



Física – Máquinas Eléctricas

MAQUINAS ROTANTES

Nota: este es un extracto del apunte del ing. Narciso Beirut Ruiz (Universidad Veracruzana, México) está resumido y adaptado al programa de Diseño Industrial.

2.1 GENERALIDADES.

Las máquinas eléctricas rotantes tienen la particularidad de convertir energía eléctrica en mecánica o viceversa.

Una primera clasificación que puede hacerse es por su función:

- Generador, máquina que produce energía eléctrica por transformación de la energía mecánica.
- Motor, máquina que produce energía mecánica por transformación de la energía eléctrica.
- Convertidor rotativo que convierte energía eléctrica de una forma a otra (cambiando frecuencia, convirtiendo corriente alterna en continua etc.) máquina muy utilizada en el pasado.

Si se clasifican por la fuente de energía que las alimenta o que representan se tiene:

- máquinas de corriente continua
- máquinas de corriente alterna

Estas últimas por sus características constructivas y de velocidad se clasifican en:

- Máquinas asincrónicas
- Máquinas sincrónicas

A partir de este capítulo nos ocuparemos de tres máquinas rotantes en las que se reúnen todos los conceptos principales de proyecto de cualquier otra, y en el siguiente orden:

- iniciaremos con el alternador como ejemplo de máquina sincrónica,
- continuaremos con el motor asincrónico,
- y finalmente la máquina de corriente continua (generador o motor).

Las máquinas rotantes utilizadas en los sistemas eléctricos tienen características que son objeto primero de especificación, luego de garantías y finalmente de comprobación mediante ensayos.



Física – Máquinas Eléctricas

2.2 PARAMETROS NOMINALES.

Son datos que en base a las condiciones de servicio definen las prestaciones que puede entregar la máquina en condiciones especificadas.

Se presentan como el conjunto de valores numéricos de las magnitudes eléctricas y mecánicas asignadas a la máquina por el constructor e indicadas en la chapa de características.

2.2.1 Potencia nominal

Este valor establece las bases de diseño, de construcción y de garantías.

Generalmente cuando no se especifica otra cosa se supone que la máquina es de servicio continuo, es decir, puede funcionar con carga constante un tiempo ilimitado en el cual alcanzará un equilibrio térmico aceptable y no perjudicial para la vida útil de la máquina. Esto también incluye el funcionamiento permanente a potencia máxima

Para las máquinas rotantes se establecen dos regímenes extremos de funcionamiento, en vacío y a plena carga.

Funcionamiento en vacío es la condición de funcionamiento de una máquina con carga nula (el resto de condiciones de operación son las nominales).

Funcionamiento a plena carga es cuando se tiene el mayor valor de carga indicada para una máquina funcionando a la potencia nominal.

2.2.2 Momento de inercia

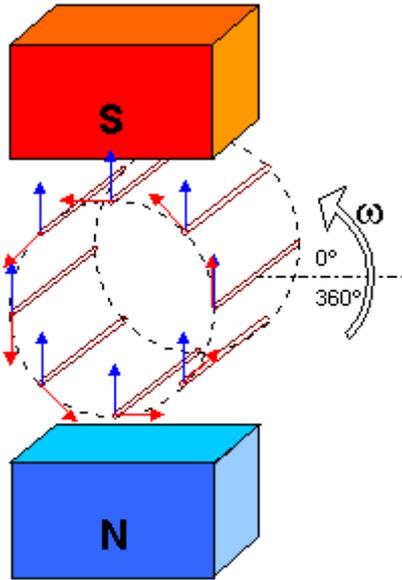
El momento de inercia (dinámico) de un cuerpo alrededor de un eje es la suma (integral) de los productos de sus masas elementales por el cuadrado de sus distancias radiales al eje.

2.2.3 Constante de tiempo térmica equivalente

La constante de tiempo térmica equivalente es la constante de tiempo que, en reemplazo de otras individuales, determina aproximadamente la evolución de la temperatura en un arrollamiento a consecuencia de una variación de corriente en escalón.



Producción de corriente alterna (senoidal)



Si hacemos girar una espira en el interior de un campo magnético, se inducirá en cada conductor una fuerza electromotriz inducida de valor:

$$e = \beta \cdot L \cdot v \cdot \text{sen } \alpha$$

Siendo α el ángulo entre la inducción magnética y la velocidad o sentido del movimiento que, como se ve en la figura, varía de 0° a 360° a cada vuelta del conductor.

β es la densidad de campo, L es la longitud de la espira, v es la velocidad de rotación.

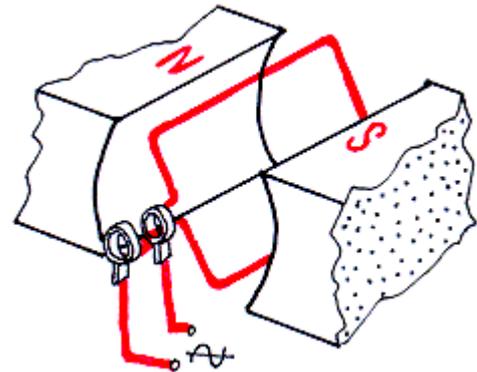
Si la espira está formada por un conductor de ida y otro de vuelta, en la espira se induce una f.e.m.:

$$e = 2 \cdot \beta \cdot L \cdot v \cdot \text{sen } \alpha$$

Si la bobina tiene N_e espiras:

$$e = 2 \cdot N_e \cdot \beta \cdot L \cdot v \cdot \text{sen } \alpha$$

Para evitar el enrollamiento de los conductores es necesario dotar al conjunto de unos anillos rozantes.



Si mantenemos constante la inducción del campo y la velocidad de giro, siéndolo también el número de conductores y la longitud de los mismos, tendremos:

$$2 \cdot N_e \cdot \beta \cdot L \cdot v = e_{\text{max}} \rightarrow \text{Constante}$$

$$e = e_{\text{max}} \cdot \text{sen } \alpha$$

Como puede deducirse de la fórmula la f.e.m. resultante tendrá forma senoidal.

Si además expresamos el ángulo girado en función de la velocidad angular:

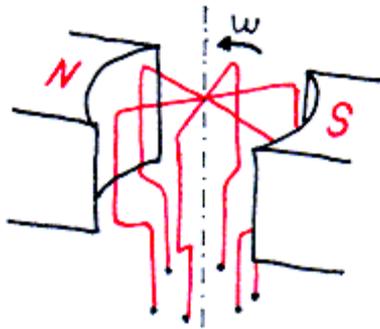
$$\omega = \alpha / t \rightarrow \alpha = \omega \cdot t$$

$$e(t) = e_{\text{max}} \cdot \text{sen } \omega \cdot t$$

Donde $\omega \cdot t$ representa el ángulo girado en radianes, siendo ω la velocidad angular en rad/s.

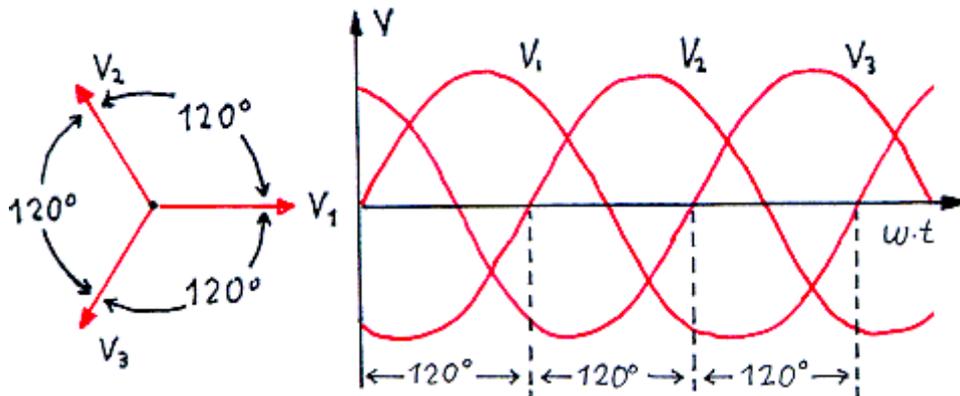


Generación de CA trifásica



Haciendo girar una espira en un campo magnético se puede conseguir una corriente alterna senoidal (monofásica).

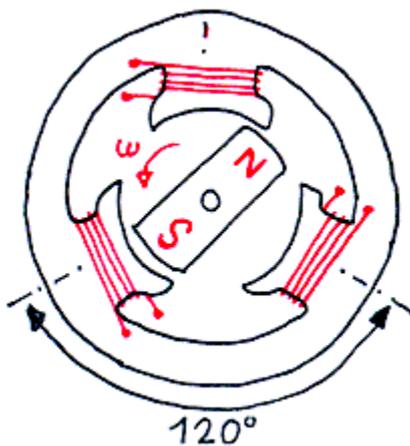
Si en vez de una única espira hacemos girar tres espiras a 120° ($360^\circ/3$) unas de otras, se consiguen tres tensiones alternas senoidales de igual frecuencia y amplitud pero desfasadas 120° entre sí:



$$v_1 = V_{\text{máx}} \cdot \text{sen } \omega t$$

$$v_2 = V_{\text{máx}} \cdot \text{sen}(\omega t - 120^\circ)$$

$$v_3 = V_{\text{máx}} \cdot \text{sen}(\omega t - 240^\circ)$$



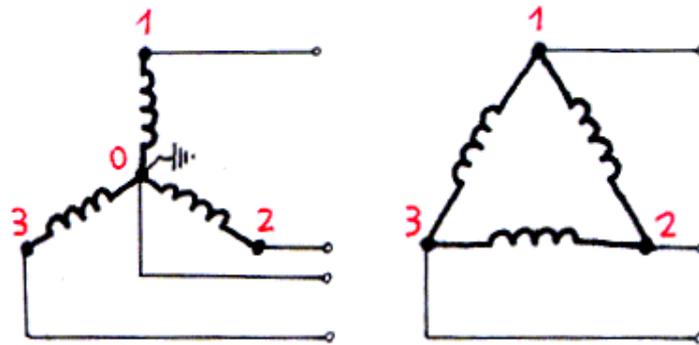
Para sacar las tensiones al exterior sería necesario un sistema de anillos rozantes y escobillas colectoras que a las tensiones usuales, de 10 a 20 kV, generan ciertos problemas eléctricos y mecánicos.

En los alternadores modernos se sitúan las bobinas en el estator dotando al rotor de un potente electroimán que, al ser alimentado por una corriente continua, genera el campo magnético. Se evita de esta forma el complejo sistema de anillos colectores.

Existen dos formas básicas de conexión de estas bobinas a las líneas exteriores: *conexión en estrella* y *conexión en triángulo*.



Física – Máquinas Eléctricas



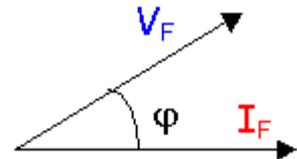
Tensión simple o de fase: Cada bobina del alternador trifásico se comporta como un generador monofásico, generando entre sus terminales una tensión denominada simple o de fase.

Tensión compuesta o de línea: De cada borne 1, 2 y 3 de la figura sale un conductor de línea. A la tensión entre dos líneas se le denomina compuesta o de línea.

En el caso de la conexión estrella puede existir un cuarto conductor **NEUTRO** (saliendo del borne 0). Las tensiones de una línea al neutro coinciden con las tensiones en cada bobina, siendo por tanto **tensiones de fase**.

Factor de potencia

FACTOR DE POTENCIA: Coseno del ángulo que forman la intensidad de fase y la tensión de fase. Este ángulo será igual al de la impedancia conectada.

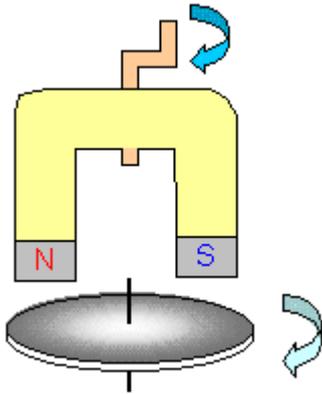


$$F.d.p. = \cos \varphi$$

$$0 \leq F.d.p. \leq 1$$



Motor asíncrono trifásico. Principio de funcionamiento

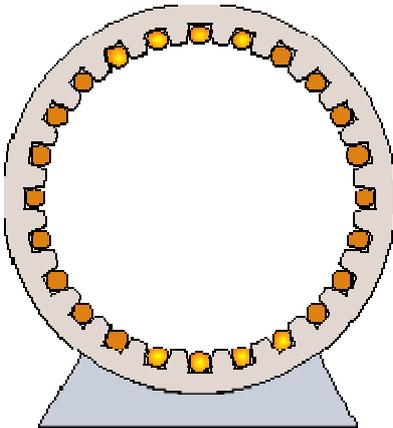


Se dispone de un imán en forma de U, de tal forma que pueda girar por su eje central mediante una manivela. Muy próximo a los polos se sitúa un disco de material conductor no magnético (cobre o aluminio), de tal forma que también pueda girar. Al hacer girar el imán permanente se puede observar que el disco también gira, pero a un poco menos velocidad que el imán.

- El imán en su giro corta el disco que es conductor induciendo f.e.m. y creando corrientes.
- Las corrientes interactúan con el campo del imán dando lugar a fuerzas que provocan el giro del disco.

En los motores asíncronos el campo giratorio lo produce un sistema de C.A. trifásica, cuya velocidad de giro dependerá de la *frecuencia* de las corrientes y del *número de pares de polos* de que conste el motor:

$$\text{VELOCIDAD DE SINCRONISMO } n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$$



En la figura de la izquierda puede verse el bobinado de una máquina de un sólo par de polos. Cada ciclo de red el campo magnético giratorio da una vuelta completa.

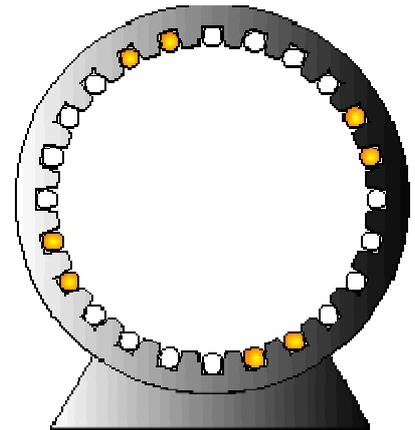
Para una frecuencia de la red de 50 Hz, el campo da 50 vueltas por segundo, esto es, 3000 r.p.m.



Física – Máquinas Eléctricas

A la derecha puede verse el bobinado de una máquina de dos pares de polos. Cada ciclo de red el campo magnético giratorio da media vuelta.

Para una frecuencia de la red de 50 Hz, el campo da 50/2 vueltas por segundo, esto es, 1500 r.p.m.



Como puede deducirse de la fórmula, la velocidad de sincronismo, velocidad con la que gira el campo magnético, será submúltiplo de $60 \cdot f$, es decir de $60 \times 50 = 3000$ r.p.m. en Europa, ya que la frecuencia de la red es de 50Hz. Para un número de pares de polos diferente de la unidad (siempre un número entero) surgirán velocidades inferiores.

Velocidad para una frecuencia de 50 Hz		
Pares de polos	Polos	r.p.m.
1	2	3000
2	4	1500
3	6	1000
4	8	750
5	10	600
6	12	500



Motor asíncrono de rotor en cortocircuito

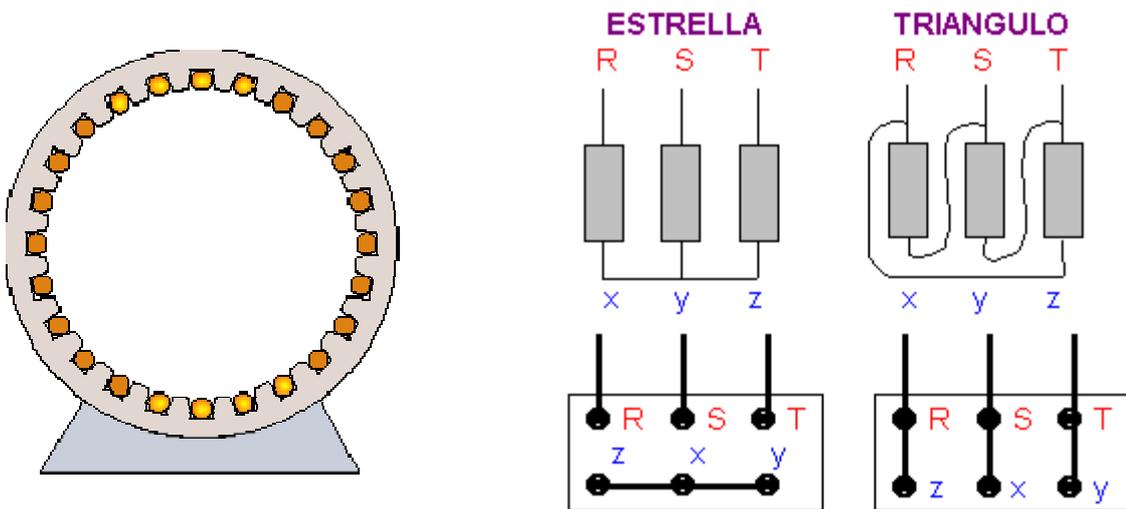
ESTATOR

Parte fija del motor formada por paquetes de chapa magnética que alojan en ranuras a las bobinas que van a crear el campo magnético giratorio.

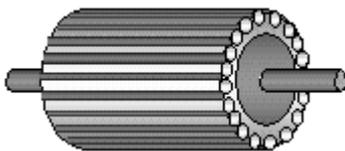
Estas bobinas pueden estar conectadas en estrella o en triángulo.

Por ejemplo un motor de 380/220 V se podrá conectar a una red de 380 V en estrella o a otra de 220 V en triángulo. En cualquier caso cada bobina estará a la tensión de fase de 220 V.

Esto es así porque la tensión que soporta cada bobinado conectado en estrella es raíz de tres veces menor que conectado en triángulo.



ROTOR



Parte del motor que va a girar y que está formada por paquetes de chapa magnética de forma cilíndrica en torno a un eje, con ranuras en las que se alojan conductores de aluminio cortocircuitados en sus extremos por medio de anillos (Jaula de ardilla).

DESLIZAMIENTO

El rotor nunca girará a la velocidad de sincronismo, ya que si iguala la velocidad de giro del campo del estator, las líneas de fuerza no cortarían a los conductores y no se generarían f.e.m., ni corrientes, ni par para mantener el movimiento.

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100$$

Se llama deslizamiento a la diferencia entre la velocidad a la que gira el rotor y la velocidad de sincronismo, normalmente dada en % de la de sincronismo.



Física – Máquinas Eléctricas

ARRANQUE

Al estar los conductores del rotor en reposo, son cortados por el campo giratorio a gran velocidad, lo que crea grandes f.e.m. inducidas que dan lugar a grandes intensidades en el arranque acompañadas de un fuerte par de arranque.

CARGA

Girando el motor en vacío, la velocidad del rotor es muy próxima a la del campo del estator siendo esta pequeña diferencia la que permite al campo cortar los conductores del rotor induciendo pequeñas f.e.m. y pequeñas intensidades suficientes para crear el par necesario.

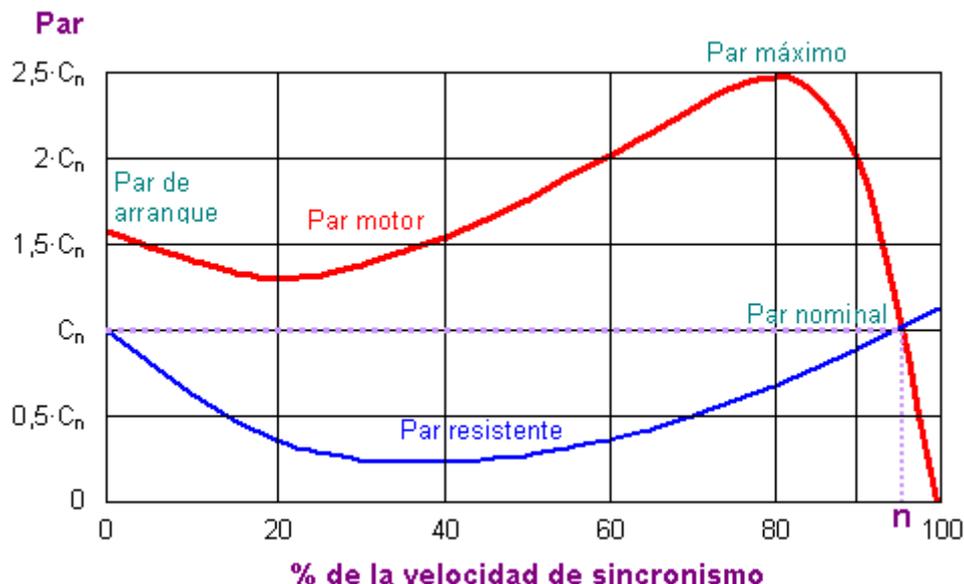
Si aumenta el par que debe realizar el motor, éste baja su velocidad, aumentando el deslizamiento e induciendo mayores f.e.m. y corrientes, capaces de provocar el aumento de par necesario.

CARACTERÍSTICA PAR-VELOCIDAD

Los motores asíncronos trifásicos tienen aproximadamente las siguientes características:

- Par de arranque de 1,5 a 2 veces el nominal.
- Par máximo de 2 a 3 veces el nominal a una velocidad del 80% de la de sincronismo.
- Par nominal con un deslizamiento del 2% al 8%.

La relación del par máximo y el nominal (C_{max}/C_n) se denomina **capacidad de sobrecarga**.





Física – Máquinas Eléctricas

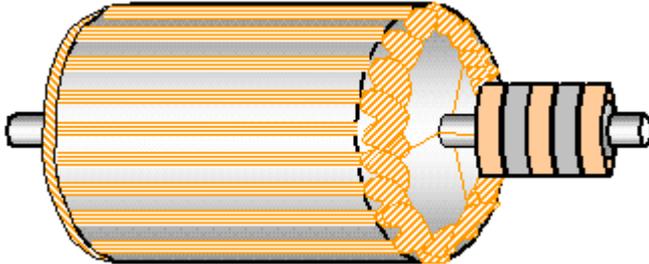
El punto de funcionamiento del motor es la intersección de la curva del par motor con la del par resistente. Esto ocurre para el par nominal del motor en torno al 92-98% de la velocidad de sincronismo (zona de la derecha de la curva).

Si el par resistente disminuye, la intersección tiene lugar más a la derecha, a una velocidad algo mayor, mientras que si el par resistente aumenta, el motor reduce su velocidad.



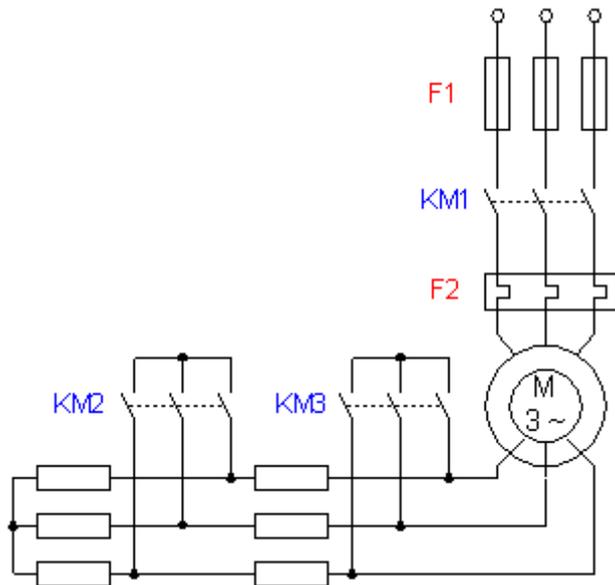
Motor asíncrono de rotor bobinado o de anillos rozantes

En estos motores, el estator posee las mismas características que el motor con rotor en cortocircuito, pero el rotor se construye insertando un devanado trifásico en las ranuras de un núcleo cilíndrico de chapas magnéticas.



Este devanado se conecta normalmente en estrella y los tres terminales restantes se conectan a tres anillos rozantes que a través de unas escobillas permiten la conexión exterior de unas resistencias para limitar la corriente rotórica.

La inserción de estas resistencias permite la reducción de la intensidad de arranque manteniendo un buen par que incluso puede ser máximo en el arranque.



Su inconveniente es su mayor precio y coste de mantenimiento, llegando casi a desaparecer en la actualidad debido a los sistemas electrónicos de arranque para el motor de rotor de jaula.

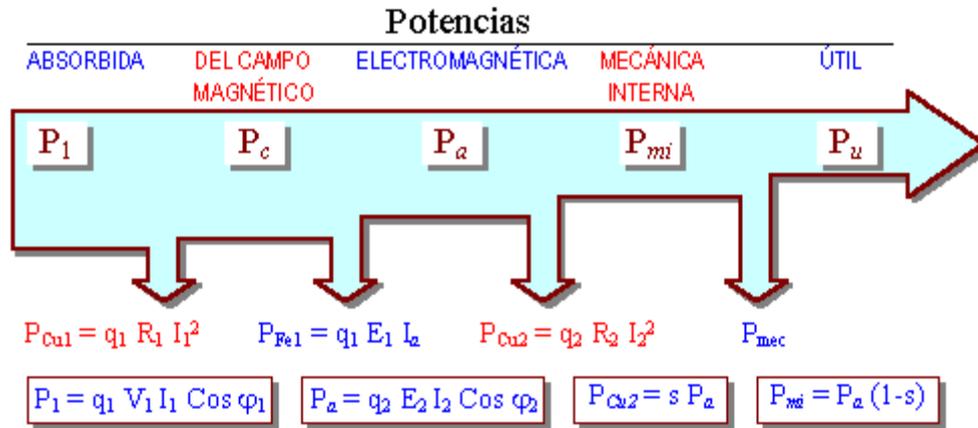
1. Se conecta **KM1**.
2. **Temporización**.
3. Se conecta **KM2**.
4. **Temporización**.
5. Se conecta **KM3**.

Balance de potencias y par motor

El diagrama siguiente representa la evolución de la potencia en un motor asíncrono, desde la potencia absorbida de la red hasta la potencia útil en el eje, siendo q_1 el número de fases del estator y q_2 el número de fases del rotor:



Física – Máquinas Eléctricas



La potencia total absorbida de la red por el estator va sufriendo ciertas pérdidas:

- Pérdidas en el cobre del estator.
- Pérdidas en el hierro del estator.
- Pérdidas en el cobre del rotor.
- Pérdidas mecánicas.

Cada pérdida va generando una nueva potencia en el motor hasta llegar a la potencia útil:

- Potencia del campo magnético.
- Potencia electromagnética.
- Potencia mecánica interna.
- Potencia útil

La relación de la potencia útil con la absorbida nos da el rendimiento del motor, que suele darse en tanto por ciento, y su relación con la velocidad del motor en rad/s nos da el par útil en $N \cdot m$, que se igualará al par resistente, producto de la fuerza por la distancia (normalmente el radio de la polea utilizada).

$$\eta = \frac{P_u}{P_{abs}} \cdot 100$$

$$C = \frac{P_u}{\omega} \quad (Nw \cdot m)$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (rad/s)$$

$$C = F \cdot r \quad (Nw \cdot m)$$

Es interesante conocer la variación sufrida por el par motor en función de la tensión y la frecuencia:

El par es directamente proporcional al cuadrado de la tensión.

$$\frac{C}{C''} = \frac{V^2}{V'^2} = \frac{f'^2}{f^2}$$

El par es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia

GENERADORES ELÉCTRICOS



Física – Máquinas Eléctricas

El generador eléctrico es la parte más importante del equipo en una termoeléctrica ya que es el que genera energía eléctrica a partir de energía mecánica, el cual es el objetivo que se quiere conseguir cuando la planta es construida.

Existen tres tipos de generadores eléctricos rotatorios : Sincrónicos de corriente alterna (ca), inducción de ca y rotatorios de corriente directa (cd). Los generadores sincrónicos son los de mayor uso debido a su sistema de excitación, en cambio, los generadores de cd han sido reemplazados casi por completo por rectificadores estáticos de silicio.

Generadores sincrónicos

El principio fundamental de operación de los generadores sincrónicos, es que el movimiento relativo entre un conductor y un campo magnético induce un voltaje en el conductor. Una fuente externa de energía cd o excitador se aplica a través de unos anillos colectores en el rotor: La fuerza del flujo, y por lo tanto, el voltaje inducido en la armadura se regulan mediante la corriente directa y el voltaje suministrado al campo. La corriente alterna se produce en la armadura debido a la inversión del campo magnético a medida que los polos norte y sur pasan por los conductores individuales.

La disposición mas común es la de un electroimán cilíndrico que gira dentro de un conjunto de conductores estacionarios. En las siguientes figuras se muestran tanto al electroimán o también llamado campo y los conductores que constituyen la armadura.

La corriente que se genera mediante los alternadores descritos más arriba, aumenta hasta un pico, cae hasta cero, desciende hasta un pico negativo y sube otra vez a cero varias veces por segundo, dependiendo de la frecuencia para la que esté diseñada la máquina. Este tipo de corriente se conoce como corriente alterna monofásica. Sin embargo, si la armadura la componen dos bobinas, montadas a 90° una de otra, y con conexiones externas separadas, se producirán dos ondas de corriente, una de las cuales estará en su máximo cuando la otra sea cero. Este tipo de corriente se denomina corriente alterna bifásica. Si se agrupan tres bobinas de armadura en ángulos de 120° , se producirá corriente en forma de onda triple, conocida como corriente alterna trifásica. Se puede obtener un número mayor de fases incrementando el número de bobinas en la armadura, pero en la práctica de la ingeniería eléctrica moderna se usa sobre todo la corriente alterna trifásica, con el alternador trifásico, que es la máquina dinamoeléctrica que se emplea normalmente para generar potencia eléctrica.

Los generadores de corriente alterna de baja velocidad se fabrican con hasta 100 polos, para mejorar su eficiencia y para lograr con más facilidad la frecuencia deseada. Los alternadores accionados por turbinas de alta velocidad, sin embargo, son a menudo máquinas de dos polos. La frecuencia de la corriente que suministra un generador de corriente alterna es igual a la mitad del producto del número de polos y el número de revoluciones por segundo de la armadura.

Existen dos parámetros que limitan la producción de energía eléctrica de un generador:

Saturación de la densidad de flujo. A medida que se incrementa la corriente de excitación del campo, se alcanza un punto donde la densidad del flujo no aumenta más debido a la saturación del hierro en el núcleo. Lo normal es que la capacidad del generador se encuentre cerca de este punto de saturación de flujo.

Elevación de la temperatura en el devanado y en el aislamiento debido a las pérdidas. Esto comprende a las pérdidas debidas a la corriente de excitación en el devanado del campo, la corriente alterna en el devanado de la armadura, el circuito magnético y cualesquiera corrientes parásitas o campos magnéticos que se generen. Dichas pérdidas pueden llegar a ser del 1 al 5% o más de la cantidad de energía que se transforme.



Física – Máquinas Eléctricas

Los generadores sincrónicos también tienen su propia clasificación la cual es por el sistema de excitación y por su sistema de enfriamiento.

1. Generadores enfriados por aire:

Estos generadores se dividen en dos tipos básicos: abiertos ventilados (OV, open ventilated) y completamente cerrados enfriados por agua a aire (TEWC, totally enclosed water to air cooled).

Los generadores de tipo OV fueron los primeros construidos y que en algunas plantas de tamaño pequeño se utilizan. 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. Se pueden usar filtros que puedan reemplazarse o limpiar, para mantener limpios los embobinados. En la siguiente figura se muestra un corte de un generador OV y el patrón de ventilación.

Los generadores tipo TEWC (Figura N° 78), son un sistema de enfriamiento cerrado, donde el aire recircula 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 peso del hidrógeno es aproximadamente 1/16 del aire y con una alta capacidad térmica, esto significa, que las pérdidas de viento, se reducen por su uso y el calor removido y transferido a los enfriadores es satisfactorio. Cuando el hidrógeno se mezcla con el oxígeno en proporciones de 20 a 85% en total, la mezcla es explosiva, y se debe tener ciertas precauciones para evitar una avería.

El enfriamiento convencional con hidrógeno puede usarse en generadores con capacidad nominal aproximada de 300 MVA o menos, mucho mayor a los generadores enfriados por agua (cuya construcción es mucho más compleja) que llegan a un máximo de 250 MVA.

Generalmente los generadores se construyen con sistema de enfriamiento por hidrógeno cuando son unidades con capacidades de 100 MVA o más (Figura N° 79).

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 (Figura N° 80). Estos diseños emplean torones de cobre a través de los cuales fluye agua desionizada. El agua de enfriamiento se suministra vía un circuito cerrado.

El voltaje y la corriente de armadura de los generadores enfriados por hidrógeno / agua son bastantes mayores que los enfriados por aire o hidrógeno. Como resultado unidades de mayor capacidad tanto en los voltajes como en las fuerzas que experimentan las unidades generadoras.

Generadores de Inducción.



Física – Máquinas Eléctricas

El estator de un generador de inducción es similar al de un generador sincrónico. El rotor se diferencia del rotor de un generador sincrónico en que no hay excitación y los conductores se encuentran unidos en corto en los extremos del rotor mediante un anillo anular. Esta distribución se parece a una jaula de ardilla, lo que origina el nombre de este tipo de devanado. La carga del generador crece según se incrementa la velocidad, por lo que el generador es autorregulante y puede usarse sin control de un regulador.

Los generadores de inducción no pueden funcionar de manera independiente en un sistema aislado, ya que estos generadores no son auto excitantes. Debido a esto, un generador de inducción siempre se debe usar en paralelo con generadores sincrónicos que regulan el voltaje y suministran los kilowatts necesarios para vencer la potencia retrasada de la generación por inducción. Otra manera de funcionar de dichos generadores es con un banco de capacitores que le entreguen la corriente retrasada para la excitación.

Los generadores de inducción son más sencillos y de menor costo inicial que los generadores sincrónicos. Se han utilizado para recuperar energía mediante la expansión de corrientes de gas de desecho y vapor a baja presión. En algunos usos, una turbina de recuperación de energía o un dispositivo de expansión, impulsa un motor generador de inducción y otra bomba o compresor en la misma flecha. El motor generador puede suministrar o absorber el par torsor cuando la potencia de los otros dispositivos esta desbalanceada.

Generadores de Corriente Directa.

El principio de operación de los generadores de cd es muy similar a los generadores de ca (Figura N° 81). La armadura del generador de cd gira entre dos polos de campo fijos, la corriente en la armadura se mueve en una dirección durante la mitad de cada revolución, y en la otra dirección durante la otra mitad. Para producir un flujo constante de corriente en una dirección continua, en un aparato determinado, es necesario disponer de un medio para invertir el flujo de corriente fuera del generador una vez durante cada revolución. En las máquinas antiguas esta inversión se llevaba a cabo mediante un conmutador, un anillo de metal partido montado sobre el eje de una armadura. Las dos mitades del anillo se aislaban entre sí y servían como bornes de la bobina. Las escobillas fijas de metal o de carbón se mantenían en contra del conmutador, que al girar conectaba eléctricamente la bobina a los cables externos. Cuando la armadura giraba, cada escobilla estaba en contacto de forma alternativa con las mitades del conmutador, cambiando la posición en el momento en el que la corriente invertía su dirección dentro de la bobina de la armadura. Así se producía un flujo de corriente de una dirección en el circuito exterior al que el generador estaba conectado.

Los generadores de corriente continua funcionan normalmente a voltajes bastante bajos para evitar las chispas que se producen entre las escobillas y el conmutador a voltajes altos. El potencial más alto desarrollado para este tipo de generadores suele ser de 1.500 V. En algunas máquinas más modernas esta inversión se realiza usando aparatos de potencia electrónica, como por ejemplo rectificadores de diodo.

Los generadores de corriente continua se clasifican según el método que usan para proporcionar corriente de campo que excite los imanes del mismo. Un generador de excitado en serie tiene su campo en serie respecto a la armadura. Un generador de excitado en derivación, tiene su campo conectado en paralelo a la armadura. Un generador de excitado combinado tiene parte de sus campos conectados en serie y parte en paralelo. Los dos últimos tipos de generadores tienen la ventaja de suministrar un voltaje relativamente constante, bajo cargas eléctricas variables. El generador excitado en serie se usa sobre todo para suministrar una corriente constante a voltaje



Física – Máquinas Eléctricas

variable. Un magneto es un generador pequeño de corriente continua con un campo magnético permanente.

Estos tipos de generadores ya no son de gran uso sólo cuando se trabajan para proporcionar energía para equipos de velocidad variable. Los avances en las fuentes de energía de cd con los rectificadores de silicio han reducido el mercado para los generadores de cd, principalmente por las piezas de reemplazo y reparación.

Sistema de excitación

La función principal del sistema de excitación es suministrar energía en forma de voltaje y corriente directa al campo generador, creando el campo magnético. Así mismo, el sistema de excitación comprende el equipo de control y protección, que regula la producción eléctrica del generador. En el diseño de los sistemas complejos de transmisión de energía, las características de desempeño y protección del sistema de excitación deben evaluarse con tanto cuidado como las características de diseño del equipo.

El voltaje de excitación es un factor esencial en el control de la salida del generador. Una característica deseable de un sistema de excitación es que este sea capaz de producir con rapidez altos niveles de voltaje de excitación después de un cambio en el voltaje terminal. Además del voltaje que se requiere en el equipo se necesita que la respuesta sea de manera rápida y a los niveles que se requiere.

Existen varios sistemas de excitación el cual se clasifican según la fuente de energía del excitador:

- Generador de cd con conmutador.
- Generador de ca y rectificadores estacionarios.
- Generador de ca y rectificadores rotatorios (sin escobillas).
- Transformadores en el generador principal y rectificadores (excitación estática).

En la figura N° 82 se muestra un diagrama esquemático de un generador de cd.

La energía de excitación se toma del conmutador en el rotor del generador del rotor y se aplica al campo rotatorio del generador principal a través de los anillos colectores. El voltaje de salida del generador principal se controla mediante un regulador de voltaje que varía la excitación del estator del generador de cd.

En la figura N° 82 se muestra de manera esquemática el sistema rectificador estacionario. El sistema excitador de ca tiene un campo rotatorio, al igual que el generador principal. La salida del excitador se toma de los devanados estacionarios de la armadura y se convierte a cd mediante los rectificadores de diodo de silicio y se aplica al campo rotatorio del generador de cd, excepto que la excitación hacia el campo rotatorio del excitador se transfiere a través de los anillos colectores. Este tipo de sistema se emplea en los generadores de más de 400000 kVA donde la potencia de excitación puede alcanzar los 7000kW.

En la figura N° 84 aparece un sistema alternativo de excitación de ca conocido como rectificador rotatorio o sin escobillas. Este sistema invierte el campo del excitador y de la armadura y elimina por



Física – Máquinas Eléctricas

lo tanto ambos juegos de anillos colectores de aquí su nombre de excitador sin escobillas. El voltaje de salida del generador principal se controla mediante el campo excitador en el estator.

En el sistema estático de excitación (Figura N° 85) elimina la necesidad de un generador independiente para la excitación. La potencia de excitación es suministrada por las terminales del generador principal a través de transformadores de excitación. La salida controlada de ca de los transformadores se convierte a cd mediante rectificadores de diodo de silicio y se aplica al campo del generador principal a través de los anillos colectores.