

Máquinas Sincrónicas:

Las máquinas sincrónicas (o sincrónicas) son maquinas cuyo estator se encuentra alimentado por corriente alterna, en tanto el rotor tiene alimentación continua ya sea a través de un enrollado de campo o bien mediante imanes permanentes.

Índice: Maquinas Sincrónicas Generadores Sincrónicos Conclusión
--

Maquinas Sincrónicas:

Los maquinas síncronas son un tipo de motor de corriente alterna. Su velocidad de giro es constante y depende de la frecuencia de la tensión de la red eléctrica a la que esté conectada y por el número de pares de polos del motor, siendo conocida esa velocidad como "velocidad de sincronismo". Este tipo de motor contiene electromagnetos en el estator del motor que crean un campo magnético que rota en el tiempo a esta velocidad de sincronismo.

En términos prácticos, las máquinas sincrónicas tienen su mayor aplicación en potencias elevadas, particularmente como generadores ya sea a bajas revoluciones en centrales hidroeléctricas, o bien a altas revoluciones en turbinas de vapor o gas.

Cuando la máquina se encuentra conectada a la red, la velocidad de su eje depende directamente de la frecuencia de las variables eléctricas (voltaje y corriente) y del número de polos. Este hecho da origen a su nombre, ya que se dice que la máquina opera en sincronismo con la red. Por ejemplo, una máquina con un par de polos conectada a una red de 50 [Hz] girará a una velocidad fija de 3000 [RPM], si se tratara de una máquina de dos pares de polos la velocidad sería de 1500 [RPM] y así sucesivamente, hasta motores con 40 o más pares de polos que giran a bajísimas revoluciones.

En la operación como generador desacoplado de la red, la frecuencia de las corrientes generadas depende directamente de la velocidad mecánica del eje. Esta aplicación ha sido particularmente relevante en el desarrollo de centrales de generación a partir de recursos renovables como la energía eólica.

Las máquinas sincrónicas también se emplean como motores de alta potencia (mayores de 10.000 [HP]) y bajas revoluciones. Un ejemplo particular de estas aplicaciones es al interior de la industria minera como molinos semiautógenos (molinos SAG) o como descortezadores de la industria maderera.

Adicionalmente a la operación como motor y generador, el control sobre la alimentación del rotor hace que la máquina sincrónica pueda operar ya sea absorbiendo o inyectando reactivos a la red en cuyo caso se conocen como reactor o condensador sincrónico respectivamente. Particularmente esta última aplicación es utilizada para mejorar el factor de potencia del sistema eléctrico el cual tiende a ser inductivo debido a las características típicas de los consumos.

La expresión matemática que relaciona la velocidad de la máquina con los parámetros mencionados es:

$$n = \frac{60 \cdot f}{P} = \frac{120 \cdot f}{p}$$

Características constructivas:

Características del estator:

Dada la alimentación alterna de la armadura, el estator de la máquina sincrónica es muy similar al estator de la máquina de inducción, por lo cual las características constructivas del mismo no se repetirán en esta sección

Características del rotor:

El rotor de una máquina sincrónica puede estar conformado por:

- Imanes permanentes
- Rotor de polos salientes
- Rotor cilíndrico

Los imanes permanentes representan la configuración más simple ya que evita el uso de anillos rozantes para alimentar el rotor, sin embargo su aplicación a altas potencias se encuentra limitada ya que las densidades de flujo magnético de los imanes no es, por lo general, alta. Adicionalmente, los imanes permanentes crean un campo magnético fijo no controlable a diferencia de los rotores con enrollados de excitación donde se puede controlar la densidad de flujo magnético.

Dentro de los rotores con enrollados de excitación se tienen los de tipo cilíndrico y los de polos salientes.

La imagen muestra el diagrama del estator de una máquina sincrónica, la figura (b) corresponde a un rotor de polos salientes, en tanto que el dibujo (c) muestra el esquema de un rotor cilíndrico. Por su parte, en las figuras (d) y (e) se observan la apariencia de una máquina sincrónica vista desde fuera y la representación de los enrollados de rotor y estator, respectivamente.

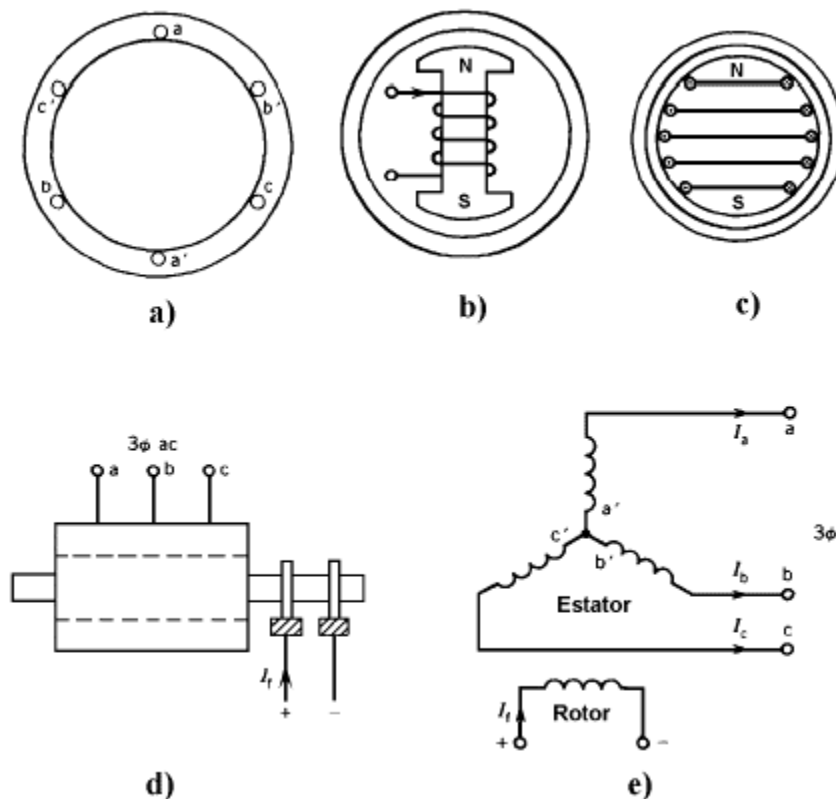


Figura 1. Rotores de máquina síncronica

Desde el punto de vista de modelamiento el rotor cilíndrico es bastante más simple que el rotor de polos salientes ya que su geometría es completamente simétrica. Esto permite establecer las relaciones para los voltajes generados respecto de las inductancias mutuas del rotor y estator, las cuales son constantes.

En el caso del rotor de polos salientes, su geometría asimétrica provoca que el modelamiento de las inductancias propias de estator y rotor, así como las inductancias mutuas entre ambos, tengan un desarrollo analítico bastante complejo.

Motores síncronos:

De acuerdo con lo estudiado, los motores síncronos no pueden arrancar en forma autónoma lo cual hace que requieran mecanismos adicionales para la partida:

- Una máquina propulsora externa (motor auxiliar).
- Barras amortiguadoras.

Particularmente en el segundo caso, se intenta aprovechar el principio del motor de inducción para generar torque a la partida. Constructivamente, en cada una de las caras polares del rotor (polos salientes), se realizan calados donde se colocan una barras, denominadas amortiguadoras, que le dan al rotor una característica similar a los segmentos tipo jaula de ardilla del motor de inducción.

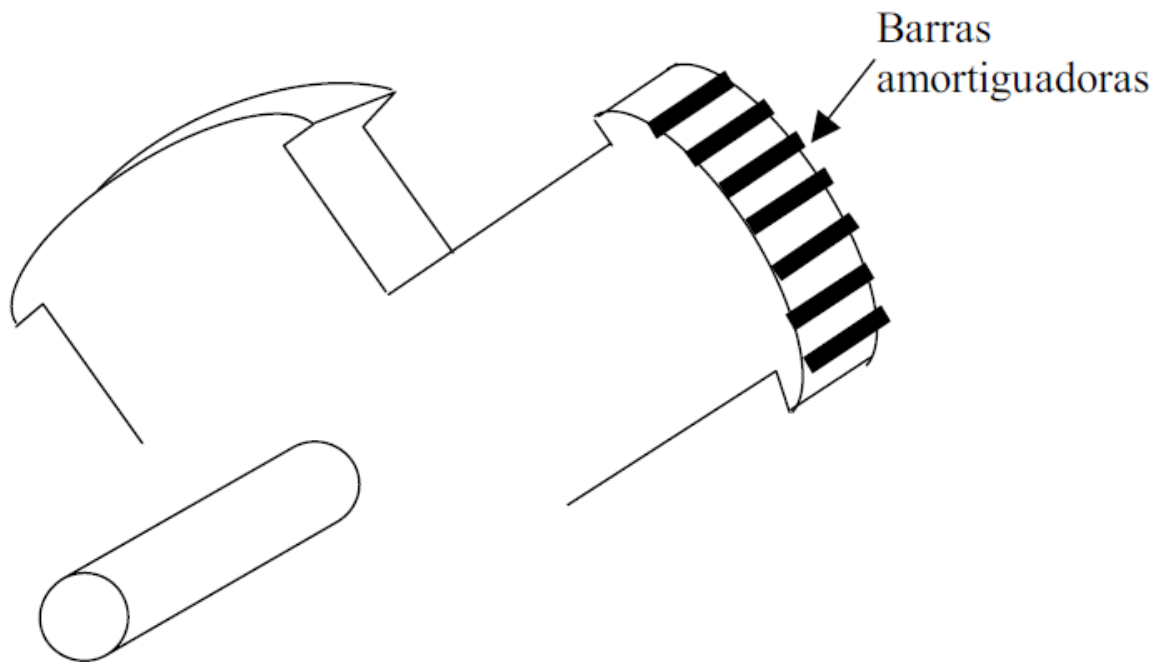


Figura 2. Barras amortiguadoras en motor síncrono

De este modo, el motor se comporta como una máquina de inducción hasta llegar a la velocidad sincrónica. Es importante notar que el circuito de compensación se construye de modo que el campo magnético rotatorio inducido en el rotor sea débil comparado con el campo magnético fijo del rotor (producido por la alimentación con corriente continua). De este modo se evita que el efecto de inducción perturbe la máquina en su operación normal.

Ejes directo y en cuadratura:

El estudio del comportamiento de las máquinas sincrónicas se simplifica al considerar dos ejes ficticios denominados eje directo y eje en cuadratura, que giran solidarios al rotor a la velocidad de sincronismo (ver figura 3):

- El eje directo es aquel que se define en la dirección Norte-Sur del rotor, con su origen en el centro magnético y en dirección hacia el Norte.
- El eje en cuadratura tiene el mismo origen que el anterior pero su dirección es perpendicular a éste.

Las corrientes por ambos enrollados ficticios (I_d e I_q) están desfasadas en 90° eléctricos y la suma de ambas es equivalente a la corriente por fase en los enrollados reales.

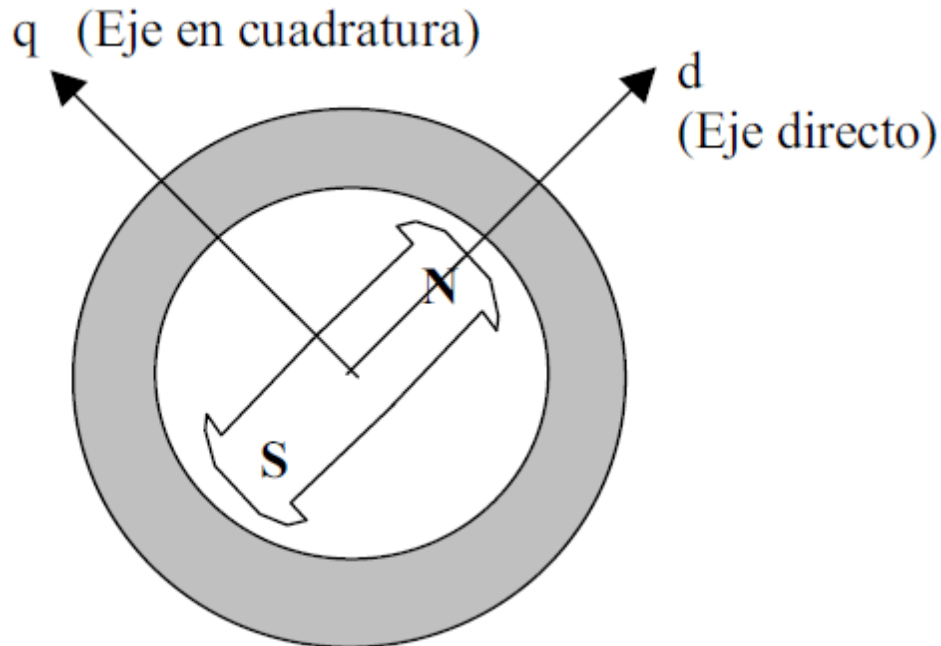


Figura 3. Ejes directo y en cuadratura

El uso de estos enrollados ficticios permite simplificar el análisis de las máquinas sincrónicas. En particular, en el caso de la máquina con rotor cilíndrico que posee una geometría simétrica es posible establecer un circuito eléctrico equivalente para definir el comportamiento de esta máquina.

En el caso del rotor de polos salientes, si bien no se puede esquematizar el comportamiento de la máquina a través de un circuito eléctrico equivalente, el empleo de los ejes directo y en cuadratura contribuye a simplificar notablemente el desarrollo analítico y las ecuaciones debido a que permite independizarse del ángulo de posición entre el rotor y los ejes de las fases.

En la sección siguiente se presenta el desarrollo analítico del comportamiento de la máquina de polos salientes (más compleja) y posterior a ello se analiza el comportamiento de la máquina con rotor cilíndrico a partir de su circuito equivalente.

Circuito equivalente de la máquina sincrónica:

La existencia de los ejes ficticios directo y en cuadratura permite modelar eléctricamente las variables del estator a través de la resistencia del estator y las reactancias del eje directo y en cuadratura.

Particularmente, si el rotor es de polos salientes las reactancias en ambos ejes son diferentes y su cálculo supone un desarrollo complejo como el presentado precedentemente. En el rotor cilíndrico, sin embargo, se define una única reactancia: $X_s = X_d = X_q$ por lo cual es posible establecer un circuito como el de la siguiente figura 4.

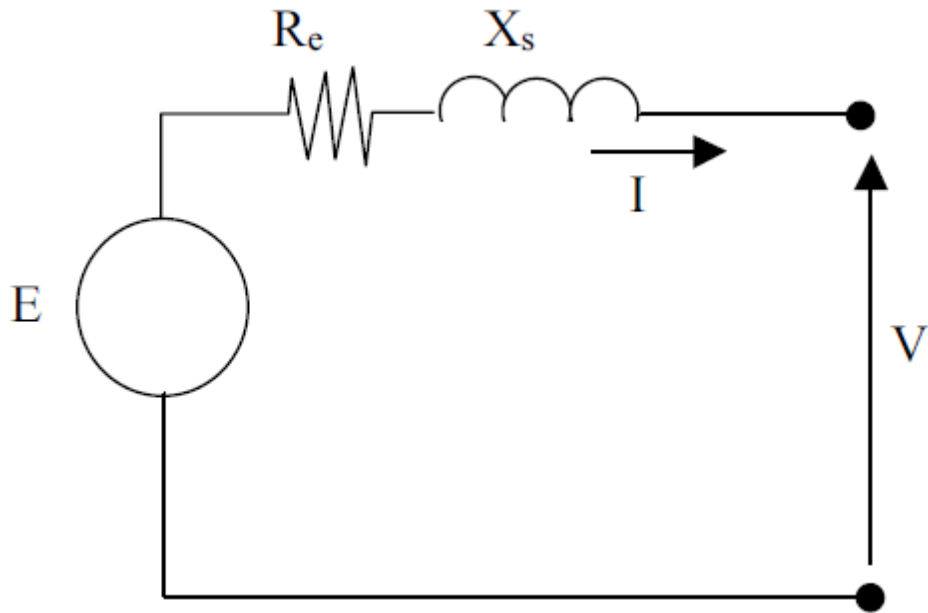


Figura 4. Circuito equivalente por fase de la máquina sincrónica.

A partir de la figura se define:

$$E = L^{er} \cdot I_r \cdot \omega \cdot \text{sen}(\omega t)$$

$$L^{er} = \frac{N_e \cdot N_r}{R}$$

Donde:

E es la tensión inducida de la máquina

Re es la resistencia en los enrollados del estator.

Ler es la inductancia mutua entre rotor y estator.

Ne, Nr son el número de vueltas de los enrollados de estator y rotor respectivamente.

R es la reluctancia del circuito magnético.

Ir es la corriente rotórica (de excitación).

Generadores Sincrónicos:

El generador síncrono (alternador) es un tipo de máquina eléctrica rotativa capaz de transformar energía mecánica en energía eléctrica. A estos también se los conoce como Máquinas Síncronas, la razón por la que se llama generador síncrono es la igualdad entre la frecuencia eléctrica como la frecuencia angular, es decir, el generador girara a la velocidad del campo magnético, por lo que a esta

igualdad de frecuencias se le denomina sincronismo. Los generadores constan fundamentalmente del rotor y el estator, ambos con devanados.

Esta máquina funciona alimentando al rotor o circuito de campo por medio de una batería es decir por este devanado fluirá CC., mientras q en el estator o circuito de armadura la corriente es alterna CA.

El generador síncrono está compuesto principalmente de una parte móvil o rotor y de una parte fija o estator, el principio de funcionamiento de un generador síncrono se basa en la ley de Faraday. Para crear tensión inducida en el (estator), debemos crear un campo magnético en el rotor o circuito de campo, esto lo lograremos alimentado el rotor con una batería, este campo magnético inducirá una tensión en el devanado de armadura por lo que tendremos una corriente alterna fluyendo a través de él.

Tipos de construcción:

La principal diferencia entre los diferentes tipos de generadores síncronos, se encuentra en su sistema de alimentación en continua para la fuente de excitación situada en el rotor.

Excitación Independiente: excitatriz independiente de continua que alimenta el rotor a través de un juego de anillos rozantes y escobillas.

Excitatriz principal y excitatriz piloto: la máquina principal de continua tiene como bobinado de campo otra máquina de excitación independiente, accionada por el mismo eje.

Electrónica de potencia: directamente, desde la salida trifásica del generador, se rectifica la señal mediante un rectificador controlado, y desde el mismo se alimenta directamente en continua el rotor mediante un juego de contactores (anillos y escobillas). El arranque se efectúa utilizando una fuente auxiliar (batería) hasta conseguir arrancar.

Sin escobillas, o diodos giratorios: la fuente de continua es un rectificador no controlado situado en el mismo rotor (dentro del mismo) alimentado en alterna por un generador situado también en el mismo eje y cuyo bobinado de campo es excitado desde un rectificador controlado que rectifica la señal generada por el giro de unos imanes permanentes situados en el mismo rotor (que constituyen la excitatriz piloto de alterna).

Partes de un generador síncrono:

A continuación se detalla las partes fundamentales que componen un generador síncrono:

- 1. Estator.
- 2. Rotor.
- 3. Sistema de enfriamiento.
- 4. Excitatriz.
- 5. Conmutador.

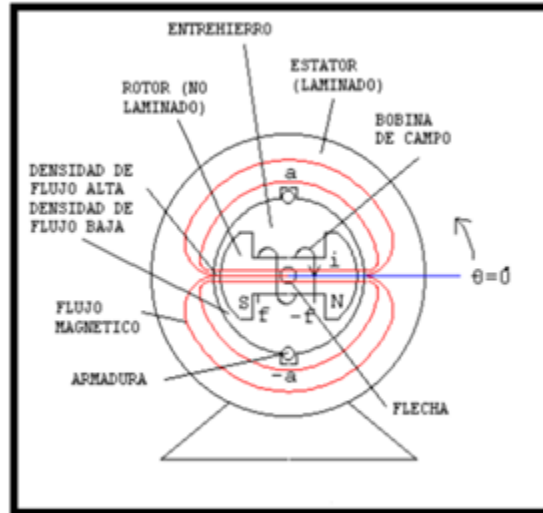


Fig 1: Partes del Alternador

- **Estator:**

Parte fija de la máquina, montada envuelta del rotor de forma que el mismo pueda girar en su interior, también constituido de un material ferromagnético envuelto en un conjunto de enrollamientos distribuidos al largo de su circunferencia. Los enrollamientos del estator son alimentados por un sistema de tensiones alternadas trifásicas.

Por el estator circula toda la energía eléctrica generada, siendo que tanto la tensión en cuanto a corriente eléctrica que circulan son bastante elevadas en relación al campo, que tiene como función sólo producir un campo magnético para "excitar" la máquina de forma que fuera posible la inducción de tensiones en las terminales de los enrollamientos del estator.

La máquina síncrona está compuesta básicamente de una parte activa fija que se conoce como inducido o ESTATOR y de una parte giratoria coaxial que se conoce como inductor o ROTOR. El espacio comprendido entre el rotor y el estator, es conocido como entrehierro.

Esta máquina tiene la particularidad de poder operar ya sea como generador o como motor.



Fig 3: Estator del Alternador

Los elementos más importantes del estator de un generador de corriente alterna, son las siguientes:

- 1. Componentes mecánicas.
- 2. Sistema de conexión en estrella.
- 3. Sistema de conexión en delta.

Componentes mecánicas. Las componentes mecánicas de un generador son las siguientes:

- A. La carcasa: La carcasa del estator está formada por bobinas de campo arrollados sin dirección, soportadas en piezas de polo sólidas. Las bobinas están ventiladas en su extremo para proporcionar de esta forma una amplia ventilación y márgenes de elevación de temperatura. La carcasa del estator es encapsulada por una cubierta apropiada para proporcionar blindado y deflectores de aire para una correcta ventilación de la excitatriz sin escobillas.
- B. El núcleo.
- C. Las bobinas.
- D. La caja de terminales.

Sistema de conexión en estrella. Los devanados del estator de un generador de C.A. están conectados generalmente en estrella, en la siguiente figura T1, T2, T3 representan las terminales de línea (al sistema) T4, T5, T6 son las terminales que unidas forman el neutro.

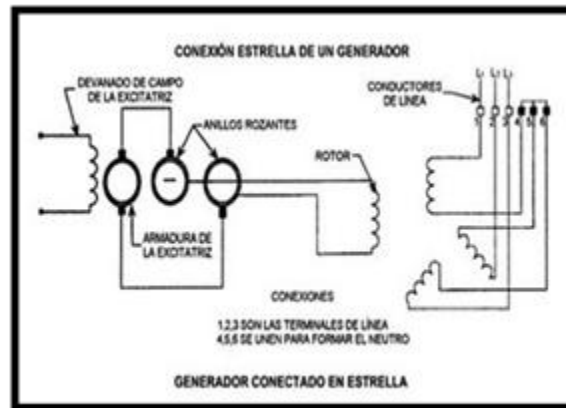


Fig 4: conexión en estrella

Sistema de conexión delta. La conexión delta se hace conectando las terminales 1 a 6, 2 a 4 y 3 a 5, las terminales de línea se conectan a 1, 2 y 3, con esta conexión se tiene con relación a la conexión estrella, un voltaje menor, pero en cambio se incrementa la corriente de línea.

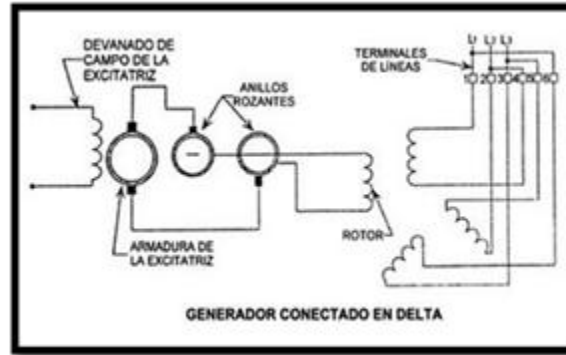


Fig 4: conexión en delta

- **Rotor:**

Es la parte de la máquina que realiza el movimiento rotatorio, constituido de un material ferromagnético envuelto en un enrollamiento llamado de "enrollamiento de campo", que tiene como función producir un campo magnético constante así como en el caso del generador de corriente continua para interactuar con el campo producido por el enrollamiento del estator.

La tensión aplicada en ese enrollamiento es continua y la intensidad de la corriente soportada por ese enrollamiento es mucho más pequeño que el enrollamiento del estator, además de eso el rotor puede contener dos o más enrollamientos, siempre en número par y todos conectados en serie siendo que cada enrollamiento será responsable por la producción de uno de los polos del electroimán.

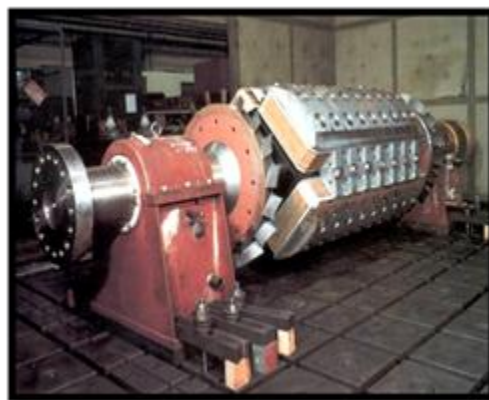


Fig 5: Rotor del Alternador

- **Sistema de enfriamiento.**

1. **Generadores enfriados por aire:**

Estos generadores se dividen en dos tipos básicos: abiertos ventilados y completamente cerrados enfriados por agua a aire.

Los generadores de tipo OV fueron los primeros construidos, el aire en este tipo de generadores pasa sólo una vez por el sistema y considerable cantidad de

materias extrañas que pueden acumularse en las bobinas, interfiriendo la transferencia de calor y afectando adversamente al aislamiento.

Los generadores tipo TEWC, son un sistema de enfriamiento cerrado, donde el aire re circula constantemente y se enfría pasando a través del tubo del enfriador, dentro de los cuales se hace pasar agua de circulación. La suciedad y materias extrañas no existen en el sistema, y puesto que se tiene agua de enfriamiento disponible, la temperatura del aire puede mantenerse tan baja como se desee.

2. Generadores enfriados por hidrógeno:

Los generadores de mayor capacidad, peso, tamaño y los más modernos, usan hidrógeno para enfriamiento en vez de aire en circuito de enfriamiento cerrado. El enfriamiento convencional con hidrógeno puede usarse en generadores con capacidad nominal aproximada de 300 MVA.

3. Generadores enfriados por hidrógeno / agua:

Pueden lograrse diseños de generadores aun más compactos mediante el uso de enfriamiento con agua directo al devanado de la armadura del generador. Estos diseños emplean torones de cobre a través de los cuales fluye agua desionizada. El agua de enfriamiento se suministra vía un circuito cerrado.

Tipos de diseños:

A continuación vamos a enumerar cuales son los tipos de diseños que se encuentran en la construcción de generadores síncronos. Estos son:

- De polos salientes en el estator
- De polos salientes en el rotor
- Generador sin escobillas

Ahora vamos a proceder a analizar cada uno de estos, recalcando la utilidad y aplicación de cada uno de estos diseños.

Generador síncrono con polos salientes en el estator:

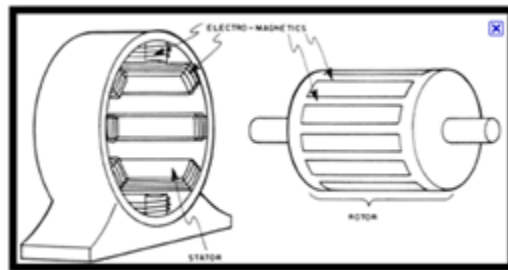


Fig. 6. Generador con polos en el estator.

El estator está constituido principalmente de un conjunto de láminas de acero al silicio (y se les llama "paquete"), que tienen la habilidad de permitir que pase a través de ellas el flujo magnético con facilidad; la parte metálica del estator y los devanados proveen los polos magnéticos.

La particularidad de este tipo de generador es que tiene el inducido en el rotor, esta configuración es propia de máquinas de baja y media velocidad y potencia, hasta 1000 rpm.

Por tal razón para poder sacar la tensión producida, necesitamos de un sistema de colector de anillos. El número de anillos a utilizar va a depender directamente del número de fases con la que nos encontremos trabajando.

Generador síncron con polos salientes en el rotor:

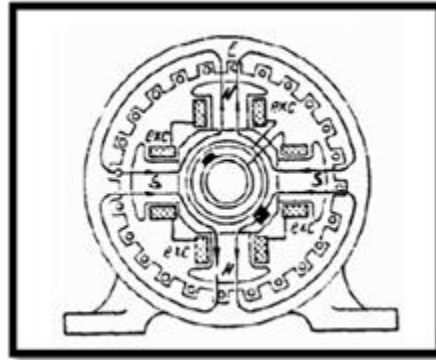


Fig. 7. Generador con polos en el rotor

Este generador a diferencia del anterior tiene el inducido en el estator, por tal razón no necesitamos un mecanismo de colector de anillos para extraer la tensión generada ya que esta va a encontrarse en la parte externa de la máquina, necesitaríamos únicamente un par de anillos, con la finalidad de ingresar el voltaje de campo, pero esto es de gran ayuda ya que el voltaje de campo es considerablemente más pequeño que la tensión generada, por tal razón este par de anillos van hacer de medidas pequeñas, y así mismo las escobillas no tendrían un tamaño mayor.

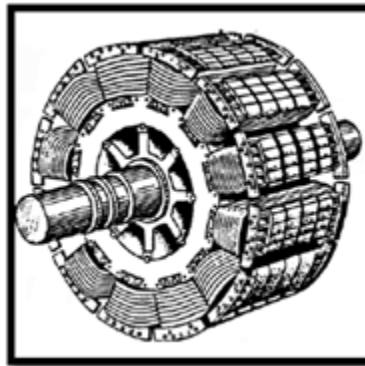


Fig. 5. Polos salientes en el rotor

Se utiliza este tipo de generadores, para gran potencia, por la versatilidad que nos brinda.

Generador síncrono sin escobillas:

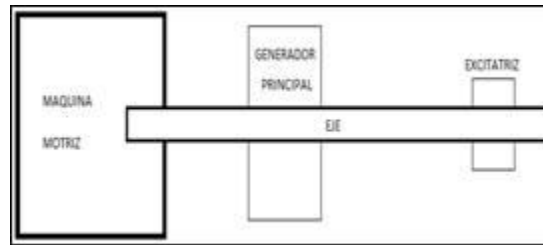


Fig. 5. Generador sin escobillas

Este tipo de generadores son de mediana potencia, para la excitación podríamos tener un banco de baterías que sería de respaldo, la excitatriz podría ser un alternador, es decir un generador síncrono con polos salientes en el estator, luego de esta etapa, sale a una placa electrónica en donde por medio de dispositivos electrónicos, se envía al circuito de excitación del generador principal. Para realizar reparaciones en este tipo de generadores, es necesario saber sobre dispositivos electrónicos, y centrarse en el controlador.

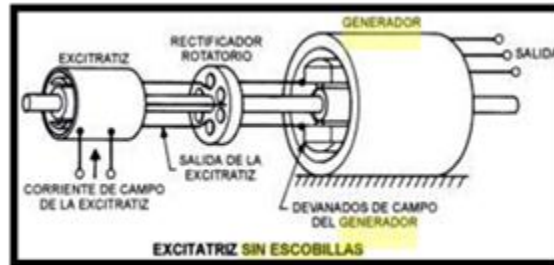


Fig. 5. Alternador sin escobillas

Debido a que no presenta ningún contacto mecánico entre el rotor y el estator estas maquinas requieren mucho menos mantenimiento.

Conclusiones

- El generador síncrono consta de una igualdad entre la frecuencia eléctrica y la frecuencia angular, es decir, el generador girara a la velocidad del campo magnético a esta igualdad de frecuencias se le denomina sincronismo.
- El diseño de polos salientes en el estator, tiene la condición que cuenta con el inducido en el rotor, es decir en la parte que se mueve, de aquí que es necesario la utilización de anillos, y estos van a depender del número de fases.
- El diseño de polos salientes en el estator, es utilizada para generadores de gran potencia, el inducido se encuentra en el estator, y no necesitamos sacar la tensión generada, únicamente ingresar un voltaje mínimo para la excitación del campo.
- El diseño del generador sin escobillas es mucho más complejo que los anteriores, ya que la salida de este va a dirigirse hacia una placa electrónica, en la cual van a encontrarse diferentes tipos de dispositivos, y este comandar el circuito de excitación.