

## GENERADOR SÍNCRONO DE FUNCIONAMIENTO AISLADO

El comportamiento de un generador síncrono bajo carga varía enormemente, dependiendo del factor de potencia de la carga y de si el generador está funcionando solo o en paralelo con otros generadores síncronos que funcionan aisladamente. A lo largo de esta sección, los conceptos se ilustrarán con diagramas fasoriales simplificados, despreciando el efecto de  $R_A$ . En algunos de los ejemplos numéricos, la resistencia  $R_A$  sí será incluida.

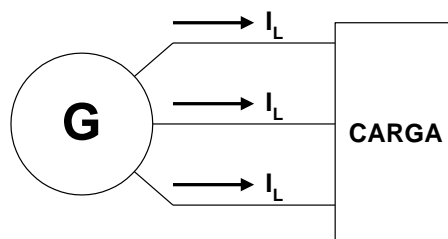
A menos que se exprese lo contrario, en esta sección se supondrá que la velocidad de los generadores es constante y todas las características terminales se trazarán suponiendo constante la velocidad. También el flujo del rotor del generador se supone constante, a menos que su corriente de campo se cambie explícitamente. Efecto de los cambios de carga sobre un generador síncrono que funcione aisladamente

Un incremento en la carga, incrementa la corriente de carga obtenida del generador. Como la resistencia de campo no ha sido modificada, la corriente de campo es constante y por consiguiente el flujo  $\phi$  es constante. Puesto que el motor primario también conserva una velocidad constante  $\omega$ , la magnitud del voltaje generado internamente  $E_{gp\phi} = K\phi\omega$  es constante. Si  $E_{gp\phi}$  es constante, entonces, ¿qué varía al modificarse la carga? La manera de averiguarlo es elaborando un diagrama fasorial que muestre un aumento en la carga teniendo en cuenta las limitaciones del generador.

Primero, examinaremos el generador que funciona con un factor atrasado de potencia: Si se aumenta la carga con el mismo factor de potencia, entonces  $|I_A|$  se incrementa, pero permanece en el mismo ángulo  $\theta$  con relación a  $V_{tp}$ , como estaba anteriormente. Entonces, la tensión de reacción del inducido  $jX_s I_A$  es mayor que antes, pero con el mismo ángulo. Ahora, puesto que:

$$E_{gp} = U_{tp} + jX_s I_A$$

$jX_s I_A$  se debe localizar entre  $V$  en un ángulo de  $0^\circ$  y  $E_{gr}$ , el cual está limitado a tener la misma magnitud, que antes del aumento de carga. Si se elabora una gráfica de estas limitaciones en un diagrama fasorial, hay solamente un punto en el cual la reacción del inducido puede ser paralela a su posición original cuando aumenta de tamaño.

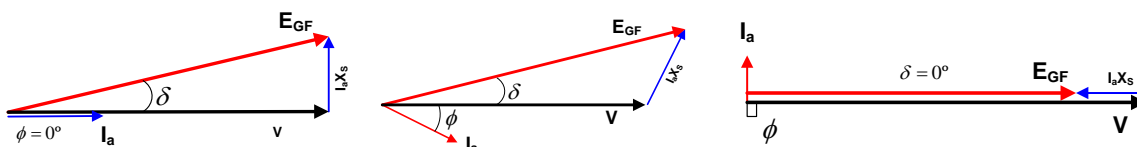


**Generador que alimenta una carga**

Si se observan detenidamente las limitaciones, entonces se podrá ver que mientras aumenta la carga, el voltaje  $V_{tp}$  disminuye drásticamente.

Ahora, si se supone que el generador está cargado con cargas de factor de potencia unitario, ¿qué sucede si se añaden nuevas cargas con el mismo factor de potencia? Con las mismas limitaciones de antes, se puede ver que en esta oportunidad  $V$  sólo disminuye ligeramente. Finalmente, supongamos al generador con carga de factor de potencia en adelanto: si se agregan nuevas cargas con el mismo factor de potencia en esta ocasión la tensión de la reacción del inducido permanece por fuera de su valor previo y  $V$  sube. En este último caso, un aumento en la carga del generador produjo un aumento en la tensión de los bornes, tal resultado no es algo que pueda esperarse, si sólo nos basamos en la intuición. Las consideraciones generales de este estudio sobre el comportamiento de los generadores sincrónicos son:

- Si se agregan cargas en atraso (+ Q o cargas inductivas de potencia reactiva) a un generador,  $V$  y la tensión en los bornes  $V$  disminuye significativamente.
- Si se agregan cargas con factor de potencia unitario (no potencia reactiva) a un generador, hay una ligera disminución en  $V$  y en la tensión de los terminales.



En la figura se observa el efecto del aumento de las cargas de un generador con factor de potencia constante sobre la tensión en sus terminales: Factor de potencia unitaria, Factor de potencia en atraso y Factor de potencia en adelanto.

- Si se agregan cargas en adelanto (-Q o cargas de potencia reactiva capacitiva) a un generador  $V$  se elevará. Una forma apropiada de comparar el comportamiento de la tensión de dos generadores es por medio de su regulación de voltaje.

Un generador síncrono que funciona con un factor de potencia en atraso tiene una regulación de voltaje positiva, bastante elevada; trabajando con un factor de potencia unitaria, tiene una baja regulación de voltaje positiva y funcionando con un factor de potencia en adelanto, con frecuencia tiene una regulación de voltaje negativa. Normalmente, es preferible mantener constante la tensión que se suministra a una carga aunque la carga en sí se modifique. ¿Cómo y para qué se pueden corregir las variaciones de tensión en los bornes? La manera más obvia sería variar la magnitud de  $E_{gf}$ , para compensar los cambios en la carga. Recuérdese que  $E_{gp}$  debe controlarse variando el flujo de la máquina.

Por ejemplo, supongamos que a un generador se le aumenta una carga en atraso; entonces el voltaje en los terminales caerá, tal como se mostró anteriormente. Para restablecerlo a su nivel previo, se disminuye la resistencia de campo  $R_F$ . Si  $R_F$  se disminuye, la corriente de campo aumentará y un incremento en  $I_F$ , crecerá el flujo, que a su vez elevará  $E_{gfr}$ , lo cual, finalmente, aumentarán las tensiones de fase y terminales. Esta idea se puede resumir en la siguiente forma:

- Al disminuir la resistencia de campo, aumenta la corriente de campo del generador.

- Un aumento en la corriente de campo del generador, aumenta su flujo.
- Un aumento en el flujo, aumenta la tensión interna  $E_{gf} = K\phi n$
- Un aumento en  $E_{gf}$ , aumenta  $V$ .

El proceso puede invertirse para disminuir la tensión terminal. Es factible regular la tensión terminal de un generador sometido a cargas variables graduando sencillamente la corriente de campo.

## **FUNCIONAMIENTO EN PARALELO DE LOS GENERADORES AC**

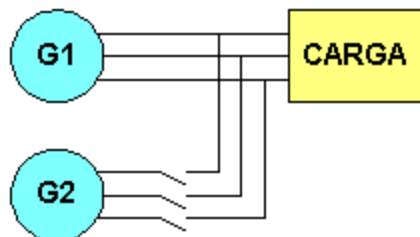
En el mundo de hoy es difícil encontrar un generador síncrono que alimente su propia carga independientemente de otros generadores. Esa situación se encuentra solamente en aplicaciones muy especiales, tal como en generadores de emergencia. Para todas las aplicaciones comunes, hay gran cantidad de generadores que trabajan en paralelo para proveer la potencia que demandan las cargas. ¿Por qué se hacen funcionar en paralelo los generadores síncronos? ¿Por qué el hacerlo tiene muchas ventajas?

- Varios generadores pueden alimentar más carga que uno solo.
- Teniendo varios generadores se aumenta la confiabilidad del sistema de potencia, puesto que si alguno de ellos falla, no se suspende totalmente la potencia a la carga.
- El tener varios generados funcionando en paralelo permite que se pueda desconectar uno o más de ellos, bien por paro o para mantenimiento preventivo.
- Si se usa un solo generador y no está funcionando muy cerca de la plena carga, entonces su funcionamiento será relativamente ineficiente. Pero con varias máquinas pequeñas es posible utilizar solo alguna o algunas de ellas; las que trabajen funcionarán muy cerca de su carga nominal y por lo tanto, será un trabajo más eficiente.

Esta sección estudia primero los requisitos para instalar los generadores de ca en paralelo y luego el comportamiento de los generadores sincrónicos que funcionan en paralelo.

Requisitos para la conexión en paralelo

La figura 3.33 ilustra un generador síncrono  $G_1$  que alimenta una carga, junto con otro generador  $G_2$  que se va a conectar en paralelo con el primero, accionando el interruptor  $S_1$ . ¿Qué condiciones deben cumplirse antes de que se pueda cerrar el interruptor para conectar los dos generadores?



Generador conectado en paralelo con un sistema de potencia en funcionamiento

Si el interruptor se cierra arbitrariamente en cualquier momento, los generadores se expondrían a graves daños y la carga podría perder potencia. Si los voltajes no son exactamente los mismos en cada uno de los conductores que se conectan entre sí, se generará un flujo de corriente muy grande cuando el interruptor se cierre. Para evitar este problema, cada una de las tres fases debe tener exactamente la misma magnitud de voltaje y el mismo ángulo de fase del conductor al cual esté conectada. En otras palabras, el voltaje en la fase a debe ser exactamente el mismo que el voltaje en la fase a' y así sucesivamente para las fases b y b' y c y c'. Lográndose esta semejanza; se deben cumplir las siguientes condiciones para la conexión en paralelo.

- Los voltajes de línea efectivos de los dos generadores deben ser iguales.
- Los dos generadores deben tener la misma secuencia de fases.
- Los ángulos de fase de las dos fases a deben ser iguales.
- La frecuencia del generador nuevo, llamado generador entrante, debe ser ligeramente más alta que la frecuencia del sistema de funcionamiento.

Estas condiciones para la conexión en paralelo necesitan cierta explicación:

La condición 1 es obvia, pues para que dos juego de tensiones sean iguales, por supuesto deben tener la misma magnitud de voltaje efectivo.

La condición 3 la tensión en las fases a y a' siempre será absolutamente idéntico, si tanto las fases como sus magnitudes son las mismas.

La condición 2 hace que el orden de sucesión en que se logran los voltajes máximos de fase, en los dos generadores, sea el mismo. Si el orden de sucesión es diferente, entonces, aunque un par de voltajes (de las fases a) estén en fase, los otros dos pares de voltaje están desfasados 120°. Si los generadores se conectaran en esta forma, no habría problema con la fase a, pero enormes corrientes fluirían por las fases b y c, dañando ambas máquinas. Para corregir un problema de secuencia de fase, sencillamente intercambie las conexiones en dos de las tres fases de cualquiera de las máquinas.

Si cuando se conecten los generadores, las frecuencias no son aproximadamente iguales, se presentarán grandes oscilaciones de potencia hasta que los generadores se estabilicen en una frecuencia común. Las frecuencias de los dos generadores deben ser aproximadamente iguales, pero no exactamente iguales; deben diferenciarse en una pequeña cantidad, en tal forma que los ángulos de fase del generador entrante cambien lentamente con relación a los ángulos de fase del sistema. De esta manera, se podrán observar los ángulos entres los voltajes, y se podrá cerrar el interruptor  $S_1$  cuando los sistemas estén exactamente en fase.

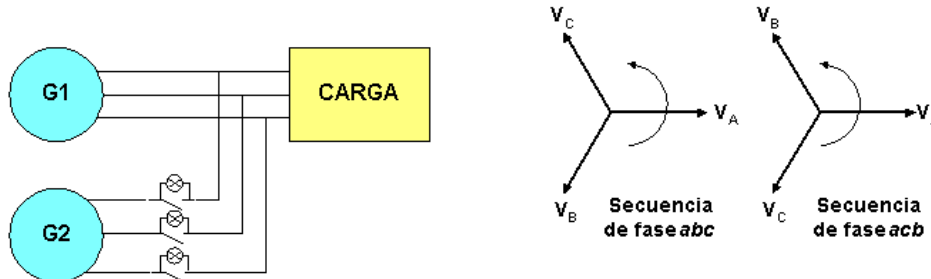
### **Procedimiento general para conectar generadores en paralelo**

Supóngase que el generador  $G_2$  se va a conectar al sistema. Para llevar cabo la conexión en paralelo, se deberán seguir los siguientes pasos:

Primero, la corriente de campo del generador entrante se deberá graduar, utilizando voltímetros, hasta lograr que la tensión de los bornes se iguale a la tensión de línea del sistema.

Segundo, la secuencia de fase del generador entrante se debe comparar con la secuencia de fase del sistema, lo cual es posible en varias formas. Una de ellas es conectar alternadamente

un motor de inducción pequeño a los terminales de cada uno de los generadores. Si el motor gira siempre en la misma dirección, entonces la secuencia de fase será la misma para ambos generadores. Si lo hace en sentido contrario, las secuencias de fase serán diferentes y deberán invertirse dos de los conductores del generador entrante.



Método de los tres bombillos para comprobar la secuencia de fase. Dos posibles secuencias de fase de un sistema trifásico.

Otra manera de comprobar la secuencia de fase es el método de los tres bombillos. Con este método se tienden tres bombillos entre los terminales abiertos del interruptor, conectando el generador al sistema. A medida que cambian las fases entre los dos sistemas, los bombillos brillan al comienzo (diferencia grande de fase) y luego se opacan (diferencia pequeña de fase). Si todos los tres bombillos se iluminan y apagan al mismo tiempo, entonces el sistema tiene la misma secuencia de fase. Si los bombillos se encienden sucesivamente, entonces los sistemas tienen la secuencia de fase contraria y deberá invertirse una de ellas.

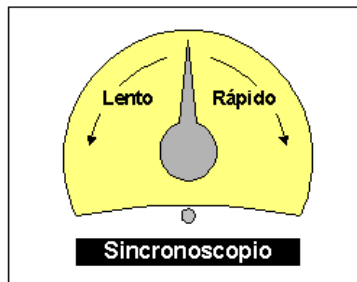
Enseguida se gradúa la frecuencia del generador entrante para que la frecuencia sea ligeramente mayor que la frecuencia del sistema en funcionamiento. Esto se hace primero mirando un medidor de frecuencias, hasta que estas se acerquen, y luego observando los cambios de fase entre los sistemas. El generador entrante se gradúa en una frecuencia ligeramente mayor, en lugar de absorberla como lo haría un motor (este punto será explicado más adelante)

Una vez que casi se igualen las frecuencias, los voltajes en dos sistemas cambiarán de fase entre sí muy lentamente, y se podrá observar, entonces, los cambios de fase; cuando sus ángulos se igualen, el interruptor que conecta los dos sistemas se debe apagar. Finalmente, ¿cómo puede saber uno cuando se encuentran los dos sistemas en fase? Una forma sencilla es observar los tres bombillos descritos atrás, relacionados con el estudio de la secuencia de fase. Cuando los tres bombillos se apagan, la diferencia de voltaje entre ellos es cero y por consiguiente, los sistemas se encuentran en fase. En este sistema funciona, pero no es muy exacto.

Un mejor sistema es emplear un sincroscopio, instrumento que sirve para medir la diferencia de ángulo de fase entre las fases *a* de los dos sistemas. El frente de un sincroscopio se puede ver en la figura adjunta. La esfera señala la diferencia de fase entre las dos fases *a* con  $0^\circ$  (que significa en fase) arriba y  $180^\circ$  abajo. Como las frecuencias de los dos sistemas son ligeramente diferentes, el ángulo de fase medido por el instrumento cambia lentamente. Si el generador o el sistema entrante es más rápido que el sistema en funcionamiento (la situación deseada),

entonces el ángulo de fase avanza y la aguja del sincronoscopio gira en el sentido de los punteros de reloj. Si la máquina entrante es más lenta, la aguja gira en el sentido contrario a los punteros del reloj. Cuando la aguja gira en el sentido del reloj. Cuando la aguja del sincronoscopio se coloca en posición vertical, los voltajes están en fase y el interruptor se puede cerrar para que queden conectados los sistemas.

Sin embargo, se debe observar que un sincronoscopio comprueba las relaciones de una fase solamente; no informa sobre la secuencia de fase. En generadores que hacen parte de grandes sistemas de potencia, todo este proceso de poner en paralelo un nuevo generador está automatizado y el trabajo descrito se hace por medio de computador. Para generadores pequeños, sin embargo, se sigue el procedimiento que se acaba de esbozar.



Características de frecuencia - potencia y de voltaje - potencia reactiva de un generador sincrónico. Todos los generadores son accionados manejados por un motor primario, fuente de potencia mecánica del generador. El tipo más común de motor primario es una turbina de vapor, pero además hay otros tipos tales como los motores diesel, las turbinas de gas, las turbinas hidráulicas y aun los molinos de viento.

Prescindiendo del tipo de origen de la potencia, todos los motores primarios tienden a comportarse en forma similar: mientras la potencia que entregan aumenta, la velocidad a la cual giran disminuye. La disminución de la velocidad es en general no lineal, pero casi siempre se incluye alguna forma de mecanismo regulador para volver lineal la disminución de velocidad con aumento en la demanda de potencia.

Cualquiera que sea el mecanismo regulador que se encuentre en el motor primario, siempre se podrá graduar para que produzca una característica ligeramente descendente a medida que la carga aumenta. La caída de velocidad ( $n$ ) de un motor primario está definida por la ecuación:

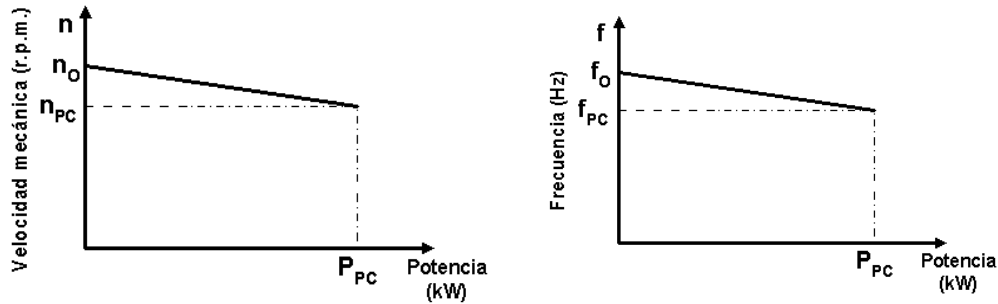
$$n_{reg\%} = \frac{n_0 - n_{pc}}{n_{pc}} \times 100\%$$

Donde  $n_0$  es la velocidad en vacío del motor primario y  $n_{pc}$  es la velocidad del motor primario a plena carga. La mayor parte de los generadores tienen una caída de velocidad de 2 a 4%, como está definido en la ecuación anterior. Además, la mayor parte de los reguladores tienen algún dispositivo de ajuste, para permitir que la velocidad de la turbina en vacío puede modificarse. Una gráfica típica de velocidad-versus-potencia.

Puesto que la velocidad del eje se relaciona con la frecuencia eléctrica resultante, la potencia de salida de un generador sincrónico está relacionada con su frecuencia. En la figura siguiente

puede verse un ejemplo de una gráfica de frecuencia - versus-potencia. Las características frecuencia-potencia de este tipo cumplen un papel esencial en el funcionamiento de generadores sincrónicos en paralelo.

$$f = \frac{n P}{120}$$



Curva de velocidad - versus - potencia de un motor primario típico y curva de frecuencia versus-potencia resultante del generador

La relación entre frecuencia y potencia se describe cuantitativamente por la ecuación :

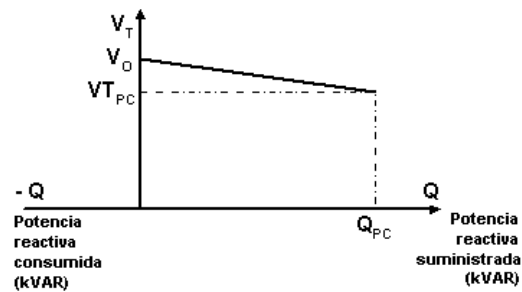
$$P = s_p (f_0 - f_{sist})$$

en donde:

- P = potencia de salida del generador
- $f_0$  = frecuencia del generador en vacío
- $f_{sist}$  = frecuencia de funcionamiento del sistema
- $s_p$  = pendiente de la curva kW/Hz o MW/Hz

Una relación similar se puede deducir para la potencia reactiva Q y tensión en los bornes V. Como se vio anteriormente, cuando una carga en atraso se le aumenta a un generador sincrónico, su voltaje terminal cae. En la misma forma, cuando se aumenta una carga en adelanto al generador sincrónico, su tensión en los bornes también aumenta. Es posible hacer una gráfica del voltaje terminal versus la potencia reactiva, tal gráfica tiene una característica descendente como la que se ve en la figura anterior. Esta característica no es necesariamente lineal, pero muchos reguladores de voltaje incluyen un rasgo especial para volverla lineal. La curva característica puede desplazarse hacia arriba y hacia abajo, cambiando el dispositivo que señala el voltaje terminal en vacío del regulador de voltaje.

Como con la característica frecuencia - potencia, esta curva desempeña un papel importante en el funcionamiento en paralelo de un generador sincrónico. La relación entre el voltaje terminal y la potencia reactiva puede expresarse por medio de una ecuación similar a la relación frecuencia - potencia si el regulador de voltaje produce una salida que sea lineal con variación de la potencia reactiva.



Curva de voltaje terminal V versus potencia reactiva (Q) de un generador sincrónico.

Es importante darse cuenta de que cuando un generador funciona aisladamente, la potencia real P y la potencia reactiva Q suministrada por el generador será la cantidad absorbida por la carga que se le conecte; estas cargas no pueden regularse por el control del generador. Por tanto, para cualquier potencia real dada, el gobernador es el que controla la frecuencia de funcionamiento del generador y para cualquier potencia reactiva, la corriente de campo es la que controla la tensión terminal del generador V.

### Ejemplo

La figura se muestra un generador que alimenta una carga. Una segunda carga va a conectarse en paralelo con la primera. El generador tiene en vacío una frecuencia de 61.0 Hz y una pendiente  $s_p$  de 1 MW/Hz. La carga 1 consume una potencia real de 1,000 kW con factor de potencia en atraso de 0.8, mientras que la carga 2 absorbe una potencia real de 800 kW con factor de potencia en atraso de 0.707.

- Antes de cerrar el interruptor, ¿cuál es la frecuencia de funcionamiento del sistema
- Después de que se ha conectado la carga 2, ¿Cuál es la frecuencia de funcionamiento del sistema?.
- Después de que se ha conectado la carga 2, ¿Qué debe hacer un operario para restablecer los 60 Hz de frecuencia del sistema?

### Solución

Este problema establece que la pendiente de la característica del generador es de 1 MW/Hz y que su frecuencia en vacío es de 61 Hz. Entonces, la potencia producida por el generador se expresa por medio de:

$$P = S_p (f_0 - f_{sist}) \quad f_{sist} = f_0 - (P/S_p)$$

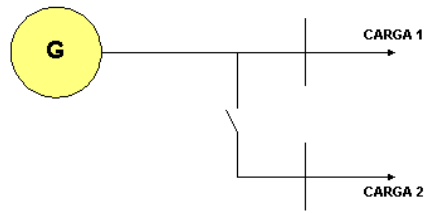
$$f_{sist} = f_0 - (1000 \text{ kW} / 1 \text{ Mw/Hz}) = 61 - 1 \text{ Hz} = 60 \text{ Hz}$$

Después de que se ha conectado la carga 2

$$f_{sist} = f_{sc} - (P/S_p) = 61 - (1800 \text{ kW} / 1 \text{ Mw/Hz}) = 61 - 1.8 \text{ Hz} = 59.2 \text{ Hz}$$



La frecuencia del sistema inicial se expresa por



Sistema de potencia del ejemplo

Después de que se ha conectado la carga, la frecuencia del sistema cae hasta 59.2 Hz para establecer el sistema a su frecuencia normal de funcionamiento, el operario debe aumentar entre 0.8 Hz y 61.8 Hz en vacío las marcas de la esfera del gobernador. Esto restablecerá la frecuencia del sistema a 60 Hz. Para resumir, cuando un generador funciona aisladamente alimentando las cargas del sistema, entonces:

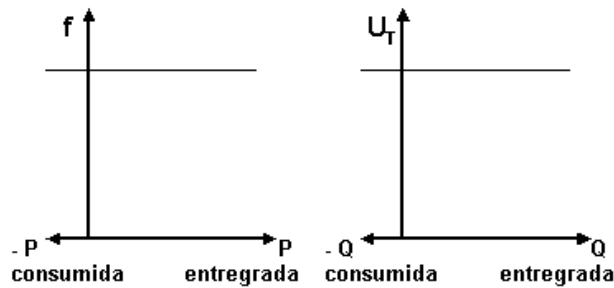
- Las potencias real y reactiva entregadas por el generador, serán de la magnitud que exijan las cargas que le sean conectadas.
- Las marcas de la esfera del gobernador, controlarán la frecuencia de funcionamiento del sistema de potencia.
- La corriente de campo (o las marcas del regulador de voltaje) controlarán la tensión terminal del sistema de potencia.

Esta es la situación que se encontró en generadores aislados en un medio ambiente remoto.

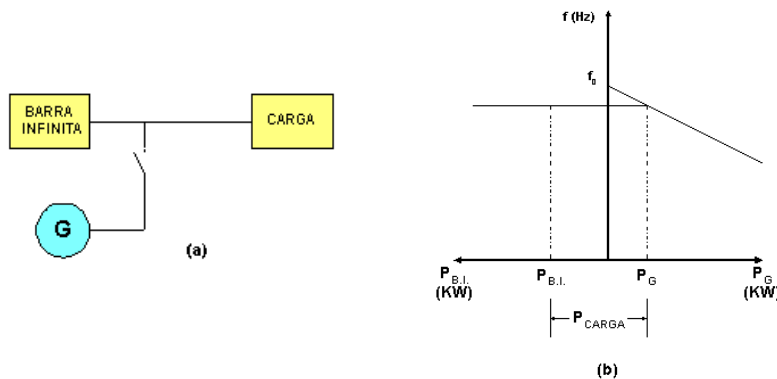
Funcionamiento de los generadores en paralelo con grandes sistemas de potencia

Cuando un generador sincrónico se conecta a un sistema de potencia, éste es con frecuencia tan grande que nada de lo que pueda hacer su operario tendrá mucho efecto sobre todo el sistema en sí. Dicha red es tan grande que ninguna acción razonable sobre el generador puede causar un cambio significativo en la frecuencia de toda la red. Esta noción es idealizada en el concepto de una barra infinita es un sistema de potencia tan grande que ni su voltaje ni su frecuencia varían, aún haciendo caso omiso de la magnitud de la potencia real o reactiva que se le saque o se le suministre. La característica de potencia - frecuencia de tal sistema puede verse en la figura 3.38-a y la característica de potencia - voltaje en la figura 3.38-b.

Para entender el comportamiento de un generador conectado a un sistema tan grande, se examina un sistema que consta de un generador y una barra infinita en paralelo, alimentando una carga. Se supone que el motor primario del generador tiene un mecanismo gobernador, pero que el campo se controla manualmente por medio de una resistencia. Es más fácil explicar el funcionamiento de un generador sin tener en consideración un regulador automático de corriente de campo, de tal manera que este estudio despreciará las diferencias menores que pueda originar dicho regulador, si lo hubiera. Tal sistema se muestra en la Fig 3.39-a.



Curvas de frecuencia vs potencia y voltaje terminal vs potencia reactiva de una barra infinita



a) Generador sincrónico que funciona en paralelo con una barra infinita. b) Diagrama de frecuencia - versus - potencia (o diagrama de casa) de un generador sincrónico en paralelo, con una barra infinita.

Quando un generador se conecta en paralelo con otro o con un gran sistema, la frecuencia y el voltaje terminal de las máquinas, deben ser todos los mismos, puesto que sus conductores de energía de salida están ligados entre sí. Por tanto, sus características de potencia real - frecuencia y de potencia reactiva - voltaje se pueden dibujar espalda con espalda, con un eje vertical común.

Supongamos que el generador acaba de ser colocado en paralelo con una barra infinita, de acuerdo con el procedimiento que se acaba de describir. Entonces, el generador estará "flotando" en la línea, suministrando una pequeña cantidad de potencia real y muy poca o ninguna potencia reactiva.

Supongamos que el generador se ha puesto en paralelo con la línea, pero en lugar de dejar su frecuencia ligeramente más alta que la del sistema, se conectó con una frecuencia un poco más baja. La situación resultante, inmediatamente después de terminar la colocación del generador en paralelo. En otras palabras, cuando la frecuencia del generador en vacío es menor que la del sistema, realmente el generador absorbe potencia en lugar de absorberla, la frecuencia de la máquina entrante debe ser ligeramente mayor que la del sistema.

Muchos generadores reales están dotados de reveladores de inversión de potencia, por lo cual es imperativo que sean colocados en paralelo en una frecuencia más alta que la del sistema en funcionamiento. Si tal generador alguna vez comenzará a absorber potencia, se desconectaría de la línea automáticamente.

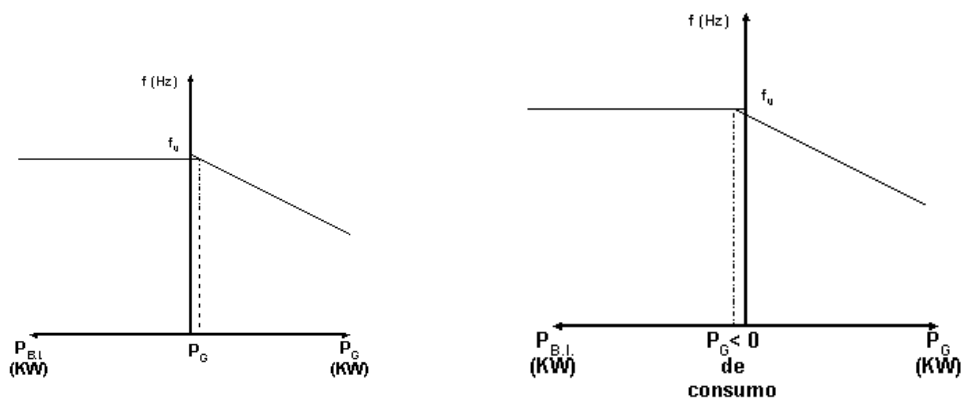


Diagrama de frecuencia vs potencia un instante después de ponerse en paralelo  
 Diagrama de frecuencia vs potencia, si la frecuencia del generador en vacío fuera ligeramente menor que la frecuencia del sistema antes de colocarse en paralelo.

Una vez que el generador se ha conectado, ¿qué sucede cuando las marcaciones en la esfera de su gobernador aumentan? El efecto de este incremento es desplazar la frecuencia del generador en vacío hacia arriba. Como la frecuencia del sistema es inmodificable (la frecuencia de una barra infinita no se puede cambiar), la potencia suministrada por el generador aumenta.

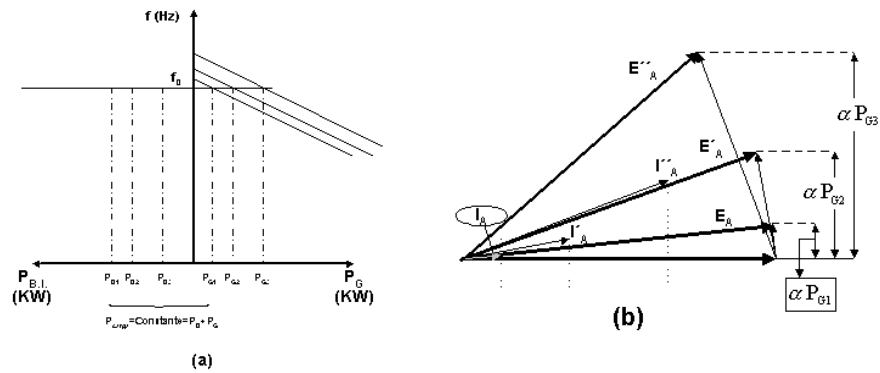
Obsérvese en el diagrama fasorial que  $E_{gf} \sin \delta$  (que es proporcional a la potencia suministrada mientras  $V_T$  sea constante) ha aumentado, mientras la magnitud de  $E_{gf}$  ( $= K\phi n$ ) permanece constante, ya que tanto la corriente de campo  $I_F$  como la velocidad de rotación  $\omega$  no se ha modificado. Como las marcaciones del gobernador aumentaron aún más, tanto la frecuencia en vacío, como la potencia que entrega el generador también aumentan. En la medida en que la potencia de salida se eleva,  $E_{gf}$  permanece invariable, mientras que  $E_{gf} \sin \delta$  sigue aumentando.

¿Qué sucede en este sistema si la salida de potencia del generador se aumenta hasta exceder la potencia que requiere la carga? Si esto sucede, la potencia adicional generada regresará hacia la barra infinita. Este, por definición, puede entregar o absorber cualquier cantidad de potencia sin cambiar de frecuencia, por lo cual la potencia extra se consume.

La primera restricción sobre el generador es que la potencia debe mantenerse constante cuando  $I_F$  se modifique. La potencia dentro de un generador se puede expresar por medio de la

ecuación  $P_{ent} = \frac{2\pi}{60} \tau_{ap} n$  Ahora, el motor primario de un generador sincrónico tiene una

determinada característica de velocidad - momento de torsión, para cualquier posición dada del dispositivo gobernador. Esta curva solamente cambia cuando se han cambiado las marcaciones de dicho dispositivo. Como el generador está ligado a una barra infinita, su velocidad no puede cambiar. Si la velocidad del generador no cambia y las marcaciones del gobernador no han sido cambiadas, la potencia entregada por el generador debe permanecer constante.



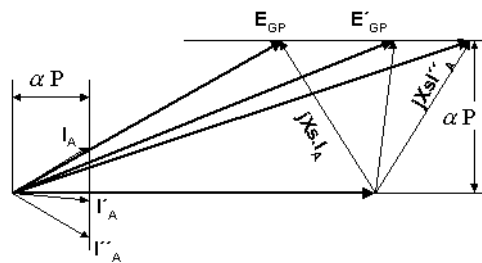
Efecto del aumento de las marcaciones del gobernador sobre: a) el diagrama de casa b) el diagrama fasorial.

Si la potencia suministrada es constante, en tanto que la corriente de campo se modifica, entonces, las distancias proporcionales a la potencia, en el diagrama fasorial ( $I_A \cos \phi$  y  $E_{gf} \sin \delta$ ), no pueden cambiar. Cuando la corriente de campo aumenta, el flujo  $\phi$  aumenta y por tanto,  $E_{gf} = K\phi \uparrow n$  crece. Si  $E_{gf}$  se incrementa, pero  $E_{gf} \sin \delta$  permanece constante, entonces el fasor  $E_{gf}$  debe "deslizarse" a lo largo de la línea de potencia constante. Como  $V$  es constante, el ángulo de  $jX_s I_A$  cambia como se indica y por tanto el ángulo y la magnitud de  $I_A$  se modifican. Nótese que como resultado, la distancia proporcional a  $Q(I_A \sin \phi)$  aumenta. En otras palabras, aumentar la corriente de campo en un generador sincrónico que está funcionando en paralelo con una barra infinita, se incrementa la salida de potencia reactiva del generador.

Para resumir, cuando un generador funciona en paralelo con una barra infinita:

- La frecuencia y el voltaje terminal del generador son controlados por el sistema al cual están conectados.
- Las marcaciones de la esfera del dispositivo gobernador del generador controlan la potencia real que este entrega al sistema.
- La corriente de campo del generador controla la potencia reactiva que este entrega al sistema.

Así funcionan los generadores reales, cuando están conectados con un sistema de potencia muy grande.



Efecto del aumento de la corriente de campo del generador sobre su diagrama fasorial

### Ejemplo

Un turboalternador trifásico, conectado en estrella, tiene una reactancia síncrona de  $8,5 \Omega/\text{fase}$  y resistencia despreciable. Se conecta a una barra infinita de  $11 \text{ kV}$ , entregando  $180 \text{ A}$  a un factor de potencia en atraso de  $0,9$ . Si la potencia mecánica de la turbina permanece constante, mientras que la excitación se incrementa en un  $25\%$ , determinar:

- La nueva corriente de línea
- El nuevo factor de potencia
- La potencia reactiva antes y después de incrementar el campo.

Datos del generador:

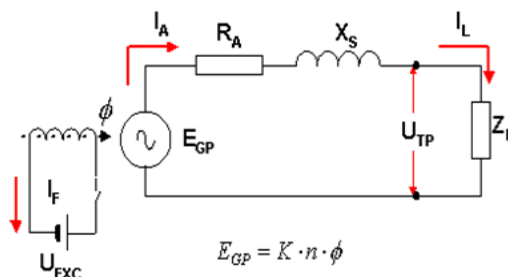
Conexión Y,  $X_s = 8.5\Omega/\text{fase}$ ,  $R_a$  despreciable,  $V = 11 \text{ kV}$   $I_{a1} = I_{L1} = 180 \text{ A}$

$\text{Cos } \phi = 0,9$  en atraso  $I_{f1} = I_{\text{exc1}}$

a)  $I_{L2} = ?$       b)  $\text{Cos}\phi_2 = ?$       c)  $Q_2 = \text{Si } I_{f2} = I_{\text{exc1}} \times 1.25$

Sabemos que :  $E_{gf} = V + I_a X_s$  (vectores)  $I_a = (E_{gf} - V) / X_s = I_L$

$$I_{a2} = (E_{gf2} - (11000/1.7321)\angle 0^\circ) / 8.5 \angle 90^\circ$$



Se conoce:

$$E_{gf1} = V + I_{a1} X_s = (11000/1.7321)\angle 0^\circ + 180 \angle 25.84^\circ \times 8.5 \angle 90^\circ = 7151.6 \angle 11.10^\circ \text{ V}$$

$$\delta_1 = 11.10^\circ$$

Se requiere conocer:  $E_{gf2} = ?$  y  $E_{gf2} = 1.25 E_{gf1}$   $E_{gf2} = 8939.5 \text{ V}$

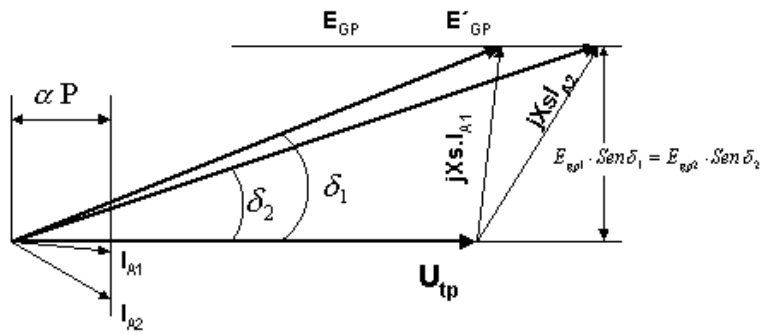
Pero como  $P = \text{cte}$ , se cumple

$$\text{Sen}\delta_2 / \text{Sen}\delta_1 = E_{gf1} / E_{gf2} \quad \text{Sen}\delta_2 = 0.8 \times \text{Sen}11.10^\circ = 0.154$$

$$\delta_2 = \text{arc. Sen}(0.154) = 8.86^\circ$$

$$I_{a2} = (8939.5 \angle 8.86^\circ - 11000/1.7321 \angle 0^\circ) / 8.5 \angle 90^\circ = 333.91 \angle -60.98^\circ \text{ A}$$

$$\text{Cos } \phi_2 = \text{Cos}(60.98) = 0.485$$



$$Q1 = 1.7321 U_L I_{L1} \text{Sen}\phi_1 = 1.7321 \times 1100 \times 180 \times \text{Sen } 25.84 = 1494.9 \text{ KVAR}$$

$$Q2 = 1.7321 U_L I_{L2} \text{Sen}\phi_1 = 1.7321 \times 1100 \times 333.91 \times \text{Sen } 60.80 = 5563 \text{ KVAR}$$