

CURSO: ESEP, FING 2016.

SISTEMAS DE PROTECCIÓN – OSCILACIÓN DE POTENCIA

ÍNDICE

Oscilación de potencia	2
Comportamiento del relé de distancia durante una oscilación de potencia	5
Métodos para la detección de la oscilación de potencia	9
Otros métodos	13
Formas de onda (oscilografías) de oscilaciones de potencia.....	15
Resumen: Filosofía de protección ante osc. de potencia.....	16
Métodos para mejorar la estabilidad transitoria, que hacen a los Sistemas de Protección.	17
Bibliografía más relevante.....	19

SISTEMAS DE PROTECCIÓN

OSCILACIÓN DE POTENCIA

El sistema de potencia, en régimen estacionario, opera muy cerca de su frecuencia nominal y las magnitudes de las tensiones en las diferentes barras no varían más de un 5%. Por lo tanto, existe un balance entre la potencia activa y reactiva generada y la consumida.

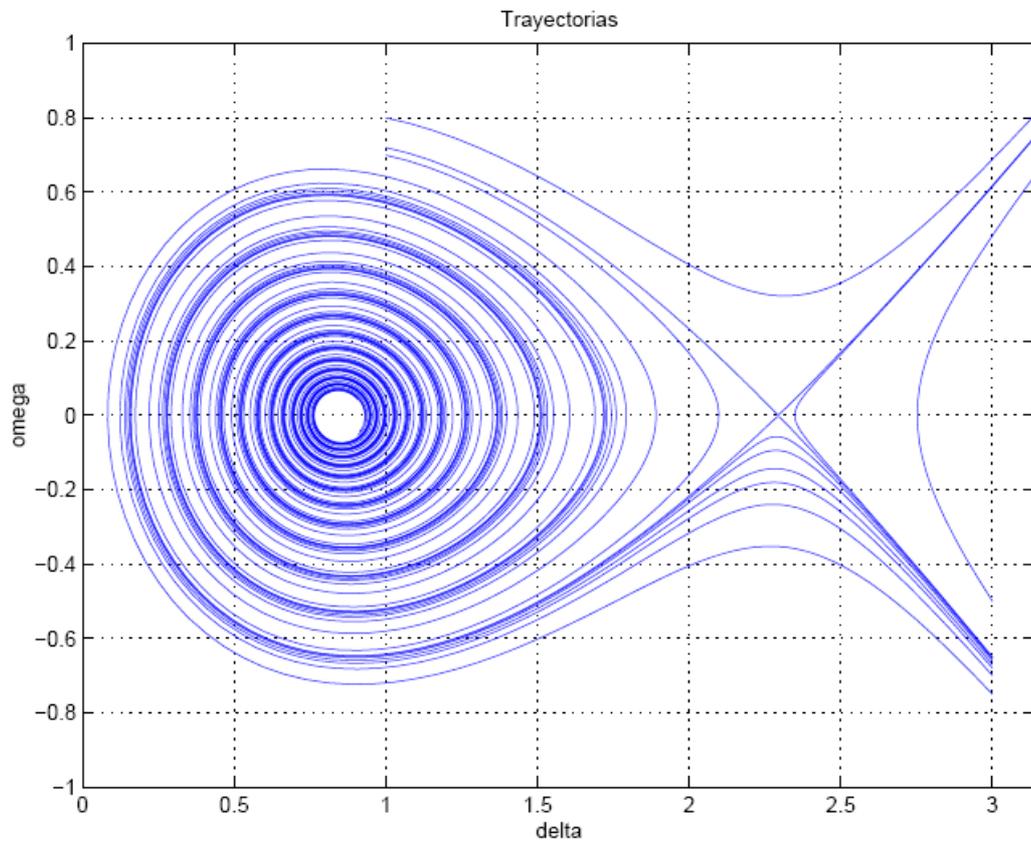
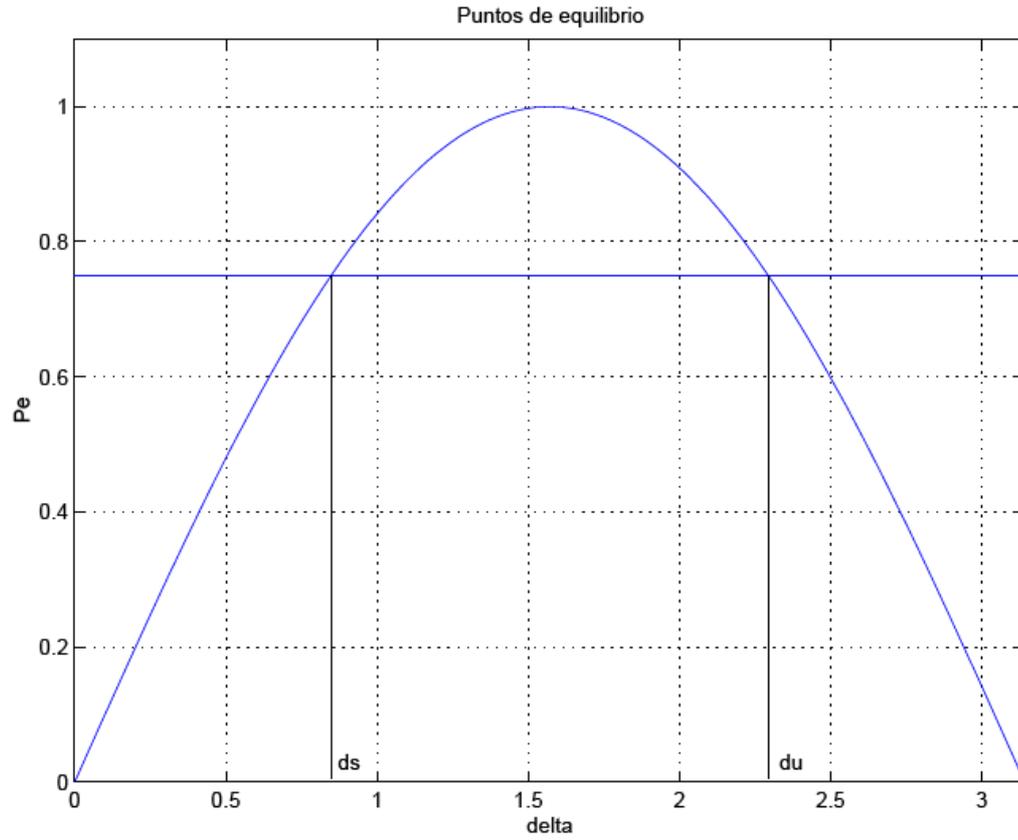
Cualquier cambio en la potencia generada, potencia demanda o en el sistema de potencia causa cambios en la transferencia de potencia del sistema, que oscila hasta alcanzar otro punto de equilibrio entre la generación y la carga. Estos cambios ocurren permanentemente y son compensados por los sistemas de control.

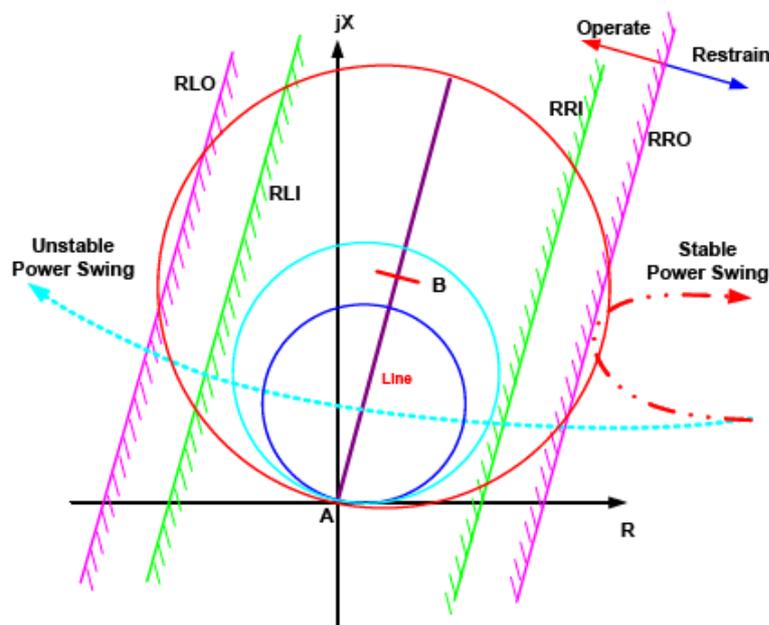
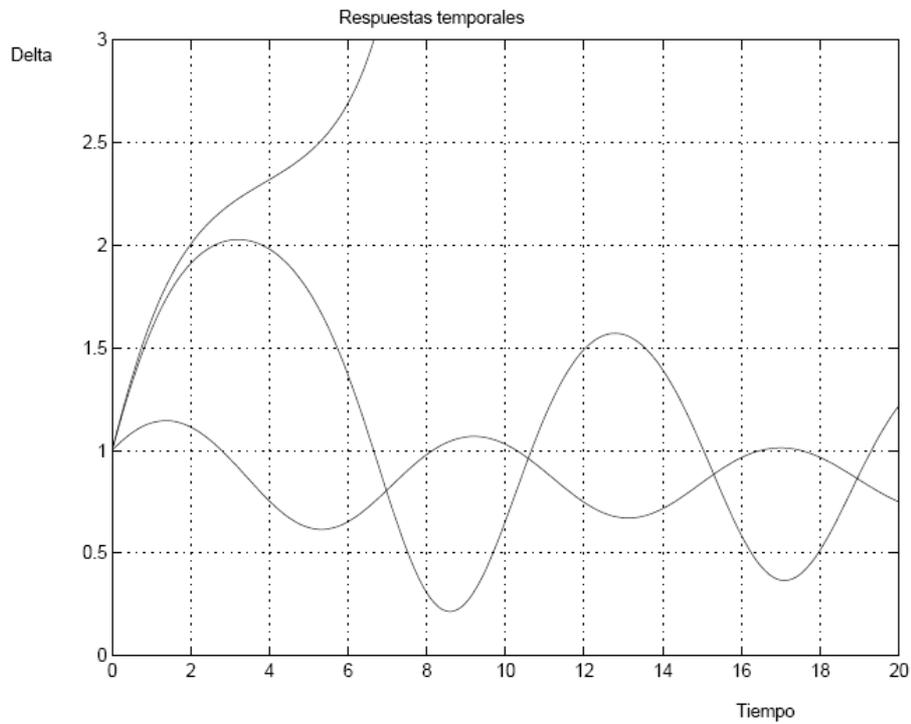
Perturbaciones que causan oscilaciones de potencia:

- las faltas en el sistema de potencia,
- las conexiones de líneas de transmisión,
- las desconexiones de generadores o
- la pérdida o aplicación de grandes bloques de carga

Estas perturbaciones resultan en cambios repentinos en la potencia eléctrica, mientras que la potencia mecánica se mantiene constante. Dependiendo de la perturbación y de la acción de los controladores las oscilaciones pueden ser estables o inestables.

En el curso se ha estudiado la estabilidad transitoria y las oscilaciones estables e inestables.





La oscilación de potencia puede hacer que la impedancia vista por un relé entre en su característica de operación; y la operación de estos relés puede hacer que salgan de servicio líneas de transmisión u otros componentes, haciendo más débil el sistema, aumentando la gravedad de la perturbación.

Los relés, funciones y zonas de distancia que pueden operar durante una oscilación de potencia deben ser bloqueados temporalmente. En los relés de distancia modernos se tienen disponibles las funciones:

- PSB: Bloqueo por oscilación de potencia (power swing blocking).
- OST: Disparo por oscilación de potencia (out-of-step tripping).

PSB: BLOQUEO POR OSCILACIÓN DE POTENCIA:

Esta función diferencia entre una falta y una oscilación de potencia y bloquea el relé de distancia durante una oscilación de potencia y previniendo el disparo. Además, debe permitir detectar y despejar las faltas que ocurren durante una oscilación de potencia.

El disparo indebido de interruptores durante una oscilación de potencia puede causar daño al equipamiento y contribuir al apagón en varias áreas del sistema. Por lo tanto, es necesario, el disparo controlado de ciertos elementos en determinados puntos del sistema para evitar daño al equipamiento y minimizar los efectos de la perturbación.

OST: DISPARO POR OSCILACIÓN DE POTENCIA:

Esta función diferencia entre una oscilación estable de una inestable y permite disparar algunos elementos del sistema para evitar el daño de los equipos y que la perturbación se extienda en el sistema.

Cuando dos áreas de un sistema de potencia o dos sistemas de potencia interconectados pierden sincronismo, tanto las áreas como los sistemas deben separarse en forma rápida y automática para evitar daños en los equipamientos o apagones. Idealmente, un sistema debe separarse en determinados lugares formando "islas", subsistemas o áreas independientes en que se mantenga el balance entre generación y carga en cada área.

Cuando el sistema se separa en áreas no siempre se alcanza el balance generación-carga, en cada una de ellas. En estos casos, se implementa un sistema de rechazo de carga o disparo de generación, para lograr el equilibrio y evitar el apagón en esas áreas.

COMPORTAMIENTO DEL RELÉ DE DISTANCIA DURANTE UNA OSCILACIÓN DE POTENCIA

La pérdida de sincronismo entre sistemas de potencia o entre un generador y el sistema de potencia afectan los sistemas de protección de las líneas de transmisión. En particular, algunos relés utilizados en las líneas de transmisión pueden operar para oscilaciones de potencia estables.

RELÉ DE SOBRECORRIENTE

Los relés de sobrecorriente de fase instantáneos pueden operar durante una oscilación de potencia si la corriente que circula por la línea durante la oscilación supera el valor de ajuste del relé.

Los relés de sobrecorriente de fase temporizados probablemente no operen durante una oscilación de potencia; pero esto depende la magnitud de la corriente y del tiempo ajustado.

RELÉ DE DISTANCIA

Los relés de distancia responden a los valores de secuencia positiva. La impedancia medida por el relé durante una oscilación de potencia varía en función del ángulo δ , entre las tensiones equivalentes del sistema.

Durante una oscilación de potencia pueden operar tanto la zona 1, que generalmente es instantánea, como las zonas utilizadas en los esquemas de

teleprotección. Las zonas de respaldo temporizadas, generalmente no operan durante una oscilación de potencia, pero eso depende de sus ajustes.

La Fig.7 (a) muestra como el lugar geométrico de la impedancia cruza la zona 1 y la Fig.7 (b) muestra un esquema de teleprotección y como se ve afectado por la impedancia medida.

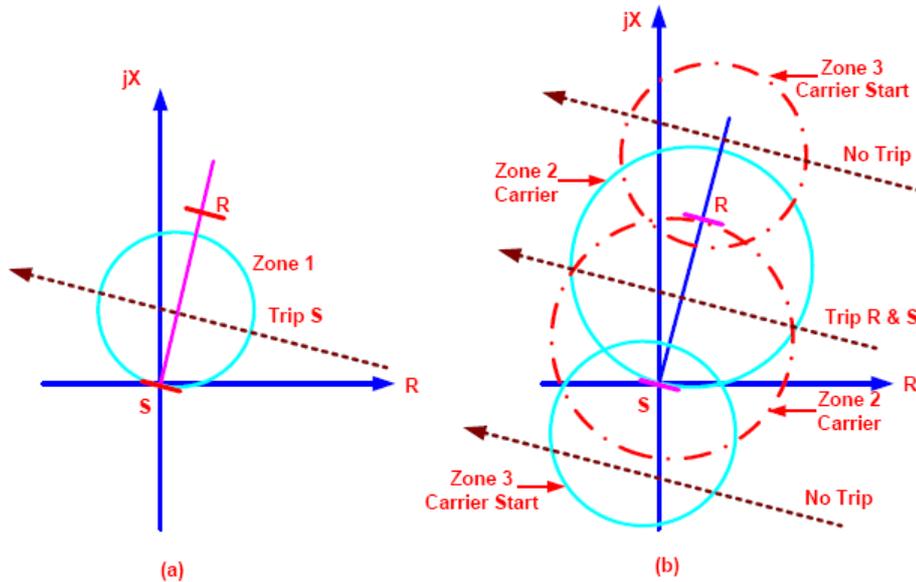


Fig. 1: Relé de distancia: Características de operación

IMPEDANCIA MEDIDA DURANTE UNA OSCILACIÓN DE POTENCIA

Durante una oscilación de potencia el relé de distancia detecta la oscilación como un defecto entre fase si la impedancia medida entra en su característica de operación.

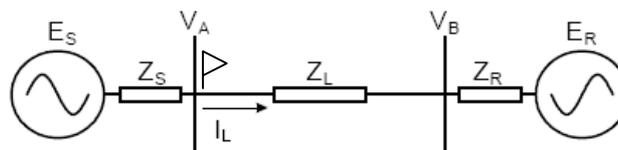


Fig. 2: Sistema de dos máquinas

Consideremos un sistema de dos generadores interconectados por una línea (un sistema complejo puede reducirse a esto), como muestra la Fig.8, con las siguientes hipótesis:

- Las amplitudes de E_S y E_R son constantes durante el transitorio (se pueden proporcionar las potencias reactivas necesarias para mantener las tensiones).
- Los ángulos (fases) de E_S y E_R coinciden con los ángulos relativos de los ejes q de los rotores correspondientes, respecto a la referencia que gira a $\omega_0 = cte$. Su diferencia es δ .
- Se realiza un estudio cuasiestático para δ variable (parámetro),

Se calcula la impedancia medida por un relé de distancia ubicado en el extremo A de la línea A-B.

$$Z = \frac{V_A}{I_L} = \frac{E_S(Z_S + Z_L + Z_R)}{E_S - E_R} - Z_S$$

Sea $k = \frac{|E_S|}{|E_R|}$.

El lugar geométrico de la trayectoria de la impedancia es un círculo, ver Fig.9, que corta al segmento de recta S-R en el Centro Eléctrico.

$$Z = \frac{V_A}{I_L} = (Z_S + Z_L + Z_R) \frac{k[(k - \cos \delta) - j \sin \delta]}{(k - \cos \delta)^2 + \sin^2 \delta} - Z_S$$

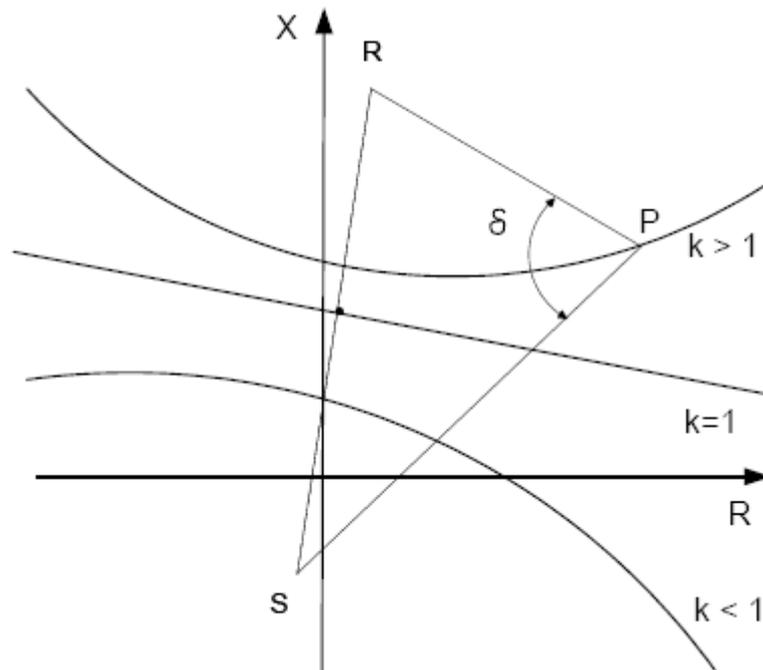


Fig. 3: Trayectoria de la impedancia durante una oscilación de potencia

Para cualquier valor de k , se cumple: $\angle SPR = \delta$, siendo P cualquier punto del lugar geométrico de la impedancia vista $Z = \frac{V_A}{I_L}$.

Para el caso particular en que las tensiones son iguales en amplitud.

$$k = \frac{|E_S|}{|E_R|} = 1.$$

Por lo tanto la impedancia medida por el relé de distancia ubicado en la barra A, se reduce a:

$$Z = \frac{V_A}{I_L} = \frac{(Z_S + Z_L + Z_R)}{2} \left(1 - j \cot \frac{\delta}{2} \right) - Z_S$$

La trayectoria de la impedancia medida por el relé es una recta perpendicular al segmento de recta S-R en el Centro Eléctrico, ver Fig.10.

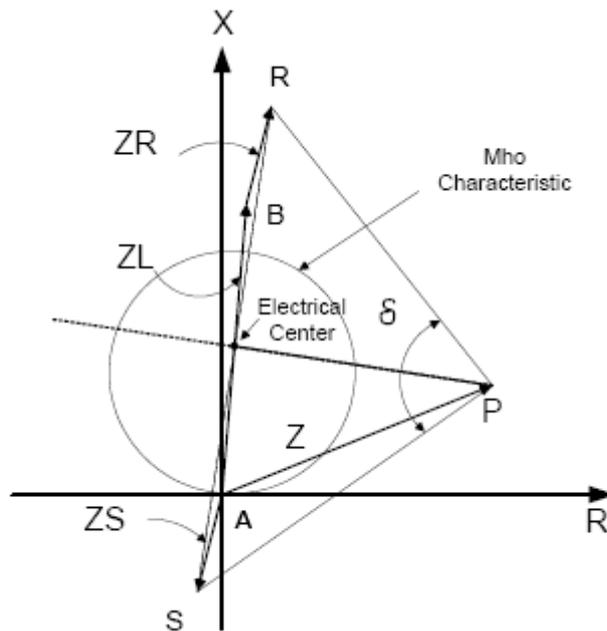
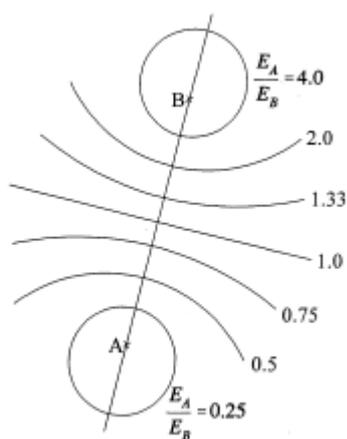
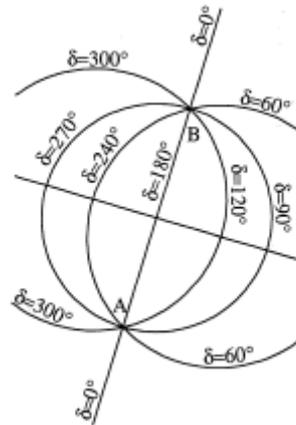


Fig. 4: Trayectoria de la impedancia durante una oscilación de potencia

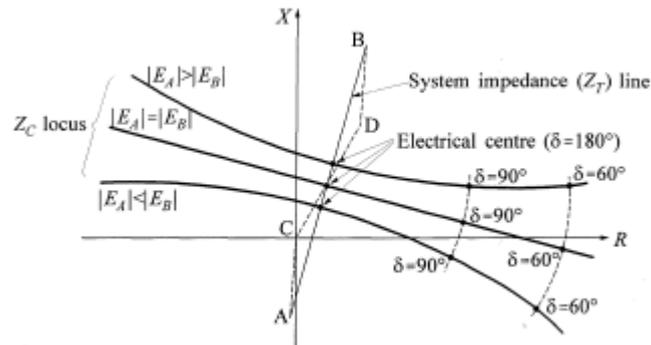
Interpretación de las gráficas (¡cuidado! cambio de notación en las tensiones de las fuentes):



Lugares geométricos para $k = cte$ y $\delta = parámetro$



Lugares geométricos para $\delta = cte$ y $k = parámetro$



MÉTODOS PARA LA DETECCIÓN DE LA OSCILACIÓN DE POTENCIA

Hay diversos métodos para la detección de oscilaciones de potencia, ya sea para usar en funciones de bloqueo por oscilación de potencia (PSB) o de disparo por oscilación de potencia (OST).

MÉTODOS CONVENCIONALES

Los métodos para la detección de la oscilación de potencia se basan en la medida de la impedancia de secuencia positiva. Durante el régimen estacionario, la impedancia medida por el relé de distancia es la impedancia de carga.

Durante una falta, la impedancia medida por el relé se mueve **rápido** desde su valor de carga hasta el valor de falta. Durante una oscilación de potencia, la impedancia medida se mueve **lento**.

Los esquemas convencionales utilizan la diferencia en la velocidad de la impedancia para diferenciar entre una falta y una oscilación de potencia.

CARACTERÍSTICAS CONCÉNTRICAS.

Para medir la velocidad de la variación de la impedancia, se mide el **tiempo** que requiere la impedancia para atravesar dos características concéntricas de impedancia, ver Fig.11.

La detección de la oscilación de potencia se realiza antes que la impedancia entre en la característica de operación.

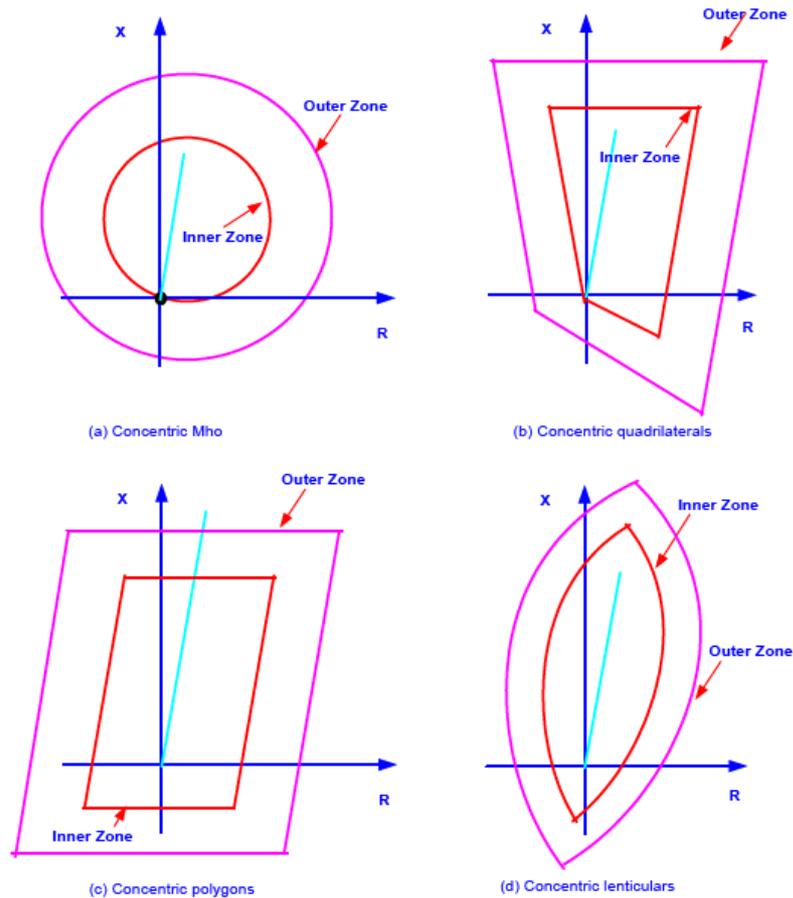


Fig. 5: Características concéntricas

CARACTERÍSTICA CON BLINDER (ANTEOJERAS)

Para medir la velocidad de la variación de la impedancia, se mide el **tiempo** que requiere la impedancia para atravesar dos rectas.

Se **optimiza** el esquema si las rectas son paralelas a la impedancia de la línea, pues las oscilaciones de potencia normalmente ingresan a las zonas de protección en forma aproximadamente perpendicular al ángulo de la línea, ver Fig.12.

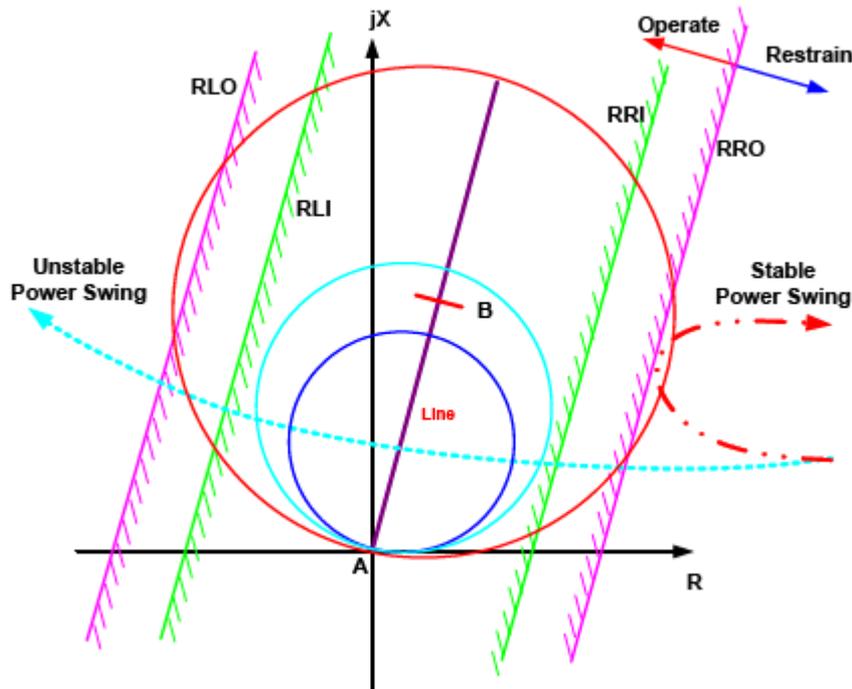


Fig. 6: Característica blinder (2 rectas)

CARACTERÍSTICAS BLINDER (1 RECTA):

Este tipo de esquema se utiliza como OST (disparo).

Este esquema **retrasa** el disparo hasta que la oscilación ya pasó los 180° y están volviendo a ponerse en fase las tensiones.

EN GENERAL:

Para ambas características (concéntricas y blinders), ajustar precisamente las funciones de oscilación de potencia no es sencillo y se requieren profundos estudios de la estabilidad transitoria del sistema de potencia concreto en sus posibles escenarios, configuraciones, causas y tipos de transitorios.

Las impedancias de fuente dependen de las posibles configuraciones del sistema, y además varían fuertemente durante grandes perturbaciones en que las funciones de oscilación de potencia deben cumplir su rol correctamente (bloqueo y disparo).

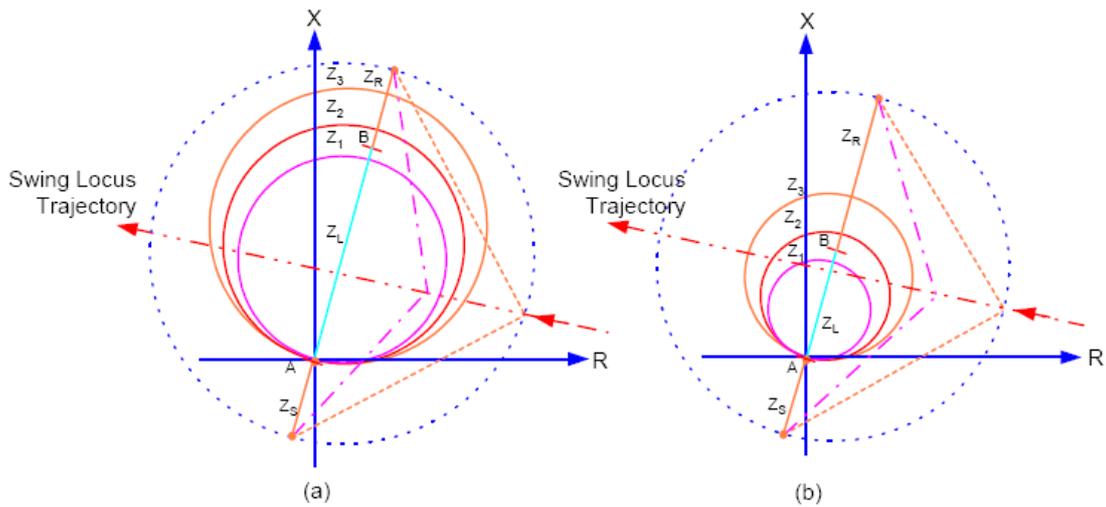


Fig. 7: Efecto de la impedancia de la línea

Como ejemplo, se muestran los efectos de la impedancia de línea en el ajuste de una función PSB, ver Fig.13.

Pero es posible simplificar el cálculo del ajuste de estas funciones, asumiendo que la frecuencia máxima de deslizamiento de las oscilaciones de potencia de un sistema eléctrico está por ej. entre 4 y 7 Hz. Esto permite ajustar razonablemente estas funciones de manera más sencilla.

Las zonas de operación del relé de distancia deben estar contenidas en la zona interna de oscilación de potencia (inner zone).

La zona de carga debe estar por fuera de la zona externa de oscilación de potencia (outer zone), ver Fig.14.

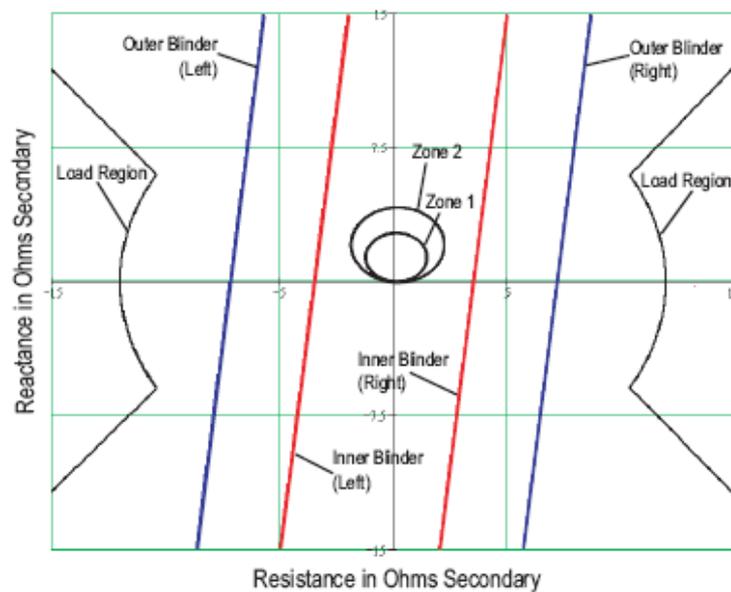


Fig. 8: Característica de operación

La zona de disparo de una función OST debe ajustarse para que el ángulo δ sea soportable por el interruptor a disparar (por ej $\delta < 120^\circ$ y decreciendo).

El problema de las características concéntricas y blinders, es que la magnitud usada para la detección de las oscilaciones de potencia (impedancia vista), depende de la impedancia total del sistema ($Z_S + Z_L + Z_R$), que a priori no es conocida y es cambiante.

OTROS MÉTODOS

CÁLCULO CONTINUO DE LA IMPEDANCIA

Este método determina la condición de oscilación de potencia calculando la impedancia en forma continua, ver Fig.15.

Calcula la impedancia cada 5ms y se compara con la calculada 5ms antes.

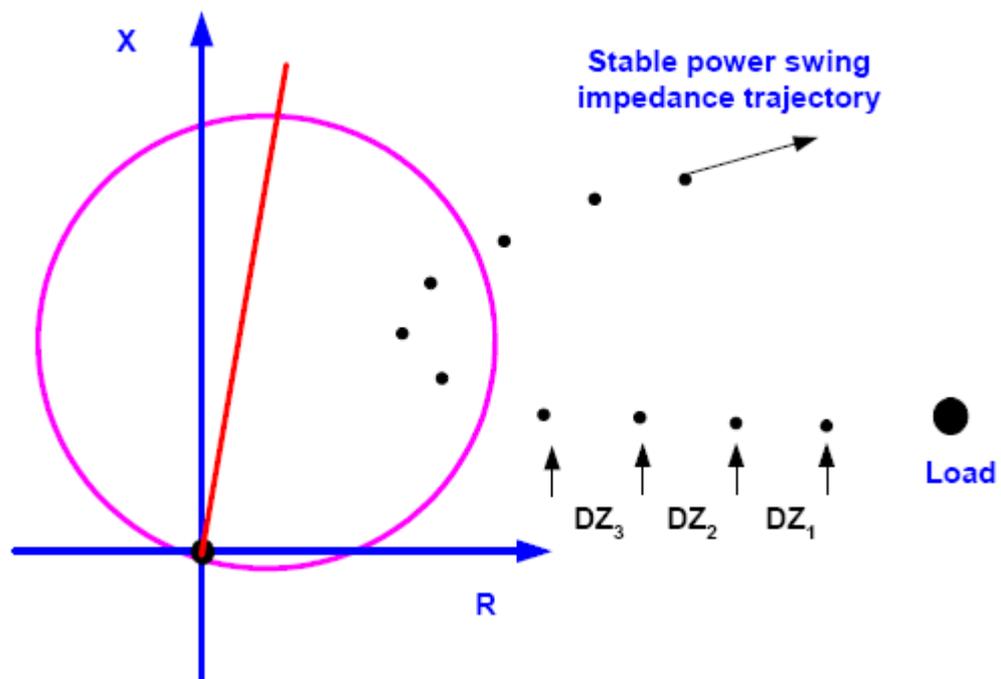


Fig. 9: Cálculo continuo de la impedancia

Cálculo continuo de la impedancia $\Delta t = 5 \text{ ms}$

- **N-1:** Cálculo de Z_{v_N-1}
- **N:** Cálculo de Z_{v_N}
Predicción de $Z_{v_N+1_esperada}$, según Z_{v_N} , Z_{v_N-1} y Δt
- **N+1:** Cálculo de Z_{v_N+1}
Comparación de Z_{v_N+1} con $Z_{v_N+1_esperada}$

Determinación de si hay oscilación de potencia

Predicción de $Zv_N+2_esperada$, según Zv_N+1 , Zv_N y Δt

SINCROFASORES

En una oscilación de potencia el ángulo de las tensiones de las barras reflejan cambios en la velocidad de rotación.

Actualmente se puede medir en forma sincronizada los ángulos de diferentes barras del sistema y reportarlas a un centro de procesamiento para procesarlas en tiempo real.

Cuando se detecta oscilación de potencia, se realiza una separación del sistema o un rechazo de carga.

Considerando un sistema con dos máquinas, medir $\Delta\delta$ y calcular en tiempo real el criterio de igual área, para determinar estabilidad o no.

Usar algoritmos predictivos de la variación de $\delta(t)$ y comparar con la medida de los sincrofasores en barras estratégicas.

CENTRO DE OSCILACIÓN SCV (SWING CENTER VOLTAGE):

SCV: se define como el punto del sistema (equivalente de 2 fuentes), donde la tensión es cero y el ángulo entre los sistemas es $\delta = 180^\circ$.

Este punto se puede aproximar por:

$$SCV \approx |V_s| \cos \varphi$$

donde V_s tensión local, φ ángulo entre la tensión y corriente.

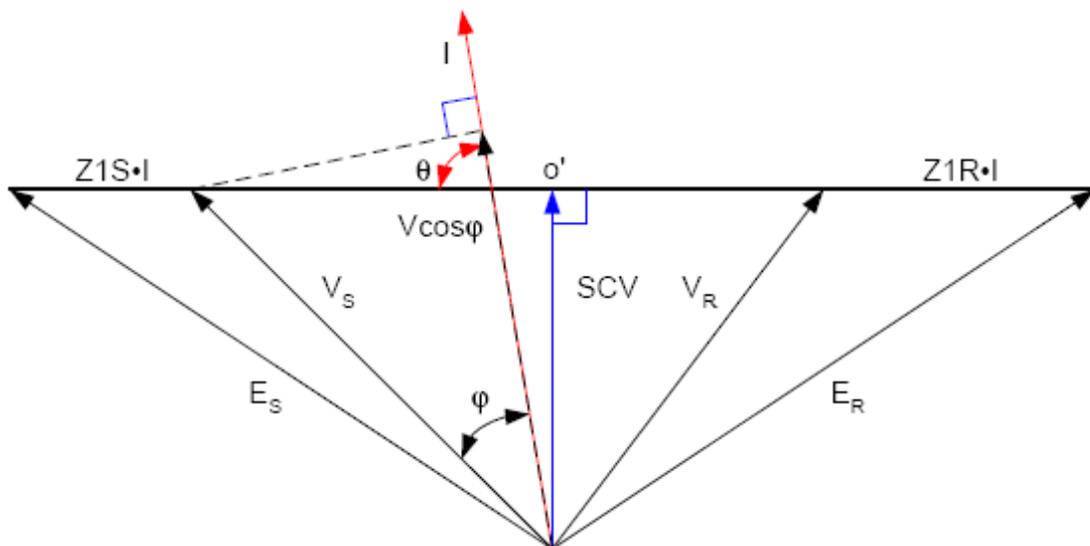


Fig. 10: Proyección de $V \cos \varphi$

Centro de oscilación SCV: $SCV \approx |V_s| \cos \varphi \Rightarrow SCV1 = E1 \cos\left(\frac{\delta}{2}\right)$

La derivada de SCV1 es: $\frac{d(SCV1)}{dt} = -\frac{E1}{2} \operatorname{sen}\left(\frac{\delta}{2}\right) \frac{d\delta}{dt}$

Casos:

Si $\delta = 180^\circ \Rightarrow SCV1 = 0$ $\frac{d(SCV1)}{dt} = \text{máximo}$ $\left\langle \operatorname{sen}\left(\frac{\delta}{2}\right) = 1 \right\rangle$

Si $\delta = 0^\circ \Rightarrow SCV1 = 1$ $\frac{d(SCV1)}{dt} = \text{mínimo}$ $\left\langle \operatorname{sen}\left(\frac{\delta}{2}\right) = 0 \right\rangle$

Si $\delta = 120^\circ \Rightarrow SCV1 = \frac{1}{2}$

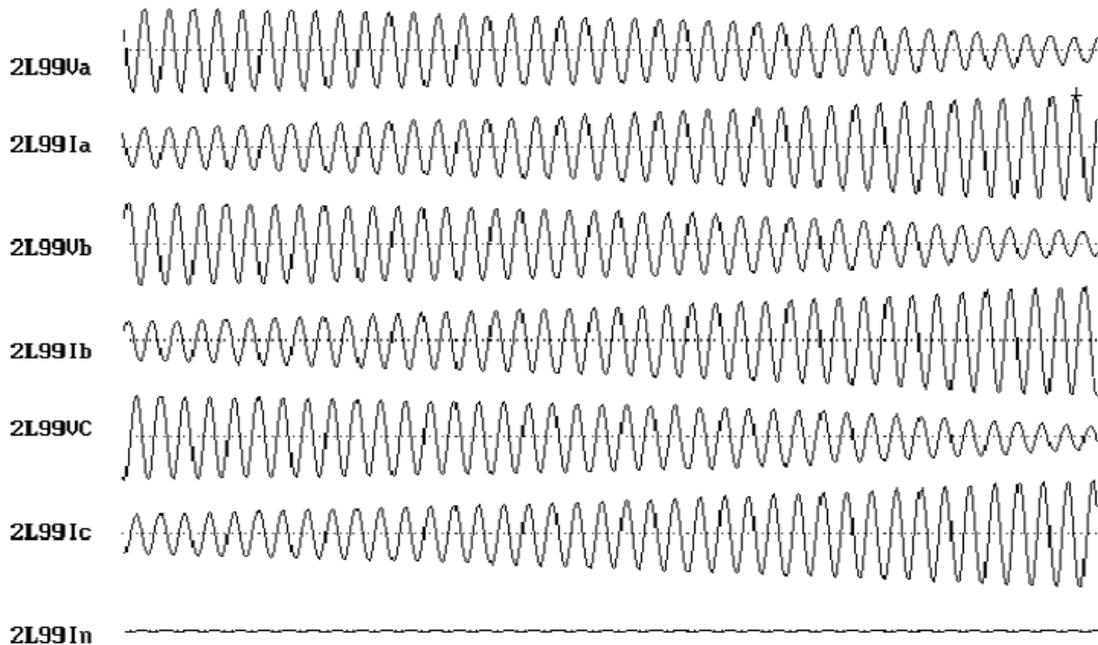
Conclusiones:

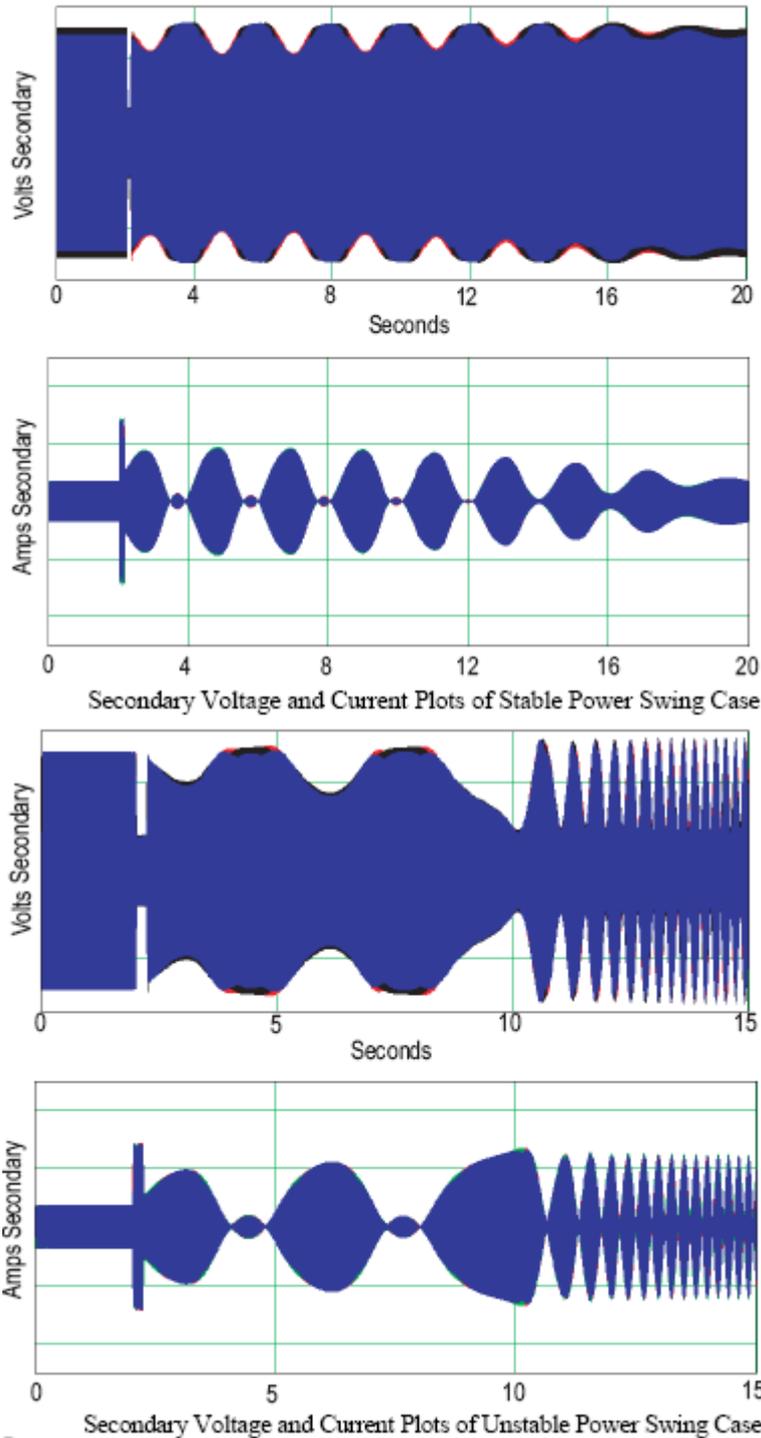
$0 \leq SCV1 \leq 1 pu$ SCV1 está acotado entre 0 y 1 pu

$SCV1 \leftrightarrow \delta$ SCV1 es independiente de Z_S, Z_L, Z_R .

Estas son la gran ventaja del método.

FORMAS DE ONDA (OSCILOGRAFÍAS) DE OSCILACIONES DE POTENCIA





RESUMEN: FILOSOFÍA DE PROTECCIÓN ANTE OSC. DE POTENCIA

La filosofía para la aplicación de los esquemas PSB y OST es:

- **Evitar** disparar cualquier elemento del sistema durante una oscilación de potencia **estable**.
- **Proteger** el sistema de potencia durante oscilaciones **inestables**.

Se debe diseñar un sistema de disparo para separar en áreas el sistema, en condiciones de oscilación de potencia inestables.

Los esquemas de disparo por oscilación de potencia están diseñados para **proteger** el sistema durante oscilaciones inestables, separando en áreas, de manera de mantener la estabilidad dentro de cada área.

Los esquemas de disparos deben estar instalados cerca del **centro eléctrico** del sistema, para mantener el balance entre generación y carga.

Los esquemas de disparo deben **evitar** disparar cuando el ángulo entre los sistemas es cercano a **180°**.

Los esquemas de disparo OST están **acompañados** con esquemas de bloqueo PSB para evitar disparos indeseados.

Los esquemas de bloqueo son instalados en otros puntos del sistema, para **evitar** la separación del mismo de manera **no controlada**.

Estos esquemas están acompañados con sistemas de **rechazo de carga** y **disparo de generación**.

MÉTODOS PARA MEJORAR LA ESTABILIDAD TRANSITORIA, QUE HACEN A LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN.

Las empresas eléctricas deben tomar medidas en el momento del diseño del sistema eléctrico de potencia para evitar salidas de equipamiento en cascada y apagones.

Las acciones son tendientes a lograr los siguientes efectos:

- Minimizar la severidad de las faltas y su duración
- Aumentar las fuerzas sincronizantes
- Reducir los pares acelerantes (control de la potencia mecánica y aplicación de cargas artificiales)

Algunos de los métodos utilizados para mejorar la estabilidad transitoria del sistema son:

- Despejar los defectos rápidamente
 - Funciones de protección instantáneas y de alta velocidad, (recordar el tiempo crítico de despeje de las faltas y los tiempos inherentes a los relés numéricos).
 - Disminuyendo el tiempo que los cortocircuitos permanecen en el sistema, disminuye la energía cinética que gana los rotores de los generadores.
- Usar protecciones de falla interruptor (breaker failure).
 - Minimiza el tiempo que permanece una falta en el sistema, si un interruptor disparado no abre. Para el caso de falla de un interruptor, esta función es preferible a tener sólo respaldos locales o remotos ya que sus tiempos de respaldo son mayores.
- Disparo monopolar de interruptores (recierre monopolar).

- Durante el tiempo muerto de un recierre con apertura monopolar (para defectos fase-tierra), buena parte de la potencia de prefault se sigue transfiriendo por las fases “sanas” de la línea, lo que reduce el embalaje de los generadores.
- Cierre dinámico (insertar cargas cerca de los generadores)
 - El forzar un consumo de potencia activa durante el transitorio, reduce o evita la aceleración de los generadores durante perturbaciones.
- Fast Valving
 - Es para el caso de turbinas a vapor, y consiste en reducir la potencia mecánica de los generadores ante ciertas perturbaciones, como mejor alternativa que sacarlos de servicio.
- Disparo de generadores.
 - Puede llegar a ser útil disparar generadores cuando hay problemas de estabilidad transitoria, como oscilaciones inestables de potencia.
 - Esto protege al generador pero no necesariamente al sistema, ya que puede estarse aumentando el desbalance de potencias en el sistema.
- Disparo controlado.
 - Disparo ante Oscilación de Potencia (OST), de manera de preservar el sistema convirtiéndolo en islas con balance entre generación y carga.
 - Para ello, además del OST también puede ser necesario disparar carga (load shedding)
 - Uso de Sistemas Especiales de Protección (SPS) o Wide Area Protection (WAP) o Protecciones Sistémicas.
- Reducción de la reactancia del sistema.
 - Inserción momentánea de capacitares serie en líneas o subestaciones aumentan el margen de estabilidad al aumentar la potencia máxima transferible $P_e = \frac{E_R E_S}{X_T}$
- Recierre rápido.
 - No es bueno que los recierres sean lentos
 - Pero no necesariamente cuanto más rápido es el recierre, mejor es para la estabilidad del sistema.

BIBLIOGRAFÍA MÁS RELEVANTE.

- Apuntes de los cursos de Estabilidad de Sistemas Eléctricos de Potencia de FING de los años 2003, 2005, 2007. Ver: <http://iie.fing.edu.uy/ense/assign/esepl/>, en particular los capítulos de estabilidad transitoria y protecciones (este último preparado en 2005 por Ing. Verónica Azevedo).
- Power System Stability and Control; P. Kundur
- Power Swing and Out-of-Step Considerations on Transmission Lines; IEEE PSRC WG D6; Mike McDonald, Demetrios Tziouvaras y otros.
- Out-of-Step Protection Fundamentals and Advancements; Demetrios Tziouvaras y Daqing Hou.
- Apuntes del curso sobre Protecciones de FING, Ing. Jorge Alonso.
- Guía de operación verano 2003 de PEE, UTE.
- Definition and Classification of Power System Stability. IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definition. Prabha Kundur, John Paserba y otros, May 2004.
- Protective Relays Theory and Applications, Walter A. Elmore
- Protective Relaying, Principles and Applications, J. Lewis Blackburn,
- The Art and Science of Protective Relaying, C.R. Mason, John Wiley 1956