



OPERACION EN PARALELO DE MAQUINAS SINCRONAS

- ✓ Para poner en paralelo un generador síncrono a una barra infinita, debe de:
- ✓ Previamente se debe haber verificado igualdad de secuencia de fases.
- ✓ Llevar la velocidad de la turbina a la velocidad síncrona.
- ✓ Luego cerrar el circuito de campo, e incrementar la corriente de campo (I_F) hasta obtener en bornes la tensión nominal.

- ✓ Mediante un doble voltímetro y doble frecuencímetro, verificar que las tensiones del generador y de la barra infinita sean iguales en magnitud y frecuencia. Luego cuando estén en fase (verificando en el sincronoscopio) ambas tensiones, cerrar el interruptor de potencia.



OPERACION EN PARALELO DE ALTERNADORES

Cuando el alternador esta siendo poco exigido el rendimiento del alternador y su máquina accionante caen.

Por este motivo, entre otros, es que se dimensionan los alternadores para hacerlos trabajar con un rendimiento **técnicamente aceptables.**

Dentro de la operación del alternador donde puede ser exigido dentro de su potencia nominal y dentro de valores menores que la nominal, se practica la CONEXIÓN EN PARALELO, manteniendo un control de potencia activa y reactiva enlazados.

Trabajando en paralelo, las máquinas síncronas pueden operar satisfactoriamente dentro de los parámetros permisibles.



CONDICIONES PARA LA PUESTA EN PARALELO

- Deben tener igual tensión en bornes.
- Que tengan la misma polaridad.
- Que tengan las mismas frecuencias.
- Que tenga la misma secuencia de fases.
- El alternador que ingresa debe estar en vacío.
-

MUY IMPORTANTE

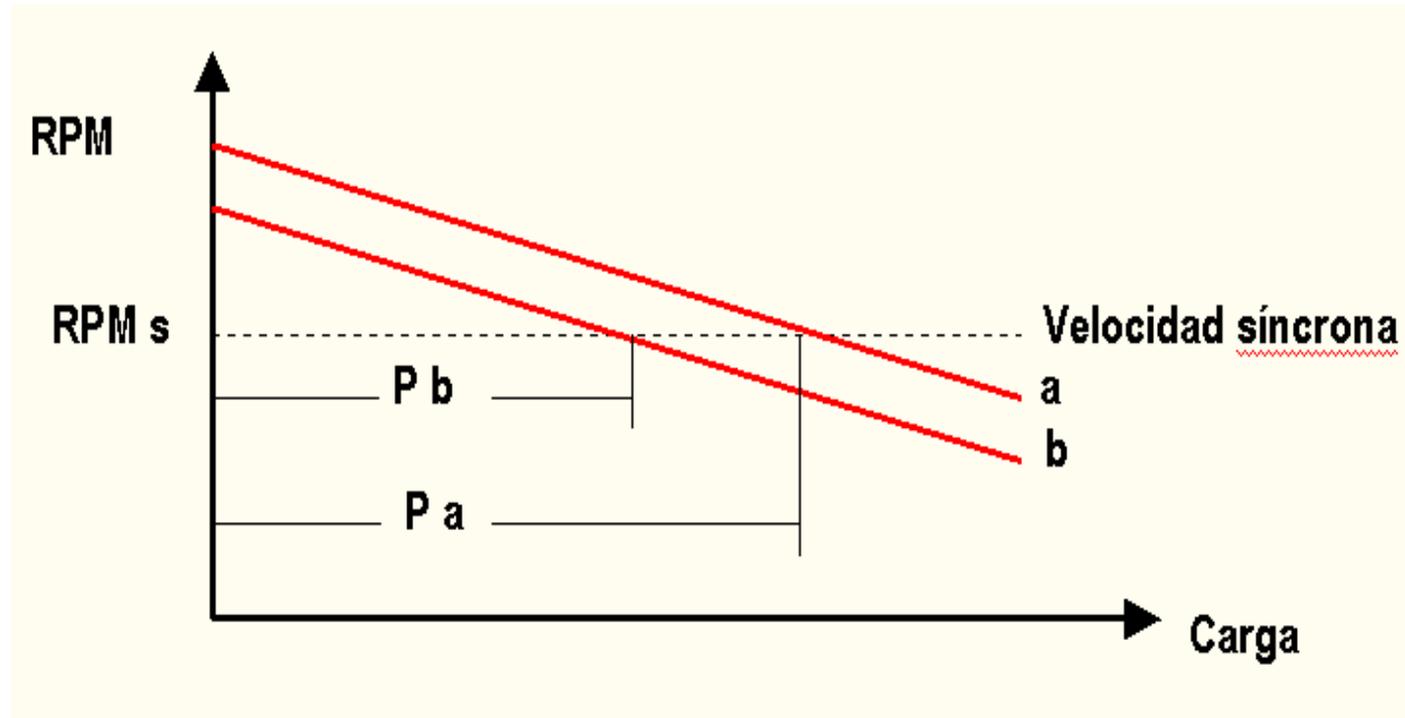
- La distribución de potencia activa depende del torque accionante (frecuencia del motor primo y es controlada en todo momento por el RAS).
- En cuanto a la corriente reactiva depende de la excitación de cada alternador (tensión de excitación dada y controlada en todo instante por el AVR).



REGULACION DE POTENCIA ACTIVA

- Cuando dos alternadores operan en paralelo y se aumenta la carga, existe una reducción de sus velocidades el cual es registrada por sus respectivos RASs, los cuales deben estar interconectados para trabajar en paralelo. Los RASs son los encargados de corregir estos cambios de velocidad.
- El regulador de velocidad, RAS, tiene que restablecer las velocidades de cada una de los motores primos haciendo que trabajen en forma cercana a la velocidad nominal.
- La regulación de la carga MW entre los dos alternadores es determinada por las características del RAS de cada uno de los motores primos.
- Dichos RAS tienen que poseer una respuesta rápida para restablecer a tiempo las variaciones de frecuencia.

CONTROL DE VELOCIDAD (RAS)



Regulacion de la velocidad mediante el RAS.

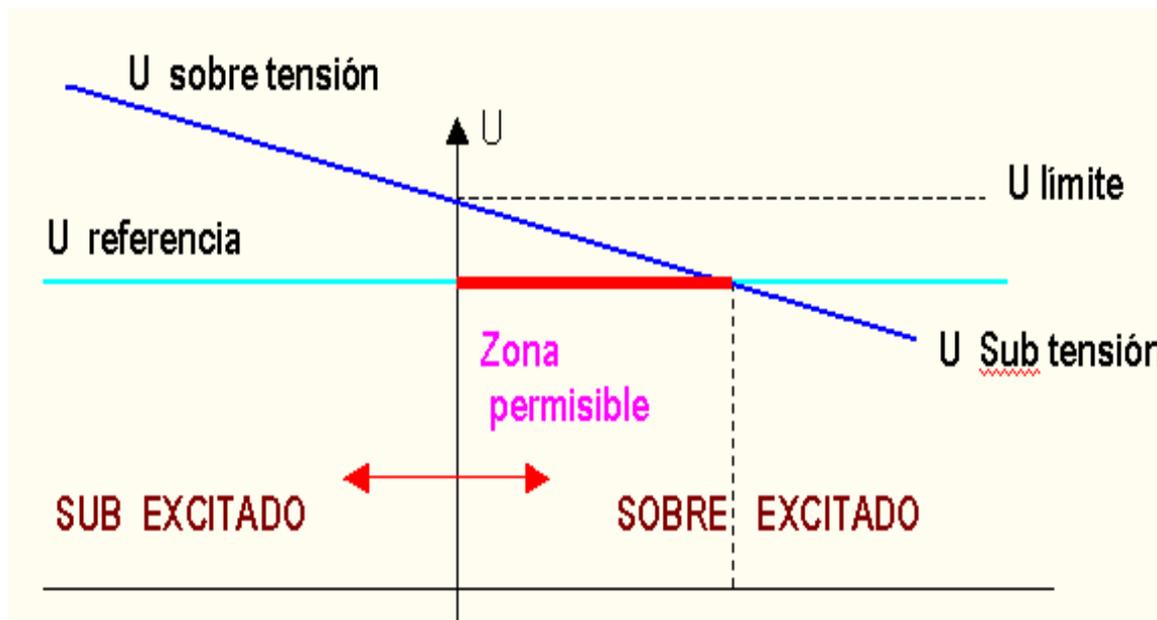


REGULACION DE POTENCIA REACTIVA

- La **regulación de la tensión de excitación** de un alternador se realiza con el AVR, quien entrega en todo momento una tensión nominal en bornes de la máquina síncrona.
- Variando los niveles de tensión en bornes del alternador se logra controlar el nivel de reactivos de la carga.
- Existe un módulo AVR (regulador automatico de ten-sión) encargado de entregar la tensión normalizada o preestablecida en los bornes del generador.
- El trabajo realizado por el AVR completamente automático.
- El AVR deberá garantizarnos la calidad de la tensión de la máquina síncrona.



CURVA CARACTERISTICA DE TENSION





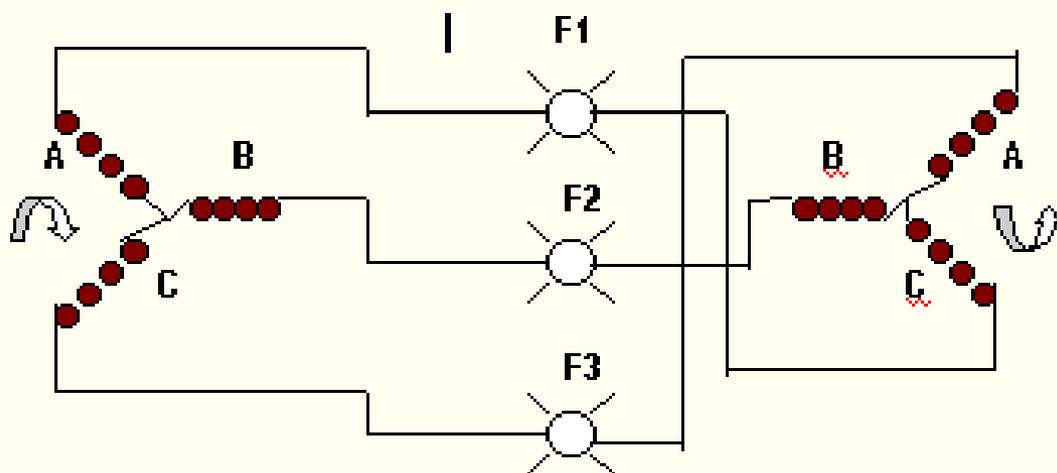
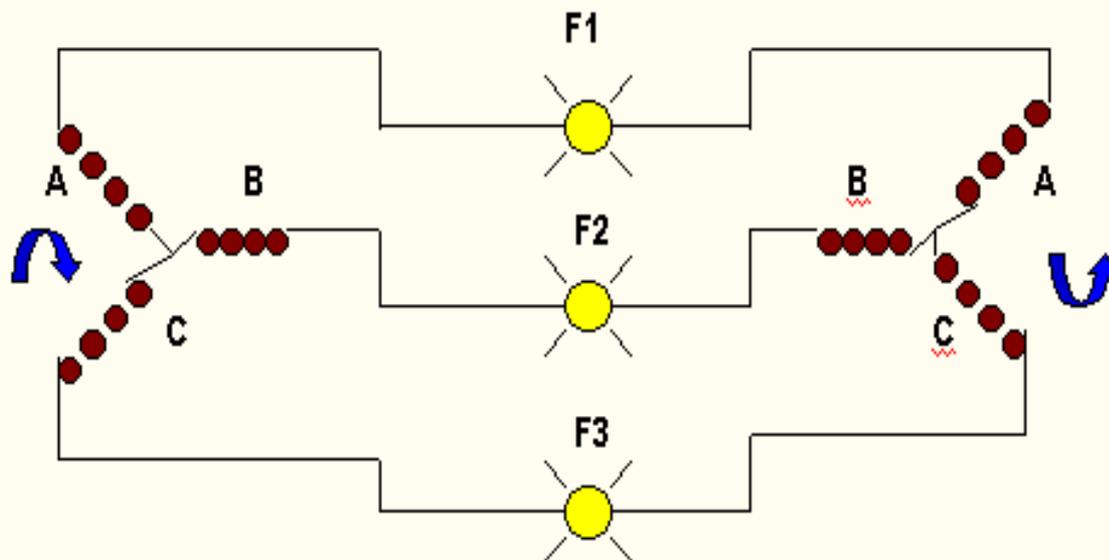
EQUIPOS NECESARIOS EN LA PUESTA EN PARALELO

- Voltímetro con escala $-V_{max} \ 0 \ + \ V_{max}$.
- Amperímetro de escala adecuada.
- Vatímetro, varímetro y frecuencímetro para cada generador
- Secuencímetro.
- Sincronoscopio
- Juego de lámparas instaladas entre generadores y barras.
- Los instrumentos de medida deben ser de clase de precisión mínima 0.5.
- Sistemas de barras del sistema.
- Relé de potencia inversa.
- IA debidamente dimensionados.
- Sistema de protección según el tamaño del los generadores.

SINCRONIZACION DE DOS GENERADORES

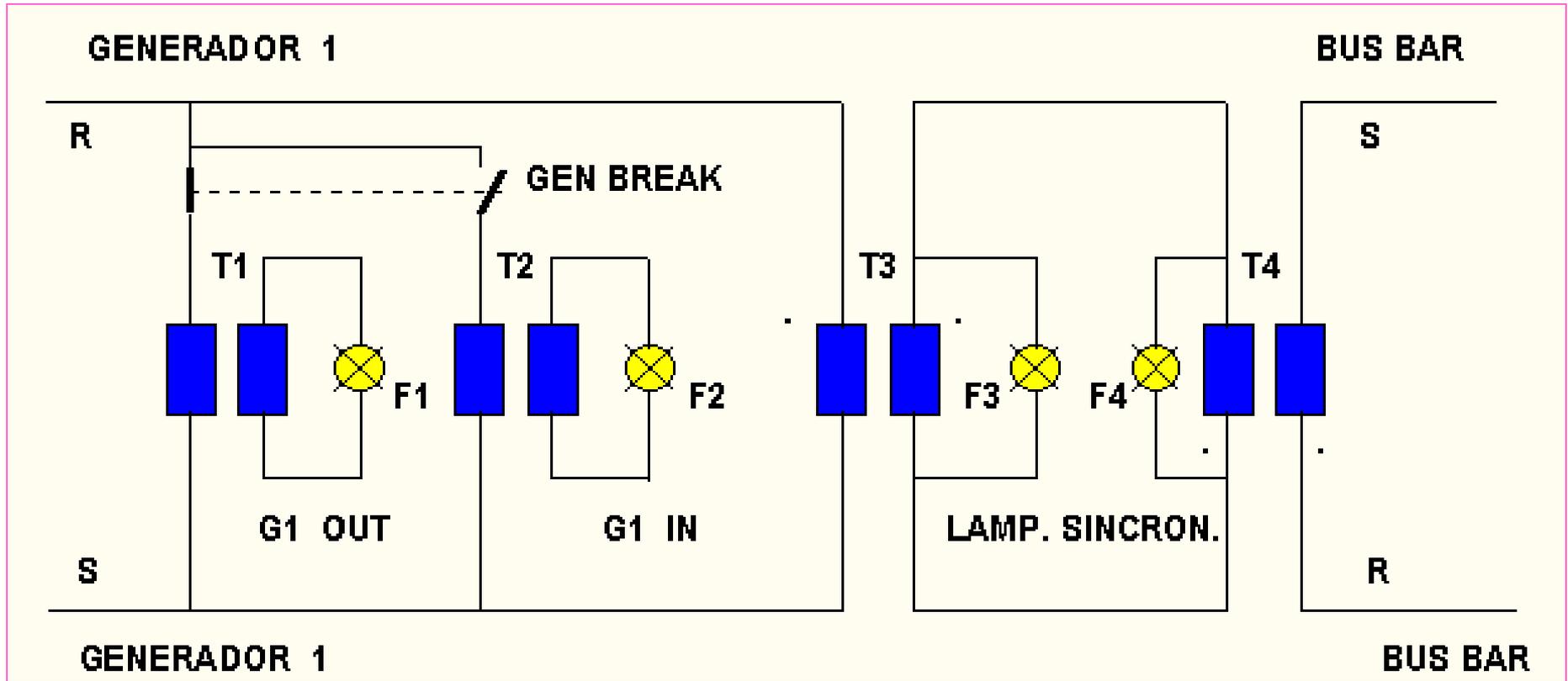
Cual es la particularidad de este sistema?

Las lámparas se hallan prendidas ó apagadas?.



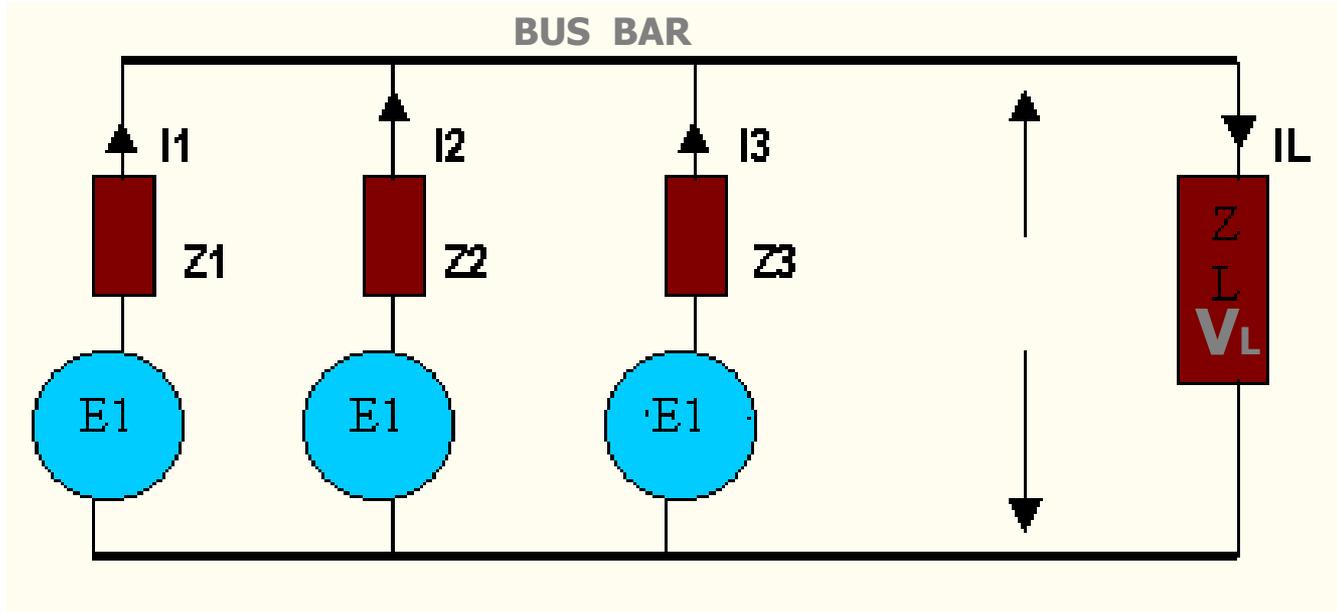


SINCRONIZACION DE UN GENERADOR Y BUS BAR



CIRCUITO DE CONTROL AISLADO

TEOREMA DE MILLMAN (Aplicación de la LKC)



La fuentes $E_1, E_2 \dots$ En (Tensiones generadas) pueden ser baterías, celdas solares, generadores de AC ó DC.

TEOREMA DE MILLMAN (Aplicación de KLC)

De la siguiente figura anterior podemos deducir las siguientes ecuaciones:

$$V_L = I_L Z_L = (I_1 + I_2 + I_3) Z_L$$

$$V_L = E_1 - Z_1 I_1 = E_2 - Z_2 I_2 = E_3 - Z_3 I_3 \dots = E_n - Z_n I_n$$

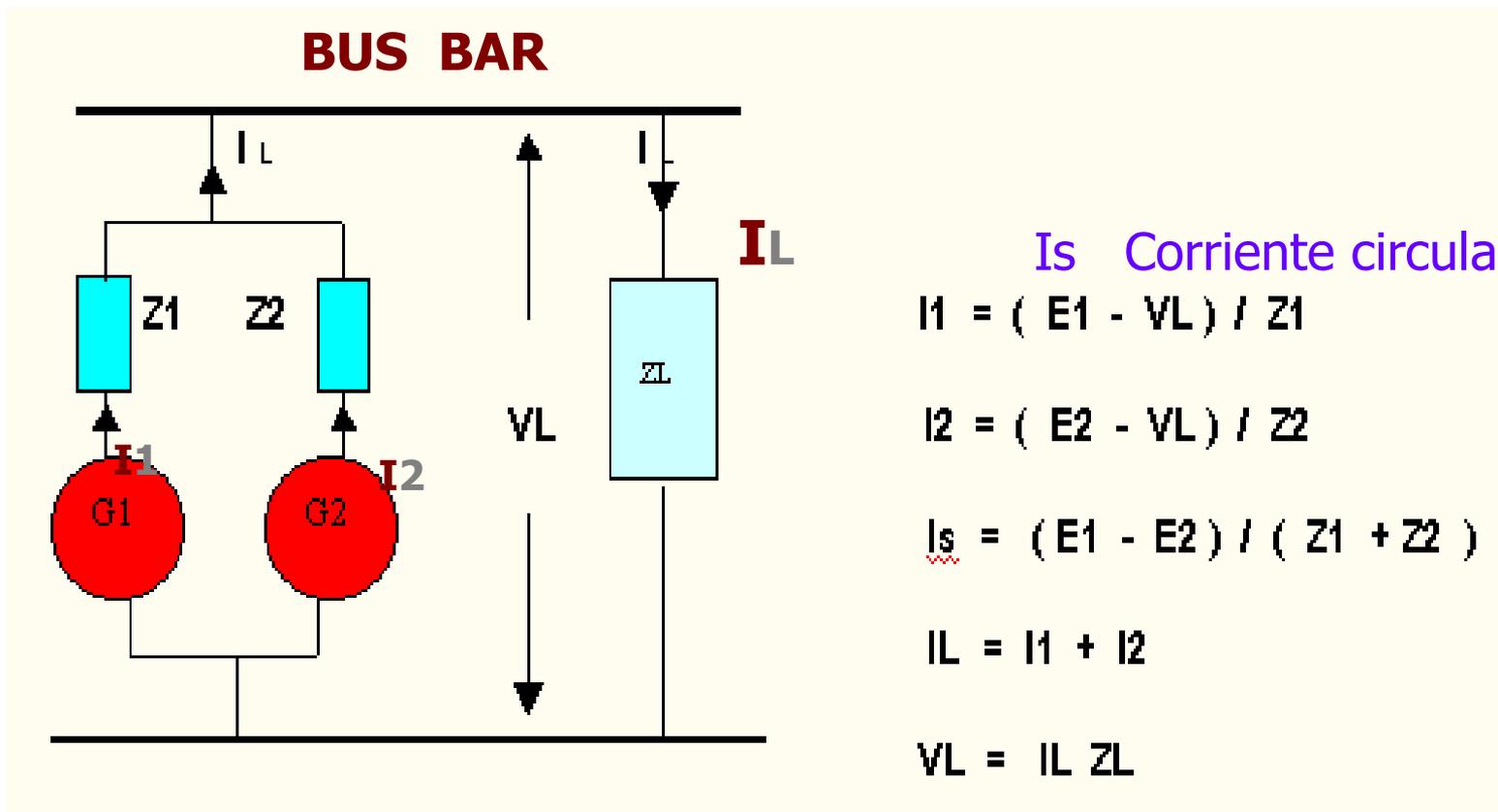
$$V_L = [\pm E_1 / Z_1 \pm E_2 / Z_2 \pm E_3 / Z_3] / [1 / Z_1 + 1 / Z_2 + 1 / Z_3]$$

$$V_L = [\pm E_1 / Z_1 \pm E_2 / Z_2 \pm E_3 / Z_3] / [Y_1 + Y_2 + Y_3]$$

Notas :

- 1.- No es necesario que las corrientes entregadas a la carga sean iguales.
- 2.- Si es indispensable que la fuente que ingresa tenga un atensión ligeramente superior a V_L para que de ésta manera pueda suministrar corriente a las barras.

OPERACIÓN DE DOS GENERADORES EN PARALELO



TEOREMA DE KOUWENHOVEN AND PULLEN



TEOREMA DE KOUWENHOVEN AND PULLEN

De la siguiente figura anterior podemos deducir las siguientes ecuaciones:

$$V_L = I_L Z_L = (I_1 + I_2) Z_L$$

$$V_L = \{ (E_1 - V_L) / Z_1 + (E_2 - V_L) / Z_2 \} Z_L$$

$$V_L = \{ (E_1 / Z_1 + E_2 / Z_2) Z_L - V_L (1 / Z_1 + 1 / Z_2) \} Z_L$$

$$V_L / Z_L = \{ (E_1 / Z_1 + E_2 / Z_2) - V_L (1 / Z_1 + 1 / Z_2) \}$$

$$V_L / Z_L + V_L (1 / Z_1 + 1 / Z_2) = (E_1 / Z_1 + E_2 / Z_2)$$



TEOREMA DE KOUWENHOVEN AND PULLEN

$$V_L \left(\frac{1}{Z_L} + \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right) = \left(\frac{E_1}{Z_1} + \frac{E_2}{Z_2} \right)$$

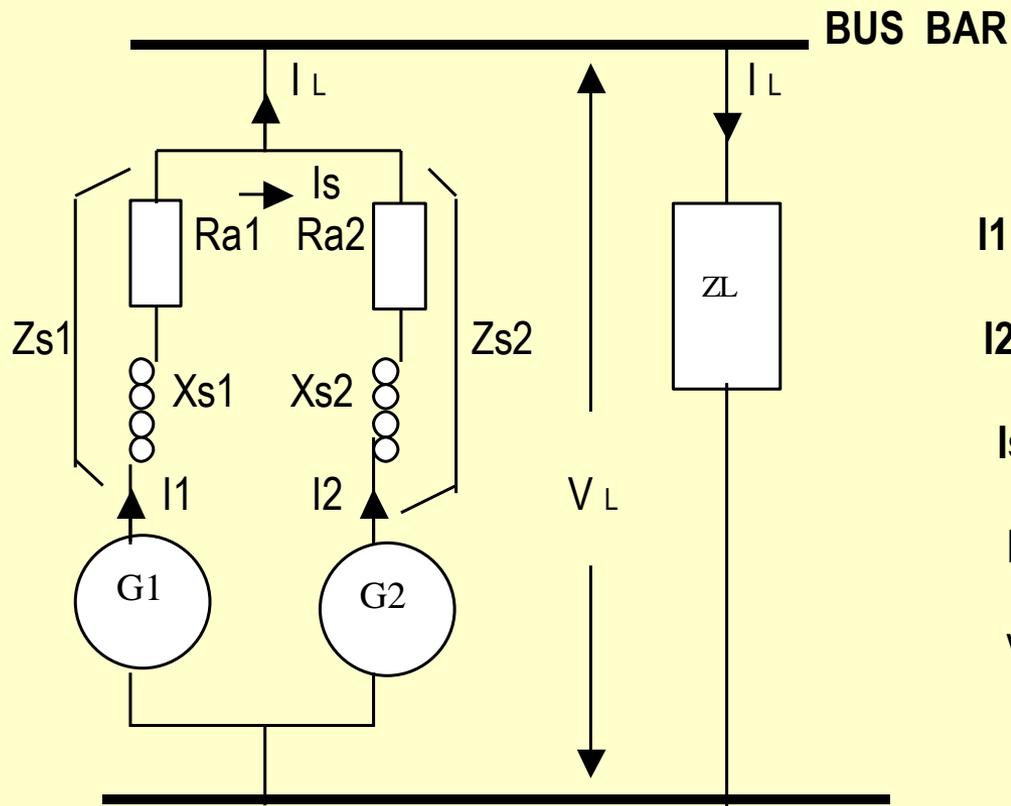
$$V_L \left(\frac{1}{Z_o} \right) = I_{cc1} + I_{cc2} = I_{cc}$$

$$V_L = Z_o \cdot I_{cc}$$

Notas :

- 1.- $1 / Z_o$ es la combinación de las impedancias de los generadores y la carga.
- 2.- I_{cc1} e I_{cc2} son las corrientes de corto circuito de cada generador.
- 3.- I_{cc} es la corriente de corto circuito total de los generadores.

TEOREMA DE KOUWENHOVEN AND PULLEN



$$I_1 = (E_1 - V_L) / Z_1$$

$$I_2 = (E_2 - V_L) / Z_2$$

$$I_s = (E_1 - E_2) / (Z_1 + Z_2)$$

$$I_L = I_1 + I_2$$

$$V_L = I_L Z_L$$

Si aplicamos la KCL a la anterior y deducimos las ecuaciones:

$$I_L = I_1 + I_2 \quad (1)$$



TEOREMA DE KOUWENHOVEN AND PULLEN

$$V_L = E_1 - Z_1 I_1 = E_2 - Z_2 I_2 = Z_L \cdot I_L \quad (2)$$

$$E_1 - E_2 = Z_1 I_1 - Z_2 I_2 = Z_L I_L$$

$$\begin{aligned} E_2 &= E_1 - Z_1 I_1 + Z_2 I_2 = Z_L I_L + Z_2 I_2 \\ &= Z_L (I_1 + I_2) + Z_2 I_2 \end{aligned}$$

$$E_2 = Z_L I_1 + I_2 (Z_2 + Z_L) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} E_1 &= E_2 - Z_2 I_2 + Z_1 I_1 = Z_L I_L + Z_1 I_1 \\ &= Z_L (I_1 + I_2) + Z_1 I_1 \end{aligned}$$

$$E_1 = Z_L I_2 + I_1 (Z_1 + Z_L) \quad (4)$$

De la ecuación (3) despejamos la corriente I_2 y obtenemos:



TEOREMA DE KOUWENHOVEN AND PULLEN

$$I_2 = (E_2 - Z_L I_1) / (Z_2 + Z_L)$$

Reemplazando en la ecuación (4)

$$E_1 = Z_L \{ (E_2 - Z_L I_1) / (Z_2 + Z_L) \} + I_1 (Z_1 + Z_L)$$

$$E_1 (Z_2 + Z_L) = Z_L (E_2 - Z_L I_1) + I_1 (Z_1 + Z_L) (Z_2 + Z_L)$$

$$E_1 (Z_2 + Z_L) = Z_L E_2 - Z_L^2 I_1 + I_1 (Z_1 + Z_L) (Z_2 + Z_L)$$

$$E_1 (Z_2 + Z_L) = Z_L E_2 - Z_L^2 I_1 + I_1 (Z_1 Z_2 + Z_L Z_2 + Z_1 Z_L + Z_L^2)$$

$$E_1 (Z_2 + Z_L) = Z_L E_2 + I_1 (Z_1 Z_2 + Z_L Z_2 + Z_1 Z_L)$$



TEOREMA DE KOUWENHOVEN AND PULLEN

$$I_1 = \{ E_1 Z_2 + Z_L (E_1 - E_2) \} / [Z_L (Z_1 + Z_2) + Z_1 Z_2] \quad (5)$$

En forma análoga de las ecua. (4) y (3) se hallará la corriente I_2 .

$$I_2 = \{ E_2 Z_1 + Z_L (E_2 - E_1) \} / [Z_L (Z_1 + Z_2) + Z_1 Z_2] \quad (6)$$

Para encontrar la corriente total $I_L = I_1 + I_2$ reemplamos y tenemos:

$$I_L = \{ E_1 Z_2 + E_2 Z_1 \} / [Z_L (Z_1 + Z_2) + Z_1 Z_2] \quad (7)$$

El voltaje en la carga $V_L = I_L Z_L$ haciendo los reemplazos tenemos:

$$V_L = \{ E_1 Z_2 + E_2 Z_1 \} / [(Z_1 Z_2 / Z_L) + Z_1 + Z_2] \quad (8)$$



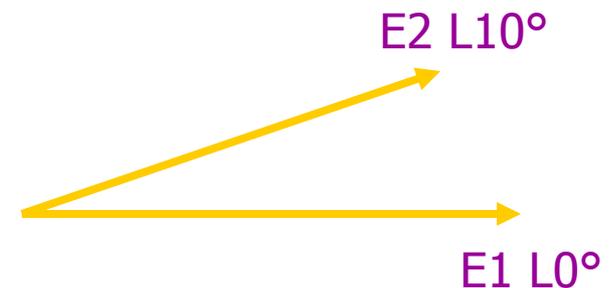
TEOREMA DE KOUWENHOVEN AND PULLEN

Ejemplo.- Hallar las corrientes de corto circuito I_{cc1} , I_{cc2} , I_{cc} , V_L , Z_o sabiendo que E_1 adelanta a E_2 en 10° . Las FEM son de 1000 voltios por fase. Las impedancias son : $Z_1 = 0.1 + j 2.0 \Omega$, $Z_2 = 2 + j 3.2 \Omega$, y $Z_L = 2 + j 1.0 \Omega$.

Solución

$$Z_1 = 2.002 \angle 87.14^\circ \quad Z_2 = 3.774 \angle 58^\circ \quad Z_L = 2.236 \angle 26.57^\circ$$

$$E_1 = 1000 \angle 0^\circ \quad E_2 = 1000 \angle 10^\circ$$



$$1/Z_o = (1/Z_L + 1/Z_1 + 1/Z_2) \quad Z_o = 0.923 \angle 58.52^\circ \Omega$$



TEOREMA DE KOUWENHOVEN AND PULLEN

$$I_{cc} = (E1 / Z1 + E2 / Z2) = I_{cc1} + I_{cc2}$$

$$= 499.5 \angle -87.14^\circ + 265 \angle -68^\circ = 754.75 \angle -80.52^\circ \text{ Amp.}$$

$$V_L = I_{cc} Z_o = 754.75 \angle -80.52^\circ \times 0.923 \angle 58.52^\circ = 696.6 \angle -22^\circ \text{ Volt.}$$

Verificar los resultados.

Resolver cuando E2 se halla con 30° de retraso respecto a E1.



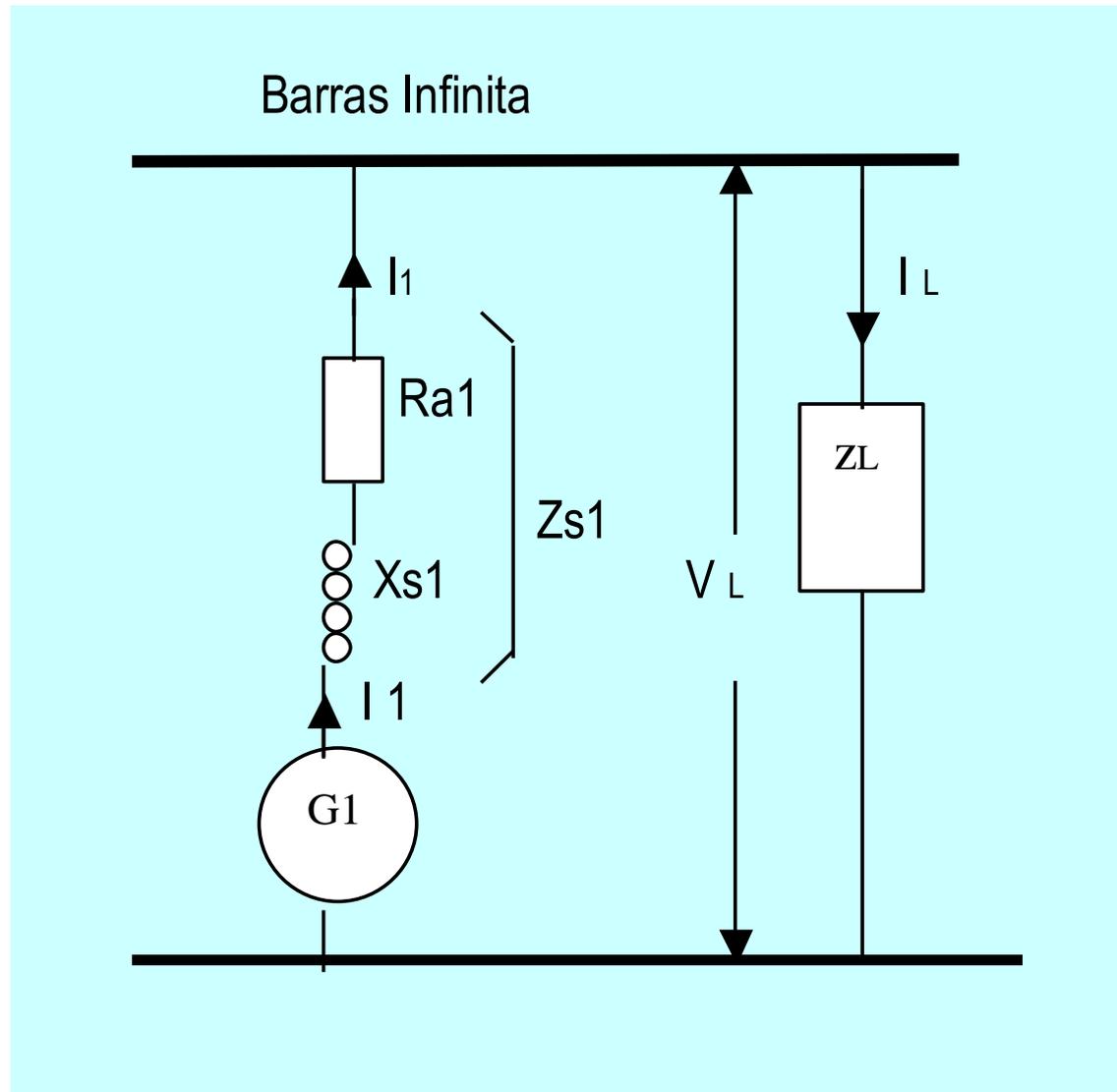
CARACTERÍSTICAS DEL G.S. Y UNA BARRA INFINITA

Una serie de máquinas síncronas que alimentan un sistema con características constantes como son por ejemplo: Tensión y frecuencia.

- Las fuentes naturales que utilizan pueden ser diferentes entre ellas están: Hidroeléctricas, a gas, eólicas, mareomotrices, térmicas, etc.
- La masa inercial de una barra infinita es lo suficientemente grande que se asume que es infinita.
- El dimensionamiento de la barra infinita esta en función de las cargas del sistema.
- El generador que ingresa al sistema, tendrá la función de reforzarlo aportando una carga limitada de P y Q respectivamente.
- Las potencias que definen una barra infinita son expresadas en MW y Mvar.
- Las potencias de los generadores se expresan en KW y Kvar.



GENERADOR SINCRONO Y UNA BARRA INFINITA





ACOPLAMIENTO EN PARALELO DE G.S.

El SEP se interconecta extensamente para ofrecer una economía y confiabilidad de operación.

Para la interconexión se requieren generadores sincrónicos operando en paralelo entre sí en un centro de generación y estar conectado en paralelo por medio de transformadores y línea de transmisión con otras plantas generadoras, diseminadas sobre un área que es prácticamente la nación.



¿ PORQUE SE DEBEN HACER FUNCIONAR EN PARALELO LOS GENERADORES SINCRONOS ?

- Varios generadores pueden alimentar a una mayor carga.
- Teniendo varios generadores se aumenta la confiabilidad de los SEPs, puesto que si alguno de ellos falla, no se suspende totalmente la potencia a la carga.
- El tener varios generadores funcionando en paralelo permite que se pueda desconectar uno o mas de ellos, y los demás pararlo para su mantenimiento.
- Se consigue la utilización máxima de la energía hidráulica.
- Surge la posibilidad de distribuir mas racionalmente la carga entre las centrales a fin de elevar el índice económicos de todo el sistema energético.



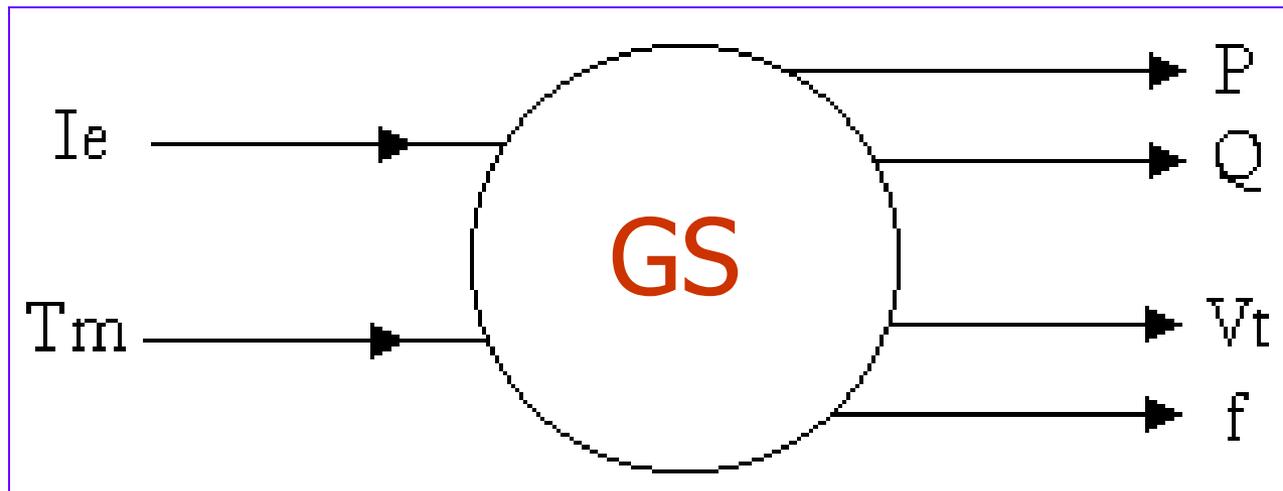
Si un generador se instala en paralelo con una red importante este seguirá el comportamiento de la red.

Si conectamos un generador importante entonces el sistema dependerá mucho de este.

Los generadores sincronicos trabajan normalmente en paralelo alimentando un determinado sistema de potencia que puede estar interconectado con otros sistemas.

En tal caso la frecuencia es fija y la tensión en las barras de la central también debe considerarse fija.

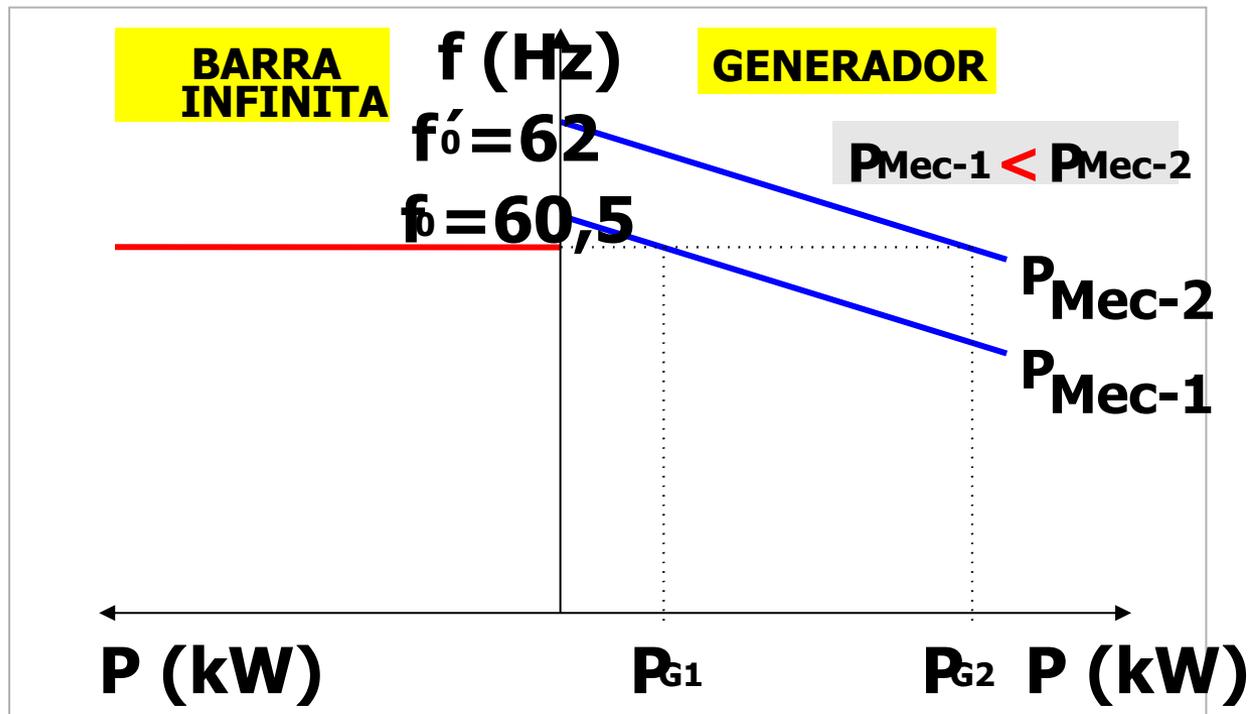
- Esto se debe naturalmente a la gran potencia e inercia mecánica del sistema comparado con la del generador.
- Ahora bien un generador sincrónico puede considerarse en general como un sistema con dos entradas;
 - El torque mecánico T_m aplicado a su eje por el MP.
 - La corriente de excitación I_e .
- Además tiene cuatro salidas (R, S, T y N).





GENERADOR EN PARALELO A UNA BARRA INFINITA

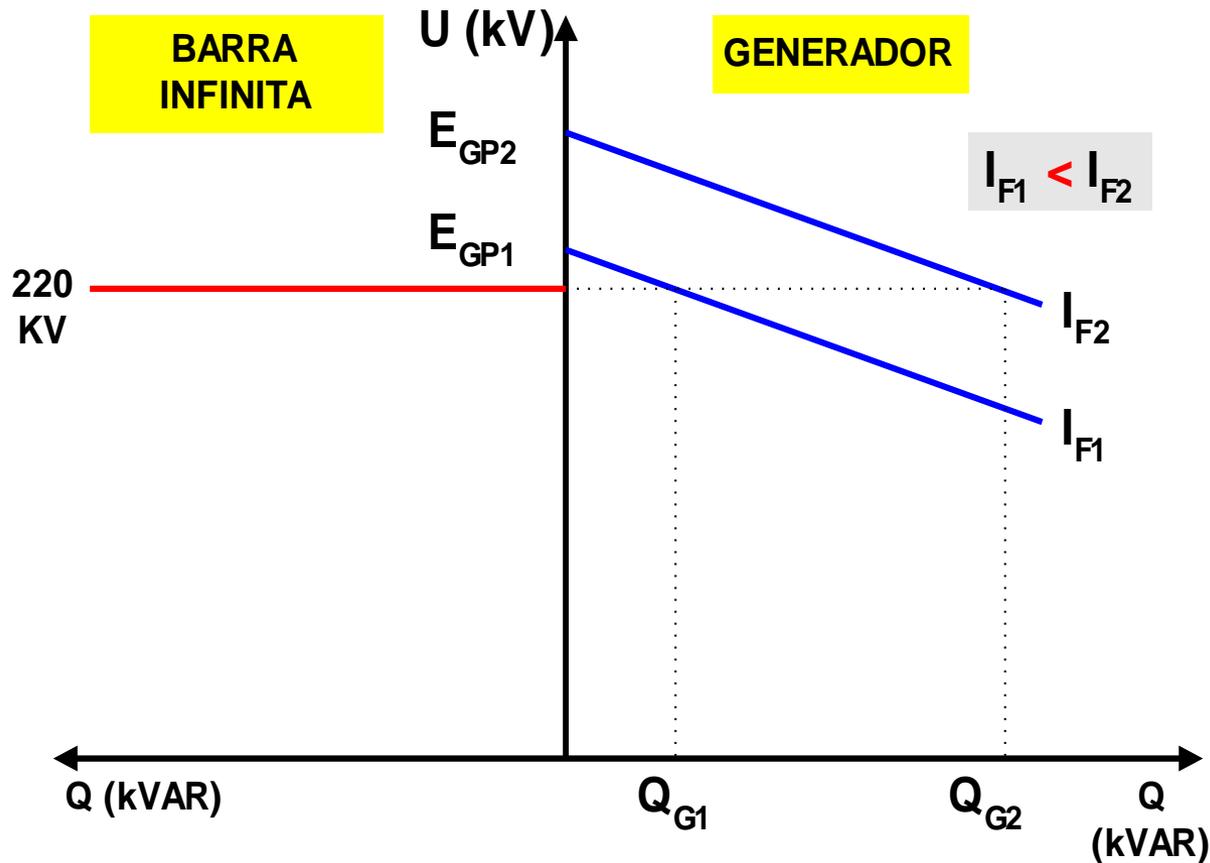
- ✓ Si se incrementa el ingreso de potencia mecánica (P_{Mec}) de entrada en la turbina, se incrementa la potencia generada (P_G), manteniéndose la velocidad.





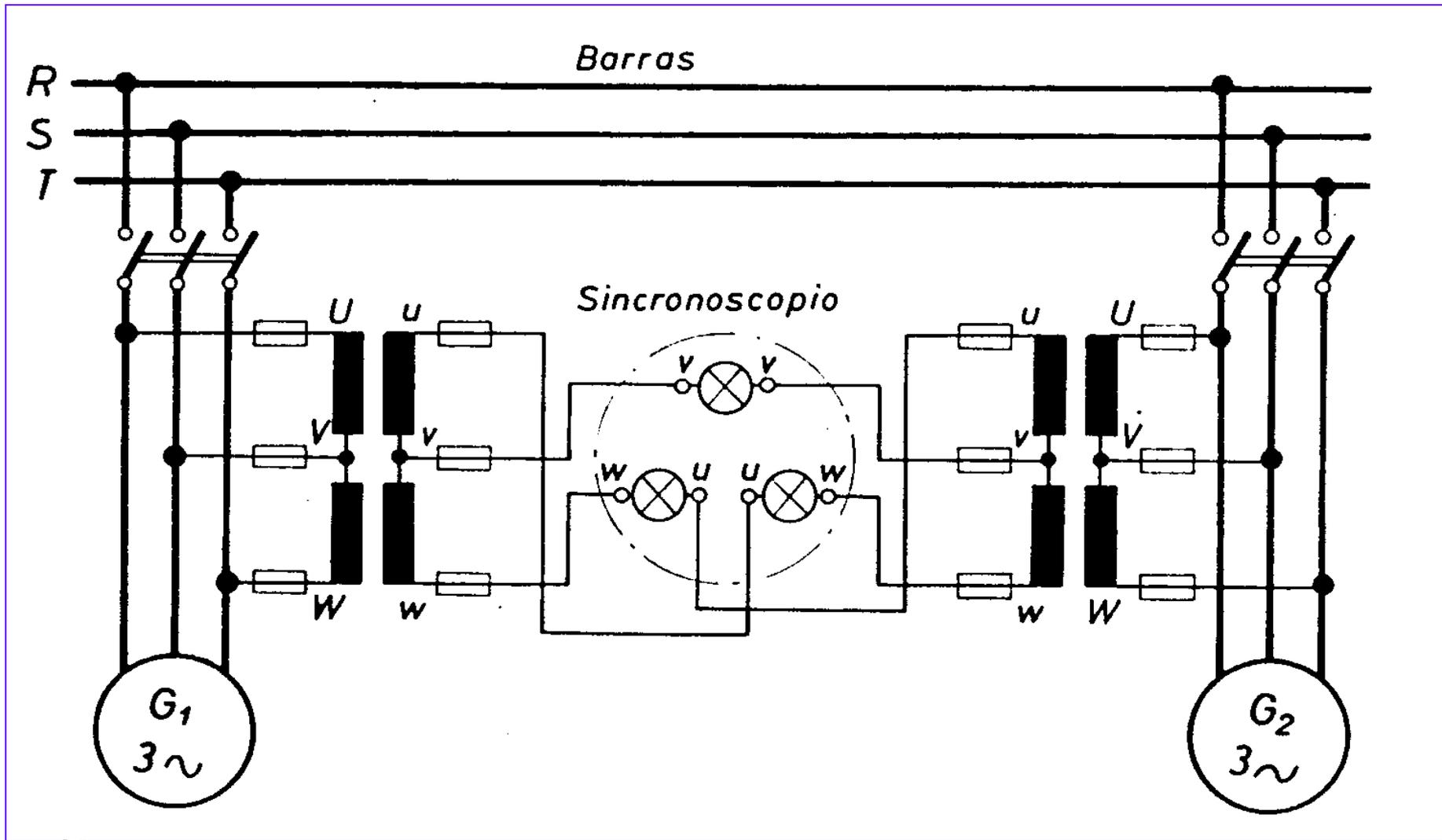
GENERADOR EN PARALELO A UNA BARRA INFINITA

- ✓ Si se incrementa la corriente de excitación (I_F), la tensión no se incrementa, pero si la potencia reactiva generada (Q_G).





SINCRONIZACION DE G.S DE ALTA TENSION POR MEDIO DE UN SINCRONOSCOPIO



IMPORTANTE

- El sincronoscopio de lámparas nos indica que si no están en fases iguales las lámparas se van a prender y apagar alternadamente.
- Cuando estén en fase se prenden y apagan a la vez.
- También se suele colocar en paralelo con una de las lámparas un voltímetro (llamado voltímetro de cero) cuya lectura al pasar por cero indican realmente cual debe ser el instante en que se debe realizar el acoplamiento.
- Para acoplar en paralelo los generadores síncronos se necesita de gran atención , serenidad , calma, y suficientes conocimientos por parte de los operarios .
- Cuando una central esté provista de dispositivos para el acoplo en paralelo se necesitarían también la instalación de un acoplamiento manual , en caso fallara el acoplamiento automático.



REFERENCIAS

CRAMACO® ALTERNATORS. Romão Latino América Cial
Ltda. Monte Carlo - SP - BRAZIL.

Indústria Comercio Importação exportação de Máquinas
POLIMAQ Ltda.

SIEMENS. Etc.

“Seminario Profesional de ‘Máquinas Eléctricas en la
Industria” Ing. Guillermo Cox Zapater

“Generadores Síncronos” Ing. Huber Murillo M.

“Máquinas Síncronas Trifásicas de Gran Porte”
Ing. Huber Murillo M.

Máquinas electromecánicas y electromagnéticas

Leander W. Matsh. editorial Alfaomega edición – 1990

Metrologia aplicada

Jhon Haston Editorial – Nuevo mundo edición - 1987

