

Anexos**Subcomité de Controles
Subcomité de Análisis y
Planeamiento Eléctrico**

Revisión	Fecha	Descripción
0	18-11-2021	Elaboración de los Anexos del Acuerdo de DFACTS

ANEXO 1

Objetivo

Este anexo define el formato para el reporte de los modelos validados de los FACTS distribuidos.

Información requerida

Los informes de resultados de validación deberán presentarse electrónicamente en formato Portable Document Format (.PDF). Cada informe debe incluir:

- Tabla de contenido.
- Generalidades.
- Descripción de los sistemas de control.
- Descripción de los detalles de las pruebas de validación realizadas.
- Modelo para flujo de carga.
- Modelos dinámicos validados de cada sistema de control con parámetros y diagrama de bloques.

Los detalles de estos requerimientos se presentan a continuación:

1. GENERALIDADES

En este campo se debe reportar la siguiente información:

- Presentar una descripción general de los dispositivos FACTS (fabricante, modelo, punto de conexión y datos técnicos). Adicionalmente se debe incluir un diagrama unifilar en donde se identifique la conexión del equipo al Sistema Interconectado Nacional.
- Indicar claramente el elemento del sistema donde se conectan y la función que están ejerciendo en el Sistema Interconectado Nacional (si se trata por ejemplo de alivio de restricción indicar de cuál se trata y cómo la operación del equipo permite aliviar la restricción).

2. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

En este campo se deben especificar los modos de operación disponibles de los FACTS distribuidos, definiendo cuál es el modo de operación en condiciones normales. Se debe indicar el rango de variación posible de los parámetros (corriente, tensión).

3. MODELO PARA ANÁLISIS DE FLUJO DE CARGA

El objetivo de este campo es presentar el modelo del FACTS distribuido validado para ser utilizado para realizar análisis de flujo de carga, representando la función de operación del equipo tal como se lleva a cabo en el SIN y teniendo en cuenta las pruebas realizadas para su validación. Con este objetivo, como mínimo se debe reportar la siguiente información:

Estructura del modelo

Rama con una reactancia en serie con que represente los ohmios equivalentes inyectados. El cálculo de la reactancia se ejecuta en cada iteración del flujo de carga teniendo en cuenta el rango de operación en voltaje del dispositivo y la corriente fluyendo por el mismo.

Reactancia = Voltaje inyectado / Corriente

Parámetros

Corriente mínima de operación
Tensión mínima de inyección
Tensión máxima de inyección
Corriente máxima de operación

4. MODELO PARA ANÁLISIS DINÁMICO

El objetivo de este campo es presentar el modelo dinámico del FACTS distribuido validado requerido para realizar análisis en el dominio RMS, representando la función de operación del equipo tal como se lleva a cabo en el SIN y teniendo en cuenta las pruebas realizadas para su validación. Con este objetivo, como mínimo se debe reportar la siguiente información:

Diagrama de bloques

Se debe incluir el diagrama de bloques en el dominio de Laplace (s) de la función de control correspondiente para cada uno de los modos de operación.

Parámetros

Se debe reportar una tabla con los parámetros validados incluidos en el diagrama de bloques y las bases usadas para la obtención de los mismos en p.u.

Pruebas de validación

Se debe realizar una descripción de las pruebas que permitan reproducirlas, definiendo:

- Fecha y hora de las pruebas.
- Tipo de prueba: SAT o FAT.
- Datos de la perturbación: tipo (escalón, sinusoidal, rampa, etc.), magnitud, punto de inyección.
- Condiciones iniciales de operación de los FACTS: corriente a través del dispositivo, tensión inyectada inicial.
- Modo de control
- Reporte de cualquier modificación sobre los parámetros del control que haya sido necesaria para la realización de cada prueba, por ejemplo ganancias, pendientes, entre otros.

Verificación de la validez del dispositivo FACTS

Se deben presentar las curvas comparativas de los registros obtenidos en las pruebas en campo vs. las obtenidas a través de simulación de los modelos, que demuestren la validez del modelo correspondiente. Las curvas son las definidas en el artículo SÉPTIMO del presente Acuerdo. Todas las curvas incluidas deben tener las siguientes características:

- Etiquetas para los ejes y las correspondientes unidades de medida.
- Títulos para cada gráfica indicando la prueba que fue desarrollada.
- Escala apropiada para ambos ejes.
- Anexo con archivo de datos que contenga los resultados de las pruebas de validación para todos los sistemas de control (datos de prueba y de simulación) en formato de texto (.txt) con encabezados que identifiquen el nombre de la variable y las unidades de medición correspondientes.

4. LIMITADORES, LÓGICAS DE PROTECCIÓN RELACIONADAS CON EL CONTROL

Descripción

En este campo se debe especificar el tipo de limitadores y lógicas de protección relacionadas con el control que estén disponibles (ejemplo lógicas subtenensión y sobretensión serie), su función y principio de funcionamiento.

Diagrama de bloques

Se debe incluir el diagrama de bloques en el dominio de Laplace (s) de los limitadores disponibles.

Parámetros

Se debe reportar una tabla con los parámetros validados incluidos en el diagrama de bloques y las bases usadas para la obtención de los mismos en p.u.

Pruebas de validación

Se debe realizar una descripción de las pruebas que permitan reproducirlas, definiendo:

- Fecha y hora de las pruebas.
- Tipo de prueba: FAT.
- Datos de la perturbación: tipo (escalón, sinusoidal, rampa, etc), magnitud, punto de inyección.
- Condiciones iniciales de operación de los FACTS: corriente a través del dispositivo, tensión inyectada inicial.
- Modo de control
- Reporte de cualquier modificación sobre los parámetros del control que hayan sido necesarios para la realización de cada prueba.

Verificación de la validez del modelo de los limitadores y de las lógicas de protección asociadas al control

Se deben presentar las curvas comparativas que demuestren la validez de los modelos de los limitadores y las lógicas de protección asociadas al control.

Las curvas deben corresponder a las variables definidas en el artículo SÉPTIMO del presente Acuerdo:

Todas las curvas incluidas deben tener las siguientes características:

- Etiquetas para los ejes y las correspondientes unidades de medida.
- Títulos claros para cada gráfica indicando la prueba que fue desarrollada.
- Escala apropiada para ambos ejes.

En los anexos se debe incluir los datos utilizados para construir las curvas reales y las simuladas en formato de texto (.txt) considerando la misma estampa de tiempo para ambas señales y reportando el nombre de la variable y las unidades correspondientes.

ANEXO 2.

Índices de evaluación para verificar la validez de los modelos

El principio esencial de la validación de la respuesta dinámica de un modelo es que éste, al ser integrado en el programa de simulación utilizado por el CND para el planeamiento del SIN, permita reproducir dentro de niveles aceptables de precisión, la respuesta real de los elementos modelados ante pruebas o perturbaciones en diferentes condiciones operativas.

Con el fin de contar con modelos útiles para el análisis y planeamiento del SIN, los agentes deben garantizar que la respuesta real y la simulada, utilizando los modelos validados, sean coherentes en los siguientes aspectos:

- Forma general de las curvas para las distintas pruebas de validación que se desarrollen, incluyendo la magnitud y velocidad de la respuesta.
- Tiempo de subida, sobreimpulso.
- Bandas muertas y tiempos de retardo.
- Valores iniciales y finales.

Con el fin de verificar que las curvas sean coherentes de acuerdo con los parámetros y características señaladas, se determinará los índices de evaluación que se presentan a continuación:

ERROR ABSOLUTO DEL SOBREPULSO (ES)

Es la diferencia absoluta entre los sobreimpulsos en porcentaje.

$$ES = |SI_R - SI_S|$$

Con:

$$SI = \frac{v_{\max} - v_f}{v_f - v_i} \times 100$$

Donde:

SI_R : Sobreimpulso de la señal real tomada durante la prueba

SI_S : Sobreimpulso de la señal simulada tomada del modelo

$v_{\max}$: Valor máximo de la curva

v_f : Valor final de la curva

v_i : Valor inicial de la curva

ERROR RELATIVO EN EL TIEMPO DE RETARDO (ETR)

Este error está basado en el tiempo de retardo, el cual se define como el tiempo necesario para que la señal alcance un 50% del valor final. El error relativo en el tiempo de retardo, será la diferencia absoluta relativa entre los tiempos de retardo real y simulado.

$$ETR = \left| \frac{TR_R - TR_S}{TR_R} \right| \times 100$$

Donde:

TR_R : Tiempo de retardo de la señal real tomado durante la prueba

TR_S : Tiempo de retardo de la señal simulada tomado con base en el modelo

ERROR RELATIVO EN EL TIEMPO DE ESTABLECIMIENTO (ETE)

Este error está basado en el tiempo de establecimiento, el cual se define como el tiempo necesario para que la señal ingrese en una banda de $\pm 3\%$ del tamaño del escalón alrededor del valor final. El error relativo en el tiempo de establecimiento, será la diferencia absoluta relativa entre los tiempos de establecimiento real y simulado.

$$ETE = \left| \frac{TE_R - TE_S}{TE_R} \right| \times 100$$

Donde:

TE_R : Tiempo de establecimiento de la señal real tomado durante la prueba

TE_S : Tiempo de establecimiento de la señal simulada tomado con base en el modelo

ERROR RELATIVO EN EL TIEMPO DE RESPUESTA INICIAL (ETRI)

Este error está basado en el tiempo de respuesta inicial, el cual se define como el tiempo necesario para que la señal salga de la banda de $\pm 3\%$ del tamaño del escalón alrededor del valor inicial. El error relativo en el tiempo de respuesta inicial, será la diferencia absoluta relativa entre los tiempos de respuesta inicial real y simulado.

$$ETRI = \left| \frac{TRI_R - TRI_S}{TRI_R} \right| \times 100$$

Donde:

TRI_R : Tiempo de respuesta inicial de la señal real tomado durante la prueba

TRI_S : Tiempo de respuesta inicial de la señal simulada tomado con base en el modelo

ERROR RELATIVO DEL VALOR FINAL (EVF)

Este error se define como la diferencia entre los valores finales alcanzados por las señales real y simulada, con base en la diferencia entre el valor final e inicial de la señal real.

$$EF = \left| \frac{vf_R - vf_S}{vf_R - vi_R} \right| \times 100$$

Donde:

vf_R : Valor final real de la señal obtenida con base en la prueba.

vf_S : Valor final de la señal simulada obtenida con base en el modelo.

vi_R : Valor inicial real de la señal obtenida con base en la prueba.

COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL (CCL):

Este error es una medida de la relación lineal entre la señal real con la simulada.

$$CCL = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}}$$

Donde:

R_i : Es el i-ésimo valor de la señal real proveniente de la prueba.

S_i : Es el i-ésimo valor de la señal simulada proveniente del modelo.

$\bar{R}$: Es el valor promedio de la señal real proveniente de la prueba.

$\bar{S}$: Es el valor promedio de la señal simulada proveniente del modelo.

ERROR ABSOLUTO MEDIO NORMALIZADO (EAMN):

Este error es el promedio del valor absoluto de las diferencias punto a punto entre la señal real y la señal simulada. Cada punto de las señales debe estar normalizado por el mínimo valor entre el aporte de la señal real y la señal simulada. Se define aporte de la señal real como la máxima diferencia entre la señal real y el valor inicial y aporte de la señal simulada como la máxima diferencia entre la señal simulada y el valor inicial. El error se reporta en porcentaje.

$$EAMN = 100 * \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(\bar{R}_i - \bar{S}_i)|$$

Donde,

$\bar{R}_i$: Es el i-ésimo valor de la señal real proveniente de la prueba, el cual es normalizado por el mínimo valor entre el aporte de la señal real y la simulada.

$\bar{S}_i$: Es el i-ésimo valor de la señal simulada proveniente del modelo, el cual es normalizado por el mínimo valor entre el aporte de la señal real y la simulada.

n : Es el número de muestras de las señales.

ERROR COMBINADO (EC):

Es el error que considera simultáneamente el *EAMN* y el *CCL* tal como se presenta en la siguiente ecuación:

$$EC = \frac{EAMN + 100(1 - CCL)}{2}$$

El Error combinado se reporta en porcentaje.

Los valores de referencia para los índices de coherencia, las pruebas y las señales sobre las que estos se aplican, son definidos en las siguientes tablas:

Tabla A3.1 Índices de coherencia para el modelo de la función de control

Prueba	Señal	Índice	Valor de referencia
Escalones hacia arriba y hacia abajo en tensión de referencia	V inyectado, corriente a través del dispositivo	ES	20%
		ETR	20%
		ETE	20%
		ETRI	15%
		EVF	10%
		CCL	≥ 0.93
		EAMN	$\leq 15\%$

Tabla A3.2 Índices de coherencia para los modelos de los limitadores y protecciones

Prueba	Señal	Índice	Valor de referencia
Escalón superando el umbral definido hasta lograr activación del limitador o lógica	V inyectado, corriente a través del dispositivo	EVF	10%
		CCL	≥ 0.85

Tabla A3.3 Índices de coherencia para la curva VI

Prueba	Señal	Índice	Valor de referencia
Curva característica VI	I normalizadas al valor máximo absoluto de la señal	Desviación porcentual	5 % de desviación entre lo esperado y lo obtenido en las pruebas

Se considera que un modelo pasa exitosamente la etapa de validación, si todos los índices de coherencia calculados para cada prueba son menores o iguales a los valores de referencia indicados en las tablas A3.1 a A3.3. De lo contrario, el CND informará al Agente sobre los índices incumplidos para que este realice los ajustes necesarios en el modelo. Se permite como tolerancia máxima el error de medición.

Para los limitadores que contengan dos funciones de actuación, instantánea y de retardo, se deben separar las respuestas de cada función para así poder hacer un adecuado análisis.

ANEXO 3.

Guía de prueba mínimas requeridas para validar los modelos de los FACTS distribuidos

Pruebas mínimas requeridas para validar los modelos de los FACTS distribuidos.

A continuación, se presenta una guía con pruebas que pueden ser realizadas para verificar la validez de los modelos de los diferentes dispositivos FACTS.

1. Pruebas Validación

1.1 Validación de la curva VI

Se realiza el barrido de la curva VI completa durante las pruebas FAT (ver Figura 1). Durante las pruebas SAT se debe mostrar evidencia que el equipo puede inyectar los valores operativos nominales de tensión, a una corriente entre I_{min} e I_{max} , siempre el sistema de potencia lo permita.

Injected Voltage (V RMS)

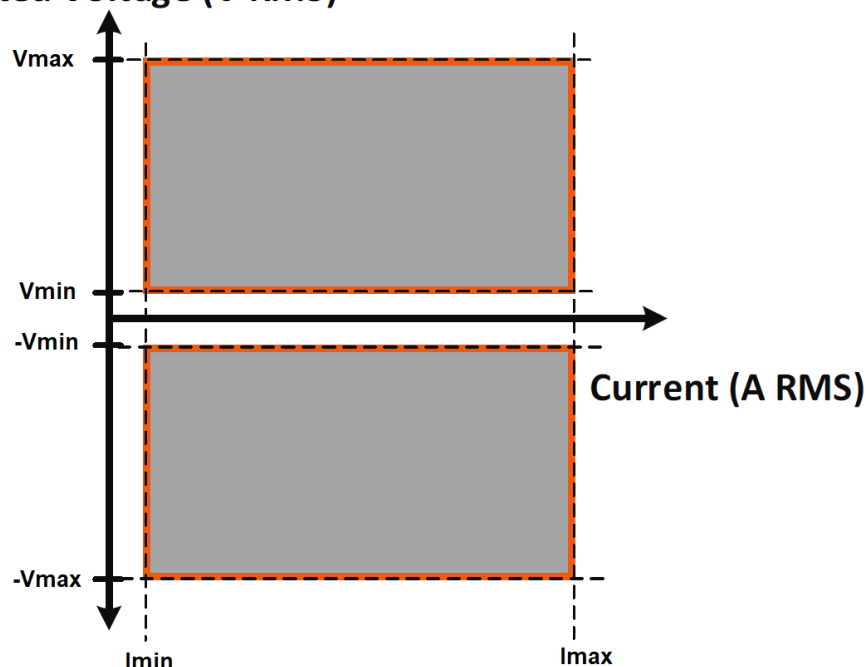


Figura 1 Curva característica VI de un M_SSSC

1.2 Validación de los modos de control

Se deben realizar pruebas tipo escalón en los modos de inyección de tensión y de reactancia y en condiciones en las que se active la acción de los dispositivos FACTS distribuidos.

Para cada uno de los modos se deben aplicar escalones hacia el lado inductivo y hacia el lado capacitivo en el parámetro referencia que corresponda según el modo de control hacia arriba y hacia abajo, de una magnitud tal que no se exciten dinámicas no lineales del sistema de control. Se registran las siguientes variables: v_{req} (modo inyección tensión), x_{req} (modo inyección reactancia), v_{actual} (señal de salida del equipo), corriente a través del dispositivo. En el Anexo 4 se detallan las pruebas a realizar.

1.3 Evaluación No linealidades del control

Se deben evaluar todas las no linealidades asociadas al sistema de control que puedan afectar el comportamiento del dispositivo FACTS limitando sus salidas.