



MOTORES SINCRONOS



1. INTRODUCCION

Los motores síncronos son máquinas síncronas que se utilizan para convertir potencia eléctrica en potencia mecánica de rotación. La característica principal de este tipo de motores es que trabajan a velocidad constante que depende solo de la frecuencia de la red y de otros aspectos constructivos de la máquina. A diferencia de los motores asíncronos, la puesta en marcha requiere de maniobras especiales a no ser que se cuente con un sistema automático de arranque. Otra particularidad del motor síncrono es que al operar de forma sobreexcitado consume potencia reactiva y mejora el factor de potencia. Estos motores se basan en la reversibilidad de los alternadores

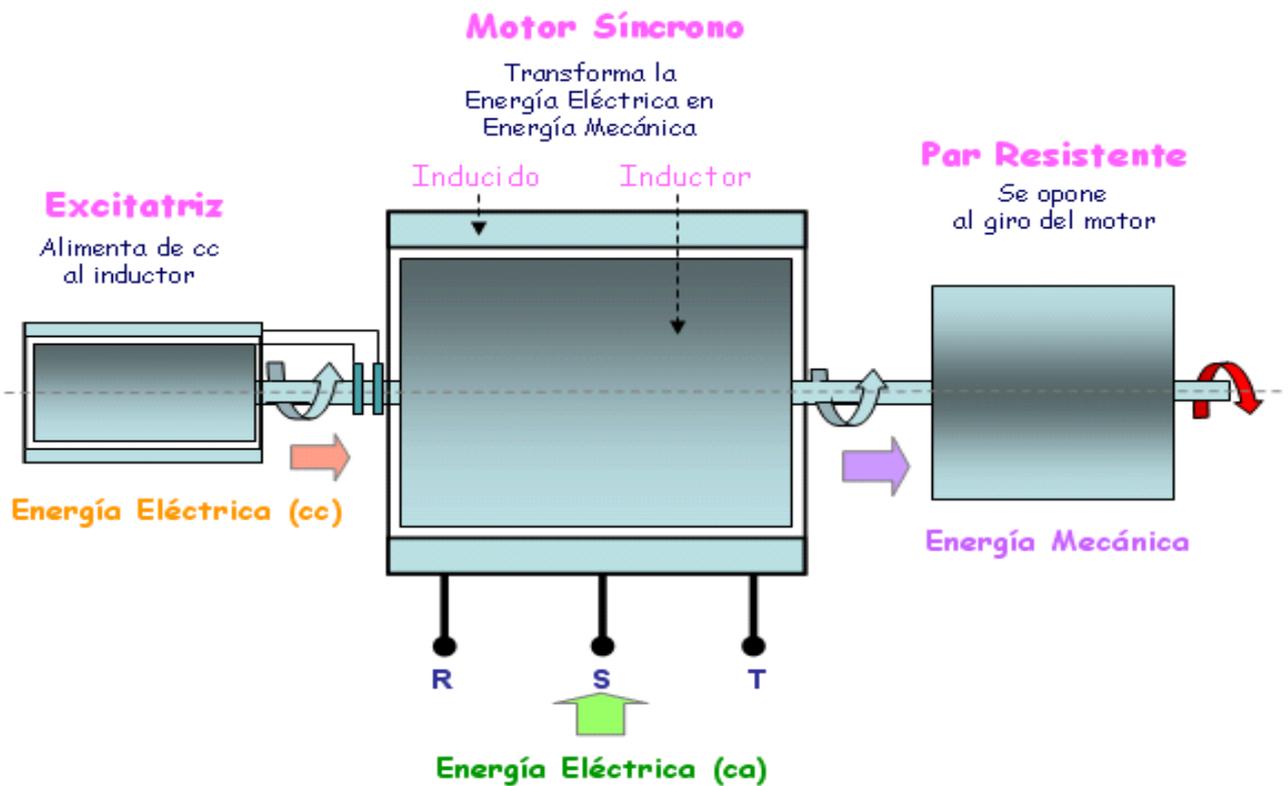
Su operación como motor síncrono se realiza cuando el estator es alimentado con un voltaje trifásico de CA provocando un campo magnético giratorio y consecutivamente el rotor alimentado con un voltaje de CC, produciendo otro campo magnético, el cual se alinearé con el campo del estator es decir lo perseguirá a una velocidad conocida como velocidad síncrona, que es la velocidad a la que gira el flujo magnético rotante que es:

$$\text{RPMs} = 120 \cdot F / p$$

Por lo que se dice que son motores de velocidad constante y suministran potencia a cargas que son básicamente dispositivos de velocidad constante

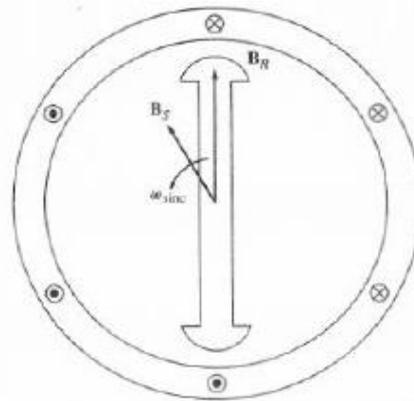


Motores síncronos trifásicos utilizados en molinos industriales



2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

La corriente de campo I_f del motor produce un campo magnético de estado estacionario B_R un conjunto trifásico de voltajes se aplica al estator de la máquina, que produce un flujo de corriente trifásica en los devanados inducidos produciendo un campo magnético uniforme rotacional B_s



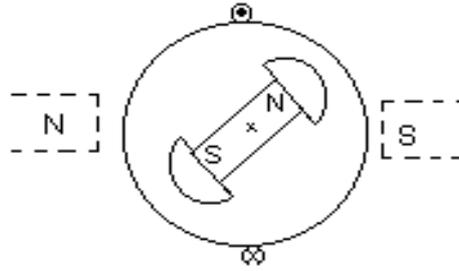
Campos Magnéticos de un Motor de dos Polos

Entonces, hay dos campos magnéticos presentes en la máquina, y el campo rotórico tenderá a alinearse con el campo estático así como dos barras magnéticas tenderán a alinearse si se colocan una cerca de la otra. Puesto que el campo electromagnético del estator es rotante (CMR), el campo magnético del rotor y el rotor tratarán constantemente de emparejarse con el CMR, es decir el principio básico de operación del motor sincrónico es que el rotor "persigue" el campo magnético rotante del estator (CMR), sin emparejarse del todo con el.

La diferencia que se manifiesta es que antes entregaba corriente a la red y ahora la recibe; si recibe corriente y gira es manifestación de que está trabajando como motor, y mantiene su velocidad síncrona porque ésta depende solo de la frecuencia.

$$F = p * \text{RPMs} / 120$$

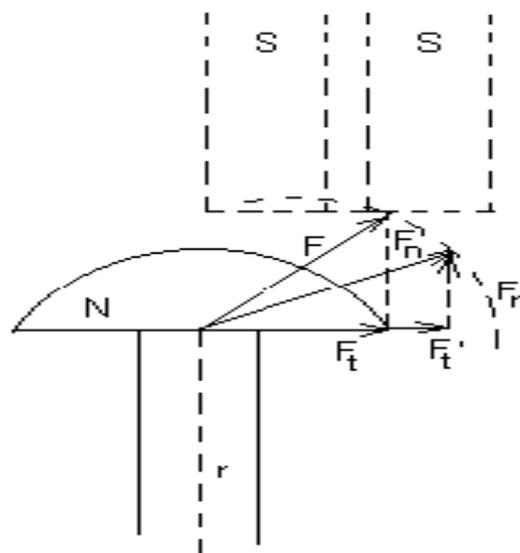
Una primera explicación de este fenómeno la podríamos deducir considerando la máquina como motor (Figura).-



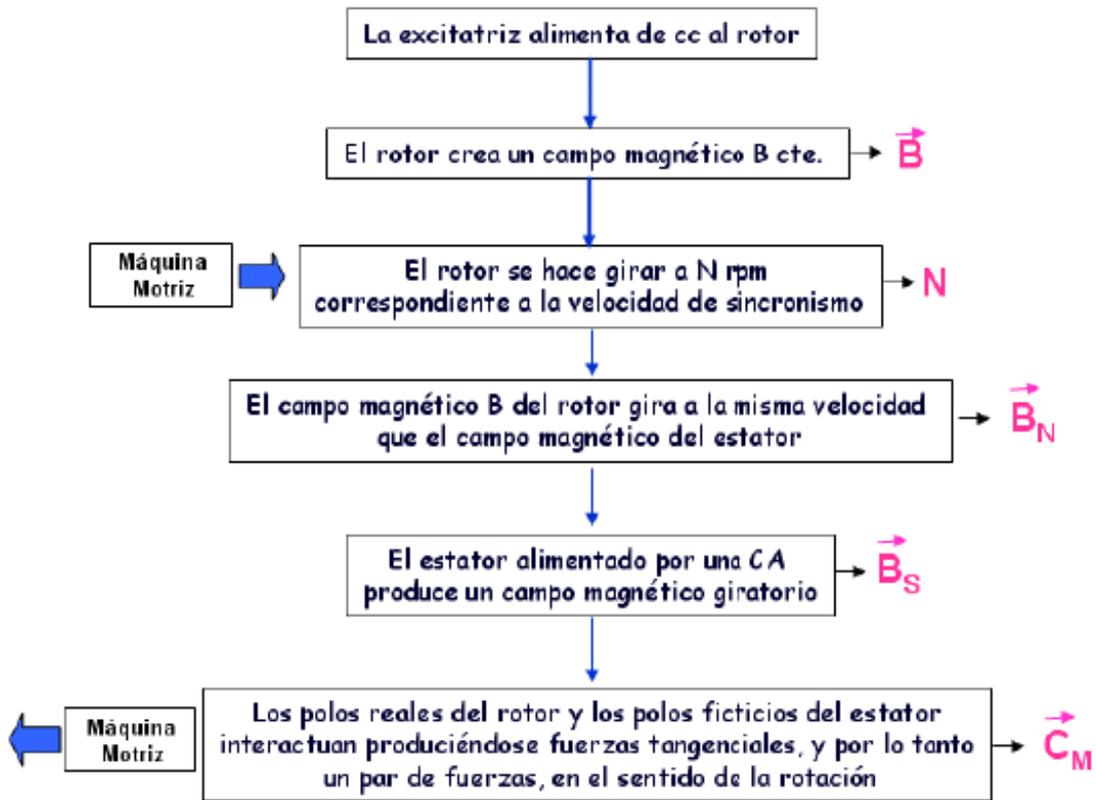
En esta última figura, al invertirse la corriente en el estator, ya que ahora es una impedancia conectada a la red que recibe corriente, esta genera un campo rodante sincrónico y que por atracción magnética entre polos de diferente nombre, arrastra al rotor en el mismo sentido y velocidad.

Dibujando solo un par de polos (Figura) y la fuerza de atracción magnética entre ellos; y descompuesta en sus componentes ortogonales: F_t (tangencial) y F_r (radial), el momento motor será: $M = F_t \cdot r$

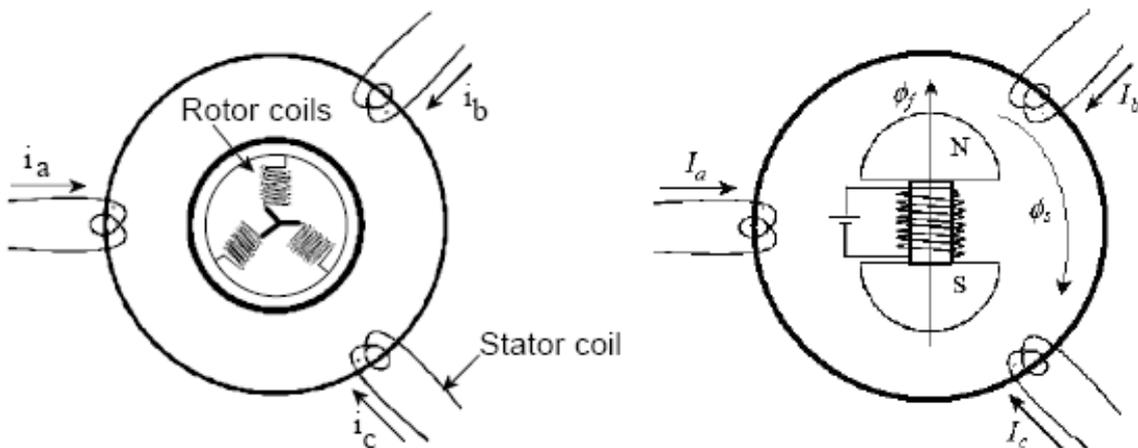
La fuerza radial F_r es la que mantiene ligado al Rotor con el campo del estator. Se observa que si crece el momento resistente (en el equilibrio dinámico es siempre igual al momento motor), en la expresión anterior lo único que puede crecer es F_t , por ejemplo crece a F'_t y si la excitación se mantiene constante (F depende de la excitación), el nuevo triángulo de fuerzas será el representado en línea punteada. Como consecuencia disminuyó F_r a F'_r . Si continua aumentando el momento resistente, se puede llegar a que la fuerza F_r que mantenía ligado al rotor sea muy pequeña y el rotor se desenganche y se detenga. Como la fuerza F actúa entre ejes de los polos, también se observa un desplazamiento de los polos sombras, al aumentar el momento resistente.



Principio de Funcionamiento • Motores Síncronos



El motor síncrono, utiliza el mismo concepto de un campo magnético giratorio producido por el estator, pero ahora el rotor consta de electroimanes o de imanes permanentes (PM) que giran sincrónicamente con el campo del estator.



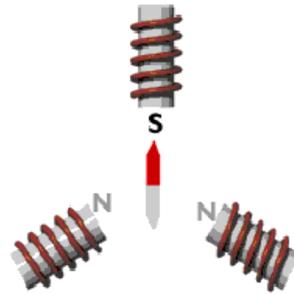
Motor Asíncrono (Inducción)

Motor (AC) Síncrono

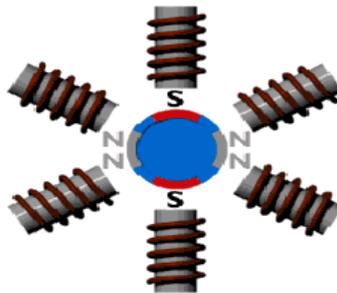
3. CLASIFICACION DE MOTORES SINCRONOS

Motor **síncrono** bipolar de imán permanente.

La razón por la que se llama motor síncrono es que el imán del centro girará a una velocidad constante síncrona (girando exactamente como el ciclo) con la rotación del campo magnético.



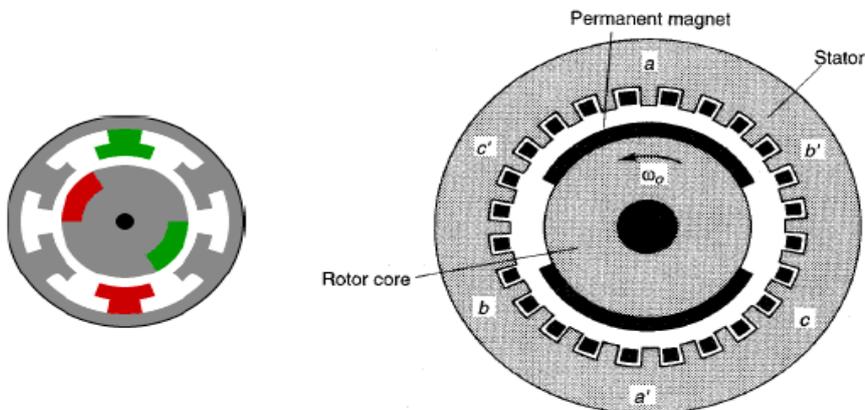
La velocidad de un generador (o motor) que está directamente conectado a una red trifásica es constante y está impuesta por la frecuencia de la red. Sin embargo, si dobla el número de electroimanes que hay en el estator, puede asegurar que el campo magnético girará a la mitad de la velocidad.



Los motores de AC que utilizan imanes para producir el campo magnético en el entrehierro, se denominan Motores de Imán Permanente (PMM o PMAC)

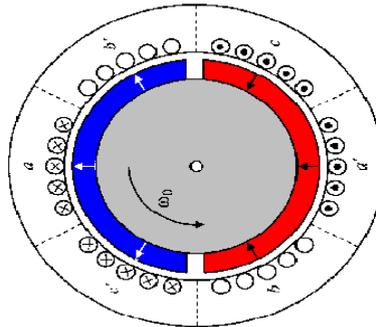
3.1.- Síncronos (PMSM):

Campo magnético giratorio y uniforme

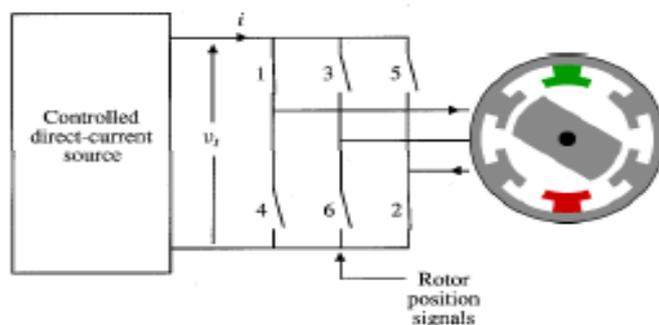


3.2.- Motores de Imán Permanente Conmutados o trapezoidales (BLDC_Motors)

El campo del estator es aplicado en pasos discretos. El rotor tiene dos imanes que cubren cada uno aprox. 180° del perímetro del rotor y producen una densidad de flujo cuasi rectangular en el gap. El estator tiene un bobinado trifásico, donde los conductores de cada fase están distribuidos uniformemente en porciones de arcos de 60°



El sistema de potencia conectara una fuente controlada de corriente a los bobinados del estator, de manera que en cada momento conectemos 2 fases del bobinado. Cada imán del rotor interactura con 2 arcos de 60° por los que circule corriente.



Motor de rotor cilíndrico

- El motor entrega potencia reactiva si está sobreexcitado, pero consume corriente en adelanto (Figura b); esto es, se comporta como un consumo capacitivo.
- El motor absorbe potencia reactiva si está subexcitado, pero consume corriente en atraso (Figura c); o sea se comporta como un consumo inductivo.

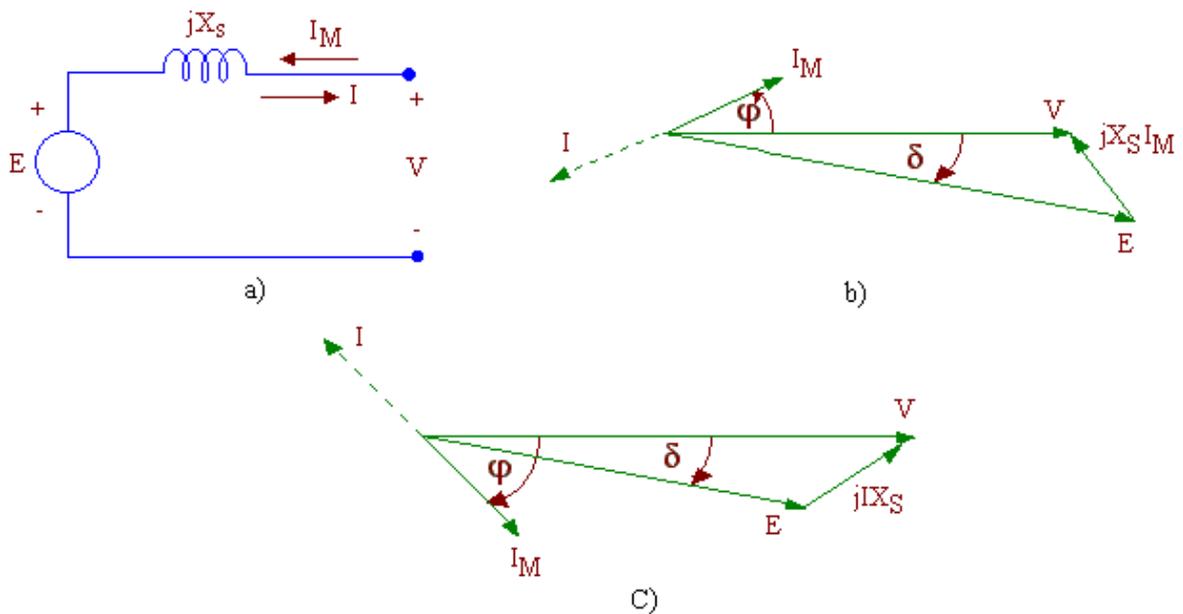


Figura - Motor síncrono de rotor cilíndrico:

- a) Circuito equivalente, b) Diagrama Fasorial sobreexcitado, c) Diagrama Fasorial subexcitado

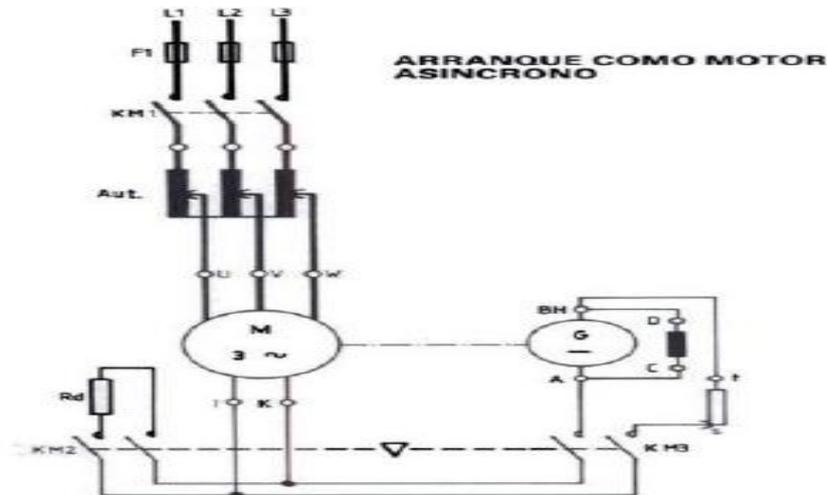
4. TIPOS DE ARRANQUES DE UN MOTOR SINCRONO

Existen diversas formas de arranque de los motores síncronos como por ejemplo: _

☞ **Arranque del motor reduciendo la frecuencia eléctrica.**- reducir la velocidad del campo magnético del estator a un valor suficientemente bajo para que el rotor pueda acelerar y se enlace con él durante la rotación del campo magnético. Esto se puede llevar acabo reduciendo la frecuencia de la potencia eléctrica aplicada. _

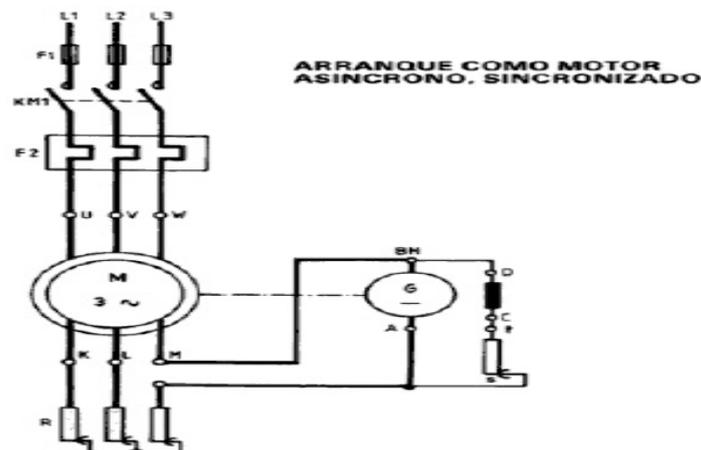
☞ **Como un Motor Asíncrono.**- El motor síncrono necesita de un arrollamiento especial de arranque dispuesto en la rueda polar. Este arrollamiento va unido al arrancador por medio de anillos rozantes. Una vez conectada la excitación, el motor entra por si solo en sincronismo.

Este procedimiento de arranque exige que el equipo de arranque disponga de un autotransformador (Aut) y una resistencia de descarga (Rd). El transformador tiene la misión de reducir la intensidad absorbida por el motor durante su arranque, lo que se consigue a base de reducir la tensión nominal, hasta un 30%. La resistencia de descarga tiene por finalidad evitar efectos perjudiciales que con su ausencia se producirían sobre bobinas polares en el momento de arranque. Esta resistencia se elimina una vez que el motor ha sido puesto en servicio.



Arranque del motor mediante un motor primario externo.- consiste en fijarle un motor externo de arranque y llevar la máquina sincrónica hasta su velocidad plena con ese motor. Entonces la máquina síncrona puede ser emparejada con un sistema de potencia como un generador, y el motor de arranque puede desacoplarse del eje de la máquina.

Como un Motor Asíncrono, pero Sincronizado.- Su puesta en marcha se hace con el auxilio de un arrancador, igual al de los motores de anillos rozantes, disponiendo que una fase rotórica circule por el inducido de la excitatriz. Cuando el motor alcanza una velocidad próxima a la de sincronismo, se excita la excitatriz, con lo que el motor termina por entrar en sincronismo.



Arranque de un motor utilizando devanado amortiguador (rotor ranurado). La técnica más popular para el arranque de motores sincrónicos es utilizar devanados amortiguadores: estos devanados son barras especiales dispuestas en ranuras labradas en la cara del rotor del motor síncrono y cortocircuitados en cada extremo por un anillo de cortocircuito.

Estos devanados tienen dos objetivos:

- a) *Hacer que el motor arranque como un motor de inducción*

b) *Impedir la oscilación de velocidad o péndulo*

FRENADO DE UN MOTOR TRIFÁSICO SÍNCRONO:

“La mejor forma de parar este tipo de motores es ir variando la carga hasta que la intensidad absorbida de la red sea la menor posible, entonces podemos desconectar el motor. Otra forma de hacerlo, y la más habitual, es regulando el reóstato, con ello variamos la intensidad absorbida y podemos desconectar el motor sin ningún riesgo.

Una forma por la cual se puede parar el motor síncrono es cuando alcance el par crítico, es decir cuando la carga asignada supera al par del motor entonces este se detendrá, no siendo una forma correcta de paro, ya que se producen recalentamientos.”

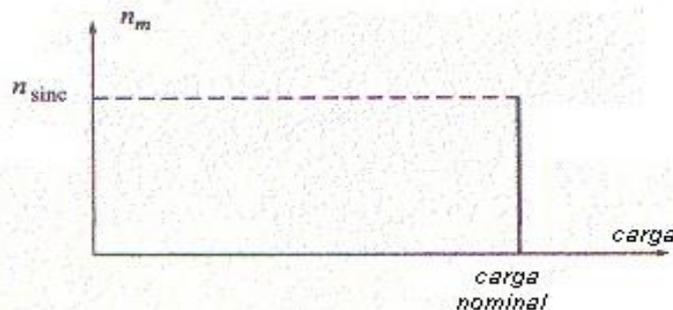
PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR SINCRONO

En primer lugar se procede a dar una alimentación trifásica al motor síncrono, la cual produce un campo magnético giratorio (CMR). Se procede a hacer girar el rotor hasta alcanzar la velocidad síncrona puede ser mediante un motor de lanzamiento auxiliar, después la excitatriz alimenta de CC al rotor, es decir se da una corriente de excitación, la cual se encarga de crear un campo magnético en el rotor el cual será constante. Entonces se logra que los campos producidos interactúen produciéndose el correcto funcionamiento del motor síncrono.

5. MOTORES SÍNCRONOS EN EL SEP

Al estar conectados los motores síncronos a sistemas de potencia mucho más grandes que los motores individuales, los sistemas de potencia aparecen como barrajes infinitos frente a los motores síncronos. Esto significa que el voltaje en los terminales y la frecuencia del sistema serán constantes, independientemente de la cantidad de potencia tomada por el motor

La velocidad de rotación del motor está asociada a la frecuencia eléctrica aplicada, de modo que la velocidad del motor será constante, independientemente de la carga. La curva característica resultante carga-velocidad sería la siguiente

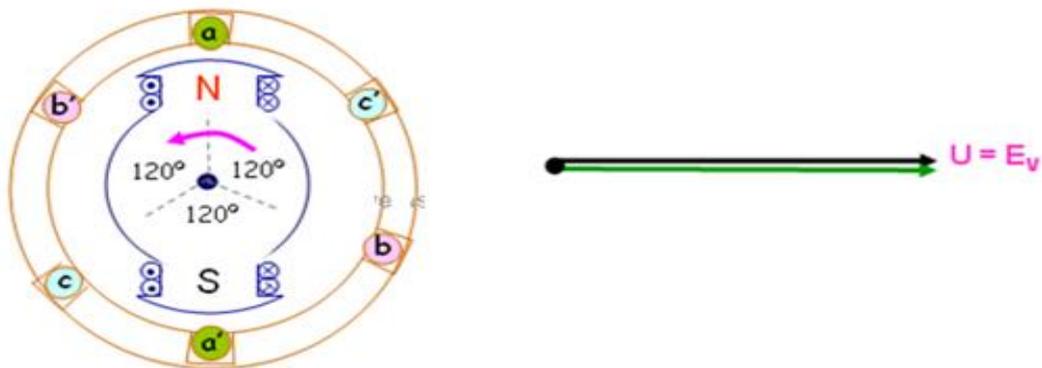


Velocidad Constante en Función de la Carga

Cuando la carga aplicada en el eje de un motor sincrónico excede la carga nominal, el rotor no puede permanecer más enlazado a los campos magnéticos estático y neto. En cambio, el rotor comienza a disminuir la velocidad frente a ellos. Como el rotor disminuye la velocidad, el campo magnético estático se entrecruza con él repetidamente, y la dirección del par inducido en el rotor se invierte con cada paso. El enorme par resultante oscila primero en una forma y luego en otra causando que el motor entero vibre con fuerza. La pérdida desincronización después que se ha excedido el par máximo, se conoce como deslizamiento de polos.

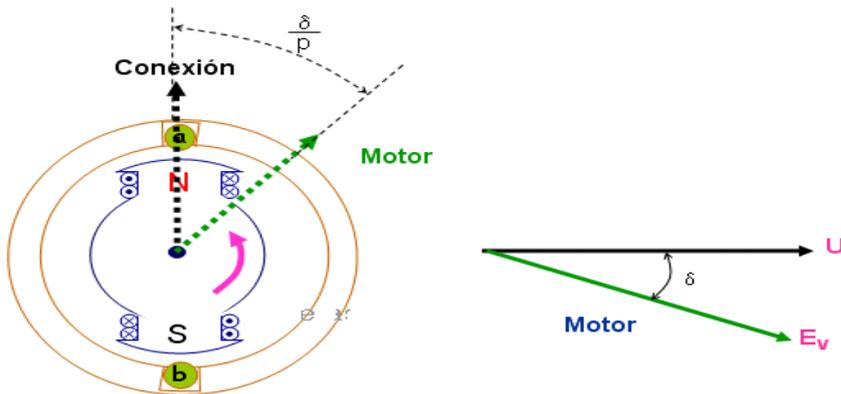
MOTOR EN VACIO

Si a un alternador trifásico se le retira la máquina motriz y se alimenta su estator mediante un sistema trifásico de C. A. se genera en el estator un campo magnético giratorio, cuya velocidad sabemos que es $N = 60 \text{ f/p}$. Si en estas circunstancias, con el rotor parado se alimenta el devanado del mismo con C. C. se produce un campo magnético rotórico fijo, delante del cual pasa el campo magnético del estator. Los polos del rotor están sometidos ahora a atracciones y repulsiones, en breves periodos de tiempo, por parte de los polos del estator, pero el rotor no consigue girar, a lo sumo vibrará. Pero si llevamos el rotor a la velocidad de sincronismo, haciéndole girar mediante un motor auxiliar, al enfrentarse polos de signo opuestos se establece un *enganche magnético* que les obliga a seguir girando juntos, pudiéndose retirar el motor auxiliar.



MOTOR EN CARGA

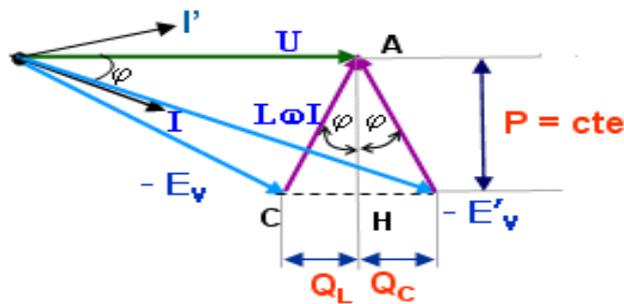
Una vez que se produzca la conexión del motor a la red, se produce un desplazamiento (d/p) del eje de los polos del rotor respecto de los polos ficticios del estator, que aumenta con la carga del motor, y tal que si este desplazamiento supera un límite el motor se para (ver más debajo "estabilidad del motor")



Curvas características

El motor síncrono para una misma potencia P , tal como vemos en la grafica, puede absorber una corriente variable I según su excitación

- ☞ El motor subexcitado absorbe potencia reactiva (Q_L)
- ☞ El motor sobrexcitado suministra potencia reactiva (Q_C)



Esta propiedad se traduce gráficamente en una serie de **curvas en V de Mordey**. Cada una de ellas da para una potencia útil constante, la variación de la corriente absorbida I en función de la corriente de excitación I_{ex}

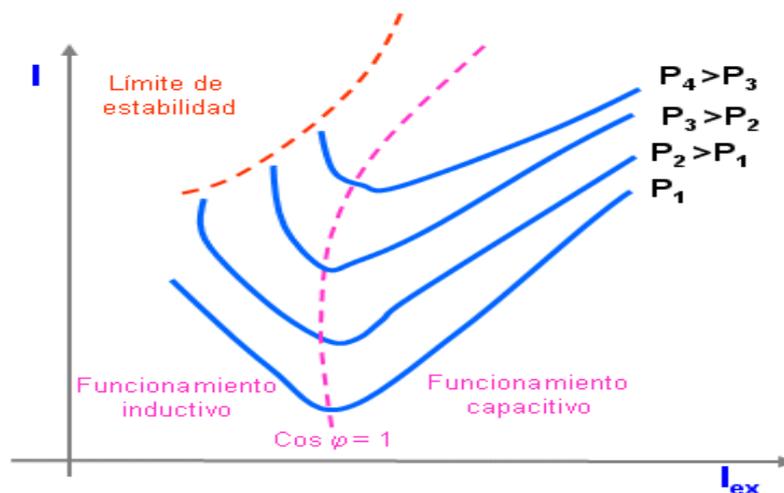


Fig 7. Curvas en V de Mordey

Como se sabe, la velocidad de este tipo de motores es constante desde vacío hasta el par máximo que el motor puede suministrar que cuyo valor es:

$$T_{max} = 3 \cdot V \cdot E_{af} / X_s \cdot W_{ms}$$

Esto indica que mientras más grande sea la corriente de excitación (y por lo tanto E_v), más grande será el par máximo del motor

Si se fija una carga al eje de un motor síncrono, el motor desarrollará suficiente par como para mantener el motor y su carga a velocidad síncrona. Al incrementar la carga en el eje, se mantendrá la velocidad pero aumentará el ángulo

El voltaje interno generado E_v es igual a $K\omega\Phi$ y por tanto sólo depende de la corriente de excitación en la máquina y de la velocidad de ésta. Por lo tanto, al variar la carga, el valor de E_v se debe mantener constante.

En base a los resultados anteriores, se hace un estudio de la relación entre la Corriente del inducido I y la corriente de campo o de excitación (I_{ex}). En la figura se observa que al crecer la excitación (y en consecuencia E_v), la corriente de carga comienza a disminuir, se hace mínima para $\cos\phi=1$, y vuelve a aumentar cuando se hace capacitivo.

Esta ley de variación se puede reproducir para diferentes estados de carga (plena carga, media carga o un cuarto de carga) para obtener las curvas en V del motor síncrono.

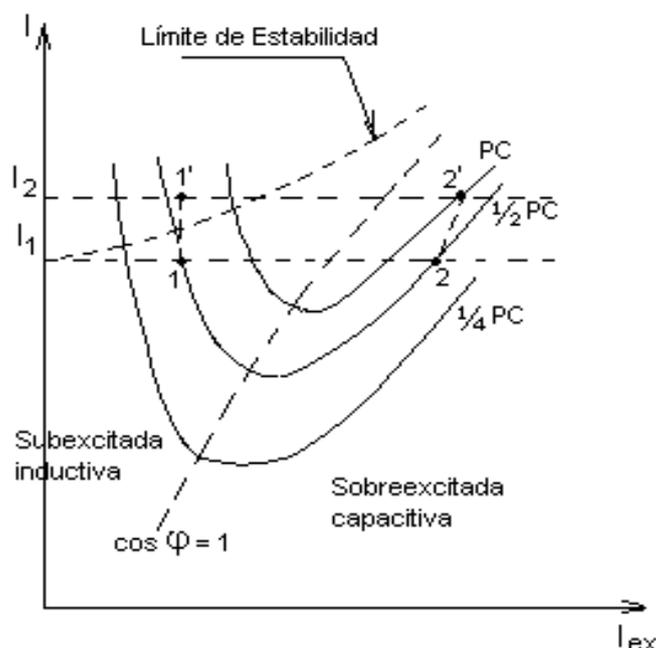


figura 8 : curvas en V de un motor síncrono

Para bajos valores de excitación, la máquina es inductiva y consume potencia

reactiva Q. Para $\cos\Phi=1$, la corriente es mínima, por lo que los mínimos en cada estado de carga determinan la curva de $\cos\Phi=1$.

Estos puntos se encuentran desplazados hacia la derecha porque a mayor carga más reacción de inducido, por lo que es necesario aumentar la excitación. Para valores grandes de excitación la máquina es capacitiva y suministra potencia reactiva al sistema. Es importante destacar que al controlar la corriente de excitación, se puede controlar la potencia reactiva suministrada a, o consumida, por el sistema de potencia.

Para muy bajos valores de excitación llega un punto en que la fuerza de atracción magnética no es suficiente para mantener al rotor ligado al campo giratorio, y la máquina se desengancha y se detiene. Estos puntos determinan el límite de estabilidad.

“Un motor puede trabajar subexcitado o sobreexcitado para un mismo estado de carga (punto 1 o 2 a media carga), pero ante una sobrecarga ($I_2 - I_1$) en el primer caso se detiene (punto 1’); en cambio en el segundo solo pasa a un estado de carga mayor (punto 2’). Por tanto, el motor sobreexcitado, además de entregar un par máximo más grande, es más estable y presenta mejor $\cos\Phi$ ”

6. ENSAYOS NORMADOS PARA MOTORES SINCRONOS

Los motores sincrónicos son ensayados de acuerdo con las normas , IEC, NEMA, IEEE y API ,UL en modernos laboratorios capacitados para testear motores de media y alta tensión con potencia de hasta 20.000 kVA y tensiones hasta 15.000 V, con monitoreo totalmente informatizado y control de alta precisión.

Los ensayos están divididos en tres categorías: ensayos de rutina, tipo y especiales.

Descripción de Pruebas

Los programas de prueba estándar se dividen en tres partes: **las pruebas de rutina, pruebas de tipo y pruebas especiales**. El programa de pruebas de rutina se hace para cada maquina. La prueba de tipo es realizado, además de las pruebas de rutina normalmente a una de las maquinas de una serie de maquinas similares o por una petición del cliente. Las pruebas especiales son necesarias si la maquina funcionara en condiciones especiales, por ejemplo aplicaciones marinas. El programa de pruebas especiales es especificado por el cliente.

Descripción de pruebas de rutina para motores sincrónicos

Inspección visual

Antes de cualquier prueba a realizar a la maquina, se verifican los siguientes puntos:

- Numero de serie correcto de la maquina se encuentra localizado en el marco (se refiere a maquinas completamente ensamblado).
- Ventiladores y sopladores con sus escudos, otros escudos y otras cubiertas, cajas de conexión y auxiliares están correctamente ensamblados.
- Extensiones de eje y las ranuras no estén dañados.
- Cojinetes están llenos de grasa de la calidad correcta.
- La brushgear de una maquina provista de anillos esta en buenas condiciones.
- Cepillo de puesta a tierra eventual esta en buenas condiciones.
- Juntas de tuberías de refrigeración de agua y tuberías de aceite lubricante estén impecables.
- Tipo y modelo del regulador de tensión (por AMG) están de acuerdo con las instrucciones de fabricación y la orden.

Medida de la resistencia de aislamiento

El propósito de la medición de la resistencia de aislamiento es para comprobar el estado de los aislamientos de las bobinas, terminales, brusher y otras partes conductoras contra el marco de la maquina. Aislamientos defectuosos y húmedos muestran un bajo valor de resistencia de aislamiento. La resistencia de aislamiento se mide antes de que cualquier cable este conectado a la maquina. Cuando todas las pruebas se han realizado, las resistencias de aislamiento se medirán de nuevo para controlar la condición final.

Las resistencias de aislamiento de las bobinas se miden utilizando un probador Megger o instrumento similar. La prueba de tensión es de 1000 VCC, si no se especifica lo contrario (de acuerdo con la mayoría de las sociedades de clasificación la tensión de prueba para los devanados del estator de las maquinas tienen una tensión nominal del estator de 7200 V o mas es de 5000 VCC). La conexión de prueba para un devanado trifásico se muestra en la **fig. 3.1**

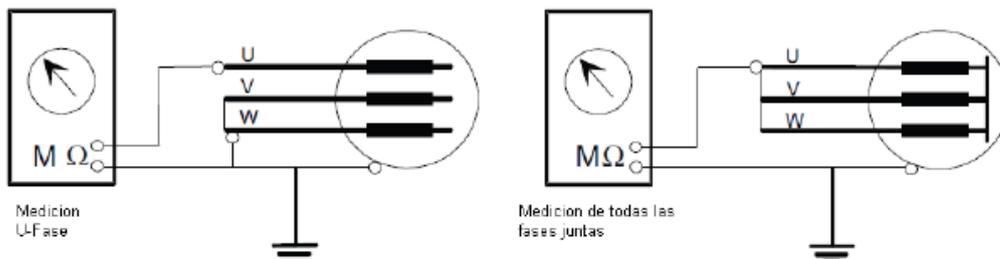


Figura 3.1 Medición de la resistencia de aislamiento del bobinado del estator de una motor síncronico

Medición de la resistencia de los devanados / IEC 60034-4

Las resistencias de los devanados se miden para averiguar:
Conexiones defectuosas y dimensiones incorrectas del conductor

- Eventuales asimetrías de los devanados
- Un valor exacto de la resistencia del devanado a temperatura ambiente y la temperatura correspondiente del devanado para la prueba de calor (véase los ensayos de tipo MDD 8006328)

Las resistencias de los bobinados se miden mediante un micro-ohmetro o el uso de dos medidores digitales y una fuente de corriente constante, ver **fig. 3.2**. Toda corriente de la fuente constante de corriente, debe fluir a través de las bobinas a realizar la prueba.

Eventuales circuitos en paralelo se debe desconectar antes de las mediciones. La temperatura de las bobinas del estator se mide siempre.

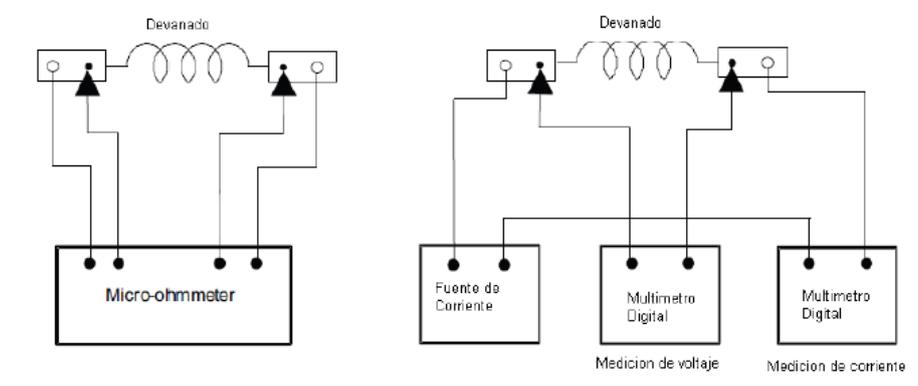


Figura 3.2 Medida de resistencia de los devanados

Verificación de los detectores de temperatura y resistencias de calefacción

Los detectores de temperatura son elementos de la resistencia lineal (Pt-100) o termistores. Ambos son verificados por medición de los valores de resistencia. Las mediciones se realizan con un bajo voltaje (menos de 2,5 V) por un instrumento digital. La resistencia medida y los valores de temperatura son registrados con las marcas en terminales correspondientes.

Mediciones de la vibración / IEC 60034-14

Las vibraciones se derivan de diversas razones, tales como:

- Desequilibrio del rotor, que pueden ser de origen estática o dinámica
- Arrastre magnético desigual entre el estator y el rotor, que puede ser causada por ejemplo por un entrehierro asimétrico
- Devanados asimétricos, defectuoso o dañados

Las vibraciones del rotor se transferirán sobre el eje a los soportes que lleven o pedestales que sostienen. Grandes fuerzas de vibración y las estructuras de soporte elástico producirán grandes amplitudes. Las características de la vibración medidas en la superficie de la caja del cojinete dará una indicación sobre las fuerzas que se trate y sobre el grado de severidad de la fatiga. Basado en las experiencias sobre los diferentes tipos de maquinas, los límites de vibración se dan en las publicaciones pertinentes.

La medición de las vibraciones se realiza en todas las maquinas. Las mediciones de las vibraciones son medidas cuando la maquina sincrónica se encuentra manejada por el motor CC a velocidad y voltaje nominal y sin carga. Las vibraciones se miden en los soportes o pedestales en dirección horizontal, vertical y axial.

PRUEBA DE ALTO VOLTAJE /NEMA MG-1 1978

Especifica para la prueba de alto voltaje la magnitud , la frecuencia , la forma de onda y la duración del voltaje de prueba

especifica el nivel de carga permitido ante la presencia de desbalances de voltajes en la alimentación al motor. El cálculo del Factor de Servicio Efectivo (Eff.s.f.) identifica los niveles apropiados de carga para evitar sobrecalentamiento en los devanados. Un incremento de 10°C en la temperatura reduce a la mitad la vida útil del aislamiento del motor (IEEE 43-2000)

VDI/VDE standard 3680, sheet 2 Static Excitation Systems for the Excitation and Voltage Regulation of Synchronous Machines

Calificación de carga UFN campo de tensión que debe aplicarse para el devanado de campo con la máquina síncrona a la temperatura normal de funcionamiento y funcionando a la potencia nominal, factor de potencia nominal y la velocidad nominal, con el fin de impulsar el IFN campo nominal Corriente en vacío Corriente nominal del IEN sistema de excitación La corriente de excitación requerida por la máquina síncrona en carga continua máxima gobierna el diseño de la excitación componentes del sistema y se llama la corriente nominal del excitación del sistema. El requisito mínimo se aplica lo siguiente: $IEN > 1,05 IFN$ Techo actual del sistema de excitación I_p La corriente máxima de salida del sistema de excitación se llama I_p el actual límite máximo, y se requiere que sea al menos 1,4 veces la nominal de carga de corriente de campo del IFN durante un tiempo mínimo de 5 s.

Techo de tensión del sistema de excitación UP Esta se define como la tensión de salida máxima de la excitación sistema es capaz de suministrar al convertidor de tiristor en su pleno ajuste positivo voltaje de salida.

La tensión de techo depende de la manera en la que la excitación sistema está conectado, en los estados de funcionamiento de la sincrónica máquina y el suministro de potencia de excitación, y en la variación de estos estados de

funcionamiento a través del tiempo.

El diseño del sistema de excitación se rige por el nominal techo voltaje.

Descripción de pruebas de tipo para motores sincrónicos

Estas son las pruebas que se realizan en adición a las pruebas de rutina.

Pérdidas y eficiencia / IEC 60034-2

La eficiencia de una maquina síncrona se calcula comunmente aplicando el método de perdida de segregación. La eficacia convencional se relaciona con la suma de las perdidas segregadas como sigue.

Para motor síncrono: Eficiencia = (Pútil / Pingreso) x 100.

En esta ecuación la potencia de entrada y perdidas están en las mismas unidades. Las pérdidas que serán incluidas y como evaluarlas se especifican en la serie estándar de aplicación **ANSI C50** y **NEMA MG 1 -1978**

Prueba de exceso de velocidad / IEC 60034-1

Todos los generadores sincrónicos (y también algunos motores) están sujetos a la prueba de sobre velocidad, porque en operaciones temporales pueden llegar a velocidades mas altas que la nominal. La máquina síncrona es conducida por un motor de CC, con terminales circuito abierto y sin excitación. La velocidad se incrementa 1,2 veces la velocidad nominal durante 2 minutos, si no se acuerde otra cosa.

Curva de vacío / IEC 60034-4

El propósito de la prueba de la curva sin carga es:

- Para medir la corriente de excitación de la maquina en circuito abierto a velocidad nominal y en la terminal de varias voltajes. Sobre la base de las mediciones, la línea del entrehierro se traza para la maquina
- Para medir las perdidas en vacio de la maquina (cuando se acuerde en un contrato). Las perdidas se componen de las perdidas de hierro PFe, y la fricción y las pérdidas de ventilación Pr

El generador síncrono o motor a probar esta directamente acoplado a un motor CC calibrada. Las pérdidas del motor CC puede calcularse con exactitud en el rango de operación en cuestión. Para los cálculos de la perdida, la corriente de armadura y el voltaje del motor CC, así como la corriente de excitación se debe medir. El mismo manejo del motor CC también debe utilizarse para la prueba de la curva de corto circuito y la prueba del factor de potencia cero.

El regulador de tensión del generador se desconecta.

La prueba se repetirá al menos en 1.2, 1.0, 0.9, 0.7 y 0.4 veces la tensión nominal, además, con la corriente de excitación en cero. La corriente de excitación se debe disminuir de forma continua. A tensión nominal los terminales, la temperatura del devanado del estator se mide con la ayuda de los detectores de temperatura, para permitir el cálculo de las pérdidas. La curva de vacío se representa con base en los resultados de las pruebas, ver fig.3.10. La remanencia magnética hace que la curva de intersección del eje vertical pase un poco por encima del punto cero de la tensión. Las normas de ensayo actual estado que la curva de vacío debe comenzar en cero voltaje correspondiente con cero corriente de excitación. Por esa razón, la curva final sin carga es a menudo derivado de la medida por moverlo hacia la derecha tanto como sea necesario.

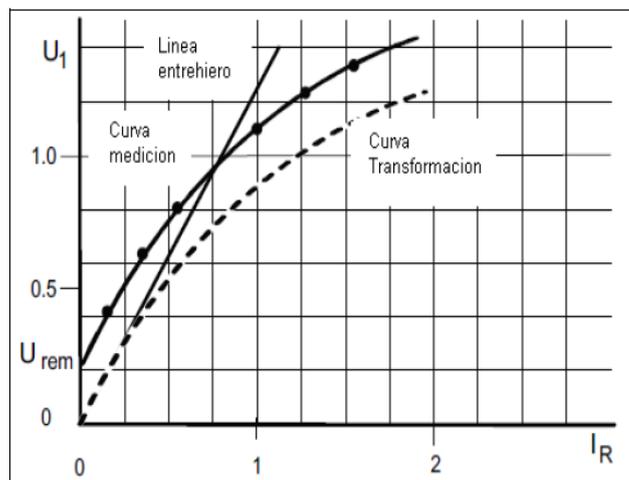


Figura. 3.10 Curva sin carga de una motor síncronico.

Curva de Cortocircuito / IEC 60034-4

El propósito de la prueba de la curva de corto circuito es:

- Para medir las características de la máquina síncrona en varios valores de corriente de excitación, con la terminales del estator en cortocircuito.
- Para controlar la simetría de los bobinados de fase del estator.
- Para medir las pérdidas en el cobre P_{Cu} y las pérdidas adicionales de carga P_{Add} en el bobinado de estator (cuando se).

El generador síncrono o motor a probar es acoplado directamente un motor CC calibrado, que ha sido utilizado para pruebas sin carga.

El regulador de voltaje del generador se desconecta. Todos los protectores, las tapas y las guías aéreas de la máquina síncrona para la prueba, debe estar en su lugar.

La prueba se repite en las corrientes de corto circuito de 1.1, 1.0, 0.75, 0.5 y 0.25 veces la corriente nominal, y, además, a corriente de excitación cero. La corriente de excitación se debe disminuir de forma continua. En la corriente nominal del estator, la temperatura de los bobinados del estator se mide con

la ayuda de los detectores de temperatura, para permitir el cálculo de las pérdidas.

La curva de corto circuito se traza para la maquina como se muestra en la fig. 3.12.

Debido a la saturación baja, la curva es una línea recta.

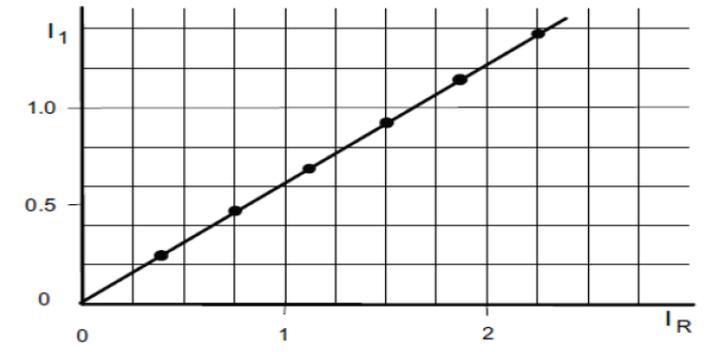


Figura. 3.12 Curva de cortocircuito de un motor síncrono

ANSI / UL 1004-1

Incluye los requisitos que son apropiados para los motores instalados en campo, incluyendo los requisitos de construcción que abordan:

- Protección de las aberturas de ventilación,
- Accesibilidad de partes vivas sin aislar,
- Compartimentos de cableado de campo, terminales, y espaciados, y
- Consideraciones Equipos de puesta a tierra.

Además, la norma incluye una serie de pruebas de rendimiento, incluyendo pruebas de socorro mecánico y la tensión, diseñados para asegurar que el equipo es adecuado para la instalación en el campo.

Descripción de las pruebas especiales

Prueba súbita de corto circuito / IEC 60034-4, IEEE 115

El objetivo de esta prueba súbita de corto circuito es:

- Para asegurarse de que la construcción mecánica de la maquina es lo suficientemente fuerte como para soportar tensiones, que son causados por corto circuitos y de otras perturbaciones eventuales
- Para saber la información básica sobre las características de la máquina síncrona durante condiciones transitorios (reactancias X_d'' , X_d' , X_d y constantes de tiempo T_d'' , T_d')

Medición de la tensión del eje

Pequeñas asimetrías del núcleo de hierro y las bobinas, así como los picos de voltaje provenientes del regulador de voltaje, pueden provocar tensiones CA en el eje de una máquina síncrona. La frecuencia de tales tensiones es sobre todo a la frecuencia de línea, o una armónica de la misma. Tensiones en el eje

puede dar lugar a corrientes en los cojinetes, que son perjudiciales para la manga y rodamientos de rodillos. Para evitar las corrientes, uno de los rodamientos está aislado del armazón de la maquina o el eje esta puesto a tierra con unas escobillas aterrizadas.

La tensión del eje (CA) se mide con un voltímetro entre los extremos del eje.

7. SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN MOTORES SINCRONICOS

Por puesta a tierra de protección se entiende la conexión de determinados elementos de una instalación eléctrica con el potencial de tierra, asegurando la actuación de los elementos de protección y evitando tensiones de contacto peligrosas para las personas. La instalación de la puesta a tierra se logra, entre otras alternativas, mediante el empleo de electrodos enterrados cuyas características dependen de aspectos como la calidad del suelo, parámetros eléctricos del sistema y la superficie de terreno disponible. Es importante mencionar que para la protección mediante un sistema de puesta a tierra **NO DEBEN UTILIZARSE LOS DUCTOS O LAS CAÑERÍAS DE COBRE DE UNA INSTALACIÓN**. Es por eso que normalmente se cuenta con tres conductores al momento de arreglar un enchufe o instalar un nuevo equipo, dos de los cuales corresponden a fase (energizada) y neutro, y el tercer conductor es el de la puesta a tierra de protección. Si por ejemplo en la instalación de un motor no se hubiese instalado este tercer conductor, o si la puesta a tierra estuviese mal hecha, entonces en caso que ocurre una falla al interior de la máquina puede que un conductor energizado haga contacto con la carcasa metálica del motor dejándolo a una tensión peligrosa, sin que una persona lo note. Sin embargo, al contar con una adecuada instalación de puesta a tierra de protección, la carcasa estará puesta al potencial de tierra, por lo que en el momento de contacto del conductor energizado con la carcasa se produciría un cortocircuito y actuarán las protecciones correspondientes.

8. CONCLUSIONES

- ☞ Los motores síncronos son máquinas síncronas que se utilizan para convertir potencia eléctrica en potencia mecánica de rotación. La característica principal de este tipo de motores es que trabajan a velocidad constante que depende solo de la frecuencia de la red y de otros aspectos constructivos de la máquina Los motores síncrónicos suministran potencia a cargas que son básicamente dispositivos de velocidad constante
- ☞ El motor síncrono, utiliza el mismo concepto de un campo magnético giratorio producido por el estator, sin embargo ahora el rotor consta de electroimanes o de imanes permanentes (PM) que giran síncrónicamente con el campo del estator
- ☞ Al estar conectados los motores síncronos a sistemas de potencia mucho más grandes que los motores individuales, los sistemas de potencia aparecen como

barrajes infinitos frente a los motores síncronos. O sea significa que el voltaje en los terminales y la frecuencia del sistema serán constantes, independientemente de la cantidad de potencia tomada por el motor

- ☞ La mejor forma de detenerlos a este tipo de motores es ir variando la carga hasta que la intensidad absorbida de la red sea la menor posible, entonces podemos desconectar el motor. Otra forma de hacerlo, y la más común, es regulando el reóstato, con ello variamos la intensidad absorbida y podemos desconectar el motor sin ningún riesgo
- ☞ Un motor síncrono tiene dos características fundamentales para su operación, la primera cuando la carga y la excitación son variables, pues en esta consideración el factor de potencia cambia a capacitivo. La segunda cuando la carga es constante y la excitación es variable, pues en esta consideración se tiene un control total del factor de potencia, ya que puede comportarse como Inductivo, Capacitivo e incluso puramente resistivo.
- ☞ Pueden servir como dispositivos de corrección del Factor de Potencia. El factor de potencia se controla variando la excitación del rotor y puede ser del 100% o unitaria con la excitación normal, de corriente atrasada con sub-excitación y de corriente adelantada con sobreexcitación.
- ☞ No se les puede variar la carga de forma brusca ya que corren el riesgo de perder su velocidad de sincronismo
- ☞ Cualquier motor síncrono que se encuentra en una planta se opera sobreexcitado para poder corregir el factor de potencia e incrementar su par máximo
- ☞ Los devanados de amortiguamiento tienden a atenuar la carga u otros transitorios en el motor síncrono. Por esta razón también se le denomina devanados de atenuación .

RECOMENDACIONES

- ☞ Como recomendación tomar muy en cuenta que este tipo de motores deben poseer un correcto arranque ya que solo de esta manera se los puede poner en funcionamiento, siendo lo fundamental hacer que el rotor alcance una velocidad cercana a la de sincronismo, en caso contrario se observará una vibración muy fuerte debido a los campos magnéticos de la máquina
- ☞ Si la carga del motor síncrono no debe ser demasiado grande, ya que el motor va disminuyendo velocidad, perdiendo su sincronismo y se para, destacando que dicho efecto es perjudicial para el motor.

9. BIBLIOGRAFIA

- ☞ JESUS FRAILE MORA. Máquinas eléctricas (5a Edición). Mc Graw Hill.2003
- ☞ MARCELO A.SOBREVILA. Máquinas eléctricas (2ª Edición). Mc Graw Hill .2003
- ☞ STEPHEN J.CHAPMAN. Máquinas eléctricas (4ª Edición). Mc Graw Hill .2005

- ☞ RAFAEL TAKESHI MINEROI AKIYA " Pruebas en motores síncronos"
.Universidad de Costa Rica "ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA"". 2010
- ☞ MANUEL PEREZ DONSION , MANUEL A.FERNANDEZ FERRO
Motores síncronos de imanes permanentes.).Reverté.1990
- ☞ ADOLF SENNER .Principios de electrotecnia.Reverté.1994

- ☞ IRVING L.KOSOW. Control de maquinas eléctricas .Reverté.1982

- ☞ IRVING L.KOSOW. Maquinas eléctricas y transformadores. Prentice -Hall
Hispanoamericana.1993

- ☞ THEODORE,WILDI. Maquinas eléctricas y sistemas de potencia. Pearson
educación .2007

- ☞ JUAN JOSÉ MANZANO ORREGO. Máquinas eléctricas.Parainfo.2010

Anexo 1: Determinación del tipo de arranque de un motor

La finalidad del ejemplo siguiente no es resolver completamente un problema, sino ilustrar, de forma concreta, una sistemática de cálculo que conduzca a la elección de un modo de arranque.

Hipótesis de cálculo

Motor asíncrono de:

- potencia nominal $P_n = 1\ 500\ \text{kW}$,
- tensión nominal $U_n = 5\ 500\ \text{V}$,
- rendimiento x factor de potencia:
 $\eta \times \cos \varphi = 0,84$,
- relación del par de arranque al par nominal a tensión nominal:

$$\frac{C_d}{C_n} = 0,8$$

- relación corriente de arranque a corriente nominal a tensión nominal:

$$\frac{I_d}{I_n} = 5$$

- par de puesta en marcha de la máquina arrastrada:
 $0,2\ C_n$
- potencia del transformador principal de alimentación:
 $P_t = 3\ \text{MVA}$

- potencia aparente máxima de punta soportada por la red del transformador:

$$S_t = 6\ \text{MVA.}$$

Otros datos necesarios para el cálculo:

- característica par - velocidad $C(N)$ del motor,
- característica par resistente - velocidad $C_r(N)$ de la máquina arrastrada,
- suministro del transformador a otros consumos, aparte del motor:
 $1\ 200\ \text{kVA}$ bajo un $\cos \varphi' = 0,87$.

Método general

La pretensión del proyectista es la de buscar la mejor elección técnico-

económica. Para ello conviene ensayar, de entrada, si la solución más simple y económica es válida; y si ésta no conviene, ensayar otras soluciones siguiendo el orden de la tabla de la **figura 34**.

Arranque directo

Potencia aparente del motor al principio del arranque:

$$S_m = \frac{P_n}{\eta \cdot \cos \varphi} \cdot \frac{I_d}{I_n} =$$

$$= \frac{1\ 500}{0,84} \cdot 5 = 8\ 925\ \text{kVA}$$

con un factor de potencia al arranque:
 $\cos \varphi_d = 0,5$, o sea, $\varphi_d = 81^\circ$.

Esta potencia se suma vectorialmente a la que cede el transformador a las restantes salidas (**figura 35**).

Gráficamente se deduce el valor total de la potencia aparente solicitada al transformador:

$$S \approx 9\ 580\ \text{kVA.}$$

Siendo la máxima potencia de punta permitida de $6\ 000\ \text{kVA}$, no es posible el arranque directo.

Arranque por reactancia

La introducción de una reactancia permite reducir la potencia aparente absorbida por el motor.

La potencia disponible para el arranque se determina gráficamente (**figura 35**).

Al arrancar el motor, la presencia de la reactancia hace que el factor de potencia esté próximo a cero, o sea, $\varphi_d \approx 90^\circ$.

$\vec{OA} = 1\ 200\ \text{kVA}$: potencia del transformador utilizada para las otras salidas.

$\vec{OB} = S_t = 6\ 000\ \text{kVA}$: potencia aparente máxima autorizada.

La potencia aparente disponible para el arranque (motor + reactancia) se deduce gráficamente:

$$\vec{AB} = S_d = 5\ 300\ \text{kVA}$$

Reducción de la potencia que debe obtenerse con la reactancia:

$$\frac{S_d}{S_m} = \frac{5\ 300}{8\ 925} \approx 0,6$$

Si I'_d es el nuevo valor de la corriente de arranque.

$$S_d = U_n \cdot I'_d \cdot \sqrt{3}$$

$$S_m = U_n \cdot I_d \cdot \sqrt{3}$$

$$\text{o sea: } I'_d = 0,6 \cdot I_d$$

Por otra parte:

$$\frac{I'_d}{I_d} = \frac{U_d}{U_n} = 0,6$$

La tensión en bornes del motor tiene un valor $U_d = 0,6\ U_n$. El problema queda resuelto desde el punto de vista eléctrico, sólo resta verificar si esta solución es válida desde el punto de vista mecánico.

soluciones de arranque	críterios de aceptación
directo	punta de potencia compatible con la red
reactancia	<ul style="list-style-type: none"> ■ par de arranque superior al par resistente de puesta en marcha ■ punta de corriente (al aplicar la plena tensión al motor) aceptable para la red
autotransformador	ídem

Fig. 34: Criterios determinantes del modo de arranque de un motor.

Para el arranque directo, el par de arranque es:

$$C_d = 8 C_n \text{ (figura 36).}$$

Para el arranque por reactancia, el par de arranque C'_d es igual a:

$$C'_d = 0,8 C_n \left(\frac{U_d}{U_n} \right)^2 = 0,288 C_n$$

Este valor es compatible con el par de puesta en marcha de la máquina arrastrada.

Queda por controlar un último detalle: si el punto de equilibrio mecánico $C_m = C_r$ está situado a una velocidad muy baja, el paso a la plena tensión corre el riesgo de efectuarse con una punta de corriente excesiva. Si ésta es muy elevada para la red, debemos de reconsiderar el modo de arranque y a elegir, por ejemplo, el arranque por autotransformador (figura 36).

Nota 1

Supongamos que el par de puesta en marcha de la máquina arrastrada tenga el valor $0,35 C_n$ en lugar de $0,2 C_n$. El arranque por reactancia se hace incompatible con el par de puesta en marcha.

En este caso es necesario considerar la solución del arranque por autotransformador.

La potencia aparente disponible sigue siendo $S_d = 5\,300$ kVA.

De este valor debe deducirse la potencia magnetizante del autotransformador S_{mg} que, en el primer instante del arranque se suma aritméticamente a la potencia aparente del motor. S_{mg} es del orden de 0,2 a 0,4 veces la potencia nominal aparente del motor.

Consideremos el coeficiente 0,4:

$$S_{mg} = 0,4 \left(\frac{P_n}{\eta \cdot \cos \varphi} \right)$$

$$S_{mg} = 0,4 \frac{1\,500}{0,84} = 720 \text{ kVA}$$

El coeficiente de la reducción de potencia pasa en este caso a ser:

$$\frac{S_d - S_{mg}}{S_m} = \frac{5\,300 - 720}{8\,925} \approx 0,513$$

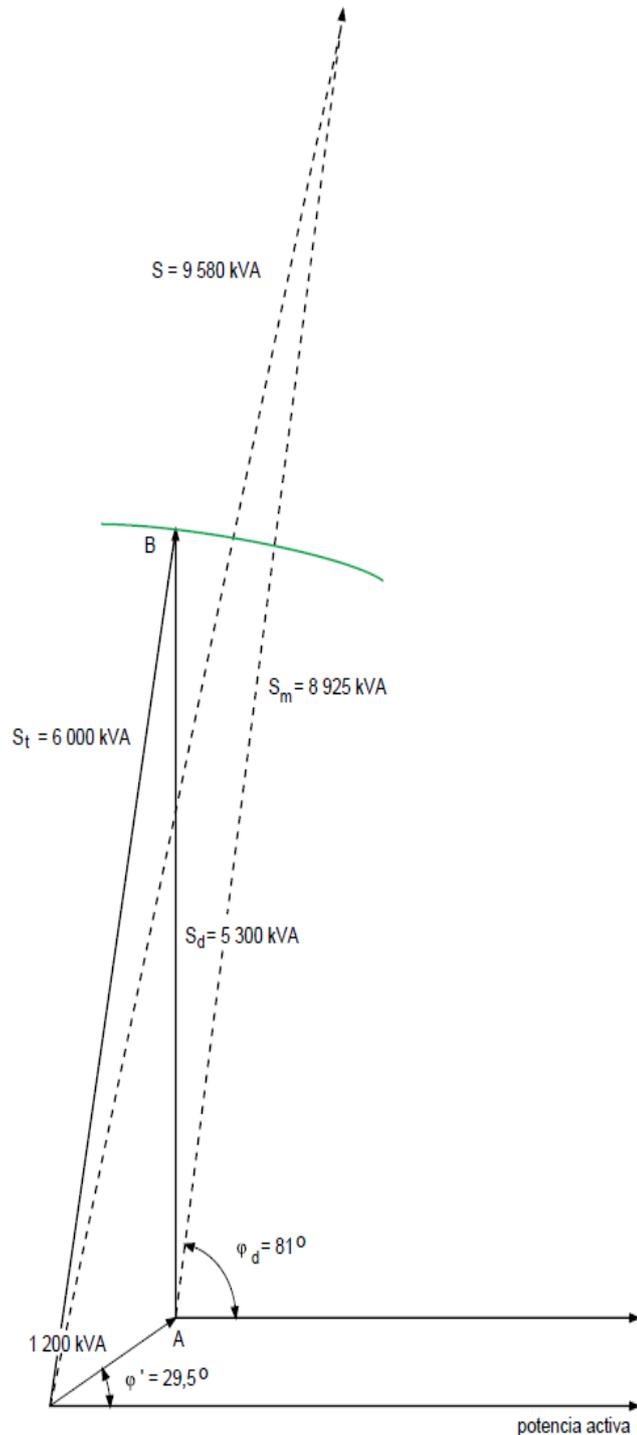


Fig. 35: Diagrama de potencias de arranque.