

# Unidad 6

**MÁQUINAS ELÉCTRICAS:  
SINCRÓNICAS**

**ELECTROTECNIA Y MÁQUINAS ELÉCTRICAS**

**(INGENIERÍA MECÁNICA)**

**M - 14**

Ing. Julián J. Ronco (Prof. Adj.)

Ing. Jorge C. Ronco (Prof. Adj.)

Mauro Curli (Aux.)

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

## 6.1 INTRODUCCIÓN

“Las máquinas sincrónicas son máquinas eléctricas cuya velocidad de rotación  $n$  (r.p.m.) está vinculada rígidamente con la frecuencia  $f$  de la red de corriente alterna con la cual trabaja:  $n = \frac{60f}{p}$ , donde  $p$  es el número de pares de polos de la máquina.”

Estas máquinas, como cualquier otro convertidor electromecánico de la energía, pueden funcionar tanto en régimen generador como en régimen motor. En la práctica, sin embargo, su empleo es más frecuente como generadores para producir energía eléctrica de corriente alterna (alternadores) en las centrales eléctricas a partir de fuentes primarias de energía hidráulica, térmica o nuclear.

## 6.2 ASPECTOS CONSTRUCTIVO

Al igual que las máquinas de inducción, están constituidas por dos arrollamientos independientes:

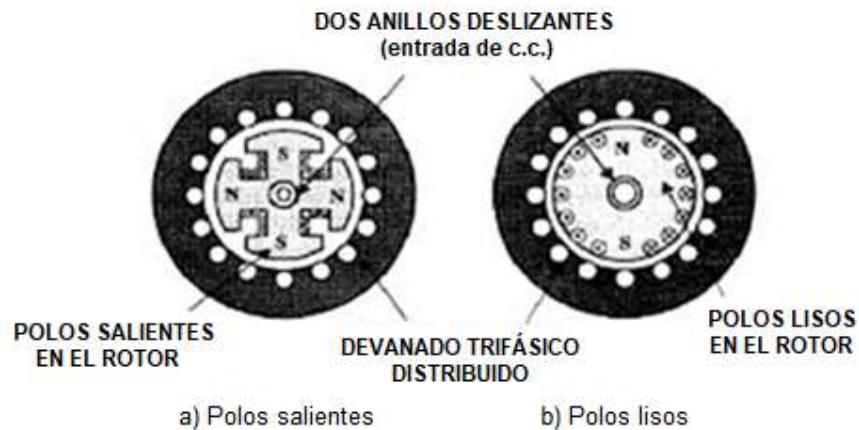
- un arrollamiento **inductor** alimentado por corriente continua, que da lugar a los polos de la máquina;
- un devanado **inducido** distribuido, formando un arrollamiento trifásico recorrido por corriente alterna, misma disposición que para la máquina asíncrona.

En las máquinas pequeñas, para potencias de hasta 10kVA, el devanado inductor se coloca normalmente en el estator, en forma concentrada, sobre los *polos salientes*. El inducido queda entonces instalado en el rotor, por lo que en el caso de formar tres fases, se necesitarán de tres anillos rozantes para acceder a él:



Máquina sincrónica de baja potencia con el inducido en el rotor

Sin embargo, debido a las dimensiones que adquieren las máquinas para potencias elevadas (pudiendo llegar a 1000-1500MVA), el arrollamiento inductor se coloca en el rotor, de forma que los polos quedan situados en él, quedando el devanado trifásico en el estator:



Tipos constructivos de máquinas sincrónicas

Puede apreciarse en la figura anterior que existen dos diferentes tipos de máquinas con el inductor en el rotor: de polos salientes, con los devanados concentrados; y de rotor cilíndrico, donde el devanado que se coloca está distribuido en ranuras (formando generalmente 2 o 4 polos), cubriendo una parte de la circunferencia del rotor. En estos casos se requiere de dos anillos rozantes en la parte móvil de la máquina para alimentar con corriente continua al arrollamiento inductor.

La elección entre estas dos formas constructivas del rotor viene dada por la velocidad de rotación de la máquina, la cual depende, a su vez, del tipo de motor primario que la hace girar, los cuales pueden ser: turbogeneradores, hidrogeneradores, generadores diésel, etc.

La máquina con el inductor giratorio (en el rotor) presenta notables ventajas frente a las de inductor fijo (en el estator), esto se debe a que la potencia eléctrica del arrollamiento de excitación es del orden de la centésima parte de la potencia de la máquina. Las principales ventajas pueden resumirse así:

- se requiere únicamente de dos anillos rozantes;
- la corriente de los anillos rozantes presenta menos problemas de conducción; a su vez, se trabaja con tensiones muy inferiores a la de generación, lo que facilita su aislación;
- es más fácil aislar la alta tensión de las grandes máquinas si su arrollamiento de potencia está en la parte fija de la máquina;
- se soportan mejor los efectos electrodinámicos de las grandes corrientes (especialmente de cortocircuito) si el circuito de potencia está en la parte fija de la máquina.

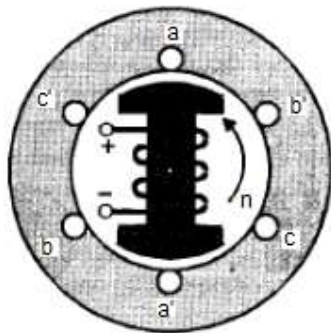
**Nota:** Queda para el/la alumno/a la búsqueda e interpretación de la utilización de uno u otro tipo de máquina (polos salientes o rotor cilíndrico), según la fuente de energía primaria empleada para su funcionamiento.

## 6.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

### 6.3.1 FUNCIONAMIENTO EN VACÍO

Analizaremos primero el proceso electromagnético que se da en la máquina funcionando en vacío; esto es, con el arrollamiento inducido en circuito abierto, por lo que la corriente circulando por él será cero, y la magnitud de la f.e.m. en el mismo será función del flujo magnético y de la velocidad de rotación de los polos. A su vez, la frecuencia de la f.e.m. generado será directamente proporcional a la velocidad.

Si consideramos que el rotor gira a una velocidad  $n$ , y que los tres arrollamientos están conformados por  $N$  espiras concentradas, como se muestra en la siguiente figura, y que el flujo concatenado por las mismas varía entre los límites  $+\Phi_m$  y  $-\Phi_m$ , el valor medio de la f.e.m. inducida en cada fase, en un medio período de la corriente alterna será:



$$E_{med} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} e \, dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} \left( -N \frac{d\Phi}{dt} \right) dt$$

es decir:

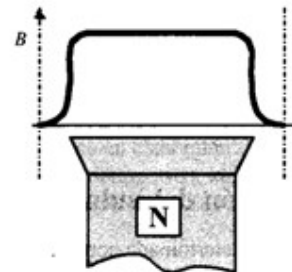
$$E_{med} = -\frac{2}{T} N \int_{+\Phi_m}^{-\Phi_m} d\Phi = 4fN\Phi_m$$

Cabe recordar, que al igual que ocurría en las máquinas de inducción, el valor eficaz de la f.e.m. inducida hay que afectarlo por el factor de forma  $k_f$  (deformación de la onda debido a que el flujo no tiene una distribución sinusoidal en el entrehierro) y los correspondientes coeficientes reductores de distribución  $k_d$  y de paso  $k_p$  de los devanados del inducido. En consecuencia, la f.e.m. eficaz  $E$  tendrá una magnitud:

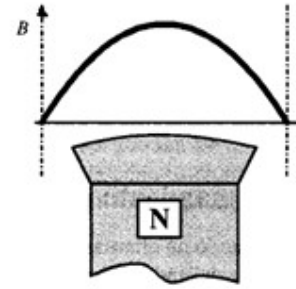
$$E = 4 k_f k_d k_p f N \Phi_m$$

La variación en el tiempo de la f.e.m. anterior deber ser sinusoidal, por lo que es necesaria una distribución sinusoidal de la inducción a lo largo de la periferia del rotor ( $e = Blv$ ).

Como la f.m.m. de excitación del inductor es constante en el tiempo, si el entrehierro es de espesor constante, dicha distribución será constante debajo de cada polo, para luego decrecer rápidamente hasta las líneas interpolares.

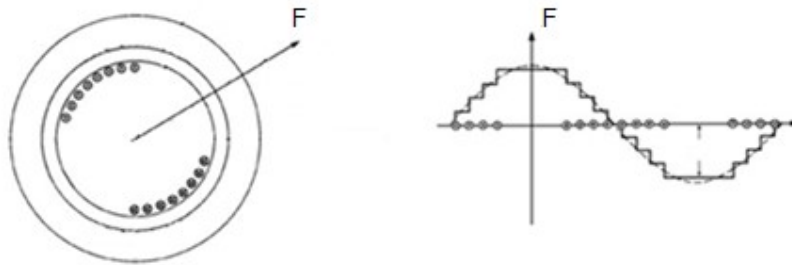


Para conseguir entonces esta distribución sinusoidal de la inducción  $B$ , habrá que aumentar el entrehierro desde el centro del polo hasta uno de sus extremos ya que de esta forma aumenta la reluctancia gradualmente lo que conduce a una forma de  $B$  que se acerca más a la sinusoidal.

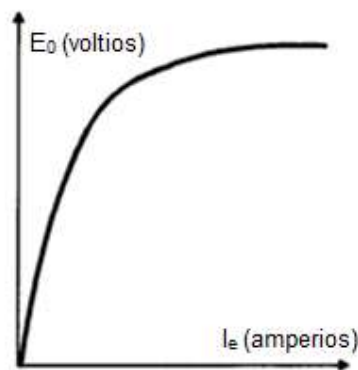


Si bien no se llega a una senoide perfecta, por lo que la f.e.m. resultante contendrá armónicos, los mismos se reducen justamente por medio de la distribución y acortamiento de las bobinas de los devanados inducidos.

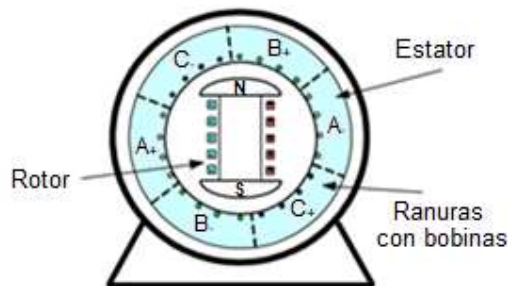
En las máquinas con rotor cilíndrico, la reluctancia magnética es idéntica cualquiera sea el eje considerado, y se las denomina "isótropas". La obtención de una forma de  $B$  sinusoidal no se puede lograr entonces mediante un arrollamiento concentrado, debiéndose realizar el bobinado en forma concéntrica. La distribución de las espiras en las ranuras debe propender a que la f.m.m. en el entrehierro tenga una configuración escalonada, lo más próxima a una senoide. Esto se representa en la siguiente figura:



**Curva de vacío de un alternador** → esta es una característica importante del funcionamiento en vacío de la máquina sincrónica, que expresa la f.e.m. en bornes de la máquina, estando desconectada la carga, en función de la corriente de excitación,  $E_0 = f(I_e)$ :



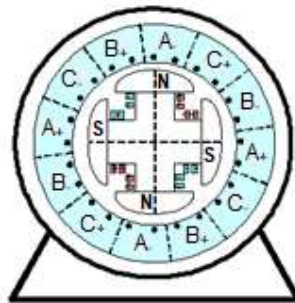
### 6.3.2 FRECUENCIA – N° DE POLOS



En la figura se muestra un inductor con un par de polos salientes. Para obtener una frecuencia de 50Hz, el rotor de estas máquinas debe girar a una velocidad:

$$n = \frac{f \cdot 60}{p} = 3000 \text{ rpm}$$

Para grandes máquinas, el inductor tendrá grandes dimensiones, siendo imposible que giren a altas velocidades. Entonces, se aprovecha el tamaño del rotor para construirlo con más de un par de polos (pueden llegar a encontrarse máquinas con hasta 20 pares de polos), disminuyendo su velocidad de giro, según la expresión anterior.



Por ejemplo, para la máquina de la figura de la izquierda, con  $p = 2$  pares de polos, la velocidad de giro de la máquina será:

$$n = \frac{f \cdot 60}{2} = 1500 \text{ rpm}$$

Concluyendo, si se desea una frecuencia de 50Hz en la tensión generada, tendremos una velocidad de giro del rotor de 3000, 1500, 1000, 750, 600, 500 r.p.m., etc. para un número de pares de polos:  $p = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ , etc. respectivamente.

### 6.3.3 FUNCIONAMIENTO EN CARGA – REACCIÓN DE INDUCIDO

Si un alternador está funcionando en vacío, con una determinada corriente de excitación, y se cierra el circuito del inducido conectando una impedancia de carga a sus terminales, se obtiene una tensión  $U$  en borne de la máquina, inferior al valor que presentaba en vacío  $E_0$ .

Esta reducción de tensión de salida tiene dos causas:

- la caída de tensión en la impedancia interna de la máquina: por una parte, existe la resistencia  $R$  del bobinado, que provoca una caída de tensión muy pequeña (suele despreciarse); y también debe considerarse la reactancia del inducido que se debe al flujo de dispersión del estator que no interacciona con el flujo del rotor, denominada *reactancia de dispersión del estator*  $X_\sigma$ ;
- a su vez, la corriente en el inducido produce una f.m.m. que reacciona con la del inductor modificando el flujo del entrehierro de la máquina. Al efecto que provoca

la f.m.m. del inducido ( $F_{mi}$ ) sobre la f.m.m. del inductor ( $F_{me}$ ), se lo conoce con el nombre de **reacción del inducido o armadura**, y sobre él tiene influencia tanto la magnitud como la fase de la corriente del estator.

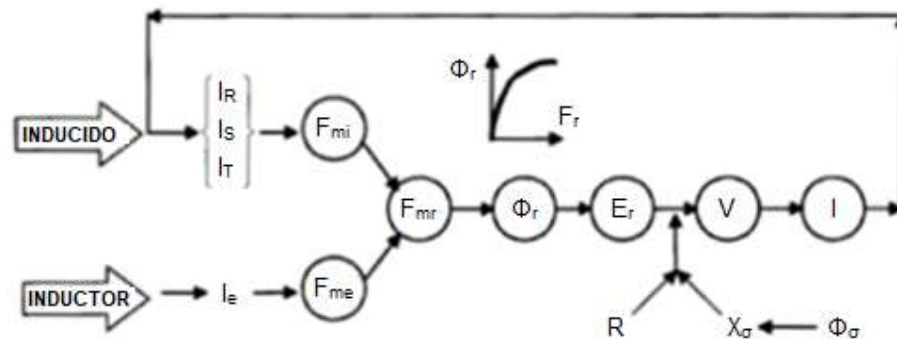
### Reacción de inducido o armadura

La f.m.m. del inductor  $F_{me}$ , de carácter armónico en el espacio, constante en el tiempo y rotante a velocidad  $\omega$ , induce las f.e.m. en los arrollamientos del estator, los cuales, cuando se trata de una máquina trifásica, estarán desfasados  $120^\circ$  en el espacio. Las corrientes que circulen por ellos, al estar desfasadas  $120^\circ$  eléctricos en el tiempo, darán origen a una f.m.m. de reacción  $F_{mi}$  que gira en el espacio a la velocidad de sincronismo, es decir, a la misma velocidad que el rotor y  $F_{me}$ . Esta f.m.m. influye sobre la f.m.m. del inductor, pudiendo deformarla, reducirla o ampliarla, ya sea la carga que alimenta de origen resistivo, inductivo o capacitivo.

$$F_{mr} = F_{me} + F_{mi}$$

## 6.4 REGULACIÓN DE TENSIÓN

La f.m.m. resultante  $F_{mr}$ , producto de la interacción de  $F_{me}$  y  $F_{mi}$ , produce un flujo resultante en el entrehierro  $\Phi_r$  que es el que origina la f.e.m. resultante  $E_r$  en el devanado del inducido (en cada fase). Debido después a la existencia de la resistencia  $R$  y reactancia de dispersión  $X_\sigma$  de las bobinas del estator, se obtendrá una tensión  $V$  algo inferior a  $E_r$ . Esto puede verse representado en el siguiente esquema:

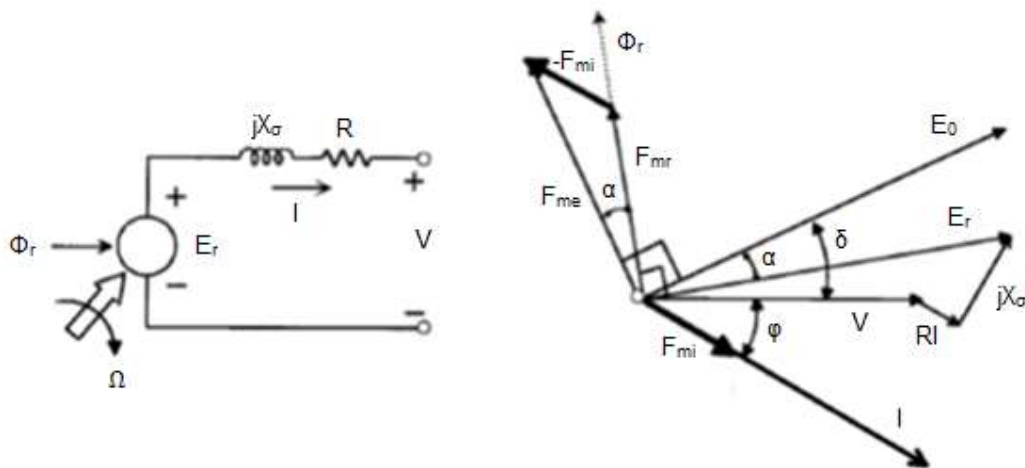


Se define *regulación de tensión* de una máquina síncrona al cociente:

$$\varepsilon = \frac{E_0 - V_n}{V_n} \cdot 100$$

la cual depende de la magnitud de la resistencia y de la reactancia de dispersión del inducido y también del valor de la f.m.m. de reacción que produce este devanado, la cual está ligada con el fdp de la carga.

A continuación se presentan el circuito que representa lo recién mencionado y la correspondiente composición fasorial del generador síncrono en carga:



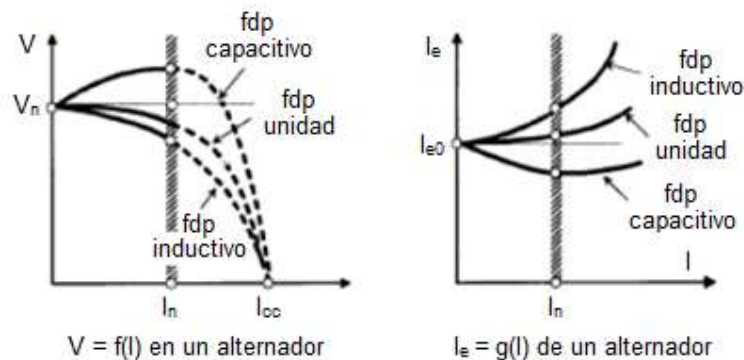
$$V = E_r - I(R + jX_\sigma)$$

Como se observa en el diagrama fasorial, la regulación depende de la magnitud de la resistencia y de la reactancia de dispersión del inducido y también del valor de la f.m.m. de reacción que produce este devanado, el cual estará ligado al fdp de la carga.

Si bien este análisis escapa a los alcances de la cátedra, destacaremos lo siguiente:

- con cargas resistivas y sobre todo con cargas inductivas, resulta una disminución de la tensión conforme crece la corriente de salida.
- para cargas capacitivas, la tensión en carga es superior a la de vacío, lo que conduce a un valor negativo de la regulación.

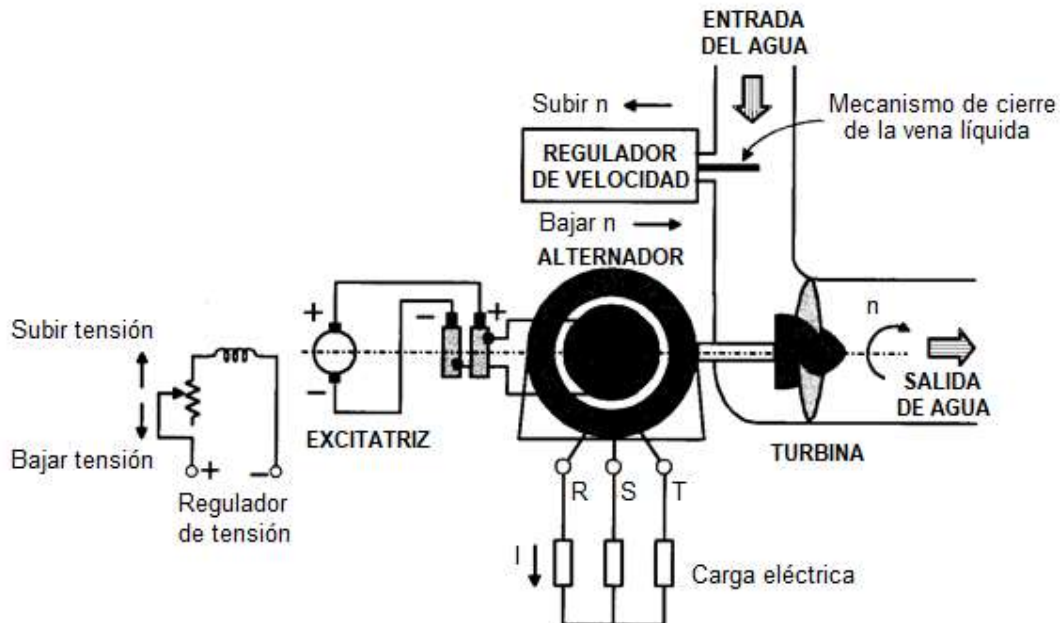
Lo recién mencionado se ve representado a continuación (curva de la izquierda), como así también la variación correspondiente en la corriente de excitación (curva de la derecha) para mantener constante la tensión en bornes de la máquina al variar la corriente del inducido:



**Nota:** Queda para el/la alumno/a la profundización e interpretación de lo recién mencionado que, en caso de requerir su consulta, se encuentra en el libro de seguimiento de la cátedra: "Máquinas Eléctricas, Jesús Fraile Mora" – Epígrafe 5.5.

### 6.4.1 FUNCIONAMIENTO DE UN ALTERNADOR EN UNA RED AISLADA

A continuación se presenta el esquema simplificado de un alternador que funciona aisladamente y está alimentando una carga trifásica equilibrada:



En la figura se destacan dos controles importantes: por un lado, el *regulador de tensión* que al variar la corriente de campo del generador permite controlar la tensión de salida; por otro lado, el motor primario que mueve el alternador (en este caso una turbina hidráulica), que lleva un *regulador de velocidad* que actúa sobre la entrada de agua, permitiendo con ello controlar la velocidad del grupo y por consiguiente, su frecuencia.

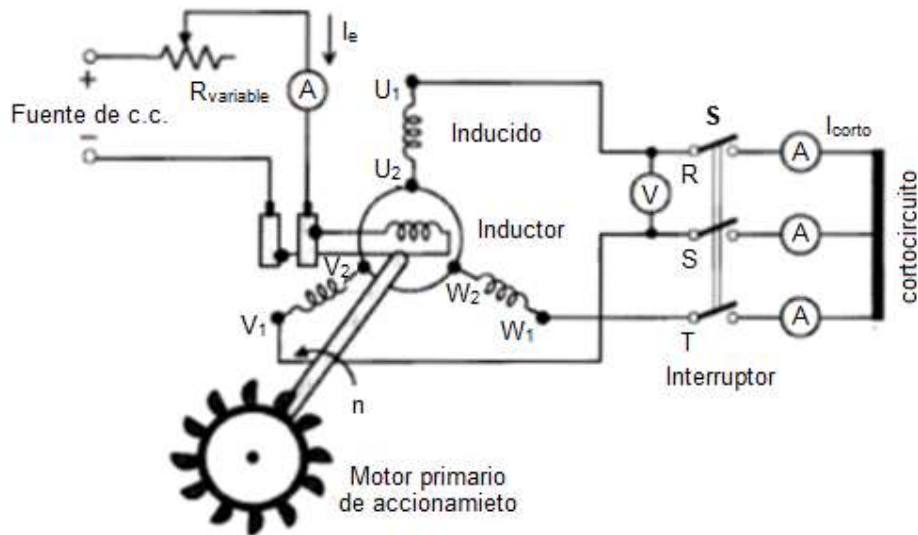
La potencia suministrada por el generador es la que solicita la carga. Cuando la carga demanda más potencia, el alternador reduce su velocidad. Esta disminución es detectada por el regulador de velocidad de la turbina (motor primario) que provoca una mayor apertura de entrada del agua, lo que hace aumentar la velocidad de giro del grupo hasta llegar al valor de consigna que impone la frecuencia de salida del generador. Cuando se ha alcanzado esta velocidad, la máquina sincrónica entrega al consumidor la nueva carga solicitada.

## 6.5 ENSAYOS CARACTERÍSTICOS

Como en el resto de las máquinas eléctricas estudiadas, para hallar los parámetros del circuito equivalente de la máquina sincrónica, se recurre a diferentes ensayos, a saber:

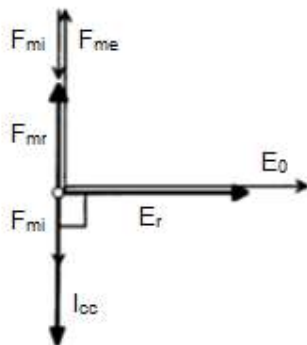
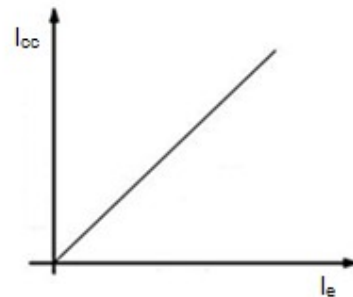
- **Ensayo de vacío:** mediante este ensayo se consigue la denominada *característica magnética* del generador, que no es otra cosa que la curva de

vacío del generador síncrono mencionada en el Punto 6.3.1 ( $E_0 = f(I_e)$ ). Se mueve a la máquina a la velocidad de sincronismo, dejando el interruptor S abierto (ver figura de abajo), por lo que  $I = 0$ . Se va incrementando desde cero el valor de la corriente de excitación  $I_e$  y se van midiendo simultáneamente ésta y la tensión de salida V.



- **Ensayo de cortocircuito:** se mueve el alternador a la velocidad de sincronismo, se mantiene el rotor desexcitado ( $I_e = 0$ ) y se cierra el interruptor S de la figura de arriba. Luego, se va elevando gradualmente la corriente de excitación hasta que los amperímetros del inducido lleguen al 130% de la corriente asignada.

Esto da lugar a una curva ( $I_{cc} = g(I_e)$ ) que se denomina *característica de cortocircuito* y es prácticamente una línea recta, debido a que en estas condiciones el circuito magnético no está saturado (flujo de excitación muy bajo):



Lo que sucede es que en cortocircuito, como se ve en el diagrama fasorial, al ser el circuito totalmente inductivo, la f.m.m. de reacción de inducido  $F_{mi}$  es totalmente desmagnetizante y se opone a la f.m.m. de excitación  $F_{me}$ , lo que provoca una  $F_{mr}$  final muy baja.

## 6.6 ACOPLAMIENTO DE UN ALTERNADOR A LA RED

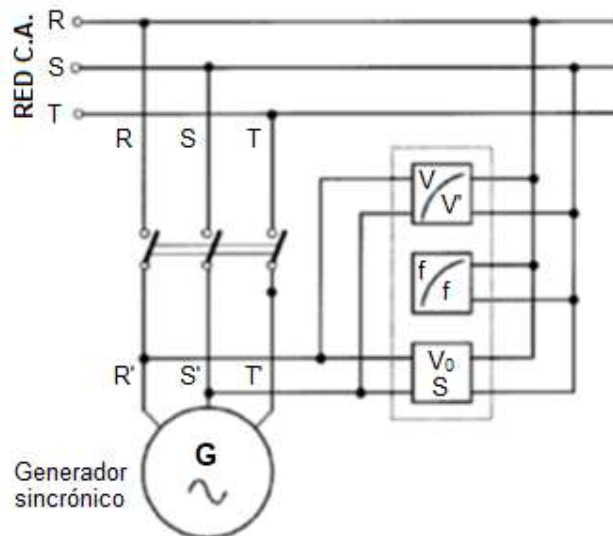
Por lo general, los generadores sincrónicos se sitúan al lado del lugar en que se encuentran las fuentes de energía primarias. Con objeto de aumentar el rendimiento y la fiabilidad del sistema, las diferentes centrales, que cuentan con varios alternadores, estarán conectadas entre sí en paralelo, por medio de líneas de transporte y distribución. La red así constituida representa un generador gigantesco en el que prácticamente *la tensión y la frecuencia se mantienen constantes*; y se la denomina **red de potencia infinita**, donde la introducción de un nuevo generador no alterará los parámetros básicos anteriores.

Acoplar en paralelo un alternador a la red implica una serie de operaciones complejas, las cuales exceden al curso, que constituyen la llamada *sincronización* de la máquina. Para que tal conexión se realice sin ninguna perturbación, se deben cumplir las siguientes condiciones:

- 1) La tensión del generador deber tener el mismo valor eficaz que la tensión de la red;
- 2) Las frecuencias de ambas tensiones deben ser iguales (frecuencímetro);
- 3) Las secuencias de fases del alternador y la red deber ser idénticas (secuencímetro); y
- 4) En el momento de la conexión sus fases deben coincidir.

Para verificar estas condiciones se emplean en la práctica unos aparatos denominados *sincronoscopios*.

En las modernas instalaciones, se emplean unas columnas de sincronización compuestas por un brazo saliente y giratorio del cuadro general de la central y compuestas por dos voltímetros (red y generador), dos frecuencímetros (red y generador), un voltímetro de cero y un sincronoscopio de aguja, como se muestra en la figura de la derecha:



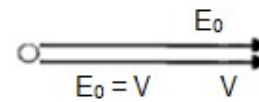
**Nota:** Para profundizar en el tema recurrir al libro de seguimiento de la cátedra: "*Máquinas Eléctricas*, Jesús Fraile Mora" – Epígrafe 5.10.

## 6.7 COMPORTAMIENTO DE UNA MÁQUINA SINCRÓNICA CONECTADA A UNA RED DE POTENCIA INFINITA

Una vez conectado el alternador a una red de potencia infinita, pasa a formar parte de un sistema que comprende centenares de otros alternadores que alimentan entre todos a millones de cargas. A diferencia de un generador que trabaja de manera aislada (analizado en el punto 6.4.1), aquí no se conoce la naturaleza de la carga que alimenta (grande o pequeña, resistiva o inductiva).

Por otro lado, el comportamiento de la máquina síncronica al regular la corriente de excitación y la velocidad del motor primario (para controlar la tensión de salida y la frecuencia, respectivamente), diferirá bastante de su comportamiento en una red de potencia infinita.

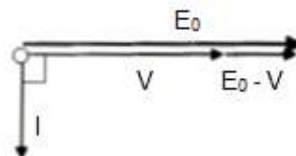
Como se dijo, al momento de acoplar la máquina en paralelo con la red, la misma produce una f.e.m.  $E_0$ , de igual magnitud y fase que la tensión  $V$  de la red. En ese instante, los fasores  $E_0$  y  $V$  son idénticos, y por tanto, no habrá circulación por el inducido del alternador, o sea, éste no suministra (ni recibe) potencia alguna; se dice entonces que trabaja en *modo flotante*.



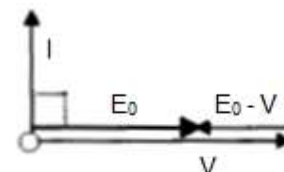
Partiendo de esta instancia inicial, veamos brevemente como afectan las diferentes regulaciones en el funcionamiento de la máquina.

### 6.7.1 EFECTOS DE LA VARIACIÓN DE EXCITACIÓN

Si se aumenta la corriente de excitación, aumentará la f.e.m. inducida  $E_0$ , que al ser superior a la tensión de red provocará una corriente de circulación por el inducido. Al predominar las reactancias del inducido sobre la resistencia (despreciable), esta corriente se retrasa respecto a la tensión resultante ( $E_0 - V$ ) un ángulo de  $90^\circ$ . Al ser inductiva pura, esta corriente produce un efecto desmagnetizante que tiende a reducir  $E_0$  para oponerse al aumento de la excitación. El alternador *entrega* a la red una potencia reactiva inductiva. El alternador está *sobreexcitado*. Contrariamente a lo que podría parecer, la máquina no absorbe ni cede potencia activa:  $V$  e  $I$  están en cuadratura:



En el caso inverso, al disminuir la corriente de excitación aparecerá una corriente adelantada  $90^\circ$  respecto a la tensión; esta corriente, al ser capacitiva pura produce un efecto magnetizante que tiende a aumentar  $E_0$  para oponerse a la reducción de excitación. El alternador *entrega* a la red una potencia reactiva capacitiva. La máquina funciona *subexcitada* y no absorbe potencia activa.



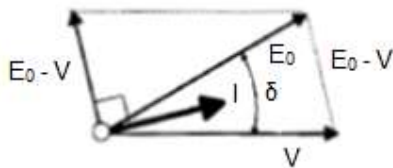
Este régimen de funcionamiento, en el que la máquina sincrónica no cede ni absorbe potencia activa, sino solo potencia reactiva de uno u otro signo, se conoce con el nombre de *compensador sincrónico*; trabajando como condensador si está sobreexcitado, y como bobina si funciona subexcitado.

### 6.7.2 EFECTOS DE LA VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR PRIMARIO

Es evidente que la potencia activa suministrada por una máquina sincrónica conectada a una red de potencia infinita procede de la potencia mecánica suministrada por la turbina.

Partiendo del modo flotante, la potencia eléctrica suministrada por el generador será igual a cero, lo que indica que la potencia mecánica de entrada será solo la necesaria para vencer las pérdidas del grupo.

Si en estas condiciones se abre la admisión de agua a la turbina (actuando sobre el regulador de velocidad), el rotor se acelerará como consecuencia del desequilibrio instantáneo provocado entre la potencia mecánica y la eléctrica. Esto hace que la f.e.m. generada se adelante a la tensión de la red un ángulo  $\delta$ , tal que la potencia activa de salida se equilibre con la potencia de entrada mecánica. Este desfase produce una tensión que provoca una corriente de circulación  $I$ , retrasada  $90^\circ$  respecto a la misma:



La potencia eléctrica cedida por el generador a la red será:

$$P = \frac{3E_0V}{X_s} \sin \delta$$

Se puede decir que la variación del regulador de velocidad de la turbina provoca un cambio en la potencia que entrega la máquina, que se ve reflejada físicamente como una modificación en el ángulo  $\delta$  que forma  $E_0$  con la tensión  $U$ , y se denomina ángulo de potencia.

Debe considerarse que al ser la red de potencia infinita, la *frecuencia es constante*, lo que indica que la velocidad del alternador no puede variar. Un cambio en el regulador de velocidad modifica solamente el ángulo  $\delta$  para equilibrar la potencia mecánica de entrada con la eléctrica de salida.

### 6.8 LA MÁQUINA COMO MOTOR SINCRÓNICO

Estando la máquina acoplada en paralelo a la red, trabajando en modo flotante, si se desconecta el motor primario (en el caso de turbinas hidráulicas se consigue cerrando la admisión de agua), el ángulo  $\delta$  se hará negativo, ya que entonces el rotor comienza a retrasarse respecto al flujo giratorio del estator, pero la máquina continuará girando sincrónicamente arrastrada por este campo rotativo. En estas condiciones, la corriente circulará en sentido contrario y la máquina comienza a funcionar como motor sincrónico, transformando la energía eléctrica absorbida de la red en energía mecánica en el eje.

La velocidad de giro del motor viene expresada por la relación:  $n = \frac{60f}{p}$  que es la de sincronismo de la red. Al ser constante la frecuencia de la red, la ecuación anterior significa que el motor sincrónico es una máquina que se mueve a una velocidad estrictamente constante.

### 6.8.1 ARRANQUE DEL MOTOR SINCRÓNICO DESDE EL REPOSO

Al conectar un motor sincrónico a la red, estando el mismo en reposo, el campo rotante creado por la armadura adquirirá instantáneamente la velocidad sincrónica, mientras que el campo del inductor estará fijo en el espacio. Esto da lugar a un par alternativo sobre el rotor, debido a las diferentes posiciones relativas entre ambos campos, cuyo valor medio resulta nulo, impidiendo así su arranque desde el reposo.

La posibilidad de que arranque por sí solo exigiría que el rotor se acelerara hasta alcanzar la velocidad sincrónica en el tiempo que el campo rotante se adelanta un paso polar. Debido a la inercia del rotor, esto no es posible partiendo del reposo, por lo que se debe recurrir a un proceso de arranque auxiliar que permita al rotor alcanzar previamente una velocidad próxima a la sincrónica.

Describiremos brevemente algunos de estos procesos:

#### a) Arranque por medio de un motor auxiliar (motor pony)

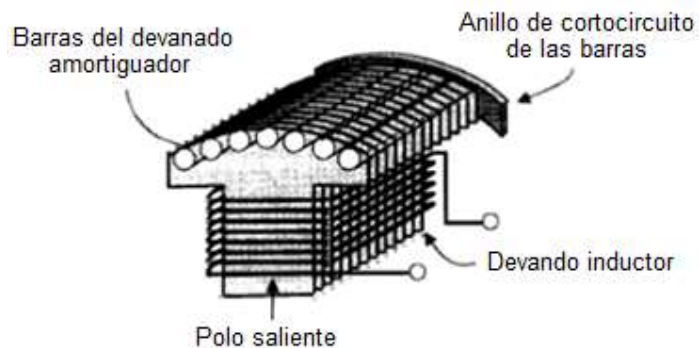
En los motores que pueden arrancar sin carga, la puesta en marcha se realiza por medio de un motor auxiliar o pony, que por lo general es un motor asincrónico con igual número de polos que el motor principal. De esta manera, se consigue una velocidad de rotación próxima a la de sincronismo y luego se conecta el motor a la red para lograr la sincronización. También se pueden emplear motores de corriente continua, los cuales tienen la ventaja de tener una precisa regulación de velocidad; o bien motores asincrónicos con un par de polos menos que el motor sincrónico, en cuyo caso la conexión a la red se efectúa una vez que se ha desconectado el motor auxiliar y el grupo para suavemente por la velocidad de sincronismo.

Este método es poco utilizado en los motores que deben arrancar con carga, ya que se requerirá de un motor auxiliar de potencia comparable al sincrónico, lo que resulta muy costoso.

#### b) Arranque como asincrónico

Este es un método más generalizado y práctico para la puesta en marcha de estos motores.

La máquina se arranca como motor de inducción, para lo cual se dispone de un arrollamiento en jaula de ardilla sobre los polos de la misma:



Durante el arranque como asincrónico, el devanado de la excitación deber estar cerrado sobre una resistencia óhmica cuya magnitud sea de 10 a 15 veces superior a la propia. De esta manera se evita que el campo giratorio induzca en él una f.e.m. muy elevada, lo que sería peligroso, pudiendo provocar la rotura del aislamiento. También sería un inconveniente cerrar el devanado en cortocircuito puesto que se crearía una elevada corriente monofásica que frenaría el rotor.

Así, el arranque del motor se puede realizar utilizando cualquiera de los métodos analizados en el Capítulo 5 - Máquinas de inducción. Una vez efectuada la puesta en marcha como asincrónico, cuando se obtiene una velocidad próxima a la de sincronismo, se conecta la c.c. al devanado de excitación; entonces se produce el acoplamiento del campo de excitación con el de armadura, girando el rotor a la velocidad de sincronismo. A este proceso se lo denomina *autosincronización* del motor.

Los motores sincrónicos se emplean, por su beneficio respecto al costo y rendimiento, en aquellas aplicaciones que necesitan velocidades bajas, inferiores a 500r.p.m., para cargas con conexión directa (sin engranajes de reducción); por ejemplo: molinos de cemento, papel, mezcladoras, en la propulsión eléctrica de buques, etc.

Los motores sincrónicos de pequeña potencia (inferiores a 1HP) para aplicaciones específicas, no utilizan c.c. para la excitación y su funcionamiento se basa en las diferentes composiciones del rotor. Estas máquinas, denominadas **máquinas especiales**, se analizarán en detalle en el Capítulo 8 de la materia.

**Nota:** generalmente, la jaula de ardilla colocada en estos motores y que aquí se utiliza para producir el arranque asincrónico, se coloca también en los generadores y recibe el nombre de **devanado amortiguador**, ya que reduce las oscilaciones que se producen en los procesos transitorios de las máquinas sincrónicas: acoplamiento a la red, variaciones bruscas de carga eléctrica o mecánica, etc. El efecto de estos devanados amortiguadores en régimen permanente es nulo, ya que al girar la máquina a la velocidad de sincronismo, no se inducen corrientes en los mismos.

**Nota 2 – Motor como compensador sincrónico:** Una vez en funcionamiento, mediante la regulación de la corriente de excitación el motor podrá trabajar en régimen de subexcitación o sobreexcitación, pudiendo regular su fdp; de esta forma, esta máquina puede cumplir la doble misión de arrastrar una carga mecánica y compensar la corriente reactiva de la red.