema de energía eléctrica incluyendo un wattímetro y/o un wathhorímetro, que son instrumentos polarizados y que marcan desplazamiento positivo o negativo según el sentido de flujo de energía.

Verificando el sentido de giro energizando por separado cada máquina, se ponen a operar simultáneamente.

Cuando se ajusta la velocidad a un valor inferior a la síncrona, la máquina de inducción trabaja como motor, y los instrumentos marcan una lectura positiva.

Aumentando la velocidad a un valor superior a la síncrona, se invierte el trabajo de motor a generador. El wattímetro tiende a marcar, por debajo del cero (lectura negativa) el wathhorímetro gira en reversa, lo que indica inversión del flujo de energía.

Algunos wathhorímetros tienen seguro para no girar en reversa. En este caso simplemente no se observa movimiento.

Comparando el generador de inducción con el generador síncrono, se encuentra que tienen ventajas y desventajas.

Las ventajas son:

- . No tiene velocidad síncrona, por tanto no se puede salir de sincronismo.
- . Genera a la misma frecuencia del sistema, independientemente de sus variaciones de velocidad.

- . Un corto circuito en el sistema no causa daño al generador.

Las desventajas son:

- . No puede generar aisladamente, debido a que siempre requiere de la frecuencia de un sistema.
- . No tiene control del factor de potencia, y éste siempre será en adelanto.

Regulador de voltaje

Un motor de inducción del tipo de rotor devanado se puede adaptar para operar como regulador de voltaje, y se le conoce como regulador de inducción.

Cuando el rotor de una máquina de este tipo se mantiene estático en determinada posición, al energizar cualquiera de los dos embobinados (de rotor o de estator) induce en el otro, un voltaje proporcional, a la misma frecuencia, operando como un transformador.

Sin embargo, a diferencia de un transformador, el ángulo de fase entre voltaje primario y secundario puede hacerse variar de 0 a 180 grados en adelanto y en atraso, de acuerdo con la posición del rotor.

En cambio, la magnitud del voltaje secundario permanece constante para cualquier posición, debido a que es inducido por un flujo magnético giratorio de magnitud constante.

Para obtener la regulación de voltaje, aprovechando las características descritas de la máquina, se suma el voltaje secundario al primario. Dos fasores de magnitud constante y ángulo de fase variable dan un resultante cuyo valor está comprendido entre la suma y la resta aritmética de sus magnitudes, en función del ángulo entre ellos Fig. 47.

Si la relación de transformación fuera unitaria, el voltaje resultante quedaría regulado entre cero y el doble del voltaje primario.

En la práctica, para adaptar un motor de inducción a que trabaje como regulador, se elige uno de los embobinados cuyo voltaje nominal sea igual al de la línea de alimentación, y se conecta en estrella, operando como devanado primario. Puede ser el del estator o el del rotor.

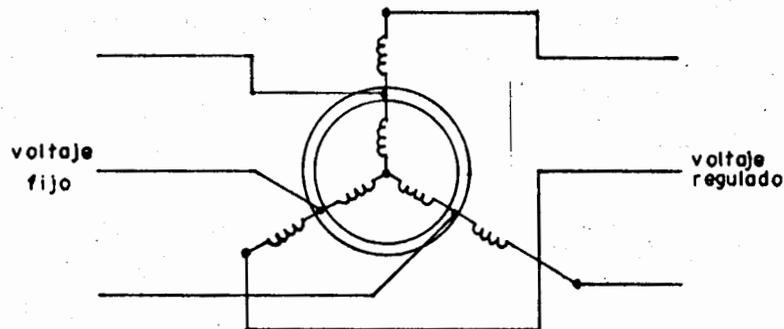


Fig. 48 Diagrama de conexiones del regulador de inducción

El secundario debe tener sus fases independientes, para conectarlas en serie con las respectivas fases de la estrella primaria. El diagrama de conexiones sería semejante al de un autotransformador trifásico, como se puede ver en la Fig. 48.

La posición de los embobinados en esta figura no necesariamente

corresponde a la localización física del rotor y estator de la máquina. La estrella central representa al devanado primario, sea éste el del rotor o el del estator, y las fases exteriores conectadas como una continuación de la estrella representan al devanado secundario.

Sería conveniente adaptar a la flecha de la máquina un mecanismo que permitiera girar solamente 180 grados eléctricos, y dentro de ese desplazamiento, fijarlo en la posición deseada.

En la Fig. 49 se ilustran en forma esquemática, diferentes posiciones entre la bobina primaria y la secundaria de una misma fase, así como sus respectivos voltajes y el voltaje resultante

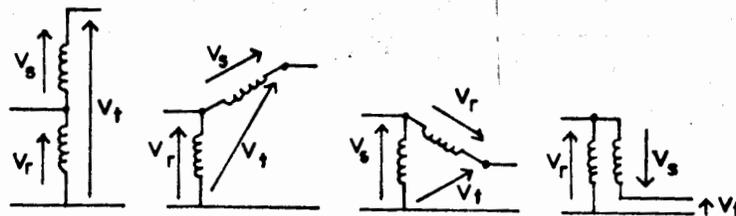


Fig. 49 Comportamiento fasorial del regulador de inducción.

2.5 Arranque de los motores de inducción

Los motores de rotor devanado no presentan gran problema en el arranque. Las terminales del devanado del estator pueden conectarse directamente a la línea con el rotor en circuito abierto, o conectando resistencias relativamente altas a las escobillas de los anillos deslizantes. Es posible, entonces reducir la resistencia del circuito del rotor hasta que el motor arranca, y luego reducirla aún más, hasta alcanzar su velocidad. A la velocidad de operación plena, las escobillas se pondrán juntas en corto (resistencia externa cero en cada fase).

Casi todos los motores de inducción de jaula de ardilla son capaces de arrancar con voltaje completo sin dañarse. Sin embargo, la corriente de arranque es tan alta y el factor de potencia tan bajo, que la alimentación de energía puede afectarse. El voltaje puede bajarse en exceso cuando se conecta el motor a la línea. No obstante, los motores de inducción hasta de varios miles de hp algunas veces se arrancan en línea, es decir, se arrancan simplemente conectándolos a la línea. Los motores del diseño B se desarrollaron en especial para arrancarlos en línea.

Estimación de la corriente de arranque a partir de las letras de clave.

Además de la letra de diseño, las placas de especificaciones de los motores de jaula de ardilla necesitan marcarse con una letra de clave. Hay que tener cuidado de no confundirlas. La letra de clave impone los límites de los kVA de arranque por hp para la máquina. (Tabla 22)

En muchos casos es necesario limitar la corriente de arranque para evitar los voltajes transitorios excesivos, sobre todo para los motores del diseño A, de más de 7.5 hp. Puesto que el par

Tabla 22 Tabla de las letras de clave NEMA

Clave	kVA por hp con rotor bloqueado ^a	Clave	kVA por hp con rotor bloqueado ^a
A	0-3.15	K	8.0-9.0
B	3.15-3.55	L	9.0-10.0
C	3.55-4.0	M	10.0-11.2
D	4.0 -4.5	N	11.2-12.5
E	4.5 -5.0	P	12.5-14.0
F	5.0 -5.6	R	14.0-16.0
G	5.6 -6.3	S	16.0-18.0
H	6.3 -7.1	T	18.0-20.0
J	7.1 -8.0	U	20.0-22.4
		V	22.4 y superiores

El intervalo de kVA por hp con rotor bloqueado incluye el número inferior, pero no incluye el número superior. Por ejemplo, 3.14 es letra A y 3.15 es letra B.

Esta tabla se ha reproducido en forma autorizada por NEMA Publication No. MG 1-1978, Motors and Generators. (Publicación NEMA No. MG 1-1978, Motores y Generadores).

que produce un motor de jaula de ardilla a cualquier velocidad es proporcional al cuadrado de la corriente, el par inicial varia para cualquier modelo que limite la corriente de arranque.

Un resistor o reactor se pone en serie con cada terminal de línea del motor, y luego se saca poniéndoles un puente cuando la máquina se acerca a la velocidad específica. Los resistores cuestan menos que los reactores, pero consumen energía. Otro método es insertar un transformador trifásico de reducción entre la línea y el motor durante el arranque y luego eliminarlo cuando el motor se acerque a la velocidad de operación. Tal transformador de arranque, junto con los necesarios conmutadores y contactores magnéticos y dispositivos de protección, recibe el nombre de "compensador de arranque".

Compensadores de arranque

Un diagrama esquemático de uno de estos dispositivos se ilustra en la Fig. 50. Un compensador de arranque tiene una gran ventaja sobre un conjunto de impedancias en serie. La impedancia de arranque del motor es transformada por el cuadrado de la razón de los números de espiras del compensador, entonces, la corriente de línea en el arranque se reduce por este cuadrado. Sin embargo, la corriente de arranque del motor es proporcional al voltaje en las terminales del motor y, por consiguiente, se reduce por la primera potencia de la razón de los números de espiras. El par se reduce por el cuadrado de esta razón, como la corriente de línea. La reducción en la corriente de línea de arranque se acompaña por una reducción proporcional en el par inicial. Con una impedancia simple en serie, el par se reduce por el cuadrado de la reducción de la corriente de línea.

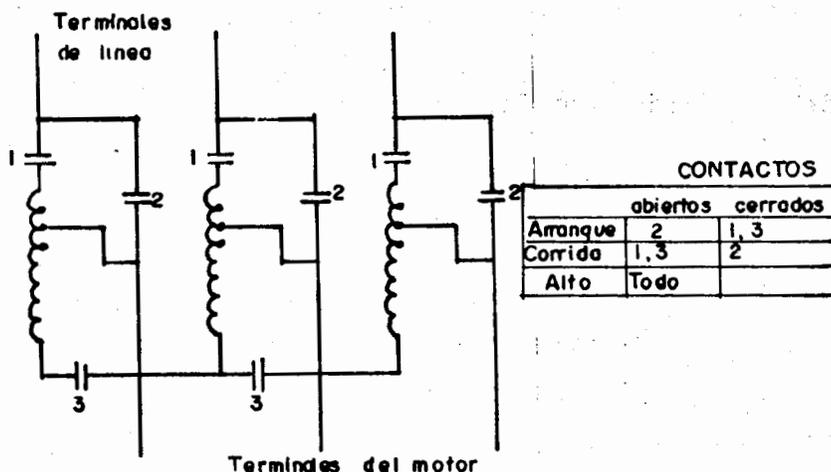


Fig. 50 Compensador de arranque para los motores de inducción o para motores síncronos con devanados amortiguadores.

Otras dos maneras de reducir la corriente de arranque requieren que los devanados del estator se vuelvan a conectar. En el arranque Y delta, el voltaje nominal de la máquina con los devanados de fase en delta del estator debe ser igual al voltaje de alimentación nominal. La máquina se arranca con los devanados conectados en Y. Se les conmuta a la conexión delta cuando la máquina alcanza su velocidad. Para la impedancia de fase en el arranque carece de importancia que las fases se conectan en Y o en delta. En la conexión en Y de arranque, el voltaje en cada fase es $\frac{1}{\sqrt{3}}$ veces su valor normal. El par inicial es un tercio de su valor en la conexión delta y la corriente de línea es también un tercio del que daría si la máquina se arrancase con el voltaje nominal de la conexión delta.

El arranque con devanado parcial requiere un diseño de motor con dos devanados por fase. Un ejemplo sería el de un motor con especificaciones de 230/460 V, en el cual los devanados de cada fase se conectan en paralelo para la operación a 230 V y en serie para 460 V. Para el arranque con devanado parcial debe usarse el voltaje más bajo. Se arranca el motor con un solo conjunto de devanados de fase conectados a la línea. El otro conjunto se conecta en paralelo cuando el motor se acerca a su velocidad específica.

Control de velocidad de los motores de inducción

Los motores de inducción no son buenos para un control de velocidad continuo, sin escalones. Se ha señalado que tienden a sobrecalentarse si se reduce el voltaje. El control de velocidad se obtiene con éxito con los motores de rotor devanado. El motor se desacele^{ra} cuando se inserta más resistencia externa. El deslizamiento aumenta, así como también la pérdida en el cobre del circuito del rotor pero la mayor parte de esta pérdida se da en los resistores de control externos al motor. La eficiencia del sistema es pobre a velocidades reducidas.

Se han hecho muchos esfuerzos para obtener un control de velocidad suave que provee un rotor devanado sin desperdiciar energía en los resistores externos del rotor. Pero estos métodos son ahora en gran parte obsoletos. Requieren convertir la energía, de otro modo perdida, ya sea en energía mecánica que se entrega al eje del motor o en energía eléctrica, con la frecuencia de línea, para regresarla a la línea. Un ejemplo es el sistema Kramer, que rectifica la salida de los anillos deslizantes del rotor y entrega esta energía a un motor cd que se conecta al eje del motor de inducción con rotor devanado. La velocidad se controla regulando la corriente de campo del motor cd. Los motores cd con regulación Ward-Leonard o SCR han reemplazado a los sistema de control de velocidad de los motores de inducción de rotor devanado para la mayoría de las aplicaciones industriales.

La velocidad de un motor de inducción se controla efectivamente cambiando la velocidad síncrona. Puesto que $\omega = 4\pi f_1 / p$, sólo hay dos modos de hacer cambiar la velocidad síncrona.

Método para el cambio de polos

El número de polos de un motor de jaula de ardilla se cambia renectando el devanado del estator. La velocidad cambia escalonadamente. El método no es práctico para los motores de rotor devanado porque los devanados del rotor deberían también volverse a conectar para tener el mismo número de polos que el estator. Un motor de jaula de ardilla automáticamente desarrolla un número de polos magnéticos igual al del campo del entrehierro.

Hay dos métodos para cambiar el número de polos: el método de polos consecuentes y la modulación de amplitud de polos (MAP). El método de polos consecuentes provee generalmente sólo dos velocidades síncronas, una de las cuales es la mitad de la otra. Desde luego es posible instalar dos devanados separados en el estator y

así obtener cuatro velocidades. También, se ha desarrollado un sistema de tres velocidades. El esquema básico se ilustra en la Fig. 51a, que muestra lo que ocurre en una fase típica de un devanado polifásico de dos velocidades. Cada bobina representa un grupo de bobinas. El paso de bobina por lo general se hace bastante corto (por ejemplo, 60°) o bastante largo (por ejemplo 240°) Un paso corto se ilustra figura. Cuando se invierte la corriente que va hacia grupos de polos alternos, según la Fig. 51b, todos los grupos tienen la misma polaridad magnética. El flujo de los grupos de polos debe por consiguiente revertirse en los espacios que hay entre los grupos, induciendo entonces polos magnéticos de polaridad opuesta en la superficie del núcleo del estator en esos espacios. Estos polos inducidos se denominan "polos consecuentes". La máquina tiene entonces el doble de polos que antes y la velocidad síncrona es la mitad de lo que era anteriormente.

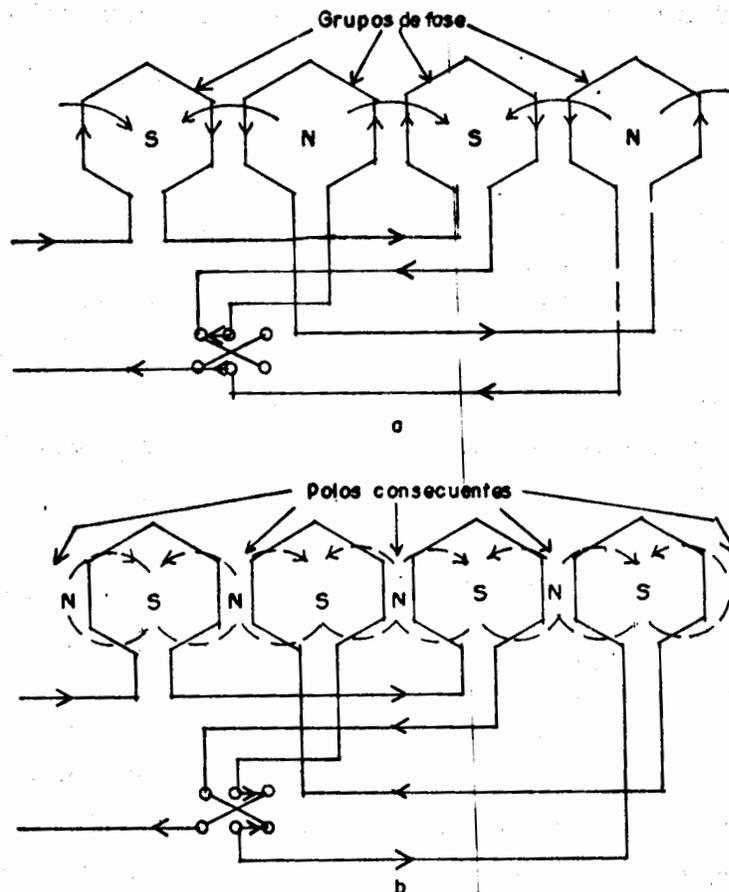
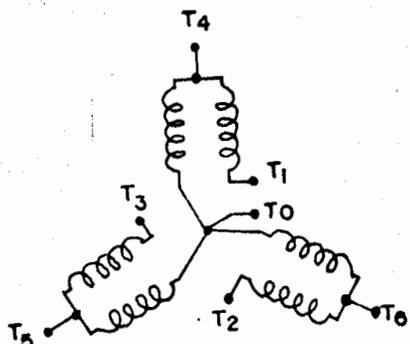


Fig. 51 Obtención de dos velocidades síncronas por el método de polos consecuentes. a) Interconexiones de grupos de bobinas de un devanado de fase para obtener el funcionamiento de alta velocidad (cuatro polos). b) Conexión de baja velocidad (ocho polos), con cuatro po

En la Fig.51 los dos conjuntos de grupos de polos se ilustran en serie. Pero también pueden conectarse en paralelo; o en serie para una velocidad y en paralelo para la otra. La Fig. 51c,d muestra las conexiones normales para obtener diferentes variaciones del par y de la potencia con la velocidad. Las características declaradas como "potencia constante" son aproximadas.

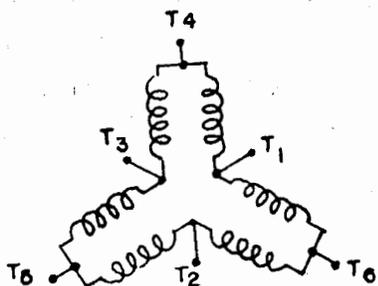


Par variable

Velocidad	L1	L2	L3	Aislados separada mente	Ligados juntos
Baja	T1	T2	T3	T4-T5-T6	--
Alta	T6	T4	T5	--	(T1, T2, T3)

máx. a baja velocidad es menor a alta

a)



Par constante

Velocidad	L1	L2	L3	Aislados separada mente	Ligados juntos
Baja	T2	T2	T3	T4-T5-T6	--
Alta	T6	T4	T5	--	(T1, T2, T3)

Potencia disponible a baja velocidad es la mitad que a alta

b)

Fig.51c Diagramas de conexión para los motores de inducción de jaula de ardilla de dos velocidades y polos consecuentes.

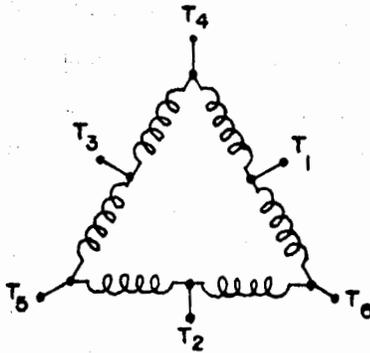


Fig. 51d

Potencia constante

Velocidad	L1	L2	L3	Aislados separada mente	Ligados juntos
Baja	T1	T2	T3	--	T4, T5, T6
Alta	T6	T4	T5	T1, T2, T3	--

T_{max} a baja velocidad es el doble que a alta

Modulación de amplitud de polos

Este nombre aceptado generalmente, no describe con precisión el método de cambio de velocidad que representa. El resultado de su aplicación es realmente la modulación de la amplitud de la portadora suprimida del esquema de la FMM del devanado del estator. Al igual que el método de polos consecuentes, por lo general se le emplea para producir motores de dos velocidades, con la ventaja de que estas dos velocidades no necesitan una relación de dos a uno.

Supóngase por ejemplo que el campo del estator de una máquina está distribuido senoidalmente:

$$F_1(\theta_1) = F_{m\acute{a}x} \operatorname{sen} \frac{p_1}{2} \theta_1$$

en donde p_1 es el número de polos del devanado. Supóngase que a este campo se le aplica otra función senoidal de θ_1 :

$$\begin{aligned}
 F(\theta_1) &= M \operatorname{sen} \frac{p_m}{2} \theta_1 (F_{m\acute{a}x} \operatorname{sen} \frac{p_1}{2} \theta_1) \\
 &= \frac{MF_{m\acute{a}x}}{2} \left[\cos \left(\frac{p_1 - p_m}{2} \theta_1 \right) - \cos \left(\frac{p_1 + p_m}{2} \theta_1 \right) \right]
 \end{aligned}$$

Como resultado se producen campos en el estator con dos diferentes números de polos:

$$P_a = P_1 - k \quad P_b = P_1 + k$$

en donde $k = p_m$

En la práctica, la función modulante es más bien tosca: una onda rectangular de amplitud $M = 1$. Esta modulación se obtiene invirtiendo simplemente las conexiones a la mitad de los grupos de polos en cada devanado de fase.

Un ejemplo simple lo ilustrará. Considérese un devanado trifásico de 8 polos. La velocidad síncrona es 900 rev/min a 60 Hz. La FMM instantánea de los polos del devanado de una fase se indica en la Fig. 52 a, junto con la función modulante, una onda rectangular de dos polos. Los números de polos del campo modulado son entonces 6 y 10. La "función modulante", es una forma elegante de indicar que, para obtener una velocidad diferentes, se invierten las conexiones a los grupos de polos 5, 6, 7 y 8. El esquema de la FMM resultante para la misma corriente instantánea de fase se señala en la Fig. 52b. Es evidente que se produce un campo de 6 polos. El campo de 10 polos no es tan obvio. El análisis de Fourier de la forma de onda de la Fig. 52c da como resultado campos de 6 y de 10 polos, con las amplitudes relativas que se muestran en c) y d).

¿Cuál velocidad síncrona será efectiva? Para determinarlo deben considerarse los campos de los otros dos devanados de fase. El campo de 6 polos es una función coseno relativa a la función modulante y el campo de 10 polos es una función negativa del coseno. La función modulante se extiende sobre 360 grados mecánicos. Las funciones modulantes de las otras dos fases se adelantan y atrasan respecto a ésta en 120 grados mecánicos, respectivamente. Para el campo de 6 polos, el desplazamiento es de 360 grados eléc-

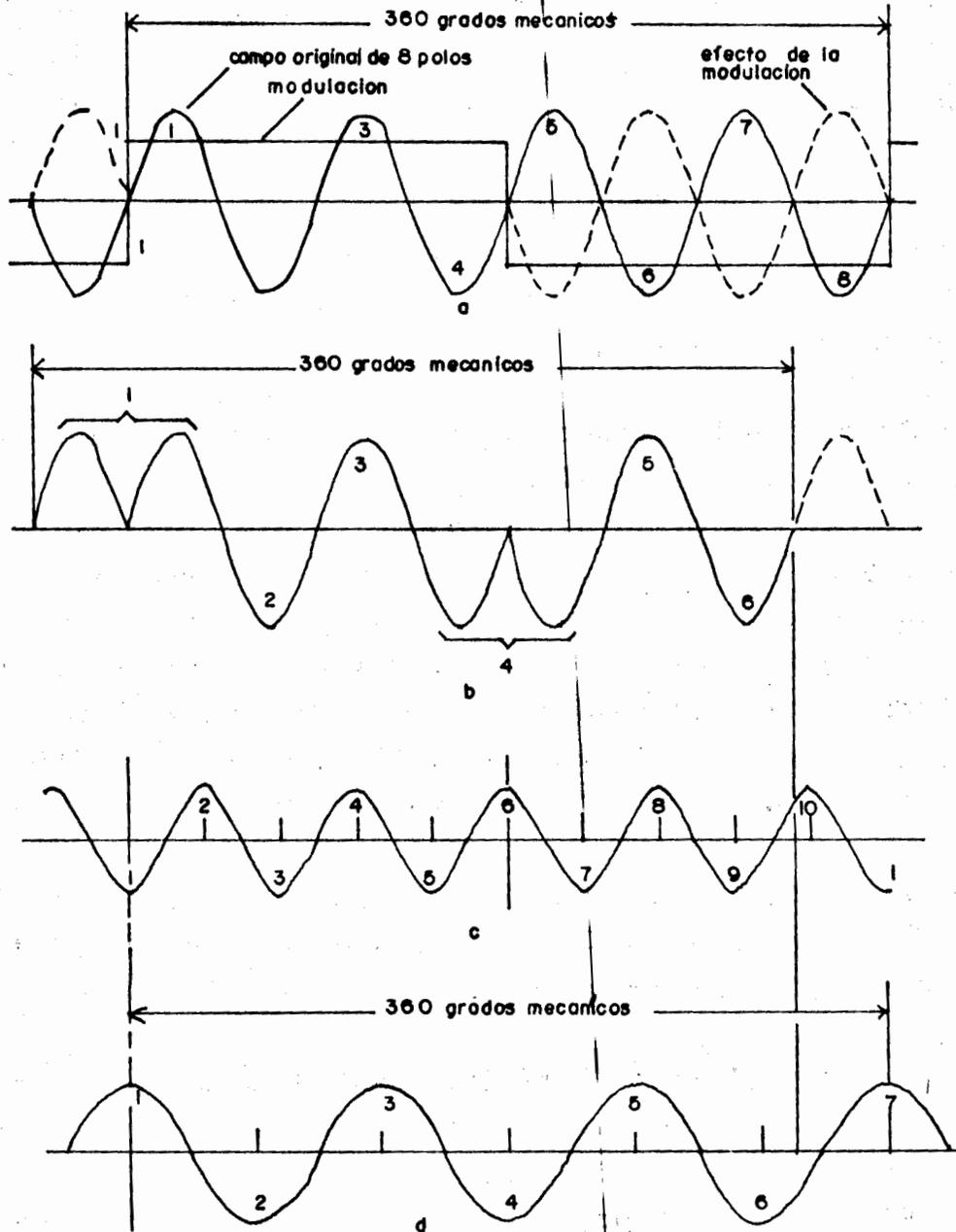


Fig.52 Un ejemplo de modulación de amplitud de polos. a) Campo original de 8 polos y la función de modulación. b) El campo modulado: una combinación de los campos de 6 y de 10 polos (el campo de 6 polos es evidente). c) Componente de 10 polos. d) Componente de 6 polos.

tricos ($6/2 \times 120^\circ$); es decir, las componentes de 6 polos de los campos de los devanados trifásicos están todas en fase especial, pero no en fase temporal. Los tres campos de 6 polos son proporcionales a las corrientes en los tres devanados de fase, y si estas corrientes están balanceadas (o si los devanados se conectan en Y, sin consideración del balance), su suma instantánea es cero. Entonces, la adición de las componentes de 6 polos de las FMM trifásicas da por resultado un campo neto cero. Los esquemas de las FMM de las fases de 10 polos, están por otro lado, $(10/2) 120 = 600$ grados eléctricos separados, o $360^\circ + 240^\circ$. Entonces, si la secuencia de fases para el campo original de 8 polos es abc, el campo de 10 polos tiene una secuencia acb. Para evitar que la máquina funcione en reversa cuando se modula a 10 polos, deben invertirse dos de los conductores de línea, al mismo tiempo que se invierten los grupos de 4 polos en cada fase. La velocidad síncrona a 60 Hz del motor modulado es 720 rev/min. Antes de la invención de la MAP eran necesarios dos devanados separados en una máquina para tener dos velocidades que no estuvieran en la razón dos a uno. La MAP permite reducir mucho el tamaño y el costo.

Control de velocidad por medio de la frecuencia.

La velocidad síncrona de un motor de inducción se controla gobernando la frecuencia del voltaje que se aplica a sus terminales. Para los motores trifásicos se requiere una fuente trifásica, de frecuencia variable, capaz de proveer suficiente potencia para alimentar al motor. Estas fuentes de potencia son por lo general complicadas y costosas. Un ejemplo se ilustra en la Fig. 53. Un motor normal de jaula de ardilla, de 60 Hz funciona satisfactoriamente en tal sistema hasta alrededor de 180 Hz. El voltaje se controla de modo que sea proporcional a la frecuencia, para mantener un flujo constante por polo en el entrehierro. La solución de la ecuación (1) para el flujo por polo es:

Inversor de fase

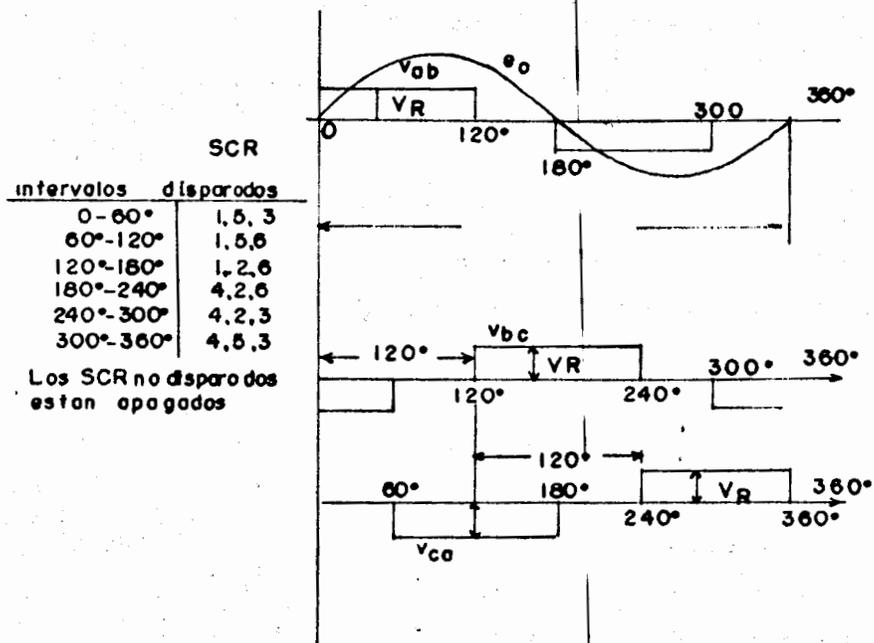
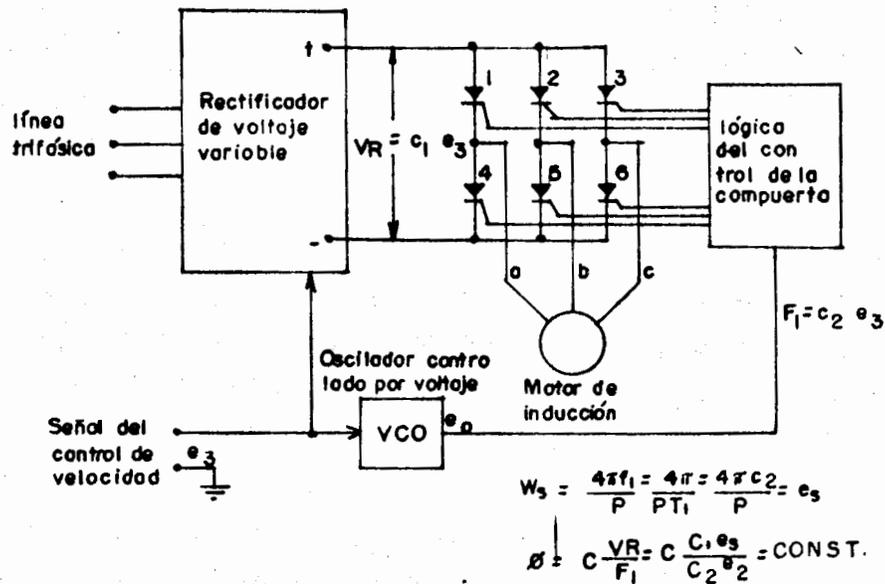


Fig. 53 Velocidad del motor de inducción controlada por frecuencia.

$$\phi = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi N}} \right) \frac{|E_1|}{f_1} \quad (1)$$

Para cualquier deslizamiento dado, E_1 es proporcional a V_{1m} , y el flujo es proporcional a los volts por hertz de la fuente. Si el voltaje no varía con la frecuencia, el núcleo se satura a bajas frecuencias y no habrá suficiente par a altas frecuencias. Con una alimentación constante de volts/hertz, el par disponible es el mismo para todas las velocidades y la potencia es proporcional a la velocidad. Tales sistemas de frecuencia regulable son extremadamente costosos. Sólo se justifican para aplicaciones en las cuales, las características de resistencia y poco mantenimiento de los motores de inducción sean esenciales. De otra manera, la elección normal es la de un motor c-d con una fuente rectificadora de potencia, de voltaje variable.

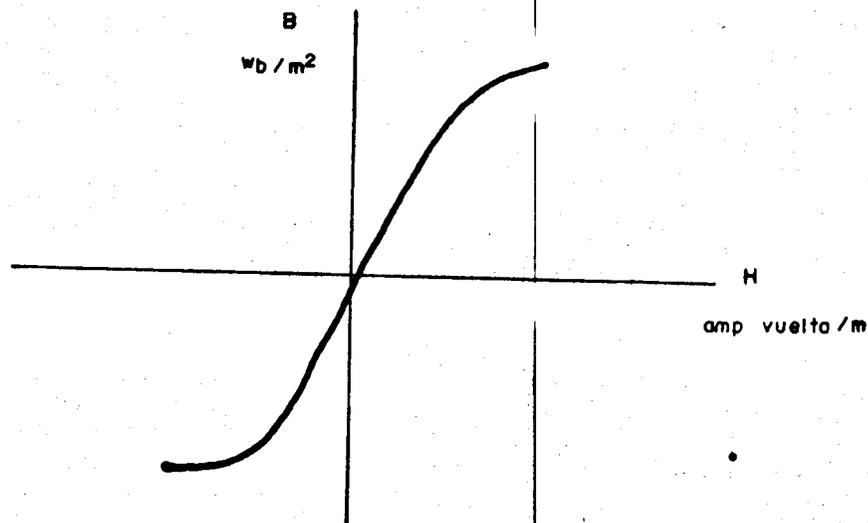
3.1 Máquinas síncronas

Obtención de las curvas de:

1.
 - a) Saturación en vacío
 - b) Pérdidas magnéticas (en vacío)
2.
 - a) Saturación en corto circuito
 - b) Pérdidas eléctricas (en C.C.)
3.
 - a) Impedancia síncrona no saturada

Saturación en vacío

Refiriéndonos a la curva de magnetización en su forma original



H- INTENSIDAD DEL
CAMPO MAGNETICO

B- DENSIDAD DE Φ

Sabemos que:

$$H = \frac{N I_{ex}}{\ell} \quad (1)$$

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (2)$$

donde

N = número de vueltas del campo excitador

ℓ = longitud del conductor del campo excitador

A = sección por donde circula el ϕ magnético

haciendo:

$$K' = \frac{\ell}{N}$$

y

$$K'' = A$$

sustituyendo en(1) y(2)

$$H = \frac{I_{ex}}{K'}$$

y

$$B = \frac{\phi}{K''}$$

$$I_{ex} = H K' \quad (3)$$

$$\phi = B K'' \quad (4)$$

Sabemos que para un generador:

$$E = \frac{PN n}{60 a}$$

y haciendo:

$$K'''' = \frac{PN}{60 a}$$

$$E = K'''' n \quad (5)$$

Sustituyendo (4) en (5)

$$E = K'''' L'' B n \quad (6)$$

Si mantenemos la revoluciones constantes podemos hacer:

$$n = \text{cte}$$

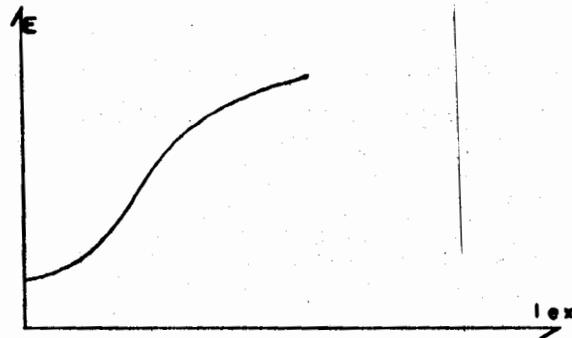
$$K^{IV} = K'''' K'' n$$

y

$$E = K^{IV} B \quad (7)$$

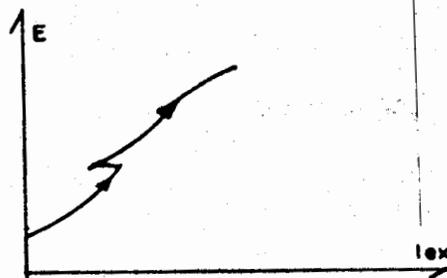
Entonces, la curva de magnetización la podremos expresar en función de I_{ex} y E en la que los valores de H y B son afectados por K' y K^{IV} respectivamente.

Entonces, la curva podrá ser:



Por lo tanto, es necesario mantener las RPM constantes.

Así también, es necesario obtener valores ascendentes o descendentes para eliminar los efectos de histéresis. De otra forma se obtendrá una cosa semejante a la figura siguiente.



Pérdidas: Es necesario disponer de una fuente de C.D. para exci-

tar el campo y de esta manera tener un control completo sobre el generador, lo que no sería posible lograr si éste fuera autoexcitado.

Para la obtención de las curvas de saturación en vacío y pérdidas en vacío, las únicas pérdidas que nos interesan serán las pérdidas magnéticas.

Será necesario controlar las otras dos formas de disipación de potencia, así pues, las pérdidas mecánicas las podemos mantener constantes si mantenemos constante la velocidad.

En cuanto a las pérdidas eléctricas, éstas varían directamente proporcional al cuadrado de la corriente, por lo que si los incrementos de corriente son pequeños, éstas se pueden considerar despreciables.

Cuando la máquina trabaja en vacío, toda la potencia que se suministra es disipada principalmente en pérdidas mecánicas y magnéticas y en forma reducida en pérdidas eléctricas

$$\text{Pérdidas Eléctricas} = I^2$$

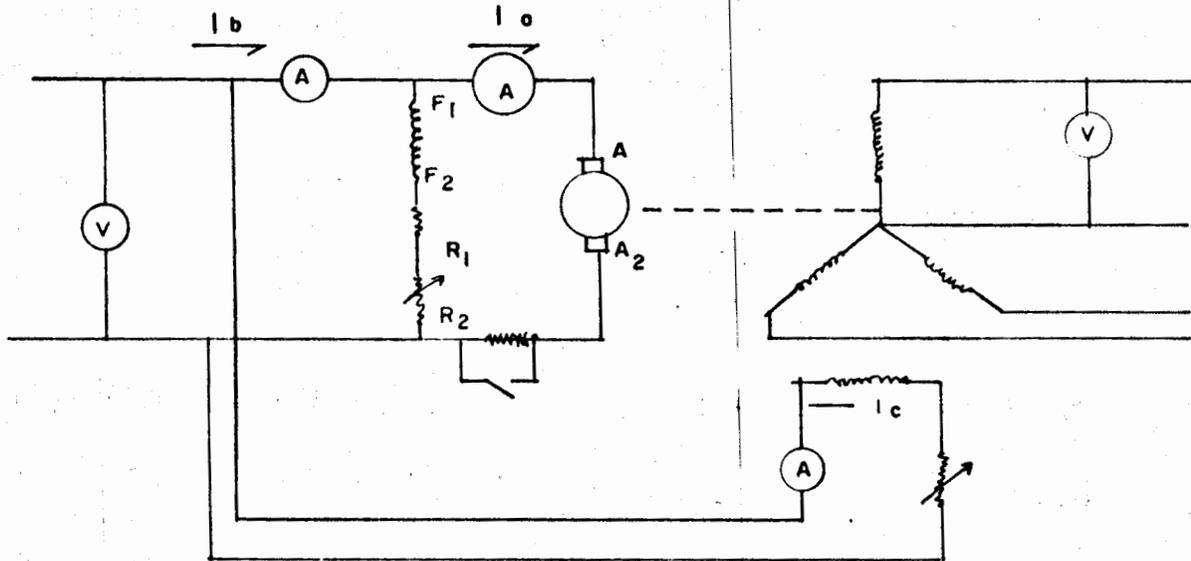
sea:

PEC = Pérdidas eléctricas en el campo
 PEA = Pérdidas eléctricas estator
 PME = Pérdidas mecánicas Mot-Gen
 PMGM= Pérdidas magnéticas motor
 PMGG= Pérdidas magnéticas generador
 PEG = Pérdidas eléctricas generador
 V = Voltaje de alimentación al motor
 I = I de alimentación al motor

I:

Ia = Saturación en vacío

Ib = Pérdidas magnéticas



Lec.	MOTOR				GENERADOR		
	n	Ia	IL		n	V	Ic mA
1	1800	120	0.09	0.2	1830	0	0
2	"	"	0.1	0.4	"	40	70
3	"	"	"	"	"	50	90
4	"	"	"	"	"	58	100
5	"	"	"	"	"	68	120
6	"	"	"	"	"	82	150
7	"	"	"	"	"	100	195
8	"	"	0.30	0.48	"	118	240
9	"	"	0.40	0.50	"	130	290
10	"	"	0.42	0.55	"	138	315
11	"	"	0.48	0.60	"	140	320
12	"	"	"	"	"	142	325

sin excitación

Curva de Saturación en vacío

Análisis:

Ib:

$$I: P_1 = V_1 I_1 = PEC_1 + PEA_1 + PMGM_1 + PME_1 \text{ (sin excitación)}$$

$$P_2 = V_2 I_2 = PEC_2 + PEA_2 + PMGM_2 + PMGG_2 + PME_2 \text{ (con excitación)}$$

$$A: \text{ como } V = \text{CTE}$$

$$n = \text{CTE}$$

$$PEC = \text{CTE}$$

$$PMGM = \text{CTE}$$

$$Y \quad PME = \text{CTE}$$

Restando:

$$P_2 - P_1 = PEC_2 + PEA_2 + PMGM_2 + PMGG_2 + PME - PEC_1 - PEA_1 - PMGM_1 - PME$$

$$P_2 - P_1 = PEA_2 + PMGG_2 - PEA_1$$

$$\text{como } PEA = I_a^2 R_a$$

$$P_2 - P_1 = I_a^2 R_a + PMGG_2 - I_{a1}^2 R_a$$

$$P_2 - P_1 = PMGG_2 + (I_{a2}^2 - I_{a1}^2) R_a$$

6

$$V_2 I_2 - V_1 I_1 - (I_{a2}^2 - I_{a1}^2) R_a = PMGG_1$$

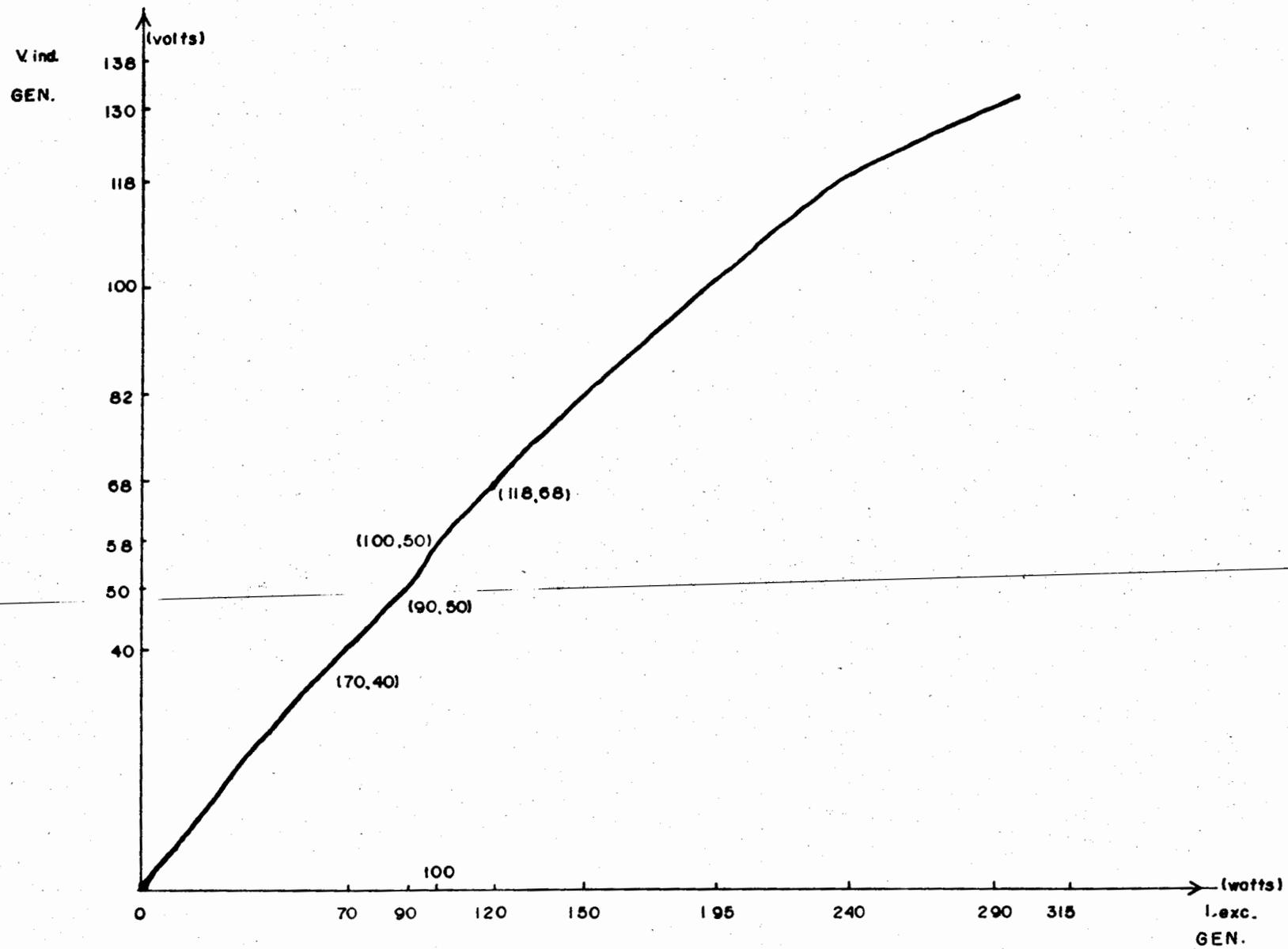
$$II: P_3 = V_3 I_3 = PEC_3 + PEA_3 + PMGM_3 + PMGG_3 + PME_3 \text{ (con excitación)}$$

por (A)

$$P_3 - P_1 = PMGG_{II}$$

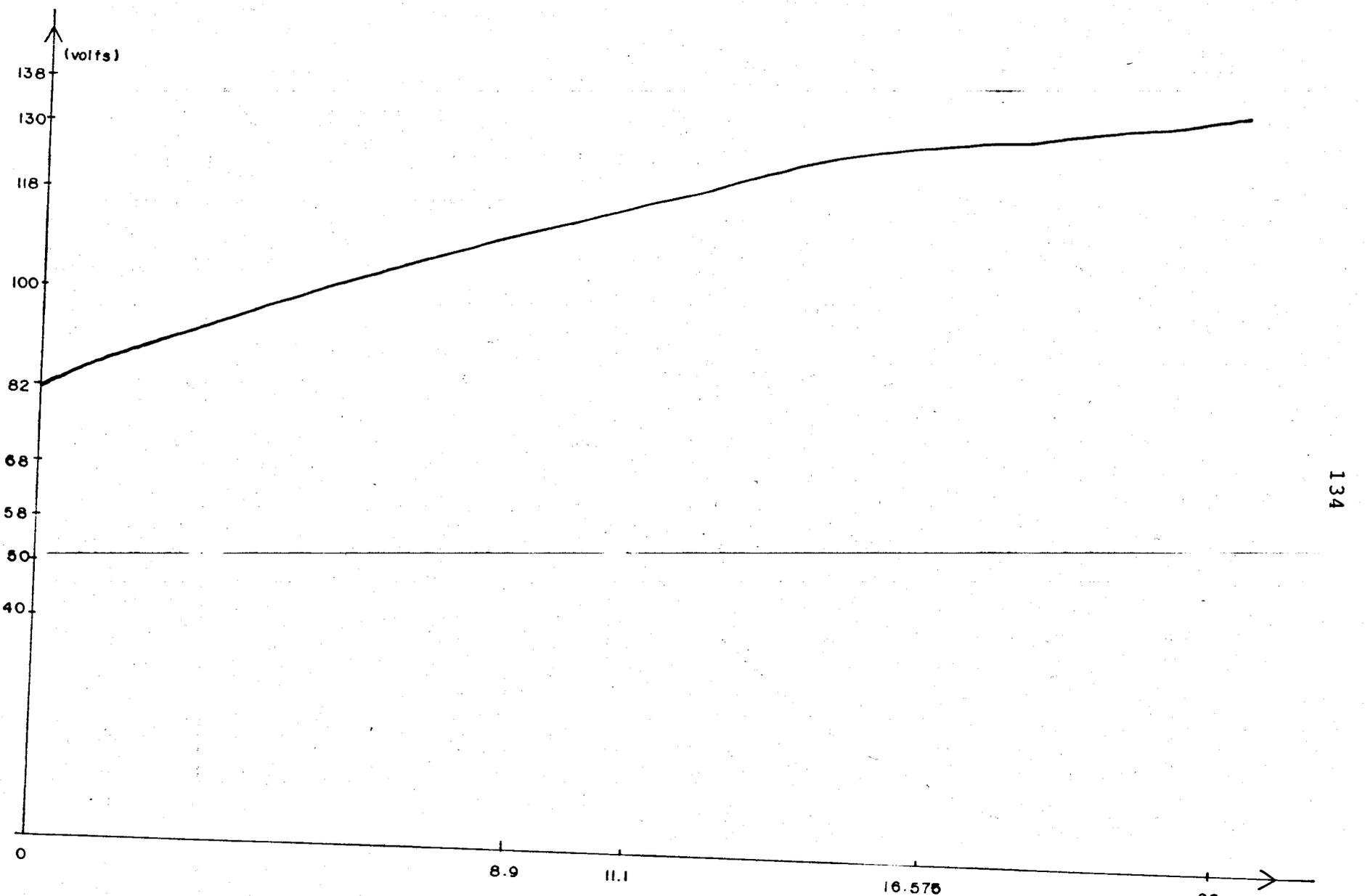
$$III: P_4 - P_1 = PMG_{III}$$

$$P_n - P_1 = PMGG$$



CURVA DE SATURACION EN VACIO

V ind
SEN



CURVA DE PERDIDAS MAGNETICAS

Perdidas magneticas (watts)

Curva de saturación en corto circuito, curva de pérdidas de carga y obtención de la impedancia síncrona no saturada, para un alternador.

Curva de corto circuito

La característica de corto circuito muestra la relación entre la corriente de armadura de corto circuito y la corriente de excitación.

La corriente de corto circuito cuyo valor va de $\frac{1}{2}$ a 4 veces el valor de la corriente nominal es limitada por la impedancia síncrona no saturada de la máquina.

Es importante hacer notar que bajo condiciones de corto circuito instantáneas y que llegan a ocurrir en los generadores por accidente, la corriente transitoria llega a tener valor de 10 a 30 veces el valor de la corriente nominal. En este caso el valor de la impedancia es más bajo que el de la impedancia síncrona no saturada y para estos estudios intervienen los valores de reactancia transitoria y subtransitoria cuyas consideraciones salen fuera de este curso.

En este caso las condiciones de corto circuito se producirán desde el principio de la prueba y por lo tanto no intervendrán en lo absoluto las condiciones transitorias antes mencionadas.

Lect.	M O T O R				GENERADOR	
	n	V	IL	Ia	Iex	Icc
1	1800	120	0.20	0.10	0	0
2	"	"	0.35	0.20	0.05	0.18
3	"	"	"	"	0.08	0.22
4	"	"	0.38	0.28	0.11	0.28
5	"	"	"	"	0.14	0.35
6	"	"	0.40	0.32	0.18	0.46
7	"	"	0.45	0.36	0.22	0.55

Sin excitación
Los aumentos
de excitación
deben ser pe-
queños

Curva de saturación
en C.C.

IIb

Análisis

$$I: P_1 = V_1 I_1 = PEC_1 + PEA_1 + PMGM_1 + PME_1 \quad (\text{sin excitación})$$

$$P_2 = V_2 I_2 = PEC_2 + PEA_2 + PMGM_2 + PME_2 + PEG$$

B: como los incrementos de Iex son pequeños entonces:

$$PMGM = \text{ctes}$$

$$n = \text{cte} \quad PME = \text{ctes}$$

$$PEC = \text{ctes}$$

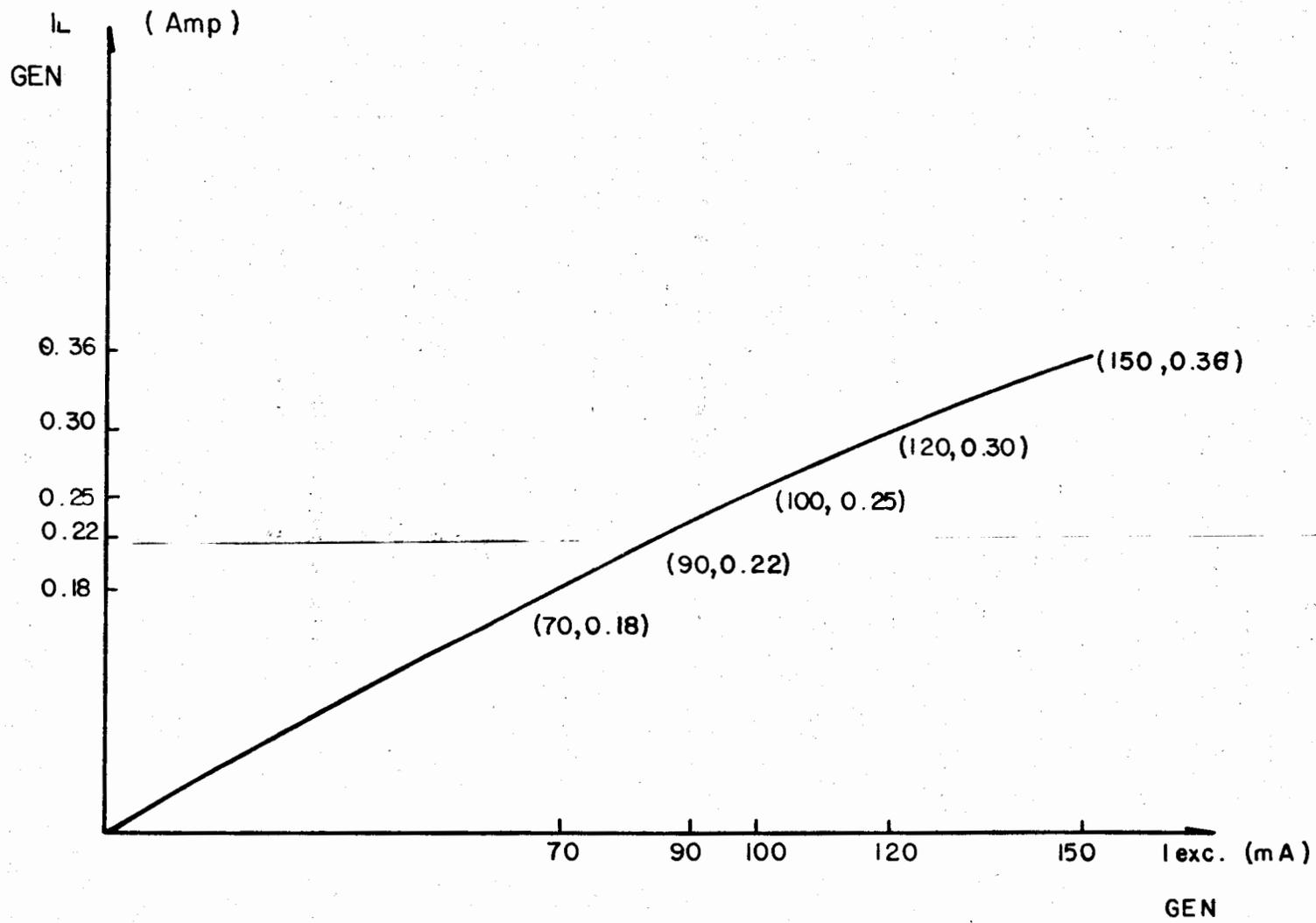
$$P_2 - P_1 = PEC_2 + PEA_2 + PMGM_2 + PME_2 + PEG \\ = PEC_1 - PEA_1 - PMGM_1 - PME_1$$

$$P_2 - P_1 = PEA_2 - PEA_1 + PEG$$

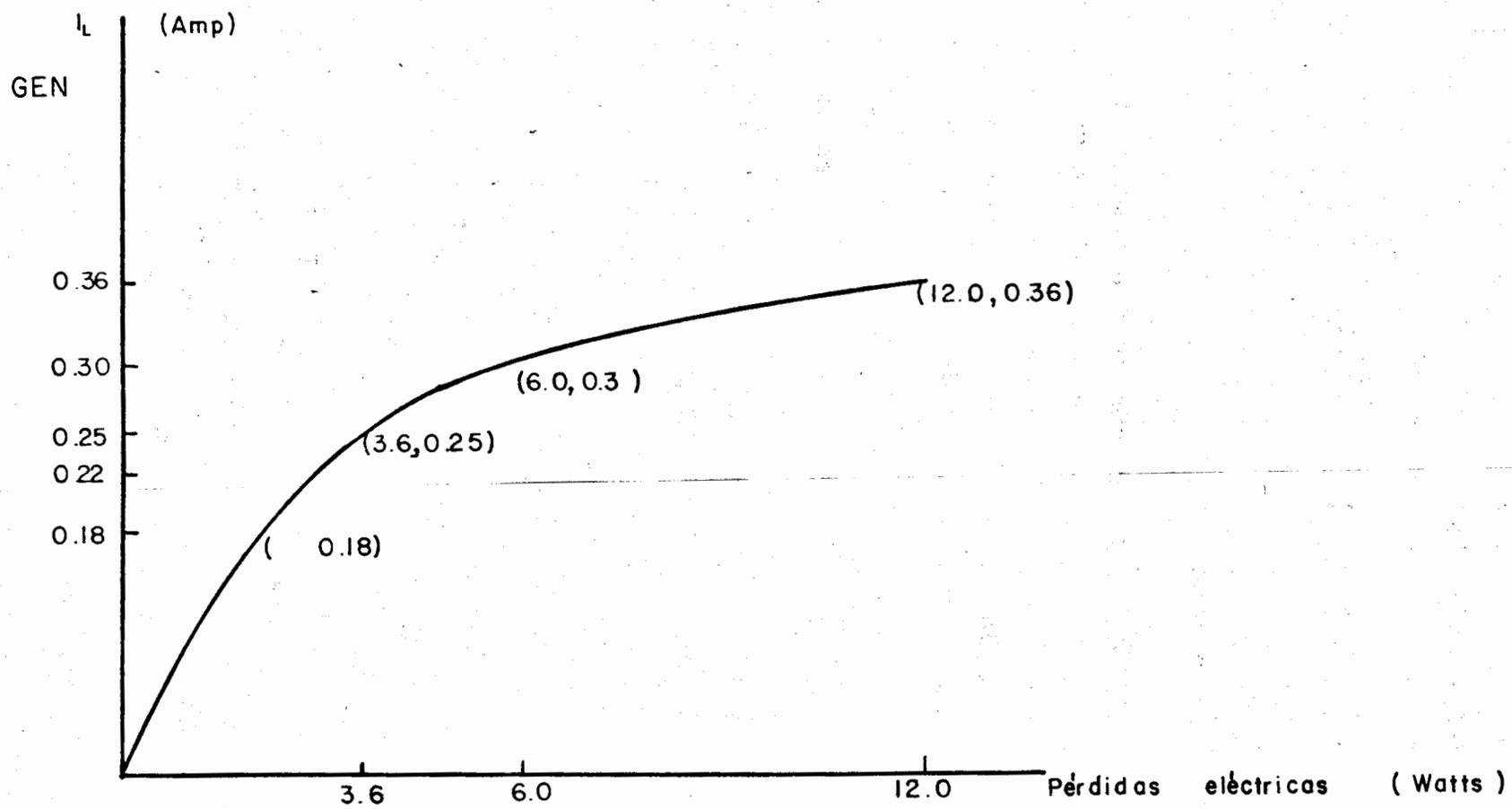
como; $PEA = I_a^2 Ra$

$$P_2 - P_1 = I_a^2 Ra - I_a^2 Ra + PEG$$

$$V_2 I_2 - V_1 I_1 - (I_a^2 - I_a^2) Ra = PEG$$



CURVA DE SATURACION EN CORTO CIRCUITO



CURVA DE PERDIDAS ELECTRICAS

$$\text{II: } P_3 = V_3 I_3 = P_{EC_3} + P_{EA_3} + P_{MG_3} + P_{ME_3} + P_{EG}$$

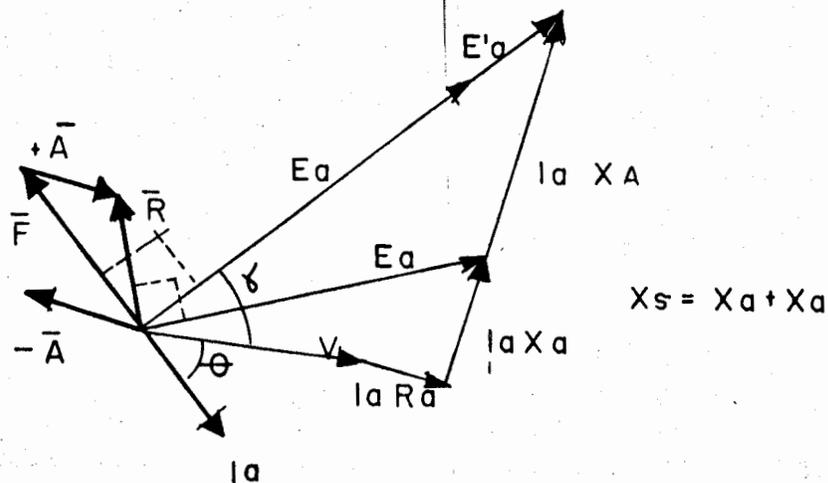
$$P_3 - P_1 - (I_{a_3}^2 - I_{a_1}^2) R_a = P_{EG}$$

$$\text{III: } P_n - P_1 - (I_{a_n}^2 - I_{a_1}^2) R_a = P_{EG}$$

Reactancia síncrona

Con el objeto de trabajar con un diagrama de tensiones exclusivamente y no mixto, el efecto de la reacción de armadura sobre las tensiones, que es la diferencia antes mencionada, puede substituirse por una caída reactiva equivalente y que en la figura se representa por $I_a X_a$ que es la caída de tensión que produciría \bar{A} actuando sola.

De esta manera la suma de $x_a + X_a = X_s$ es la reactancia síncrona



lo tanto, el valor que se obtiene empleando dicha X_s para el cálculo de la tensión de vacío tendrá que ser corregido, ya que en vacío la saturación es otra y estará determinada por F .

También puede interpretarse que cuando la diferencia entre las magnitudes \bar{F} y \bar{R} , $\bar{A}\bar{B}$ actúa sobre una parte del circuito menos saturado y su efecto sería mayor. Así, si $A''B'' = \bar{A}\bar{B}$ el valor de AV'' será mayor que AV .

Como X_a sustituye el efecto de \bar{A} (Reac. armadura) su valor tiene que disminuir con la saturación y por lo tanto el valor de la reactancia síncrona:

Conclusión : Saturación X_s

Reactancia Síncrona no saturada

Impedancia Síncrona no saturada

Al obtenerse la curva de saturación de corto circuito, podrá establecerse un diagrama fasorial como el de la figura siguiente.

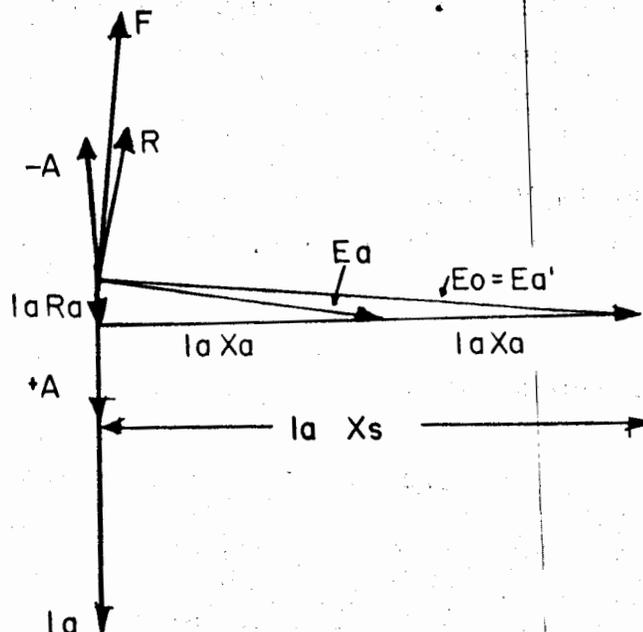


Fig. 53c

La interpretación se basa en que al no existir voltaje terminal y por lo mismo no existe carga externa, la única limitación de la corriente será la impedancia interna, sin embargo, en los generadores síncronos, el valor de X_a es mucho mayor que R_a (aprox. 10) por lo que el valor de la carga interna será prácticamente reactiva y con un ángulo de f.p. muy atrasado.

Esto conduce a tener a la reacción de armadura \bar{A} en oposición a \bar{F} y que produce un valor muy bajo de \bar{R} aun con valores altos de excitación \bar{F} . Más aún en los rangos de C.C., al no tenerse carga externa el valor de corriente de excitación será muy baja para hacer circular la corriente nominal de carga I_a , a valores semejantes a ella, por lo que definitivamente puede concluirse que no hay saturación alguna y por lo tanto esta curva se obtiene en forma de línea recta. En estas condiciones $E_0 = E_a'$.

Por lo anterior, de la Fig. 53c

$$E_a' = V + I_a (R_a + j X_s)$$

como; $V = 0$; $I_a = I_{cc}$ y $E_a' = E_0$

$$E_0 = I_{cc} (R_a + j X_s)$$

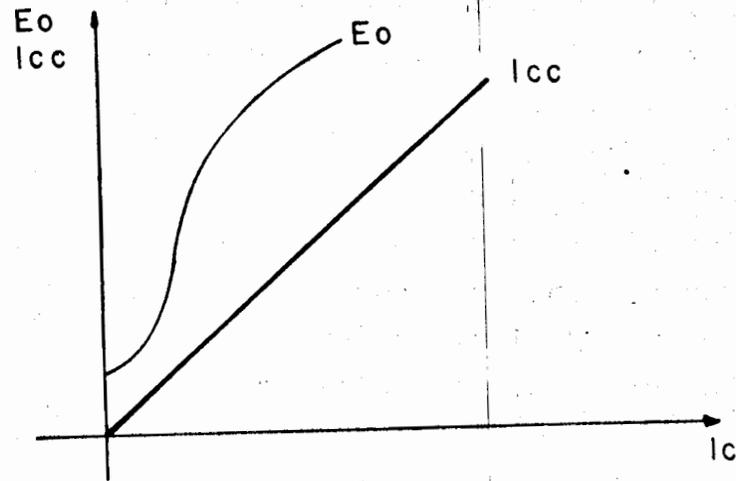
si; $Z_s (R_a + j X_s)$ impedancia síncrona no saturada

$$Z_s = \frac{E_0}{I_{CC}}$$

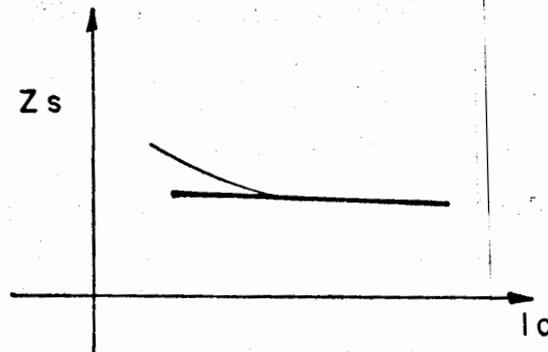
Puede concluirse que el valor de la Z_s puede determinarse en función de un valor de tensión en vacío (curva de saturación en vacío) y un valor de corriente de C.C. (curva de saturación de C.C.)

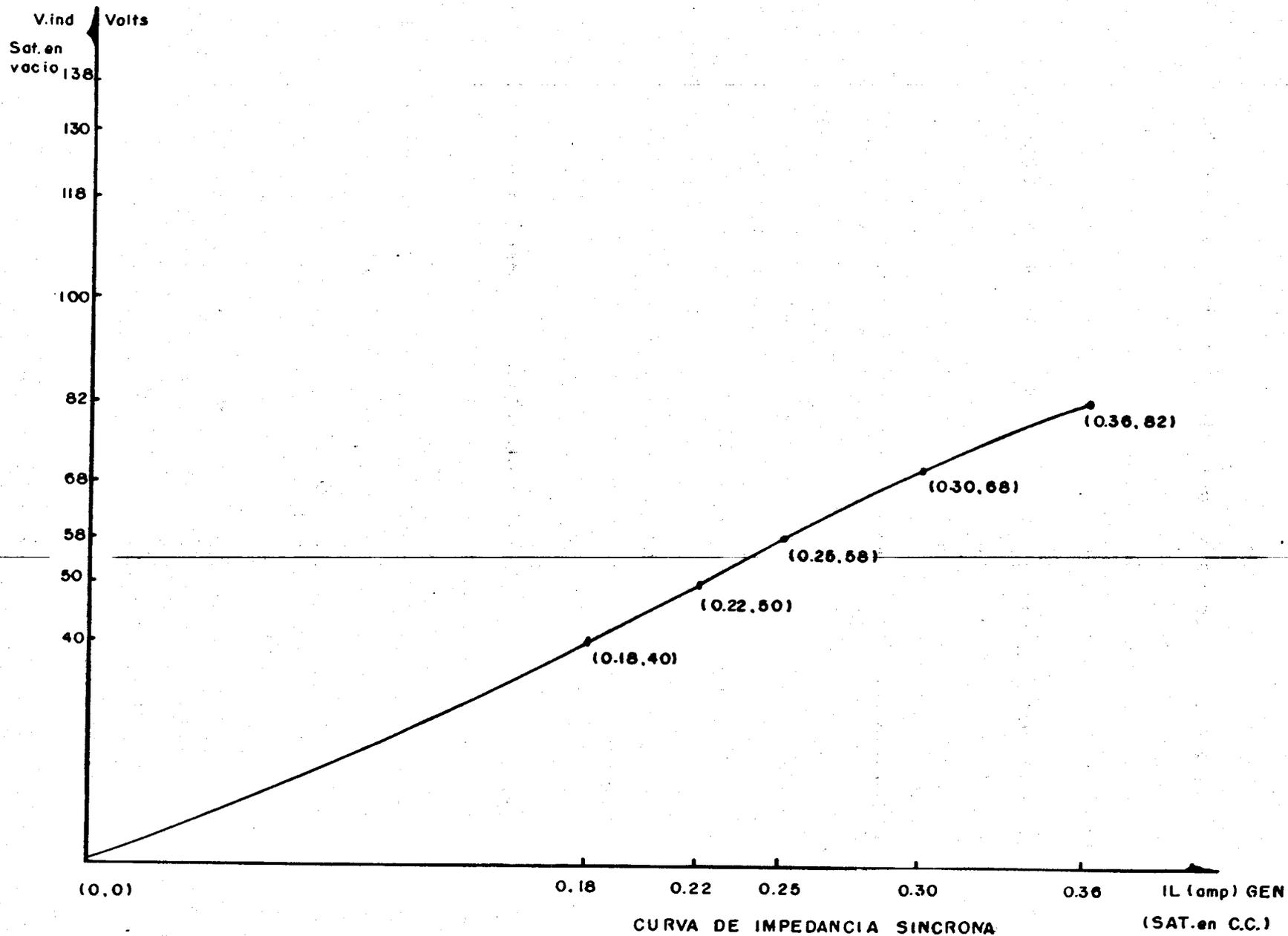
$$Z_s = \frac{V}{I_L} \frac{IND}{(C.C.)} \text{ (saturación en vacío) } [\Omega/\phi]$$

Trazando en una sola gráfica los valores de ambas curvas:



Dividiendo los valores de E_o e I_{cc} con A , mismos valores de corriente de excitación solo dentro de la parte lineal de la curva de saturación, se podrá obtener el valor de Z_s no saturada, representada en la Figura siguiente.





El valor de Z_s no saturada es conocida por muchos autores, como el valor óptimo de Z_s , puesto que al ser el mayor valor que se pueda obtener, el resultado de I_{cc} bajo tales circunstancias será el menor.

Como se mencionó, el valor de Z_s podrá variar a lo largo de la operación del alternador.

3.2 Determinación de las curvas de saturación a corriente nominal y factor de potencia 0 y 0.9 para un generador de C.A.

La obtención de la curva de saturación a corriente nominal y factor de potencia 0, requiere de una técnica especial que a continuación se describe. Dicha curva es una herramienta muy útil en la operación y conocimiento del generador de corriente alterna y algunas aplicaciones se describen al final de esta práctica tal como lo es la curva de saturación a corriente nominal y factor de potencia 0.9.

La máquina en prueba es aquella de alterna perteneciente al grupo MG II, y las conexiones necesarias se muestran en el siguiente diagrama de la Fig. 54a. En caso de utilizar el diagrama de conexión de la Fig. 54a, deberá observarse que el motor-generador I (MG I) sirva exclusivamente para sobrealimentar el campo de la máquina en prueba.

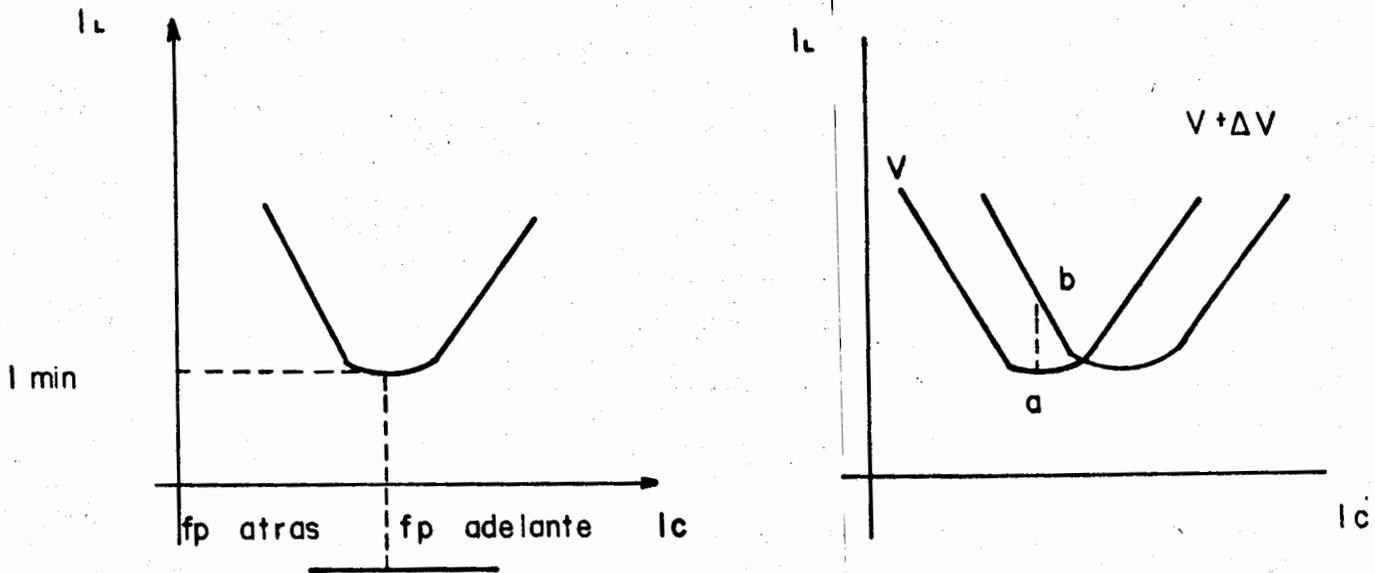


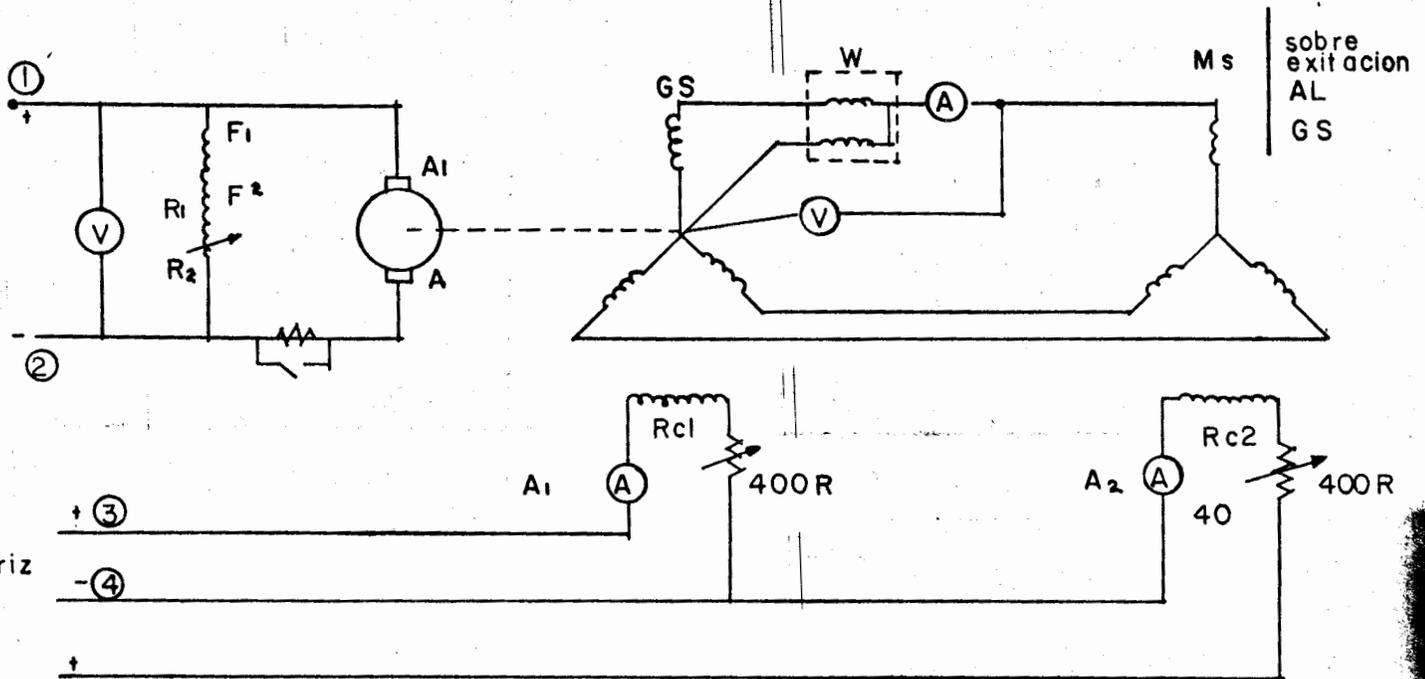
Fig. 54

Para que la máquina trabaje a $fp = 0$ a plena carga, utilizamos un motor síncrono como carga, y recordando la curva característica del motor síncrono mostrada en la Fig. 54, se observa que variando la excitación (I_c) puede variarse el fp aún trabajando la máquina en vacío.

Cuando el incremento de voltaje sobre-excita al generador en prueba, la curva del motor síncrono se desliza hacia la derecha como lo muestra la Fig. 54.

El efecto neto que se obtiene al sobre excitar al generador cuando el $fp=1$ (pasar de "a" a "b") es retrasar el f.p. sin modificar la excitación del motor síncrono.

La obtención de la curva de saturación a corriente nominal y $f_p = 0$ requiere de una técnica especial que a continuación se describe.



54a

Secuencia de operaciones

La I a plena carga será la I del G_s

I. Saturación a plena carga

- 1) Operar el G_s a través del med. hasta obtener:

$$\text{rpm}_n ; V_n$$

- 2) Arrancar el M_s sin excitación

- 3) Se excita el M_s , para obtener $I_L = \text{min}$ de este modo se obtiene $f_p = 1.0$

- 4) Sobre excitar el Gs hasta + 40% (en MGII - 154)V. Con ésto se obtiene el punto más alto de la curva. Las lecturas se hacen en valores decrecientes para evitar el sobre calentamiento.

Al existir sobre excitación, la curva "V" se desplaza hacia la derecha, por lo que el fp es atrasado.

- 5) Se ajusta con R_{c2} el valor de la corriente de línea del valor especificado ($IL = 10.454$)
- 6) Tomar lecturas del:
- Volmetro
 - Ampermetro de línea
 - Ampermetro A_1
 - Ampermetro A_2
 - Wattmetro
- 7) Se baja la excitación de Gs con R_{c1} con R_{c2} se ajusta nuevamente IL
- 8) Se toman lecturas indicadas en 6)
- 9) Se repite el punto 7)
- 10) El penúltimo punto se obtiene abriendo el campo del Ms y ajustando el valor de $IL = 10.45$ A variando el voltaje del Gs con R_{c1} .

II Curva de corto circuito fijo

- 11) Se cortacircuitan las tres fases del Gs y se varia la I_c por medio de R_{c1} y se toman las lecturas de I_{cc} del Gs.
- 12) El último punto de la curva se obtiene de esta prueba. Se toma en el eje de la ordenadas el valor de I a plena carga ($I = 10.45$) y el de las abscisas se lee la I_c , siendo este el punto buscado que corresponde al valor inicial de la curva.

III Curva de saturación en vacio

- 13) Se da excitación al Gs con R_{c1} y se lee el voltaje, teniendo

las terminales del Gen. abiertas.

14) Se repite el proceso

PRUEBA 1

Curva de saturación a plena carga
con $f_p = 0.0$

M O T O R			GENERADOR		
n	Ic	IL	Ic	V	P
Nn	1.13	10.45	4.52	154	210
"	0.65	"	4.00	140	"
"	0.55	"	3.90	134	"
"	0.4	"	3.70	128	"
"	0.0	"	3.15	106	"
"	0.0	"	2.20	100	0

PRUEBA 2

Curva de C.C.

GENERADOR		
n	Ic	Icc
Nn	0.3	2
"	0.50	3
"	0.70	5
"	0.85	6
"	1.20	8
"	1.39	10.0
"	1.46	10.45
"	1.55	11.0
"	1.56	11.5
"	1.60	12

PRUEBA 3

Curva de saturación en vacío

Lect.	Ic	V ϕ -N
1	0.2	29
2	0.4	36
3	0.6	50
4	0.92	70
5	1.20	90
6	1.54	110
7	1.94	130
8	2.15	140
9	2.50	150
10	2.80	160
11	3.16	170
12	3.68	180
13	4.31	190
14	4.50	200

IV Obtención de la curva de saturación

A $f_p = 0.9$

a) Trazar las curvas de:

- Curva de saturación en vacío (y curva de C.C.)
- Curva de saturación a plena carga a $f_p = 0.0$

b) En una hoja separada se traza un cuadrante como lo indica la Fig. 54c

- 1) Con un compás se lleva la distancia " $o_n b_n$ " sobre el eje de las abscisas $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$.
- 2) En el eje de las ordenadas la distancia " $a_1 b_1$ "
- 3) Por " a_1 " se traza una horizontal.
- 4) Por el punto " a_1 " se traza una línea que haga un ángulo $\theta = 25.8^\circ$ que es el que corresponde a un $f_p = 0.9$ ó $\cos \theta = 0.9$, hasta cortar al círculo de radio " ob " en " d_1 "
- 5) La distancia " $a_1 d_1$ " es llevada a la curva de "saturación a plena carga" y "saturación en vacío" mencionadas en a)

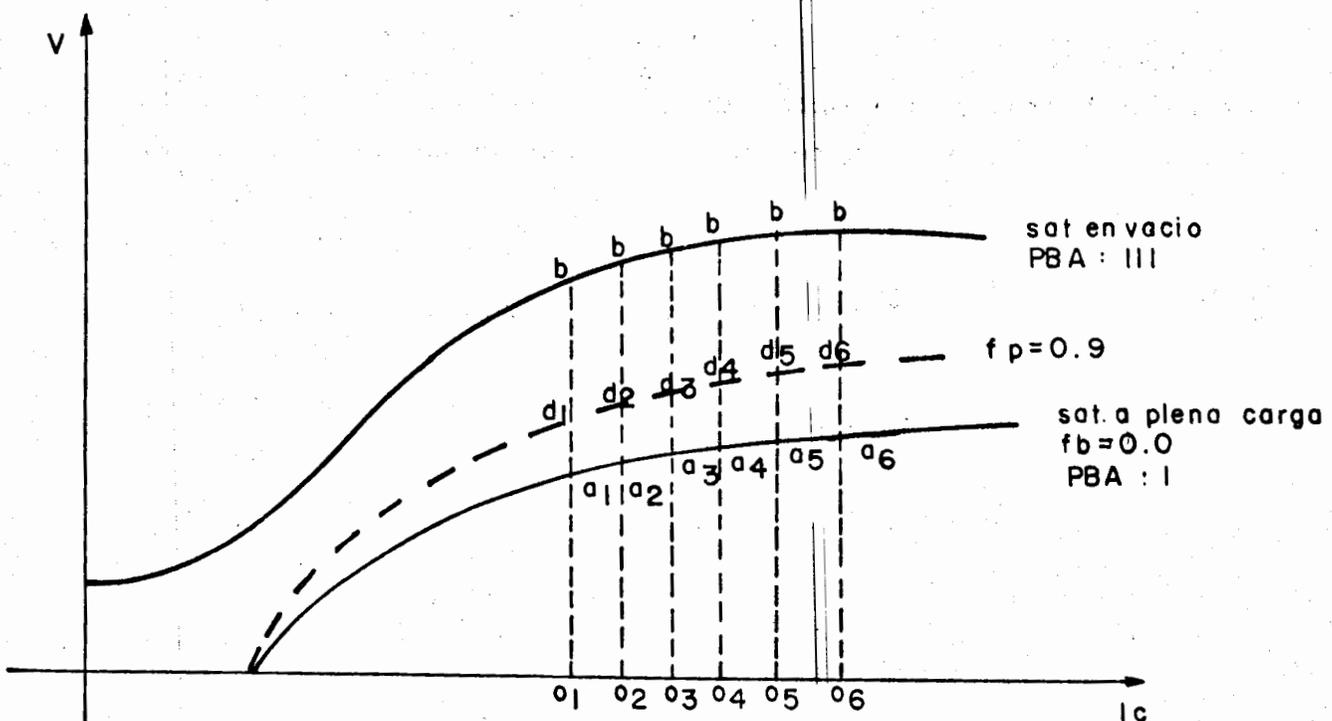


Fig. 54b

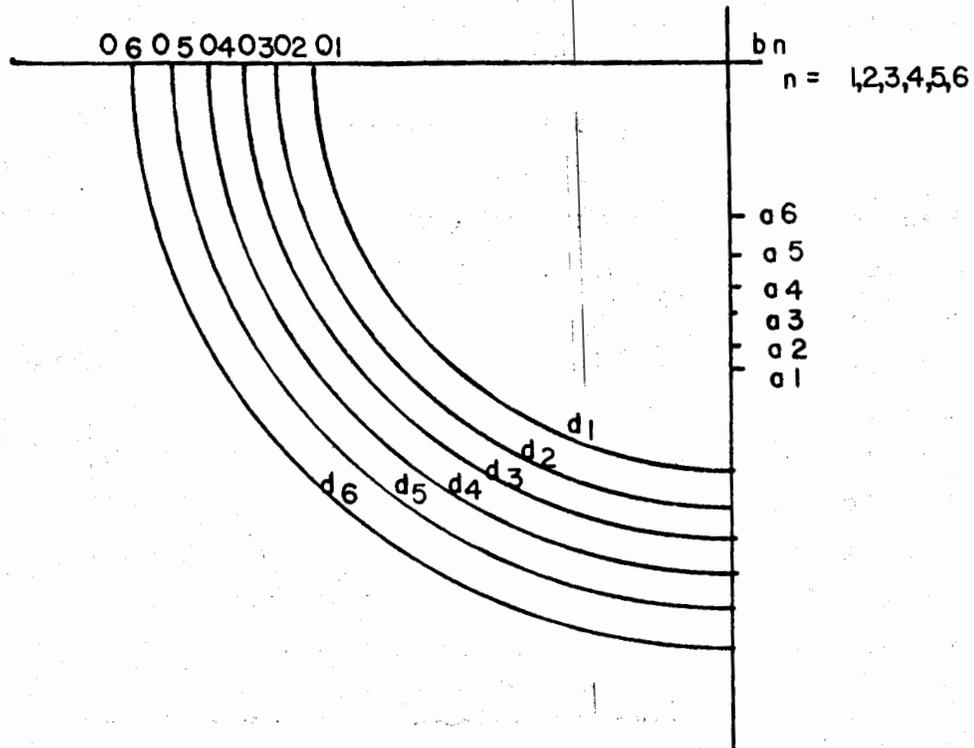


Fig. 54c

De esta forma, hemos obtenido como resultado los puntos d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 y d_6 que representan los puntos de la curva a $f_p=0.9$ a plena carga

I campo	V fase-neutro
2.0	65
2.5	97
3.0	121
3.5	144
4.0	158
4.5	171

con este diagrama podemos determinar cuando la máquina trabaja a:

cualquier fp su I_{ex}
y a cualquier carga determinada

Además nos permite conocer en un Gen. el:

$V_{terminal}$ a una I_{ex} determinada
para cualquier carga y fp

Ejemplo:

Donde: $\ominus = \text{Angulo } \cos 0.9 = 25.89^\circ$
 $a_o = \text{Voltaje a plena carga } fp = 0.0$
 $a_c = \text{Voltaje a plena carga } fp = 1$
 $a_d = \text{Voltaje a plena carga } fp = 0.9$

Se traza un cuadrante de radio "ob", en su extremo vertical se marca la distancia "ab" y por el se traza una línea horizontal hasta cortar la circunferencia en "c". A partir de "ac" se traza el ángulo ($fp = 0.9$) y se traza la recta "ad" la cual representa la magnitud en ese punto de la curva a $fp = 0.9$.

Obteniendo varios puntos se puede trazar la curva a $fp=0.9$ a partir de trazar diagramas semejantes para un número determinado de segmentos verticales que se construyen a lo largo de las dos curvas.

Otras aplicaciones

Curvas a diferente fp y a diferente carga

Como es fácil comprender de los diagramas anteriores, se pueden

determinar las características de la máquina trabajando a cualquier fp. Además nos permite conocer el voltaje terminal de un generador par cualquier carga y fp que sean a una I de excitación dada, ya que la construcción anterior puede hacerse repetitiva para cualquier fp que se desee, así como también puede conducirse nuevamente para otro tipo de carga.

Ejemplo: $\frac{1}{2}$ carga
 $\frac{1}{4}$ carga
 etc.

Con lo anterior puede determinarse el porcentaje de regulación del generador:

$$\% \text{ REG} = \frac{V_{\text{vacío}} - V_{\text{carga}}}{V_{\text{carga}}} \times 100$$

Determinación de la reactancia de dispersión X_1 y reacción de armadura por el método de Potier.

La determinación de este método impone la necesidad de disponer de:

- a) Curva de saturación en vacío
- b) Curva de saturación a I_N y fp = 0

El voltaje terminal de un generador síncrono bajo carga, difiere del que se obtiene a circuito abierto, con la misma corriente de excitación.

Lo anterior es ocasionado por 3 efectos (Fig. 55)

- a) Reacción de armadura

- b) Caída de voltaje en la reactancia de dispersión
 c) Caída de voltaje en la resistencia de la armadura

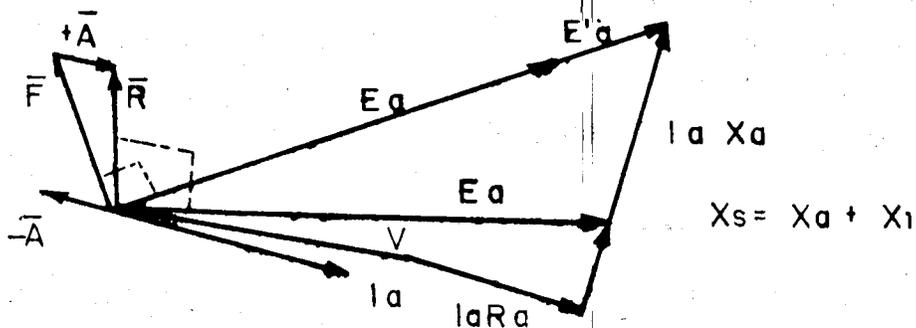


FIG. 55

La relativa influencia de los 3 factores depende principalmente del fp de la carga, lo que se aclara mejor al construir el diagrama fasorial cuando las condiciones son I_N y $\text{fp} = 0.0$

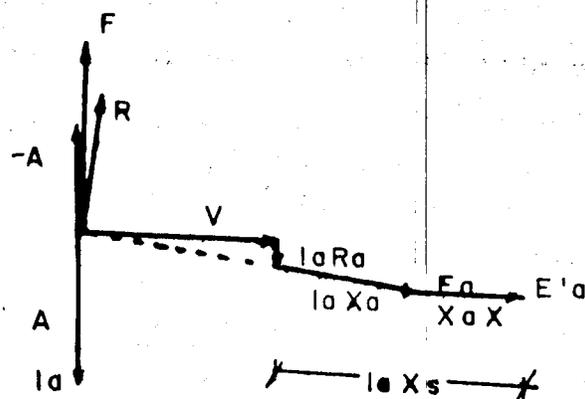


FIG. 56

Según estas condiciones, el decremento en el voltaje terminal es debido prácticamente a la reacción de armadura y a la reactancia de dispersión, ya que el efecto de la resistencia de por sí es pequeña y ahora en cuadratura es prácticamente despreciable.

Así el campo resultante \bar{R} es de hecho igual a la diferencia algebraica entre \bar{F} y \bar{A} ; y el voltaje terminal V es igual a la diferencia algebraica entre E_a e $I_a X_a$.

En la Fig. 57 se reflejan las curvas de:

- Saturación en vacío y
- Saturación I_N y $f_p = 0.0$

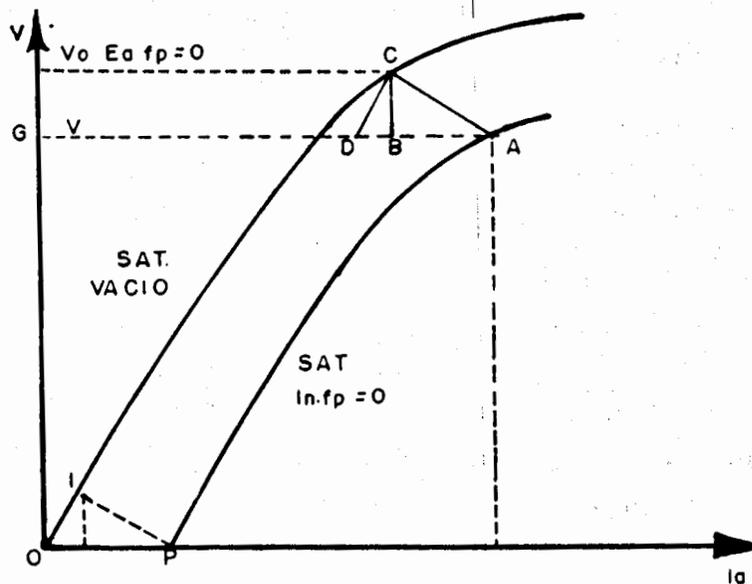


Fig. 57

Elijamos dos puntos de las curvas que tengan el mismo valor de saturación, sean C y A.

Según se indica en este caso la diferencia de voltaje o desplazamiento entre ambas curvas dependerá

- 1) Horizontalmente, por la reacción de armadura cuyo efecto proviene de la diferencia algebraica entre \bar{F} y \bar{R} para dar \bar{A} (segmento \bar{BA})
- 2) Verticalmente, por la caída $I_a X_a$ en la reactancia de dispersidad de la armadura (segmento CB).

De acuerdo a la Fig. 57

$$E_a - V = I_a X_a$$

y

$$I_a = CB$$

$$X_a = \frac{CB}{I_a}$$

El porqué el segmento BA representa la reacción de armadura se encenderá y quedará demostrado si nos referimos al siguiente desarrollo.

Como los puntos C y A corresponden a partes de igual saturación se tendrá que:

$$(E_a)_{fp=0} = 0 = 0 = V_0 \quad (1)$$

Los puntos G, A corresponden a la excitación de la máquina de $fp = 0.0$ y GB al punto de excitación en vacío.

Sin embargo $E_a \text{ a } fp = 0 \sim \bar{R}_{fp=0}$

$V_0 \text{ vacío} \sim \bar{F}_{\text{vacío}}$

De (1) puede concluirse que:

$$\bar{F}_{\text{vacio}} = \bar{R}_{\text{fp}=0} \quad (2)$$

según la Fig. 57

$$GA = \bar{F}_{\text{fp}=0} \text{ y } GB = \bar{F}_{\text{vacio}}$$

$$GA - GB = \bar{F}_{\text{fp}=0} - \bar{F}_{\text{vacio}} \quad (3)$$

Sustituyendo 2) en 3)

$$GA - GB = \bar{F}_{\text{fp}=0} - \bar{R}_{\text{fp}=0} = \bar{A}_{\text{fp}=0}$$

Que es lo que se desea demostrar

Como la reacción de armadura es un efecto neto de la corriente de armadura I_a , se concluye que:

$$\bar{A} = BA = KI_a$$

Para otra corriente que no fuera I_n ; sea I :

$$\bar{A}^1 = I \frac{BA}{I_a}$$

Para poder trazar el triángulo de Potier, es necesario disponer de algún método para localizar los dos puntos correspondientes a la misma saturación que a continuación describimos uno de ellos.

Refiriéndonos a la Fig 56

1) Se observa que ambas curvas son paralelas, por lo tanto el

triángulo rectángulo ABC se podrá repetir en cualquier parte de ellas.

- 2) Transpórtese hasta eje de las abscisas este triángulo que será ahora IOP.
- 3) A partir del punto A se dibujará un segmento paralelo a igual OP lo que obtenemos el punto D.
- 4) A través de D, se traza un segmento paralelo a la parte inferior de la curva de saturación en vacío, cuya intersección con esta última curva localizará el punto C. Que es equivalente en saturación al punto A de la curva de saturación a I_N y $f_p = 0.0$

Nota: El diagrama de Potier aunque permite determinar experimentalmente la reacción de armadura y la reactancia de dispersión, supone condiciones normales de saturación para un $f_p = 0.0$ que nunca se logra en la práctica.

Por lo tanto en generadores de polos salientes en que el valor de la reacción de armadura se ve afectado considerablemente por el f.p. Dicho valor será más elevado que el real, al determinarse por este método.

Reactancia Síncrona Saturada

Como se demostró en la práctica anterior, el valor de la reactancia síncrona decrece conforme aumenta la saturación, así el valor de la reactancia bajo condiciones de saturación es llamada reactancia síncrona saturada. Su valor puede determinarse prácticamente utilizando el diagrama de Potier y las curvas de saturación en vacío y la de saturación a I_N con $f_p = 0.0$

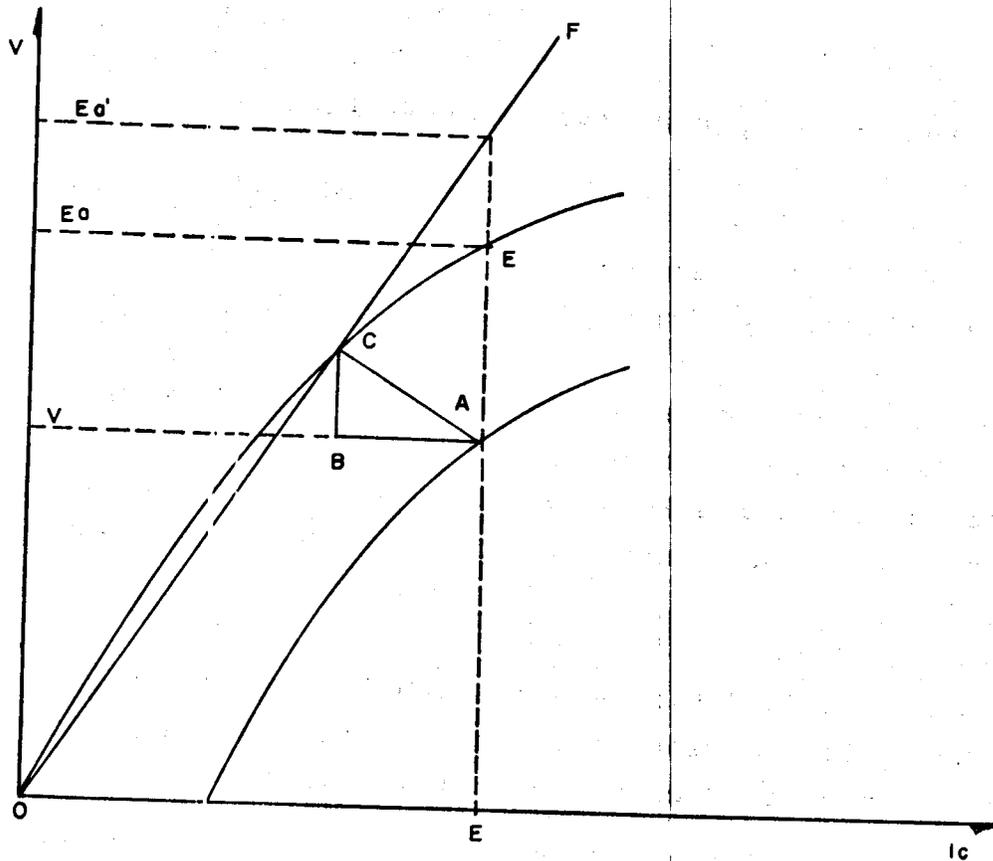


Fig. 58

De la Fig. 58 si la corriente a $fp = 0.0$, fuera removida sin alterar la excitación de la máquina OG, el voltaje terminal "V" se incrementará de GA a GE (Valor E_o). sin embargo en este cambio la saturación ha cambiado.

El segmento AE que representa el cambio de voltaje anterior, estará ocasionado por la caída debida a la reactancia de dispersión X_1 , más otra caída producida por el cambio del flujo causado por el efecto de reacción de armadura y que ha sido sustituida por el elemento reactivo X.

En resumen, esta caída representa el efecto total de la reactancia denominada sincrónica:

$$X_s = X_a + X_e$$

Sin embargo, esta caída en el diagrama vectorial (Fig. 56) no es coincidente con el voltaje terminal en vacío E_o , ya que según dicho diagrama, la caída reactiva producida por X_s estará representada por la que produce X_a y por la caída producida por el efecto de la reacción de armadura X_a siempre y cuando la saturación hubiera permanecido igual a la condición de I_n , lo cual se cumple en el segmento AF de la Fig. 58 y donde se representa la X_s de la Fig. 56.

Esto es cierto ya que la saturación que se mantenía en "A" da condiciones de I_N y que es la misma en "C" se mantuvo constante a través de este punto al trazar la línea OCF. En este punto el voltaje terminal en vacío hubiera sido $E'a$ y no E_o cuyo valor del primero esta representado por GF.

En estas condiciones se tendrá:

$$X_s = \frac{AF}{I_a} ; I_a = I_n \text{ de armadura}$$

En todo caso será necesario trabajar siempre bajo las condiciones de la saturación impuestas por la corriente nominal, ya que siempre la construcción de diagramas fasoriales supone condiciones de saturación constante.

3.3 Sincronización

Acoplamiento en paralelo y sincronización de los generadores de corriente alterna

El objetivo principal de conectar dos o más generadores en paralelo

lo, es el de aumentar la capacidad del sistema eléctrico a un mismo voltaje de alimentación.

Para efectuar esta conexión en paralelo se deberán sincronizar los generadores que se deseen acoplar, para lo cual se deberán cumplir tres requisitos, que son:

- a) La frecuencia de ambas máquinas deberá ser la misma
- b) El voltaje de las terminales de una de ellas, deberá ser numéricamente igual al de la otra máquina.
- c) El voltaje de una de ellas, con respecto a la carga externa del circuito, deberá estar en fase con el del otro generador en el punto de contacto de ambos. Esto significa que la secuencia de fases de ambos, debe ser la misma.

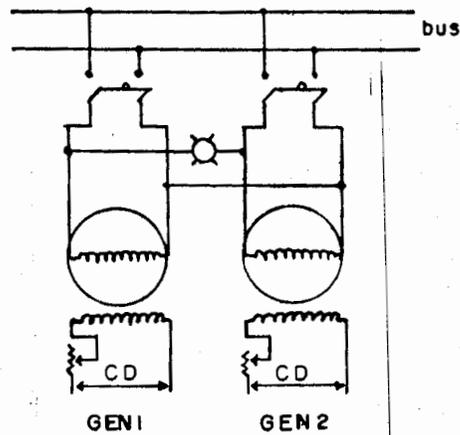
Para saber si los requisitos anteriores se cumplen, con objeto de estar seguros de que el acoplamiento por realizar esté correcto, existen 4 métodos que nos lo indicarán y que son:

1. Por medio de lámparas
2. Por medio del sincronoscopio
3. Con osciloscopio
4. Sincronizador automático

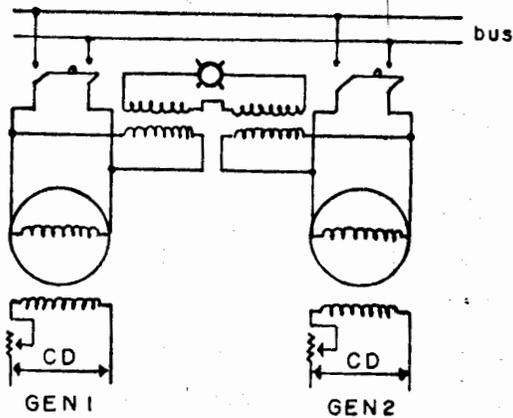
El procedimiento para conectar los generadores en paralelo es muy similar, para el caso de que sean monofásicos, de 2 ó 3 fases.

Generadores monofásicos

El circuito de conexión será la siguiente



(a)



(b)

Fig. 59

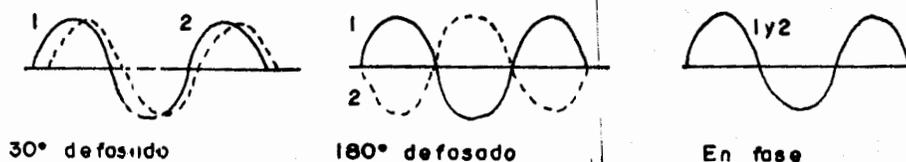
representándose en la Fig. 59a cuando es bajo el voltaje, y en la Fig. 59b cuando es en alto voltaje, donde se intercalarán transformadores de potencial para bajar el voltaje de alimentación al nominal de la lámpara.

El procedimiento a seguir para efectuar la sincronización será:

1. Se pondrá en marcha el generador 1 ajustándolo a su velocidad nominal
2. Se ajustará con su reóstato de campo su voltaje nominal.
3. Se comprobará la frecuencia con un frecuencímetro, o se calculará a partir de la velocidad y número de polos de la máquina.

$$f = \frac{NP}{120}$$

4. Se cerrará el interruptor correspondiente alimentando al bus de distribución.
5. Se harán las mismas operaciones para el generador número 2, pero antes de conectarla al sistema se comprobarán los requisitos mencionados en un principio, de la manera siguiente:
6. Según se indica en las figuras, se unirán los generadores por medio de dos líneas, intercalando en una de ellas una lámpara, la cual deberá tener una capacidad en voltaje de 60 a 80% mayor del nominal.
7. En el momento en que la lámpara se encuentra apagada, nos indicará que las máquinas se encuentran en fase, pues en caso contrario, a través de la lámpara circulará una corriente, que se deberá a la resta vectorial de los voltajes de las máquinas como se representa en la figura.



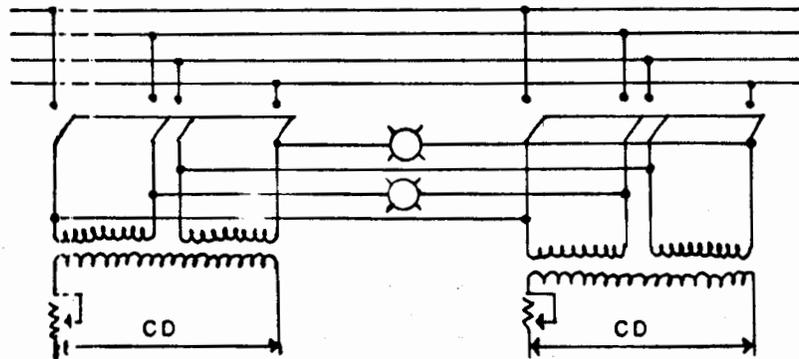
8. En el caso de que se emplee un sincronoscopio, sus bornes terminales se conectarán a los que en la figura está conectada la lámpara.

Generadores de 2 fases

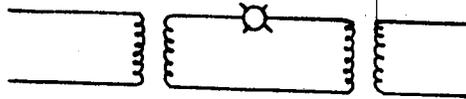
El procedimiento a seguir para la sincronización de este tipo de generadores es exactamente igual al anterior, pero con la diferencia de que en este caso podría suceder que las lámparas encendiesen alternadamente, indicándonos que la secuencia de fases es incorrecta, cosa que corregiremos al intercambiar las terminales de una de las máquinas.

El interruptor deberá cerrarse cuando ambas lámparas se encuentran apagadas.

El circuito será el mostrado en la figura siguiente:

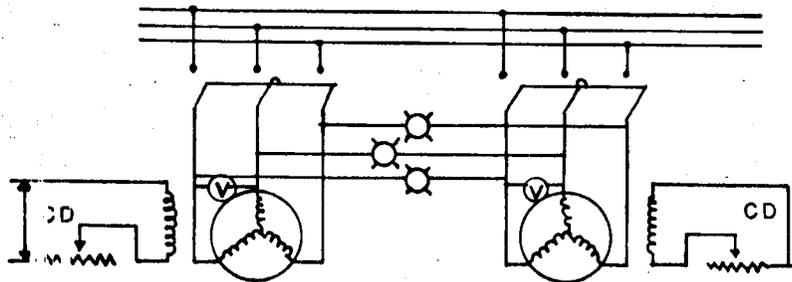


Cuando se tengan voltajes muy altos, como en el caso anterior se usarán transformadores de potencial, o sea, quedaría como sigue:



Generadores trifásicos

La conexión por utilizar será como sigue:

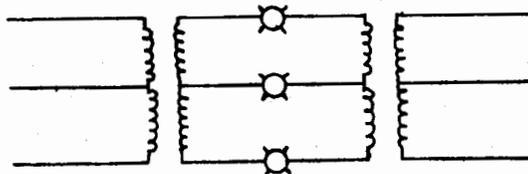


El procedimiento a seguir para la sincronización de los generadores trifásicos será muy similar al ya descrito para los generadores monofásicos, o sea, se arranca uno de ellos a su velocidad normal, regulándose su voltaje y frecuencia normales se cierra entonces el interruptor, de conexión al bus; se hace lo mismo con el otro alternador, pero antes de cerrar el interruptor se igualará el voltaje con el primero, ahora, según sea mayor o menor la diferencia de frecuencias de los dos generadores, será más o menos frecuente el apagado y encendido alternativo de las lámparas.

Cuando las lámparas estén apagadas, por supuesto no existirá diferencia de voltaje entre ellas y por consiguiente entre el interruptor de conexión que falta por cerrar. En este instante se habrán llenado los requisitos para la correcta sincronización y por lo tanto se podrá cerrar el interruptor sin causar ningún daño.

En el caso de que las lámparas no se enciendan y apaguen simultáneamente, será debido a que la secuencia de fases no es correcta en alguna de las máquinas, por lo que se corregirá al invertir dos de las fases de la máquina.

Si se está sincronizando con máquinas de alto voltaje, se hará uso de transformadores de potencial, siendo su conexión de la manera indicada a continuación.

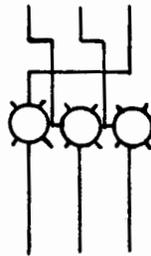


No sólo se puede sincronizar con focos de la manera ya indicada en los procedimientos anteriores, sino también puede usarse el de lámparas encendidas o el de dos encendidas y una apagada.

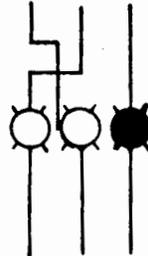
Los siguientes diagramas nos indicarán la manera en que deben de conectarse las lámparas cuando se quiera utilizar uno y otro procedimiento.



1. lámparas
apagadas



Lámparas
encendidas



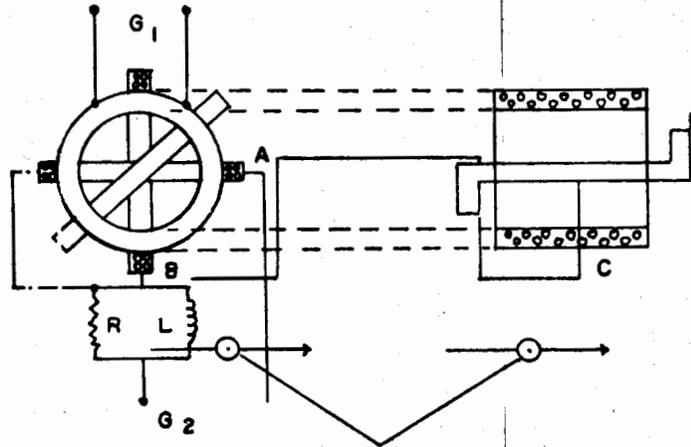
Dos encendidas y
una apagada

Para el primer caso, que es el ya visto se cerrará el interruptor cuando las lámparas estén apagadas; en el segundo caso cuando estén encendidas y en el tercero cuando dos estén encendidas y una apagada.

Sincronoscopio

Este aparato es diseñado para sincronizar generadores que se deseen conectar en paralelo, el cual proporciona el instante preciso en que se debe cerrar el interruptor para el acoplamiento co-

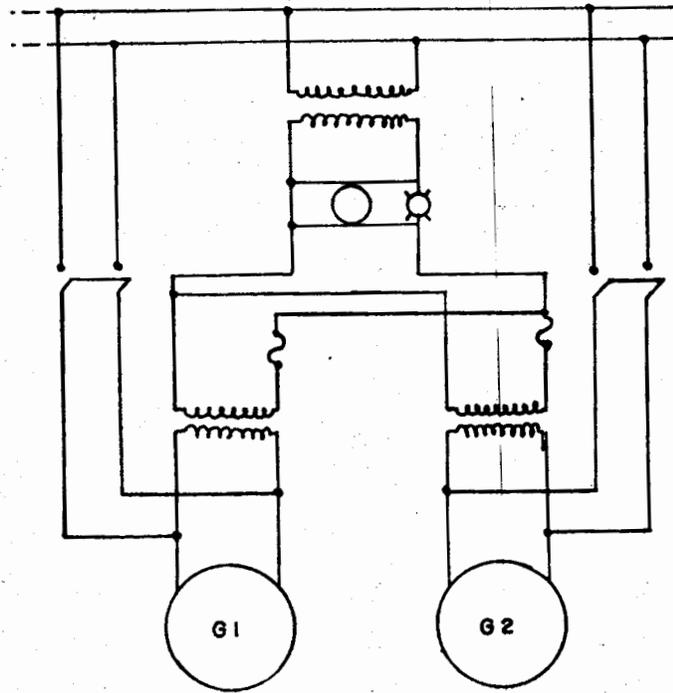
recto, sin embargo este aparato no proporciona la secuencia de fases, por lo que en muchas instalaciones, se usan además del sin cronoscopio, las lámparas para determinar esta secuencia.



Según se puede observar en el diagrama, las bobinas A y B en cu adratura, constituyen la armadura del sin cronoscopio (este es un motor bipolar), los cuales están conectados a través de una resis tencia y una inductancia a las barras colectoras. La bobina esta cionaria que forma el embobinado de campo del motor, esta conecta da a la máquina por sincronizar. El elemento D es un núcleo de hierro montado en joyas.

En el momento en que los pares que se tienen por el efecto electro magnético estén equilibrados, nos determinará el instante de igual dad de voltajes y frecuencias.

La manera de conectar el sin cronoscopio al sistema está representa do en la siguiente figura:



Osciloscopio auxiliar

Con la ayuda de un osciloscopio con entrada a dos señales también se puede verificar la sincronización.

Una de las señales es utilizada en uno de los generadores o sistema de referencia y la otra para el generador que se desea sincronizar. El acoplamiento se realiza al identificar las dos señales de voltaje en coincidencia, por supuesto es necesario determinar previamente la secuencia de fases con el método de las lámparas.

Sincronizador automático

En la actualidad, el acoplamiento de los generadores requieren alto grado de precisión, que se tiene solo con sistemas automáticos de sincronización, que evitan probabilidad de fallas, como cuando estas operaciones se hacen de manera manual.

Este tipo de instrumentos se basan en un circuito sensor que detecta la diferencia de potencial entre fases por sincronizar y que dispara el relevador de acoplamiento cuando el voltaje es cero.

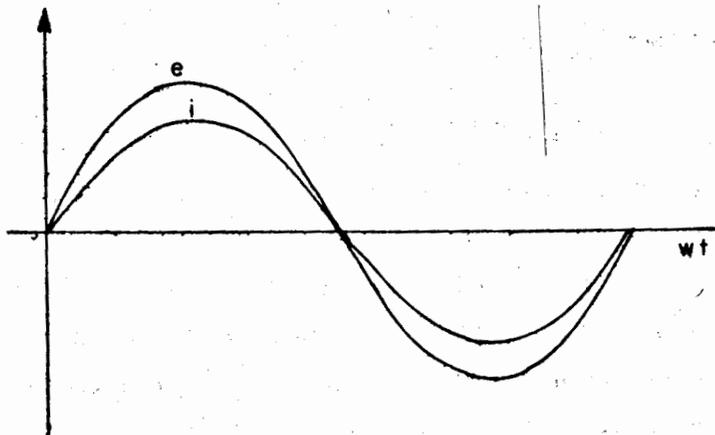
Es necesario igualmente conocer previamente la secuencia de fases.

3.4 Regulación de voltaje de un generador síncrono

Diagramas fasoriales de la máquina síncrona

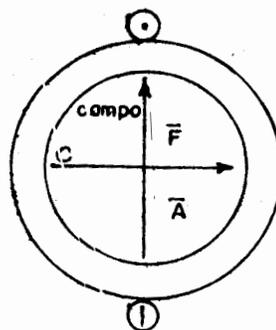
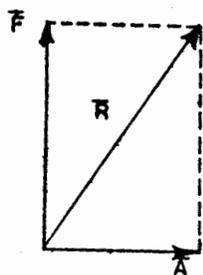
Sea un generador síncrono que opera a factor de potencia unitario.

Considérese que " F " es la fuerza magnetomotriz (F.M.M.) producida por el campo magnético que induce la tensión " e ". Al momento de



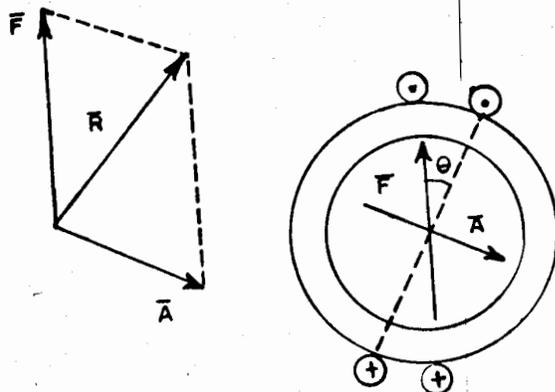
circular corriente, se producirá una nueva fuerza magnetomotriz denominada " \bar{A} " que se conoce como "Reacción de Armadura".

En el ejemplo considerado, por el hecho de estar en fase la tensión inducida y la corriente, se establecerá una composición de fasores en cuadratura tal como muestra la siguiente figura. Observe que la dirección de la reacción de armadura puede determinarse siguiendo la regla de la mano derecha o del tirabuzón, considerando que la corriente fluye en el sentido indicado. Para efecto de simplicidad se considera una sola bobina en la armadura o inducido del alternador.

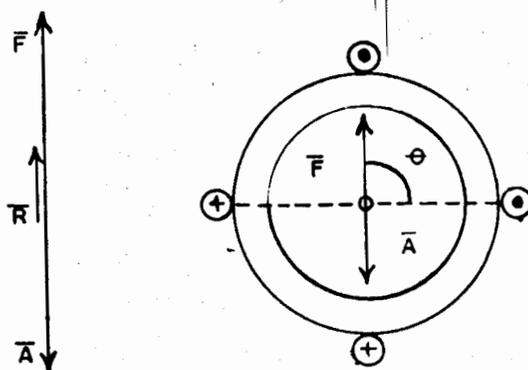


La composición de fasores dará lugar a un campo resultante denomi-
nado " \bar{R} ", como se observa a continuación.

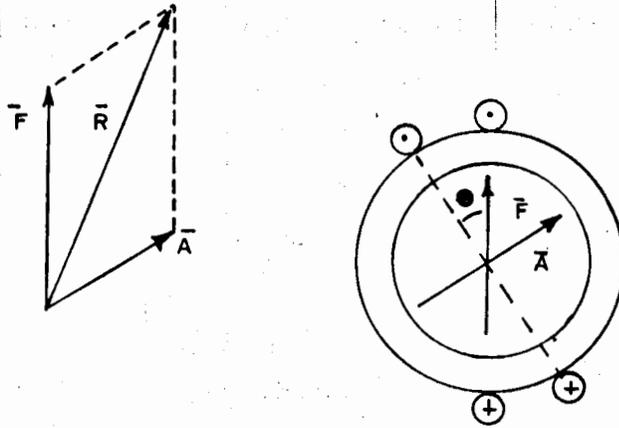
Ahora bien, supongamos que la carga del alternador se altera y se
incluye un elemento reactivo inductivo; se tendrá una corriente
atrasada que dará lugar a las siguientes condiciones.



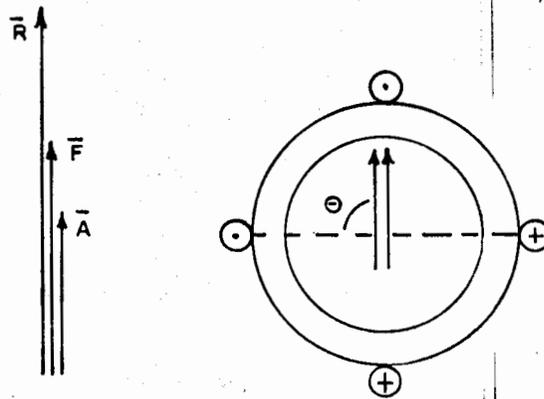
En un extremo si la carga fuera netamente inductiva se observaría
la siguiente construcción de fasores:



Considerando ahora una carga reactiva capacitiva, se obtendría que:



Nuevamente en un extremo, considerando un efecto capacitivo se obtendría:



De lo anterior puede concluirse que cuando un alternador trabaja con cargas inductivas su campo neto resultante " \bar{R} " se debilita a un mínimo, en tanto que trabajando con cargas capacitivas dicho campo " \bar{R} " se robustece a un máximo. La situación resistiva (f.p.

unitario) dará lugar a una condición intermedia.

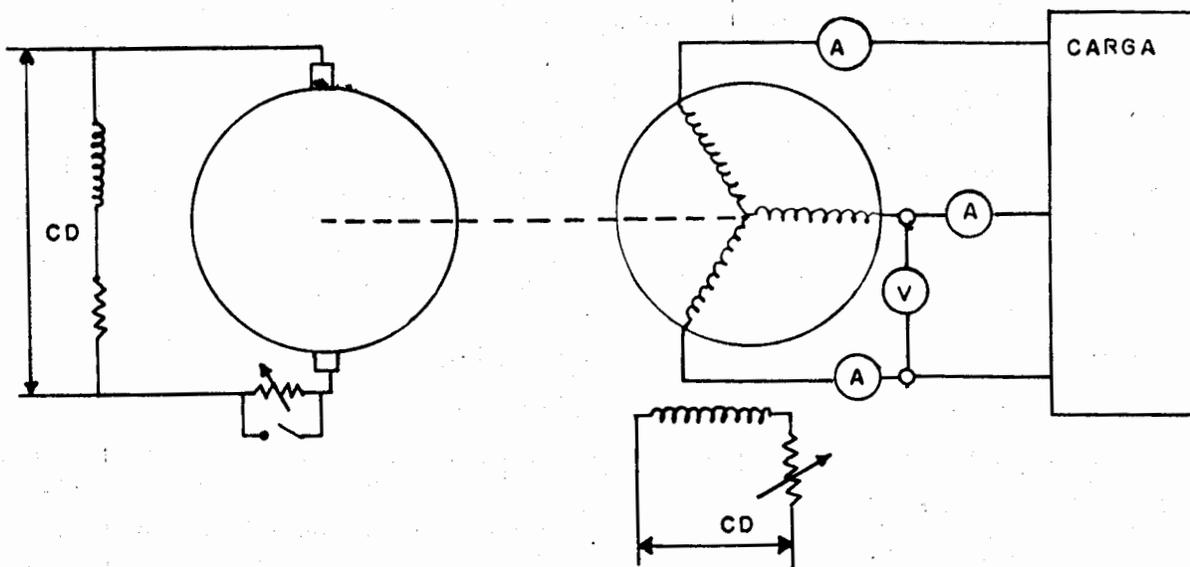
Aplicando ahora este efecto sobre el concepto de regulación, se podrá establecer que si a un alternador se le aplican diferentes tipos de carga inductiva, capacitiva y resistiva, la regulación del alternador dada por la fórmula:

$$\% \text{ Regulación} = \frac{\text{Voltaje terminal sin carga} - \text{Voltaje terminal con carga}}{\text{Voltaje terminal con carga}}$$

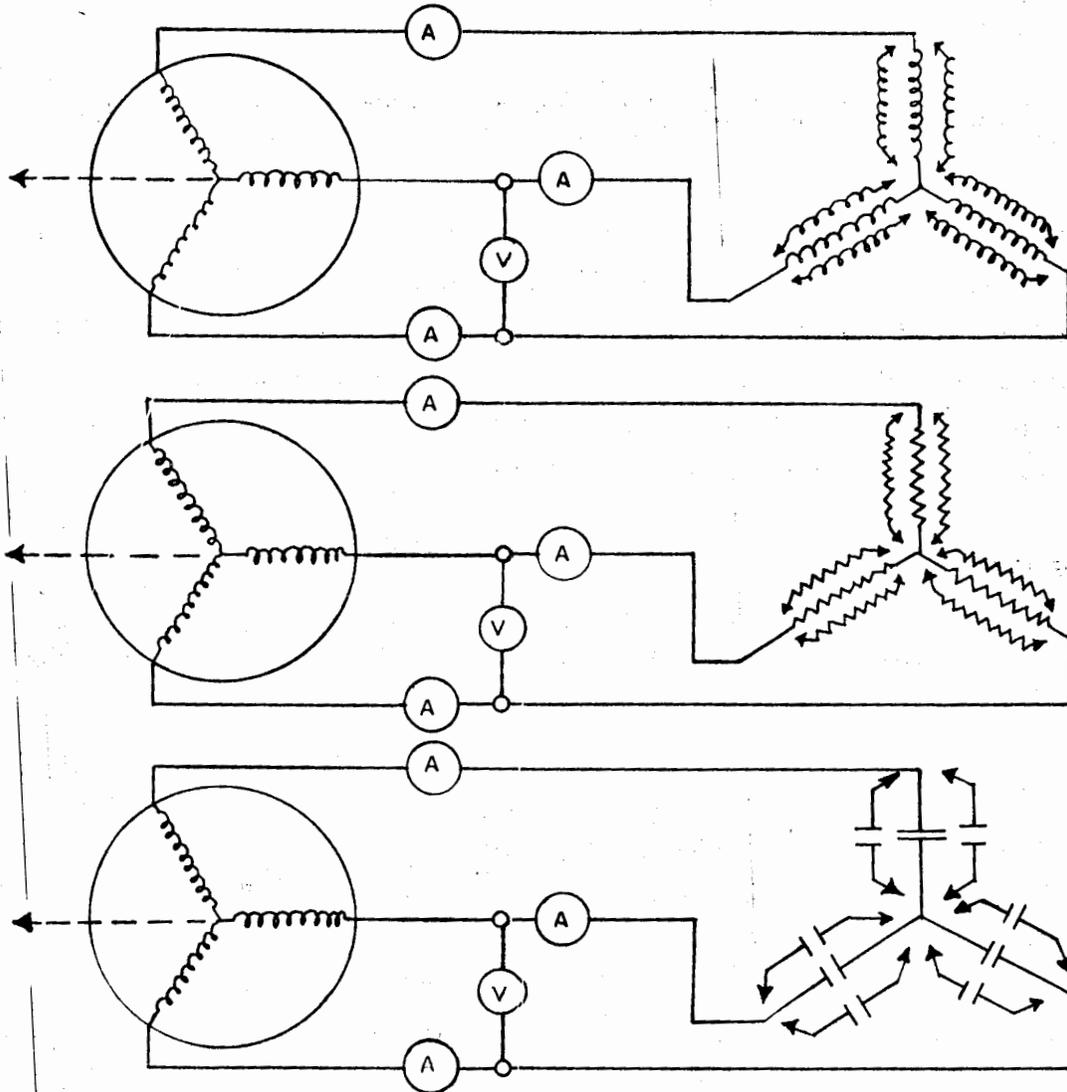
podrá ser positiva con valores elevados cuando se aumentan cargas inductivas al ser muy reducido el voltaje con carga, por efecto de una fuerza magnetomotriz "R" reducida. En tanto que con cargas capacitivas, dicho valor se tornará negativo al ser el voltaje terminal con carga más elevado que el de sin carga, por efecto de una fuerza magnetomotriz "R" elevada.

Comprobación

Para comprobar lo anterior, realizamos la siguiente prueba, utilizando el diagrama mostrado a continuación:



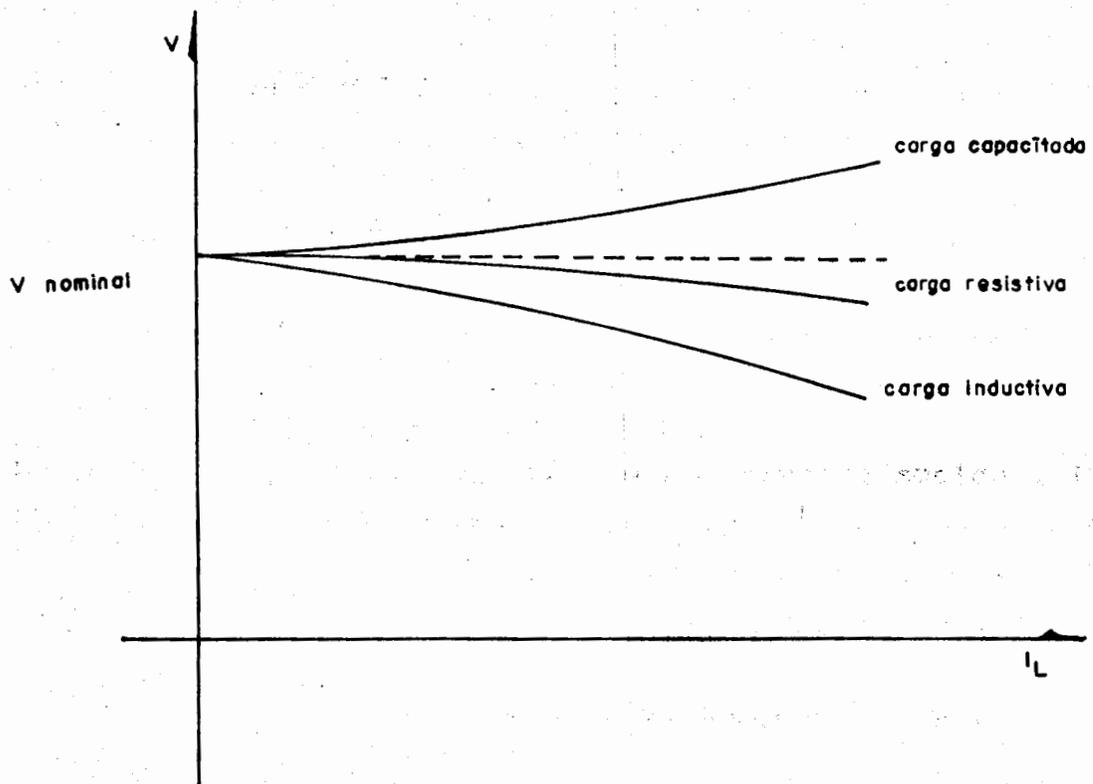
La carga, como se ha mencionado, será de 3 tipos: inductiva, resistiva y capacitiva.



Para realizar la práctica, se hace trabajar al alternador por medio de un motor de C.D., operándolo a su velocidad, (frecuencia) y voltaje nominales, la carga se incorpora paulatinamente y se toman las lecturas siguientes:

N rpm	V	IL
Ctes		

Con los valores determinados se construye la siguiente gráfica, que debe verificar el planteamiento inicial.



3.5 Arranque de motores síncronos, características y curvas "V"

Características

Existen varias particularidades que diferencian al motor síncrono del alternador, que pueden adaptarse en estas máquinas, cuando sólo van a trabajar como motores. Algunas de estas particularidades pueden ser las siguientes:

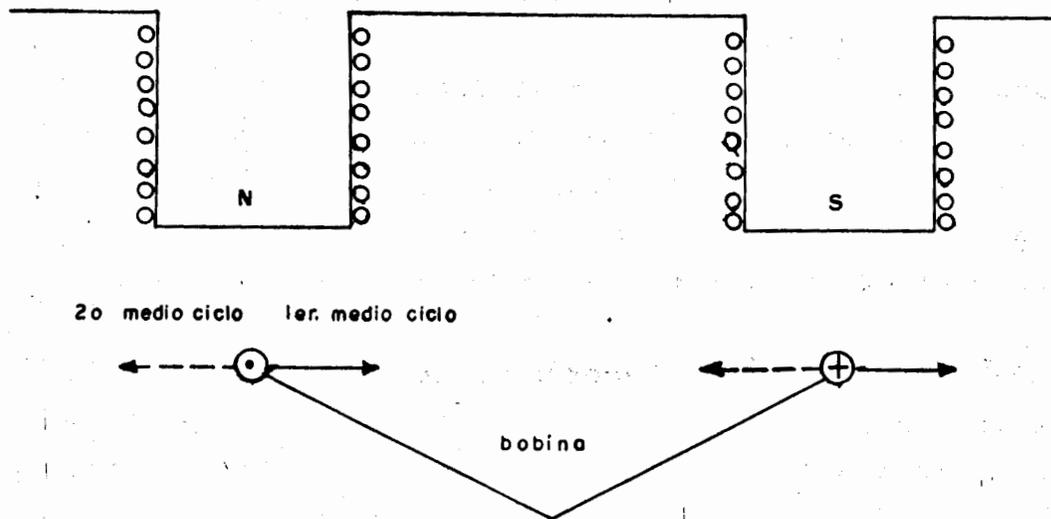
1. Tienen una jaula de alta resistencia en las piezas polares, con el objeto de tener un par de arranque más elevado.
2. Mayor relación entre la potencia máxima y la normal para facilitar la transición entre el arranque y la marcha normal.
3. Devanados dobles en cada circuito, conectados normalmente en paralelo, a los cuales, durante el arranque se conecta uno de ellos a la línea, bajando por lo tanto la corriente de arranque a la mitad.
4. Embrague de fricción, que permitirá que el motor arranque sin carga, incrementando posteriormente ésta en una forma progresiva.
5. Devanado trifásico colocado en ranuras hechas en las piezas polares con anillos de contacto con objeto de conectar éstos a un reóstato externo de arranque.

El problema principal que existe en este tipo de máquinas es el arranque, problema que ha sido resuelto por varios métodos, siendo los más efectivos los siguientes:

- a) Arranque por inducción
- b) Arranque con ayuda de un motor auxiliar

a) Arranque por inducción

En el período de arranque con corriente alterna, los polos no deberán estar excitados con corriente directa. Esto es debido a que los impulsos que el flujo polar imprime al rotor son alternativa-mente positivos y negativos, según se muestra en la figura:



En este diagrama en el momento de arranque, la corriente en la bobina tiene el sentido dibujado durante el primer medio ciclo. Si tomamos en cuenta el flujo en las piezas polares, según la regla de la mano derecha, la bobina experimenta una fuerza hacia la derecha, pero durante el 2o. medio ciclo, la corriente circula en sentido contrario, produciendo un par hacia la izquierda, o sea, el rotor sufre impulsos hacia uno y otro lado. Concluyendo entonces que para que la fuerza sea constante hacia la derecha, la bobina deberá avanzar un paso polar completo hacia la derecha durante medio ciclo, condición que en el arranque no puede cumplir la bobina.

Como resultado de esto, es que el motor tiende a oscilar, y como la variación de la dirección de la corriente es de 60 cps., el ro

tor no se mueve. La condición necesaria para que la bobina pueda recorrer ese paso durante medio ciclo, es que la máquina está girando a la velocidad de sincronismo, velocidad, que está dada por

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

El arranque por inducción es posible debido a una red de barras en forma de jaula de ardilla, colocadas en la superficie polar y unidas entre sí en corto circuito. Entonces para el arranque se eliminará en primer lugar la excitación, posteriormente se aplicará corriente alterna a la armadura, operando entonces la máquina como motor de inducción, la cual aumentará su velocidad hasta poco menos que la de sincronismo, donde finalmente se pondrá la excitación operando entonces como motor síncrono.

En algunas máquinas suele hacerse el corto circuito de las barras, en el exterior por medio de un reóstato de arranque, lo que implicará entonces 5 anillos rozantes, dos para el campo y tres para la jaula.

b) Arranque ayudado con un motor auxiliar

Cuando se usa este procedimiento, debe tenerse el motor que ayudará al arranque acoplado en la misma flecha. Este acelerará el motor síncrono hasta que tenga su velocidad de sincronismo, conectándose en este momento la excitación. En algunas ocasiones este motor auxiliar suele ser la excitatriz.

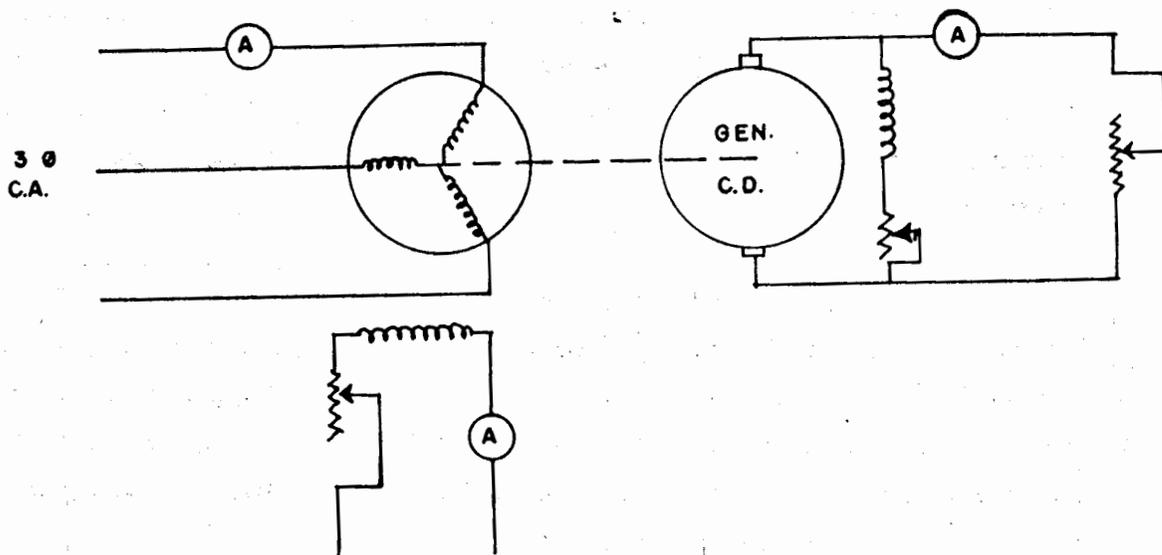
Curvas "V"

El motor síncrono además de las características similares a las de cualquier alternador, como saturación en vacío y en corto circuito a factor de potencia cero, etc., tiene también curvas especiales de su operación. Entre éstas, se tienen las curvas "V", denominadas

así por la forma que presentan, las cuales relacionan las corrientes del estator y del rotor para una carga dada y una tensión constante.

Las curvas "V" tienen varias aplicaciones, entre las cuales se puede contar el ajuste previo de la corriente de campo de un motor cuya carga es variable, cuando se desea mantener el factor de potencia dentro de los límites especificados y no existe personal para ello. Para ésto se marcan puntos en cada curva en el factor que les corresponda, ya sea por lectura del factorímetro, o por la relación que exista entre la ordenada máxima y la actual, método bastante aproximado de obtener el factor de potencia, y se busca un valor de corriente de campo tal, que la ordenada que se levante corte las curvas dentro de los límites de potencia y factor de potencia fijados.

Para nuestra práctica, encontraremos para un motor síncrono sus curvas "V" correspondientes para plena carga, tres cuartos de carga, media carga, un cuarto de carga y en vacío. El diagrama por utilizar será como sigue:



Al motor síncrono en prueba se le dará carga con un generador de corriente directa acoplado directamente al mismo.

El procedimiento a seguir será de la manera que se indica a continuación:

Se registrarán las lecturas indicadas en la siguiente tabla:

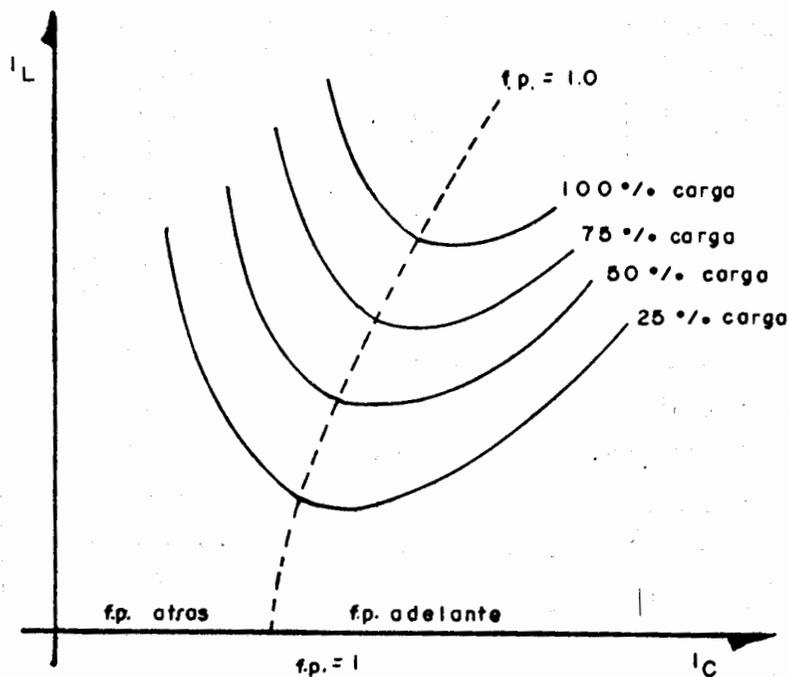
V_L	I_L	I_C
CTE		
"		
"		
"		
"		

Durante la prueba, el voltaje de alimentación del motor permanecerá constante.

1. Se arrancará el motor iniciándose por tomar en primer lugar la curva "V" sin carga, (solo se tendrá ligera carga que será producida por el arrastre del generador de corriente directa). Para determinar esta curva se iniciará disminuyendo prácticamente casi toda la excitación, para posteriormente ir aumentando paulatinamente y registrando en la tabla anterior corriente de excitación y corriente de línea.
2. Par obtener las demás curvas, o sea a 25, 50, 75 y 100% de carga se buscará primero el porcentaje de carga correspondiente a la curva que se vaya a tomar, variando para este fin la excitación del motor en prueba hasta encontrar el punto mínimo de carga, teniendo en ese entonces el factor potencial un

tario. En ese momento, por medio del reóstato de carga conectado al generador de corriente directa, se regulará para obtener la carga buscada.

3. Una vez obtenidos los datos correspondientes, se llevarán a ejes coordinados, refiriendo al eje de las abscisas a la corriente de campo, y al eje de las ordenadas a la corriente de línea.
4. Uniendo entre sí los puntos de corriente mínima en las curvas encontradas, se localizará la correspondiente al factor de potencia unitario. A la izquierda de esa curva se tendrán los factores de potencia atrasados y a la derecha adelantados.
5. La forma en que quedan representadas estas curvas es como sigue:



3.6 Determinación del par motor, potencia y eficiencia de un motor síncrono

Para la obtención de la eficiencia principalmente de motores pequeños (por ejemplo hasta 200 HP) se pueden utilizar dos métodos, que son por medio del freno de Prony y por medio del electrodinamómetro. Para máquinas de mayor capacidad, la eficiencia se obtiene por el método de pérdidas.

La eficiencia de un motor es el resultado de dividir su potencia de salida entre su potencia de entrada, donde ambas potencias deberán estar expresadas en las mismas unidades. Para un motor, su potencia de entrada generalmente se expresa en KW, y su potencia de salida en H.P. La conversión entre una y otra unidad está dada por las siguientes expresiones:

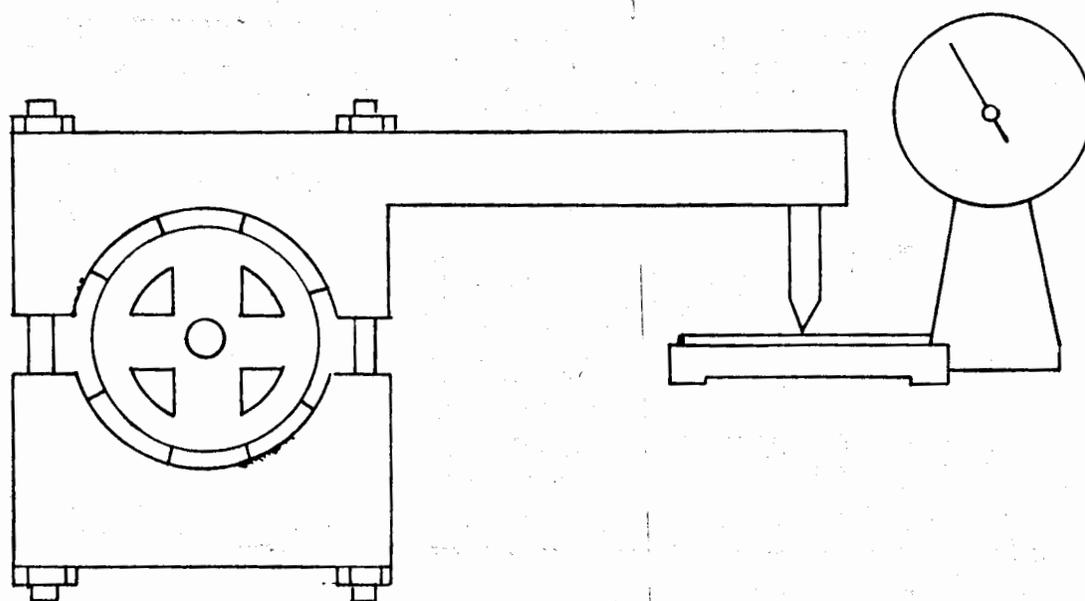
$$\begin{aligned} 1 \text{ H.P.} &= .746 \text{ KW} \\ 1 \text{ KW} &= 1.34 \text{ H.P.} \end{aligned}$$

Por lo cual, para obtener esta eficiencia habrá que encontrar las potencias antes mencionadas.

Freno de Prony

Este método es apropiado para motores hasta aproximadamente 50 H.P. El freno de Prony consiste de dos zapatas que rodean una polea del motor por probar, una de ellas tiene un brazo, en cuyo extremo libre se coloca una balanza. Una vez corregida la lectura en la balanza de acuerdo con la tara de la zapata, se tiene una fuerza F para cada potencia, que multiplicada por el brazo de palanca existente nos da el par. Este al multiplicarse por la velocidad angular en radianes por segundo nos da la potencia de salida del motor.

Ahora, la potencia de entrada se obtendrá a partir de las lecturas obtenidas en los wáttmetros instalados a la entrada del motor.

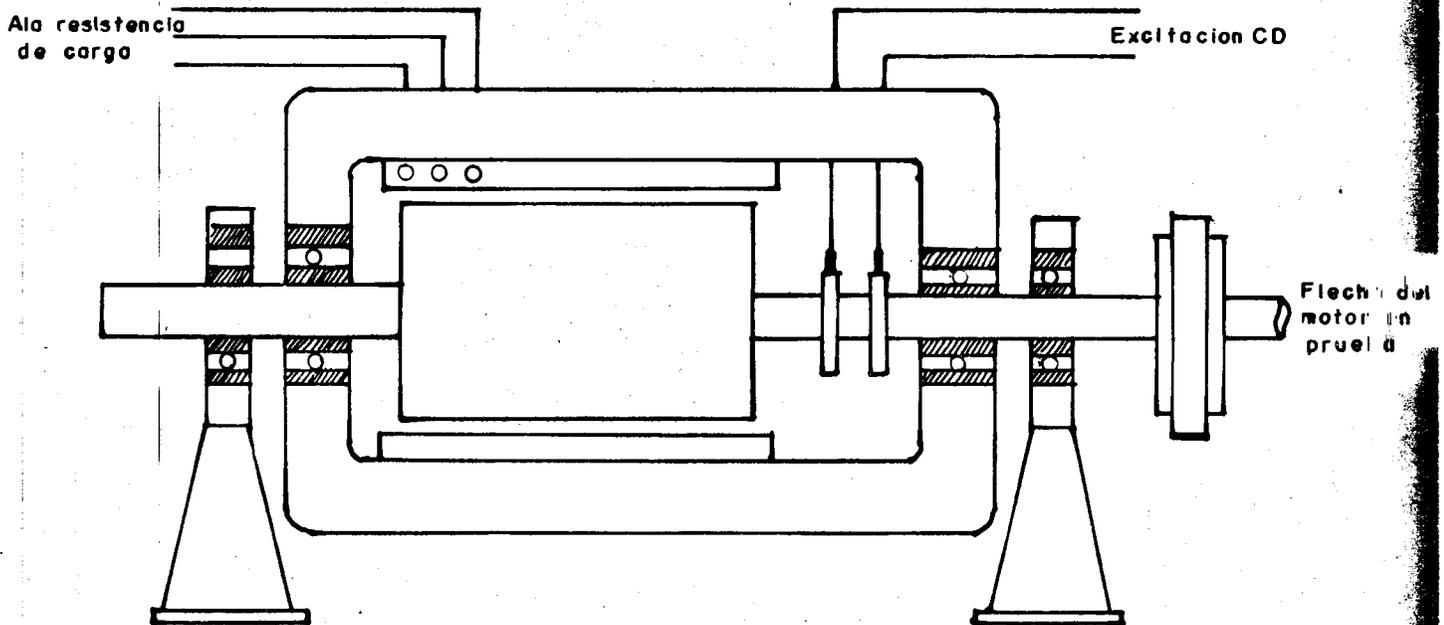


Cuando se prueban máquinas grandes es conveniente utilizar una polea hueca, con objeto de permitir un enfriamiento con agua en su parte interior.

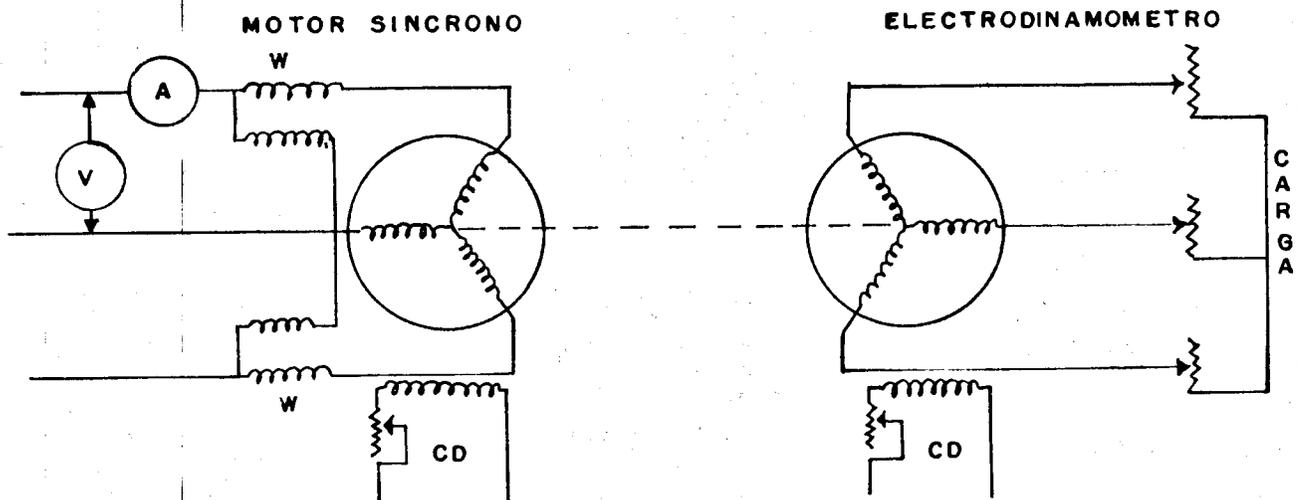
Electrodinámómetro

Para encontrar en el Laboratorio las curvas de par, potencia y eficiencia haremos uso de este equipo. El electrodinámómetro consiste de un generador que puede ser de corriente alterna o de corriente directa, construido de manera que el rotor y el estator puedan girar independientemente. El motor por probar se acoplará directamente al dinamómetro. La reacción entre la corriente del

rotor y del estator tienden a hacer girar la carga del mismo, produciéndose una fuerza que se registra en una balanza, siendo entonces el par producido por el motor el que se obtiene al multiplicar dicha fuerza por el brazo de palanca de la carcasa del electrodinamómetro.



El diagrama a utilizar en esta prueba es como sigue:



El procedimiento será el indicado a continuación

Se registrará la tabla siguiente de valores:

N R.P.M.	I_L Amp.	F Lbs.	T Pie-Lb	Pot.Mec. H.P.	Pot. Eléct. K.W.	N %	F.P

1. Se arrancará el motor en prueba acoplado al electrodinamómetro registrando las lecturas en la tabla anterior, iniciando la operación de arriba hacia abajo o sea, ir reduciendo la carga paulatinamente partiendo de aproximadamente 110% de la misma.
2. Las lecturas que se registrarán directamente serán la velocidad, corriente de línea, fuerza, potencia eléctrica y factor de potencia, siendo las faltantes calculadas a partir de las anteriores.
3. Su cálculo se hará de la siguiente manera. El primer lugar se calcula el par, al multiplicar las lecturas de las fuerzas ob

tenidas por el brazo de palanca del dinamómetro (en este caso particular es 0.875 ft).

$$T = F.r$$

A partir del par se calcula la potencia mecánica, utilizando la siguiente expresión:

$$\text{Pot. mec.} = \frac{2\pi T.N.}{33000}$$

donde

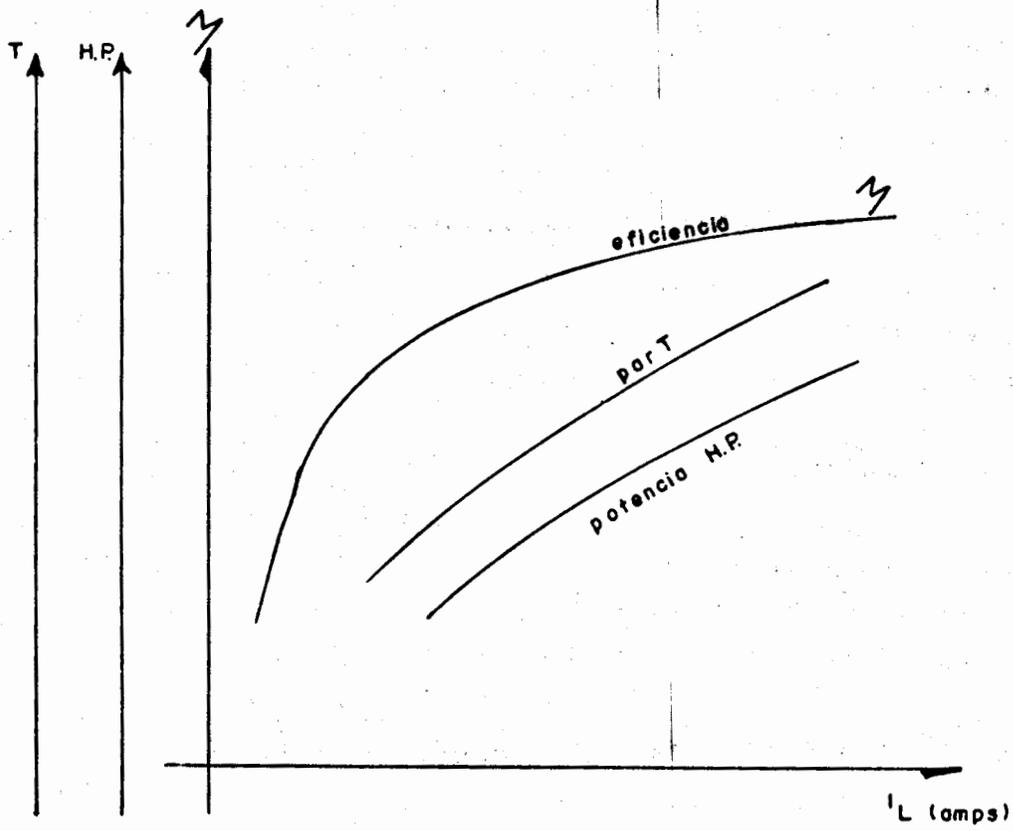
T. = Par

N. = Velocidad en r.p.m.

Esta potencia mecánica se obtiene en H.P., la cual al convertirse en KW, podremos obtener la eficiencia, por medio de la ecuación indicada a continuación:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia mecánica}}{\text{Potencia eléctrica}}$$

4. La prueba se deberá efectuar a un factor de potencia constante, el cual lo podremos regular por medio de la excitación de la máquina en prueba.
5. Los valores obtenidos del par, potencia y eficiencia se referirán a los ejes coordenados en las ordenadas, y en el eje de las abcisas quedará la corriente de línea.
6. Las curvas así encontradas tendrán una representación aproximada como las que muestran a continuación:



4.1 Determinación de la posición del eje neutro

La Fig. 60 muestra los ejes magnéticos del campo y de la armadura desplazado un ángulo θ . En ese instante existe corte de líneas de flujo por los conductores por lo tanto hay una F.E.M., inducida.

Si los ejes magnéticos coinciden, o sea, $\Theta = 0$ ó $\Theta = \pi$, no existirá corte de flujo por el conductor por lo que no habrá F.E.M., inducida.

A este punto de colocación del eje magnético de la armadura se conoce como eje neutro.

Existen varios métodos para determinar el eje neutro de los cuales describiremos tres de mayor frecuencia. Antes de efectuar las pruebas es conveniente limpiar lo mejor posible el conmutador y las escobillas a fin de tener un buen contacto entre ellos.

- Operación en los dos sentidos

.Se opera la máquina ya sea motor o generador en condiciones nominales, en un sentido de rotación.

.Se efectúa la misma prueba pero en sentido contrario de rotación.

.Si la velocidad o voltaje de ambas pruebas difiere en más de 2% deberán moverse las escobillas hasta que la diferencia no sobrepase este porcentaje.

- Por inducción con rotor fijo

Esta prueba consiste en inducir un voltaje al campo, a través de la armadura, y mover las escobillas hasta que este voltaje inducido sea cero, manteniendo el rotor fijo.

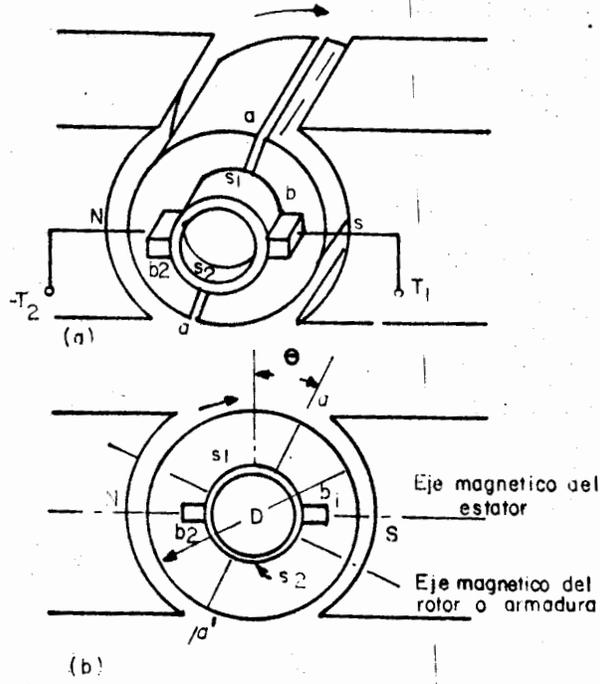


Fig. 60

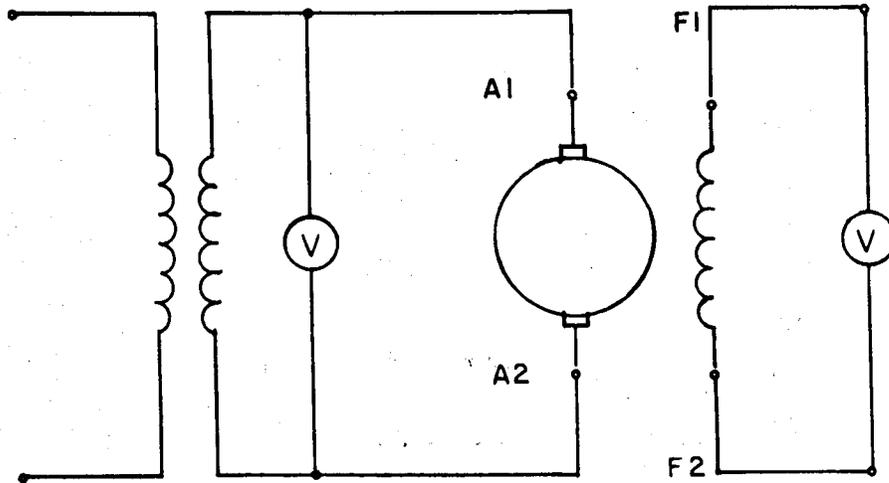


DIAGRAMA DE CONEXIONES

Para ésto es necesario que la excitación sea independiente.

El voltaje aplicado a la armadura podrá ser hasta de 80 V C.A.

- Curva de potencial

Esta prueba consiste en inducir un voltaje a la armadura a través del campo, por medio de un interruptor.

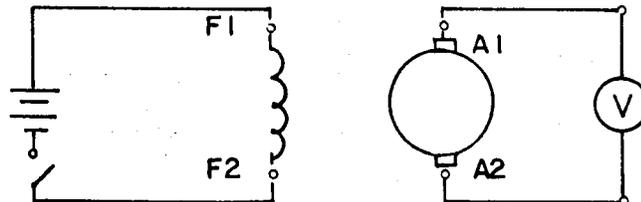
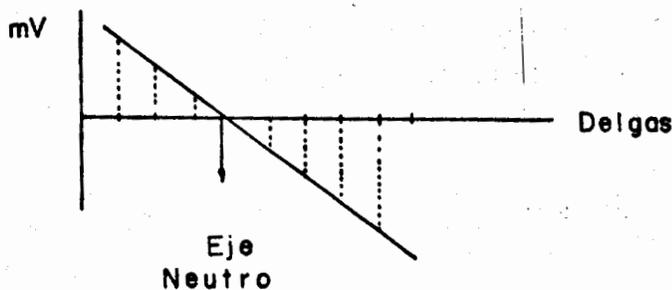


Diagrama de Conexiones

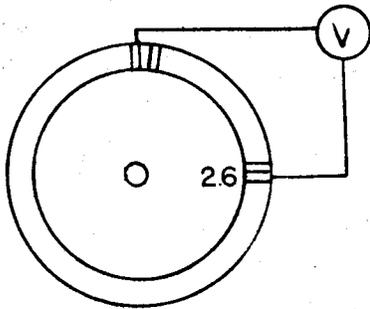
1. Es necesario que la excitación sea independiente con el rotor fijo.
2. Se cuentan las delgas que hay entre centros polares adyacentes o se divide el número de delgas del conmutador entre el número de polos. Esto nos da el paso polar (ejemp: 100 delgas, 4 polos, paso polar = $100/4 = 25$).
3. Se conecta un milivoltmetro entre una delga y la delga siguiente al paso polar (ejem: delga No.1-cualquiera y la delga No. 26).
4. Se abre a interruptor "A" del campo y se lee el voltaje inducido.
5. Se conecta ahora el milivóltmetro entre las delgas siguientes (ejem: delga No. 2 y la delga No. 27).
6. Se abre el interruptor "A" y se lee el voltaje inducido.
7. Se repiten los pasos anteriores conectando el milivóltmetro a las delgas siguientes.
8. Cuando el milivóltmetro cambie de polaridad será necesario intercambiar sus terminales y continuar el proceso, cuando menos tres delgas más.
9. Se traza una curva de potencial.



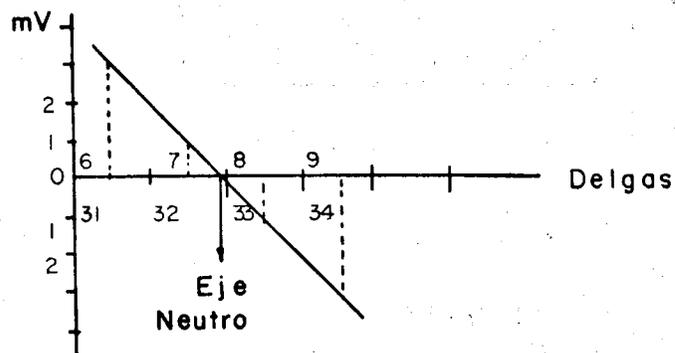
El ancho de cada delga está representado por el segmento entre dos marcas.

10. Del centro de cada delga se trazan los valores de voltaje inducido de 2 lecturas, antes de la inversión y 2 después de la inversión.

Ejemplo No. 1 Delgas 100, polos 4, paso polar $100/4=25$

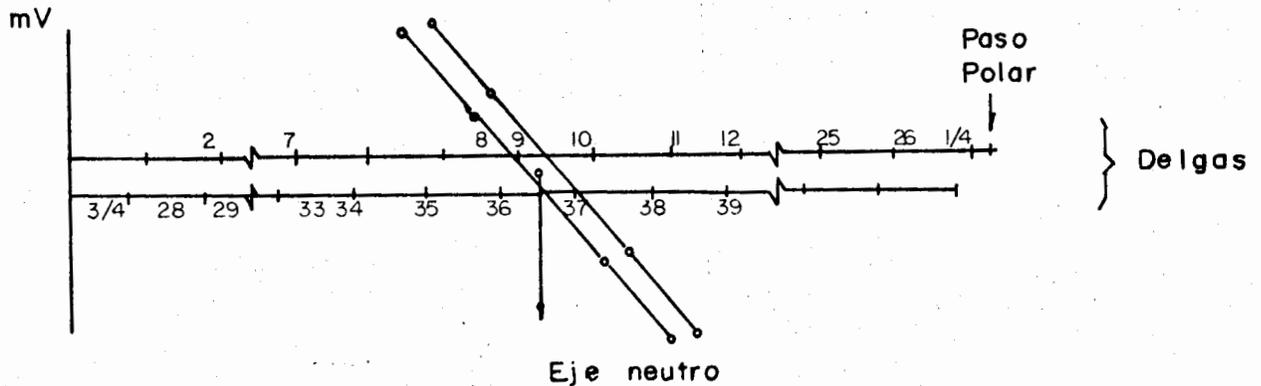


Delgas	+m	-mV
1-26	10.0	
2-27	9.4	
3- 8	8.8	
.....	
.....	
6-31	1.6	
7-12	0.5	
8-13		0.6
9.34		1.7



Ejemplo No. 2 Delgas 105, Polos 4; paso polar fraccionado
 $105/4=26 \frac{1}{4}$

1a. Prueba			2a. Prueba		
Delgas	+mV	-mV	Delgas	+mV	-mV
1-27	10		1-28	9.8	
2-28	9.4		2-29	8.7	
3-29	8.8		3-30	7.7	
.			.		
.			.		
.			.		
8.34	1.6		8-35	1.5	
9-35	0.5		9-36	0.5	
10.36		0.9	10.37		0.8
11-37		1.8	11-38		1.6



Curva de potencial

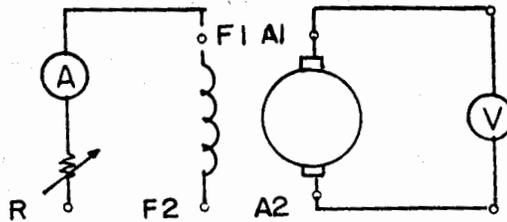
1. Se trazan tres líneas paralelas equidistantes en las que se marcarán las delgas. El ancho de cada delga está representado por el segmento entre dos marcas.
2. Se trazan los potenciales correspondientes a las delgas 8-34, 9-45, 10-36, 11-37 a partir del punto medio correspondiente a los centros de dichas delgas.

3. Se unen estos potenciales con una recta.
4. Igualmente se trazan los potenciales correspondientes a las delgas 8-35, 9-36, 10-37, 11-38, a partir del punto medio correspondiente a los centros de dichas delgas.
5. Se unen estos potenciales con una recta.
6. El punto medio del segmento entre las dos curvas de potencial determina la localización del eje neutro.

4.2 Curva de saturación en vacío

La característica magnética, o característica de circuito abierto de un generador muestra el cambio de voltaje terminal sin carga, al variar la corriente de campo, manteniendo constante la velocidad del generador.

Para que pueda variarse convenientemente la corriente de campo, la máquina se excita utilizando una fuente de alimentación separada según se muestra en la figura donde A es la armadura, F el campo, A un ampermetro que mide la corriente del campo que puede variarse por medio de una resistencia variable R y V voltmetro que mide el voltaje terminal de la máquina.



La característica de circuito abierto, similar a todas las máquinas de corriente directa se representa en la Fig.61. La F.E.M.,

generada es proporcional al flujo total producido por los devanados del campo y puesto que la relación entre este flujo y la corriente del campo depende de la curva de magnetización del hierro que forma el circuito magnético del generador, la característica presenta una forma similar a la de una curva de magnetización.

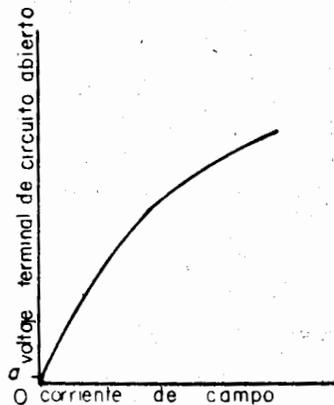


Fig. 61

En la Fig. 61 la curva no pasa por el origen 0 sino por un punto a de manera que, aún cuando la corriente de campo sea cero, se genera una pequeña F.E.M., representada por 0a. Este es el caso en la práctica. En condiciones normales, los polos poseen un magnetismo residual o remanente, que permite a la armadura generar una pequeña F.E.M., inicial cuando se arranca el generador. Al principio, la corriente en el devanado de campo es pequeña, dependiendo solo del magnetismo remanente, pero el proceso es acumulativo, de manera que el flujo del campo se va creando hasta que la F.E.M., llega al valor del trabajo requerido. En caso de que se perdiera el magnetismo remanente, entonces el generador dejaría de ser autoexcitado, y en este caso los polos del campo necesitarían volverse a magnetizar utilizando una fuente externa.

En otras ilustraciones, por sencillez, se muestran las curvas par-
tiendo del origen. Esto es permisible, ya que cualquier efecto
que tenga el magnetismo residual sobre las curvas es generalmente
lo bastante pequeño para despreciarse. La característica de cir-
cuito abierto algunas veces recibe el nombre de "característica
interna".

4.2a Prueba

Esta prueba puede hacerse con excitación propia e independiente.
En este caso la haremos con excitación independiente.

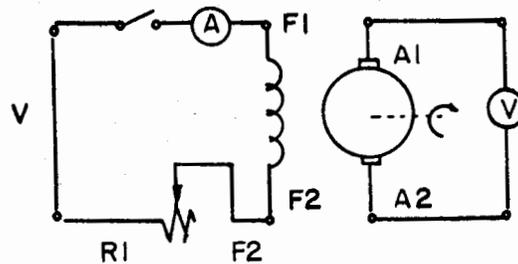


DIAGRAMA DE CONEXIONES

R.P.M.	I_C	E
CTES	0	E_1
	I_1	E_2
	I_2	E
	I_N	$E_n = 1.35V_N$

Hechas las conexiones, se opera la máquina como generador a r.p.m.
constantes.

Sin excitación, se toma la lectura de una F.E.M., inducida dando así el primer punto de la curva.

A continuación cerramos el circuito de excitación en el cual el ampermetro indicará I_m y el voltmetro E .

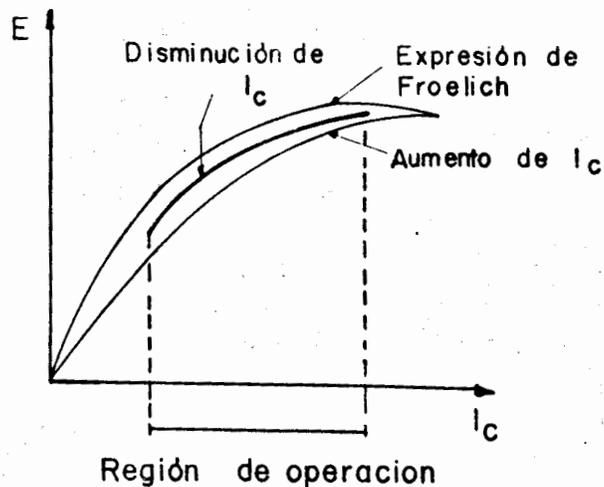
Los siguientes puntos los obtendremos incrementando la corriente de excitación tomando la lectura de ésta y de la F.E.M., generada E .

4.2b Curva de Froelich

Froelich realizó la prueba de magnetización en los dos sentidos, la primera aumentando la corriente de excitación y la segunda disminuyéndola, obteniendo una expresión algebraica que representa la curva de magnetización de la máquina.

TABLA DE LECTURAS

RPM	I_c	E
CTS	0	E_0
	I_1	E_1
	I_2	E_2
	I_N	$E_N^{1.25}$
	I_2	E'_1
	I_1	E'_2



$$E = \frac{aw_m I_c}{b + I_c}$$

Para obtener la expresión de E se toman dos valores de I_c y E correspondiente a los límites de la región de operación de la máquina

$$I_{c \text{ min}} \Rightarrow E_{\text{min}}$$

$$I_{c \text{ max}} \Rightarrow E_{\text{max}}$$

y se sustituyen en la ecuación para obtener dos ecuaciones con dos incógnitas.

Donde:

$$b = \frac{(E_{\text{max}} - E_{\text{min}}) (I_{c \text{ min}} * I_{c \text{ max}})}{E_{\text{min}} I_{c \text{ max}} - E_{\text{max}} I_{c \text{ min}}}$$

y

$$a = \left(\frac{b}{I_{c \text{ min}}} + 1 \right) \frac{E_{\text{min}}}{w}$$

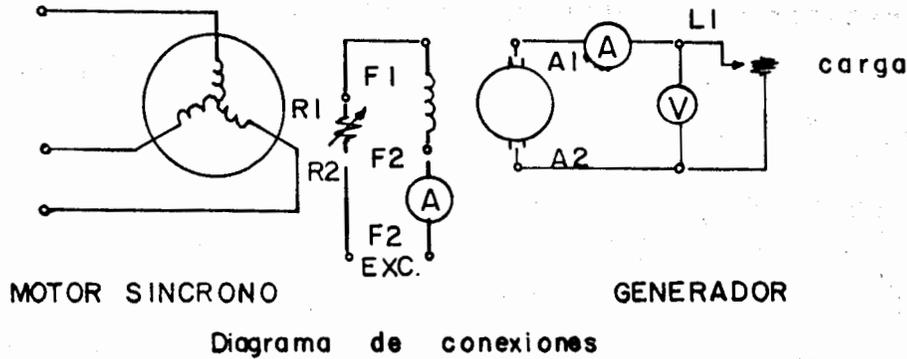
4.3 Curvas de regulación de voltaje de generadores

La curva de regulación o característica externa de un generador, muestra la variación del voltaje terminal con cambio de la corriente de salida, manteniendo constante la velocidad de la máquina.

La regulación representa en promedio la variación de tensión en las terminales del generador cuando se reduce la carga desde plena hasta vacío

$$\% \text{ Reg} = \frac{V_o - V_n}{V_n} \times 100$$

4.3a Generador con excitación independiente



- a1 Para esta prueba la máquina debe trabajarse por una hora antes de la prueba de voltaje, corriente y velocidad nominales para obtener su temperatura normal de operación.
- a2 Obtenidas las condiciones anteriores, se toman lecturas de I_c , I y w y se disminuye la carga hasta cero sin alterar las condiciones nominales. (I_c , V y w), tomando las lecturas de I_c , I y V correspondientes a cero carga.
- a3 Se va aumentando la carga de manera que corresponda a un 25% de I_L hasta llegar a 150% de I_L tomando las correspondientes lecturas de I_c , I_L y V en cada incremento de carga.

TABLA DE LECTURAS

n_n	I_c	V	I_L
Cts	I_c	V_c	I
	.	.	.
	I_{nc}	V_n	I_n

La curva cae debido a la resistencia de la armadura, a mayor corriente de la armadura mayor caída de voltaje en la armadura

La gráfica se presenta en la Fig. 62.

4.3b Generador con excitación en derivación

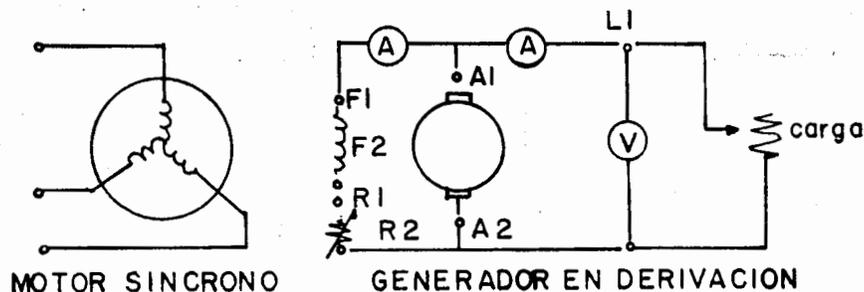


Diagrama de conexiones

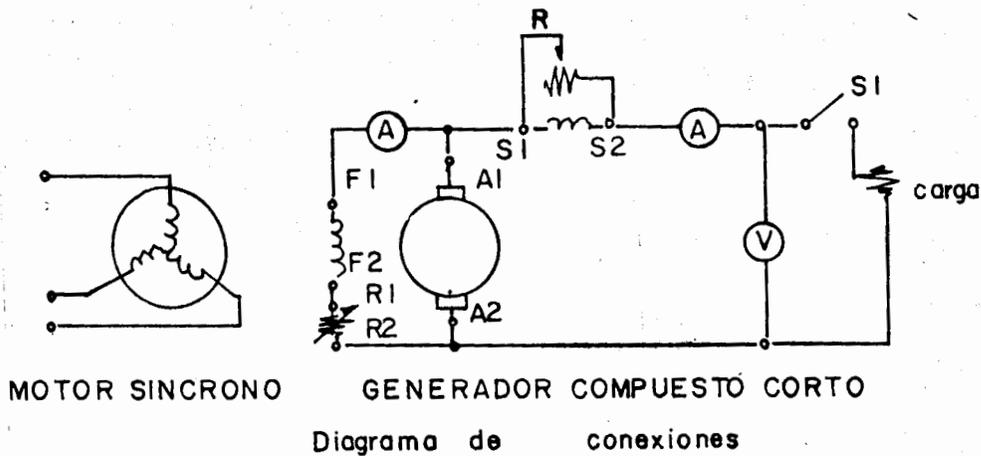
- b1 La forma de efectuar la prueba es similar a la prueba anterior "Generador con excitación independiente"

La curva decae por:

1. Resistencia de la armadura
2. Debilitamiento del campo por la reacción de armadura
3. Como consecuencia de lo anterior, el voltaje terminal se reduce produciendo una disminución de I_c .

La gráfica se representa en la Fig. 62.

4.3c Generadores con excitación compuesta acumulativa y diferencial



- c1 Se obtiene la temperatura normal de operación como se indica en el párrafo al de la prueba, para el generador con excitación independiente.
- c2. Por breve tiempo se abre el interruptor S1 y se observa el voltmetro:
- si el voltaje es bajo, la conexión es compuesto acumulativo y será necesario conectar una resistencia R en paralelo al campo serie para evitar este bajo voltaje sin carga.
 - si el voltaje sufre un aumento relativo, la conexión es compuesto diferencial y no será necesaria la resistencia R.
- c3 La prueba es similar a la prueba del "Generador con excitación independiente".

Compuesto acumulativo. El devanado del campo serie refuerza el flujo producido por el campo derivado.

Compuesto diferencial. El devanado del campo serie debilita el flujo producido por el campo derivado.

4.3d Generador con excitación serie

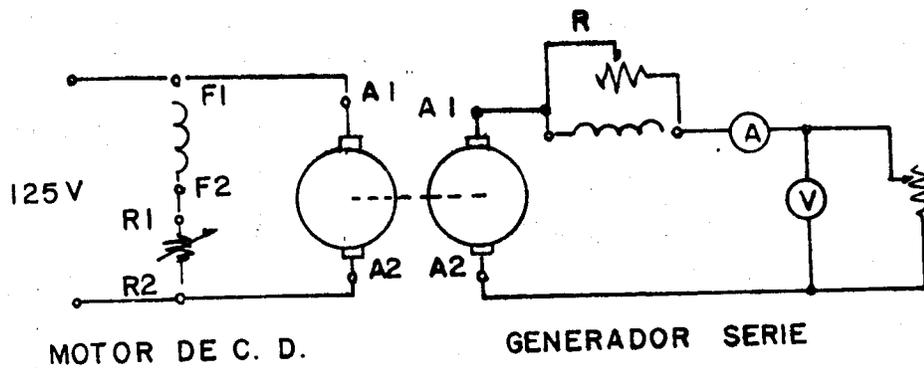
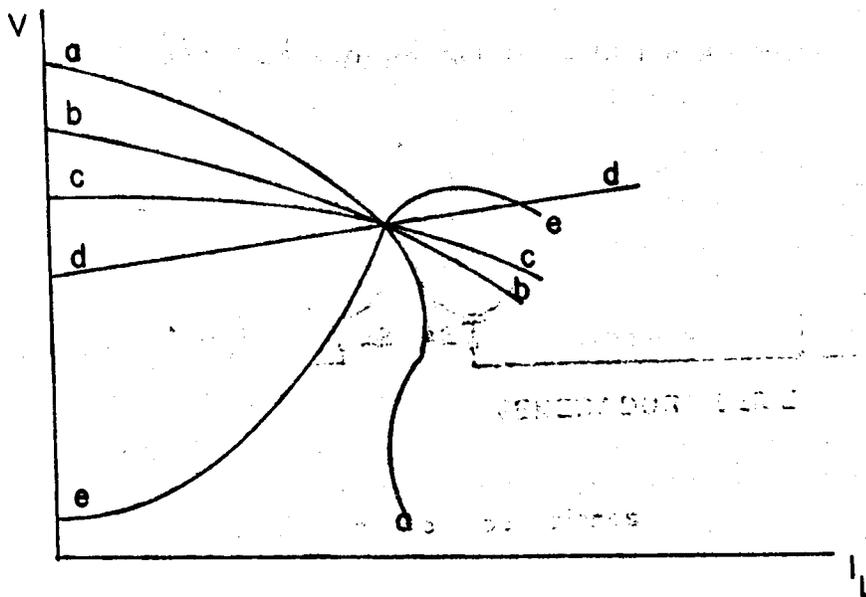


Diagrama de conexiones

Para esta prueba se conecta una resistencia variable R en paralelo con el campo serie, para sostener el voltaje nominal cuando se varíe la carga.

La prueba es similar a la primera del "Generador con excitación in dependiente" logrando los valores nominales con la ayuda del reóstato R.

Fig. 62



- a) Excitación compuesto diferencial
- b) Excitación en derivación
- c) Excitación independiente
- d) Excitación compuesto acumulativo
- e) Excitación serie

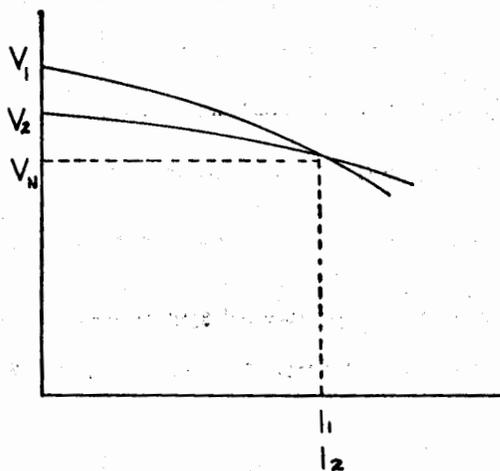
4.4 Acoplamiento de generadores

Los generadores de corriente directa pueden conectarse en serie o en paralelo.

Se conectan en serie cuando se requiere aumentar la tensión y en paralelo cuando se requiere aumentar la capacidad de corriente a un mismo voltaje.

Es común el acoplamiento en paralelo de generadores con excitación en derivación, sin importar que sean exactamente de la misma capacidad. Sus curvas de regulación de voltaje serán diferentes y proporcionarán diferentes corrientes a la carga para un mismo voltaje.

Por medio del reóstato de campo de una de ellas se logra igualar las corrientes como se ilustra en la figura siguiente



Acoplamiento en serie

Excitación en serie

Excitación en derivación

Acoplamiento en paralelo

Excitación en serie

Excitación en derivación

Excitación compuesta acumulativa

4.4a Acoplamiento en serie de dos generadores con excitación serie

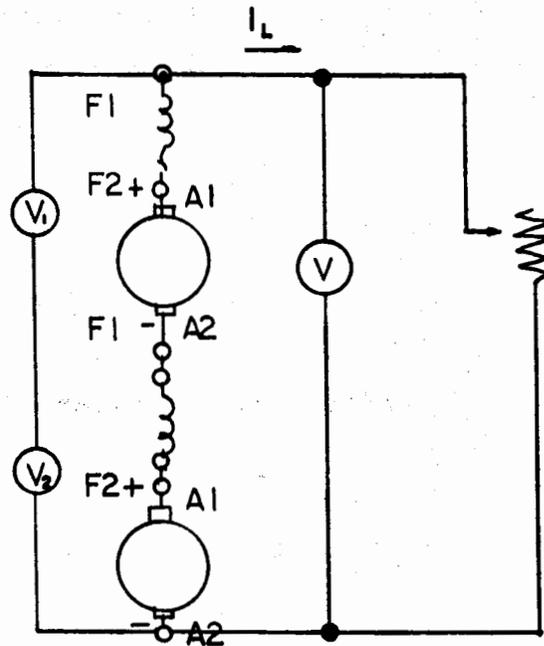


Diagrama de conexiones

Se arrancan por separado los generadores y con un voltmetro se determinan el positivo y negativo de cada uno de ellos.

4.4b Acoplamiento en serie de dos generadores con excitación en derivación

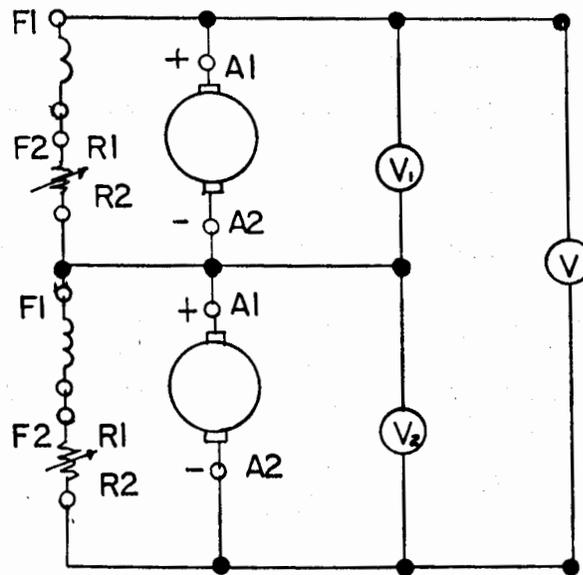
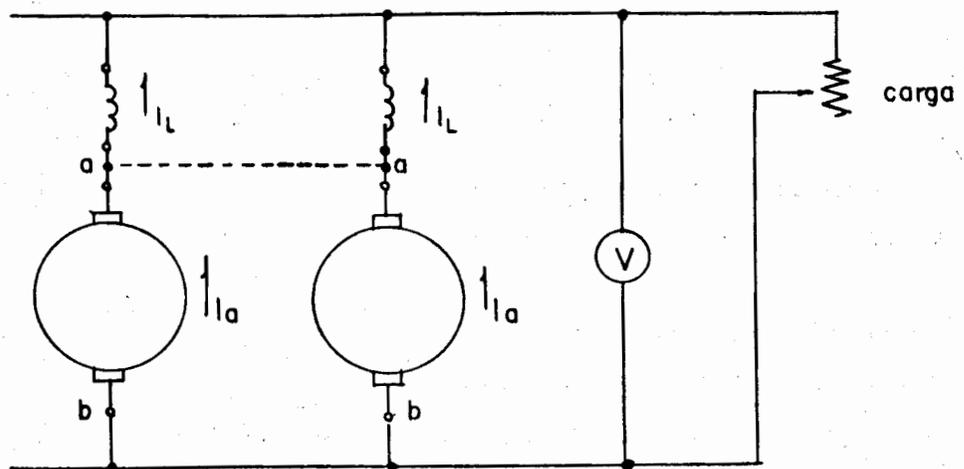


Diagrama de conexiones

Se arrancan por separado los generadores y con un voltímetro se determinan el positivo y el negativo de cada uno de ellos.

4.4c Acoplamiento en paralelo de dos generadores con excitación en serie

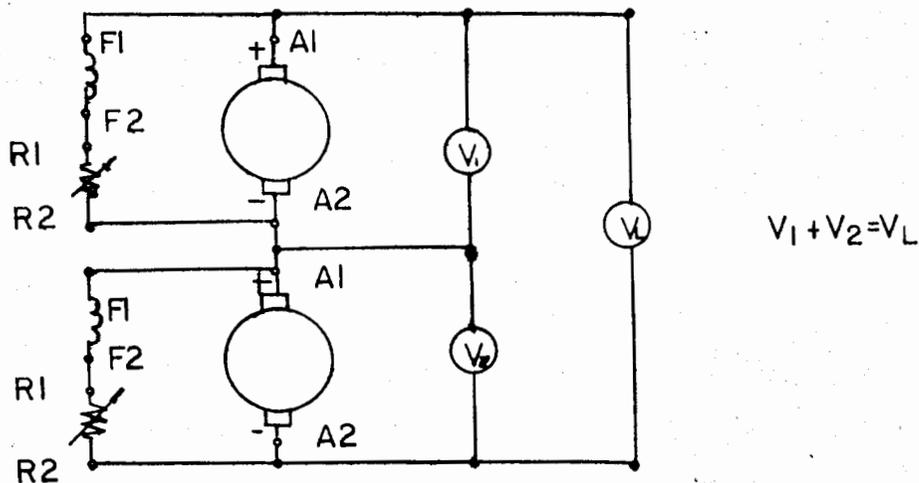


Si uno de los generadores gira a menor velocidad que su nominal su fuerza electromotriz disminuirá, y generará menor corriente hacia la línea, lo que puede ocasionar que llegue a trabajar como motor, produciéndose un corto circuito puesto que la corriente de campo se invierte.

Para evitar lo anterior, se conecta entre dos puntos "A" una barra igualadora que mantiene el mismo potencial de salida de ambas máquinas.

4.4d Acoplamiento en paralelo de dos generadores con excitación en derivación

El objeto de este acoplamiento es el de aumentar la tensión de salida.



Las máquinas se arrancan por separado, y con un voltmetro se determinan las polaridades positivas y negativas.

Obteniendo lo anterior se procede a la conexión de las máquinas como lo muestra el diagrama.

4.5 Curvas de regulación de velocidad para motores y arrancadores.

Muestran la variación de velocidad a un cambio de la corriente de entrada manteniendo constante el voltaje de alimentación.

4.5a Motor con excitación en derivación

Al mantener constante I_c el ϕ será constante y como V también es constante lo único que varía será I_a .

$$V = E + I_a V_a$$

$$E = \frac{PN_a \omega}{2\pi a} \phi = \frac{PN_a n}{60a} \phi$$

$$K_e = \frac{PN_a}{60a}$$

$$E = K_e n \phi$$

$$V = K_e n \phi + I_a r_a$$

$$n = \frac{V - I_a r_a}{K_e \phi}$$

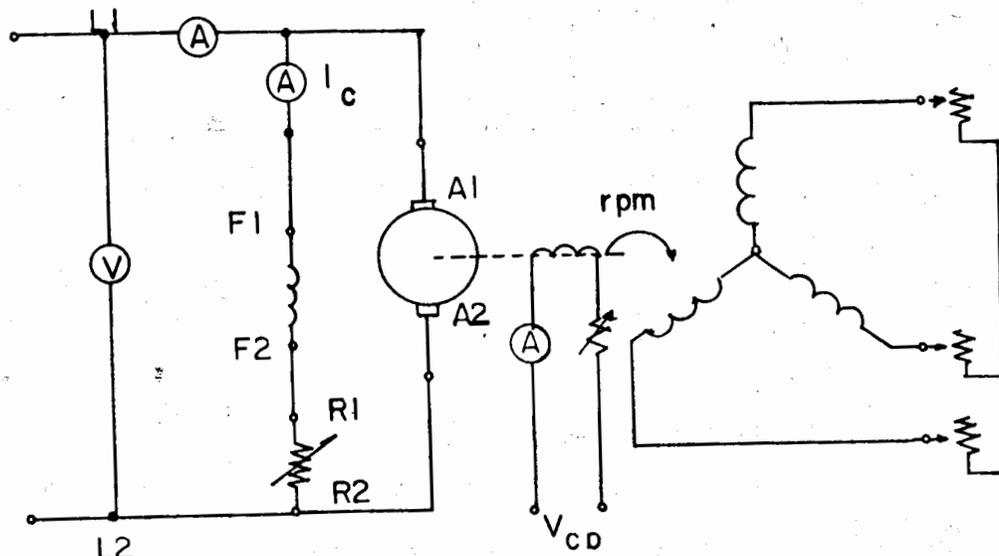


Diagrama de conexiones

Motor de C.D.				Gen. de C.A.	
V	$I_c = \text{cte}$	I_{L1}	r.p.m	I_c	V
V_n	cte	I_1	n_1	I_1	cte
.		I_2	n_2	I_2	
.		.	.	.	
.		.	.	.	
.		.	.	.	
.		.	.	.	
.		.	.	.	

Es conveniente antes de efectuar la prueba, operar el motor por unos cuantos minutos con el fin de que trabaje a su temperatura de operación.

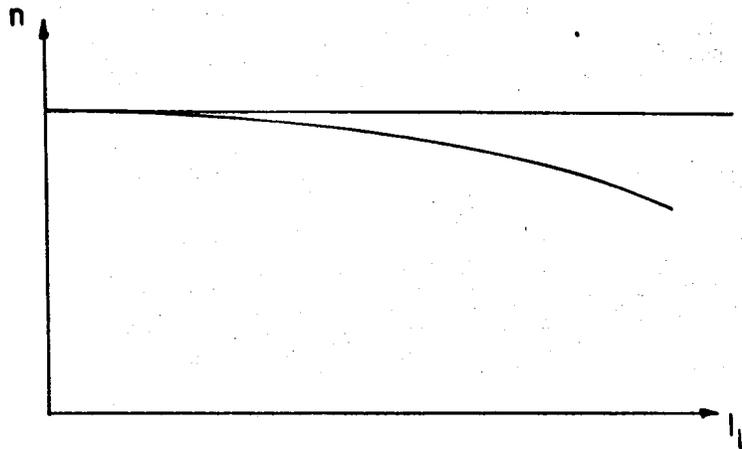


Fig. 62

$$\% \text{ Reg} = \frac{n_0 - n}{n} \times 100$$

n = velocidad a plena carga

n_0 = velocidad en vacio

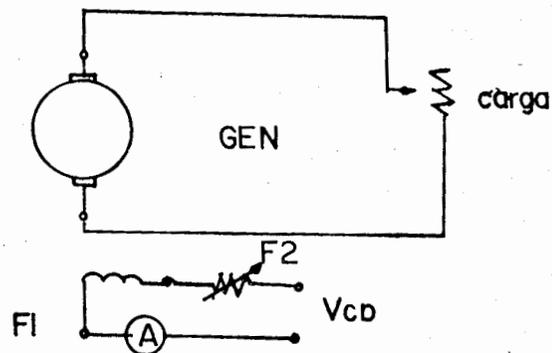
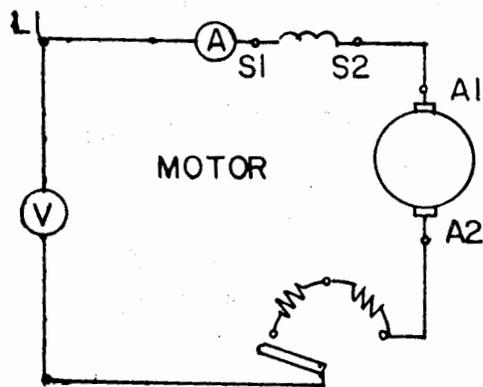
Al reducir la velocidad, también disminuye la fuerza contraelectromotriz, haciendo que aumente la corriente de la armadura equilibrando al par solicitado por la carga.

4.5b Motor con excitación en serie

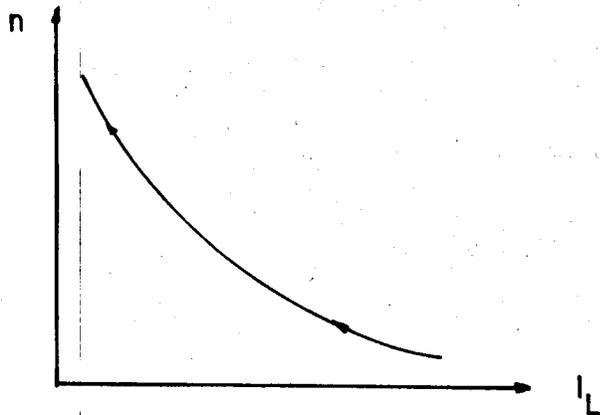
como

$$n = \frac{V - I_a r_a}{K_e \Phi}$$

la velocidad depende del Φ por lo que si baja súbitamente la I_L el motor se desbocará

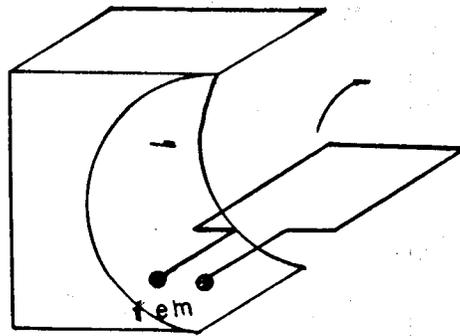


1. La carga para la prueba será un gen de C.D., con excitación separada. Esto es para asegurar que la carga no pierda excitación.
2. Se instalará un interruptor centrífugo en el motor para que lo desconecte en caso que sobrepase el límite de velocidad.
3. La prueba se efectuará con valores ascendentes
4. Desconectar el motor sin desconectar al gen.



GEN	MOT		
I_C	I_L	V	n
I	I_{max}	V_{cte}	n_{min}
	.		.
	.		.
	.		.
	I_{min}		n_{max}

4.5c Fuerza contraelectromotriz



El acto de mover un conductor a través de un campo magnético, genera o produce una F.E.M.

Mientras no haya corriente en el conductor, no existe campo magnético secundario a su alrededor y no hay reacción magnética que se oponga al movimiento. Cuando se forma un circuito cerrado con el

conductor en movimiento, de tal manera que fluya corriente en él, deberá ejercerse una fuerza para mover el conductor contra la reacción de oposición. Por lo tanto, en el caso de la acción generador, mientras haya corriente que circule deberá ejercerse una fuerza para mantener el movimiento del conductor a través del campo. Se efectúa trabajo sobre el conductor. En el caso de la acción motor, la fuerza desarrollada entre el conductor que lleva la corriente y el campo magnético principal hace que el conductor se mueva: el trabajo es efectuado por el conductor y deberá alimentarse energía eléctrica de una fuente externa.

Haciendo referencia a la Fig. 63 , supóngase que el conductor mostrado en a, adyacente al polo norte, lleva una corriente hacia el observador. Por medio de la regla del tirabuzón, esta corriente desarrollará un campo magnético alrededor del conductor, en dirección contraria al movimiento de las manecillas del reloj. Este campo tenderá a reforzar el campo principal en la región que se encuentra abajo del conductor y a debilitarlo en la región superior al conductor, dando por resultado que el conductor será impulsado hacia arriba, como lo muestra la flecha.

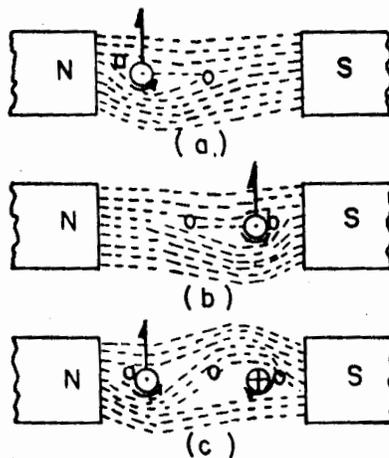


Fig. 63

Supongase que el conductor estuviese montado sobre un núcleo de armadura y tuviera libertad de moverse con respecto al centro o, como lo muestra la línea recta interrumpida. Si el conductor se mueve a un punto adyacente al polo sur, como se muestra en b, la dirección en que tiende a moverse será la misma que en el diagrama anterior, ésto es, la armadura tenderá ahora a girar en la dirección opuesta.

Es evidente que si la armadura gira una revolución completa la dirección de la corriente en el conductor b, Fig. 63 (b), deberá invertirse antes de que entre al campo producido por el polo sur. Esta inversión en un motor se lleva a cabo en el conmutador, en combinación con los carbones.

La Fig. 63(c) puede representar entonces dos costados opuestos ab de una bobina de armadura. Se puede ver que los costados de la bobina llevan corriente en direcciones opuestas, pero éstas se encuentran simultáneamente bajo polos opuestos, de manera que la acción de ambos conductores es la de producir movimiento en el núcleo de armadura en la misma dirección con respecto a su momento de giro.

En el caso del generador, cuando la corriente fluye en los conductores de armadura de acuerdo con la regla de la mano derecha, como lo hace cuando se conecta carga a la máquina, se tienen todas las condiciones para la acción motor; ésto es, conductores que llevan corriente colocados en un campo magnético. Si ahora se aplica la regla para la acción motor, o sea la regla de la mano izquierda, se verá que los conductores tienden a moverse en la dirección opuesta a la del movimiento impuesto por la máquina impulsora y esta última tiene que vencer esta tendencia; ésto es, la acción mecánica está venciendo a una reacción mecánica. Mientras mayor sea la carga en el generador, mayor será la corriente que alimenta, mayor la reacción y mayor la potencia desarrollada por el impulsor principal para mantener operando al generador.

En el caso del motor, cuando gira, es claro que se tienen presentes todas las condiciones para la acción generador; ésto es, conductores con corriente que cortan línea de flujo, por lo tanto, se genera una F.E.M., y si se aplica la regla para la acción generador (mano derecha) se encontrará que esta F.E.M., generada tiene una dirección opuesta a la corriente que fluye en los conductores debida a la F.E.M., de la fuente externa al motor. Esta última F.E.M., vence a la F.E.M., generada por el motor -llamada fuerza contraelectromotriz o F.C.E.M.- y presiona a la corriente contra ella. Una acción eléctrica, por lo tanto, vence a una reacción eléctrica.

Si la armadura gira libremente y aplicamos una F.E.M., a sus terminales, la armadura inmediatamente adquirirá su velocidad, generará su propia F.C.E.M., con lo que disminuirá el valor de la corriente a una magnitud más pequeña. Sin carga, la velocidad se elevará a un valor en el cual la F.C.E.M., es muy aproximadamente igual al voltaje de alimentación y la corriente será pequeña.

4.6 Arranque y control de motores

La corriente que fluye en la armadura de un motor está dada por:

$$I = \frac{V-E}{r_a}$$

En el momento del arranque, la armadura es estacionaria, de manera que no hay creación de F.C.E.M. La corriente de armadura, por lo tanto, estará limitada solamente por la resistencia de armadura y será igual al voltaje aplicado dividido por esa resistencia. Puesto que la resistencia de armadura en la práctica generalmente es pequeña, el impulso de corriente en el instante del arranque puede ser lo bastante elevado para causar daños a la máquina.

4.6a Arrancador para motor derivado

La Fig. 64 muestra las conexiones internas y el método de conexión.

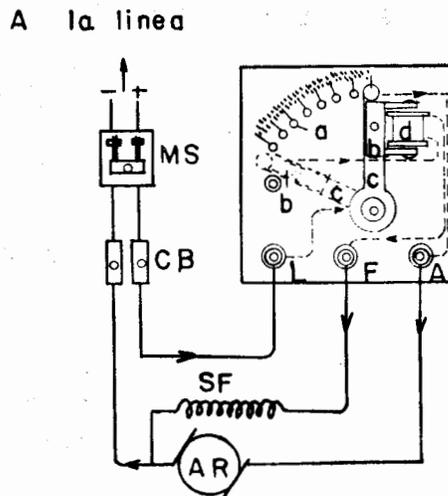


Fig. 64

El valor de la resistencia en serie con la armadura se varía por pasos, utilizando el movimiento de la manija c sobre los contactos a. Cuando el arrancador se encuentra en la posición "fuera" la manija está en la posición extrema izquierda. Para arrancar el motor, la manija se mueve lentamente hacia la derecha, contra la acción un resorte (no mostrado) con lo que se va soltando, paso a paso, la resistencia en el circuito de armadura.

El librador de "no voltaje" se muestra en d, consiste de un pequeño electroimán conectado en serie con el circuito del campo derivado. Cuando la manija c se encuentra en la posición de "total" el electroimán sujeta a la armadura de hierro b de la manija, evitando que ésta regrese a la posición "fuera". Si la alimentación

se interrumpe, la bobina se desmagnetiza, liberando la manija que regresa a su posición "fuera". Al regresar el voltaje de la fuente, la máquina debe ser arrancada nuevamente en la forma normal. Esto evita el riesgo de daño debido a una reposición del servicio cuando la manija se encuentra en la posición total y la armadura en reposo.

El campo derivado no está conectado permanentemente a la armadura del motor. Tiene un extremo en serie con la bobina de liberación y el otro al primer contacto de una resistencia de manera que está directamente conectado al voltaje de alimentación tan pronto se mueve la manija, el campo entonces, es intenso al arrancar, permitiendo la obtención de un alto par, la razón por lo que se adopta este método, es que el voltaje aplicado a la armadura durante el arranque es bajo, y si el campo estuviera conectado permanentemente a la armadura, el voltaje del campo durante el arranque sería también bajo dando como resultado un bajo par de arranque.

Puesto que el circuito de campo de un motor de C.D., tiene una alta inductancia, puede producirse una alta F.E.M., inducida cuando se abre. Esta F.E.M., puede ser lo bastante elevada para dañar el aislamiento, por lo tanto, para evitar este riesgo se conecta el campo de manera que esté en circuito cerrado, aún cuando el arrancador este fuera. Se puede ver que el circuito cerrado consiste del devanado derivado, la bobina de liberación, la resistencia de arranque y la armadura, que se conecta a un extremo del devanado del campo. Cuando el motor se para, la energía inductiva en el devanado del campo se disipa produciendo una corriente en este circuito cerrado ($I R$) evitando así cualquier elevación peligrosa del voltaje.

Puesto que el arrancador se usa solamente en períodos muy cortos, el alambre usado para la resistencia no necesita ser muy grueso.

4.6b Arrancador para motor serie

La resistencia y arranque que se usa, deben conectarse en serie con la armadura y el devanado del campo. Debido a que los motores serie generalmente se usan en aplicaciones en que se requiere velocidad variable, se requiere también una resistencia variable para el control de velocidad y si está en serie con la armadura, puede emplearse también para el arranque. La resistencia en este caso, está hecha de alambre grueso, con el objeto de que no se quemé si se mantiene continuamente en el circuito. Una resistencia variable usada en esta forma se conoce como "control". Los aditamentos de seguridad generalmente se encuentran formando parte de un interruptor automático independiente.

Control

Sabemos que
$$n = \frac{V - I_a r_a}{K_c \phi}$$

si $I_a r_a$ es pequeña

entonces

$$n \Rightarrow \frac{V}{\phi}$$

$$n \Rightarrow V$$

$$N \Rightarrow \frac{1}{I_c}$$

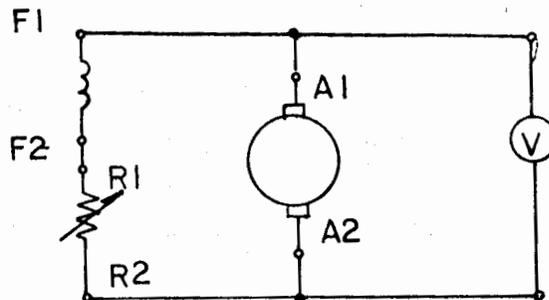
4.6c Control de un motor derivado

Puede usarse una resistencia en serie para reducir el voltaje aplicado a la armadura. Sin embargo, puesto que la corriente total en la armadura debe pasar por la resistencia, se tendrá una considerada

ble pérdida de energía. Además tiene la desventaja de que la resistencia debe ser de suficiente sección transversal para que pueda conducir toda la corriente durante largos periodos de tiempo sin sobrecalentarse.

Un mejor método es el de controlar el flujo y en consecuencia la velocidad, por medio del ajuste de una resistencia variable en serie con el circuito de campo. En el menor valor de la resistencia serie en el circuito, se obtiene la velocidad más baja y al aumentar la resistencia aumenta también la velocidad. La corriente de campo de un motor derivado es solo una pequeña parte de la corriente total alimentada, por lo tanto, el alambre de la resistencia puede ser de sección transversal pequeña.

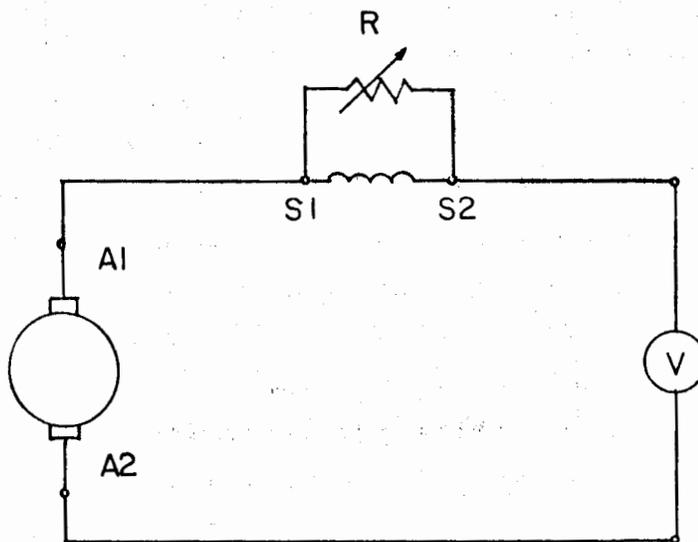
Debe tenerse cuidado en su aplicación para evitar velocidades excesivas que puedan dañar al motor.



4.6d Control de un motor serie

En este caso, también puede reducirse la velocidad bajando el voltaje aplicado a la armadura por medio de una resistencia en serie con la fuente. Sin embargo, es antieconómico si se usa durante periodos prolongados.

El método usado en la práctica es el de reducir el flujo. Se emplea un derivador que es una resistencia variable en paralelo con el devanado de campo y que se usa para derivar una parte de la corriente. En la velocidad más baja, el derivador se encuentra en circuito abierto, dando como resultado que toda la corriente de armadura pasa por el devanado del campo produciendo el flujo máximo. Para velocidades mayores, el derivador se conecta en el circuito ajustándose hasta que se deriva la cantidad de corriente de campo para dar la velocidad requerida. A velocidades más altas, la corriente en el derivado es elevada pero la resistencia es pequeña, de manera que se desperdicia poca potencia.



5.1 Rigidez dieléctrica del aceite

El aceite utilizado en los transformadores cumple dos objetivos, servir como medio refrigerante, y como dieléctrico entre todas las piezas sumergidas. Es importante una rigidez alta dieléctrica del aceite. Un aceite puro tiene una rigidez elevada, pero ésta se reduce a medida que aumenta su contaminación.

Un aceite nuevo que se utiliza para un transformador puede estar contaminado por:

- Impureza en los recipientes de transporte o de almacenaje
- Absorción de humedad por contacto prolongado con el medio ambiente.

Un aceite que muestre baja rigidez no es apropiado para utilizarlo en transformadores, por lo que será necesario someterlo a un proceso de filtración para eliminarlo de humedad e impurezas.

La prueba de rigidez dieléctrica, consiste en colocar dos electrodos planos o semiesféricos dentro de una muestra de aceite, y aplicarles una diferencia de potencial cuyo valor aumenta gradualmente hasta obtener la ruptura.

Equipo de prueba

- a) Transformador de alta tensión. Un transformador elevador, alimentado en baja tensión por una fuente de voltaje regulado, y capaz de dar en alta tensión un valor superior a 35KV. Se recomienda una capacidad mínima de 0.5 KVA para evitar distorsión de onda.
- b) Interruptor. El transformador debe protegerse con un interruptor automático que abra como máximo en tres ciclos a partir de la ruptura.

- c) Control de tensión. De preferencia utilizar un control automático para incrementar la tensión a razón de 3 KV/seg. \pm 20%. Si no, esta operación puede ser manual.
- d) Medidor de tensión. Un voltímetro integrado al equipo, que nos indique con precisión los KV en el secundario del transformador elevador.
- e) Copa de prueba. Debe cumplir con:
Tener los electrodos rígidamente montados, con sus caras paralelas y ejes coincidentes en línea horizontal. Los electrodos deben ser discos de bronce pulido, de 2.54 cm. de diámetro, cuando menos 0.32 cm. de espesor con aristas a 90°, y separados una distancia de 2.54 ± 0.01 mm.

Ninguna parte de la copa debe estar a menos de 13 cm de cualquier parte de los electrodos y su borde superior debe estar a 3.8 cm de la parte superior de los electrodos.

- f) Muestreadores. Utensilios adecuados para extraer la muestra de acuerdo al recipiente de almacenamiento.
- g) Recipiente de muestreo. Son botellas de vidrio transparente para inspección visual, con capacidad de dos litros y tapones que eviten contaminación.

El muestreador y el recipiente de muestreo deben lavarse cuidadosamente con solventes, agua y jabón. Se recomienda que en el momento de muestrear, el aceite se encuentre a la temperatura ambiente, a fin de reducir al mínimo la absorción de humedad.

Al vaciar la muestra en el recipiente de muestreo debe hacerse escu^{ri}éndolo por la paredes, para que no se formen burbujas. Cuando falte aproximadamente 13mm, para que se llene, se tapa el recipiente y se le coloca una identificación.

Previamente a la prueba, la muestra debe agitarse suavemente, de manera que no produzcan burbujas y usar una porción de ella para enjuagar la copa. Después se limpia ésta con papel o gamuza secos.

Se llena la copa lentamente hasta un nivel de 2 cm., arriba del borde superior de los electrodos, evitando la inclusión de aire, y se coloca en el transformador de prueba.

Después de 2 a 3 minutos se comienza a aplicar la tensión, incrementándola a razón de 3 KV/segundo hasta que ocurra la ruptura.

La ruptura se caracteriza por una descarga continua entre los electrodos, que hace operar el interruptor de seguridad. En ocasiones ocurren pequeñas descargas momentáneas que no deben tomarse en cuenta.

Una vez determinada la ruptura, se vacía la copa en un recipiente limpio, y se llena nuevamente con otra porción de muestra, de terminando nuevamente su ruptura.

Si ningún valor de las dos primeras pruebas está por debajo del valor de aceptación, el aceite se considera bueno y no requiere más pruebas.

Si cualquiera de los valores resultara por debajo de aceptación, entonces se requieren otras tres pruebas de la muestra.

A continuación se obtiene la diferencia entre el valor mayor y el valor menor de las cinco pruebas, y se multiplica por tres. Si el valor obtenido es mayor al inmediato superior del valor mínimo, la estadística es insuficiente y habrá que efectuar otras cinco pruebas. El promedio de los diez resultados se reportará como la tensión de ruptura de la muestra. Si no es así, basta el promedio

de las primeras cinco pruebas.

Desarrollo

- Haga la limpieza de sus dispositivos y llene el recipiente con la muestra.
- Agite suavemente la muestra y tome una primera porción para limpiar la copa. Verifique la calibración de los electrodos.
- Llene la copa con otra porción de muestra y colóquela en el transformador de prueba.
- Después de dos a tres minutos, comience a elevar la tensión, a razón de 3 KV/seg. Esté pendiente de la tensión de ruptura, y anote su valor en la Tabla 23.
- Verifique que el equipo está desenergizado después de cada prueba. Precaución: Haga contacto entre el cable de alta tensión con un cable aterrizado, para evitar cualquier voltaje electrostático posible.
- Retire la copa, vaciela en un recipiente limpio y vuélvala a llenar con otra porción de muestra. Colóquela nuevamente en el equipo de prueba.
- Después de dos a tres minutos, comience a elevar la tensión 3 KV/seg hasta el punto de ruptura y anote su resultado en la Tabla
- Si ninguno de los valores obtenidos es menor a 25 KV, obtenga el promedio y anótelo en la misma tabla, así como la temperatura de prueba.
- Si alguna lectura resultó menor a 25 KV, llene la copa otras tres veces, tome en cada una la tensión de ruptura y anótelas en la Tabla 23.
- Obtenga la diferencia entre la lectura mayor y la menor y multiplíquela por tres.
- Compare este valor con el inmediato superior a la lectura menor.

llas o pasamuros, esta prueba consiste en aplicar una tensión elevada a uno de los embobinados, y el otro embobinado, el núcleo y el tanque conectados a tierra.

El valor de la tensión aplicada depende de la clase de aislamiento que es función de su voltaje nominal de operación, y lo fijan las normas de acuerdo a la tabla

Para la prueba se requiere un transformador elevador, alimentado en baja tensión con una fuente de voltaje regulado, y capaz de suministrar en alta tensión el voltaje requerido para la prueba. Debe tener integrado un voltímetro que registre con precisión los KV en alta tensión.

No se debe colocar resistencia de valor apreciable entre el equipo y el transformador en prueba, si se permite el uso de bobinas reactivas.

Es conveniente incluir explosores o voltímetros de esferas a una tensión 10% en exceso de la tensión de prueba.

Todas las terminales del devanado bajo prueba deben conectarse entre sí y a la línea del equipo de prueba, por medio de alambre desnudo, de diámetro no menor de 0.3mm.

Las demás terminales y partes conductoras, incluyendo núcleo y tanque, deben conectarse entre sí, a tierra y a la otra terminal del equipo de prueba formando un circuito sólido.

Procedimiento. La prueba debe iniciarse a un valor máximo del 25% de la tensión de prueba, y se incrementa hasta su valor total aproximadamente en 15 segundos.

Después de un minuto de alcanzado el valor total se reduce la ten-

sión a un valor igual o menor que el de iniciación en un máximo de 5 segundos y se desenergiza el circuito.

Tabla 24 Valores del potencial aplicado de acuerdo a la clase de aislamiento

Clase de aislamiento KV	Potencial aplicado KV	Clase de aislamiento KV	Potencial aplicado KV
0.6	4	92	185
1.2	10	115	230
2.5	15	138	275
5.0	19	161	335
8.7	26	196	395
15	34	215	430
18	40	230	460
25	50	315	630
34.5	70	345	690
46	95	375	750
69	140	400	800

Desarrollo

- Seleccione de la Tabla 24 el valor del potencial de prueba. Esta prueba se recomienda efectuarla una sola vez en transformadores nuevos. Para un equipo que está sometido frecuentemente a este experimento es recomendable no sobrepasar más del 75% del valor de norma. Si éste es el caso, anote su valor de prueba.

Potencial aplicado: _____ KV

- Conecte el circuito de prueba de acuerdo a las recomendaciones. Importante. Después de instalado el transformador para la prueba, aisle el área en que se encuentra, de manera que nadie pueda acercarse a la zona de alto voltaje.
- Energice la fuente, Inicialmente se puede aplicar un voltaje entre cero y el 25% del potencial de prueba.

- Aumente gradualmente el voltaje hasta obtener el potencial de prueba en 15 segundos como máximo.
- Mantenga el potencial de prueba durante un minuto y observe a distancia si hay arqueo en las partes visibles, burbujas de humo, o alguna otra anomalía.
- Reduzca el potencial aplicado en 5 segundos y al llegar al 25% de la tensión de prueba desenergice el equipo.
- Antes de retirar las conexiones haga contacto entre las líneas del potencial aplicado y un cable aterrizado, para descargar cualquier voltaje electrostático acumulado.
- Si se va a probar el otro embobinado, elija en la tabla 24 el potencial aplicado, de acuerdo a la clase de aislamiento de este devanado, y repita nuevamente todos los pasos del desarrollo de la prueba.
- Si tiene observaciones a los resultados obtenidos de la prueba anótelas a continuación.

Observaciones _____

Tensión inducida

Esta prueba tiene por objeto verificar el aislamiento entre espiras y entre capas, de todos los devanados del transformador. Se efectúa haciéndolos trabajar durante un tiempo determinado al 200% de su tensión nominal. Al suministrar a uno de los devanados, un voltaje de este valor, en los demás devanados se inducirán tensiones en la misma proporción y siempre que el núcleo no se sature, todos los embobinados estarán bajo las condiciones de prueba.

Se recomienda que en ninguno de los devanados aparezca un valor de potencial inducido superior a su correspondiente potencial aplicado, según la prueba de potencial aplicado.

El valor máximo de la onda de flujo en el núcleo del transformador está dado por:

$$\Phi = \frac{V}{4.44 Nf}$$

en donde

Φ = Flujo magnético

V = Voltaje eficaz en el devanado en estudio

N = Número de espiras del mismo devanado

f = Frecuencia de la onda de voltaje

De la fórmula observamos que el flujo en el núcleo es directamente proporcional al voltaje suministrado, e inversamente proporcional a la frecuencia, de manera que si se va a suministrar un voltaje mayor al de diseño, es necesario aumentar también la frecuencia para evitar la saturación del núcleo.

Las normas dan como frecuencia mínima de prueba:

$$f = \frac{\text{Tensión inducida a través del devanado}}{(1.1) \text{ Tensión nominal del devanado}} \times \text{frecuencia nominal}$$

pudiendo utilizarse, desde luego, frecuencias mayores.

Mientras mayor sea la frecuencia, la prueba es más severa, de manera que se recomienda que su duración no sea mayor de 7200 ciclos.

Para frecuencias múltiples de 60 Hz, la duración de la prueba está especificada en la Tabla 25. Para cualquier frecuencia intermedia,

el tiempo se obtiene según la indicación anterior.

Tabla 25 Duración de la prueba de potencial inducido

Frecuencia Hz	Duración segundos
120 o menos	60
180	40
240	30
300	24
360	20

Para esta prueba se requiere una fuente de voltaje regulado. Si la fuente no incluye un voltímetro y un amperímetro, éstos deben intercalarse en el circuito de alimentación del transformador en prueba.

Se debe elegir uno de los embobinados del transformador que sea posible alimentar al 200% de su voltaje nominal el cual se conecta a la fuente, incluyendo un voltímetro y un amperímetro. El otro embobinado debe permanecer en circuito abierto.

Procedimiento. La prueba se debe iniciar con un valor no mayor al 25% de la tensión completa y se aumenta gradualmente hasta alcanzar el valor de prueba en aproximadamente 15 segundos. Se mantiene la tensión plena durante el tiempo de prueba, y se observa si aparece alguna anomalía, como:

- Ruidos
- Burbujas de humo (las burbujas de aire no necesariamente son anormales, y si aparecen sería aconsejable repetir la prueba)
- Inestabilidad en la corriente de excitación.

Al concluir el tiempo de prueba, se reduce el voltaje a un valor igual o menos que el de iniciación, en aproximadamente 5 segundos y se abre el circuito.

Desarrollo:

- Seleccione el embobinado del transformador por el cual va a alimentar y anote el 200% de su tensión nominal.

Esta prueba se recomienda efectuarla una sola vez en transformadores nuevos. Para un equipo que está sometido frecuentemente a este experimento es recomendable no sobrepasar más del 75% del valor de norma. Si éste es el caso, anote su valor de prueba.

Potencial inducido: _____Volts.

- Seleccione de la Tabla 25 el tiempo de prueba de acuerdo a la frecuencia de la fuente.

Tiempo de prueba: _____ seg.

- Conecte el circuito de prueba de acuerdo a las recomendaciones.

Importante. Después de instalado el transformador para la prueba, aisle el área en que se encuentra, de manera que nadie pueda acercarse a las terminales de alta tensión.

- Energice la fuente. Inicialmente se puede aplicar un voltaje entre cero y el 25% del potencial de prueba. Aumente gradualmente el voltaje hasta obtener el potencial de prueba en 15 segundos como máximo.
- Mantenga el potencial de prueba durante el tiempo requerido y observe a distancia si se presentan anomalías como:

- Ruidos en el transformador ()
- Burbujas de humo ()
- Inestabilidad en la corriente de excitación ()

- Transcurrido el tiempo de prueba, reduzca el voltaje hasta el 25% en 5 segundos máximo y desenergice la fuente

REPORTE DE PRUEBAS

Nombre del Laboratorio _____
 Responsable de las pruebas _____
 Nombre del cliente _____

Características	
Marca:	
Núm serie:	
Capacidad:	
Num. fases:	
K.V. alta tensión:	
K.V. baja tensión:	
Frecuencia:	
Elev. temperatura:	

Pérdidas magnéticas	
Volts medios	
Volts eficaces	
Amp. excitación:	
Watts	

Resistencia óhmica			
Alta tensión		Baja tensión	
Terminales	R	Terminales	R
R/fase		R/fase	
Temp.		Temp.	

Pérdidas eléctricas	
Amperes	
Volts	
% Z	
Watts	
Temperatura	
$\Sigma I^2 R$ Amb.	
Indet. Amb.	
$\Sigma I^2 R$ a 75°	
Indet. a 75°	

Resistencia de aislamiento	
AT - BT	
AT - tierra	
BT - tierra	

Elevación de temperatura	
Elev. aceite	
Elev. alta tensión	
Elev. baja tensión	

Relación de transformación	
Fase	Relación

Rigidez del aceite (KV)						
1	2	3	4	5	Prom.	Temp.

Polaridad o sec. fases	

Potencial aplicado		
Lado	KV	Segundos
Alta tensión		
Baja tensión		

Diagrama de conexiones

Potencial inducido
% voltaje nominal
Frecuencia
Segundos

Fecha _____

Firma _____

5.3 Impulso y descargas parciales

En este capítulo haremos una descripción breve de dos pruebas, sin presentar la guía de desarrollo, debido a que la primera requiere de un equipo costoso y la segunda, además del equipo especializado es una prueba reciente en vías de normalización, lo que motiva que éstas sólo puedan realizarse en laboratorios especializados.

Prueba de impulso

Esta prueba consiste en aplicar al transformador una descarga de alta tensión de breve duración, medida en microsegundos. Se hace con el objeto de detectar si en el transformador se generan situaciones anormales por motivo de este tipo de descargas, las que en operación normal pueden producirse por descargas atmosféricas o en aperturas de interruptores.

Las características que se producen en la realidad, cuando aparecen estos fenómenos transitorios, no se reproducen fielmente en

la prueba, pero la experiencia ha demostrado que ésta es suficientemente confiable, para garantizar la operación del transformador bajo estas condiciones.

La descarga se aplica mediante un generador de impulso, consistente en un conjunto de capacitores conectados en paralelo a través de resistencias, los cuales se cargan por medio de una fuente de C.D.

Cuando el potencial de carga ha llegado al valor de ruptura del primer explosor, inmediatamente rompen todos los demás explosores, formando un circuito serie que finalmente descarga en el equipo bajo prueba.

La descarga que produce el generador de impulso debe corresponder a un modelo de onda como muestra la Fig. 65 con las siguientes características.

Valor de cresta. Es de acuerdo a la clase de aislamiento del devanado en prueba, y está tabulado en la norma de prueba. El tiempo para alcanzar este valor no debe ser superior a 2.5 microsegundos a partir del cero virtual.

Frente de onda. Región ascendente de la onda hasta alcanzar el 90% del valor de cresta. El tiempo para completar el frente de onda a partir de cero virtual debe ser de 1.2 microsegundos.

Cola de onda. Región descendente de la onda hasta alcanzar el 50% del valor de cresta. El tiempo para descender a este valor a partir del cero virtual no debe ser menor de 50 microsegundos.

Cero virtual. Un punto en el eje de las abscisas que se obtiene por la intersección de una recta que pase por los valores 30% y 90% de cresta, en el frente de onda.

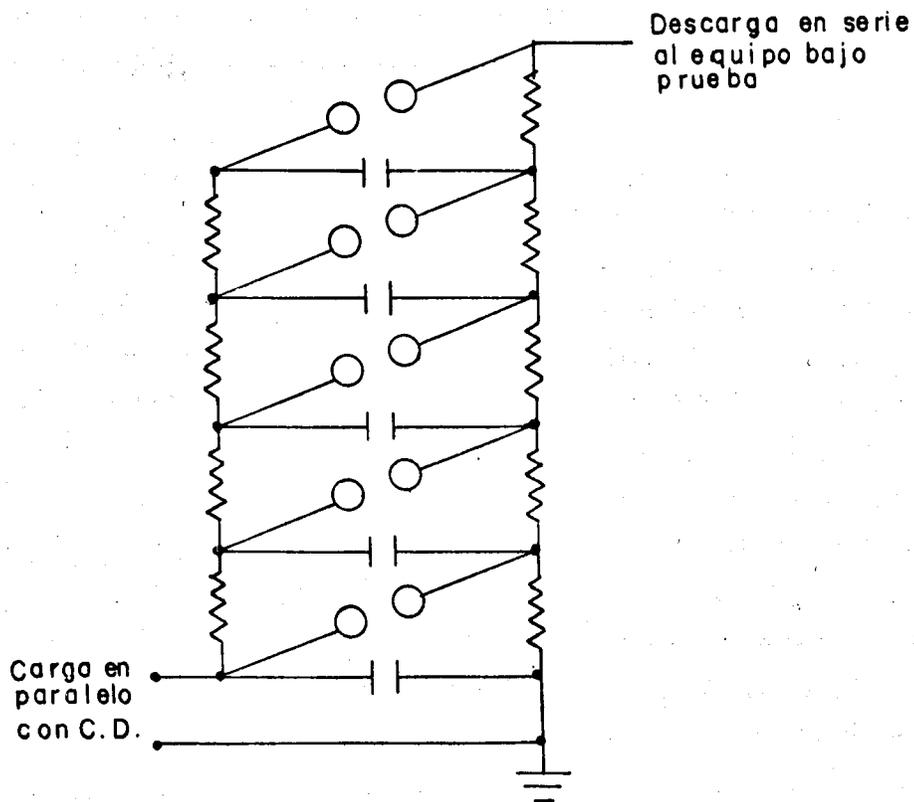


Diagrama de un generador de impulso

Esta onda normalizada, en función de sus tiempos de frente y de cola se identifica como 1.2/50 m seg.

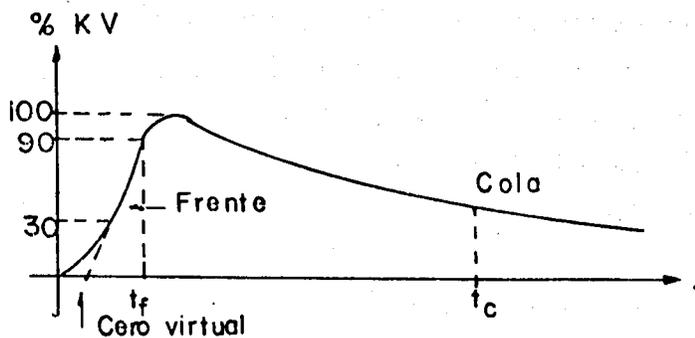


Fig. 65

Forma de onda de impulso

Para lograr la forma de onda, así como los tiempos requeridos, se diseña el generador de impulso con valores de capacitancias y resistencias adecuadas.

La prueba de impulso consiste en:

- Aplicación de onda a tensión reducida, cuyo valor de cresta es una fracción del valor correspondiente a la onda completa.
- Aplicación de frentes de onda y ondas cortadas, lo que se logra interrumpiendo las ondas con explosores calibrados.
- Aplicación de la onda completa, con todas las características que muestra la Fig. 65.

Cuando se especifican pruebas de impulso en las terminales de línea, se debe aplicar primeramente una onda de tensión reducida, después dos ondas cortadas y por último una onda completa.

Cuando se especifican pruebas de frente de onda, se debe aplicar una de tensión reducida, dos frentes de onda, dos ondas cortadas y una onda completa.

Registro de onda. Todos los impulsos que se apliquen a un transformador y que excedan del 40% del valor de cresta de la onda completa, se deben registrar por medio de un oscilógrafo de rayos catódicos. Este instrumento implica un divisor de voltaje que debe estar instalado entre el generador de impulso y el transformador en prueba. Las características físicas y la instalación del conjunto son de gran importancia para la interpretación confiable del oscilograma, pues los tiempos tan pequeños para las variaciones en la onda, motivan una influencia de las capacitancias mutuas, así como de las capacitancias entre el equipo, el piso y las paredes del laboratorio de prueba.

Cada una de las terminales del transformador se debe probar por separado, las terminales del devanado bajo prueba que no estén

en prueba, deben conectarse directamente a tierra, o a través de una resistencia de bajo valor, cuando se requiera medir la corriente.

Las terminales de los demás devanados deben conectarse a tierra en la misma forma, para limitar las tensiones inducidas.

Se pueden observar fallas durante el desarrollo de la prueba, como:

- Burbujas de humo
- Ruidos perceptibles dentro del transformador
- Ausencia de arqueo en el explosor

Fallas de resultados en los oscilogramas;

- Diferencia entre el oscilograma a tensión reducida y el de onda completa.
- Diferencia entre los oscilogramas de ondas cortadas, principalmente en el rizo final.
- Diferencia entre los oscilogramas a tensión reducida o de onda completa, y el oscilograma de corriente a tierra, cuando se toma este último por medio de un oscilógrafo extra, conectado a través de un derivador intercalado en el aterrizador del devanado en prueba.

Pruebas de descargas parciales

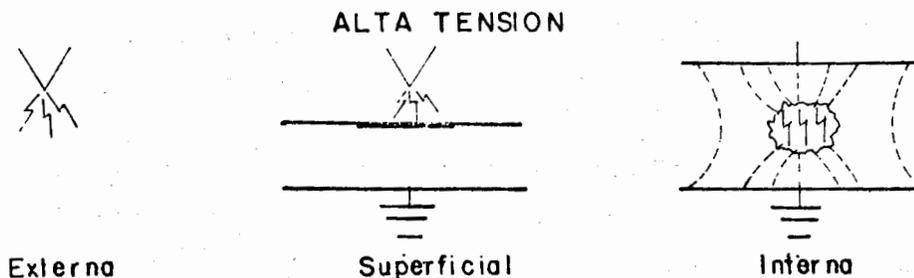
Esta prueba tiene por objeto verificar la calidad de las conexiones y de los dieléctricos, abarcando estos últimos los aislamientos y las boquillas o pasamuros. Consiste en aplicar al equipo en prueba, una tensión elevada cuyo valor no llega a los de potencial aplicado o de impulso, y detectar la presencia de fugas de corriente cuando existen zonas de falla. Estas fugas se conocen con el nombre de descargas parciales.

Si la prueba no indica presencia de descargas parciales puede considerarse como no destructiva.

Una descarga parcial es una fuga de corriente entre dos electrodos rompiendo la rigidez del medio que los separa, pero sin llegar al circuito-corto.

Son tres las clases o tipos de descargas parciales:

- a) Descargas externas. Cuando un conductor de alta tensión presenta salientes puntiagudas, principalmente en las conexiones mal terminadas, esta es una zona de alta concentración del campo eléctrico, y por consiguiente favorece la formación de pequeños arcos hacia el medio circundante. Si esta situación se presenta en el interior de un transformador produce degradación del aceite.
- b) Descargas superficiales. El origen es similar al de descargas externas, pero los arcos en vez de dispersarse en el medio circundante, inciden en la superficie de un aislamiento, provocando la degradación del mismo.
- c) Descargas internas. Cuando un dieléctrico contiene burbujas o impurezas, el coeficiente dieléctrico es notablemente menor en estas zonas con respecto al resto del cuerpo aislante, lo que provoca concentración del campo eléctrico que lo atraviesa, hasta el punto de ruptura de la rigidez de la burbuja o impureza, presentándose un pequeño arqueo dentro del dieléctrico. También en este caso hay un proceso de degradación.



Tipos de descargas parciales

El arqueo de las descargas parciales se asocia con un conjunto de fenómenos físicos y químicos que producen:

1. Pulsos de alta frecuencia
2. Radiaciones electromagnéticas
3. Pérdidas dieléctricas
4. Luz
5. Sonido
6. Presión de gas
7. Degradación de los dieléctricos

De todas estas manifestaciones, las más sencillas de detectar son las tres primeras, aunque en ocasiones se toman la cuarta y quinta como evidencia de la presencia de descargas, aunque éstas no se recomiendan para mediciones cuantitativas.

Circuitos de pruebas. Se requiere una fuente de alta tensión consistente en un transformador elevador alimentado en el primario con voltaje regulado.

Para formar el circuito de prueba existen varios arreglos, de los cuales describiremos dos en la Fig. 66.

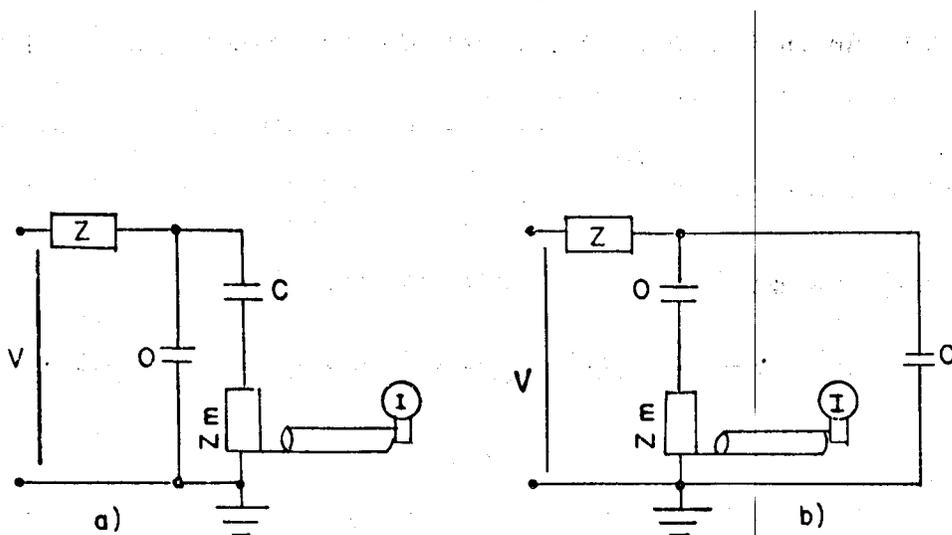


Fig. .66

Circuitos de prueba básicos para descargas parciales

En la Fig. 66, tenemos los siguientes elementos:

- V = voltaje alterno de alta tensión
- Z = Impedancia de acoplamiento para evitar pulsos de descarga e interferencias provenientes de la fuente
- O = Objeto en prueba. Un aislamiento es un dieléctrico entre dos conductores, lo cual constituye un capacitor tal como se simboliza en estos diagramas.
- C = Capacitor de acoplamiento
- Z_m = Impedancia de medición
- I = Instrumento de medición

El diagrama a) de la Fig. 66 muestra la tensión de la fuente aplicada al objeto de prueba y en paralelo con éste, el capacitor de acoplamiento y el sistema de medición en serie.

El diagrama b) de la Fig. 66 muestra la tensión de la fuente aplicada al objeto en prueba y el sistema de medición en serie, y en paralelo con ésta el capacitor de acoplamiento. Una variante de este circuito consiste en sustituir el capacitor por otro objeto en prueba (método diferencial).

Instrumentos de medición. La señal de la impedancia de medición se manda a instrumentos que pueden ser:

- Voltímetro cuasi-cresta
- Osciloscopios
- Sintonizadores con altavoces o audífonos.

Este método detecta las dos primeras manifestaciones de descargas parciales, o sea pulsos de alta frecuencia y radiaciones electromagnéticas.

La tercera manifestación se detecta mediante el puente shering.

La cuarta manifestación (luz) estaría limitada a las descargas externas y superficiales y se detecta visualmente, efectuando la prueba en una cámara oscura.

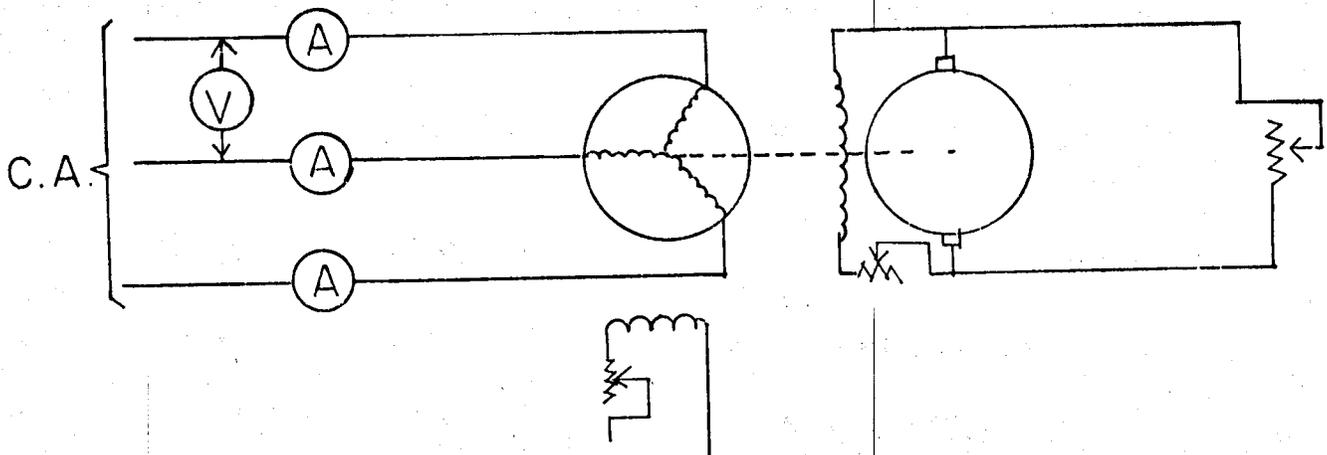
La quinta manifestación (sonido) se detecta mediante micrófonos efectuando la prueba en una cámara silente.

5.4 Balanceo de corriente, balanceo de voltaje, resistencia de aislamiento y prueba dieléctrica.

Balanceo de corriente

Esta prueba se realiza para verificar si la corriente en la máquina síncrona permanece estable y del mismo valor en las tres fases, cuando se somete a variación de carga.

Por lo general ésta se efectúa con la máquina trabajando como motor, utilizando para tal efecto el siguiente circuito de conexiones.



Para su realización seguiremos el procedimiento indicado a continuación:

- a) Se arrancará la máquina en prueba aplicándole su voltaje nominal (se conservará constante durante todo el proceso), llevándola a su velocidad de sincronismo.
- b) En estas condiciones se empezará a aplicarle carga paulatinamente y en pasos escalonados hasta llevarla a aproximadamente el 150% de su corriente nominal de placa.
- c) Se registrarán los valores del voltaje aplicado y de la corriente en sus tres fases, según se indica en la tabla indicada a continuación procurando que los ampérmetros usados tengan la misma calibración con objeto de evitar errores en los aparatos, o en caso contrario es recomendable usar un solo ampérmetro para tomar la corriente en las tres fases.

V	I ₁	I ₂	I ₃

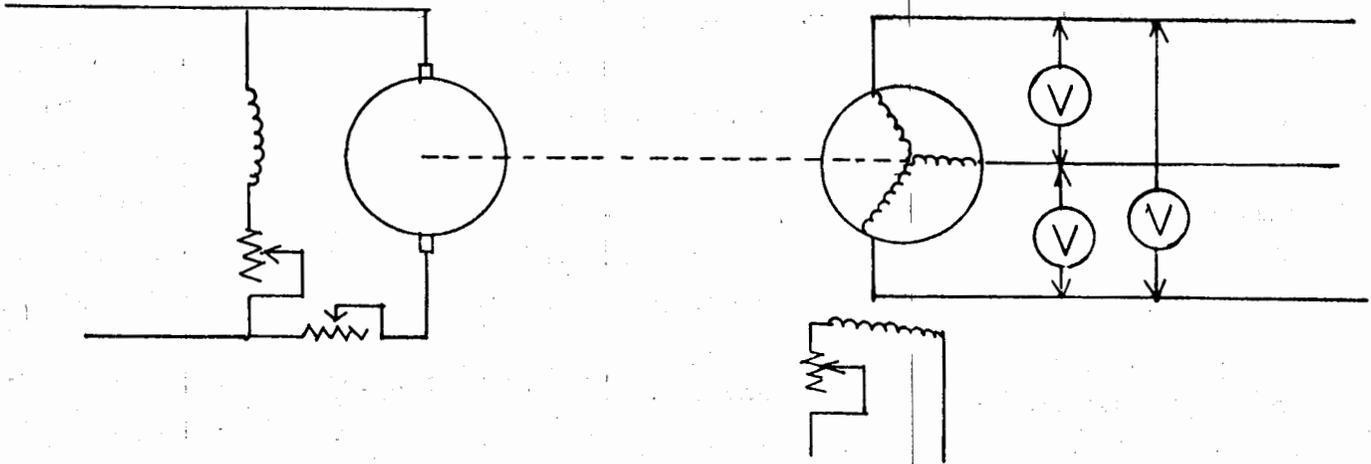
- d) Para verificar si la máquina se encuentra balanceada, se deberá tener la misma corriente en cada una de las fases, para cualquier grado de carga.

Balanceo de voltaje

Como en el caso anterior de balanceo de corriente, esta prueba se efectúa para verificar que el voltaje generado entre las tres fases de la máquina es exactamente el mismo para cualquier grado de excitación.

El circuito de conexiones por usar es similar al utilizado en la

prueba de saturación en vacío, o sea:



El proceso se efectuará de la siguiente manera:

- a) Se hará girar al generador en prueba, a su velocidad de sincronismo.
- b) Se excitará al ternador con mínima corriente, y se irá incrementando en pasos escalonados, hasta obtener aproximadamente el 130% del voltaje nominal.
- c) Se registrarán en cada paso la lectura de los tres vóltmetros procurando como en el caso anterior que estén perfectamente calibrados, o de lo contrario será preferible usar un solo aparato para hacer la medición entre las tres fases.
- d) La máquina estará en correcto balance de voltaje si los voltajes entre fases son los mismos para cualquier grado de excitación

I_{exc}	V_1	V_2	V_3

Resistencia de aislamiento

La medición de la resistencia de aislamiento nos dará una indicación del aislamiento de la máquina, que deberá conocerse antes de efectuar la prueba dieléctrica.

En transformadores, una resistencia de aislamiento de 1 megohm por cada 1000 volts de su tensión de trabajo, se considera suficiente para garantizar la prueba dieléctrica que le precederá. En cambio, en máquinas rotatorias su nivel de aislamiento no es tan alto como en los transformadores, recomendando las normas estándar del IEEE que para encontrar el valor de su resistencia de aislamiento se utilice la siguiente expresión

$$\text{Res. de aislamiento en megohms} = \frac{\text{Voltaje nominal}}{\frac{\text{KVA nominales} + 1000}{100}}$$

Para encontrar el valor de la resistencia de aislamiento se usa por lo general, el método del megger el cual nos dará el valor medido directamente en su escala, calibrado en megohms.

Esta resistencia es generalmente expresada en ohms o megohms y es proporcional al espesor de una homogénea capa de material aislante e inversamente proporcional al área bajo prueba.

Se determina principalmente el valor de la resistencia de aislamiento entre los siguientes componentes de la máquina.

- a) Entre todos los circuitos eléctricos y la coraza
- b) Entre las bobinas componentes de la máquina.

Para el primer caso se deberán conectar entre sí los circuitos eléctricos de la máquina, colocando una punta del megger en los mismos y la otra en la coraza; en el caso de obtener una resistencia muy baja, se irán eliminando circuitos hasta determinar en

cual de ellos se encuentra la falla.

Con el segundo caso podremos conocer si existe alguna falla de aislamiento entre bobinas.

El megger por lo general mide el valor de las resistencias con una corriente directa de 500 volts que se generan en el mismo aparato.

Prueba Dieléctrica

Esta prueba se realiza después de la obtención de la resistencia de aislamiento y debe efectuarse entre cada embobinado y todos los demás circuitos eléctricos y las partes metálicas por lo general conectadas a tierra.

Ambas terminales de los embobinados deberán estar interconectadas, de esa manera el voltaje impreso será uniformemente distribuido sobre todo el embobinado previniendo de un alto voltaje que se desarrollaría en el extremo libre debido a la distorsión de su onda.

La magnitud, frecuencia y duración de la prueba son generalmente determinadas de las normas del IEEE.

Para su realización, el equipo probador se conectará a la máquina, y su voltaje se irá elevando gradualmente hasta obtener el valor deseado; esta tensión se mantendrá en ese valor por el tiempo requerido (por lo general un minuto), reduciéndolo posteriormente en forma gradual, hasta un límite de seguridad antes de abrir el circuito.

Esta prueba es semejante a la que se conduce en transformadores y que se denomina prueba de tensión aplicada.

Bibliografía

1. Lucas M.C., Máquinas Eléctricas. Primera, Segunda y Tercera Parte: Tercera edición. Representaciones y Servicios de Ingeniería, S. A. 1968
2. Aguilar Campuzano G., Conversión de Energía Electromecánica Instructivo para pruebas, FIUNAM 1980
3. Langsdorf M.M. Teoría de las Máquinas de Corriente Alterna, Segunda Edición, Mc Graw Hill 1977.
4. Méndez Téllez Girón, J., Conversión de Energía Electromecánica, Instructivo para Pruebas, FIUNAM 1980.
5. Gingrich W.H., Máquinas Eléctricas, Primera edición Prentice-Hall, 1980.
6. Norma Oficial Mexicana, Calidad, funcionamiento y métodos de pruebas para motores de inducción de C.A. CCONNIE, 1971

Esta obra se terminó de imprimir
el mes de junio de 1991
en el taller de impresión
del Departamento de Publicaciones y Difusión
de la Facultad de Ingeniería.
El tiraje consta de 200 ejemplares

APUNTE
71-A

FACULTAD DE INGENIERIA UNAM.



612486

G.- 612486