



C4 – Desempeño del sistema eléctrico de potencia

ANÁLISIS MULTI-PLATAFORMA PARA LA EVALUACIÓN DE LA EMISIÓN ARMÓNICA DE INSTALACIONES FACTS TIPO M-SSSC EN LA SUBESTACIÓN SANTA MARTA (COLOMBIA)

J.P. BOTERO*
Smart Wires Inc.
Colombia

A. DUQUE
Smart Wires Inc.
Colombia

C.E. BORDA
Smart Wires Inc.
Colombia

J.A. CALDERON
ISA
Colombia

***Resumen** – Este documento presenta la metodología, análisis y resultados obtenidos al determinar, a través de simulación, el impacto en la distorsión armónica de la subestación Santa Marta, perteneciente al sistema de transmisión nacional colombiano, ante la futura instalación de dispositivos FACTS M-SSSC (Modular – Static Synchronous Series Compensator) para control de flujo de potencia. Utilizando una metodología multi-plataforma fue posible evaluar de forma integral la influencia que este tipo de tecnología tendría sobre el flujo armónico en la red de transmisión, considerando tanto mediciones reales de distorsión armónica existente en el punto de instalación, simulaciones EMT del área de influencia y validación del comportamiento del dispositivo utilizando un sistema RTDS para análisis en tiempo real. Los resultados permiten identificar que no solo los dispositivos FACTS considerados cuentan con una inmunidad suficiente a las condiciones existentes de distorsión en sitio, permitiendo una operación adecuada de control de flujo, sino que su emisión armónica y régimen operativos no representan un riesgo significativo de superar los límites de distorsión armónica de tensión establecidos para el sistema eléctrico, ni de generar interacciones armónicas perjudiciales con los activos del sistema en el área de interés del proyecto.*

***Palabras clave:** FACTS- compensación serie- armónicos- calidad de la potencia- tiempo real- RTDS-HIL- M-SSSC- control flujo de potencia- EMT.*

1 INTRODUCCIÓN

Como parte del desarrollo del sistema interconectado nacional colombiano, fue propuesta la instalación de dispositivos FACTS de compensación serie tipo M-SSSC [1], con el fin de controlar el flujo de potencia en una zona del país donde se proyecta alta integración de generación renovable [2][3]. Estos dispositivos inyectan una forma de onda de tensión cuasi senoidal a la red eléctrica que lleva asociada una distorsión armónica no despreciable; por lo tanto, su efecto en la distorsión total de las variables eléctricas en su punto de instalación y las potenciales interacciones con otros elementos dentro de la zona de influencia fueron evaluados, para así prever la ocurrencia de situaciones de riesgo que puedan manifestarse en sobrecargas, deterioro de activos de transmisión, indisponibilidad de los dispositivos de compensación, entre otras.

La metodología para el presente documento fue implementada con el fin de identificar la operación que tendrían los dispositivos ante las condiciones reales de distorsión del punto de instalación, utilizando medidas de calidad de la potencia como insumo para crear un modelo EMT del área de interés del proyecto, que incluya tanto el detalle de la impedancia armónica de la red eléctrica y su aporte armónico activo, como un modelo detallado de los dispositivos de compensación a ser instalados y finalmente replicar dicha modelación en un software de simulación en tiempo real que incluyó la integración del hardware real de los equipos de compensación, validando su comportamiento.

Lo anterior permitió identificar la medida en que los equipos considerados afectarían la distorsión armónica total del sistema, potenciales interacciones de los equipos con los activos en el punto de instalación y la capacidad de los mismos de operar de manera satisfactoria ante las condiciones de distorsión existentes en la red eléctrica.

* Calle 7D# 43A – 40, Medellín, Colombia – juan.botero@smartwires.com

2 DISPOSITIVOS M-SSSC EN EL SISTEMA ELÉCTRICO COLOMBIANO

2.1 Instalación dispositivos M-SSSC subestación Santa Marta 220 kV

La unidad de planeación minero energética (UPME) incluyó un proyecto de expansión que incluye la instalación de dispositivos M-SSSC en la subestación Santa Marta 220 kV del sistema interconectado nacional (SIN). La entidad consideró que la utilización de dicha tecnología, inyectando una reactancia inductiva fija en serie con 2 circuitos de la sub-área GCM, podría solventar algunos escenarios operativos en los que se manifiestan sobrecargas inaceptables. Los valores de reactancia fueron escogidos de tal forma que la corriente de línea se mantuviera por debajo del límite de emergencia para las líneas de transmisión de la zona durante una condición N-1, situación causada por la integración de una cantidad significativa de generación renovable.

La zona de influencia del proyecto se identifica en la Figura 1, la cual incluye las magnitudes de reactancia de compensación escogidas para la solución de las potenciales condiciones de sobrecarga mencionadas anteriormente.

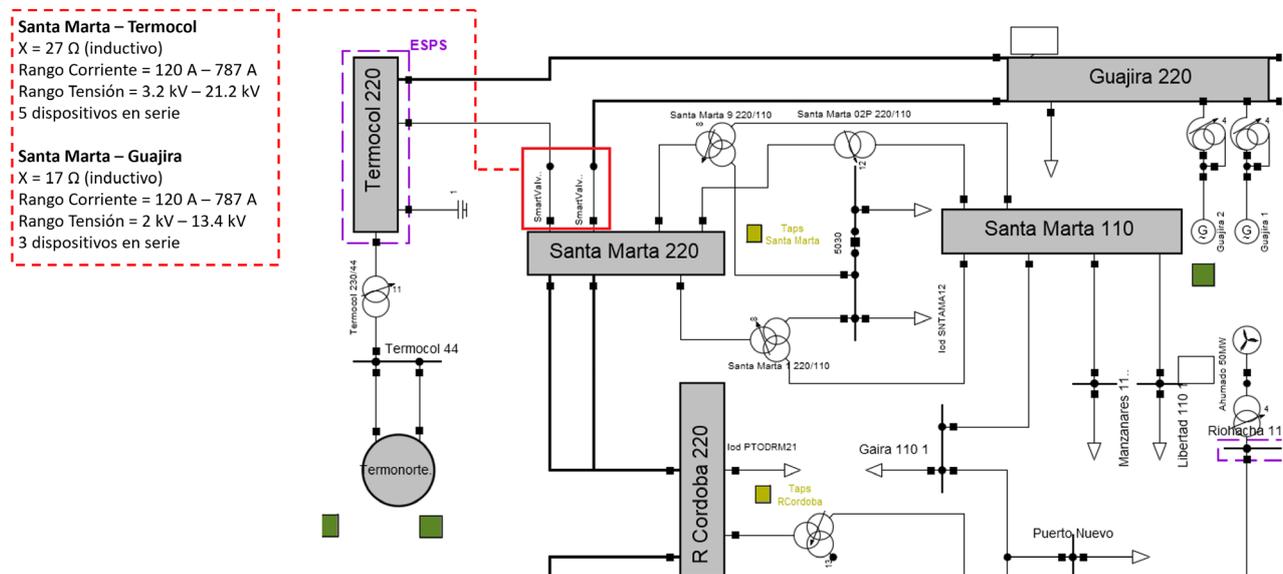


Figura 1. Sub-Área GCM – Proyecto de Compensación M-SSSC

2.2 Principio Operativo del Dispositivo M-SSSC

Los M-SSSC (Figura 2) son equipos FACTS de compensación serie basados en electrónica de potencia, los cuales inyectan una tensión con un desfase de 90 grados en adelante o en atraso con respecto a la corriente de línea, logrando así simular un reactor o un condensador serie respectivamente y de esta forma controlar el flujo de potencia por la línea de transmisión de forma dinámica según la consigna del usuario.



Figura 2. Dispositivo M-SSSC [4]

Los dispositivos M-SSSC se componen internamente por una serie de convertidores de fuente de tensión (Figura 3), los cuales dependiendo del régimen de disparo de sus correspondientes puentes H pueden o no aportar a la inyección de tensión en un instante dado; esto permite construir una forma de onda a través de una serie de niveles DC que en conjunto forman una fuente de tensión sincrónica de estado sólido. Dicho régimen de disparo determinará la magnitud equivalente de tensión que será inyectada a la red y con sus controles internos asociados se alcanzará según determine el usuario, una reactancia equivalente bien sea positiva (inductiva) o negativa (capacitiva).

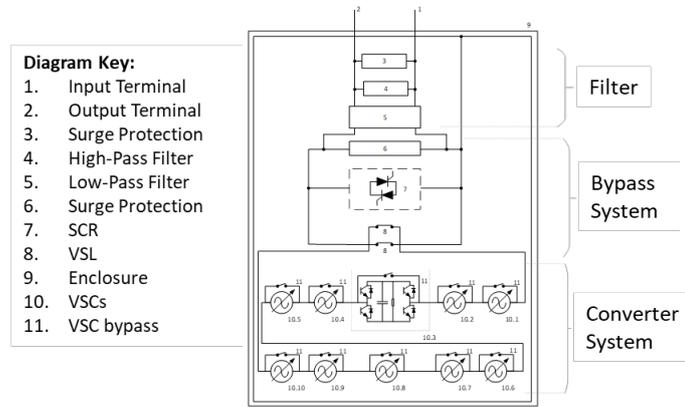


Figura 3. Configuración eléctrica dispositivo M-SSSC

Dado el funcionamiento de dichos convertidores, la forma de onda construida que será inyectada en serie con la línea de transmisión dependerá principalmente de los siguientes factores:

- Operación inductiva o capacitiva
- Frecuencia nominal del sistema
- Consigna de reactancia
- Número de convertidores del dispositivo
- Magnitud de la corriente de línea
- Distorsión de fondo de la corriente de línea

Cada uno de estos elementos puede tener una mayor o menor influencia sobre el contenido armónico de la forma de onda de tensión del dispositivo, aunque generalmente aquellos más relevantes son la consigna de reactancia, operación inductiva o capacitiva y el número de convertidores internos, no necesariamente en ese orden de relevancia.

A modo de ejemplo, la forma de onda de un solo dispositivo que cuenta con 10 convertidores se muestra en la Figura 4 para operación inductiva. Instalaciones con más de un dispositivo por fase podrán coordinarse de forma que cada convertidor disponible aporte a construir una forma de onda más cercana a una senoidal pura, la cual se sobrepone a la gráfica como punto de comparación.

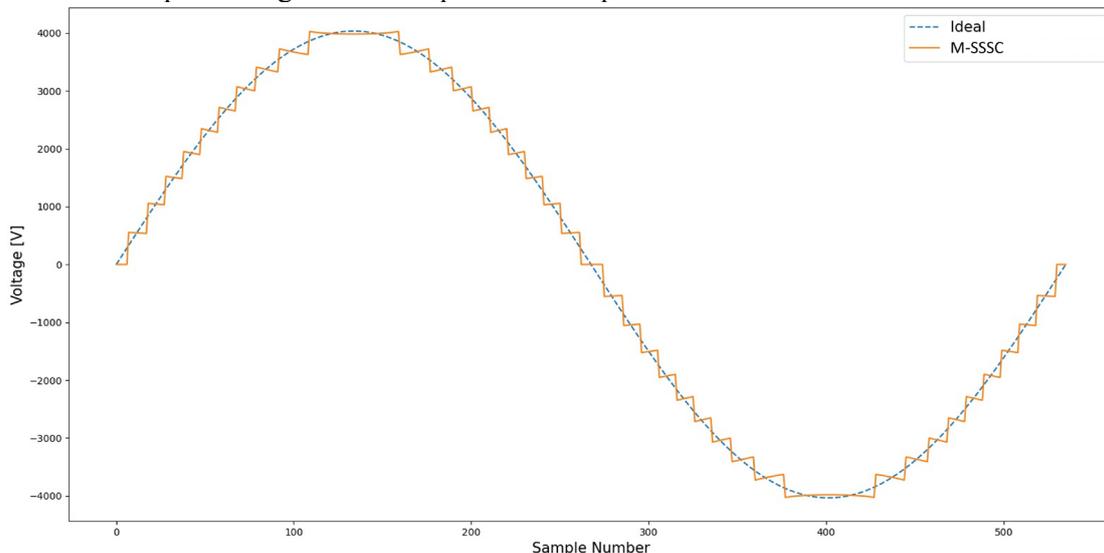


Figura 4. Forma de onda – Inyección de tensión operación inductiva

3 METODOLOGÍA

3.1 Referencia Normativa

La norma técnica colombiana (NTC) 5001 [5] fue utilizada para desarrollar el análisis de impacto sobre la distorsión armónica en el punto de instalación de los dispositivos de compensación. Esta norma se basa en el estándar internacional IEEE 519 [6] y provee límites aplicables al nivel de tensión de interés para determinar la gravedad en la magnitud de distorsión individual y total de tensión obtenida de los análisis. Cabe aclarar que estas referencias fueron creadas para evaluar puntos de conexión común con usuarios del sistema de transmisión, dado que el análisis se basa en un punto del sistema interconectado que no sufre dicha función, el análisis fue basado en distorsión armónica de tensión, la distorsión armónica de corriente fue incluida como referencia pero no evaluada con base en el estándar.

Los límites utilizados para el análisis de armónicos de tensión se exponen en la Tabla 1.

TABLA 1. LÍMITES DISTORSIÓN ARMÓNICA DE TENSIÓN – NTC 5001

Valores de Referencia – Distorsión Armónica de Tensión 220 kV		
Duración	> 1 hora	< 1 hora
Distorsión Armónica Individual [%]	1.00	1.50
Distorsión Armónica Total THDv [%]	1.50	2.25

3.2 Medidas Armónicos de Fondo

Como paso inicial para el desarrollo del estudio, se llevaron a cabo medidas de calidad de la potencia durante dos semanas según las indicaciones de la norma NTC 5001 en la subestación Santa Marta, incluyendo todas las líneas de transmisión y circuitos de transformación asociados. De estos registros fueron escogidos casos de alto contenido armónico, principalmente en el armónico de quinto orden, significando un escenario crítico para la operación de los dispositivos M-SSSC. Los casos escogidos se muestran a continuación:

- **Caso #1 (Máxima distorsión total (THD) e individual de tensión):** Identificado como **Caso_V484**, la magnitud de THDv obtenida fue de 3.34% y la magnitud del armónico individual más alto (en este caso el quinto orden) fue de 3.33% con respecto al valor a frecuencia fundamental.
- **Caso #2 (Máxima distorsión total e individual de la demanda (TDD)):** Identificado como **Caso_I1607**, la corriente presentó un valor máximo de distorsión total de 10.87% e individual de 9.92% en el circuito Santa Marta – Guajira y total de 8.45% e individual de 6.07% en el circuito Santa Marta – Termocol con respecto al valor máximo de corriente a frecuencia fundamental.
- **Caso #3 (Máxima distorsión total de corriente (THD)):** Identificado como **Caso_I1506**, la corriente presentó una distorsión total de 23.18% en el circuito Santa Marta – Guajira y 12.20% en el circuito Santa Marta – Termocol.

Para ilustrar la distorsión obtenida en la medición real en sitio, la Tabla 2 muestra el espectro de distorsión de tensión y corriente respectivamente medido en sitio para los casos escogidos. Únicamente se presentan los órdenes impares hasta el orden 11 debido a ser aquellos con magnitudes representativas en las medidas de cada caso analizado.

TABLA 2. ESPECTRO ARMÓNICO - MEDICIÓN EN SITIO

Orden	THD	3	5	7	9	11	Tensión [%]
CASE V484	3.507	0.171	3.497	0.248	0.004	0.173	
CASE I1607	1.213	0.149	1.171	0.250	0.007	0.105	
CASE I1506	2.892	0.010	2.881	0.269	0.005	0.010	
Límite NTC 5001	1.500	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
Orden	THD	3	5	7	9	11	Corriente [%]
CASE V484	5.823	0.883	5.698	0.774	0.009	0.457	
CASE I1607	9.974	0.817	9.902	0.805	0.013	0.274	
CASE I1506	6.200	0.088	6.143	0.922	0.009	0.031	

3.3 Modelación EMT

Con el fin de obtener un modelo adecuado de la red eléctrica para el estudio de emisión armónica, fue decidido utilizar un modelo detallado de todos los elementos a nivel 220 kV dentro de la sub-área GCM, incluyendo generadores, modelos de líneas dependientes de la frecuencia, compensación pasiva existente y el modelo detallado de los dispositivos M-SSSC, el cual incluye todas las lógicas relevantes de inyección no líneal de tensión serie y la topología pasiva interna para identificar adecuadamente su interacción con el resto del sistema. Las fronteras del área a considerar fueron modeladas por medio de una caracterización de la impedancia dependiente de la frecuencia obtenida del modelo del sistema de transmisión colombiano en el software PowerFactory.

PSCAD fue el software escogido para la ejecución de las simulaciones dinámicas. La integración del equivalente de impedancia dependiente de la frecuencia y las mediciones de armónicos de fondo es facilitada por un bloque interno al software llamado FDNE (frequency dependent network equivalent) [7]. El modelo completo construido en el software se muestra en la Figura 5.

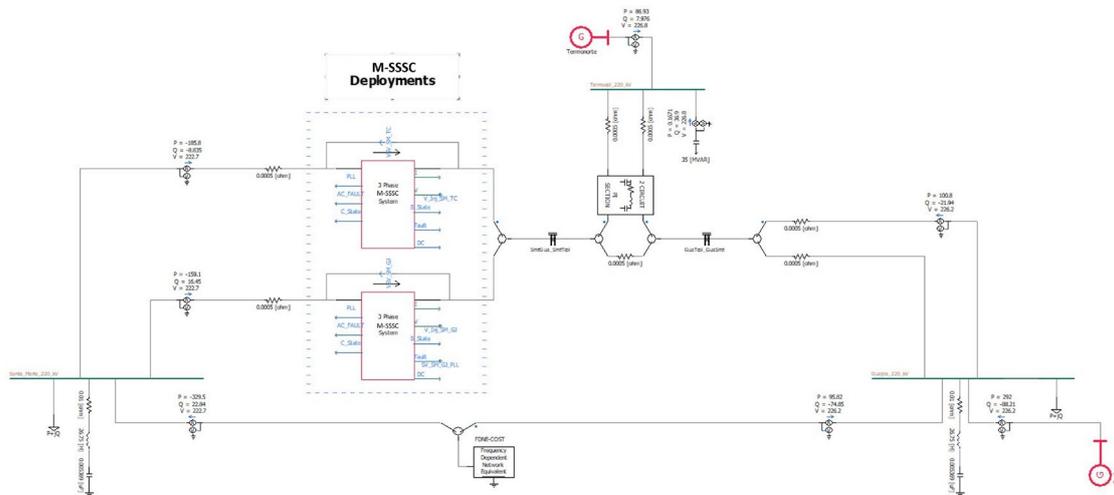


Figura 5. Sistema bajo análisis – Software PSCAD

4 RESULTADOS EMISIÓN ARMÓNICA PSCAD

Se procedió a realizar una comparación entre los índices de distorsión en la subestación Santa Marta previo y posterior a la instalación del proyecto de compensación con dispositivos M-SSSC. Cada caso propuesto fue analizado de forma comparativa con el fin de determinar si la presencia de los dispositivos provoca alguna interacción no atenuada con algún elemento del sistema o la superación de alguno de los límites establecidos en la norma que en condiciones previas se encuentren dentro de la franja permitida. El análisis de corriente se basó en el circuito Santa Marta – Guajira dado que se consideró el más significativo en los resultados.

4.1 Operación Normal Dispositivos M-SSSC

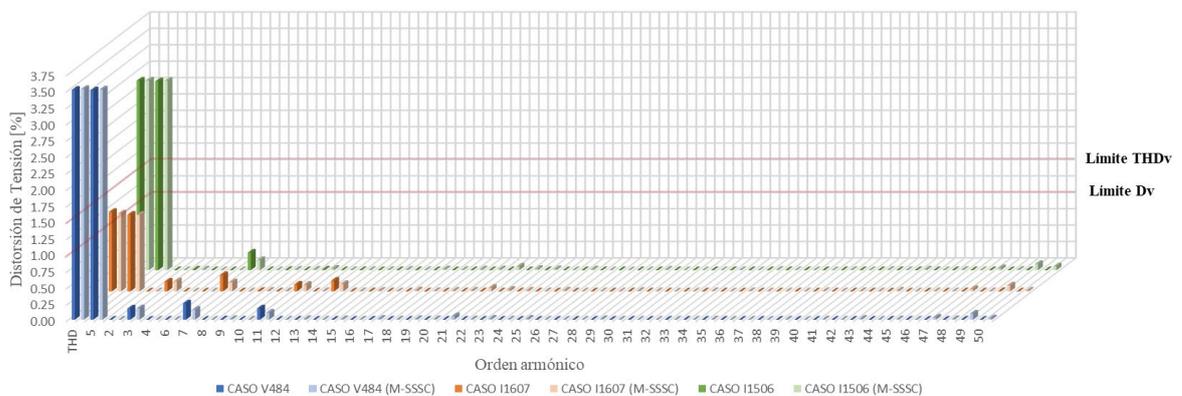


Figura 6. Comparación Distorsión Armónica Tensión M-SSSC

Como puede observarse en la Figura 6, la presencia del dispositivo de compensación no afecta de manera significativa la distorsión de tensión medida en la subestación Santa Marta. Llevando a cabo un comparativo entre las condiciones previa y posterior a la instalación de los dispositivos, la Figura 7 muestra que la distorsión de tensión y corriente se ven incrementadas un máximo de 0.1% y 0.55% respectivamente.



Figura 7. Diferencia Distorsión Armónica M-SSSC

4.2 Operación Bajo Falla de los Dispositivos M-SSSC

Adicional al caso analizado previamente, fue incluida la situación en que uno de los dispositivos M-SSSC en serie presentara una falla que provocara su indisponibilidad total de inyección. Esto implica que la cantidad de convertidores disponibles para la formación de la onda de tensión se reduce en 10 y, por lo tanto, se incrementa su aporte total de armónicos hacia el sistema.

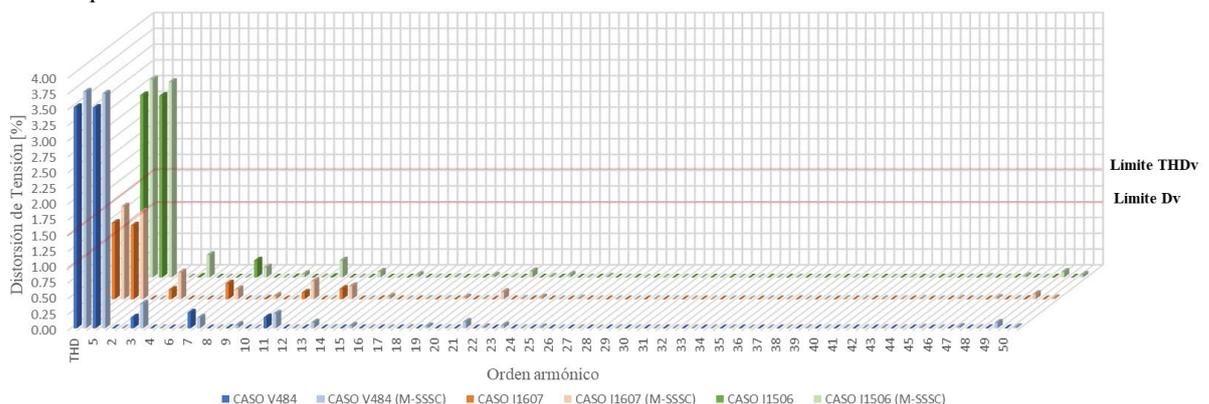


Figura 8. Comparación Distorsión Armónica Tensión M-SSSC (Falla)

Como puede observarse en la Figura 8, aunque mayor que para el caso visto previamente, la presencia del dispositivo de compensación sigue sin afectar de manera significativa la distorsión de tensión medida bajo condición de falla. Llevando a cabo el comparativo entre las condiciones previa y posterior a la conexión de los dispositivos, la Figura 9 muestra que la distorsión de tensión y corriente se ven incrementadas un máximo de 0.35% y 3.4% respectivamente.

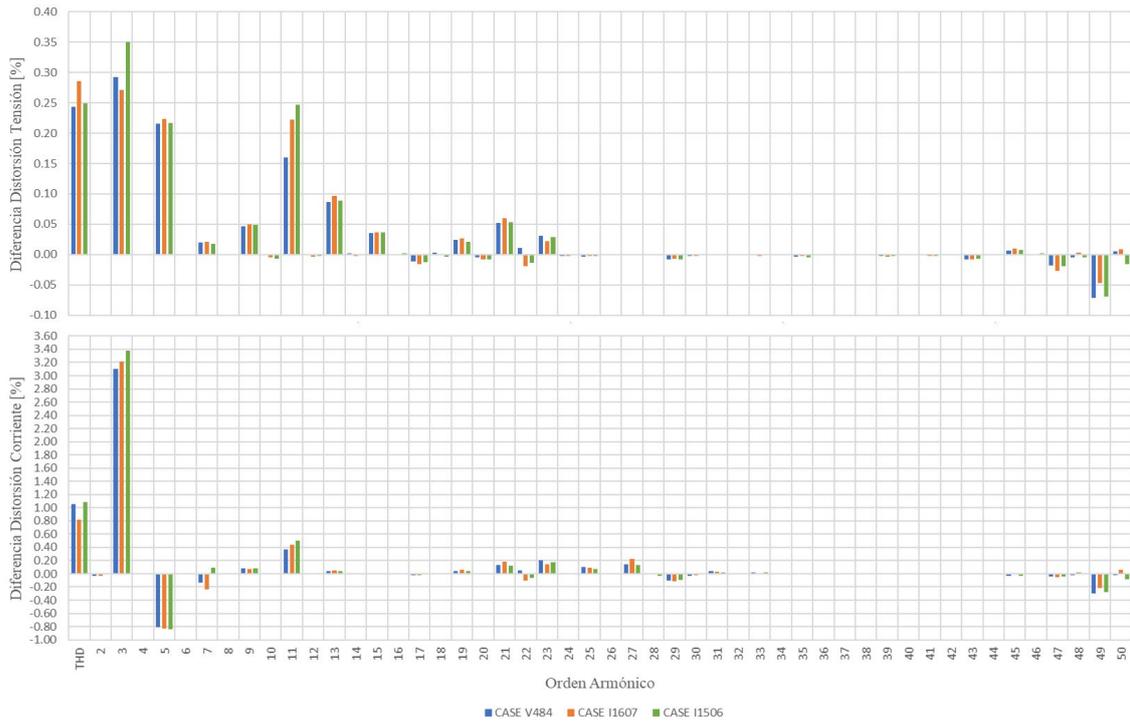


Figura 9. Diferencia Distorsión Armónica M-SSSC (Falla)

La distorsión de corriente resulta con una modificación significativa con respecto al caso anterior, sin embargo, no fueron identificadas interacciones no atenuadas bajo esta condición y según los esquemas operativos del dispositivo, ante condición de falla, el equipo ajustará su esquema de disparo para disminuir su inyección de armónicos dentro de un periodo de aproximadamente 10 segundos.

5 VALIDACIÓN DE EMISIÓN ARMÓNICA CON SIMULACIÓN EN TIEMPO REAL

Con el objetivo de validar el comportamiento del modelo detallado del dispositivo M-SSSC en las simulaciones de PSCAD, fue utilizado un sistema RTDS que incluye el hardware real de las tarjetas de control del dispositivo y la representación del caso de simulación implementado en el software RSCAD. El caso de simulación es idéntico al presentado para el software PSCAD, la diferencia reside en la ausencia del bloque FDNE para equivalentes de red, los cuales, fueron modelados utilizando equivalentes de Foster [8] y fuentes de tensión con generación de armónicos. El análisis efectuado se muestra en la Figura 10.

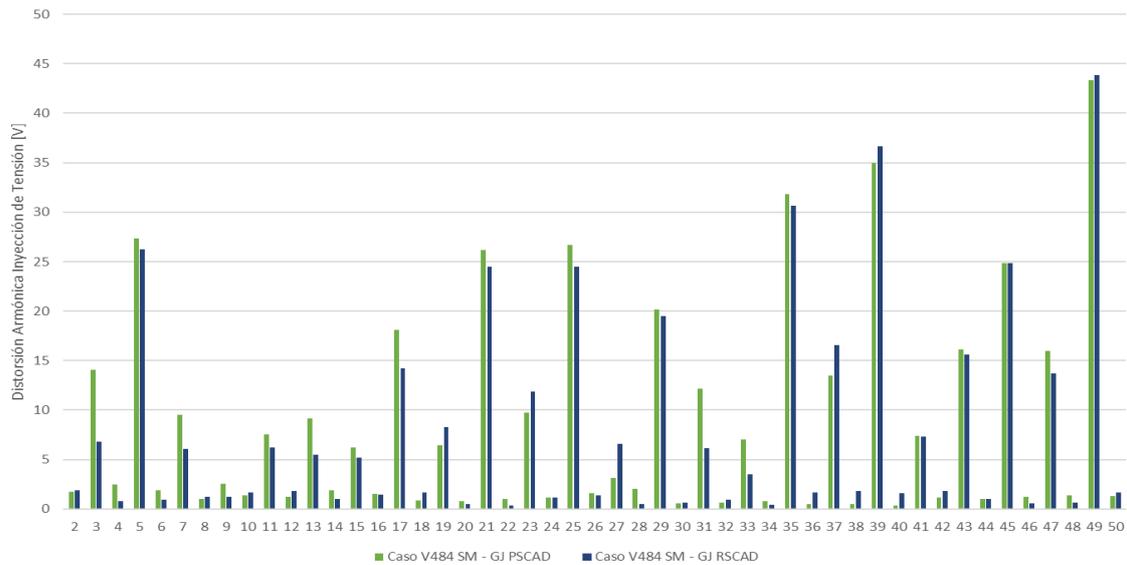


Figura 10. Validación Modelo M-SSSC – Sistema RTDS

La Figura 10 muestra una comparación del espectro de distorsión de la inyección de tensión serie de los dispositivos M-SSSC entre el modelo detallado en PSCAD y el hardware real. Las simulaciones permitieron identificar que existe consistencia del modelado con respecto al dispositivo real en todos los casos analizados, validando así los resultados expuestos en las simulaciones dinámicas. Adicionalmente, fue posible identificar un correcto funcionamiento del hardware bajo las condiciones de distorsión de tensión y corriente existentes en el punto de instalación, permitiendo el control de flujo de potencia dentro de los límites que este requiere para operar adecuadamente.

6 CONCLUSIONES

- Los resultados de emisión armónica mostraron que, para todos los casos considerados, la instalación de los dispositivos M-SSSC no provoca un aumento significativo en la distorsión de tensión presente en la subestación Santa Marta, permitiendo así una integración adecuada a la red y el cumplimiento del objetivo de control de flujo de potencia especificadas para el proyecto de forma segura.
- La distorsión adicional de tensión provocada por la instalación de los dispositivos M-SSSC presentó una magnitud de 0.1% en operación normal y 0.35% bajo condición de falla. Estos valores representan únicamente el 10 y 35% del límite establecido en el estándar para este nivel de tensión respectivamente, dejando así un margen amplio para la distorsión de tensión asociada al sistema.
- Durante la ejecución de las simulaciones dinámicas, no fueron identificadas interacciones no atenuadas que puedan ser asociadas a la ocurrencia de resonancias entre los componentes internos del dispositivo M-SSSC y el resto del sistema, tanto en operación normal como bajo condición de falla.
- Las simulaciones efectuadas en el sistema RTDS permitieron, además de validar la modelación de los dispositivos en el software PSCAD, que el desempeño de los dispositivos M-SSSC no se ve afectado bajo las condiciones de distorsión armónica elevada identificadas en el punto de instalación. El sistema de control del equipo genera adecuadamente una inyección de tensión serie con la línea de transmisión, con el desfase requerido para lograr representar una reactancia equivalente según la consigna utilizada para las simulaciones.

Es de resaltar que una vez sea llevada a cabo la instalación de los dispositivos del proyecto, se realizarán nuevamente mediciones de calidad de la potencia con el fin de corroborar los resultados obtenidos en el presente documento, permitiendo obtener conclusiones sobre la validez de la modelación del sistema, el funcionamiento de los dispositivos de compensación bajo las condiciones de distorsión existentes en el punto de instalación y el impacto que su operación tiene sobre los índices de distorsión de tensión y corriente en la zona de influencia, tanto bajo los límites establecidos por las normas aplicables como en relación a potenciales interacciones con activos del sistema.

7 REFERENCIAS

- [1] NG. Hingorani and L. Gyugyi, "Understanding FACTS", (IEEE Press, New York, USA, 1999).
- [2] CNO Agreement 1343 – Autorization of D-FACTS incorporation into the Colombian SIN.
- [3] Generation and Transmission Expansion Plan 2020 – 2034, UPME, Colombia.
- [4] "SmartValve™ - Smart Wires Inc." <https://www.smartwires.com/smartvalve/>
- [5] ICONTEC, "NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 5001 CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA. LÍMITES Y METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN EN PUNTO DE CONEXIÓN COMÚN," Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2008.
- [6] IEEE Std 519-2014, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems."
- [7] "PSCAD FDNE Block" https://www.pscad.com/webhelp/Master_Library_Models/Passive/FDNE
- [8] K. Murthy and R. Bedford, "Transformation between Foster and Cauer equivalent networks," in IEEE Transactions on Circuits and Systems, vol. 25, no. 4, pp. 238-239, April 1978