

Seminario *PowerFactory*

Estabilidad en Sistemas Eléctricos de Potencia

Material de Entrenamiento Ejercicios

DigSILENT GmbH

Heinrich-Hertz-Strasse 9

D-72810 Gomaringen

Tel.: +49 7072 9168 - 0

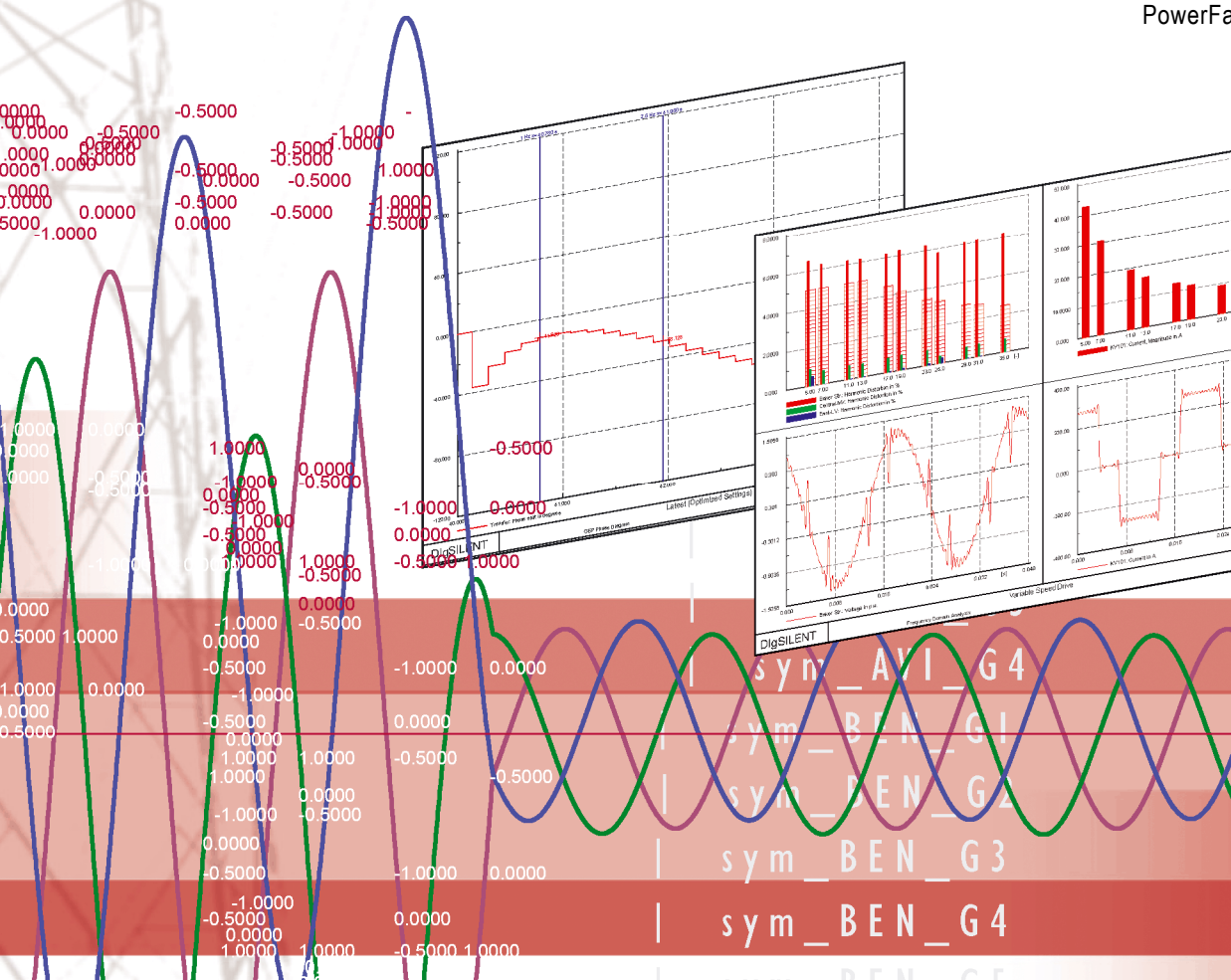
Fax: +49 7072 9168- 88

<http://www.digsilent.de>

e-mail: mail@digsilent.de

PowerFactory Version 14.0

2 October 2010



Índice de Contenidos

1	Introducción	4
2	Estabilidad Angular Transitoria	5
2.1	El sistema de una máquina.....	5
2.2	Simulación de una falla en la línea CCT2.....	5
2.2.1	Ajuste de la simulación	5
2.2.2	Cálculo automático del tiempo crítico	6
2.2.3	Recierre exitoso de la línea.....	7
2.2.4	Recierre fallido de la línea	7
3	Sistema de Excitación	9
3.1	AVR.....	9
3.1.1	Definición del elemento DSL	9
3.1.2	Definición del modelo de planta (modelo compuesto)	9
3.1.3	Respuesta del regulador al escalón	10
3.1.4	Comportamiento durante falla	13
3.2	Estabilizador de potencia (PSS).....	13
3.2.1	Definición del element DSL.....	13
3.2.2	Comportamiento frente a fallas.....	13
4	Estabilidad de Pequeña Señal	16
4.1	Simulación transitoria de una pequeña perturbación	16
4.2	Análisis modal. Cálculo de Autovalores.	17
5	Estabilidad de tensión	19
5.1	Curvas V-Q:	19
5.2	Curvas P-V:.....	20
5.2.1	Ajuste automático de tap	20
5.2.2	Factor de potencia.....	21
6	Estabilidad de Frecuencia.....	22
6.1	Sistema Multi-Máquina	22
6.1.1	Escenarios de Operación	22
6.1.2	Análisis de Modal.....	22
6.2	Pérdida de Generación	23
6.3	Pérdida del Interconector del Área 2	23
6.3.1	Pérdida repentina del interconector	23

6.3.2	Pérdida del interconector tras falla	23
6.4	Rechazo de Carga.....	24
6.5	Modificando la Inercia del Sistema	24
6.6	Modificando la Regulación Primaria	25
6.7	Dependencia de la Carga con la Frecuencia	25

1 Introducción

El propósito de los siguientes ejercicios es introducir los métodos fundamentales para el estudio de los diferentes fenómenos asociados a la estabilidad de sistemas eléctricos de potencia (SEPs). Los diferentes tipos de cálculos y las herramientas disponibles en PowerFactory se ejercitan de manera de permitir una familiarización con los métodos de análisis para estabilidad de SEPs, visualización e interpretación de los resultados.

Durante los ejercicios el instructor le brindará ayuda para la realización de las tareas y estará a su disposición para contestar preguntas y atender dudas. Por favor, no dude en consultarlo.

i Le deseamos éxito con la tarea !

2 Estabilidad Angular Transitoria

2.1 El sistema de una máquina

- Importar el archivo "Sistema de Una Máquina @ Inicio.pfd" y activar el proyecto.
- Este proyecto contiene el sistema de una máquina que se muestra en el diagrama unifilar de la Figura 1. La potencia del generador sincrónico se transmite a través de un sistema de 2 líneas (de diferente longitud) hacia una red de potencia infinita, representada en este caso por una fuente de tensión con impedancia de salida = 0. En los próximos ejercicios se analizarán diferentes aspectos referidos a la estabilidad de la operación de esta máquina.
- Antes de comenzar, calcular un flujo de cargas y verificar mensajes de error y/o advertencias en la ventana de salida. Corregir cualquier error antes de proseguir.

2.2 Simulación de una falla en la línea CCT2

2.2.1 Ajuste de la simulación

- Calcular las condiciones iniciales para la simulación dinámica RMS  :
- En la página de opciones básicas seleccionar el método de simulación RMS, utilizar una representación de la red balanceada, y seleccionar la opción para verificar las condiciones iniciales.
- En la página "Tamaño de Paso" ajustar el paso de integración a 1 ms y el tiempo inicial a - 200 ms.
- Verificar cualquier advertencia o mensaje de error en la ventana de salida.
- Definir a continuación las variables a monitorear: picar con el botón derecho sobre el elemento, Definir -> Conjunto de variables (Sim).
- Incluir mínimamente las siguientes variables de resultado:
 - Generador: potencia activa y reactiva, corriente y ángulo del rotor (con referencia a la tensión de la barra de referencia del sistema *fir0t*).
 - Generador: variable "outofstep" (ver *Simulación RMS|Señales*). Esta variable lógica cambia de 0 a 1 cuando el generador pierde sincronismo con la red.
 - Tensiones en las 3 barras del sistema
 - Corrientes en las líneas CCT1 y CCT2

- Se pueden editar en cualquier momento las variables de resultados ya definidas a través de  en la barra de las funciones de estabilidad.
- Definir a continuación los siguientes eventos de simulación:
 - Cortocircuito trifásico a la mitad (50%) de la línea 'CCT2' para $t=0$. Picar con el botón derecho la línea, y en el menú contextual *Definir* -> *Evento de Cortocircuito*. Ajustar allí el tiempo de ejecución y el tipo de falla (trifásica). La impedancia de falla en este caso será 0.
 - Observar que la ubicación de la falla en la línea (ej. al 50%) se define directamente en la línea sobre la página *Simulación RMS*. Al elegir la ubicación activar la opción *Disponible*.
 - Apertura tripolar de los interruptores de la línea para $t=100$ ms a los efectos de despejar la falla. Picar con el botón derecho la línea, y en el menú contextual *Definir* -> *Evento de Switcheo*.
- Se pueden editar en cualquier momento los eventos de simulación ya definidos a través de  en la barra de las funciones de estabilidad.
- Ejecutar la simulación  para $t=10$ s (tiempo absoluto de la simulación). Verificar en la ventana de salida que los eventos de simulación se hayan ejecutado correctamente.
- Graficar las variables de resultado . Utilizar  y  para autoescalar los ejes X e Y respectivamente.
- Para generar diagramas (instrumentos virtuales) adicionales picar  y seleccionar alguno de los siguientes tipos disponibles:
 - Subplot(VisPLot) : un solo eje Y, el eje X corresponde al tiempo.
 - Subplot(2y) : dos ejes Y disponibles, el eje X corresponde al tiempo.
 - A partir de los diagramas analizar el comportamiento transitorio de la máquina y decidir sobre su estabilidad para la falla simulada.
 - Repetir la simulación modificando el tiempo de despeje de la falla hasta encontrar de manera iterativa el tiempo crítico de despeje de la falla.

2.2.2 Cálculo automático del tiempo crítico

El escrito DPL "Critical Fault Screening" que se encuentra en la librería de escritos DPL del proyecto permite automatizar la iteración para el cálculo del tiempo crítico de despeje de falla una vez que se completó la primera simulación.

- Picar con el botón derecho en la línea y en el menú contextual elegir Ejecutar escritos DPL.
- En la ventana de diálogo seleccionar el escrito "Critical Fault Screening".

- Ajustar los parámetros de entrada:
 - Pos: 50%; ubicación de la falla en la línea.
 - minTclear: 0.05 s; tiempo mínimo (el escrito no iterará si el sistema se vuelve inestable para un tiempo menor a minTclear)
 - maxTclear: 1 s; tiempo máximo (el escrito no iterará si el sistema se mantiene estable para una duración de la falla de maxTclear)
 - tstep: paso de la iteración, se recomienda usar aquí el período de la frecuencia del sistema.
- Ejecutar para iniciar el cálculo.
- El escrito reporta el resultado a la ventana de salida. Verificar este valor con el calculado anteriormente de forma manual.
- Ejecutar el escrito nuevamente para diferentes ubicaciones de la falla (10% y 90%). Comparar los resultados y sacar conclusiones.

2.2.3 Recierre exitoso de la línea

- Repetir nuevamente la simulación para la falla al 50% de la línea y agregar ahora los siguientes eventos de simulación para modelar el recierre exitoso de la línea:
 - Remover la falla 100 ms después de la apertura de los interruptores de línea. Picar con el botón derecho la línea, y en el menú contextual *Definir* -> *Evento de Cortocircuito*. Ajustar allí el tiempo de ejecución y en tipo de falla seleccionar *Despejar Cortocircuito*.
 - Cierre tripolar de los interruptores de la línea para $t=1$ s. Picar con el botón derecho la línea, y en el menú contextual *Definir* -> *Evento de Switcheo*.
- Ejecutar la simulación y analizar las curvas de resultado. Sacar conclusiones.

2.2.4 Recierre fallido de la línea

- Repetir nuevamente la simulación del paso anterior, pero poner el evento de despeje de falla fuera de servicio . Esta condición corresponde a un recierre fallido de la línea, o sea recierre sobre falla.
- Ejecutar la simulación y analizar las curvas de resultado. Sacar conclusiones.

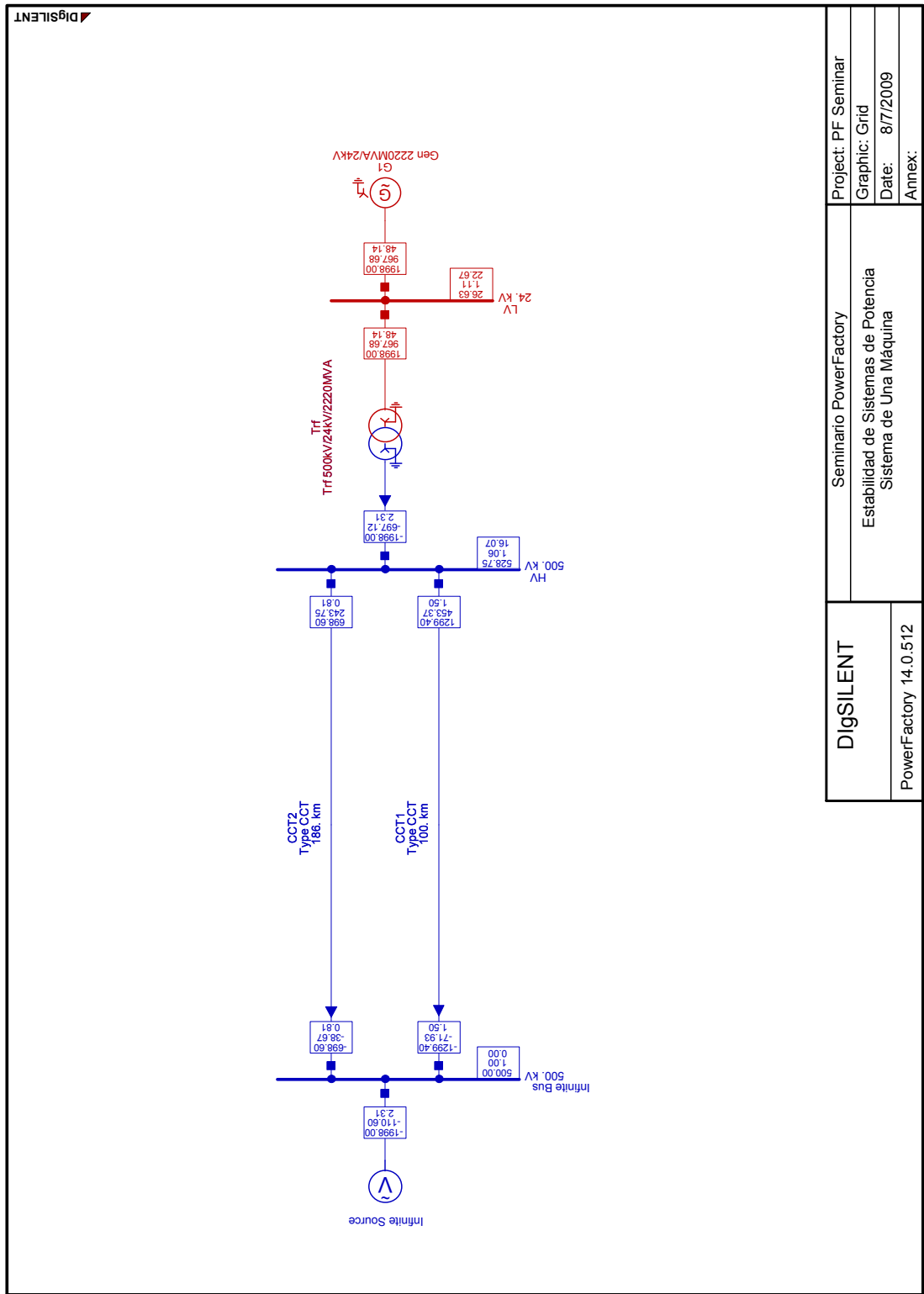


Figura 1: Diagrama unifilar del sistema de una máquina.

3 Sistema de Excitación

A continuación se incluirá un regulador de tensión (AVR) y un estabilizador (PSS) para el generador. De esta manera se incluirá en el estudio los reguladores del generador y se analizará su influencia sobre la estabilidad del sistema que está siendo analizado.

3.1 AVR

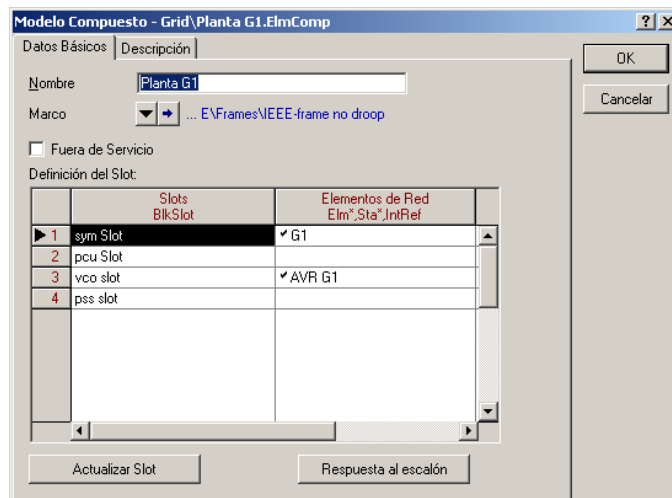
3.1.1 Definición del elemento DSL

- Mediante el administrador de datos crear  un nuevo "Modelo General" (Common-Model) dentro de la carpeta de la red del sistema.
- Seleccionar el bloque "vco_EXAC1A" de la librería IEEE standard de controladores que encontrará dentro de la librería global de PowerFactory.
- Ingresar el nombre y los parámetros del regulador de acuerdo con la Tabla 1.
- El diagrama de bloques del regulador se muestra en la Figura 2. Para mostrarlo en PF picar con el botón derecho sobre el elemento DSL del regulador  y seleccionar "Mostrar Gráfica". Identificar sobre el diagrama de bloques las variables de entrada y de salida del regulador.

3.1.2 Definición del modelo de planta (modelo compuesto)

A continuación se define el modelo compuesto de planta de manera de conectar el regulador de tensión creado en el paso anterior con el generador del sistema. De esta forma podremos analizar la respuesta del sistema regulador-generador en lazo cerrado.

- Mediante el administrador de datos crear un nuevo modelo compuesto (Composite Model) dentro de la red y nombrarlo "Planta G1".
- De la librería global de PF, seleccionar el frame "Standard Models|Marcos de Modelos Compuestos|SYM Frame_no droop". Este frame corresponde al sistema de excitación de una máquina síncrona.
- A continuación se deberán completar los slots (celdas en la columna derecha) seleccionando el generador síncrono "G1" y al regulador de tensión (AVR) recientemente creado. Completa la selección el modelo de planta deberá verse como se muestra a continuación:



- Ejecutar un flujo de carga y calcular las condiciones iniciales para verificar la no existencia de errores.
- Ejecutar un flujo de carga y calcular las condiciones iniciales de la simulación dinámica para verificar la no existencia de errores. Observar que pegado al símbolo del regulador  deberá aparecer la tilde indicando que el modelo se encuentra activo.

3.1.3 Respuesta del regulador al escalón

A continuación se analiza el comportamiento del generador frente a la falla del caso anterior bajo la influencia ahora del regulador de tensión.

- Definir variables de resultado para el regulador de tensión del mismo modo que se realizó en el ejercicio anterior para los demás elementos de la red. Seleccionar todas las señales de entrada y salida del regulador.
- Recalcular las condiciones iniciales, editar nuevamente las variables de resultado , luego picar allí con botón derecho sobre el símbolo del regulador y seleccionar *Salida -> Variables Seleccionadas*. PF imprimirá en la ventana de salida los valores iniciales de las señales de entrada y salida del regulador.
- Definir un evento de parámetro sobre la variable de entrada *usetp* para simular un escalón en la tensión de referencia. Para ello:
 - Editar la lista de los eventos de simulación . De ser necesario, poner eventualmente fuera de servicio los eventos de la simulación del caso anterior.
 - Crear un nuevo evento de simulación  y elegir en el menú desplegable *Evento de parámetro (EvtParam)*.
 - Ajustar el tiempo de ejecución.
 - En "Elemento" seleccionar el regulador de tensión recientemente creado.
 - Nombre de la variable: *usetp* (nombre de la señal de entrada que se desea modificar).

- Nuevo Valor: salto del 5% sobre el valor inicial de la señal de entrada *ustep*. (ej. Nuevo valor = 1.05 para el caso de ser 1 el valor inicial de esta señal).
- Ejecutar la simulación durante 10 s, graficar y analizar los resultados. Observar el comportamiento de la tensión de excitación (salida del AVR) y la tensión en bornes de la máquina. Se comporta el sistema de acuerdo a lo esperado?
- Opcionalmente se pueden cambiar los ajustes de los parámetros del regulador de tensión (AVR) y observar su influencia en la respuesta al escalón.

Tabla 1: Ajustes para el regulador de tensión (AVR) tipo EXAC1A

	DIGSILENT	Project:	
	PowerFactory	-----	
	13.0.252	Date:	11/11/2011
Grid:Grid	Syst.Stage:Grid	Annex:	/ 1
AVR G1	Common Model	1	/1
Model Definition	\Library\Models\IEEE\Models\vco_EXAC1A		
Out of Service	No		
Parameter			
Tr Measurement Delay [s]	0.0000		
Tb Filter Delay Time [s]	1.0000		
Tc Filter Derivative Time Constant [s]	1.0000		
Ka Controller Gain [p.u.]	500.0000		
Ta Controller Time Constant [s]	0.2000		
Te Excitor Time Constant [s]	0.0100		
Kf Stabilization Path Gain [p.u.]	0.0300		
Tf Stabilization Path Delay Time [s]	1.0000		
Kc Excitor Current Compensation Factor [p.u.]	0.3470		
Kd Excitor Current Derivative Factor [p.u.]	0.0500		
Ke Excitor Constant [p.u.]	1.0000		
E1 Saturation Factor 1 [p.u.]	7.4025		
Se1 Saturation Factor 2 [p.u.]	0.2416		
E2 Saturation Factor 3 [p.u.]	9.8700		
Se2 Saturation Factor 4 [p.u.]	1.5373		
Vrmin Controller Minimum Output [p.u.]	-10.0000		
Vrmax Controller Maximum Output [p.u.]	10.0000		

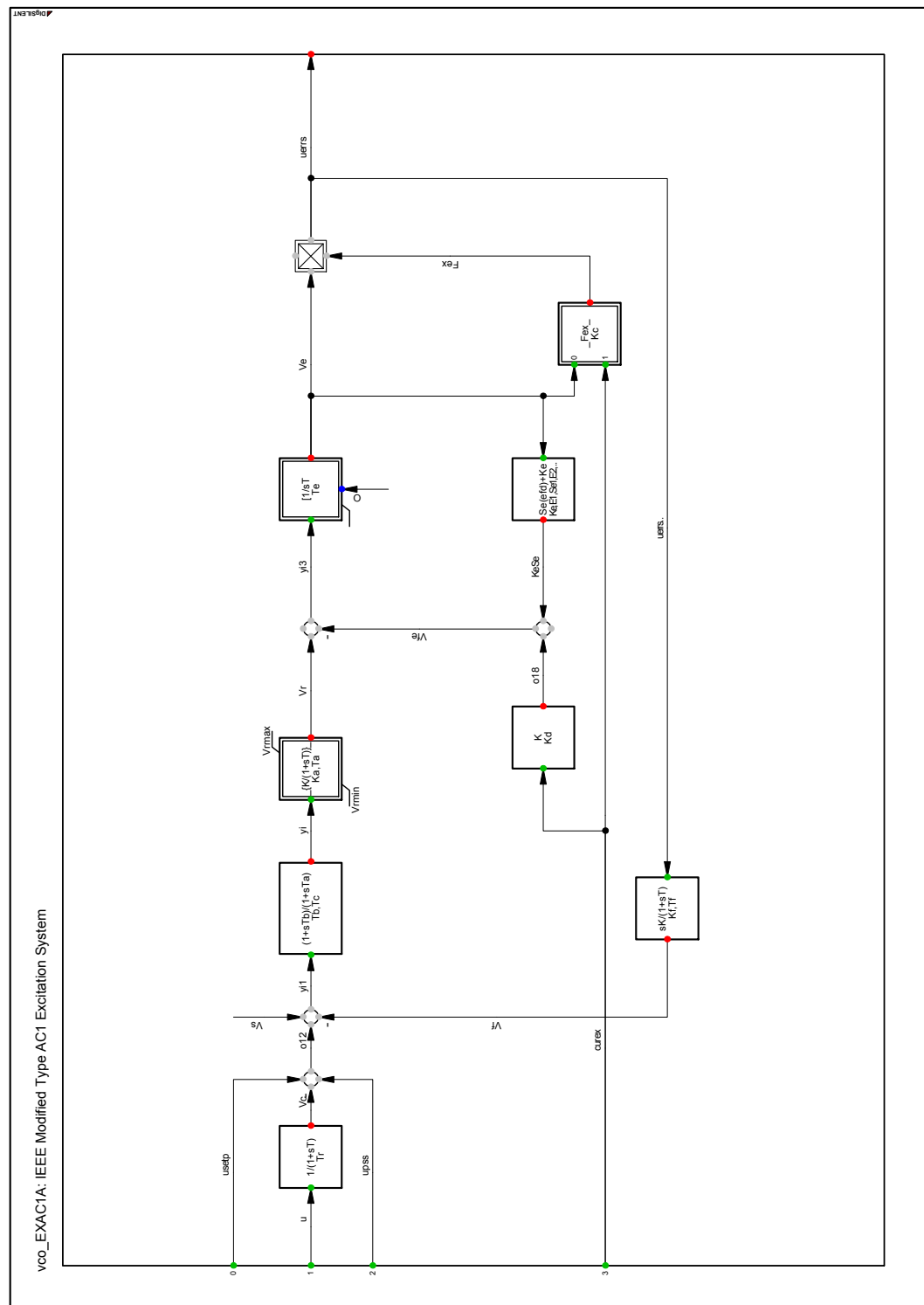


Figura 2: Diagrama de bloques del regulador de tensión vco_EXAC1A

3.1.4 Comportamiento durante falla

A continuación se analiza la influencia del regulador de tensión (AVR) sobre la estabilidad transitoria del generador en el sistema de una máquina.

- Repetir la simulación de la falla en la línea CCT2 del ejercicio 1 (§2.2.1).
- Analizar los resultados obtenidos y compararlos con aquellos previos a la conexión del regulador de tensión.
- Determinar el tiempo crítico de despeje de falla. ¿Se ha modificado respecto del caso §2.2.1?

3.2 Estabilizador de potencia (PSS)

A continuación se define un estabilizador de potencia (PSS) y se analiza el comportamiento de la planta generadora frente a fallas en el sistema.

3.2.1 Definición del element DSL

- Mediante el administrador de datos crear  un nuevo "Modelo General" (Common-Model) dentro de la carpeta de la red del sistema.
- Seleccionar el diagrama de bloques "pss_STAB2A" de entre los modelos IEEE standard disponibles en la librería global de PowerFactory.
- Ingresar el nombre y los parámetros de acuerdo a la Tabla 2.
- El diagrama de bloques del estabilizador de potencia se muestra en la Figura 2. Para mostrarlo en PF picar con el botón derecho sobre el elemento DSL del estabilizador  y seleccionar "Mostrar Gráfica". Identificar sobre el diagrama de bloques las variables de entrada y de salida.
- Editar el modelo compuesto (composite model) de la planta  y completar el spot correspondiente al PSS con el estabilizador de potencia recientemente creado.
- Calcular las condiciones iniciales para verificar la no presencia de errores.
- Ejecutar un flujo de carga y calcular las condiciones iniciales de la simulación dinámica para verificar la no existencia de errores. Observar que pegado al símbolo del regulador  deberá aparecer la tilde indicando que el modelo se encuentra activo.

3.2.2 Comportamiento frente a fallas

- Definir variables de resultado para el estabilizador, seleccionando todas las señales de entrada y salida.

- Recalcular las condiciones iniciales, editar nuevamente las variables de resultado , luego allí picar con botón derecho sobre el símbolo del regulador y seleccionar *Salida -> Variables Seleccionadas*. PF imprimirá a la ventana de salida el valor inicial de las señales de entrada y de salida. Analizar los valores iniciales de las variables del estabilizador.
- Ejecutar a continuación la simulación para la misma falla que en §3.1.4
- Comparar la respuesta de la planta (generador) tras el agregado del estabilizador de potencia con aquella obtenida en §3.1.4 y sacar conclusiones sobre la influencia del estabilizador en el sistema.
- Determinar el tiempo crítico de despeje de falla para l línea CCT2 (misma ubicación que en §2.2.2) y comparar resultados respecto del caso anterior.

Tabla 2: Ajustes para el PDD tipo STAB2A

	DIGSILENT	Project:	
	PowerFactory	-----	
	13.0.252	Date:	11/11/2011

Grid:Grid	Syst.Stage:Grid	Annex:	/ 1

PSS G1	Common Model	1	/1

Model Definition	\Library\Models\IEEE\Models\pss_STAB2A		
Out of Service	No		
Parameter			
K2	Washout Factor [p.u.]	1.0000	
T2	Washout Time Constant [s]	4.5000	
K3	Signal Transducer 1th Factor [p.u.]	1.3000	
T3	Signal Transducer Time Constant [s]	2.0000	
K5	Output Filter Factor [p.u.]	1.5000	
T5	Output Filter Time Constant [s]	0.0100	
inv	-1 [-1]	-1.0000	
K4	Signal Transducer 2th Factor [p.u.]	1.0000	
Hlim	Controller Maximum Output [p.u.]	0.0500	

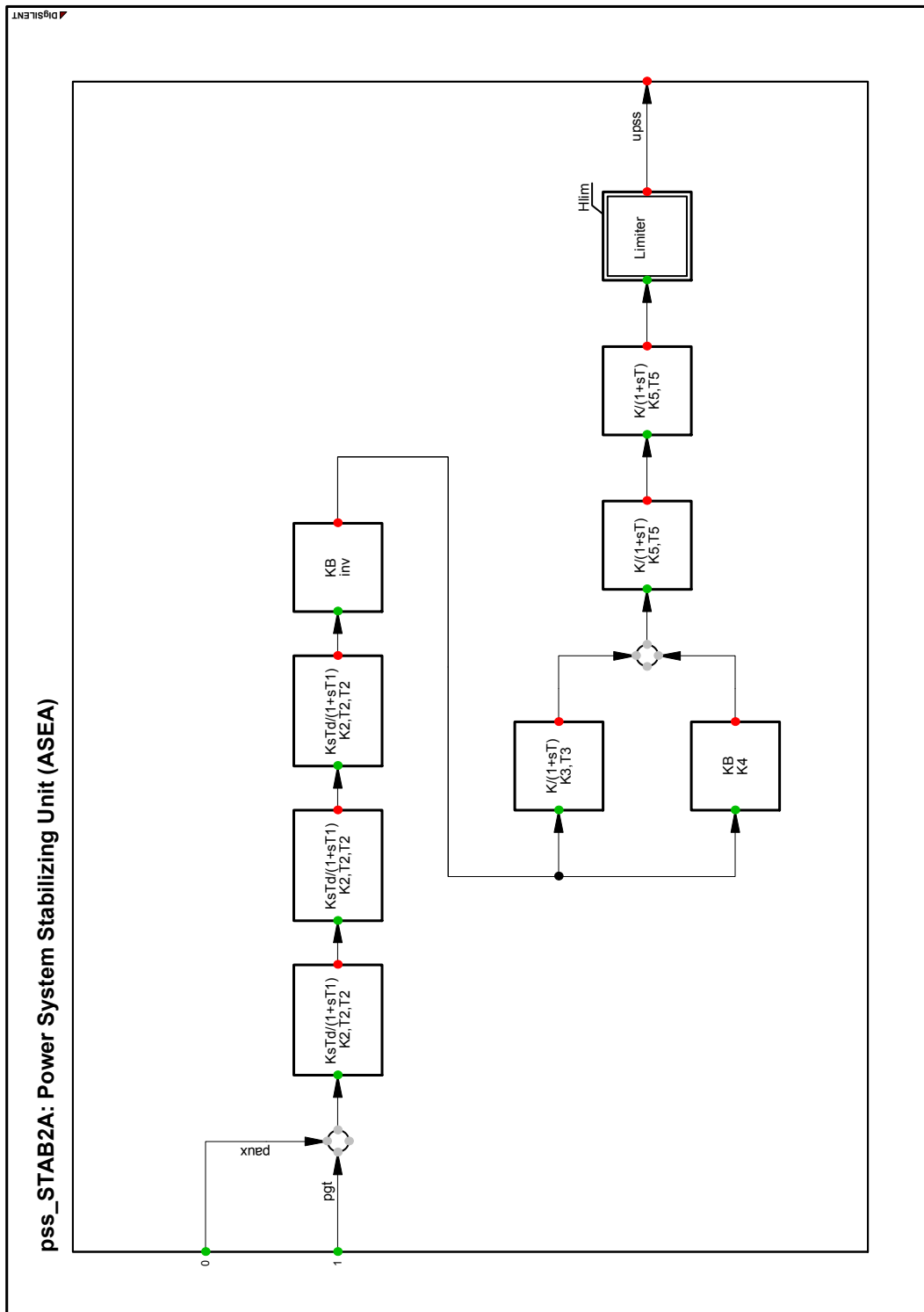


Figura 3: Diagrama de bloques del pss_STAB2A (power system stabilizer).

4 Estabilidad de Pequeña Señal

A continuación se analizará mediante el cálculo de autovalores la estabilidad dinámica o de pequeña señal en el sistema de una máquina.

A los efectos de brindar una mejor comprensión del análisis y ejercitar el uso de la herramienta en PF, se verificarán los resultados del análisis de autovalores con aquellos correspondientes a una simulación transitoria de una pequeña perturbación en el sistema.

Antes de comenzar, crear un nuevo caso de estudio de manera de no perder los resultados de los ejercicios anteriores.

4.1 Simulación transitoria de una pequeña perturbación

- Calcular las condiciones iniciales del sistema.
- Editar los eventos de simulación y asegurarse de eliminar o poner fuera de servicio los eventos de simulación de los ejercicios anteriores.
- Mediante la definición de un evento para la máquina sincrónica incrementar el torque en la máquina en 0,01p.u. para $t=0$ s. Para ello:
 - Picar con el botón derecho sobre el generador sincrónico en el diagrama unifilar y en el menú contextual seleccionar *Definir -> Evento de Máquina Sincrónica*.
 - Ajustar el tiempo de ejecución
 - Definir un torque adicional de 0.01 p.u. (pequeña señal o perturbación). Este torque se adicionará al torque inicial de la máquina, produciendo una leve aceleración del rotor.
- Mediante un nuevo evento para la máquina sincrónica volver el torque adicional nuevamente a cero para $t=0.2$ s.
- Ejecutar la simulación durante al menos 1 s.
- Graficar la velocidad y el ángulo del rotor del generador.
- Sobre la curva, medir la frecuencia (o período) y el amortiguamiento de la oscilación principal de la velocidad del generador. Recordar que para ello se puede hacer uso de las siguientes herramientas:
 - Zoom en el eje X  y eje Y 
 - Ubicar el cursor sobre un punto de la curva, botón derecho para acceder al menú contextual y seleccionar *Mostrar dx/dy* para medir la distancia entre dos puntos.

- De ser necesario también se podrá definir normalizar la curva (factor de escala para el eje Y). Para ello editar el gráfico, y en la tabla de las curvas, activar en la penúltima columna "Normalizar" y ajustar el valor normalizado según se desee.
- Tomar nota de la frecuencia y el amortiguamiento de la oscilación a los efectos de compararlo después con los resultados del análisis de autovalores.
- Poner a continuación el estabilizador (PSS) fuera de servicio, ejecutar nuevamente la simulación, y medir la nueva frecuencia de la oscilación y el factor de amortiguamiento.

El resultado de las simulaciones transitorias se verificará a continuación mediante la función a análisis modal (cálculo de autovalores).

4.2 Análisis modal. Cálculo de Autovalores.

- En la barra principal del programa, cambiar la barra de herramientas por  (análisis de autovalores).
- Calcular las condiciones iniciales .
- Iniciar el cálculo de autovalores  con las siguientes opciones:
 - Opciones básicas: todos los valores propios (QR-algoritmo)
 - Opciones avanzadas: asegúrese que esté seleccionada la opción de cálculo de los factores de participación. La variable de estado deberá ser la velocidad (s:speed).
- Verificar cualquier error y/o advertencia en la ventana de salida del programa.
- Generar un reporte  para el cálculo de autovalores con las siguientes opciones:
 - *Valores Propios -> Participaciones -> Detallado* para reportar la información detallada incluidos los factores de participación.
 - Selección de valores propios: elegir la opción de Filtro para todos los valores propios con un período menor que 30 segundos y un amortiguamiento máximo de 10 1/s.
- Identificar el período y el factor de amortiguamiento de la oscilación principal y comparar con los valores obtenidos de la simulación transitoria en §4.1.
- Para representar los resultados del análisis de autovalores gráficamente en el plano complejo, seleccionar  y luego . En la ventana de diálogo seleccionar *Mostrar Todo* y escalar los ejes X e Y.
 - Picar doble sobre cualquiera de los autovalores del diagrama para acceder a sus datos (partes real e imaginaria, factor de participación etc.).

- Picar con el botón derecho en cualquiera de los autovalores y en el menú contextual seleccionar *Generar Diagrama Fasorial* o *General Diagrama de Barras* para acceder a una representación fasorial o de barras de los factores de participación de ese modo de oscilación.
- Repetir el cálculo de autovalores para el caso con estabilizador (PSS en servicio) y comparar los resultados nuevamente.

5 Estabilidad de tensión

A continuación se analizará la estabilidad de tensión del sistema de una máquina. Esto puede ser llevado a cabo mediante el uso de curvas tensión-potencia reactiva (V-Q) y curvas potencia activa-tensión (P-V). Para agilizar el cambio de los parámetros del sistema (por ejemplo el P de las cargas) y generar las curvas P-V y V-Q se dispone de escritos DPL que automatizan esta tarea.

5.1 Curvas V-Q:

- Generar un nuevo caso de estudio.
- Asegurarse que la tensión de operación de la barra de potencia infinita sea 1 p.u.
- Sobre el diagrama unifilar, marcar el generador y la barra LV (presionar la tecla *control* para la selección múltiple).
- Botón derecho sobre la selección, y en el menú desplegable seleccionar *Ejecutar Escritos DPL*.
- En la ventana de diálogo seleccionar el escrito "V-Q Curve" que se encuentra dentro de la carpeta "Scripts" del proyecto.
- En la ventana de diálogo del escrito ajustar los parámetros de entrada como sigue:
 - Starting voltage (tension inicial) = 1.2 p.u.
 - Step voltage (paso) = 0.02 p.u.
 - Stop voltage = 0 p.u.
 - Minimum active power Pmin = 1800 MW
 - Maximum active power Pmax = 2400 MW
 - DoVi = 1 (para crear los gráficos de las curvas v-Q).
- *Ejecutar* para iniciar la simulación.

El escrito DPL generará automáticamente tantas curvas V-Q como pasos para la potencia activa del generador se hayan elegido. Observar además que el escrito DPL cambia el despacho del generador de P-Q a P-V (tensión en la barra "LV") para la generación de las curvas V-Q.

Analizar los resultados y determinar los puntos estables/inestables del sistema. Notar que también es posible mostrar todas las curvas sobre un mismo diagrama editando la tabla de curvas de cualquiera de las gráficas.

5.2 Curvas P-V:

A continuación se analiza mediante el uso de curvas P-V la estabilidad de tensión en la barra LV del sistema. Se desea determinar cual es la carga máxima que se puede suministrar allí, sin la existencia del generador. Para ello, se modificará temporalmente la red para incluir una nueva carga en LV y desconectar el generador.

Para generar las curvas P-V se dispone otro escrito DPL.

- Crear un nuevo caso de estudio.
- Opcional: crear una variación de red a los efectos de guardar las modificaciones que se introducirán a continuación.
- Poner fuera de servicio el generador, y conectar una carga en el Terminal "LV". Definir esta carga como carga PQ, vale decir con una potencia activa y un factor de potencia constante. Asignarle un valor de 100 MW (el valor inicial no es relevante ya que será modificado durante el cálculo) y un factor de potencia de 0.8 inductivo.
- Sobre el diagrama unifilar, marcar la carga, y las barras LV, HV y la barra de potencia infinita (presionar la tecla *control* para la selección múltiple).
- Botón derecho sobre la selección, y en el menú contextual seleccionar *Ejecutar Escritos DPL*.
- En la ventana de diálogo seleccionar el escrito "P-V Curve" que se encuentra dentro de la carpeta "Scripts" del proyecto.
- En la ventana de diálogo del escrito ajustar el valor de escala inicial a 1.
- *Ejecutar* para iniciar la simulación. El escrito generará automáticamente las curvas P-V para las 3 barras seleccionadas.
- Determinar los límites de estabilidad de tensión del sistema.
- Para una tensión de operación de 1 p.u. +/- 5% determinar cual es la máxima potencia que puede ser suministrada a una carga en la barra LV.

5.2.1 Ajuste automático de tap

- Habilitar para el transformador del sistema el ajuste automático de taps, de manera de controlar el valor de la tensión en el lado LV a 1 p.u.
- Calcular un flujo de cargas con ajuste automático de cargas y verificar la solución.

- Ejecutar nuevamente el escrito DPL "P-V curves2 y comparar los resultados con el caso anterior. ¿Qué influencia tiene el conmutador bajo carga sobre la estabilidad de tensión en este caso? Determinar los nuevos límites para la máxima carga que se puede suministrar en la barra LV.

5.2.2 Factor de potencia

- Repetir el cálculo de curvas P-V para diferentes factores de potencia: considerar $fp=0.8$ capacitivo y $fp=1$.
- Comparar los resultados con el caso anterior y sacar conclusiones.

6 Estabilidad de Frecuencia

6.1 Sistema Multi-Máquina

Los estudios a continuación serán realizados en un sistema consistente de 4 áreas interconectadas mediante líneas de transmisión. Las áreas 1, 3 y 4 están eléctricamente cercanas entre sí, mientras que el área 2 está débilmente interconectada con el resto del sistema.

6.1.1 Escenarios de Operación

Las estudiarán dos escenarios de operación previamente definidos en el proyecto:

- **Importa:** el área 2 está importando aprox. 500 MW del resto del sistema
- **Exporta:** el área 2 está exportando aprox. 500 MW al resto del sistema

Antes de comenzar el análisis:

- Calcular un flujo de cargas y verificar la condición inicial del sistema (perfiles de tensiones, sobrecarga de elementos, etc.). Imprimir para ello un reporte de verificación (ventana Salidas en el comando de flujo de cargas).
- Verificar las potencias de intercambio entre las diferentes áreas del sistema. Utilizar para ello un reporte de resumen por área. Alternativamente podrá definir un *Boundary* para acceder a los resultados en forma tabular.

6.1.2 Análisis de Modal

- Para ambos escenarios de operación calcular los autovalores del sistema para la velocidad de los generadores.
- Mostrar los resultados en el plano complejo de autovalores.
- Verificar que no existan modos inestables de operación (polos en el semiplano derecho, marcados en rojo en el diagrama).
- Cambiar las propiedades del eje Y para mostrar la frecuencia. ¿En qué rangos de frecuencia se encuentran distribuidos los modos de oscilación?
- Chequear el modo de oscilación alrededor de 0.8 Hz con el mínimo coeficiente de atenuación. Generar un diagrama con los factores de participación. Identificar los generadores que participan de esta oscilación.

6.2 Pérdida de Generación

A continuación se estudiará la pérdida de los generadores más importantes del sistema y su efecto sobre la desviación de frecuencia.

- Identificar en cada área los generadores con el mayor despacho por escenarios. Estos generadores son candidatos a producir la mayor desviación de frecuencia en el sistema de producirse su desconexión.
- Simular a continuación la desconexión (n-1) de dichos generadores. Considerar los siguientes casos: 1 generador por área desconectado, dos escenarios de operación por generador.
- Ajuste de la simulación:
 - Evento de switcheo para desconectar el generador
 - Monitorear la velocidad (o frecuencia) de todos los generadores en cada una de las áreas.
 - Monitorear los flujos de potencia a través de las líneas de interconexión.
- ¿Influencia la ubicación del generador desconectado la máxima desviación de frecuencia?
- De acuerdo al código de operación del sistema, la frecuencia no puede bajar de 49.7 Hz para una contingencia (n-1) en el sistema. ¿Se excede este límite para la desconexión de alguno de los generadores en el sistema?

6.3 Pérdida del Interconector del Área 2

La pérdida del interconector del área 2 (dos líneas entre las áreas 2 y 4)) conlleva a la formación de dos islas en el sistema. A continuación se estudiará el comportamiento de la frecuencia tras la formación de islas.

Al igual que en el caso anterior, el análisis se llevaría a cabo para ambos escenarios de operación.

6.3.1 Pérdida repentina del interconector

- Disparar el interconector de área 2 para $t=0$ sin existencia de falla previa, mediante un evento de switcheo para ambas líneas.
- Analizar el comportamiento de la frecuencia en ambas islas tras la separación. ¿Se mantienen ambas islas estables? Determinar la desviación de frecuencia de estado estacionario en ambas islas del sistema.

6.3.2 Pérdida del interconector tras falla

- Considerar ahora la siguiente simulación:
 - Falla trifásica franca en el extremo de una de las líneas del interconector.

- Como consecuencia de la mala operación de una protección, ambas líneas son desconectadas.
- ¿Resulta afectada por la falla la desviación transitoria de la frecuencia en este caso con relación a la simulación anterior?
- ¿Cómo resulta la desviación de frecuencia de estado estacionario en ambas islas del sistema en este caso con relación al caso anterior?

6.4 Rechazo de Carga

Para limitar la caída de frecuencia en el sistema tras la pérdida del interconector, se estudiará el efecto de un esquema de rechazo de carga basado en protecciones de baja frecuencia.

- Identificar aquellos casos previamente analizados (pérdida de una unidad generadora o del interconector con el área 2) donde se produce una desviación transitoria de la frecuencia de hasta 49 Hz o mayor.
- Calcular un flujo de carga con las siguientes opciones:
 - *Opciones de Simulación Avanzadas*: Considerar todos los dispositivos de protección.
- Colorear el diagrama unifilar de acuerdo a la ubicación de relés.
- Editar el relé de alguna de las cargas y observar su definición y los diferentes pasos de rechazo de carga.
- Ejecutar nuevamente la simulación de los casos identificados mas arriba.
- Verificar los mensajes en la ventana de salida. ¿A qué frecuencia se inicia el rechazo de carga? Verificar los ajustes de los diferentes pasos de los relés en función de los resultados de la simulación.
- ¿Cuál es la máxima caída de la frecuencia en este caso?
- ¿Cómo se ve afectada la desviación de frecuencia de estado estacionario?

6.5 Modificando la Inercia del Sistema

La inercia del sistema es un factor importante para el gradiente inicial de la frecuencia.

- Simular nuevamente el disparo del interconector del área 2 para $t=0$ sin existencia de falla previa, mediante un evento de switcheo para ambas líneas.
- Determinar la máxima y mínima desviación transitoria de frecuencia en ambas islas del sistema.

- Desconectar a continuación el generador "G4_2" e incrementar en 100 MW el despacho del generador vecino "G3_2" a modo de compensación .
- Ejecutar la simulación nuevamente. ¿Cuál es la pendiente de la frecuencia y la máxima desviación en este caso?
- ¿Cómo se ve afectada la desviación de frecuencia de estado estacionario?

6.6 Modificando la Regulación Primaria

El control primario de frecuencia es importante en el análisis de la estabilidad de frecuencia del sistema.

- Cambiar el droop de los reguladores de velocidad de los generadores del área 2 del valor 0.05 a 0.025 p.u. Notar que:
 - Como el droop del regulador es un parámetro del modelo de la red, se recomienda aquí la definición de una variación de red a los efectos de no modificar los valores anteriores.
- Repetir la simulación de la pérdida del interconector del caso anterior.
- ¿Cuál es el comportamiento de la frecuencia en este caso? ¿Cómo resulta la desviación de frecuencia de estado estacionario respecto del caso anterior?

6.7 Dependencia de la Carga con la Frecuencia

El modelo de carga usado hasta ahora no considera ninguna dependencia de la carga con la frecuencia. A continuación se modificará esta dependencia y se analizará el comportamiento de la frecuencia en este caso.

- Editar el tipo de carga general y en la hoja de la simulación RMS cambiar la dependencia de P con la frecuencia de 0 a 0.1 y luego también a 1.
- Repetir la simulación anterior de la pérdida del interconector.
- Comparar el comportamiento de la frecuencia en este caso respecto del caso anterior.
- ¿Cuál es la máxima desviación transitoria de la frecuencia en este caso?
- ¿Cuál es la desviación de la frecuencia de estado estacionario en este caso?
- Es correcta la hipótesis a veces asumida de despreciar este efecto en caso de que no se conozca esta característica de la carga?