

ANEXO 1

Objetivo

Este anexo define el formato para el reporte de los modelos validados de los FACT tipo SVC y STATCOM.

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 de las pruebas.
- Descripción de los FACTS incluyendo los datos técnicos.
- Descripción de los sistemas de control.
- Descripción de los detalles de las pruebas de validación realizadas.
- Modelos validados de cada sistema de control con parámetros y diagrama de bloques. En caso de que no sea posible entregar los diagramas de bloques por temas de confidencialidad con el fabricante del equipo, se requiere entregar el modelo en la herramienta de simulación que utiliza el CND.
- Curvas comparativas de los registros obtenidos en las pruebas en campo vs. las obtenidas a través de simulación de los modelos validados.
- 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.

Los detalles de estos requerimientos se presentan a continuación:

Tabla de contenido

El informe debe contener una tabla de contenidos similar a la que se muestra en la figura siguiente:

Tabla de Contenido

1. GENERALIDADES

2. REGULADOR DE TENSIÓN

2.1 Descripción

2.2 Diagrama de bloques

2.3 Parámetros

2.4 Pruebas de validación

2.5 Verificación de la validez del modelo del Regulador de Tensión

3. AMORTIGUADOR DE OSCILACIONES DE POTENCIA – POD

3.1 Descripción

3.2 Diagrama de bloques

3.3 Parámetros

3.4 Pruebas de validación

3.5 Verificación de la validez del modelo del POD

4. LIMITADORES, LÓGICAS DE PROTECCIÓN RELACIONADAS CON EL CONTROL

4.1 Descripción

4.2 Diagrama de bloques

4.3 Parámetros

4.4 Pruebas de validación

4.5 Verificación de la validez de los modelos de los limitadores, lógicas de protección relacionadas con el control

5. ANEXOS

ANEXO 2

1. GENERALIDADES

Descripción general del FACTS bajo pruebas de validación (fabricante, modelo, punto de conexión y datos técnicos)

2. REGULADOR DE TENSIÓN

Descripción

En este campo se deben especificar los modos de operación disponibles del regulador correspondiente definiendo cuál es el modo de operación en condiciones normales.

Diagrama de bloques

Se debe incluir el diagrama de bloques en el dominio de Laplace (s) del regulador correspondiente para cada uno de los modos de operación, en caso de que sea posible entregarlos por razones de confidencialidad.

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., en caso de que sea posible entregarlos por razones de confidencialidad.

Pruebas de validación

Las pruebas de validación para el regulador correspondiente en sus diferentes modos de operación deben realizarse sin POD.

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

- Fecha y hora de las pruebas.
- Tipo de prueba: SAT.
- Datos de la perturbación: tipo (escalón, sinusoidal, rampa, etc.), magnitud, punto de inyección.
- Condiciones iniciales de operación de los FACTS: se debe especificar el punto de operación antes de la perturbación, voltaje en barra(s) de conexión, potencia reactiva inyectada o absorbida.

- Condiciones iniciales de operación del equivalente del sistema: nivel de cortocircuito, voltaje en barra del equivalente de red.
- Modo de control: tensión, potencia reactiva.
- 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 modelo del Regulador de Tensión

Se deben presentar las curvas comparativas que demuestren la validez del modelo del Regulador 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.

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

3. AMORTIGUADOR DE OSCILACIONES DE POTENCIA (POD)

Descripción

En este campo se debe especificar: señal(es) de entrada, detalle de lógicas de activación/desactivación, si aplican.

Diagrama de bloques

Se debe incluir el diagrama de bloques en el dominio de Laplace (s) del POD incluyendo limitadores y lógicas de activación/desactivación, en caso de que sea posible entregarlos por razones de confidencialidad.

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., en caso de que sea posible entregarlos por razones de confidencialidad.

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: se debe especificar el punto de operación antes de la perturbación, voltaje en barra(s) de conexión, potencia reactiva inyectada o absorbida.
- Condiciones iniciales de operación del equivalente del sistema: nivel de cortocircuito, voltaje en barra del equivalente de red.
- Modo de control: tensión, potencia reactiva.
- 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 del POD

Se deben presentar las curvas comparativas que demuestren la validez del modelo del POD.

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.

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 subtensión y sobretensión), 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, en caso de que sea posible entregarlos por razones de confidencialidad.

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., en caso de que sea posible entregarlos por razones de confidencialidad.

Pruebas de validación

Las pruebas de validación para estos elementos deben realizarse sin POD.

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: se debe especificar el punto de operación antes de la perturbación, voltaje en barra(s) de conexión, potencia reactiva inyectada o absorbida.
- 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 3.

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 a los parámetros y características señaladas, se determinará los índices de evaluación que se presentan a continuación:

Error absoluto del sobreimpulso (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 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 del valor final y el valor 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.

Coefficiente de Correlación Lineal (R^2):

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

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

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 (MAE):

Este error es el promedio del valor absoluto de las diferencias punto a punto entre la señal real y la simulada.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |R_i - S_i|$$

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.
 n : Es el número de muestras de las señales.

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 para el Regulador de tensión, los limitadores y el POD:

Tabla A3.1 Índices de coherencia para el modelo del REGULADOR DE TENSIÓN

Prueba	Señal	Índice	Valor de referencia
Escalones hacia arriba y hacia abajo en tensión de referencia en condiciones de absorción y entrega de potencia reactiva	V_T	ES	20%
		EVF	10%
		ETR	20%
		R^2	0.85
	Q	ES	20%
		EVF	15%
		R^2	0.85
	Bref (SVC) o Ireq (STATCOM)	R^2	0.85
		EVF	10%

Tabla A3.2 Índices de coherencia para el modelo del POD

Prueba	Señal	Índice	Valor de referencia
Inyección en la entrada del POD	V_T	ES	20%
		EVF	10%

		ETR	10%
		R^2	0.85
	Q	ES	20%
		EVF	15%
		R^2	0.85
	Bref (SVC) o Ireq (STATCOM)	R^2	0.85
	Salida del POD	R^2	0.85

Tabla A3.3 Índices de coherencia para los modelos de los limitadores estrategias de sobre o subtensión

Prueba	Señal	Índice	Valor de referencia
Escalón superando el umbral definido hasta lograr activación del limitador o lógica tras el tiempo de retardo parametrizado	Bref (SVC) o Ireq (STATCOM)	EVF	10%
		R^2	0.85

Tabla A3.4 Índices de coherencia para la curva VI o VQ

Prueba	Señal	Índice	Valor de referencia
Curva característica VI o VQ	I ó Q normalizadas al valor máximo absoluto de la señal	R^2	0.95
		MAE	3%

Dado que cada prueba implica la realización de diferentes ensayos en campo, los índices de coherencia correspondientes a cada prueba se calcularán como el promedio aritmético de los índices obtenidos para cada uno de los ensayos.

Se considera que un modelo pasa exitosamente la etapa de validación si los índices de coherencia promedio, calculados para cada prueba, son menores o iguales a los valores de referencia indicados en las tablas A3.1 a A3.4. De lo contrario, el CND informará al agente sobre los índices incumplidos para que éste realice los ajustes necesarios en el modelo.

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 4.

Guía de prueba mínimas requeridas para validar los modelos de los FACTS tipo SVC y STATCOM

Pruebas mínimas requeridas para validar los modelos de los FACTS.

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 modelos SVC

1.1 Validación de la curva VI o VQ

Se realiza el barrido de la curva VI (o VQ) completa durante las pruebas FAT (ver [Figura 1](#)). Durante las pruebas SAT se debe mostrar evidencia que el equipo puede entregar y absorber los límites operativos nominales del equipo (puntos 1 y 2 de la [Figura 1](#)).

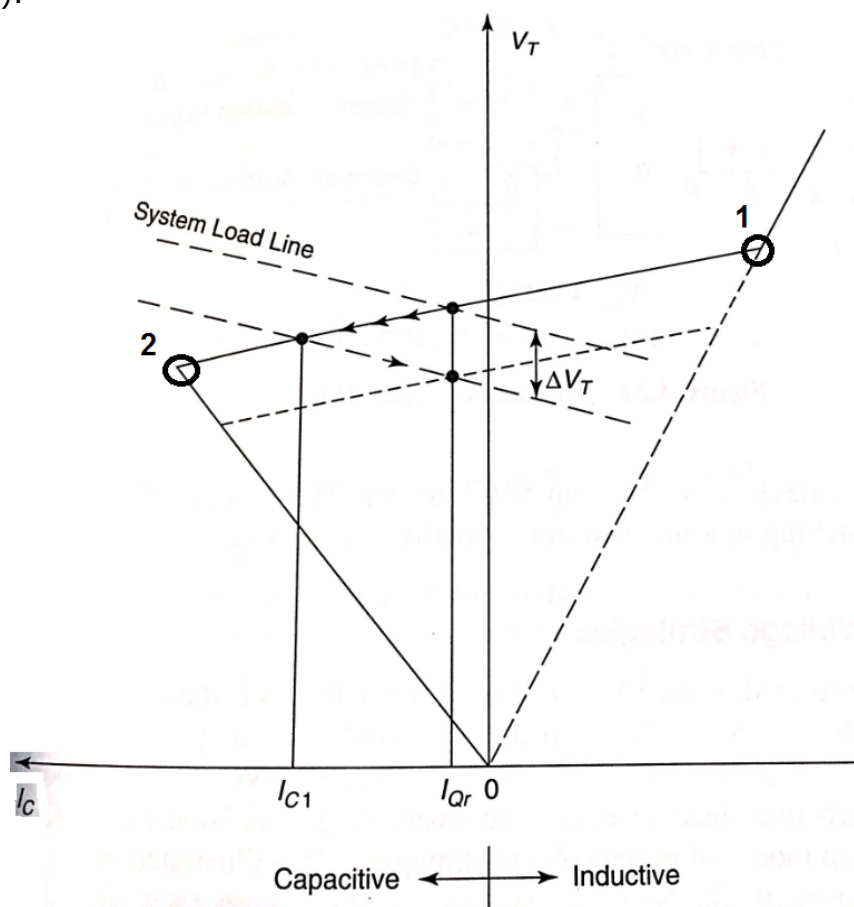


Figura 1 Curva característica VI de un SVC. Tomado de [1]

1.2 Validación del regulador de tensión

Se realiza para el *slope* finalmente ajustado en campo.

Se debe realizar la prueba en al menos dos escenarios de cortocircuito (alto y bajo).

Para cada uno de los escenarios de prueba, se deben aplicar escalones en el parámetro de tensión de referencia (V_{ref}) hacia arriba y hacia abajo para la zona inductiva y la zona capacitiva, de una magnitud tal que no se exciten dinámicas no lineales del sistema de control. Se registra la salida en la B_{ref} , la potencia reactiva y el voltaje en la barra de conexión del SVC.

Ejemplo:

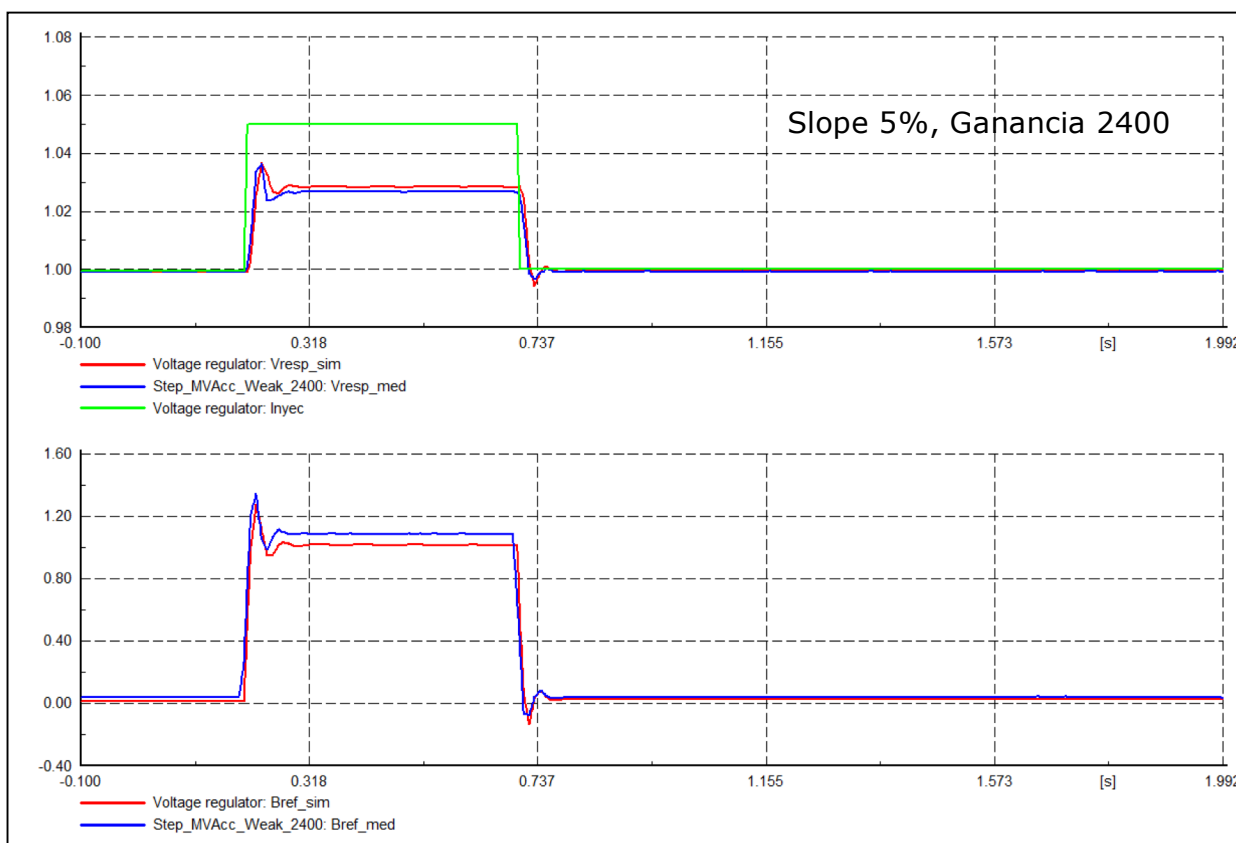


Figura 2 Ejemplo de prueba de inyección de escalón

1.3 Validación del POD

Se debe realizar inyecciones cuya magnitud sea pequeña y no se exciten dinámicas no lineales. Se debe registrar al menos una de las siguientes variables: salida del POD, susceptancia de salida (Bref), potencia reactiva o voltaje en la barra de conexión.

Para los FACTS que entren en operación después de la aprobación de este Acuerdo, con el fin de evaluar el desempeño del POD ante modos de oscilación y determinar su dinámica interna, el CND junto con el agente propondrán unos ajustes que se validarán en las pruebas FAT a través de barridos de frecuencia, con una magnitud tal que no se exciten las dinámicas no lineales del sistema de control del FACTS.

Tanto para los FACTS existentes como para los que entren en operación después de la aprobación de este Acuerdo, a través del seguimiento que realiza el CND, se debe evaluar el desempeño del sistema con el ajuste actual del POD. En caso de identificar la necesidad, se debe realizar los reajustes que se requieran.

1.4 Evaluación No linealidades del control

Se deben evaluar todas las no linealidades asociadas al sistema de control que puedan afectar el comportamiento del SVC limitando sus salidas. Para el caso del SVC típicamente se dispone de las siguientes funciones de limitación:

1.4.1 Evaluación estrategia subtensión con sus respectivas temporizaciones

Esta estrategia se evalúa en las pruebas tipo FAT reduciendo el voltaje de la red a un valor inferior al voltaje de activación de la estrategia de subtensión hasta lograr su activación y se registra: la susceptancia de salida (Bref) y la señal digital de activación de la estrategia.

1.4.2 Evaluación estrategia sobretensión con sus respectivas temporizaciones

Esta prueba se realiza en las pruebas tipo FAT llevando a la máxima tensión al SVC hasta lograr la activación de los limitadores de corriente que existan. Se grafica la susceptancia de referencia (Bref) y la señal digital de activación de la estrategia.

1.4.3 Validación de limitadores de corriente

Esta prueba se realiza en las pruebas tipo FAT llevando a la máxima corriente capacitiva y reactiva del SVC hasta lograr la activación de los limitadores de

corriente que existan. Se grafica la susceptancia de salida (Bref), la salida de los limitadores (si puede medirse) y señal digital de activación de la estrategia.

2. Pruebas Validación modelos STATCOM

2.1 Validación de la curva VI o VQ

Se realiza el barrido completo de la curva VI o VQ durante las pruebas FAT (ver [Figura 3](#)) Durante las pruebas SAT se debe mostrar evidencia que el equipo puede entregar y absorber los límites operativos nominales del equipo (puntos OP5 y OP6 de la [Figura 3](#)).

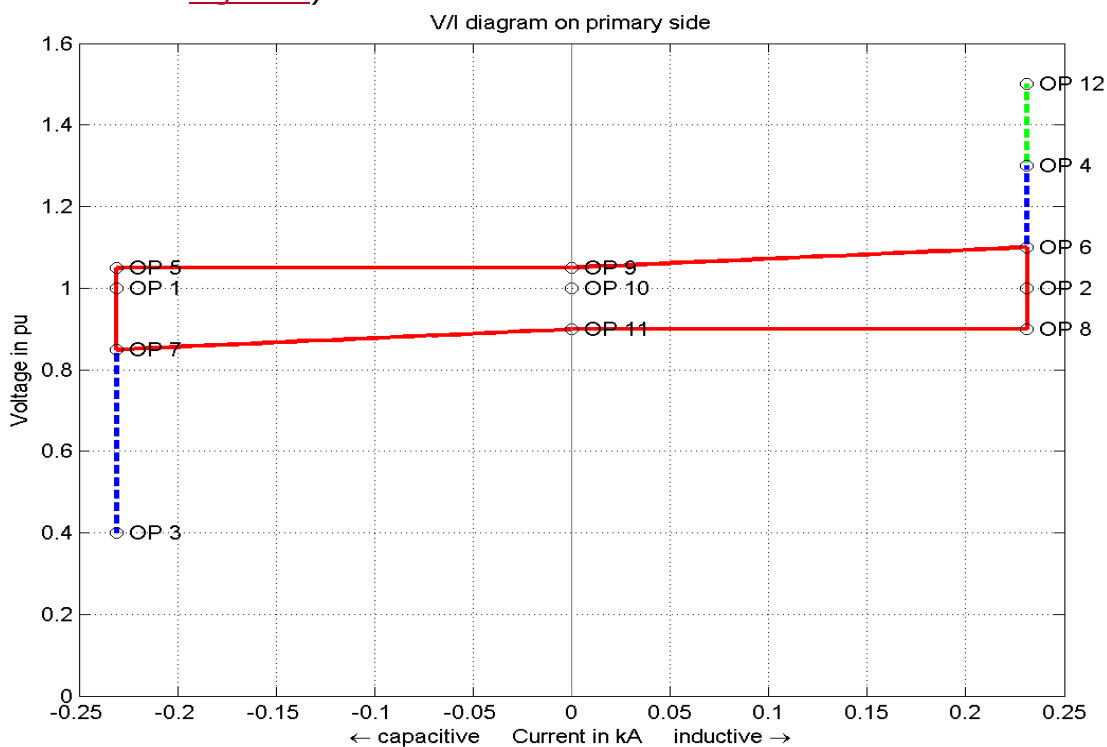


Figura 3 Curva VI de un STATCOM.

2.2 Validación del regulador de tensión

Se realiza para el *slope* finalmente ajustado en campo.

Se debe realizar la prueba en al menos dos escenarios de cortocircuito (alto y bajo).

Para cada uno de los escenarios de prueba, se deben aplicar escalones en el parámetro de tensión de referencia (V_{ref}) hacia arriba y hacia abajo para la zona

inductiva y la zona capacitiva, de una magnitud tal que no se exciten dinámicas no lineales del sistema de control. Se registra la salida en la corriente de regulación (Ireg), la potencia reactiva y el voltaje en la barra de conexión del STATCOM.

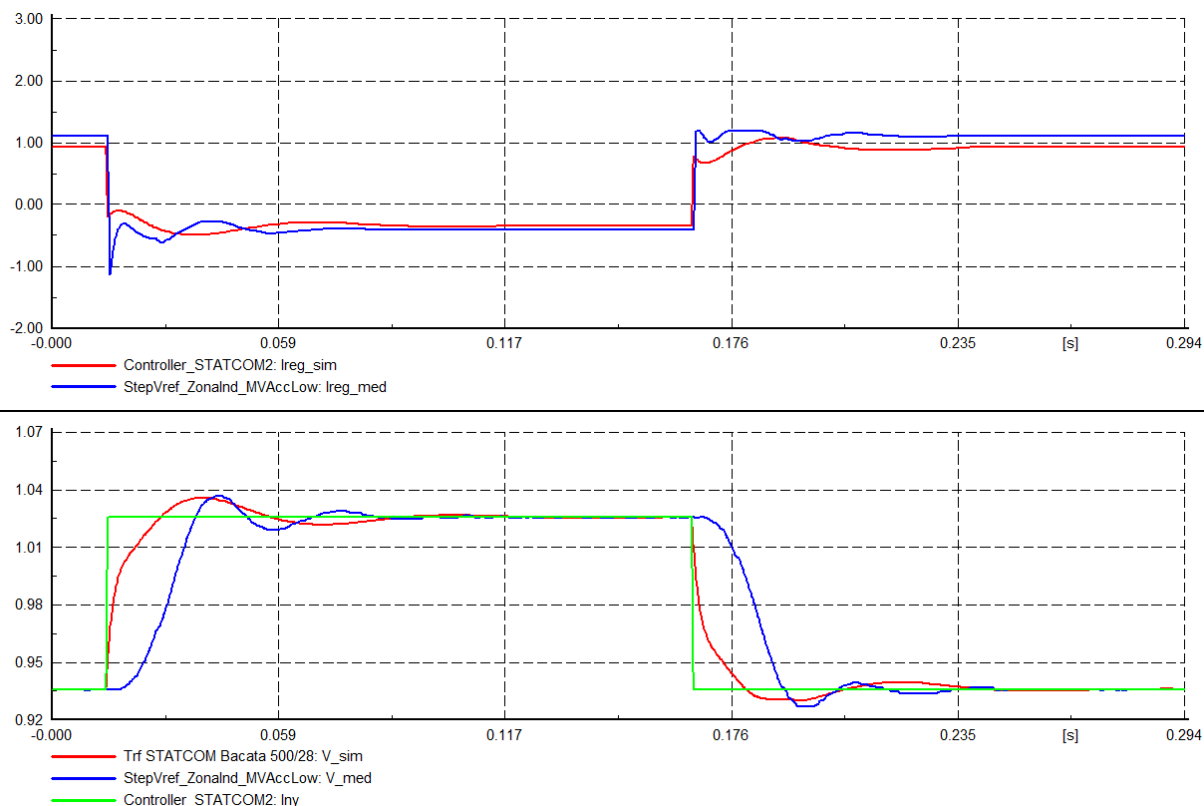


Figura 4. Ejemplo de prueba de inyección de escalón.

2.3 Validación del POD

Se debe realizar inyecciones cuya magnitud sea pequeña y no se exciten dinámicas no lineales. Se debe registrar al menos una de las siguientes variables: salida del POD, corriente de salida del regulador (Ireg), potencia reactiva o voltaje en la barra de conexión.

Para los FACTS que entren en operación después de la aprobación de este Acuerdo, con el fin de evaluar el desempeño del POD ante modos de oscilación y determinar su dinámica interna, el CND junto con el agente propondrán unos ajustes que se validarán en las pruebas FAT a través de barridos de frecuencia, con una magnitud tal que no se exciten las dinámicas no lineales del sistema de control del FACTS.

Para los FACTS existentes, a través del seguimiento que realiza el CND, se debe evaluar el desempeño del sistema con el ajuste actual del POD. En caso de identificar la necesidad, se debe realizar los reajustes que se requieran.

2.4 Evaluación No linealidades del control

Se deben evaluar todas las no linealidades asociadas al sistema de control que puedan afectar el comportamiento del STATCOM limitando sus salidas. Para el caso del STATCOM típicamente se dispone de las siguientes funciones de limitación:

2.4.1 Evaluación estrategia subtensión con sus respectivas temporizaciones.

Esta estrategia se evalúa en las pruebas tipo FAT reduciendo el voltaje de la red a un valor inferior al voltaje de activación de la estrategia de subtensión hasta lograr su activación y se registra: la corriente de regulación (I_{reg}) del STATCOM y la señal digital de activación de la estrategia.

2.4.2 Evaluación estrategia sobretensión con sus respectivas temporizaciones.

Esta prueba se realiza en las pruebas tipo FAT llevando a la máxima tensión al STATCOM hasta lograr la activación de los limitadores de corriente que existan. Se grafica la corriente de regulación (I_{reg}) del STATCOM y la señal digital de activación de la estrategia.

2.4.3 Validación de limitadores de corriente

Esta prueba se realiza en las pruebas tipo FAT llevando a la máxima corriente capacitiva y reactiva del STATCOM hasta lograr la activación de los limitadores de corriente que existan. Se grafica la corriente de regulación (I_{reg}) para el STATCOM, la salida de los limitadores (si puede medirse) y señal digital de activación de la estrategia.