

# Estabilidad Transitoria

---

## Consideraciones Generales

El módulo de Estabilidad Transitoria es un programa computacional de simulación de fenómenos transitorios electromecánicos en redes eléctricas.

Para calcular el comportamiento de las redes eléctricas, todos los elementos de red se simulan mediante modelos matemáticos. Las máquinas sincrónicas y sus circuitos de control se describen (en términos de su comportamiento de operación en estado no estable) por medio de las ecuaciones del sistema, las cuales contienen ecuaciones algebraicas y diferenciales. En conjunto con las ecuaciones algebraicas de la red, se obtiene un sistema de ecuaciones que representa un modelo matemático de la red completa.

Además de la descripción de los elementos primarios, el módulo de Estabilidad Transitoria también suministra una opción para simular elementos secundarios (equipos de protección). Durante el proceso de simulación se determinan los valores medidos de los relés de protección y se monitorean las condiciones de disparo continuamente. Los disparos y las operaciones de suicheo asociadas son ejecutados automáticamente por el programa. De esta manera se facilitan significativamente los ajustes y las rutinas de monitoreo de sistemas de protección complejos.

El punto de inicio para cada simulación es una condición de operación de estado estable, la cual se determina previamente mediante un cálculo de flujo de carga.

## Método de Simulación

El trabajo del método de simulación para calcular fenómenos transitorios electromecánicos está en resolver simultáneamente las ecuaciones algebraicas de la red y las ecuaciones del sistema de los elementos dinámicos, en cualquier punto en el tiempo.

Las **ecuaciones algebraicas de la red** son las ecuaciones del modelo de los elementos en estado casi estable de la red eléctrica. Estos elementos son las líneas, los transformadores, los compensadores constantes y las cargas de impedancia constante. Las ecuaciones del modelo se forman a partir de admitancias complejas y/o matrices de admitancias. Las ecuaciones del modelo para los elementos individuales en estado casi estable se agrupan para formar la matriz de admitancias  $\underline{Y}_N$  de tal forma que reflejen la topología de la red. La matriz de admitancias de la red es una matriz cuadrada con elementos complejos, de orden correspondiente al número de nodos en la red.

Así, la ecuación matricial de la red eléctrica se obtiene de la siguiente forma

$$\underline{u} = \underline{Y}_N^{-1} \cdot \underline{i}$$

Si se conocen las corrientes de nodo  $\underline{i}$ , se pueden calcular los voltajes de nodo  $\underline{u}$ . Durante la simulación, la matriz de admitancias de la red es constante siempre y cuando no haya cambios en la topología. Esta matriz sólo es alterada mediante operaciones de suicheo en respuesta a las perturbaciones de la red o por disparos en caso de falla. La inversa de  $\underline{Y}_N$  se determina por factorización, y para minimizar el trabajo de cálculo y computación, la secuencia de los nodos se especifica por ordenamiento dinámico.

Las corrientes de nodo de entrada  $\underline{i}$  son las variables de salida de las ecuaciones del sistema de los elementos dinámicos, y en la mayoría de los casos, dependen del voltaje. Las corrientes de nodo también se producen por cargas que no representan una impedancia pura y simple, y también dependen del voltaje. Así, la ecuación matricial de la red eléctrica no es lineal y se debe resolver mediante métodos iterativos.

**Las ecuaciones del sistema** se utilizan para todos los equipos que se simulen mediante ecuaciones algebraicas y diferenciales. Las ecuaciones del sistema generalmente se leen en el siguiente estado

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{D} \cdot \mathbf{u}\end{aligned}$$

Como se ilustra en el modelo la máquina sincrónica, las variables de entrada  $\mathbf{u}$  son las componentes de los ejes d y q del voltaje en terminales, el voltaje de excitación y el torque de la turbina. Las variables de salida  $\mathbf{y}$  son las corrientes en los terminales. La inyección de corriente a la matriz invertida de admitancias de la red se puede determinar mediante la transformación del sistema de coordenadas de rotor fijo al sistema de coordenadas complejas de las ecuaciones de red. Las variables de estado  $\mathbf{x}$  dependen del modelo seleccionado, y no deben corresponder a variables físicas.

La transformada de Laplace de las ecuaciones diferenciales del sistema dará lo siguiente:

$$\mathbf{X}(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{x}_0 + (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}(s)$$

$\mathbf{A}$  y  $\mathbf{B}$  están dadas,  $\mathbf{x}_0$  es el punto de inicio de las variables de estado. Si las variables de entrada  $\mathbf{U}(s)$  también fueran conocidas, la re-transformación al

dominio del tiempo generaría entonces una solución precisa de las ecuaciones de estado. Si las variables de entrada se aproximan entre dos puntos de integración por medio de un polinomio de primer orden (línea recta), se obtienen las siguientes fórmulas de integración (ver [1])

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{x}_n + \mathbf{W}_1 \cdot \mathbf{u}_n + \mathbf{W}_2 \cdot \mathbf{u}_{n+1}$$

$\mathbf{x}_n, \mathbf{u}_n$  ... Variables al inicio del intervalo de integración

$\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{u}_{n+1}$  ... Variables al final del intervalo de integración

El método de integración es un método implícito de paso simple, y es estable para todos los tamaños de pasos de integración, sin tomar en cuenta los tamaños de las constantes de tiempo involucradas.

La fórmula de integración contiene una parte que depende sólo de las variables al inicio del intervalo. Esta parte se debe calcular sólo una vez por intervalo, y será constante durante el proceso de solución iterativo. Las variables de entrada  $\mathbf{u}$  al final del intervalo de integración se estiman al inicio de la iteración y son continuamente mejoradas a medida que avanza el proceso iterativo.

Las matrices coeficientes  $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{W}_1$  y  $\mathbf{W}_2$  son constantes siempre y cuando el intervalo de integración no se modifique. Estas matrices se determinan analíticamente o por desarrollo en serie, dependiendo del tamaño y la estructura de la matriz del sistema  $\mathbf{A}$ . Para evitar un trabajo computacional excesivo, las ecuaciones del sistema se dividen en subsistemas de orden hasta 3 o 4. Los subsistemas se resuelven consecutivamente, bloque a bloque, llegando de esta forma a la solución de la totalidad de todas las ecuaciones del sistema en el proceso de solución iterativa.

El proceso de solución iterativa se parece a esto:

- a) Comienza con un flujo de carga inicial o con el resultado del último paso de integración, y estima las variables de entrada para el final del intervalo.
- b) Resuelve las ecuaciones del sistema para los elementos dinámicos y las cargas que no representen una impedancia constante. Determina las corrientes de entrada  $\mathbf{I}$ .
- c) Resuelve las ecuaciones de la red y calcula los nuevos voltajes de nodo.
- d) Chequea la convergencia comparando los voltajes de nodo antes y después de la iteración. Cuando se haya alcanzado la convergencia, se abandonará la iteración y empezará el siguiente intervalo de integración. En caso contrario, se continúa con la iteración en b).

Esta solución iterativa de las ecuaciones de red y del sistema suministra una solución simultánea para el sistema completo sin error de interfase alguno.

Una función de control para el tamaño del paso de integración se superpone sobre el proceso de iteración descrito anteriormente. El tamaño del paso se modifica dependiendo de la desviación entre las variables estimadas y las variables calculadas actualmente para el ángulo del rotor y la potencia eléctrica activa de las máquinas sincrónicas. Una función lógica incrementa o disminuye el

tamaño del paso entre valores específicos. Gracias a este control del ancho de paso, el trabajo computacional requerido para un gran periodo de simulación se puede reducir significativamente.

---

## Términos y Definiciones, Sistema por Unidad

### Términos y Definiciones

#### Bloque de Funciones

Un bloque de funciones es la unidad de función más pequeña de un circuito de control. Cada bloque de funciones está descrito por una función de transferencia que constituye la(s) señal(es) de salida a partir de las señales de entrada. Una función de transferencia puede ser independiente (sólo ecuaciones algebraicas) o dependiente (ecuaciones algebraicas y diferenciales) del tiempo.

#### Variable

Variable de salida análoga o binaria de un elemento de red que varía en el tiempo. Una variable se puede seleccionar para que se muestre en la salida, o puede servir como variable de entrada para un circuito de control o un dispositivo de protección. El usuario puede cambiar un valor de variable estableciendo valores absolutos, por negación y/o por inversión.

#### Señal de Control

Una señal de control es una salida análoga o binaria de un bloque de funciones de un circuito de control. Una señal de control se encuentra disponible como una variable dentro y fuera del circuito de control pertinente.

#### Operaciones de Suicheo

Una operación de suicheo es un cambio en el estado de un *elemento de red*. Hay más de un tipo de operaciones de suicheo para cada *tipo de elemento*. Una operación de suicheo es provocada en un punto en el tiempo programado de antemano por el usuario o automáticamente por la función de disparo de un dispositivo de protección.

#### Sistema Por-Unidad

Internamente, el módulo de Estabilidad Transitoria realiza los cálculos con variables de referencia o base, es decir, con variables por unidad. Los valores nominales de los elementos de red se convierten en “por unidad” con la potencia de referencia o base  $S_B$  y el voltaje base  $U_B$  especificado para cada nodo. Los voltajes y potencias de referencia se leen al utilizar el Archivo de Flujo de Carga.

## Potencias de Referencia

Valores Nominales:

$$\underline{S}_{[MVA]} = P_{[MW]} + j \cdot Q_{[MVAr]}$$

Por unidad:

$$\underline{s} = p + j \cdot q \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\underline{S}}{S_B} = \frac{P}{S_B} + j \cdot \frac{Q}{S_B}$$

## Voltajes de Referencia

Valores Nominales:

$$\underline{U}_{[kV]} = U_{re[kV]} + j \cdot U_{im[kV]}$$

Por unidad:

$$\underline{u} = u_{re} + j \cdot u_{im} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\underline{U}}{U_B} = \frac{U_{re}}{U_B} + j \cdot \frac{U_{im}}{U_B}$$

## Corrientes de Referencia

Valores Nominales:

$$\underline{I}_{[A]} = I_{re[A]} + j \cdot I_{im[A]}$$

Por unidad:

$$\underline{i} = i_{re} + j \cdot i_{im} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\underline{I}}{I_B} = \frac{I_{re}}{I_B} + j \cdot \frac{I_{im}}{I_B}$$

Corriente de Referencia o Base:

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_B}$$

## Impedancias de Referencia

Valores Nominales:

$$\underline{Z}_{[\Omega]} = R_{[\Omega]} + j \cdot X_{[\Omega]}$$

Por unidad:

Impedancia de Referencia:

$$Z_B = \frac{U_B^2}{S_B}$$

$$\underline{Z} = r + j \cdot x \quad \Leftrightarrow \quad \frac{Z}{Z_B} = \frac{R}{Z_B} + j \cdot \frac{X}{Z_B}$$

### **Voltajes de Excitación de Referencia**

Los voltajes de los modelos de las máquinas síncronas son variables referidas al voltaje de red base  $U_B$  del nodo de los terminales de la máquina. Con el fin de simular dispositivos excitadores, el voltaje de excitación y las variables de entrada del modelo de control de voltaje se deben convertir de la red en por unidad a excitación en por unidad.

De acuerdo a IEEE [4], la variable de referencia  $U_E$  para voltajes de excitación es ese voltaje que en modo de no carga produce voltaje nominal en los terminales de la máquina síncrona.

La red en por unidad y la excitación en por unidad son diferentes sólo si se simula la saturación de la máquina síncrona o si el voltaje nominal de la misma,  $U_N$ , no es igual al voltaje de referencia  $U_B$ .

*Red por-unidad:*

*Factor de Conversión:*

$$u_{fB} \quad \frac{U_B}{U_E} = \frac{U_B}{U_N \cdot (1 + A \cdot e^{0,2 \cdot B})}$$

A,B ... Factores de saturación (ver máquinas síncronas)

*Excitación por-unidad:*

$$u_{fE} \quad \Leftrightarrow \quad u_{fE} = u_{fB} \cdot \frac{U_B}{U_N \cdot (1 + A \cdot e^{0,2 \cdot B})}$$

---

## Elementos de Red

### Admitancia Controlada

Las admitancias controladas son la forma más general de un modelo de simulación en el módulo de Estabilidad Transitoria. Las admitancias controladas, combinadas con modelos de control de cualquier estructura deseada, dan a los usuarios completa libertad de escoger la naturaleza y complejidad del modelo matemático a simular.

Básicamente, una admitancia controlada es una admitancia constante  $y_{cad}$  que ha sido permanentemente incorporada en la matriz de admitancias de la red. Su valor se entra a través del archivo de Datos Dinámicos, y es independiente del valor de la admitancia en el flujo de carga inicial. La admitancia efectiva se genera por medio de una corriente inyectada en la matriz de admitancias.

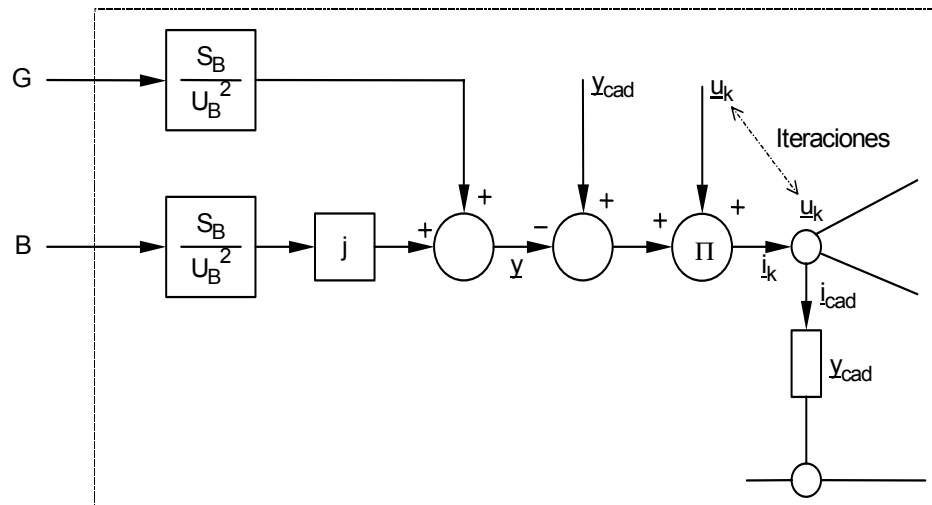
La admitancia efectiva (en  $[Ohm^{-1}]$ ) se puede controlar por medio de cualquier modelo de control deseado. Las componentes activa y reactiva de la admitancia se pueden controlar una independiente de la otra.

Una admitancia controlada está proyectada ante todo para modelar compensadores estáticos de potencia reactiva. En estos casos, sólo se controla la componente reactiva; la componente activa (si no es igual a cero) permanece constante. La admitancia controlada corresponde al bloque “Interfase” de la figura 11.67 en la referencia [7].

Sin embargo, las admitancias controladas también se pueden utilizar para modelar (además de los compensadores estáticos) cargas dinámicas, máquinas sincrónicas especiales, etc.

El uso de admitancias controladas requiere de un buen conocimiento del efecto de la admitancia pertinente y de la corriente de suministro en la solución de las ecuaciones de la red. Como no se han corrido los chequeos de credibilidad, se puede fácilmente obtener divergencia o inestabilidad numérica!

## Diagrama de Bloques del Modelo de Simulación



### Variables

Todas las variables de una admitancia controlada son variables análogas.

A... **Magnitud del Voltaje** [pu]

B... **Angulo del Voltaje** [grados]

C... **Magnitud de la Corriente** [A]

D... **Angulo de la Corriente** [grados]

E... **Potencia Activa** [MW]

F... **Potencia Reactiva** [MVar]

G... **Magnitud de la Admitancia Efectiva** [ $\text{Ohm}^{-1}$ ]

H... **Angulo de la Admitancia Efectiva** [grados]

I... **Componente Activa de la Admitancia Efectiva** [ $\text{Ohm}^{-1}$ ]

J... **Componente Reactiva de la Admitancia Efectiva** [ $\text{Ohm}^{-1}$ ]

### Operaciones de Suicheo

Ninguna

### Generadores de Funciones

Un generador de funciones es un elemento de red ficticio que sirve para probar equipos de control o como función de disturbio o perturbación para la simulación de la red.

Un generador de funciones se enciende y se apaga (se fija en on y en off) por medio de operaciones de suicheo.

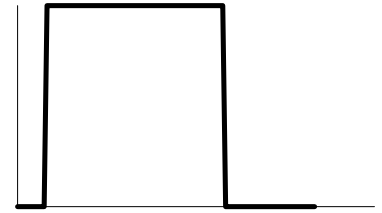
Se puede encender (fijar en on) más de un generador de funciones simultáneamente.

Los siguientes tipos de generadores de funciones se encuentran disponibles:

A.....**Paso**

Si el generador se abre, la señal de salida es 0.

Si el generador se cierra (se fija en on) en el tiempo  $t_0$ , la señal de salida es igual al valor constante K.



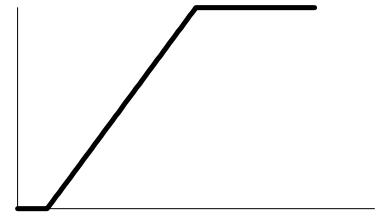
B.....**Rampa**

Si el generador se abre, la señal de salida es 0.

Si el generador se enciende en el tiempo  $t_0$ , la señal de salida se computa, usando la función

$$y = \text{Min} \left( K, \frac{K}{T} \cdot (t - t_0) \right)$$

Si  $|T| < 0.0001$ , la función rampa corresponde a una función impulso de magnitud K.



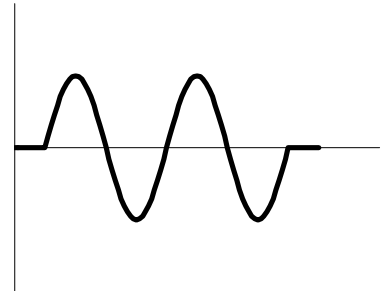
C.....**Seno**

Si el generador se abre, la señal de salida es 0.

Si el generador se cierra en el tiempo  $t_0$ , la señal de salida se computa, usando la función

$$y = K \cdot \sin \left( \frac{2\pi}{T} \cdot (t - t_0 + T_\phi) \right)$$

Si  $|T| < 0.0001$ , la función seno corresponde a una función impulso de magnitud K.



## Variables

A.....Salida del generador de funciones [pu]

## Operaciones de Suicheo

A.....**Generador ON**

Parámetros: ninguno

El generador de funciones se cierra (se fija en on).

B.....**Generador OFF**

Parámetros: ninguno

El generador de funciones se abre.

## Simulación

La secuencia de simulación se puede controlar dependiendo de los resultados de cómputo utilizando un elemento de red ficticio llamado "Simulación".

### Variables

*Ninguna*

### Operaciones de Suicheo

#### A **Abortar Simulación**

Parámetro: Ninguno

Las operaciones de suicheo abortan la simulación inmediatamente.

#### B **Activar Casilla de Depuración**

Parámetro:

$P_1$  Número de la casilla de depuración[#]

Se activa la casilla de depuración Número  $P_1$ , y la información de depuración afectada es el valor de salida. La casilla de depuración permanece activa hasta que se reinicialice de nuevo.

Si la casilla de depuración no se hubiera ajustado, la operación de suicheo no tendría ninguna función.

#### C **Reinicializar Casilla de Depuración**

Parámetro:

$P_1$  Número de casilla de depuración [#]

La casilla de depuración Número  $P_1$  se reinicializa.

Si la casilla de depuración no se hubiera ajustado, la operación de suicheo no tendría ninguna función.

## Relés Máximos y Mínimos

Los relés máximos y mínimos monitorean una variable medida para una violación por exceso (por encima del valor) o por defecto (por debajo del valor) de un valor medido programado de antemano. Si la variable medida de un relé máximo excede el valor umbral (Arranque), se inicia un conteo de tiempo que define un intervalo de tiempo. Si la variable medida afectada permanece sobre el valor umbral durante este intervalo, entonces la salida al final del intervalo será un comando de disparo. Si la variable medida retrocede cayendo por debajo del valor umbral, el contador de tiempo se reinicializa, y no habrá ningún comando de disparo como salida. Si se determina un comando de disparo, la función de disparo asociada se ejecutará cuando expire el tiempo de apertura de un interruptor.

Algunos ejemplos de relés máximos y mínimos:

- Relés de sobrecorriente
- Relés de sobrevoltaje
- Relés de bajo voltaje
- Relés de potencia
- Relés de impedancia (circuito de impedancia central)
- Relés de frecuencia

El concepto de una variable medida monitoreada no está restringido a las variables medidas listadas anteriormente. Cualquier variable se puede utilizar como variable medida monitoreada.

Se pueden operar hasta cuatro etapas del relé con una variable medida.

Cualquier operación de suicheo deseada se puede accionar como función de disparo asignada a una etapa del relé. Se pueden asignar más de una función de disparo a una etapa del relé. El arranque o las señales de disparo se pueden utilizar como conexiones de señal para otros relés.

El monitoreo de variables específicas puede utilizarse ventajosamente para controlar el proceso de simulación. Para determinar los límites de estabilidad, por ejemplo, se puede monitorear el ángulo del rotor. Si se excede un valor definido, la simulación se abortará como la “operación de suicheo” del relé. El generador ya se habrá salido de sincronismo, y el cálculo se puede detener.

## Variables

Todas las variables de los relés máx/mín son binarias.

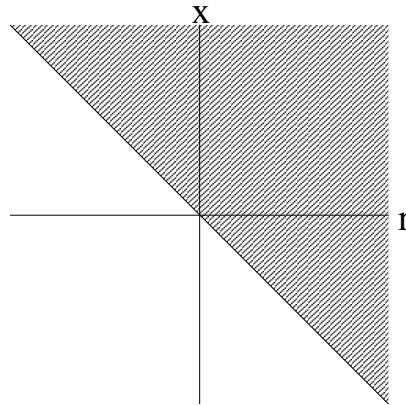
- A **Disparo, Etapa 1**
- B **Disparo, Etapa 2**
- C **Disparo, Etapa 3**
- D **Disparo, Etapa 4**

## Operaciones de Suicheo

Ninguna

## Protección de Distancia

El modelo de simulación para equipos de protección de distancia procesa señales de entrada binarias y análogas, y entrega señales de salida binarias. El plan de flujo de la señal se muestra en la página 17.



Las **señales de entrada análogas** son la corriente y el voltaje del elemento de rama asignado. Adicionalmente, e independientemente de todas las funciones subsecuentes, la corriente se monitorea para la violación por exceso de un valor mínimo, y el voltaje para la violación por defecto (por debajo) de un valor máximo. Si no hay violación por exceso ni por defecto, ninguno de los contadores de tiempo subsecuentes arrancará.

En el bloque “Dirección”, la dirección de la falla se determina a partir de la corriente y el voltaje. Si la impedancia medida en el diagrama  $r/x$  se encuentra en el área sombreada (ver figura anterior), la decisión será entonces para la dirección hacia adelante. De lo contrario, sería un caso de dirección hacia atrás. El efecto de la dirección se puede ajustar en positivo, negativo o inoperante para el arranque, así como para las etapas de medición. Esto significa que las características se pueden simular como direccional hacia adelante, direccional hacia atrás o no direccional.

En los bloques “Arranque” y “Mediciones”, el disparo del relé de distancia o el arranque de un contador de tiempo de una zona de medición, se obtiene por medio de las características de impedancia, las cuales se pueden utilizar para las siguientes funciones:

- Arranque
- Zona 1
- Zona 1 extendida
- Zona 2
- Zona 3
- Zona 4
- Hacia atrás
- Disparo y activación de un auto-recierre externo.

Cada una de estas funciones se puede asociar con las siguientes características de impedancia. Más de una característica del mismo tipo o de tipos diferentes se puede asociar con una función.

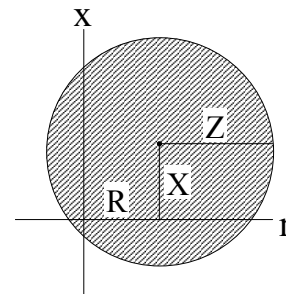
## Arranque por Sobrecorriente

El uso del arranque por sobrecorriente está proyectado predominantemente para la función “Arranque”.

La función de arranque por sobrecorriente evalúa sólo la corriente del elemento de rama, y es independiente del voltaje. Así, ésta es una “característica de impedancia” sólo en un sentido muy general. Si la corriente del elemento de rama excede el valor de corriente mínimo, el contador de tiempo de la función asignada arrancará.

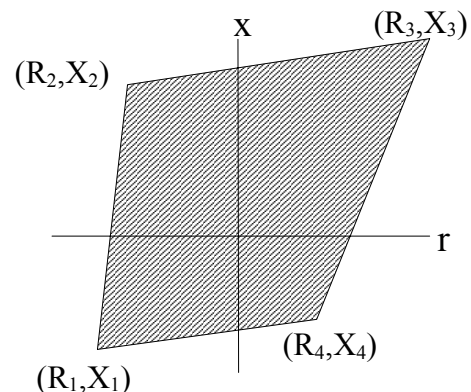
### Característica Circular

La característica circular en el diagrama  $r/x$  se muestra en la figura adyacente. Si el punto de impedancia medido se localiza dentro del círculo, entonces el contador de tiempo asociado arrancará. El círculo tiene un diámetro de  $Z$ , y está alejado del centro de coordenadas en  $(R, X)$ .



### Característica Poligonal

La característica poligonal en el diagrama  $r/x$  se muestra en la figura adyacente. Si el punto de impedancia medido se localiza dentro del polígono, entonces el contador de tiempo asociado arrancará.



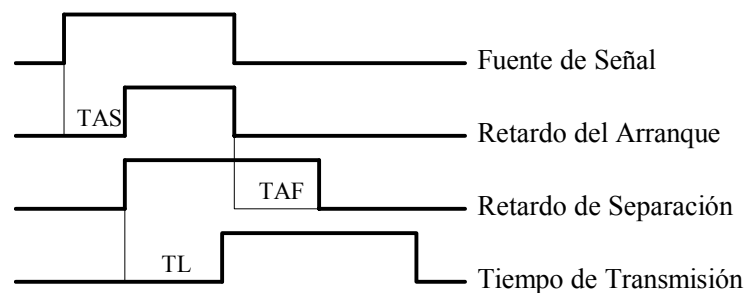
El polígono está definido por cuatro puntos vértices. Si estos puntos no se especifican, el polígono será interpretado como un triángulo. Los polígonos con más de cuatro vértices se pueden crear combinando varios polígonos de cuatro vértices.

## Señales Binarias

Se pueden utilizar señales binarias para ejercer influencia en el comportamiento del modelo de protección de distancia por eventos externos.

Las señales de entrada binarias pueden ser señales de salida binarias de otros relés de distancia o de otro tipo de relés. Estas señales pueden ser alteradas tanto en la fuente de señal como en la entrada del relé de distancia.

Para controlar el flujo de señal dependiente del tiempo, se pueden suministrar señales binarias en la fuente con un retardo de tiempo en el arranque TAS y/o con un retardo de separación TAF. Para el tiempo de transmisión de la señal entre la fuente de señal y el destino, a la señal se le puede asignar un tiempo de transmisión TL.



La ilustración anterior muestra la forma básica con la cual se ejerce influencia en la señal.

Cuando la señal llega al relé de distancia, puede ser alterada como se explica más adelante:

- 0 La señal no es alterada
- 1 La señal es invertida
- 2 La señal siempre es 1
- 3 La señal siempre es 0

Note que una señal binaria puede tener las siguientes funciones en el modelo de protección de distancia (ver ilustración al final de este capítulo):

### Bloqueo de Disparo

Se dará un comando de disparo al interruptor sólo si esta señal no está siendo recibida.

### Habilitar Disparo

El contador de tiempo de la Zona 1 no arrancará hasta que la señal externa esté siendo recibida. Sin embargo, el arranque del contador de tiempo de la Zona 1 se bloqueará sólo hasta que el tiempo,  $T_{FG}$ , haya transcurrido. Al terminarse  $T_{FG}$ , el contador de tiempo de la Zona 1 arrancará así ninguna señal habilitada esté siendo recibida.

### Enclavamiento

Si una señal está siendo recibida, se enviará un comando de disparo siempre y cuando el arranque direccional se haya activado.

### Extensión de Rango

Cuando una señal esté siendo recibida, se activa la Zona 1 extendida.

### Arranque Externo

La función de arranque comienza cuando se esté recibiendo una señal externa.

## **Bloqueo de Auto-Recierre**

El contador de tiempo de un disparo utilizando la característica de auto-recierre se iniciará sólo cuando ninguna señal externa esté siendo recibida.

## **Variables**

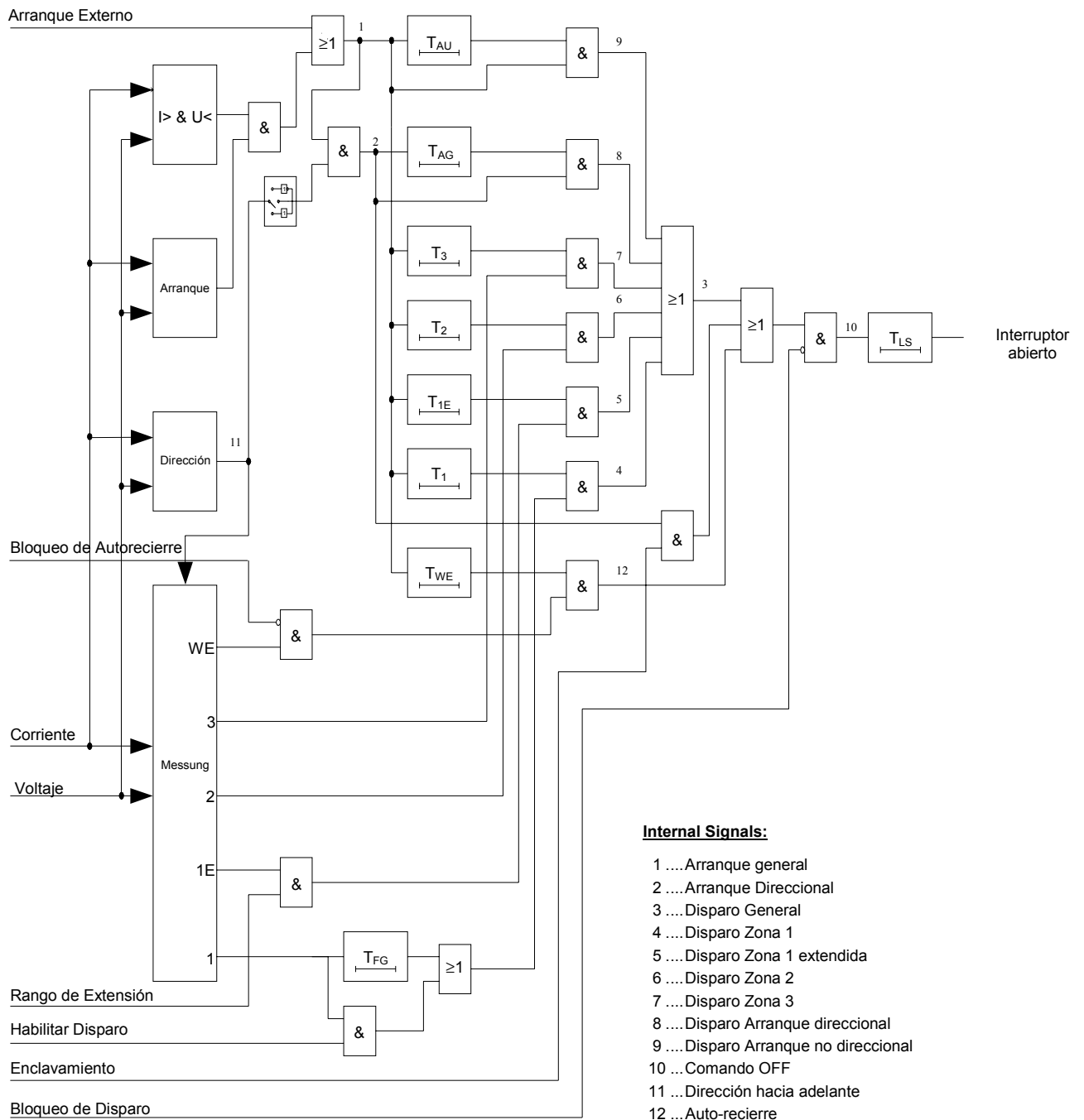
Todas las variables del relé de distancia son binarias.

- B     ***Arranque General***
- C     ***Arranque Direccional***
- D     ***Disparo General***
- E     ***Disparo, Zona 1***
- F     ***Disparo, Zona 1 extendida***
- G     ***Disparo, Zona 2***
- H     ***Disparo, Zona 3***
- I     ***Disparo, Arranque Direccional***
- J     ***Disparo, Arranque no Direccional***
- K     ***Comando OFF (señal a interruptor)***
- L     ***Dirección hacia Adelante***
- M     ***Auto-recierre***

## **Operaciones de Suicheo**

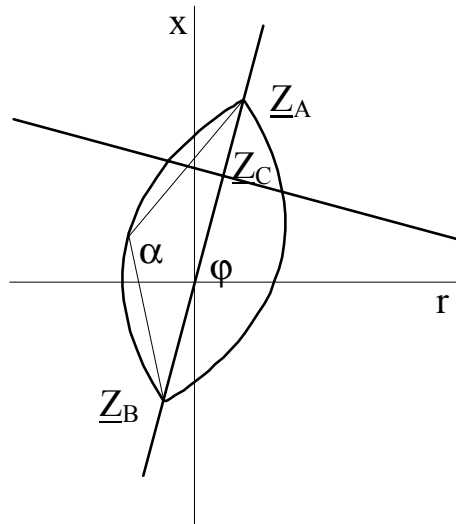
Ninguna

## Plan del Flujo de Señal para Protección de Distancia



## Protección de Deslizamiento de Polos

El deslizamiento de polos es una operación asincrónica dinámica de dos o más generadores sincrónicos, en los cuales los voltajes de entrehierro del generador están por lo menos una vez en oposición de fases.



En el evento de un cortocircuito en la red, un generador se releva de la potencia activa y se acelera, pues el torque de la turbina no cambia de manera inmediata. Si el cortocircuito es de corta duración, el generador efectivamente exhibirá oscilación de potencia en relación con la red, pero la oscilación decaerá con un amortiguamiento. Si la duración del cortocircuito excede un cierto valor que depende del uso de la capacidad del generador, del tipo y distancia de la falla pertinente, la máquina se saldrá de sincronismo, exhibiendo deslizamiento en contra de la red. El salirse de sincronismo está acompañado por mayores oscilaciones en corriente y potencia, y constituye un caso severo de “esfuerzo” para el generador involucrado. Con el fin de evitar un daño térmico y mecánico, este deslizamiento se debe detectar lo más pronto posible, y el generador se debe desconectar de la red. En una red con más de un generador, el deslizamiento se puede obtener usando el desplazamiento del puntero o punto de impedancia, visto desde los terminales del generador, en el plano  $r/x$ .

La característica de la corriente de deslizamiento del polo en el módulo de Estabilidad Transitoria está conformada por un área en forma de lente dividida en dos lentes mitades por medio de una línea recta en el eje del lente. Una línea recta perpendicular al eje del lente divide el plano  $r/x$  en áreas cercana y remota de los terminales del generador. La posición del lente se define por el ángulo phi del eje del lente, y la forma, por el ángulo alfa.

El criterio para un deslizamiento es el desplazamiento del puntero o punto de impedancia a través del lente. El puntero o punto de impedancia debe entrar al área del lente en un lado, y salir de nuevo del lente por el otro lado. Este puntero o punto debe estar por lo menos 25 ms en cada mitad del lente. Si el puntero o punto de impedancia pasa a través del lente por encima de la línea recta, significa que el deslizamiento pertinente se encuentra alejado de los terminales del generador, y en la Zona 2, y en caso contrario, se encuentra cercano a los terminales del generador, y en la Zona 1.

La frecuencia máxima del deslizamiento que se adquiere se especifica seleccionando el tamaño y la forma del lente. Mientras más ancho sea el lente, más altas son las frecuencias del deslizamiento que se pueden detectar. La

anchura y el tamaño del lente también determinan el rango en la dirección-r, la cual debe mostrar una distancia suficientemente grande desde la impedancia mínima de operación.

La función de disparo del relé se puede especificar de forma separada para la Zona 1 y la Zona 2. Se puede definir más de una función de disparo para cada nivel. Así mismo, se puede asignar cualquier operación de suicheo como función de disparo. Para una descripción de las funciones de disparo, ver “Relés Máximos – Mínimos”.

### **Variables**

Todas las variables del relé de deslizamiento de polos son binarias.

**A** *Disparo, Zona 1*

**B** *Disparo, Zona 2*

### **Operaciones de Suicheo**

*Ninguna*

## **Protección de Sobrecorriente**

### **Descripción Funcional**

En redes eléctricas, una característica de protección de sobrecorriente monitorea una *corriente medida*, y envía un *comando de disparo* a un interruptor cuando la corriente encuentra *condiciones definidas de arranque y disparo*.

La simulación de una característica de protección de sobrecorriente en el módulo de Estabilidad Transitoria se divide por consiguiente en

- Variable medida
- Condición de arranque
- Condición de disparo
- Función de disparo

Una característica de protección de sobrecorriente posee una variable medida, una condición de arranque y una función de disparo. Una característica de protección de sobrecorriente puede tener, sin embargo, más de una condición de disparo (p.e. nivel de alta corriente y retardo de tiempo independiente, nivel de sobrecorriente con retardo de tiempo dependiente).

### **Variable Medida**

La variable medida puede ser una magnitud de corriente de cualquier elemento de red. No se permiten otras variables (mensaje de error).

### **Condición de Arranque**

La condición de arranque es la violación por exceso de una corriente de arranque  $I_A$ , que es el múltiplo  $K_A$  de la corriente ajustada  $I_E$ . Después del arranque, empieza a correr el tiempo de disparo (condición de disparo). Si la corriente cae por debajo de un valor de reinicio  $I_R$  (que es el múltiplo  $K_R$  de la corriente ajustada  $I_E$ ) antes de que el tiempo de disparo haya transcurrido, el tiempo de disparo se reanuda y no se ejecutará ningún disparo.

$$I_A = K_A \cdot I_E$$

$$I_R = K_R \cdot I_E$$

### **Condición de Disparo**

Se pueden seleccionar diferentes características para el tiempo de disparo como condición de disparo. Una característica de protección de arranque se puede asociar con más de una característica de disparo.

#### **1) Tiempo de Disparo Independiente**

El tiempo de disparo  $t_A$  es constante e independiente de la corriente medida:

$$t_A = T_E$$

#### **2) Tiempo de Disparo Dependiente Analíticamente**

El tiempo de disparo  $t_A$  es variable y depende de la corriente medida  $I$  de forma no lineal. La correlación no lineal está dada analíticamente como,

$$\frac{t_A}{T_E} = \frac{K_1}{\left(\frac{I}{I_E}\right)^{K_2} - 1}$$

Por medio de  $K_1$  y  $K_2$ , las características de disparo pueden, por ejemplo, construirse de acuerdo a la IEC 255:

|                                       |              |              |
|---------------------------------------|--------------|--------------|
| Normalmente dependiente (Tipo A) :    | $K_1 = 0.14$ | $K_2 = 0.02$ |
| Muy dependiente (Tipo B) :            | $K_1 = 13,5$ | $K_2 = 1$    |
| Extremadamente dependiente (Tipo C) : | $K_1 = 80$   | $K_2 = 2$    |

Si la corriente es mayor que el múltiplo  $K_B$  de la corriente ajustada  $I_E$ , el tiempo de disparo no se reducirá más; ( $\max\left(\frac{I}{I_E}\right) = K_B$ ).  $K_B$  es, por ejemplo, igual a 20.

### 3) Tiempo de Disparo Dependiente en Forma Tabular

El tiempo de disparo  $t_A$  es variable, y depende de la corriente medida  $I$  de forma no lineal. La correlación no lineal está dada como una función tabular:

$$\frac{t_A}{T_E} = f\left(\frac{I}{I_E}\right)$$

Una función tabular se puede utilizar, por ejemplo, para simular características de fusibles.

### ***Función de Disparo***

Si la corriente medida permanece por encima del valor de reinicio  $I_R$  más tiempo que el de disparo después de que se haya excedido la corriente de arranque  $I_A$ , se da inicio a la función de disparo. En el módulo de Estabilidad Transitoria, la función de disparo es cualquier operación de suicheo deseada. Se puede asignar también más de una operación de suicheo a una función de disparo simple.

Al expirar el tiempo de apertura de un interruptor, el cual puede ajustarse para cada operación de suicheo, las operaciones de suicheo se ejecutarán.

### **Variables**

Las variables de un relé de sobrecorriente son análogas o binarias.

- A Corriente medida  $I$  [A]
- B Tiempo de disparo efectivo  $t_A$  [s]
- C Condición de arranque cumplida [binaria]
- D Condición de disparo cumplida [binaria]

### **Operaciones de Suicheo**

En una característica de protección de sobrecorriente no se puede ejecutar ninguna operación de suicheo.

*Esto NO se debe confundir con operaciones de suicheo producidas por una característica de protección de sobrecorriente.*

### **Condiciones de Corriente de Arranque (Pickup)**

La subrutina REGS determina como corrientes el cuadrado de las corrientes por unidad:

$$i^2 = \left( \frac{I}{I_B} \right)^2 \quad I_B \quad \text{Corriente base del elemento de red} \quad \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot U_B}$$

La condición de corriente de arranque (Pickup) en valores nominales

$$I > I_A \Rightarrow i^2 > I_A^2 \Rightarrow i^2 \cdot I_B^2 > (K_A \cdot I_E)^2$$

Resultados como condición de corriente de arranque (pickup) programada:

$$i^2 > \left( \frac{K_A \cdot I_E}{I_B} \right)^2 \Rightarrow i^2 > pcka$$

donde

$$pcka = \left( \frac{K_A \cdot I_E}{I_B} \right)^2 = 3 \cdot \left( \frac{K_A \cdot I_E \cdot U_B}{S_B} \right)^2$$

### Características Analíticas Dependientes de Retardo de Tiempo

La subrutina REGS da como corrientes el cuadrado de las corrientes por unidad (ver arriba). La característica requiere

$$\frac{I}{I_E} = \frac{i \cdot I_B}{I_E} = \left[ i^2 \cdot \left( \frac{I_B}{I_E} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

La característica analítica resulta como

$$\frac{t_A}{T_E} = \frac{K_1}{\left[ i^2 \cdot \left( \frac{I_B}{I_E} \right)^2 \right]^{\frac{K_2}{2}} - 1} = \frac{tck1}{(i^2 \cdot pcie)^{tck2} - 1}$$

donde

$$pcie = \left( \frac{I_B}{I_E} \right)^2 = \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{S_B}{I_E \cdot U_B} \right)^2$$

$$tck1 = K_1$$

$$t_{ck2} = \frac{K_2}{2}$$

## Control del Programa

### Simulación y Tabla de Salida

#### ***Longitud del Paso de Integración Inicial***

La simulación comienza con la longitud de paso inicial, y es alterada automáticamente por el programa. Si el control de longitud de paso se ha apagado (fijado en OFF), la simulación completa se ejecutará entonces con la longitud del paso de integración, XDT0.

Valor por defecto: 0.001 s (cuando XDT0 < 0.0001 s)

#### ***Duración de la Simulación***

Valor por defecto: XDT0 (cuando TEND < XTD0)

#### ***Control de la Longitud de Paso Automático***

0 apagado (fijado en off)

1 encendido (fijado en on)

Valor por defecto: 1 (cuando NVIS  $\neq$  0)

#### ***Nombre de una Máquina Sincrónica para el Angulo de Referencia del Rotor***

El ángulo del rotor de la máquina sincrónica con este nombre es la variable de referencia para la salida de los ángulos del rotor de todas las otras máquinas sincrónicas. Todos los ángulos del rotor son valores de salida como la diferencia del ángulo del rotor de la máquina sincrónica de referencia.

#### ***Controlar el Detenimiento de la Simulación del Programa***

0 No parar

1 Parar después de leer flujo de carga

2 Parar después de leer e inicializar los datos dinámicos

3 Parar después de leer e inicializar los datos de protección

4 Parar después de leer todos los datos

Valor por defecto: 0 (cuando NST < 0 o > 4)

#### ***Control de Listas de Salida de Variables***

0 Listas no impresas

1 Listas impresas

Valor por defecto: 1 (cuando KLIS  $\neq$  0)

**Control de Salida de Variables en Archivo**

0 Las variables no son valores de salida

1 Las variables son valores de salida

Valor por defecto: 1 (cuando KMON  $\neq$  0)

**Número de Puntos por Variable en Archivo**

Enuncia sólo el número aproximado de puntos por variable. Debido a operaciones de suicheo y al control de la longitud del paso, el número actual se puede desviar del especificado.

Valor por defecto: 150 (cuando NVF < 1)

**Parámetros de Simulación****Número de Sub-Intervalos para Circuitos de Control**

Las ecuaciones del sistema para los circuitos de control se resuelven NSI veces en un paso de integración. El valor mínimo es 2.

Valor por defecto: 5 (cuando NSI < 2 o > 100)

**Número Máximo de Iteraciones para la Solución Implícita**

Valor por defecto: 100 (cuando NITAMX < 1 o > 1000)

**Tolerancia de Convergencia para la Potencia Activa de Máquinas Síncronas**

Valor por defecto: 0.001 por unidad (cuando EPSP <  $10^{-8}$  o > 0.1)

**Tolerancia de Convergencia para las Componentes Real e Imaginaria de Voltajes de Nodo**

Valor por defecto: 0.001 por unidad (cuando EPSV <  $10^{-8}$  o > 0.1)

**Limitación de la Tabla para Multiplicación de la Longitud del Paso Inicial**

La longitud del paso de integración es alterada en múltiplos de la longitud del paso inicial. Se procede con la multiplicación de acuerdo a la tabla siguiente. La longitud de paso máxima se puede especificar limitando la tabla.

|   |    |   |    |    |    |    |    |    |    |
|---|----|---|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 1  | 5 | 15 | 9  | 35 | 13 | 55 | 17 | 75 |
| 2 | 2  | 6 | 20 | 10 | 40 | 14 | 60 | 18 | 80 |
| 3 | 5  | 7 | 25 | 11 | 45 | 15 | 65 | 19 | 85 |
| 4 | 10 | 8 | 30 | 12 | 50 | 16 | 70 | 20 | 90 |

Valor por defecto: 20 (cuando NVIMMX < 1 o > 20)

***Número Máximo de Iteraciones para la Solución Implícita después de la cual la Longitud de Paso se Reduce***

Valor por defecto: 7 (cuando NVIIMX < 1 o > 20)

***Número de Pasos para Incrementar más la Longitud de Paso después de su Último Incremento***

Valor por defecto: 3 (cuando NVIINC < 1 o > 20)

***Número de Pasos para Incrementar la Longitud de Paso después de su última Disminución***

Valor por defecto: 10 (cuando NVIDEC < 1 o > 20)

***Desequilibrio Máximo de Potencia Activa para Incrementar la Longitud de Paso***

Valor por defecto: 0.001 por unidad (cuando DEPEMX <  $10^{-6}$  o > 0.1)

***Máxima Frecuencia de Desequilibrio para Incrementar la Longitud de Paso***

Valor por defecto: 0.001 rad/s (cuando DERSMX <  $10^{-6}$  o > 0.1)