



Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Mecánica
Departamento de Electricidad

Estabilidad de Potencia UNI - FASP

Estabilidad de Sistemas de Potencia - Panorama

Fredy Saravia Poicón
Ing. Electricista, MSc
fsaravia@kiewasociados.com

Lima, Diciembre de 2007

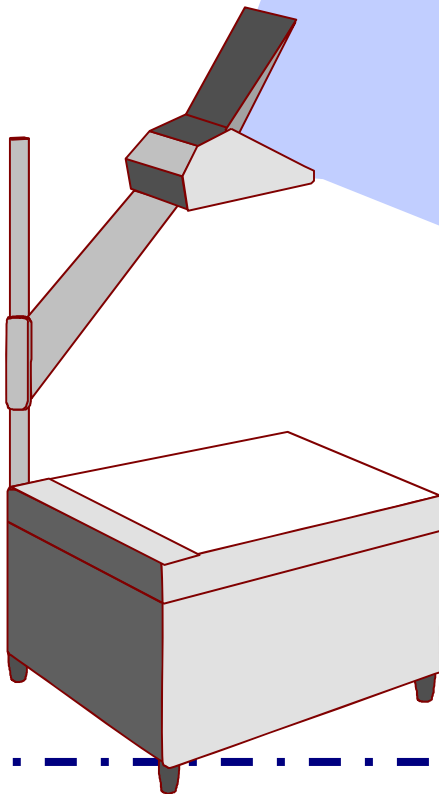


Panorama de la Estabilidad

CONTENIDO

- ❑ **Objetivos**
- ❑ **Conceptos Principales**
- ❑ **Ecuación de Angulo de Potencia.**
- ❑ **Tipos de Estabilidad**

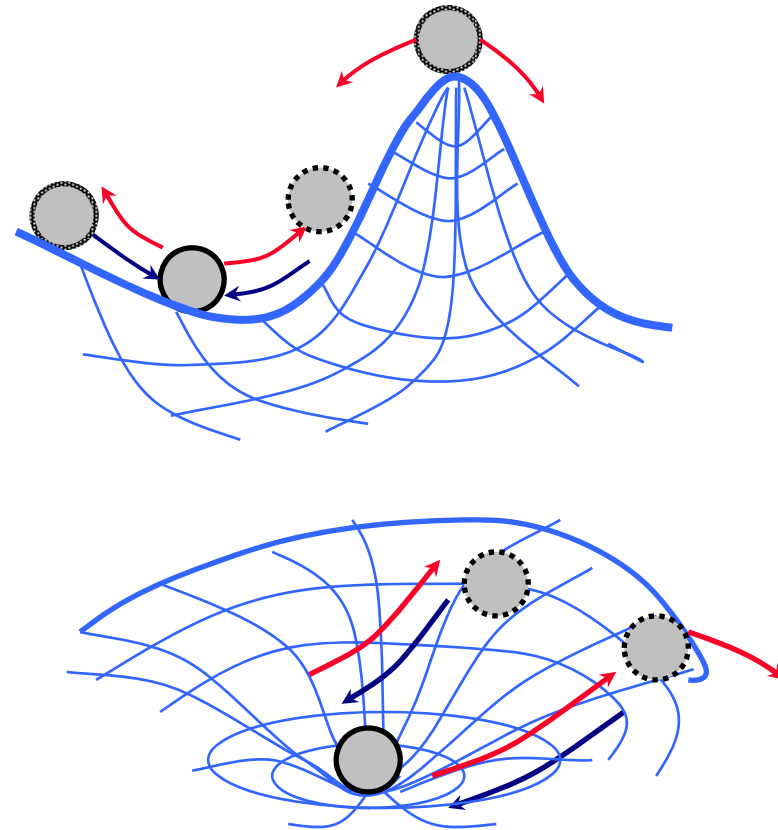
Estabilidad de Potencia UNI - FASP





Objetivos

- ❑ Exponer los **conceptos** principales del **problema de la estabilidad**.
- ❑ Definir los principales **variables eléctricas y mecánicas** que intervienen en el análisis.
- ❑ Describir las **tipos de estabilidad** que se evalúan en SEP.
- ❑ Cómo se **formula el problema** de estabilidad y como se resuelven.
- ❑ Conclusiones





Definiciones Importantes

- ❑ **Sistema de Potencia** - Conjunto de G, T&D, protección y compensación.
- ❑ **Estado Estacionario** - Condición de operación donde las variables de operación se consideran constantes.
- ❑ **Operación Síncrona** – Si la velocidad angular de un G es igual a la frecuencia angular de la red.
- ❑ **Perturbación** – Cambio o secuencia de cambios de las variables del sistema.
 - Pequeñas- Normales, estado estacionario. Ec. lineales
 - Grandes- Cortos, pérdidas de líneas. Ec. no lineales



Estabilidad del Sistema

- ❑ **Estabilidad** - Capacidad del sistema de operar normalmente o recuperar esta condición, luego de producida una perturbación.
- ❑ **Inestabilidad** – Proceso en el cual un generador o grupo de generadores salen de sincronismo (“out of step”), ocasionando variación de frecuencia en el sistema.
- ❑ **Tipos de Estabilidad**
 - Estabilidad del **ángulo del rotor**
 - Permanente o Estacionaria- Modo local e inter-área
 - Transitoria. De 0 a 10 s.
 - Estabilidad de **Tensión**
 - Estabilidad de **Media y Larga duración**



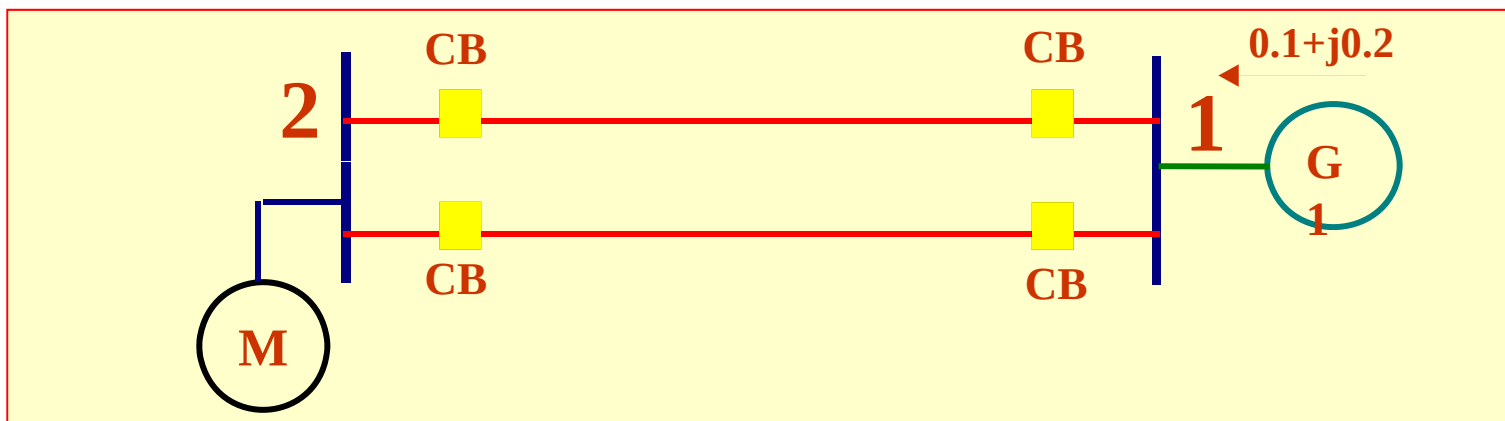
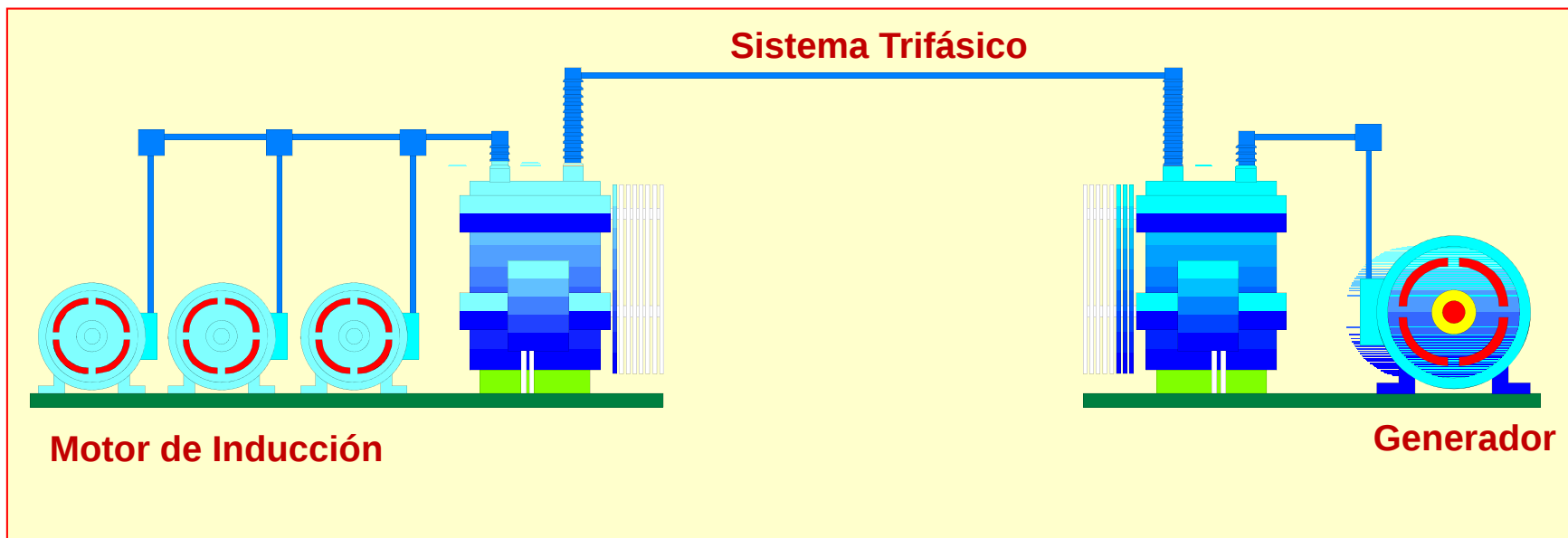
Importancia de la Estabilidad

- ❑ El estudio de la estabilidad es importante por:
 - La seguridad del sistema que permite prever condiciones o configuraciones críticas del sistema de potencia.
 - Permite apreciar en forma cuantitativa y cualitativa los sistemas de protección y control en generadores, líneas y sistemas de compensación.
 - El desarrollo de los sistemas requieren mayor y mejor control
- ❑ No sólo es importante **comprender el problema** de la estabilidad, sino también poder **prever** el desarrollo de los procesos electromecánicos y **controlarlos**.



Sistema de Potencia

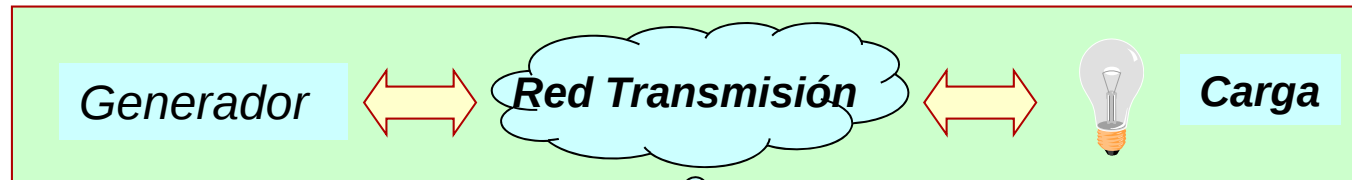
Estabilidad de Potencia UNI - FASP



Generador que suministra energía a una carga motriz



Estabilidad de Sistemas de Potencia



Estabilidad de Angulo

Estabilidad de Tensión

Conceptos

Dinámica Máquina

Curvas $P\delta$

Curva PV/QV Dinámica Carga

Base

Variaciones

Estabilidad Transitoria

Estabilidad Permanente

Colapso de Tensión

Aplicaciones

Criterio de Areas Iguales

Método de Eigen-valores

Métodos

Métodos Numéricos

Mejoras
Compensación

PSS

Compensación Reactiva

Mejoras

Estabilidad de Potencia UNI - FASP



Variables que Intervienen

- ❑ Variables de Operación
 - Tensión
 - Frecuencia
 - Flujos en Líneas
- ❑ Parametros del Sistema
 - Parámetros de Generadores
 - Parámetros de LLTT, Trafos y Compensación
 - Parámetros de la Carga
- ❑ Para el análisis se aplican las leyes de la mecánica, ya que es un problema de cuerpos en movimiento. Par

$$T = J \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

T – Torque de la máquina, Joule/rad ó N.m

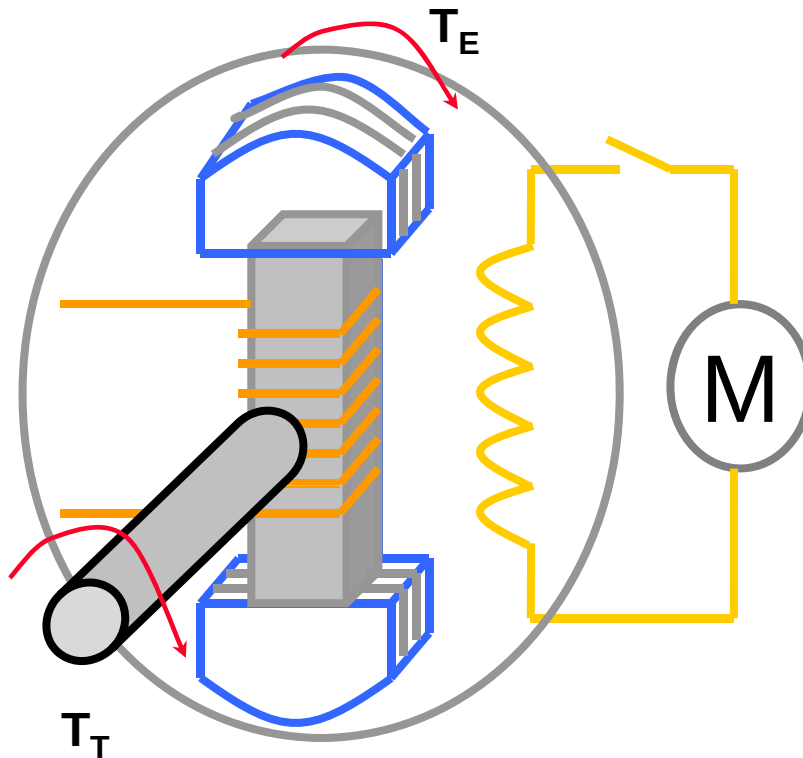
J – Momento de inercia, kg-m²

$\alpha = d^2\theta/dt^2$ - Aceleración angular, rad/s²



Condición de Estabilidad

Estabilidad de Potencia UNI - FASP



□ Torque de Aceleración-

$$T_a = T_T - T_E$$

$$P_a = P_T - P_E$$

Estado permanente Estable $T_a = 0$

Salida de Sincronismo $T_a \neq 0$

$T_a > 0$ – Sobre frecuencia

$T_a < 0$ – Subfrecuencia

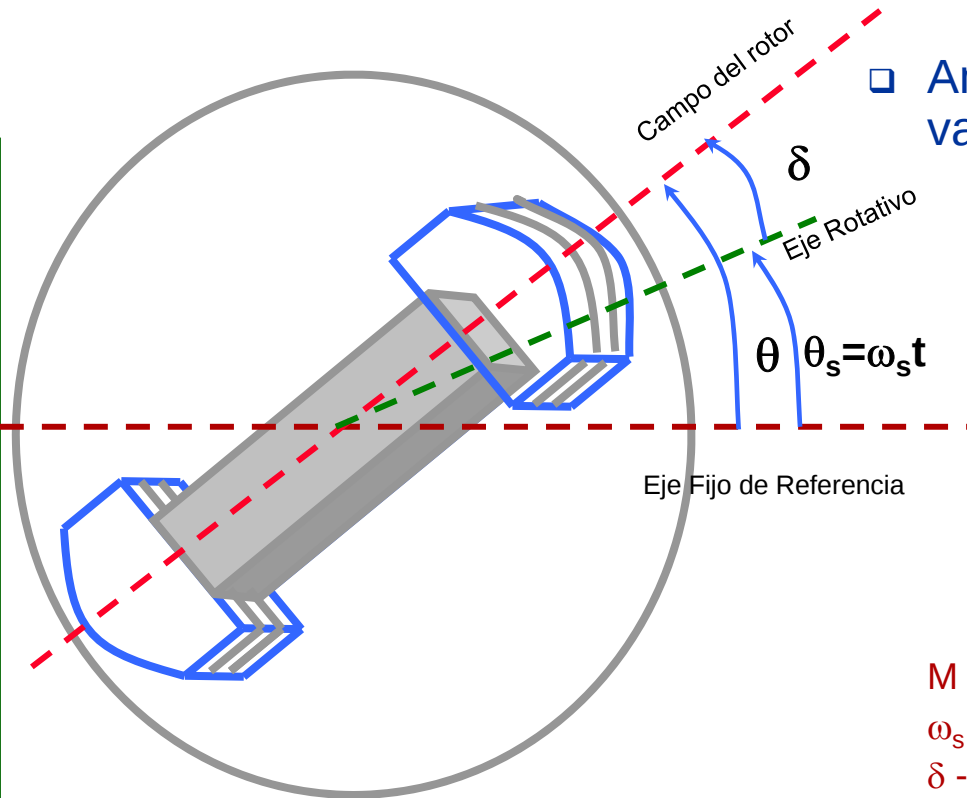
$$P_a = T_a \cdot \omega$$

ω - velocidad angular, rad/s



Ecuación de Oscilación

Estabilidad de Potencia UNI - FASP



- Ante perturbaciones el ángulo θ varía en el tiempo

$$\theta = \omega_s t + \delta$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_s + \frac{d\delta}{dt}$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d^2\delta}{dt^2}$$

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_T - P_E$$

M – Momento angular

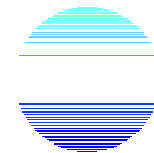
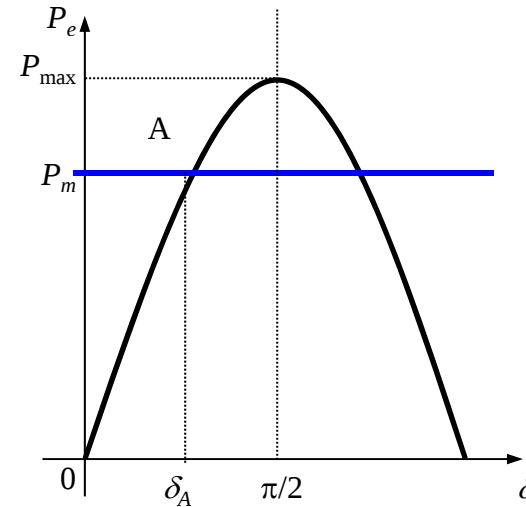
ω_s – velocidad angular de eje rotativo

δ - Desplazamiento angular respecto al eje rotativo

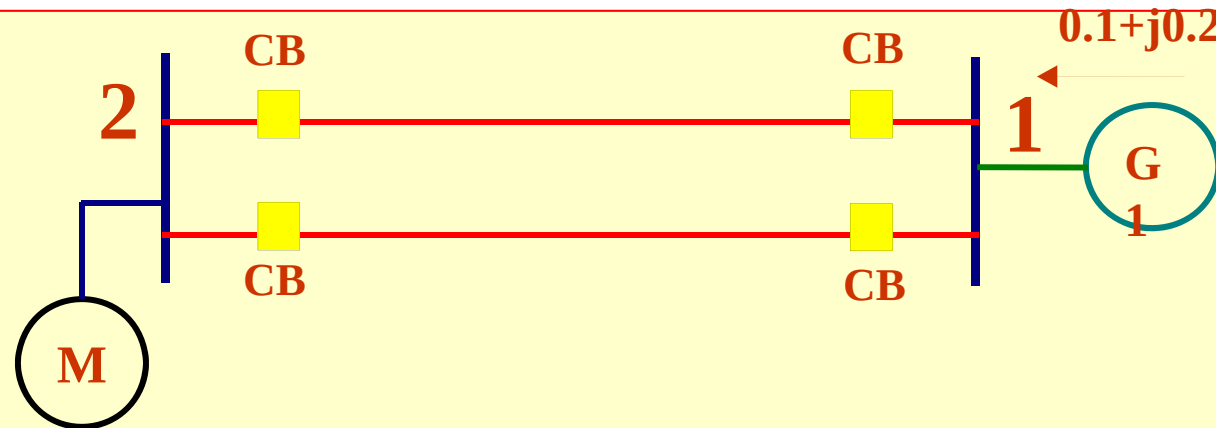


Formulación del Problema

$$P_T = \frac{E_G \cdot V_2}{X_S} \cdot \cos \delta$$



Estabilidad de Potencia UNI - FASP

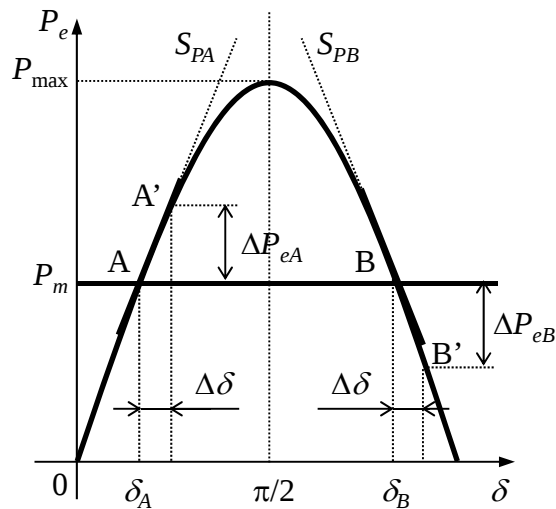


Generador que suministra energía a una carga motriz



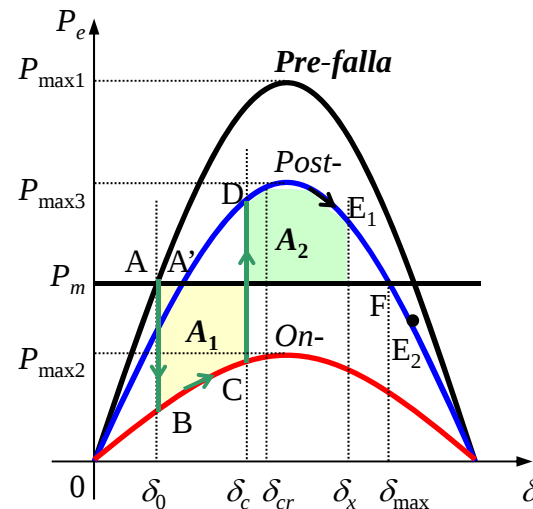
Estabilidad de Sistemas de Potencia

Estabilidad de Potencia UNI - FASP

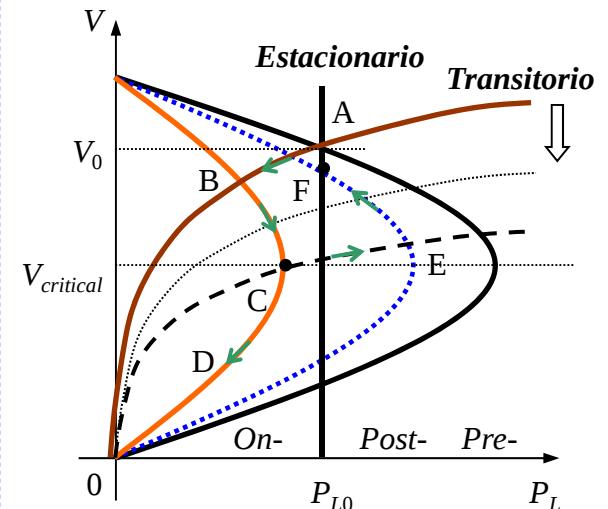


Estabilidad Permanente

Estabilidad de Angulo



Estabilidad Transitoria

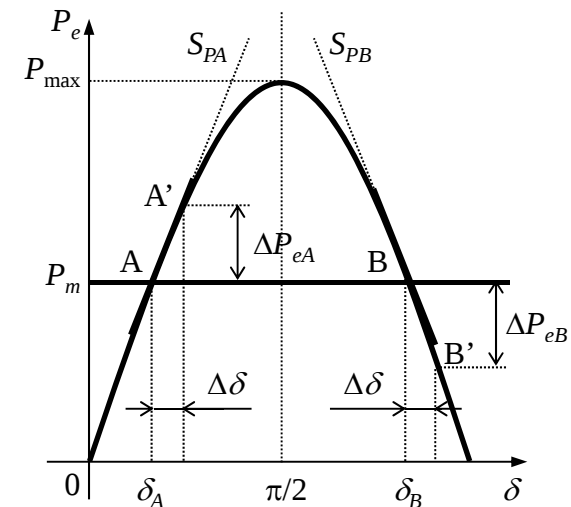


Estabilidad de Tensión



Estabilidad de Angulo – Estabilidad Permanente (Estacionaria)

- ❑ Coeficiente de Sincronización
 $S_p = P_{\max} \cos \delta$
- ❑ Coeficiente de Amortiguamiento D
- ❑ Dos Puntos de Operación
 - A: $S_p > 0$, Estable
 - B: $S_p < 0$, Inestable
- ❑ Linearización & Eigen-valores
 - Característica de matriz A
 - $\text{Re}(\lambda) \geq 0$, Estable
 - $\text{Re}(\lambda) < 0$, Inestable
 - D apoya la estabilidad
- ❑ PSS (Power System Stabilizer)
 - Aumentar D mediante D_{PSS}



$$\begin{cases} \frac{2H}{\omega_s} \frac{d\Delta\omega}{dt} = -S_p \Delta\delta - D\Delta\omega \\ \frac{d\Delta\delta}{dt} = \Delta\omega \end{cases}$$

Aplicable a cualquier sistema



Estabilidad de Angulo – Curva $P\delta$

□ Ecuación Potencia-Angulo

$$P = P_{\max} \sin \delta = \frac{E'V}{X_{\text{total}}} \sin \delta$$

□ Factores que afectan la Curva $P\delta$

1. Original

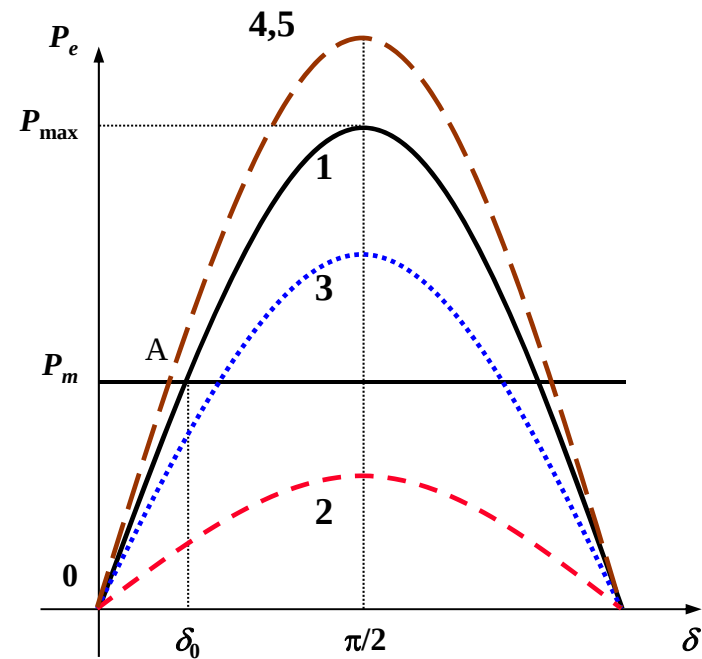
2. Fault

3. Salida de Línea

4. Compensación

5. Sistema de Excitación $\Rightarrow E'$

} $\Rightarrow X_{\text{total}}$





Estabilidad de Angulo – Dinámica de Máquina

□ Ecuación de Oscilación

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e$$

□ Aplicaciones de Ecuación de Oscilación

- Agrupamiento de máquina en una central
 - Una central puede equivaler a una máquina virtual con potencia total P_m and P_e
 - Reduce el número de ecuaciones de oscilación

■ Rotación relativa entre dos máquinas

- La estabilidad de un generador dentro de un sistema es una propiedad relativa asociado con su comportamiento dinámico respecto a otros generadores del sistema

δ : Angulo eléctrico del rotor del generador

ω_s : Velocidad síncrona

H : Constante de inercia de la máquina

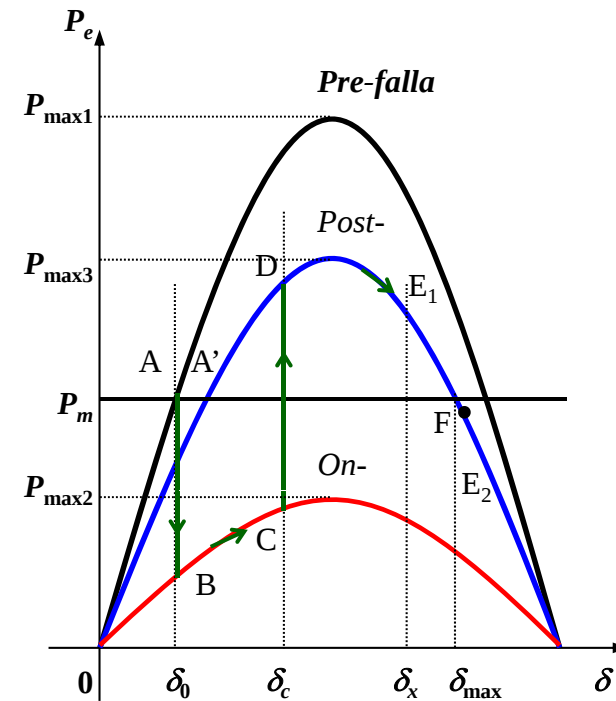
P_m : Potencia Mecánica de entrada

P_e : Potencia Eléctrica de salida



Estabilidad de Angulo – Estabilidad Transitoria

- Desbalance de Potencia
 - $P_m > P_e$, motor se acelera
 - $P_m < P_e$, motor se desacelera
- Caso Estable
 - $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E_1 \rightarrow A'$
- Caso Inestable $\Rightarrow$ Pérdida de Sincronismo
 - $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow F \rightarrow E_2 \dots$
- Mejora de Estabilidad Transitoria
 - Reducir desbalance de potencia y el area de aceleración
 - Reducir P_m : Gobernador
 - Incrementar E' : Excitación
 - Reducir X_{Total} : Compensación o refuerzos
 - Reducir duración de fallas: Sistemas de protección



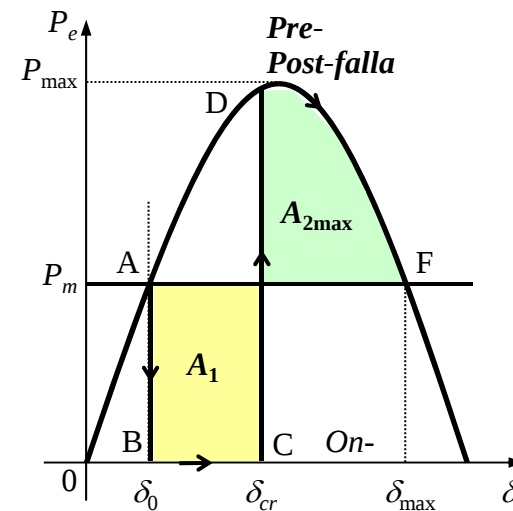
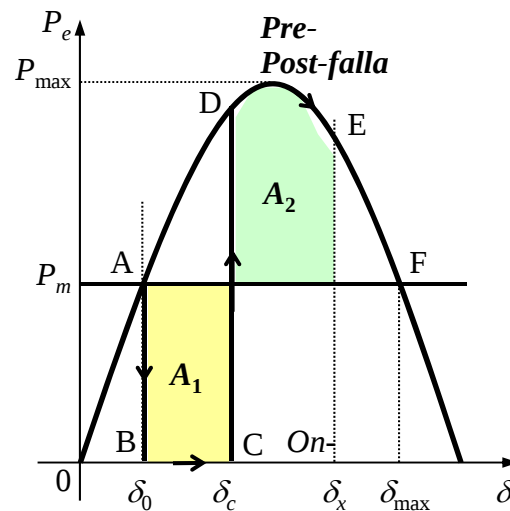


Estabilidad de Angulo – Método de Análisis

□ Método de Areas Iguales

$$A_1 = A_2 \Rightarrow \delta_x$$

□ Angulo/Tiempo crítico de despeje (δ_{cr}/t_{cr}) Cuando $\delta_x = \delta_{max}$ ($A_1 = A_{2max}$)

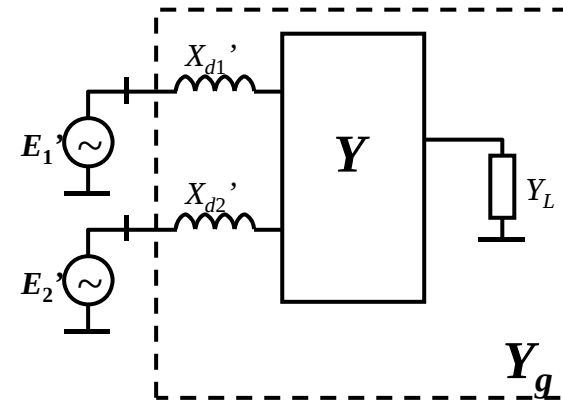


Adecuado para pequeños sistemas (1-máquina-a -bus - ∞ , 2-máquinas)



Estabilidad de Angulo – Método de Análisis

- ❑ Método Numerico
 - Dos tipos de modelos asumidos
 - Modelo Clásico
 - Modelo completo
 - Método Numérico usando modelo clásico
 - Modelo de generador: E' ($E' \angle \delta$) and X_d'
 - Modelo de Carga: $Z_L = V_0^2/S^*$
 - Matriz Y_g para diferentes períodos de tiempo
 - Ecuación potencia-ángulo para diferentes períodos de tiempo
 - Integración Numérica de las Ecuaciones de Oscilación
 - Método de Euler & Método Modificado de Euler
 - Tiempo de integración (“de paso”)

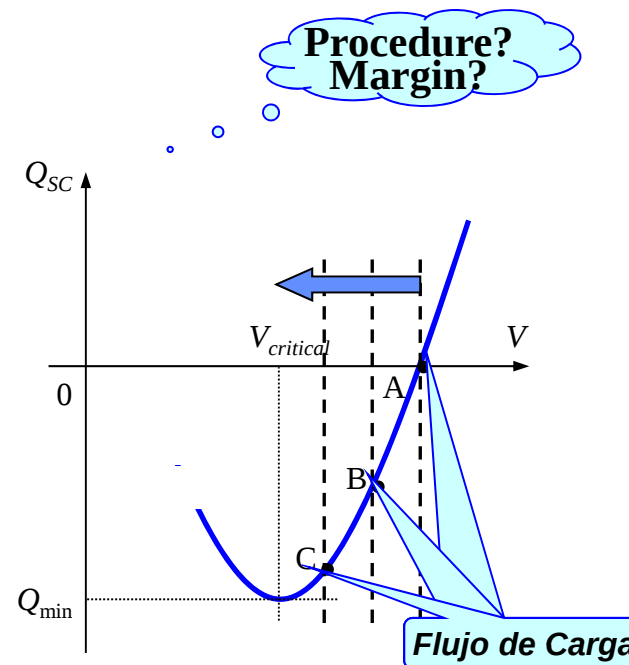
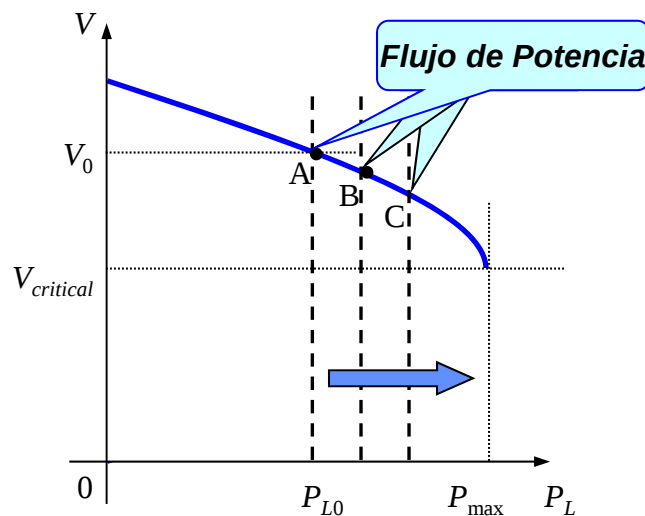


Aplicable a sistemas grandes



Estabilidad de Tensión – Curva PV/QV

- Característica de la Capacidad de Transferencia de la Red de Transmisión
 - Carga puramente resistiva : $P_{\max}$, V_{critica}
 - Caso general : $P_{\max}$, V_{critica}
- Curva PV
- Curva QV



Procedure?
Margin?



Estabilidad de Tensión – Variación de la Curva PV

- ❑ Factores que afectan la curva PV
- ❑ Equipos de Compensación Reactiva
 - Capacitores fijos en series
 - Capacitores variable en serie
 - Capacitores Fijos shunt
 - Switched shunt capacitors
 - Compensadores Síncronos
 - Static Var Compensation (SVC)
 - Equipos FACTS (p.e. STATCOM)

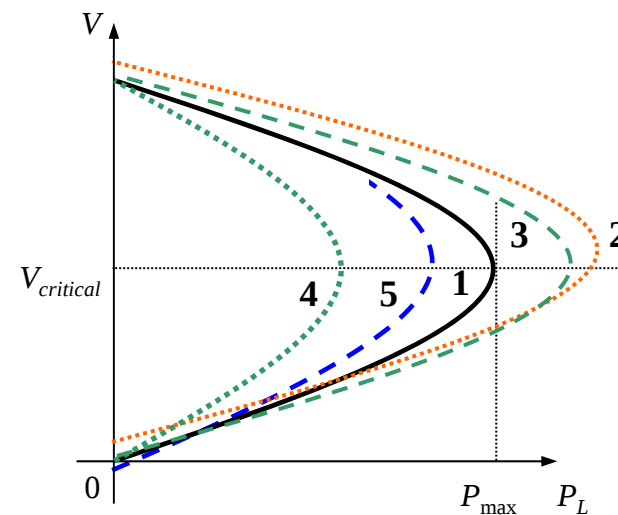
1. Original

2. Compensación Shunt

3. Compensación Serie

4. Contingencias

5. Límite Q de Generador





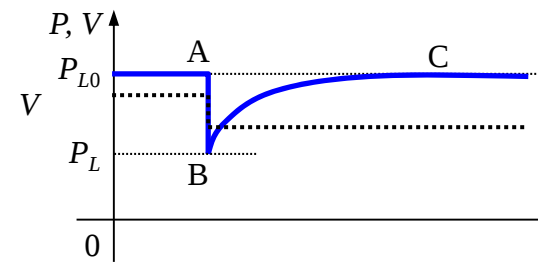
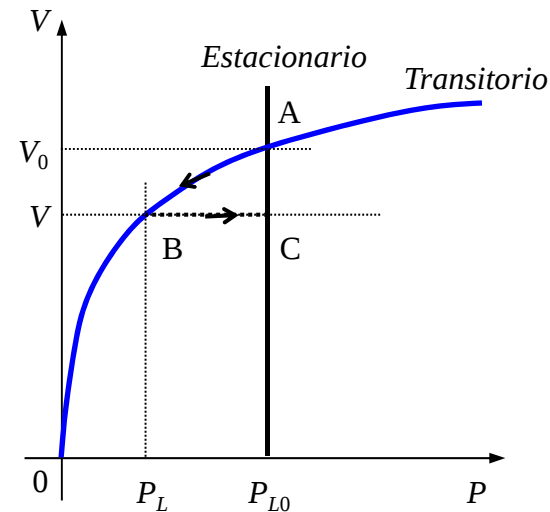
Estabilidad de Tensión – Dinámica de la Carga

- ❑ Característica de respuesta de la Carga
 - Característica Transitoria

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha, Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta$$

- Característica Estacionaria

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^a, Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^b$$



Q es similar a P

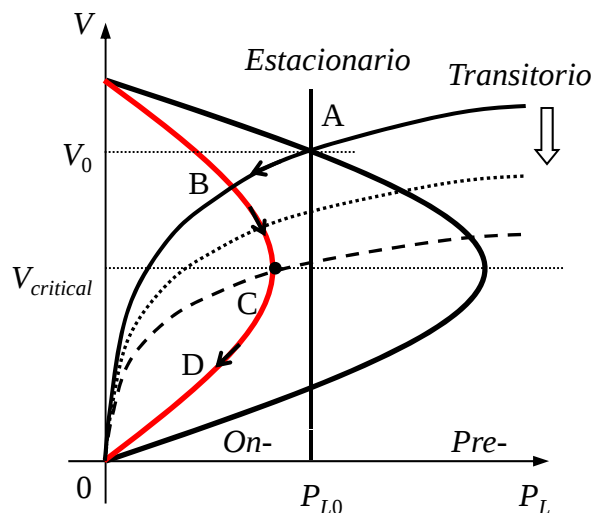


Estabilidad de Tensión – Colapso de Tensión

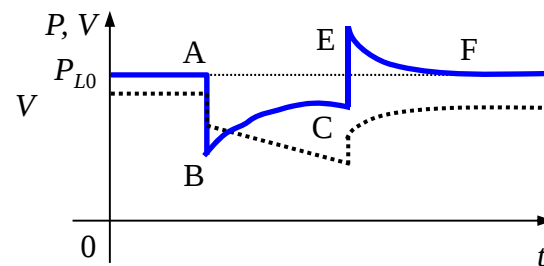
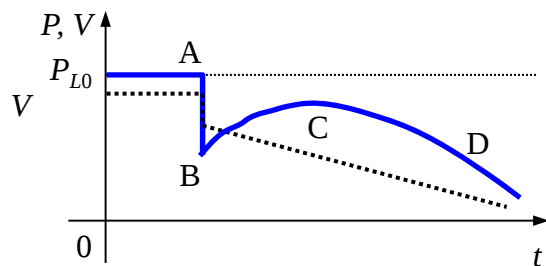
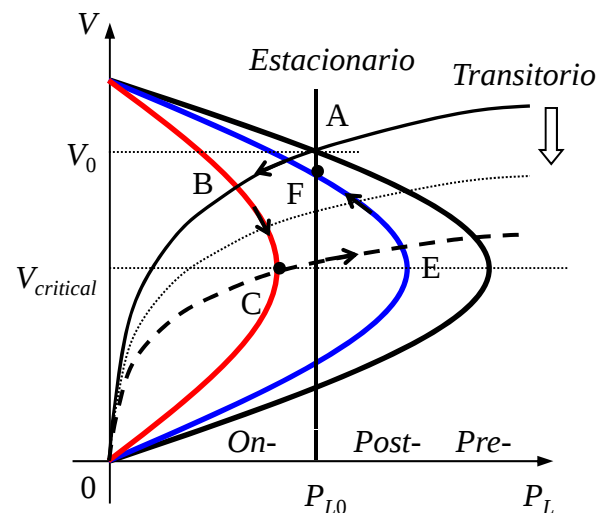
Colapso Natural de Tensión

Prevención del Colapso de Tensión

Estabilidad de Potencia UNI - FASP



Refuerzos





CONCLUSIONES

- ❑ El análisis de estabilidad es un proceso electro-mecánico e importante para evaluar la confiabilidad y seguridad del sistema eléctrico.
- ❑ Para comprender el tema en profundidad se requiere conocer el comportamiento de los generadores y los modelos que se aplican en los componentes del sistema.
- ❑ Existen dos tipos: De Angulo (Permanente y Transitorio) y de Tensión.
- ❑ El análisis de estabilidad no sólo se aplica en el lado de generación sino también en el lado de la carga.
- ❑ Asimismo es necesario complementar el análisis con el comportamiento de los reguladores de excitación y de velocidad.
- ❑ Los resultados del análisis permiten definir criterios de protección y control en el sistema de potencia, así como de refuerzos de la transmisión y compensación reactiva.



FIN DE LA EXPOSICION

Estabilidad de Potencia UNI - FASP

***MUCHAS GRACIAS
POR SU ATENCIÓN***

fsaravia@kiewasociados.com

LIMA - Telf. (051) 1 222 7069 - (051) 1 999 958 271