

## CAPITULO 2 : OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACION

### 2.1 CONCEPTOS GENERALES SOBRE GENERADORES SINCRONICOS

#### A. Aspectos de diseño

El diseño típico de una máquina síncrona consiste en tres devanados dispuestos sobre la armadura o estator, más un devanado de campo dispuesto sobre el rotor.

La figura 3.1 muestra en forma esquemática la disposición de los devanados.

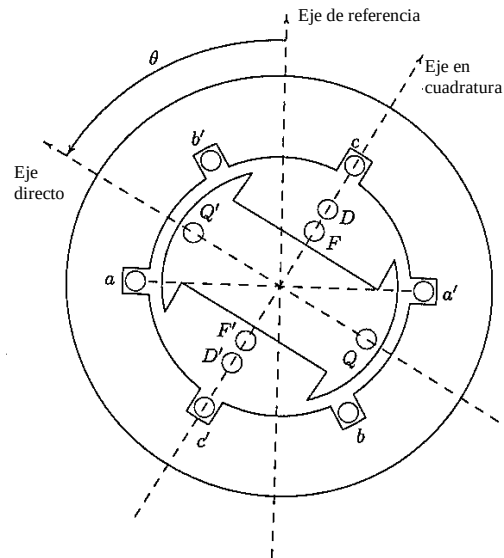


Figura N° 2.1.

El rotor es accionado por una máquina motriz (turbina a vapor o turbina hidroeléctrica, por ejemplo), recibiendo potencia mecánica la cual a través de la interacción entre los campos magnéticos producidos por las corrientes a través de estos devanados, es convertida a potencia eléctrica.

Para una máquina sin saliencias, es decir con rotor en forma de un cilindro, el circuito equivalente por fase es el que se muestra en la figura 2.2.

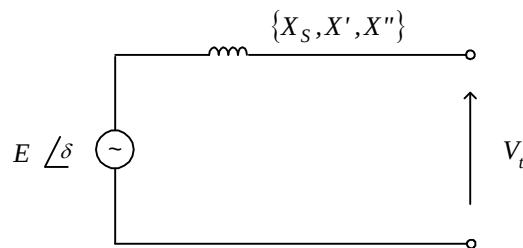


Figura N° 2.2.

La fuente de tensión interna representa a la tensión inducida por efecto Faraday en los devanados del estator y depende de la velocidad de rotación del rotor y de la corriente de excitación.

En estado estacionario, la reactancia entre la fuente interna y los terminales de la máquina corresponde a la reactancia sincrónica  $X_s$ .

En los primeros dos a tres ciclos después de ocurrida una perturbación en el sistema al cual está conectada la máquina (por ejemplo un cortocircuito), el efecto transitorio electromagnético se representa a través de la reactancia subtransitoria  $X''$ . En los siguientes ciclos y mientras se mantienen las oscilaciones, este efecto se representa mediante la reactancia transitoria  $X'$ .

## B. Ecuación de oscilación

Bajo condiciones normales de operación, el ángulo relativo entre el eje del rotor y el eje del campo magnético giratorio resultante, se mantiene fijo. A este ángulo se le denomina ángulo de torque.

Ante una perturbación el rotor se acelera o se desacelera con respecto a este campo magnético giratorio produciéndose un movimiento relativo, descrito a través de la ecuación de oscilación que es de la forma:

$$T_M - T_E = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad \Rightarrow \quad P_a = M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_M - P_E \quad (2-1)$$

en que,  $T_M$  y  $P_M$  son el torque y la potencia mecánica desarrollados por la turbina de accionamiento del generador,  $T_E$  y  $P_E$  son el torque y la potencia electromagnética desarrollados por el generador y  $M$  es la constante de aceleración angular relacionada con el momento de inercia  $J$  de las partes rotatorias, la constante de inercia  $H$ , y la frecuencia  $f$  del sistema a través de las expresiones:

$$M = \frac{J\omega}{p} = \frac{MVA_{nom} \cdot H}{\pi f} ; H = \frac{\text{Energía cinética a velocidad Sincrónica [M. Joule]}}{MVA \text{ nominales de la máquina}} \quad (2-2)$$

$p$  es el número de pares de polos tal que  $\delta = p\delta_g$  [° eléctricos] que corresponde a lo que a continuación se esquematiza:

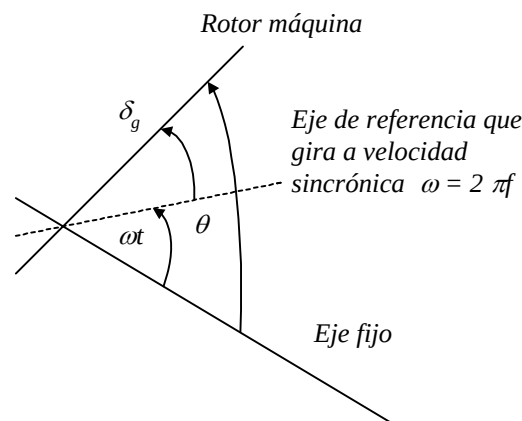


Figura N° 2.3.

Valores típicos de H:

| Tipo de máquina           | Constante de inercia H [MJ / MVA ] |
|---------------------------|------------------------------------|
| Turbogenerador            | 3 a 9                              |
| Generador Hidráulico      | 2 a 4                              |
| Condensador<br>sincrónico | 1 a 1.5                            |
| Motor sincrónico          | 2                                  |

### C. Modelos de la máquina sincrónica para estudios de estabilidad transitoria

Consideremos una parte de un sistema eléctrico consistente en un generador que abastece una parte de un consumo local con una interconexión a través de un circuito de enlace (Tie Line) a un sistema de gran capacidad, que se puede representar a través del concepto de barra infinita. El esquema unilineal simplificado es el siguiente

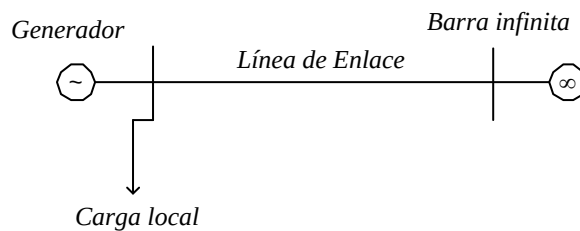


Figura N° 2.4.

Si la carga local se presenta como una impedancia constante  $Z_C$ , el circuito equivalente para análisis de estabilidad angular subtransitoria de este subsistema es el siguiente:

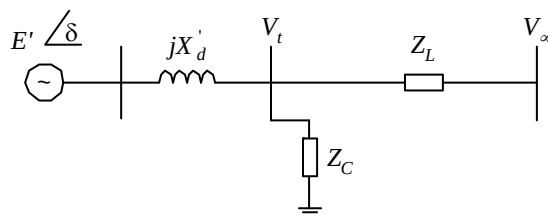


Figura N° 2.5.

$Z_L$  es la impedancia del circuito de enlace;  $X'_d$  es la reactancia transitoria del generador;  $E' \delta$  es la tensión interna transitoria asociada;  $V_\infty$  es la tensión mantenida por el gran sistema.

Mediante una transformación circuital se obtiene el siguiente circuito equivalente:

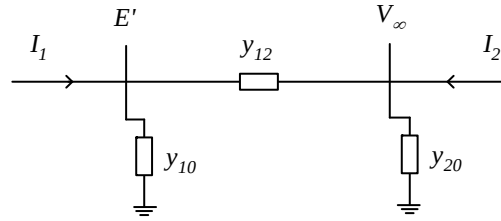


Figura N° 2.6.

Todos los valores están expresado en p.u. base común y las admitancias están determinada por las siguientes expresiones:

$$y_{10} = \frac{Z_L}{j X'_d Z_C + j X'_d Z_L + Z_L Z_C} \quad (2-3)$$

$$y_{20} = \frac{j X'_d}{j X'_d Z_C + j X'_d Z_L + Z_L Z_C} \quad (2-4)$$

$$y_{12} = \frac{Z_C}{j X'_d Z_C + j X'_d Z_L + Z_L Z_C} \quad (2-5)$$

Las ecuaciones nodales correspondientes son:

$$\dot{I}_1 = \left( \dot{y}_{10} + \dot{y}_{12} \right) \dot{E}' - \dot{y}_{12} \dot{V}_\infty \quad (2-6)$$

$$\dot{I}_2 = -\dot{y}_{12} \dot{E}' + \left( \dot{y}_{20} + \dot{y}_{12} \right) \dot{V}_\infty \quad (2-7)$$

Estas ecuaciones se pueden escribir en forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \dot{Y}_{12} \\ \dot{Y}_{21} & \dot{Y}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{E}' \\ \dot{V}_\infty \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

$$\text{en que } \dot{Y}_{11} = \dot{Y}_{11} \quad \theta_{11} \neq \angle \dot{y}_{10} + \dot{y}_{12} \quad ; \quad \dot{Y}_{12} = \dot{Y}_{12} \quad \theta_{12} \neq \angle -\dot{y}_{12} \quad (2-9)$$

$$\dot{Y}_{21} = \dot{Y}_{12} = -\dot{y}_{12} \quad ; \quad \dot{Y}_{22} = \dot{Y}_{22} \quad \theta_{22} \neq \angle \dot{y}_{20} + \dot{y}_{12} \quad (2-10)$$

La potencia activa inyectada al nodo 1 es:

$$\begin{aligned} P_e &= \text{Parte Real} \left\{ \dot{E}' \dot{I}_1^* \right\} \\ &= |\dot{E}'|^2 \dot{Y}_{11} \cos \theta_{11} + \dot{E}' \dot{V}_\infty \dot{Y}_{12} \cos (\delta - \theta_{12}) \end{aligned} \quad (2-11)$$

Si como aproximación se desprecian todas las resistencias, se obtiene la ecuación típica Potencia-ángulo:

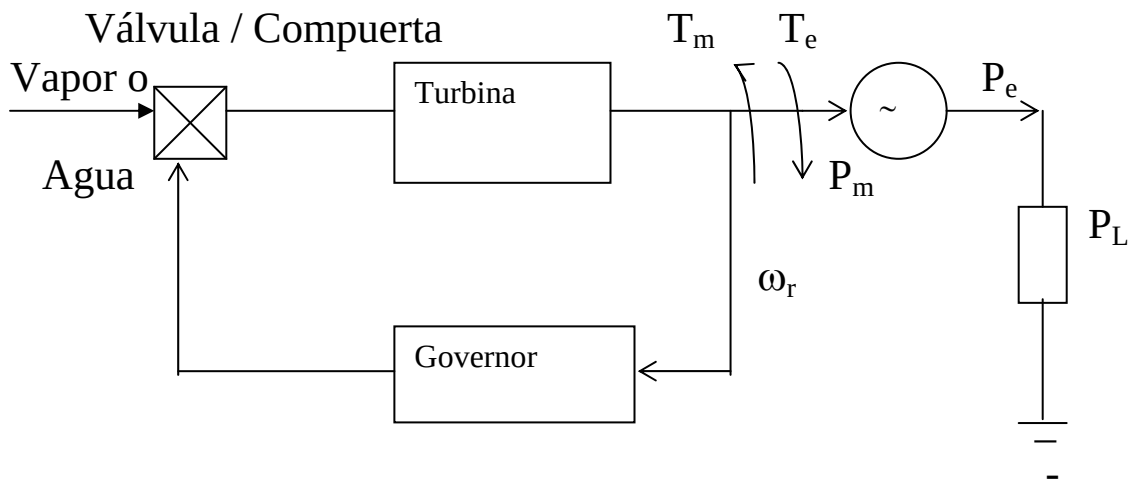
$$P'_e = \frac{\dot{E}' \dot{V}}{X_{12}} \sin \delta = P_{\text{máx}} \sin \delta \quad (2-12)$$

$$\dot{E}' = \dot{V}_t + j X'_d \dot{I}_a \quad (2-13)$$

con  $\dot{I}_a$  = corriente previa a la perturbación

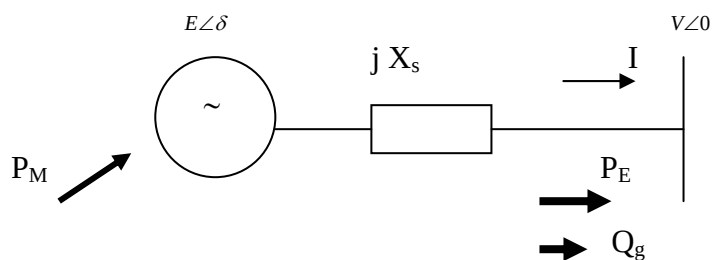
## 2.2 CONCEPTOS BASICOS SOBRE CONTROL DE POTENCIA ACTIVA GENERADA

Para un generador sincrónico, la potencia activa generada queda determinada por la potencia mecánica de salida de la turbina que lo impulsa. Esto se puede esquematizar en la siguiente forma:



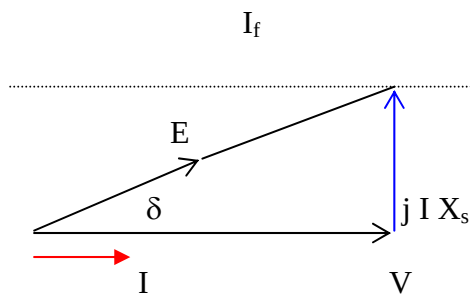
## 2.3 CONCEPTOS BASICOS SOBRE CONTROL DE POTENCIA REACTIVA GENERADA

Esta potencia se puede controlar ajustando la corriente de excitación. Consideremos un turbogenerador conectado a un gran sistema, de modo que la tensión en sus terminales y la frecuencia se mantengan constantes independiente de los ajustes que se efectúen en esta máquina.



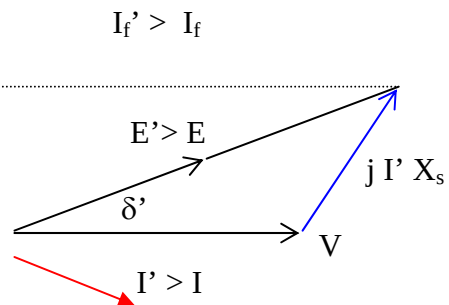
Si además la potencia mecánica de entrada al generador es constante, mediante un diagrama fasorial se observa que al aumentar( disminuir ) la corriente de campo la potencia reactiva generada aumenta ( disminuye ).

## Corriente de campo



$$P_M \approx P_E = \frac{V \cdot E}{X_s} \sin \delta = \text{constante}$$

## Sobreexcitación



$E \cdot \sin \delta$  se debe mantener esencialmente constante

## 2.4 LIMITES OPERACIONALES EN GENERADORES SINCRÓNICOS

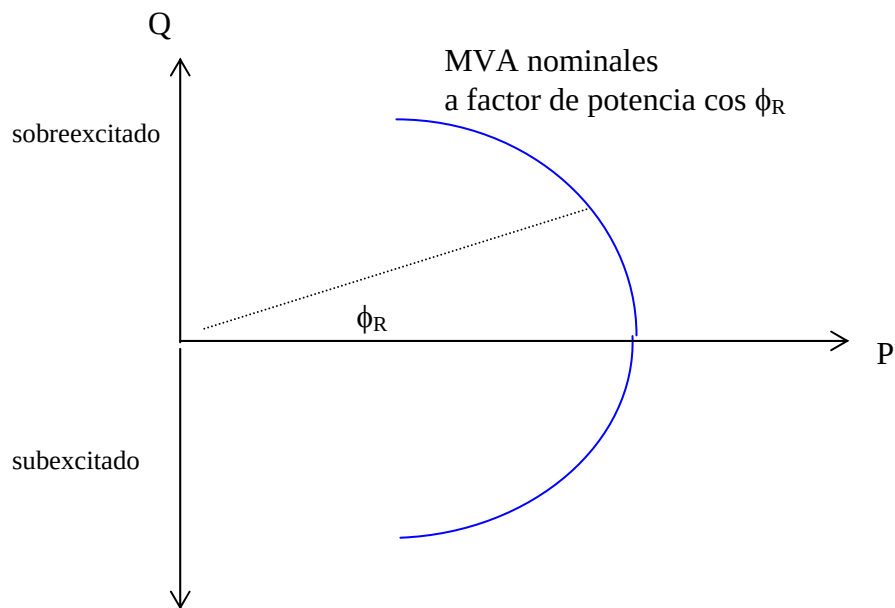
La capacidad de los generadores sincrónicos se especifica en términos de los MVA máximos que pueden entregar en forma permanente a la red para una tensión y factor de potencia especificados.

El límite de potencia activa está determinado por la capacidad del equipo motriz de modo que su valor quede dentro de los MVA nominales.

La capacidad de potencia reactiva está limitada por 3 consideraciones: *Límite de corriente de armadura, límite de corriente de campo, calentamiento en la región terminal del estator y rotor.*

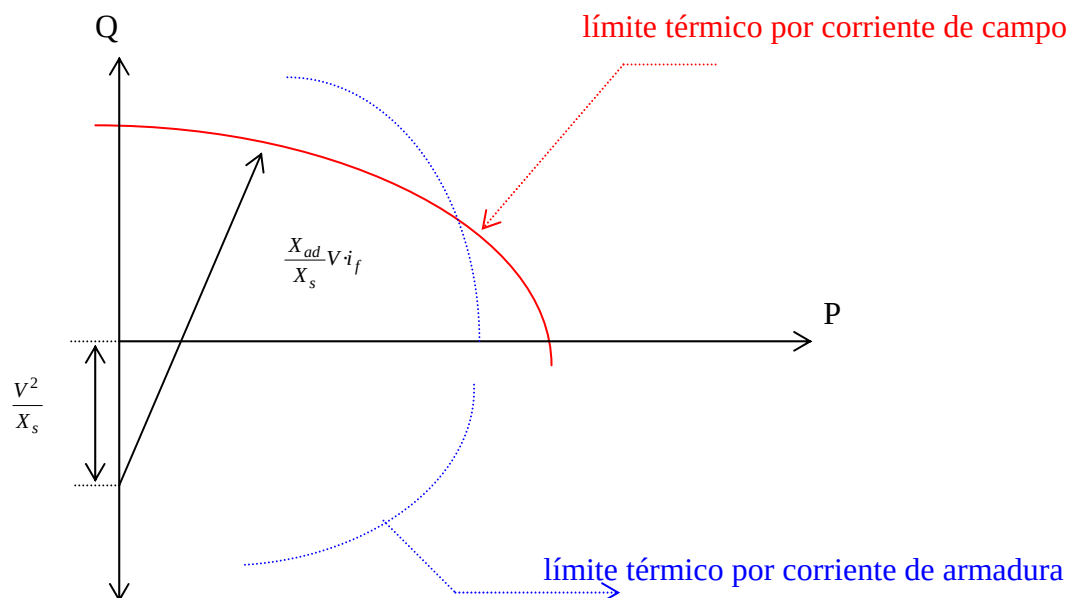
- Límite de corriente de armadura

La corriente por los devanados del estator origina pérdidas Joule  $I^2 R$  lo que influye en la elevación de temperatura de la máquina



- Límite de corriente de campo

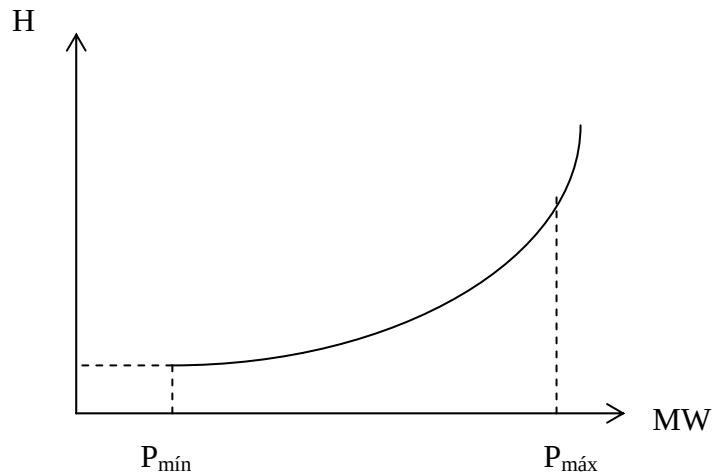
Las pérdidas Joule en el circuito de campo imponen un segundo límite en los MVA de un generador síncrono y combinando con el contorno anterior se tiene



## 2.5 COSTOS DE OPERACIÓN DE UNIDADES GENERADORAS

Este costo depende entre otros factores del consumo de combustible, tipo de combustible empleado, rendimiento térmico de la máquina, etc.

Típicamente el consumo de combustible ( denotado aquí como  $H$  ) no se expresa en unidades de peso o de volumen, sino en unidades de calor necesario tales como kcal/ hora o BTU/ hora ( 1 BTU es la cantidad de calor requerida para elevar en  $1^{\circ}$  F la temperatura de 1 libra de agua ). Este consumo varía con la potencia generada según una curva de la forma mostrada en la siguiente figura:



Si se multiplica  $H$  por el costo medio del combustible ( por ejemplo \$ / kcal ) se obtiene la curva de costo medio de generación  $C$  versus potencia eléctrica  $P$ .

El costo medio del combustible debe incorporar no sólo el combustible propiamente tal, sino otros gastos variables con el volumen de producción, que se pueden controlar a través de una estrategia apropiada, tales como mantenimiento, manejo de residuos, etc.

El rendimiento térmico medio de la máquina correspondiente a una potencia  $P$  es  $P / H$ : Su inverso  $H / P$  se denomina razón calórica media

## 2.6 COSTOS MARGINALES

El costo marginal se obtiene multiplicando la razón calórica incremental  $dH / dP$  determinada en forma experimental, por el costo del combustible empleado lo que generalmente se expresa en \$/h / MW.

Una aproximación comúnmente usada es aproximar la curva de costo marginal (  $C_{\text{marg}}$  ) en función de la potencia  $P$  por un polinomio de la forma:

$$C_{\text{marg}} = \alpha + \beta \cdot P + \gamma \cdot P^2$$



Los coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  se pueden obtener del análisis de curvas obtenidas empíricamente y los órdenes de magnitud de valores típicos son:

$\alpha$  entre 7 a 10 US\$ / MWh ;  $\beta$  entre 0.02 a 0.05 US\$ / MWh/ MW ;  
 $\gamma$  entre 0.00007 a 0.00015 US\$ / MWh/ MW<sup>2</sup>

Se debe considerar los siguientes costos marginales en un sistema de generación de energía eléctrica:

### ***Costo Marginal de Corto Plazo***

Es el costo en que se incurre para generar una unidad adicional de energía eléctrica considerando la demanda y el parque de generación disponible

### ***Costo marginal de potencia de punta***

Es el costo unitario de incrementar la capacidad instalada de generación de potencia de punta