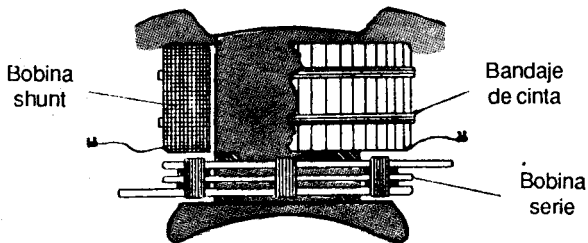


Capítulo 4

EL GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA EN REGIMEN ESTABLE

- 4.1 Formas de excitación
- 4.2 Circuitos equivalentes. Ecuaciones
- 4.3 Curvas características
- 4.4 Generadores en paralelo



EL GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA EN REGIMEN ESTABLE

En las centrales eléctricas modernas prácticamente se genera sólo energía eléctrica de corriente alterna trifásica. Una parte significativa de esta energía se usa en la misma forma de corriente alterna en la industria, comercio y residencias para fuerza y alumbrado.

En los casos en que por las condiciones de producción es necesaria o preferente la corriente continua (empresas de la industria química y metalúrgica, transporte o tracción eléctrica) ésta se obtiene, con más frecuencia, transformando la corriente alterna en continua con auxilio de convertidores estáticos. Los convertidores rotativos (un motor de corriente alterna se acopla en el mismo árbol con un generador de continua) están en desuso debido a su baja eficiencia.

En la actualidad, el campo de aplicación de los generadores de continua es bastante reducido. En los vehículos automotores el generador de continua, conocido antiguamente como dinamo o *dinamo*, ha sido sustituido eficazmente por el alternador. En las centrales eléctricas también ha sido desplazado por un pequeño generador síncrono con el inducido en el rotor que trabaja con un rectificador de diodos a la salida.

Si bien la aplicación del generador de continua es muy reducida, sin embargo, su estudio puede ser de interés para comprender mejor ciertos problemas y fenómenos que también se presentan en los generadores comunes de alterna.

El funcionamiento de un generador de cualquier tipo y, en particular, del generador de continua, se base en el proceso de transformación de la energía mecánica suministrada a éste en energía eléctrica. Para ello, el generador se acopla con algún motor primo, por ejemplo, con un motor de combustión interna, que lo pone en rotación con una velocidad ω .

Un laboratorio de Máquinas Eléctricas que cuente con máquinas de continua, permitirá hacerlas trabajar como generadores y someterlas a varias pruebas de ensayo con la finalidad de conseguir las curvas características de funcionamiento. Estos generadores pueden ser fácilmente accionados por motores eléctricos por acoplamiento directo.

4.1 FORMAS DE EXCITACION

El método de excitación, es decir, el modo de alimentar el bobinado inductor, da origen a una clasificación de los generadores de continua.

Así se tiene que los generadores de continua pueden ser de excitación

independiente o **separada** (requieren de una fuente exterior o de imanes para funcionar) y también de **excitación propia** o **autoexcitados** (para funcionar, no requieren de una fuente exterior).

Los generadores con excitación independiente pueden ser, a su vez, **generadores excitados por una fuente de corriente continua exterior** o **generadores con imanes permanentes** (caso de los megóhmetros de manivela o de las bicicletas). Puesto que los últimos son de poca importancia, en lo sucesivo, se tendrá en cuenta sólo los primeros.

Los generadores autoexcitados se dividen, atendiendo al método de conexión de los arrollamientos de excitación, en **generadores shunt, derivación** o **paralelo** (el circuito del campo se conecta en paralelo con el de la armadura), **generadores serie** (el embobinado del campo se conecta en serie con el de la armadura) y **generadores compound, mixto** o **compuesto** (llevan un embobinado de campo en paralelo y otro embobinado de campo en serie con el de la armadura, ambos ubicados en los mismos polos).

En la figura 4.1 se representan los esquemas principales de los generadores de excitación independiente, en derivación, en serie y de excitación compuesta. Estos esquemas de conexiones no incluyen los embobinados de conmutación ni de compensación.

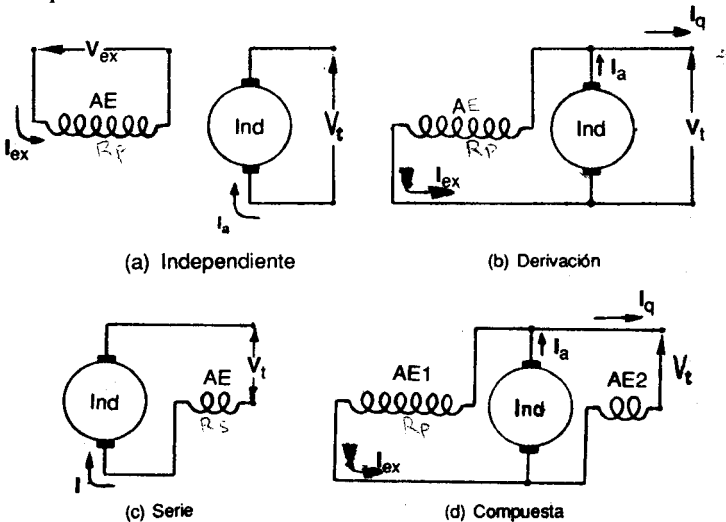


Fig. 4.1 Esquemas de principio de los generadores de corriente continua..

En la figura 4.1, Ind significa inducido; AE, arrollamiento de excitación; V_t y V_{ex} , las tensiones en los bornes del generador y del circuito de excitación, respectivamente; I_a , la corriente en la armadura o inducido; I_q , la corriente entregada por el generador a la red o a la carga, se llama, también corriente de línea; I_{ex} , la corriente de excitación.

En todos los casos, en la excitación del generador se consume el 1-3 % de su potencia nominal.

4.2 CIRCUITOS EQUIVALENTES. ECUACIONES

El funcionamiento de estado estable de un generador de continua se describe por su característica de carga.

Las caídas de tensión a causa de los efectos inductivos son despreciables debido a que, bajo las condiciones de estado estable, las corrientes son constantes o, a lo más, con una variación ligera.

Mientras que la inductancia propia de las bobinas de la armadura que están sufriendo una conmutación y la inductancia mutua entre estas bobinas y el resto del embobinado de la armadura influyen en la conmutación, sus efectos en las características de carga de las máquinas de continua convencionales es despreciable.

En el circuito equivalente de cada tipo de conexión se debe incluir algunos elementos de circuito que permitan representar o explicar los efectos de los componentes reales.

Así, por ejemplo, una bobina de campo participa del circuito equivalente con su resistencia propia, la cual podrá medirse con un ohmímetro en la práctica. En el circuito se dibuja la bobina que representa al campo pero se le asigna sólo su resistencia.

La bobina shunt se caracteriza por tener muchas espiras de alambre delgado por lo que se le dibuja alargada con varias espiras y su resistencia se designa con R_p . El valor de esta resistencia es relativamente alto (50, 100, 250 ohmios, por ejemplo) comparado con otras resistencias de la máquina.

La bobina serie se caracteriza por tener pocas espiras de alambre grueso por lo que se le dibuja corta, con dos o tres espiras, designándose su resistencia con R_s . Esta resistencia presenta un valor bastante pequeño (0.01, 0.5, 1.0 ohmios, por ejemplo).

Si se midiera con un ohmímetro, estando la máquina apagada, la resistencia entre los bornes de las escobillas, se obtendría aproximadamente el valor de la resistencia del bobinado de la armadura. Esta resistencia se designa por r_a y se dibuja en serie con el símbolo de la armadura, para indicar que en ella se produce una caída de tensión debido al paso de la corriente de armadura I_a . La resistencia de armadura presenta valores tan pequeños como los de una bobina serie.

Para ajustar el valor de la corriente de campo, I_{ex} en la bobina shunt, se acostumbra conectar en serie con dicho bobinado de campo un resistor ajustable, conocido con el nombre de **reóstato de campo** y que se denota por R_{ex} .

Los interpolos y embobinados de compensación, cuando existen, se consideran como parte del circuito de armadura y la resistencia de estos embobinados, así como la de las escobillas, se incluye en r_a .

Conviene recordar, ahora, dos expresiones de suma importancia para el análisis de estas máquinas. Una es la expresión de la f.e.m. inducida $E_a = K_a \cdot \phi_p \cdot \omega$ y la otra es la expresión del torque electromagnético o torque mecánico interno (T.m.i.) $T = K_a \cdot \phi_p \cdot I_a$.

Para simplificar, se supone que el circuito, magnético de la máquina es de carácter lineal y que, por lo tanto, el flujo ϕ_p es proporcional a la corriente de excitación I_{ex} , por lo que las expresiones de la f.e.m. inducida y el T.m.i.

$$E = K \cdot I_{ex} \cdot \omega$$

$$T = K \cdot I_{ex} \cdot I_a$$

donde K sería una constante que depende de la reluctancia del núcleo supuestamente constante y del número de vueltas por polo N_p .

La caída de tensión en las escobillas durante el trabajo con carga es del orden del 1.0 % de la tensión nominal en bornes V_t (nom), por lo que, a veces, no se considera en los cálculos.

4.2.1 Generadores con excitación independiente

Estos generadores son los más sencillos de estudiar porque en ellos la corriente de excitación I_p no depende de la tensión inducida E_a por el propio generador:

$$I_p = \frac{V_{ex}}{R_p + R_{ex}}$$

En la figura 4.2 se muestra el circuito equivalente de un generador de continua con excitación independiente.

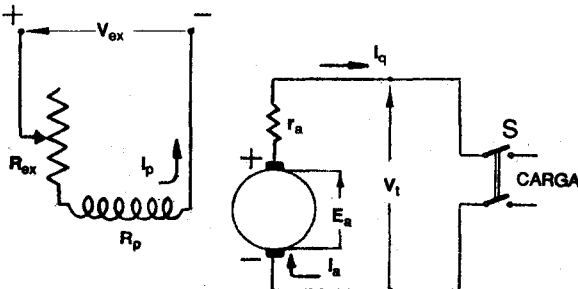


Fig. 4.2 Generador con excitación independiente.

Debido a que la corriente de campo I_p de estas máquinas es proporcionada por una fuente externa, la corriente de armadura I_a es igual a la corriente de carga I_q :

$$I_a = I_q$$

Aplicando la segunda ley de Kirchoff en el circuito de la armadura se cumple lo siguiente:

$$E_a = V_t + I_a \cdot r_a$$

Obsérvese que en el caso de generadores, $E_a > V_t$.

En vacío con el interruptor S abierto, se cumple que:

$$I_a = I_q = 0$$

y que:

$$V_t = E_a = K \cdot I_p \cdot \omega$$

En la figura 4.3 se muestra la curva característica en vacío $V_t - I_p$ del generador de continua con excitación independiente.

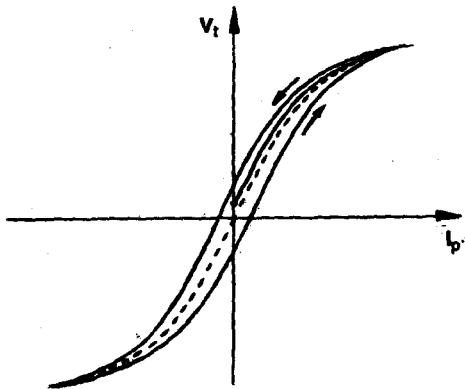


Fig. 4.3 Tensión de marcha en vacío en función de la corriente de excitación.

Como la velocidad ω del rotor es constante, V_t varía directamente con la corriente de excitación I_p y, de asumirse lineal el circuito magnético de la máquina, la curva de vacío sería una recta, en este caso, la denominada **línea del entrehierro**.

Cuando se ensaya una máquina real, la verdadera característica de vacío del generador es una curva, la denominada **curva de vacío del generador** y que tiene la misma forma de la curva de magnetización del circuito magnético del generador.

Obsérvese que, cuando la corriente de excitación es nula, en los bornes del generador aparece de todas maneras una pequeña tensión V_t . Esta tensión se llama **tensión remanente** y es, por ejemplo, de unos 6 voltios en un generador de 220 V.

En la solución de problemas de generadores de continua con carga, los valores de E_a que corresponden a cada I_p se toman directamente de esta curva.

Para una velocidad ω' distinta de ω se tiene otra curva de vacío, cuyos puntos se pueden encontrar para cada I_p a partir de la siguiente relación:

$$E_a' = E_a \frac{\omega'}{\omega}$$

En la figura 4.4 puede verse las curvas de vacío de un generador de continua para dos velocidades ω' y ω'' distintas de la velocidad ω de ensayo en vacío.

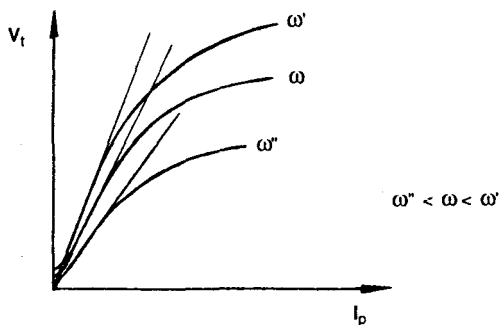


Fig. 4.4 Curvas de vacío de un generador de continua para diferentes velocidades.

4.2.2 Generadores autoexcitados

La autoexcitación es posible sólo mediante el magnetismo remanente. Es la excitación de la máquina por medio de una corriente que suministra ella misma o la misma red a la que va conectado el inducido.

Los polos del generador de continua son de material ferromagnético y adquieren su polaridad magnética cuando la bobina de excitación es alimentada por corriente continua. Cada vez que la bobina es desexcitada, desaparece su f.m.m., pero los polos, debido al magnetismo remanente propio de los materiales ferromagnéticos, mantienen una pequeña f.m.m. que no desaparece y que conserva su polaridad como si se tratase de un pequeño imán permanente.

Gracias a esta propiedad, los generadores de continua pueden proporcionar su propia excitación del campo a velocidad normal.

Considerando el trabajo del generador sin carga, para hacer crecer la tensión, desde la pequeña tensión remanente, es necesario que, en los generadores shunt y compound, se pongan en paralelo los circuitos de los bobinados de armadura y shunt, tal como lo sugieren las conexiones de los mismos, vistas desde un principio. El generador serie puede hacer crecer su tensión sólo bajo carga debido a que su corriente de carga es también la corriente de campo.

En la figura 4.5 puede verse los pasos fundamentales que explican el aumento de la tensión en los bornes del generador, considerando una conexión shunt.

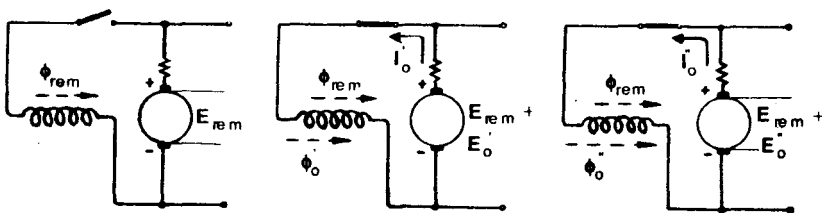


Fig. 4.5 Explicación gráfica del fenómeno de la autoexcitación en generadores de CC.

Para la excitación del generador es necesario que en éste exista un pequeño flujo remanente de magnetización Φ_{rem} (2-3 % del nominal).

Al cerrar el circuito de excitación (si se hace girar el generador con una velocidad nominal, por ejemplo, entonces, en sus terminales aparecerá una pequeña tensión remanente V_1 (rem) igual aproximadamente a un 2 - 3 % de la V_1 (nom)) por el circuito de excitación circulará una pequeña corriente que creará el flujo adicional de magnetización Φ_0 .

Dependiendo del sentido de la corriente en el arrollamiento de excitación, el flujo Φ_0 puede ser dirigido bien en sentido opuesto respecto del flujo remanente Φ_{rem} , o bien en el mismo sentido que éste.

El generador se puede autoexcitar sólo cuando los dos flujos están dirigidos en un mismo sentido, es decir, el proceso de autoexcitación del generador puede transcurrir sólo en un sentido, determinado por el sentido del flujo Φ_{rem} .

Si ambos flujos tienen un mismo sentido, el flujo resultante de excitación aumenta; esto conduce al aumento de la f.e.m. inducida en el inducido y, a su vez, provoca el aumento ulterior de la corriente y el flujo de excitación... y, así, sucesivamente.

En realidad, la tensión en los bornes se puede expresar en función de los dos circuitos en paralelo:

$$V_t = E_a + I_a \cdot r_a + d \lambda_a / dt \quad , \quad \lambda_a \text{ es el flujo concatenado con el embobinado de la armadura.}$$

$$V_t = K_a \cdot \phi_{rem} \cdot \omega + K \cdot I_p \cdot \omega + I_a \cdot r_a + d \lambda_a / dt$$

$$V_t = E_{rem} + K \cdot I_p \cdot \omega + I_a \cdot r_a + d \lambda_a / dt$$

y:

$$V_t = I_p (R_p + R_{ex}) + d \lambda_p / dt \quad , \quad \lambda_p \text{ es el flujo concatenado con la bobina de excitación}$$

Igualando las últimas expresiones, se deduce que la tensión en bornes V_t deja de crecer cuando:

$$I_p = \frac{E_{rem}}{R_p + R_{ex} - K \cdot \omega - r_a}$$

Suponiendo que el generador se arranca con $R_{ex} = 0$ y despreciando la resistencia de armadura por ser pequeña, se logra una forma más simple de esta expresión:

$$I_p = \frac{E_{rem}}{R_p - K \cdot \omega}$$

En la figura 4.6 se muestra las condiciones de autoexcitación de un generador shunt.

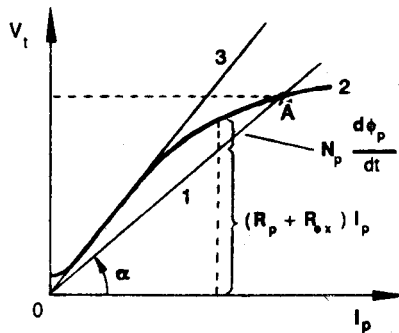


Fig. 4.6 El fenómeno de la autoexcitación en los generadores shunt en vacío.

Si $R_{ex} = \text{cte}$, entonces la caída de tensión $I_p (R_p + R_{ex})$ varía en forma directamente proporcional a la corriente de excitación I_p . Gráficamente, se

expresa por la recta 1 en la figura 4.6, que forma un ángulo α con el eje de las abscisas. Se cumple, además, que:

$$\operatorname{tg} \alpha \equiv I_p (R_p + R_{ex}) / I_p = R_p + R_{ex}$$

Por lo tanto, a cada valor de R_{ex} le corresponde una recta particular que parte del origen de coordenadas bajo un ángulo determinado por la última fórmula.

En la misma figura 4.6, la curva 2 representa la característica en vacío. Los segmentos de las ordenadas entre las curvas 2 y 1 dan la diferencia $d\lambda_p/dt$.

Como se sabe, el proceso finaliza cuando se cruzan las curvas 1 y 2. Así, pues, el valor estacionario de la corriente I_p queda determinado por el punto de intersección A de las curvas 1 y 2.

Si se aumenta la resistencia R_{ex} , o sea, el ángulo α , entonces el punto A se deslizará por la curva de vacío en dirección hacia el punto O. Para cierta resistencia R_{cr} , llamada **resistencia crítica**, la recta 1 será tangente a la parte inicial de la curva de vacío (la recta 3 en la figura 4.6). En estas condiciones, el generador, prácticamente, no se excita.

4.2.2.1 Generador shunt

En la figura 4.7 se muestra el circuito equivalente de un generador de continua con excitación shunt.

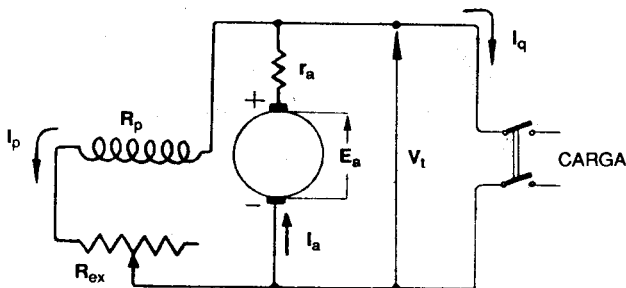


Fig. 4.7 Generador con excitación shunt.

Por aplicación de la ley de las corrientes en uno de los nudos del circuito, se cumple que la corriente de armadura I_a es igual a la suma de las corrientes de excitación I_p y de carga I_q :

$$I_a = I_p + I_q$$

La corriente de excitación I_p depende de la tensión en bornes V_t de la máquina:

$$I_p = \frac{V_t}{R_p + R_{cx}}$$

De la segunda ley de Kirchoff, en el circuito de la armadura, se cumple lo siguiente:

$$E_a = V_t + I_a \cdot r_a$$

En vacío se cumple que: $I_q = 0$

y que: $I_a = I_p$

Asimismo, se tiene que la tensión en los bornes V_t es, prácticamente, igual a la f.e.m. inducida E_a debido al pequeño valor de la caída de tensión en la resistencia de armadura r_a .

Dado que el generador shunt se autoexcita en un sólo sentido, entonces, también la curva de vacío de este generador puede ser trazada en un solo sentido. Véase la figura 4.8.

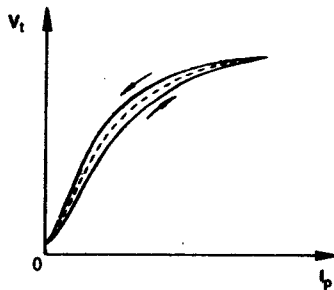


Fig. 4.8 Curva de vacío de un generador shunt.

Entre las curvas de vacío de los generadores de excitación independiente y excitación shunt no existe diferencia alguna esencial, puesto que la corriente de armadura $I_a = I_p$ que circula en el shunt no supera en más de 1 - 3 % la corriente nominal del generador y por eso no puede provocar una variación notable de la tensión en bornes V_t .

4.2.2.2 Generador serie

En la figura 4.9 puede verse el esquema de un generador serie.

En el generador de excitación serie se cumple que todas las corrientes son iguales:

$$I_a = I_{cx} = I_q = I$$

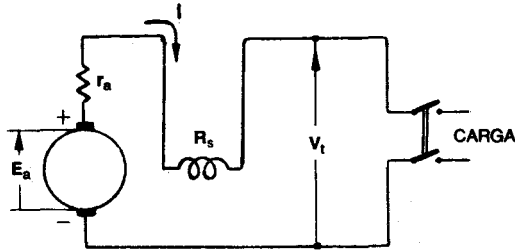


Fig. 4.9 El generador serie.

Dado que la tensión en bornes del generador serie varía bruscamente al variar la carga, en la práctica, este generador nunca se usó, sin embargo se le estudia debido a que permite explicar mejor el funcionamiento del generador compound.

En vacío, la característica del generador serie sería un punto en el eje de las ordenadas, es decir, el punto correspondiente a la tensión remanente.

Como se sabe, para que este generador pueda incrementar su tensión en bornes precisa que se le conecte una carga.

Cuando se le conecta una carga, se cumple lo siguiente, en el único circuito de la máquina:

$$E_a = V_t + I (r_a + R_s)$$

La única forma de trazar la curva de vacío del generador serie es conectándolo como un generador con excitación independiente. Véase la figura 4.2 y la figura 4.10.

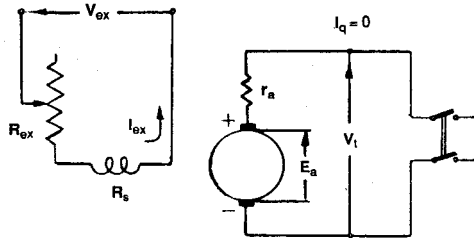


Fig. 4.10 Conexión del generador serie para obtener la curva de vacío.

4.2.2.3 El generador compound

Puesto que el generador de excitación compuesta tiene arrollamiento de excitación en derivación y en serie, reúne, en si, las características de los generadores de ambos tipos.

En la figura 4.11 puede verse la forma en que normalmente se disponen las bobinas serie y paralelo en los núcleos polares de estas máquinas.

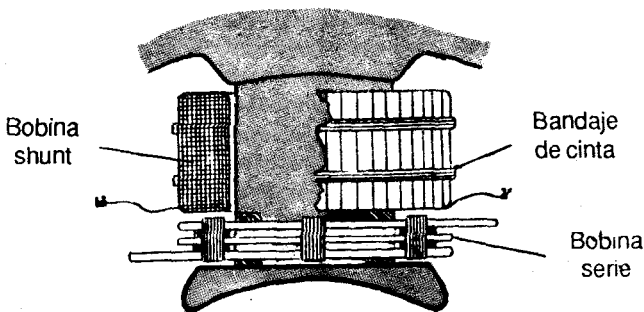


Fig. 4.11 Esquema constructivo de un polo de un generador compound.

La conexión de un generador compound puede ser ejecutada con shunt corto, como se muestra con línea continua en la figura 4.12 o, con shunt largo, como se muestra en el mismo esquema con línea de trazos.

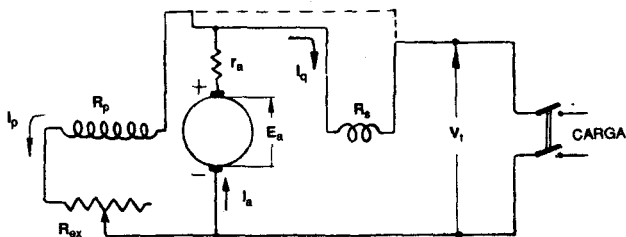


Fig. 4.12 Esquema de un generador de excitación compuesta.

Entre ambas conexiones no existe, prácticamente, ninguna diferencia ya que la resistencia del arrollamiento serie y correspondientemente la caída de tensión en sus bornes son bastante pequeñas.

Los arrollamientos de excitación se pueden conectar en un mismo sentido (generador compound acumulativo), es decir, de tal modo, que sus f.m.m.s se sumen. Como consecuencia de esto, al aumentar la carga, el flujo aumenta y también la f.e.m. generada.

En este caso, el papel principal lo desempeña el arrollamiento en derivación, mientras que el arrollamiento en serie tiene la finalidad de compensar la f.m.m. de la reacción del inducido a una carga determinada.

De este modo se logra la regulación automática de la tensión en bornes en determinados límites de la corriente de carga.

La conexión en sentidos opuestos de los arrollamientos de excitación (generador compound sustractivo) se emplea en esquemas especiales, por ejemplo, en algunos tipos de generadores para soldadura.

Como la f.m.m. equivalente F_{eq} depende de las f.m.m.s de los bobinados

shunt F_p y serie F_s , cuyos respectivos números de espiras por polo son N_p y N_s , se tiene la siguiente expresión:

$$F_{cq} = F_p \pm F_s$$

$$F_{cq} = N_p \cdot I_p \pm N_s \cdot I_s$$

Convenga expresar la f.m.m. equivalente en términos de la bobina shunt con el fin de poder utilizar la curva de vacío del generador con excitación independiente en la solución de problemas del generador compuesto. Así, se tiene lo siguiente:

$$N_p \cdot I_{cq} = N_p \cdot I_p \pm N_s \cdot I_s$$

y de aquí se deduce que la corriente equivalente I_{cq} es igual a:

$$I_{cq} = I_p \pm \frac{N_s}{N_p} I_s$$

En esta expresión se cumple que la corriente de excitación shunt I_p , para el caso de conexión larga, es igual a:

$$I_p = \frac{V_t}{R_p + R_{cx}}$$

y que la corriente de excitación serie I_s es igual a:

$$I_s = I_a$$

$$I_s = I_p + I_q$$

De modo que la corriente de excitación equivalente I_{cq} no es ninguna corriente circulando por alguna rama del circuito del generador.

Cuando esta corriente I_{cq} ha sido hallada partiendo de la expresión de arriba, se puede afirmar que la f.e.m. inducida E_a es producida por dicha corriente.

Para encontrar el valor de esta E_a se debe recurrir a la curva de vacío del generador funcionando con excitación independiente, a donde se ingresa con el valor calculado de I_{cq} .

Conociendo las características de los generadores shunt y serie, es fácil explicar las características del generador compuesto. Así, por ejemplo, la curva de vacío del generador compuesto, para $I_q = 0$ y $\omega = \text{constante}$, no se diferencia en nada de la correspondiente curva del generador shunt, ya que, en este caso, la corriente I_s es pequeña e igual a I_a y a I_p .

4.3 CURVAS CARACTERISTICAS

Las propiedades de los generadores se analizan con ayuda de las características que establecen la dependencia entre las magnitudes principales que determinan el funcionamiento del generador.

Tales magnitudes son:

- la tensión en los terminales del generador V_t ;
- la corriente de excitación I_{ex} ;
- la corriente de armadura I_a ; y
- la velocidad de rotación ω .

Puesto que los generadores funcionan, por lo general, con velocidad de rotación constante, el grupo fundamental de características se obtiene para ω constante.

De las otras tres magnitudes, la que mayor importancia tiene es la tensión V_t , por cuanto determina las cualidades del generador respecto a la red para la cual éste funciona.

Por esta razón, las características principales son:

1. La curva de carga $V_t - I_{ex}$, para I_q constante. En el caso particular, cuando $I_q = 0$, la curva de carga pasa a ser la curva de vacío, que tiene gran importancia en la evaluación del generador.
2. La curva de características exteriores $V_t - I_q$, para I_{ex} constante.
3. La curva de regulación $I_{ex} - I_q$, para V_t constante. En el caso particular, cuando $V_t = 0$, la curva de regulación pasa a ser la curva de cortocircuito.

Se examinará las características de los generadores para cada método de excitación. En realidad, se trata de mostrar la curva real capaz de ser obtenida haciendo el ensayo respectivo en el laboratorio.

Al mismo tiempo, se mostrará, con la ayuda de sucesivas expresiones, el método analítico que se puede seguir para llegar a la ecuación aproximada de las diferentes curvas. Este método se basa en el conocimiento de las distintas relaciones encontradas en el subcapítulo 4.2 para cada tipo de generador.

En el método analítico, se parte del supuesto que el circuito magnético tiene comportamiento lineal, de modo que las ecuaciones de las curvas obtenidas pertenecen a líneas rectas.

4.3.1 Curvas características de un generador con excitación independiente

En la figura 4.12 puede verse un esquema para el trazado de las curvas características de un generador de excitación independiente.

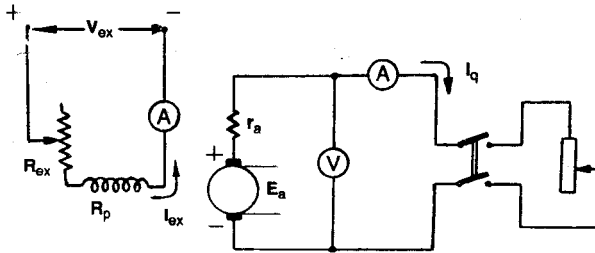


Fig. 4.12 Conexión del generador de continua con excitación independiente.

4.3.1.1 La curva de carga ($I_q = \text{cte.}$)

Partiendo de la expresión de la tensión en bornes V_t se tiene lo siguiente:

$$V_t = E_a - I_q \cdot r_a$$

$$V_t = E_{rem} + K \cdot I_{ex} \cdot \omega - I_q \cdot r_a$$

$$V_t = V_t (\text{vacío}) - I_q \cdot r_a$$

De la última expresión se deduce que las curvas de carga, suponiendo despreciable la reacción de armadura, se pueden obtener restando de la curva de vacío el producto $I_q \cdot r_a$, que es constante, tal como se ve en la figura 4.13.

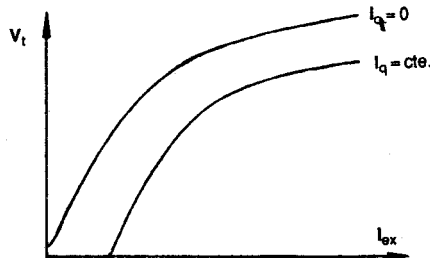


Fig. 4.13 Curvas de carga y de vacío de un generador con excitación independiente.

La ecuación obtenida puede quedar como la ecuación de una recta si se pone en la siguiente forma:

$$\boxed{V_t} = (E_{rem} - I_q \cdot r_a) + K \cdot \omega \cdot \boxed{I_{ex}}$$

De particular importancia es la curva de vacío de un generador con excitación independiente. Un ejemplo de estas curvas se muestra en las figuras 4.3 y 4.14.

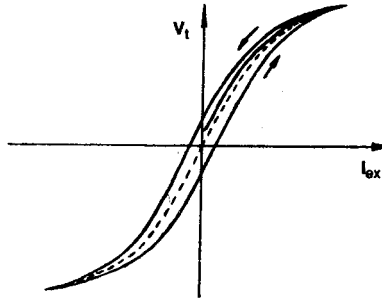


Fig. 4.14 Curva característica de marcha en vacío de un generador con excitación independiente.

Obsérvese que, en esta conexión del generador, es posible invertir la polaridad del campo inductor (invirtiendo el sentido de la corriente de la bobina del estator) obteniendo de esta manera el lazo de histéresis del circuito magnético de la máquina.

Como curva de vacío se suele tomar la curva media en línea de trazos.

Nótese que, cuando $I_q = 0$, se obtiene la curva de vacío:

$$V_t = V_t(\text{vacío})$$

4.3.1.2 La curva de características exteriores ($I_{cx} = \text{Cte.}$)

Si la corriente de excitación permanece constante, la expresión de la tensión en bornes queda reducida a la siguiente:

$$V_t = (E_{rem} + K \cdot I_{cx} \cdot \omega) - r_a \cdot I_q$$

que es la ecuación de una recta con una pendiente negativa muy pequeña, por ser r_a bastante pequeña.

En vacío, se cumple que:

$$V_t = E_a = E_{rem} + K \cdot I_{cx} \cdot \omega$$

En la figura 4.15 puede verse la curva de características exteriores de un generador con excitación independiente.

Para trazar esta curva, se pone el generador en rotación con velocidad nominal y se establece una corriente de excitación I_{cx} tal, que para una corriente $I_q = I_{nom}$, se tenga $V_t = V_{nom}$.

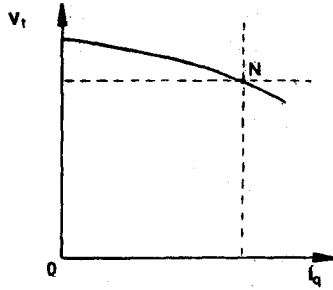


Fig. 4.15 Característica exterior de un generador con excitación independiente.

Luego se descarga gradualmente hasta la marcha en vacío, inclusive. La tensión del generador crece según la curva mostrada, ya que, a medida que disminuye la carga, disminuye la caída de tensión en el inducido.

4.3.1.3 La curva de regulación ($V_t = \text{Cte.}$)

Puesto que, para $I_{ex} = \text{cte.}$, la tensión en bornes V_t del generador disminuye con el aumento de la corriente de carga I_q y viceversa, véase la figura 4.15; entonces, para mantener constante la magnitud de la tensión en bornes V_t es necesario aumentar la corriente de excitación al aumentar la carga y disminuirla al disminuir esta última.

En el primer caso, se actúa por la parte ascendente de la curva de magnetización (véase la figura 4.14); en el segundo caso, por la parte descendente.

En correspondencia con esto, la curva de regulación tiene la forma mostrada en la figura 4.16. La curva media, trazada con línea de trazos entre las partes ascendente y descendente, se cuenta como característica práctica de regulación.

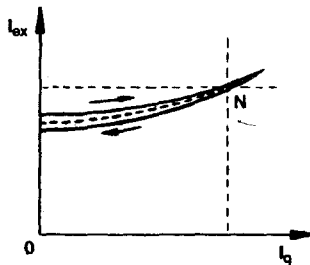


Fig. 4.16 Característica de regulación de un generador de excitación independiente.

Para encontrar una expresión aproximada de esta curva se parte, como siempre, de la expresión de V_t y se trata de poner la corriente de excitación I_{ex} en función de la corriente de carga I_q :

$$I_{ex} = \frac{V_t - E_{rem} + I_q \cdot r_a}{K \cdot \omega}$$

$$I_{ex} = (V_t - E_{rem}) / K \cdot \omega + (r_a / K \cdot \omega) I_q$$

que es la ecuación de una recta con una pendiente positiva, relativamente pequeña.

Para trazar la curva de cortocircuito, se pone el generador en rotación con la velocidad nominal y se conecta el circuito del inducido sólo con un amperímetro.

4.3.2 Curvas características de un generador con excitación shunt

El modo de hacer las conexiones del generador shunt para efectuar los ensayos se representará en la figura 4.17.

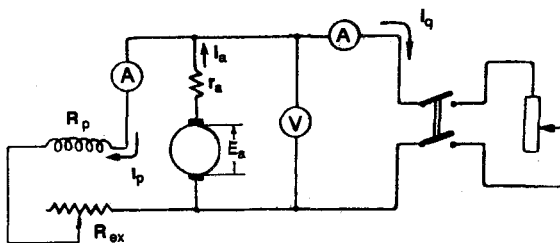


Fig. 4.17 Forma de conectar el generador shunt.

4.3.2.1 La curva de carga ($I_q = cte.$)

La tensión en bornes V_t es igual a:

$$V_t = E_a - I_a \cdot r_a$$

$$V_t = E_{rem} + K \cdot I_p \cdot \omega - I_a \cdot r_a$$

$$V_t = E_{rem} + K \cdot I_p \cdot \omega - (I_p + I_q) r_a$$

$$V_t = (E_{rem} - I_q \cdot r_a) + (K \cdot \omega - r_a) I_p$$

En la figura 4.18 se puede ver la forma de esta curva lograda en el laboratorio.

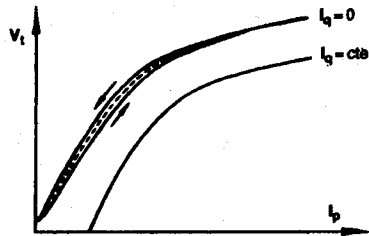


Fig. 4.18 Curvas de carga y de vacío de un generador shunt.

La última ecuación tiene la forma de una recta, que si se le compara con la del generador con excitación independiente, la del shunt quedaría un poco más abajo por tener una menor pendiente.

Nótese que, cuando $I_q = 0$, se obtiene la curva de vacío.

4.3.2.2 La curva de características exteriores ($I_p = \text{cte.}$)

En la ecuación de la tensión V_t , puede ponerse ésta como función de la corriente I_q , suponiendo que $R_{ex} = \text{cte.}$, de la siguiente forma:

$$V_t = E_{rem} + (K \cdot \omega - r_a) I_p - r_a \cdot I_q$$

$$V_t = E_{rem} + (K \cdot \omega - r_a) \frac{V_t}{R_p + R_{ex}} - r_a \cdot I_q$$

y de aquí, despejando V_t , queda:

$$\boxed{V_t} = \frac{E_{rem}}{1 - \frac{K \cdot \omega - r_a}{R_p + R_{ex}}} - \frac{r_a}{1 - \frac{K \cdot \omega - r_a}{R_p + R_{ex}}} \boxed{I_q}$$

Esta es la ecuación de una recta que pasa por debajo de la respectiva curva del generador con excitación independiente, pues la pendiente es más negativa.

Para comparar, véase la ecuación correspondiente del generador de excitación independiente.

En la figura 4.19 se muestra la curva de características exteriores de un generador shunt.

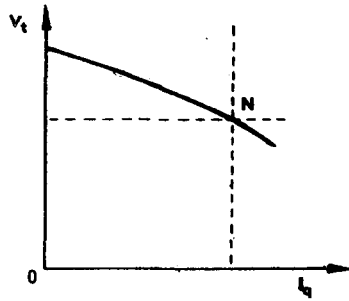


Fig. 4.19 Curva de características exteriores del generador shunt.

4.3.2.3 La curva de regulación ($V_t = \text{cte.}$)

La curva de regulación de un generador shunt tiene la forma mostrada en la figura 4.20

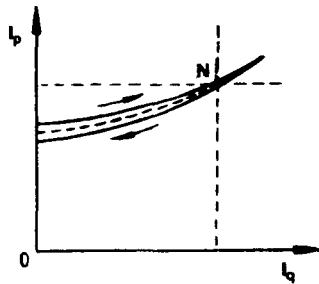


Fig. 4.20 Curva de regulación del generador shunt.

La expresión aproximada de esta curva se logra poniendo la corriente de excitación I_p en función de la corriente de carga I_q :

$$I_p = \frac{V_t - E_{rcm} + I_q \cdot r_a}{K \cdot \omega - r_a}$$

y de aquí:

$$I_p = \frac{V_t - E_{rcm}}{K \cdot \omega - r_a} + \frac{r_a}{K \cdot \omega - r_a} I_q$$

Se observa que la pendiente de esta recta es mayor que la de un generador con excitación independiente.

4.3.3 Curvas características de un generador con excitación serie

Para ensayar el generador serie, los instrumentos de medición y demás elementos del circuito se colocan según se ve en la figura 4.21.

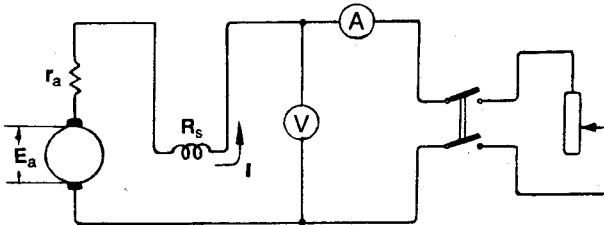


Fig. 4.21 Conexión del generador serie para ser ensayado.

El único ensayo que puede realizarse con este generador conectado en serie es uno que se puede considerar como de características exteriores, a pesar de que la corriente de excitación no es constante.

En el circuito de este generador se cumple, por la ley de las tensiones, lo siguiente:

$$E_a = V_t + (r_a + R_s) I$$

$$V_t = E_a - (r_a + R_s) I$$

$$V_t = E_{rem} + K \cdot I \cdot \omega - (r_a + R_s) I$$

$$\boxed{V_t} = E_{rem} + (K \cdot \omega - r_a - R_s) \boxed{I}$$

que es la ecuación de una recta de pendiente positiva.

La forma de la curva de $V_t - I$ obtenida en el laboratorio se muestra en la figura 4.22.

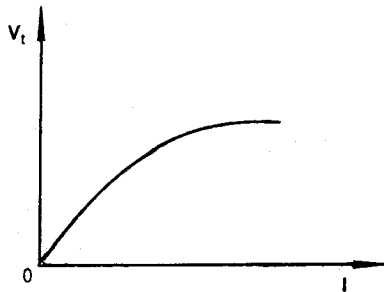


Fig. 4.22 Curva característica del generador serie.

4.3.4 Curvas características de un generador con excitación compuesta

En la figura 4.23 se puede apreciar el esquema para el trazado de las curvas características de un generador compound.

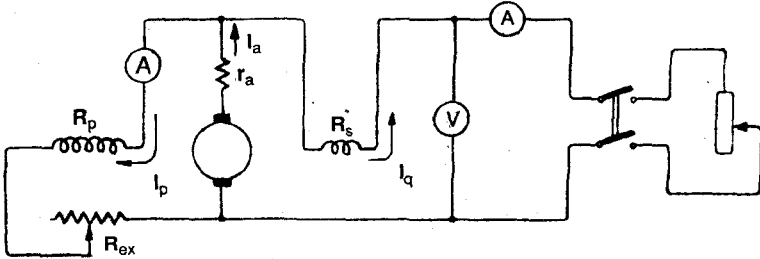


Fig. 4.23 Conexión del generador compound.

Conociendo las características de los generadores shunt y serie, es fácil explicar las del generador compound.

4.3.4.1 La curva de carga ($I_q = \text{cte.}$)

La curva de carga del generador compound tiene la misma forma que la respectiva característica del generador shunt, pero si el arrollamiento serie es lo suficientemente fuerte, estas curvas pueden estar situadas por encima de la curva de vacío, tal como se ve en la figura 4.24.

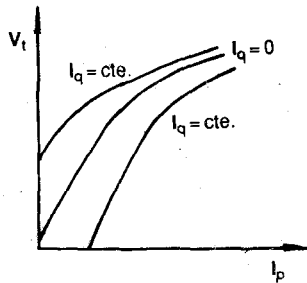


Fig. 4.24 Curva de carga de un generador de excitación compound.

4.3.4.2 La curva de características exteriores ($I_p = \text{cte.}$)

En la figura 4.25 puede verse la curva de características exteriores de un generador compound la cual no se diferencia mucho de la curva correspondiente de un generador shunt.

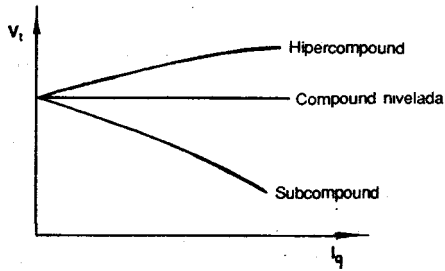


Fig. 4.25 Curva de características exteriores de un generador compound.

Para tener la posibilidad de mantener una tensión constante en los terminales de los receptores de energía eléctrica, hay que compensar la caída de tensión en la línea eléctrica.

En este caso se amplifica el arrollamiento serie de tal modo, que la curva de características exteriores tenga la forma de la curva superior representada en la figura 4.25.

Cuando los arrollamientos de excitación se conectan en oposición, la curva de características exteriores se obtiene del mismo modo que en el generador shunt. Véase la curva inferior de la figura 4.25

4.4 GENERADORES EN PARALELO

En las centrales y subestaciones de conversión de corriente continua, habitualmente se instalaba varios grupos de corriente continua con el fin de disponer de la reserva necesaria y, en el caso de carga variable, asegurar el funcionamiento de los grupos en las condiciones más favorables para los mismos.

Para el funcionamiento conjunto de los generadores de continua, es posible conectarlos en paralelo, conectando entre sí los puntos de potenciales de la misma polaridad.

4.4.1 Acoplamiento para el funcionamiento en paralelo

Para operar dos generadores de corriente continua en paralelo, según el circuito mostrado en la figura 4.26, se debería seguir los pasos que se muestra en la figura 4.26, suponiendo que el generador I se encuentra ya suministrando corriente a las barras, creando en éstas una tensión V_t .

Para conectar a las mismas barras el generador II, hay que observar dos condiciones, a saber:

- los terminales + y - del generador que se conecta se deben acoplar con los bornes del mismo signo de las barras colectoras;
- la f.e.m. del generador que se conecta debe ser prácticamente igual a la tensión V_t

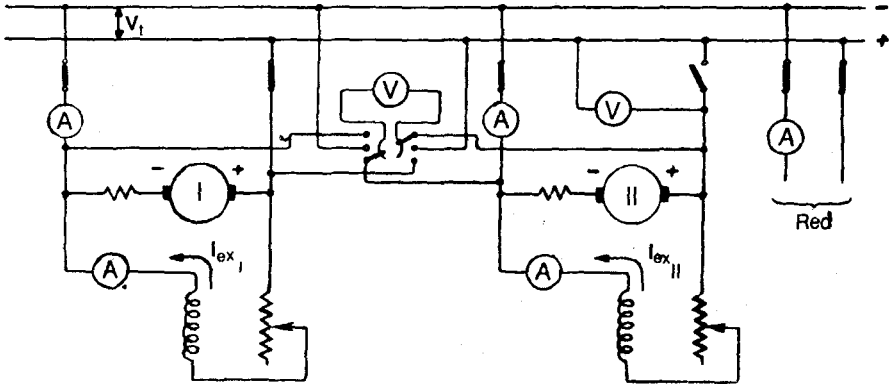


Fig. 4.26 Esquema del funcionamiento en paralelo de generadores shunt

Para cumplir estas condiciones se procede de la siguiente manera:

1. Se hace girar el generador **II** hasta su velocidad nominal.
2. Sin excitar el generador **II**, se cierra uno de sus interruptores, por ejemplo, el izquierdo.
3. Se conecta un voltímetro al interruptor derecho, que permanece desconectado. Este mide la tensión V_t (se desprecia la influencia del flujo remanente del generador **II**).
4. Se comienza a excitar el generador **II** y se comprueba con el voltímetro. Si su polaridad no coincide con la polaridad de las barras (ambos generadores están acoplados en serie), el voltímetro indicará la suma $V_t + E_a(\text{II})$. En este caso, no se pueden conectar los generadores a las barras, puesto que esto correspondería al cortocircuito de ambas máquinas. Por el contrario, si la polaridad del generador que se acopla coincide con la polaridad de las barras, entonces, el voltímetro comenzará a disminuir sus indicaciones, indicando la diferencia $V_t - E_a(\text{II})$.
5. Cuando esta diferencia se haga igual a cero, se podrá cerrar el interruptor derecho y con ello conectar el generador **II** a las barras. Si la f.e.m.

E_a (II) del generador II es exactamente igual a la tensión de la red V_t , entonces, la corriente del generador II será igual a cero.

6. Para dar carga al generador II hay que aumentar la potencia mecánica suministrada a éste por el motor primo. Esto se puede lograr de dos maneras: actuando directamente sobre el regulador de velocidad del motor primo del generador y con ello aumentando su velocidad de rotación, o aumentando la corriente de excitación I_{ex} (II) del generador II, reduciendo la resistencia de campo. Los amperímetros indicarán la carga que van tomando ambos generadores.

No es necesario que los generadores tengan la misma potencia nominal. La repartición de carga se hará automáticamente según las características externas de los generadores.

En el ejemplo mostrado en la figura 4.27, cuando la tensión en las barras sea de 125 V, los porcentajes de carga serán de 50 % y 75 % de la potencia nominal.

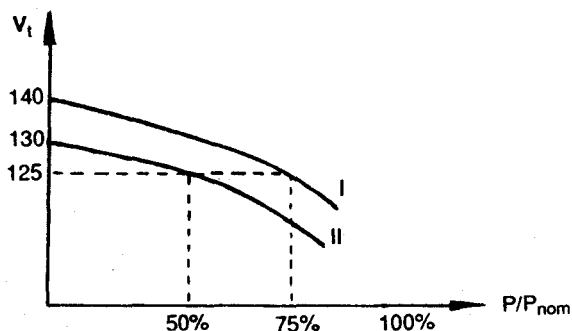


Fig. 4.27 Curvas de características externas de dos generadores acoplados en paralelo.

Si se excita más cualquiera de las máquinas, ésta elevará su f.e.m.; su curva característica subiría y tomaría, entonces, un porcentaje de carga mayor.

Cuando se trata de generadores compound, se requiere de una barra equalizadora que conecte las bobinas serie, para evitar que éstas aumenten la tensión interna del generador, al aumentar la carga, lo que produciría un efecto acumulativo que haría pasar toda la carga a ese generador. Véase la figura 4.28, en la pág. 86.

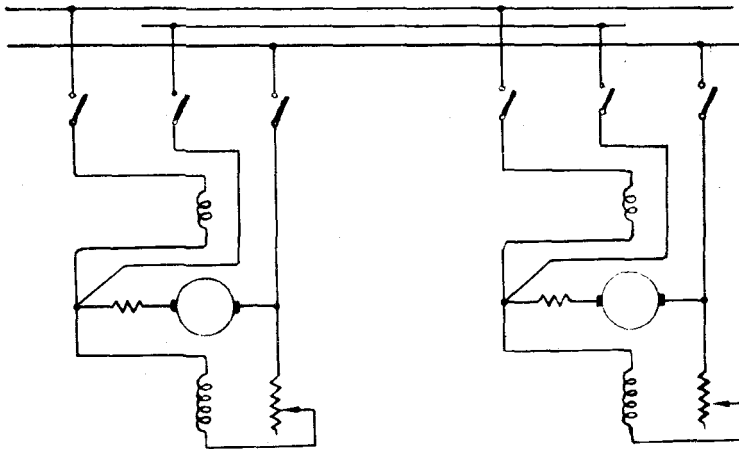


Figura 4.28 Generadores compound en paralelo