

## Modelo de Interacción Armónica a través del convertidor entre el lado de ac y dc en Sistemas de HvdC

*Juan D. PALENCIA, Jhon A. CALDERÓN*

*Facultad IEE; Universidad Pontificia Bolivariana; Cir. 1 #70-01, B11, Medellín, Colombia  
juancho8710@gmail.com*

Resumen: El objetivo principal de este proyecto era realizar estudios que ayuden a fabricantes y la academia a optimizar el diseño de los filtros según los requerimientos reales del sistema HVdc y de la red a.c. con el fin de mitigar el riesgo de especificar características no adecuadas que conlleven por ejemplo a la sobrecarga de los filtros durante la operación. *Copyright © 2014 UPB.*

Abstract: The primary purpose of this work was to realize different studies for supporting academic and industrial sectors in the optimization of the design of filters according to real requirements of a HVdc system and to the a.c. network. The aim was to mitigate the risk of specifying non-adequate characteristics which can lead to an overload in the filters during their operation time.

Keywords / Palabras clave: HVdc Systems, Electrical Power Systems, PSCAD/ Sistemas HVdc, Sistemas Potencia, PSCAD/EMTDC.

## 1. INTRODUCCIÓN

La tecnología clásica de HVdc está basada en convertidores de conmutación natural, usando tiristores como elemento de rectificación e inversión (la mayoría de las instalaciones de HVdc en el mundo usan ésta tecnología). Al instalar una estación convertidora HVdc en un sistema ac, la forma en que puede afectar a la calidad del suministro eléctrico en ese sistema es siempre un problema importante [4].

Las estaciones convertidoras utilizadas en un sistema HVdc clásico están compuestas por grupos convertidores de 6 o 12 pulsos, este último conformado mediante la conexión serie de dos puentes trifásicos de 6 pulsos, alimentados por dos fuentes trifásicas desfasadas en  $30^\circ$  eléctricos. La operación de cada uno de los puentes trifásicos genera corrientes armónicas (números enteros de la frecuencia básica o fundamental) que son inyectadas hacia las redes ac, para un grupo de 12 pulsos las corrientes armónicas características generadas resultan de orden  $12k \pm 1$ , con  $k$  un número entero positivo cualquiera.

Lo anterior hace necesario colocar filtros para adecuar la forma de onda a la salida en los convertidores, ya que la corriente armónica puede ocasionar niveles inaceptables de distorsión armónica en la tensión del sistema [4], lo que puede ocasionar problemas para los equipos y/o dispositivos de la subestación. Otras razones de la necesidad del uso de los filtros es que reduce la interferencia con

las líneas telefónicas, y proporcionan soporte de potencia reactiva ya que las estaciones de conmutación natural consumen potencia reactiva (independientemente de si trabajan como rectificador o inversor) y ésta es generada en parte por los filtros de ac, en caso de no ser suficiente, se agregan bancos de capacitores [7]. El controlar los armónicos reduce el riesgo de problemas en forma de perturbaciones, errores de medición y el mal funcionamiento de la protección del relé. También extiende la vida útil de los equipos conectados.

## 2. MODELOS Y/O METODOLOGÍAS UTILIZADAS PARA EL DISEÑO DE FILTROS AC Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS EN ENLACES HVdc

En la Figura 1 (diagrama de flujos) se puede observar la representación general de la metodología convencional que se usa como referencia para realizar el diseño de los filtros de ac para sistemas HVdc, es claro que el diseño de filtros de ca y la evaluación del desempeño se realizan en varias etapas.

Cada etapa presenta particularidades en la metodología que puede ser interpretado y/o ejecutado en diferentes formas por los distintos fabricantes. Normalmente, durante las especificaciones técnicas de los filtros existen responsabilidades tanto de parte del cliente como del contratista [4]. La información durante la etapa

de la metodología posee grandes impactos en el diseño del filtro debido a que un diseño sobre-dimensionado llevaría a tener filtros más caros pero un diseño sub-dimensionado llevaría a tener bajos rendimientos o problemas en la red.

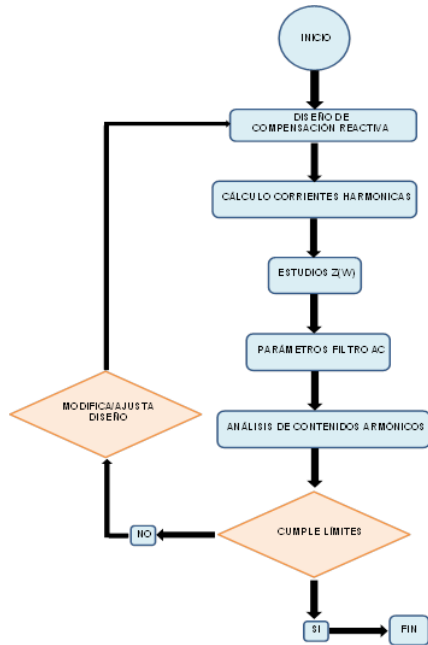


Figura 1. Metodología convencional diseño filtros a.c

## 2.1. Compensación Reactiva

Por lo general una estación HVdc consume una potencia reactiva aproximadamente entre el 50 - 60% de la potencia activa transmitida por el enlace.

El caso más conservativo[3] pertenece cuando el diseño de la compensación reactiva se realiza considerando que la estación opera con un factor de potencia cercano uno; esto significa que los bancos de condensadores y filtros entregan el total de potencia reactiva necesaria para la operación de las estaciones y por tanto no existe intercambio con la red ac. Una vez determinados los reactivos necesarios para las estaciones convertoras, se procede a dimensionar los bancos y sub-bancos; la magnitud de estos se define de acuerdo al cambio máximo de tensión permitida en la barra ac, en otras palabras el  $dV/dQ$  sobre la barra de ac, típicamente este valor se encuentra entre el 1-3%, el rango de variación de la tensión por el “switcheo” de un banco capacitivo no debe ser muy amplio; lo anterior para evitar problemas de operación en el sistema y en los equipos.

### 2.1.1. Cambio de tensión por conmutación de un sub-banco

#### ➤ Metodología tradicional

Determina el cambio de tensión según [4] mediante la expresión

$$\Delta V = \frac{\Delta Q_f}{(S_{SCL} - Q_{f0})} * V_0 \quad (1)$$

En donde:

$\Delta V$ = Cambio de tensión ac (p.u)  $\Delta Q_f$ = Potencia reactiva inyectada a la barra ac (Mvar),  $Q_{f0}$ = Potencia reactiva total inyectada a la barra ac, incluida la potencia reactiva a ser conmutada (Mvar),  $S_{scl}$ = Nivel de cortocircuito en la barra de ac.

#### ➤ Modelo Detallado:

Determina el cambio de tensión mediante simulaciones, teniendo en cuenta el  $dV/dQ$  sobre el nodo de interés, en este punto se realiza un automatismo mediante el lenguaje de programación DPL en el DigSILENT en donde según la barra de análisis, se realizan  $n$  flujos variando la potencia reactiva inyectada por los filtros y cuyo resultado es una matriz donde se obtiene una curva tensión vs potencia reactiva. Dicha matriz es llevada a un archivo de Excel que contiene una macro en donde según el porcentaje de variación deseado por el usuario, determina el tamaño de los sub-bancos a ser instalados en la barra de ac.

## 2.2. Corrientes armónicas generadas por el convertidor

### 2.2.1. Armónicos característicos

En la siguiente figura se pueden observar un espectro de corrientes armónicas características tanto para un puente de 6 como de 12 pulsos.

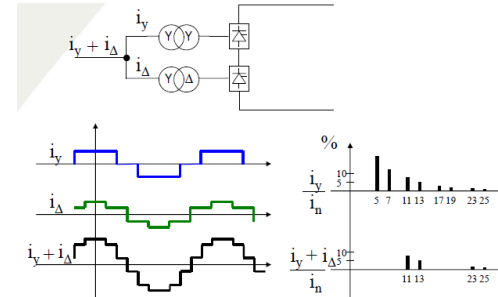


Figura 2. Armónicos característicos puente 6 y 12 pulsos

De la figura anterior, se observa que al aumentar el orden, la amplitud de los armónicos característicos disminuye rápidamente. Por esta razón generalmente en aplicaciones HVdc se implementan filtros sintonizados para los primeros armónicos, y un filtro pasa altos para los demás. Igualmente para los armónicos de bajo orden ( $n=3$ ), se instalan filtros para evitar efectos de resonancia producto de corrientes armónicas no características.

### 2.2.2. Amónicos no característicos y Resonancia

Durante la operación de un enlace HVdc se pueden presentar armónicos no característicos, que son originados por alguna condición de funcionamiento anómala tanto en la red o en el enlace, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar una variación típica de las corrientes armónicas no características conforme a la variación de corriente del enlace [10].

La presencia de armónicos no-característicos pueden implicar el uso de filtros para un armónico de menor orden al calculado con los característicos. Para determinar la necesidad de algún filtro para armónicos de bajo orden es necesario establecer si hay resonancia paralelo entre la red y el filtro. En este caso, si la frecuencia de resonancia es lo suficientemente cerca de cualquiera de los armónicos de corriente producidos por el convertidor HVdc, sobretensiones armónicas son causadas, estas tensiones elevadas pueden deteriorar o destruir los elementos del sistema.

La ecuación que determina la armónica a la que se presenta resonancia en paralelo, es la siguiente:

$$f_{rp} = f \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{MVAR_{Cap}}} \quad (2)$$

En donde:

$f_{rp}$  = Armónica a la que se presenta resonancia en paralelo,  $f$  = Frecuencia Fundamental,  $MVASC$  = MVA de corto circuito del sistema en el punto de instalación del banco de capacitores,  $MVARCAP$  = MVAR nominales del banco de capacitores.

#### ➤ Metodología tradicional

Realiza el cálculo de las corrientes armónicas a través de las expresiones disponibles en la literatura [4], con base a las características del sistema de transmisión HVdc particular en estudio. Este cálculo de las corrientes armónicas para efectos de determinar el desempeño de los filtros se realiza para todo el rango de potencia del enlace [3][4].

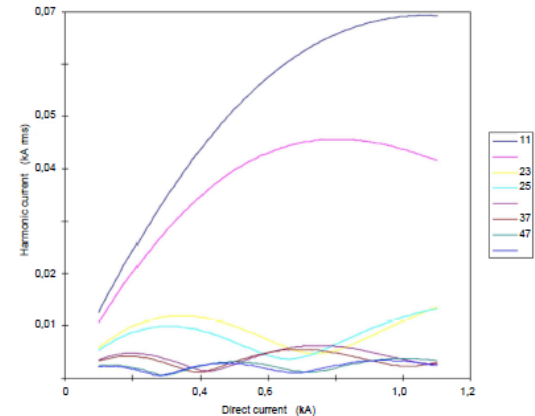


Figura 3. Variación típica de la magnitud de Corrientes armónicas características con la corriente en directa

De la figura anterior, se observa que para las corrientes armónicas dominantes 11/13 el comportamiento tiende a ser creciente. Sin embargo, para las armónicas de mayor orden se presenta un comportamiento cíclico donde la magnitud no aumenta de forma unidireccional con la potencia dc. Esto implica que la magnitud máxima de cada corriente armónica característica se alcanza para distintos puntos de operación del enlace [3].

Igualmente, se puede dar la posibilidad en donde en vez de simulación se utilizan valores típicos del contenido armónico en la inyección de corrientes armónicas del convertidor para configuración de 6 o 12 pulsos:

Tabla 1. Corrientes armónicas inyectadas por un convertor 6 pulsos

Número de Armónico	5	7	11	13	17	19	23	25
% Fundamental	20,0	14,2	9,0	7,6	5,8	5,2	4,3	4,0

Tabla 2. Corrientes armónicas inyectadas por un convertor 12 pulsos

Número de Armónico	11	13	23	25	35	37	47	49
% Fundamental	9,0	7,6	4,3	4,0	2,8	2,7	2,1	2,0

### ➤ Modelo Detallado:

Determina las corrientes, extrayendo las componentes armónicas de la onda de corriente, en este punto el software empleado es el PSCAD y para descomponer las componentes armónicas de la onda de corriente se utiliza un “Data Merge”.

### 2.3. Metodología cálculo $Z(W)$

La importancia de realizar el barrido de frecuencia radica en que las distorsiones de voltaje dependen de las corrientes armónicas y de la impedancia que resulta de la red de corriente alterna en paralelo con la de los filtros. La impedancia de red puede ser obtenida mediante simulación o mediante métodos analíticos [8]; la simulación implica tener un buen conocimiento de la red, las condiciones operativas, restricciones, contingencias críticas, etc, por lo cual se hace necesario hacer un barrido de la  $z$  del sistema en función de la frecuencia ante varios escenarios [8] [9].

La impedancia de red no es un valor fijo y este depende de condiciones como: topología, condiciones de demanda, condiciones de generación, etc.

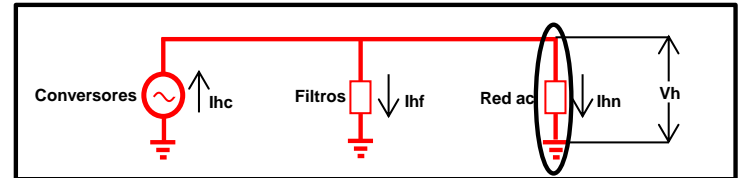


Figura 4. Circuito equivalente para la distorsión armónica

Mientras que la impedancia del filtro puede ser determinada, la impedancia armónica de la red de ac no es un valor único y esta puede variar sustancialmente debido a las condiciones operativas de la red (salida de líneas, demanda, generación).

$$I_{Filtro} = \frac{Z_{red}}{Z_{Filtro} + Z_{red}} Ihc \quad (3)$$

$$V_h = \frac{Ihc}{Y_{Filtro} + Y_{red}} \quad (4)$$

Distorsiones preexistentes originadas desde la red de ca deben ser añadidas a la distorsión de voltaje causada por las corrientes armónicas inyectadas por los convertidores. El límite de distorsión armónica varía en cada red, acorde al nivel de tensión manejado.

#### ➤ Metodología tradicional

Realiza simplificaciones para obtener la impedancia en función de la frecuencia. Cuando no hay más información disponible acerca de la red de ac, las fronteras se determinan con el mínimo y la impedancia de cortocircuito máxima del sistema. Un enfoque simplificado que se ha utilizado con frecuencia define las impedancias máximos y mínimos de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} Z_{max} &= Z_{max\ sc} * n \\ Z_{min} &= Z_{min\ sc} * \sqrt{n} \end{aligned} \quad (5)$$

En donde:

$Z_{max\ sc}$  = la impedancia máxima de cortocircuito,  $Z_{min\ sc}$  = la impedancia mínima de cortocircuito.

Como se dijo anteriormente la impedancia armónica de la red de ac no es un valor único y esta puede variar sustancialmente debido a diferentes condiciones operativas, entonces la cantidad de casos a evaluar para hallar la variación de la impedancia en función de la frecuencia, será:

Figura 5. Casos a Evaluar estudio  $Z(w)$ 

#### ➤ Modelo Detallado:

Dado que cada condición del sistema posee un valor determinado de la impedancia en función de la frecuencia se realiza un automatismo mediante el lenguaje de programación DPL en el DigSILENT en donde según la barra de interés y para cada condición del sistema se ejecuta el flujo armónico con el objetivo de obtener el barrido de frecuencia con base a las diferentes condiciones que se encuentre el sistema. Posteriormente y

mediante un archivo de Excel que contiene una macro se evalúa posible resonancias a la frecuencia de los armónicos característicos.

#### 2.4. Diseño de filtros

El criterio ideal para el diseño de los filtros corresponde a eliminar todos los efectos perjudiciales causados por la distorsión en la forma de onda de tensión, incluyendo interferencia telefónica que resulta ser la más difícil de eliminar. Sin embargo este criterio ideal resulta poco realista por razones técnicas y económicas [4]. Un método práctico para el diseño de los filtros consiste en reducir a un nivel aceptable la distorsión armónica de tensión. Para sistemas de transmisión HVdc se recomienda definir el criterio de diseño para los filtros ac en términos de distorsión de tensión individual (HDV) y total (THDV).

En términos de interferencia telefónica es importante definir un límite que garantice el correcto funcionamiento de las instalaciones de comunicación ubicadas en la cercanía de la línea de transmisión HVdc. Por esta razón el criterio de diseño debe incorporar un valor límites para los índices THFF o TIF, que debe ser cumplido por el diseño de los filtros ac.

##### 2.4.1. Desviación relativa de frecuencia

La desviación de frecuencia del ajuste del filtro respecto de la frecuencia de resonancia se cuantifica a través del factor  $\delta$

conocido factor de desintonización o bien desviación relativa de frecuencia.

La ecuación que determina la desviación relativa de frecuencia, es la siguiente:

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} + \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right) \quad (6)$$

En donde:

$\delta$  = Desviación relativa de frecuencia,  $\Delta f$  = Desviación frecuencia,  $f_n$  = Frecuencia Nominal sistema,  $\Delta L/L_n$  = Desviación relativa de la inductancia,  $\Delta C/C_n$  = Desviación relativa de la capacitancia.

##### 2.4.2. Selección de los tipos de filtros

La manera tradicional para calcular los parámetros de ac filtros se basa en el principio de que la impedancia Z de filtros es cero en el punto sintonizado. Este método se puede aplicar a calcular filtros individuales sintonizados, filtros dobles sintonizados, filtros triples sintonizados[2].

Existen diferentes tipos de configuraciones de los circuitos de filtrado para corriente alterna, que deben ser seleccionados para un sistema HVdc según los niveles de distorsiones armónicas y según los parámetros de la red de ac. Las configuraciones reciben el nombre que mejor describe su comportamiento ante la



frecuencia, y por lo general, estos pueden ser principalmente filtros sintonizados, amortiguados y “orden” de los filtros [4].

En lo referente al tema de los filtros pasivos, es importante empezar mencionando que estos a su vez se pueden agrupar en dos tipos, los filtros pasivos serie (usando una alta impedancia en serie para bloquear su paso) y los filtros pasivos paralelos o shunt (proveen una baja impedancia donde la mayoría de las corrientes armónicas son desviadas). El filtro paralelo presenta mayores ventajas que el filtro serie debido a que: es más económico, sólo transporta las corrientes armónicas para las que fue sintonizado y proporciona una parte de la potencia reactiva al sistema; mientras que el filtro serie debe soportar plena corriente en estado estable, corrientes de cortocircuito, voltaje pleno de la red y sobretensiones. El hecho que esté en serie conlleva un factor de pérdidas en estos equipos, a favor de los shunt, que sólo conducen a tierra las corrientes armónicas para las cuales fueron diseñados.

### 3. SIMULACIONES REALIZADAS, EMPLEANDO PSCAD.

Se evaluaron los armónicos y las fluctuaciones de voltaje verificando que se cumplan con los estándares internacionales más relevantes de la Calidad de la Potencia como la IEEE 519. Para el desarrollo de este estudio se usaron programas reconocidos para el análisis de sistemas de potencia, como lo son: EMTDC/PSCAD, el DiGSilent y herramientas computacionales como Microsoft Visual Basic.

El esquema propuesto para realizar los análisis consiste en un enlace con similares características a las que en un futuro (2018) poseería el enlace entre Colombia y Panamá.

Para el año 2018 se planea la entrada de la nueva interconexión internacional con tecnología HVdc entre Colombia y Panamá,. La interconexión tendrá una longitud aproximada de 614 km, con dos unidades convertoras independientes, una en cada país y una capacidad inicial de 300 MW. Del lado de Colombia se conectará en la subestación Cerromatoso 500 kV y en Panamá en la subestación Panamá II 230 kV.

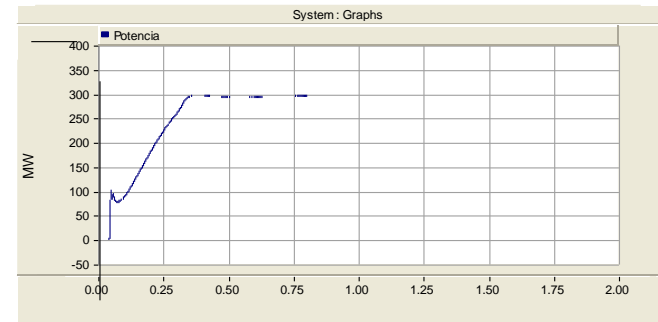


Figura 6. Potencia transmitida en el modelo PSCAD

Se consideraron impedancias equivalentes de Thevenin en el año de entrada del proyecto (2018) en los nodos extremos (Cerromatoso y Panamá II) con los correspondientes valores de

secuencia cero y positiva; para su consecución, se utilizaron equivalentes de Thevenin obtenidos a partir del software DIGSILENT. Así mismo, con base en los MVA de cortocircuito y teniendo en cuenta la potencia de dc a transferir, se realizó el cálculo del SCR, obteniéndose una relación en la que la interconexión se realizara entre nodos robustos.

Tabla 3. Fuentes equivalentes

Equivalente	R0 [ $\Omega$ ]	X0 [ $\Omega$ ]	R1 [ $\Omega$ ]	X1 [ $\Omega$ ]
<b>Rectificador</b>	2,99	20,50	1,37	23,14

### 3.1. Análisis de Compensación Reactiva

La cantidad de potencia reactiva requerida por las estaciones convertoras sería de:

Tabla 4. Cálculo Potencia Reactiva Requerida

Potencia a transmitir [MW]	300
$\tan\Phi$ [ $^\circ$ ]	0,467
Potencia Reactiva [Mvar]	147,54

Una vez determinado el valor total de potencia reactiva, se procede a establecer la cantidad de potencia reactiva que establezca un cambio de tensión máximo en estado estacionario de 1,0 %.

Tabla 5. Regulación de tensión máxima en estado estacionario

Nodo	dQ [MVar]	dV [pu]	dQ/dV [MVar/pu]
Rectificador	280,44	0,01	28044
Inversor	275,98	0,01	27598

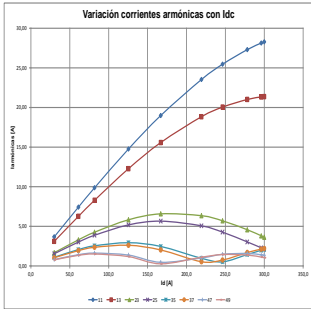
De la información anterior se deduce que la cantidad de potencia requerida para los convertidores es inferior al valor que produce un cambio de tensión de 0,01 p.u, por lo tanto se tomará como base 3 sub-bancos de 49,18 MVar para cumplir con los requerimientos tanto en la estación rectificadora como en la inversora.

### 3.2. Corrientes Armónicas generadas por el convertidor

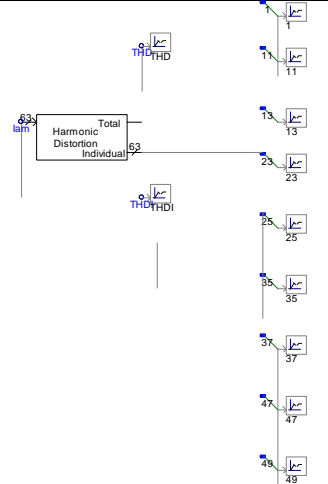
Se calculan las corrientes armónicas generadas por los convertidores mediante el cálculo analítico y obteniéndolas de la simulación tanto para el caso normal de operación (transmisión de 300 MW), variación en variables del sistema (frecuencia, tensión) y para condiciones de falla más comunes según la literatura internacional (fallas trifásicas, monofásicas a tierra en ambos extremos del enlace y bloqueos de conmutación)

### Corrientes Armónicas

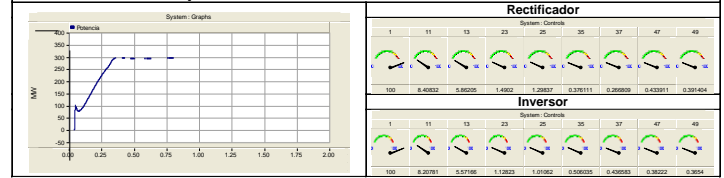
Modelo Analítico:



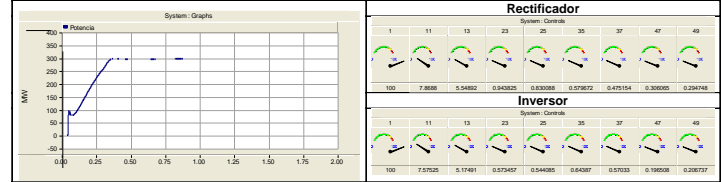
Modelo Detallado:



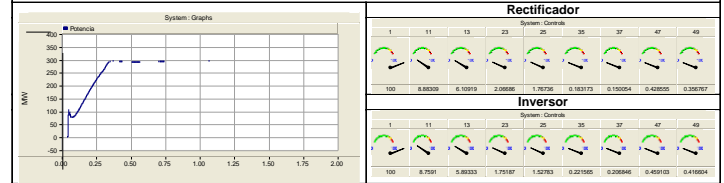
### Operación Normal - Transmitiendo 300 MW

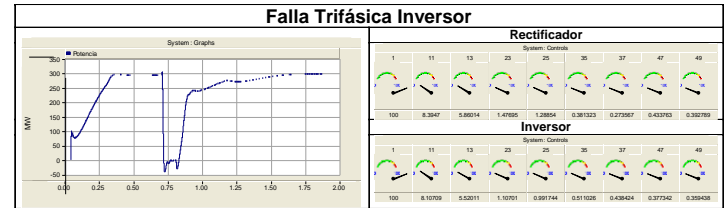
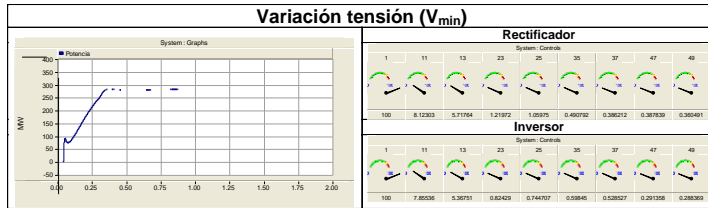
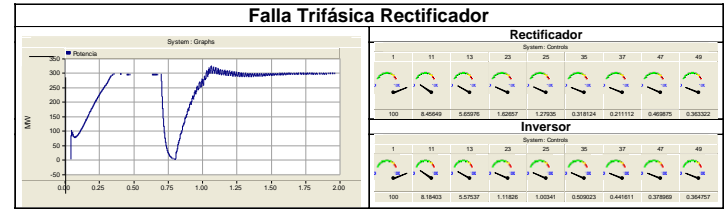
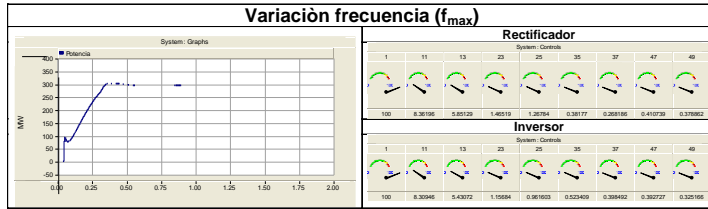
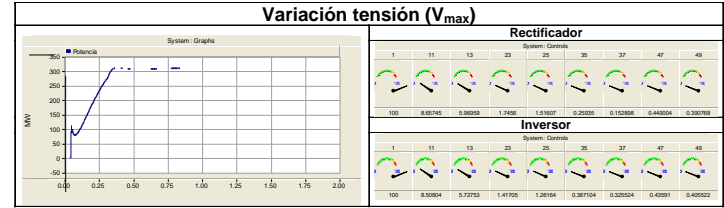
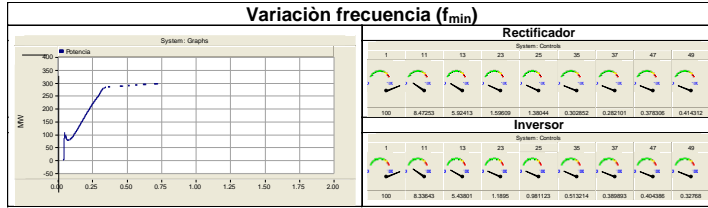


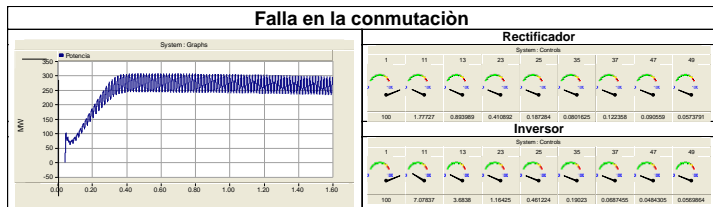
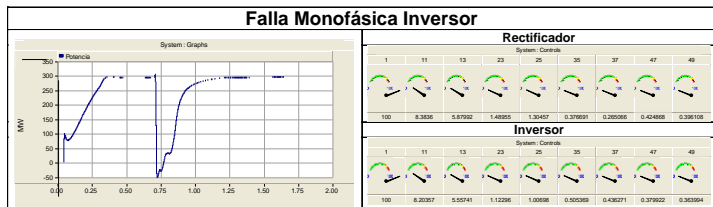
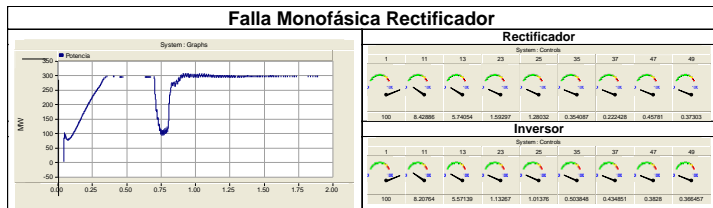
### Reactancia Transformadores +10%



### Reactancia Transformadores -10%







Rectificador														
Armónico	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
11	28.28	27.00	25.22	23.61	26.65	25.42	25.09	24.37	25.97	25.37	25.18	25.29	25.15	5.33
13	21.36	22.80	17.59	16.65	18.33	17.77	17.55	17.15	17.91	16.98	17.58	17.22	17.64	2.68
23	6.58	12.90	4.47	2.83	6.20	4.79	4.40	3.66	5.24	4.88	4.43	4.78	4.47	1.23
25	5.65	12.00	3.90	2.49	5.30	4.14	3.80	3.18	4.55	3.84	3.87	3.84	3.91	0.56
35	2.93	8.40	1.13	1.74	0.55	0.91	1.15	1.47	0.78	0.95	1.14	1.06	1.13	0.24
37	2.61	8.10	0.80	1.43	0.45	0.85	0.80	1.16	0.46	0.63	0.82	0.67	0.80	0.37
47	1.62	6.30	1.30	0.92	1.29	1.13	1.23	1.16	1.35	1.41	1.30	1.37	1.27	0.27
49	1.50	6.00	1.17	0.88	1.07	1.24	1.14	1.08	1.17	1.09	1.18	1.12	1.19	0.17

Inversor														
Armónico	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
11	28.28	27.00	24.62	22.73	26.28	25.01	24.93	23.57	25.52	24.55	24.32	24.62	24.61	21.24
13	21.36	22.80	16.71	15.52	17.68	16.31	16.29	16.10	17.18	16.73	16.56	16.71	16.67	11.05
23	6.58	12.90	3.38	1.72	5.26	3.57	3.47	2.47	4.25	3.35	3.21	3.98	3.37	3.49
25	5.65	12.00	3.03	1.63	4.58	2.94	2.88	2.23	3.78	3.01	2.98	3.04	3.02	1.38
35	2.93	8.40	1.52	1.93	0.66	1.54	1.57	1.80	1.16	1.53	1.53	1.51	1.52	0.57
37	2.61	8.10	1.31	1.71	0.62	1.17	1.19	1.59	0.98	1.32	1.32	1.30	1.31	0.21
47	1.62	6.30	1.15	0.59	1.38	1.21	1.18	0.87	1.31	1.14	1.13	1.15	1.14	0.15
49	1.50	6.00	1.10	0.62	1.25	0.98	0.98	0.87	1.22	1.09	1.08	1.10	1.09	0.17

Notas:

C1: Caso calculado mediante expresiones matemática

C2: Caso con porcentajes típicos según la literatura

C3: Caso Operación Normal

C4: Caso con Reactancia Transformadores +10%

C5: Caso con Reactancia Transformadores -10%

C6: Caso Variación frecuencia (fmin)

C7: Caso Variación frecuencia (fmax)

C8: Caso Variación tensión (Vmin)

C9: Caso Variación tensión (Vmax)

C10: Caso Falla Trifásica Rectificador

C11: Caso Falla Trifásica Inversor

C12: Caso Falla Monofásica Rectificador

C11: Caso Falla Monofásica Inversor

C12: Caso Falla Conmutación

De acuerdo a los resultados presentados en las figuras anteriores se observa que la magnitud de las corrientes armónicas disminuye rápidamente al aumentar el orden. Para las corrientes armónicas características de menor orden se obtiene el mayor porcentaje de aporte respecto a la corriente nominal, esto implica la necesidad filtros especialmente dedicados a filtrar estas frecuencias.

De los casos analizados, se observa que los valores que ofrece la literatura son mayores a los medidos mediante el programa de simulación, la explicación de esto puede ser que estos valores tienden a ser más conservativos, es decir contemplan un margen superior a los que se pudieran obtener mediante un modelo detallado.

Igualmente, es importante recalcar que las mediciones de los niveles de armónicos de pre-existentes reales (background) son significativas para complementar los estudios de simulación y evitar experiencias operativas desafortunadas que se tuvieron en el pasado como con el diseño de los filtros de ac del proyecto de HVdc Ibiúna - Itaipú.

El diseño de filtros en Itaipú tuvo en cuenta un sub-banco de un filtro sintonizado doble para el tercer y quinto armónico y para operar con una corriente un 10% más alta que la contribución total de las corrientes armónicas generadas por los convertidores de HVdc. El margen de 10% se estableció con el fin de considerar una contribución de la red eléctrica (“background”).

Con el tiempo y debido a las diversas operaciones indeseadas que se tuvieron, se realizaron mediciones de armónicos que indicaron que el quinto armónico que fluía por los filtros doble sintonizados para los armónicos tres / cinco ubicados en la subestación Ibiúna (HVdc Itaipú - inversor) era mucho mayor que los que inyectaban los convertidores de HVdc, aproximadamente el 90% de la corriente del quinto armónico por los filtros provenía de la propia

red eléctrica, y, como resultado, estos filtros se sobrecargaron (incluso durante condiciones de demanda mínima o media). En consecuencia, bancos adicionales fueron instalados con el fin de evitar la sobrecarga de los filtros.

### 3.3. Metodología cálculo $Z(W)$

Se hicieron análisis de impedancia en función de la frecuencia en los nodos donde conectará el enlace HVdc, con el fin de explorar la ocurrencia de polos a los armónicos característicos de orden 11,13, 23, 25 y posteriormente en tales casos evaluar la interacción de la red con las corrientes armónicas generadas por las estaciones y la posibilidad de aparición de sobretensiones.

En la Figura 7 se muestran los resultados de la magnitud de las impedancias de la red a los armónicos característicos, obtenida con DIGSILENT, para todos los escenarios nombrados anteriormente. Igualmente en la Figura 8 se puede observar un ejemplo de un caso evaluado de la impedancia armónica tanto en el gráfico  $Z(w)$  como en un diagrama R-X.

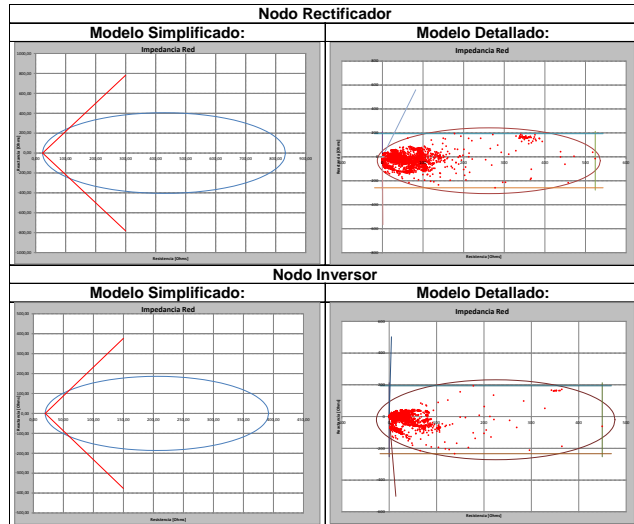


Figura 7. Comparación  $Z(w)$  modelo simplificado y detallado

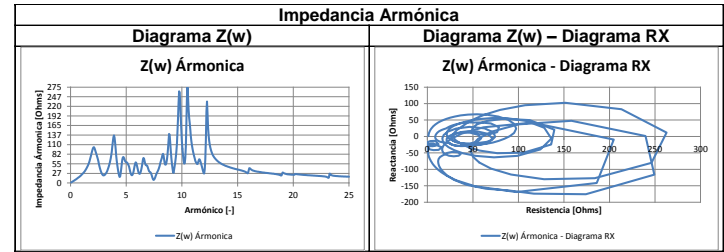


Figura 8. Ejemplo de impedancia armónica

De los resultados obtenidos se observó que no se presentan polos de magnitud elevada a los armónicos característicos 11,13, 23, 25 en los nodos analizados vistos para las estaciones convertoras.

### 3.4. Análisis de contenidos armónicos

Para realizar el análisis de los contenidos de armónicos se requiere como información los resultados de las etapas anteriores.

#### 3.4.1. Índices para armónicos de tensión

El índice de distorsión individual de tensión se define mediante la siguiente ecuación:

$$D_V = \frac{V_h}{V_1} \times 100\% \quad (7)$$

En donde:

Dv: Distorsión individual de tensión, Vh: Magnitud de la componente armónica individual, h: Orden del armónico, V1: Magnitud de la componente fundamental.

El índice de distorsión armónica total de tensión se define como:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N (V_h)^2}}{V_1} \times 100\% \quad (8)$$

Los límites de distorsión de tensión están relacionados con la distorsión armónica total (THDV) de tensión, en porcentaje de la tensión nominal a frecuencia fundamental. La Tabla 6 establece estos límites.

Tabla 6. Límites de distorsión de Voltaje según IEEE 519

Tensión en la barra [kV]	Distorsión individual de Tensión Dv (%)	Distorsión total de tensión THDv (%)
$V \leq 69.000$	3,0	5,0

Tensión en la barra [kV]	Distorsión individual de Tensión Dv (%)	Distorsión total de tensión THDv (%)
$69.001 \leq V \leq 161.000$	1,5	2,5
$V \geq 161.001$	1,0	1,5

Una forma para definir los límites de distorsión de tensión para una red ac particular puede ser considerar los valores que han sido utilizados por instalaciones existentes en las cuales se ha logrado un desempeño aceptable [3]. Los siguientes límites corresponden a información obtenida por CIGRE respecto al comportamiento de los filtros ac en numerosas instalaciones HVdc actualmente en operación [4]

Los límites especificados para Dn se encuentran en el margen de 0,5% a 1,5% (el más típico corresponde a 1%).

Los límites especificados para THD se encuentran en el margen de 1% a 4% (no existe un valor típico).

Para definir los límites de interferencia telefónica se puede adoptar un criterio similar, a pesar que estos requerimientos dependen de manera importante del proyecto HVdc particular.

El Factor de interferencia telefónico, THFF se define como:



$$THFF = \sqrt{\sum_{n=1}^N \left(\frac{V_n}{V} F_n\right)^2} \quad (9)$$

En aplicaciones HVdc el límite requerido para el THFF típicamente es de 1%.

Vn: armónico de tensión de orden n, N: armónico de mayor orden considerado, V: Magnitud de la componente fundamental, Fn:  $p_n \cdot n \cdot f_0 / 800$ , Pm: Factor de ponderación “psophometric”, fo: es la frecuencia fundamental.

### 3.4.2. Diseño filtros

Teniendo presente lo mencionado en el numeral 2.4.1, es necesario calcular el factor de desintonización, teniendo en cuenta los coeficientes de temperatura para los condensadores (0,05% por grado Celsius), bobinas (0,01% por grado Celsius) y la temperatura ambiente (20°C).

$$\delta = 0.016$$

Se hace el cálculo para observar y determinar si es necesario un filtro para evitar resonancias entre la red y el filtro de acuerdo a lo presentado en el numeral 2.2.2.

$$frp - R_{ect} = f \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{MVA_{r_{Cap}}}} = \sqrt{\frac{4060}{260}} \approx 3f$$

$$frp - I_{nv} = f \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{MVA_{r_{Cap}}}} = \sqrt{\frac{2230}{260}} \approx 3f$$

Se observa la presencia de una resonancia en paralelo para una frecuencia cercana al armónico 3. Este resultado implica la necesidad de instalar filtros para este armónico tanto en la estación rectificadora como inversora.

#### ➤ Selección de los tipos de filtros

Filtro sintonizado de doble ajuste 11 y 13: Este filtro fue seleccionado producto de que el mayor porcentaje de las grandes corrientes generadas por la estación rectificadora son los armónicos 11 y 13, por tratarse de un convertidor de 12 pulsos.

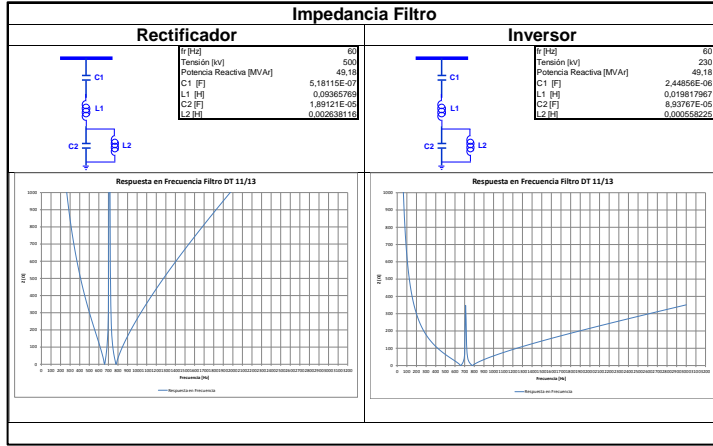


Figura 9. Respuesta en frecuencia Filtro Sintonizado Doble

Filtro pasa altos: Este filtro es necesario debido a que las corrientes armónicas disminuyen al aumentar el orden permitiendo atenuarlas con un filtro pasa altos.

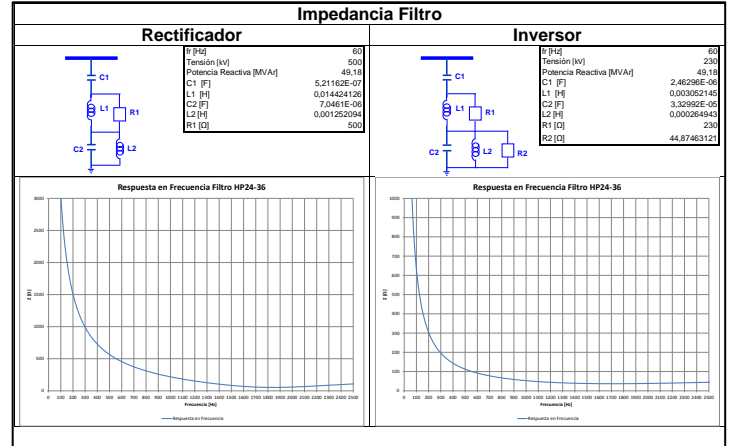


Figura 10. Respuesta en frecuencia Filtro Pasa Altos

Filtro pasa altos C-Type armónico 3: Para resolver el problema de resonancia entre la red y los filtros se selecciona un filtro pasa alto, ajustado en el armónico 3. Debido a que la frecuencia de ajuste se encuentra cercana a la frecuencia fundamental se opta por un filtro pasa altos C-Type para reducir las pérdidas.

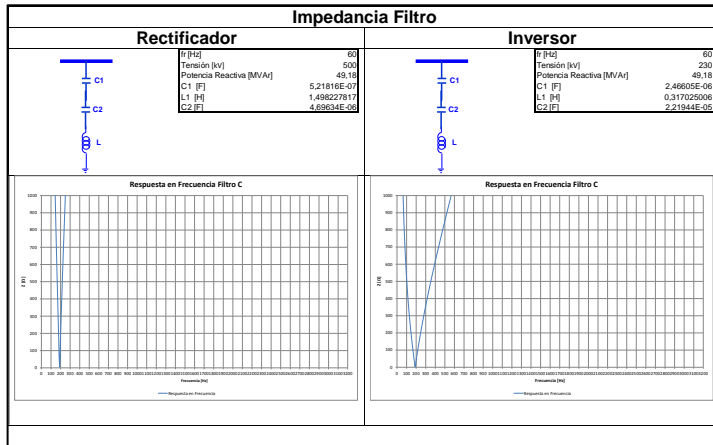


Figura 11. Respuesta en frecuencia Filtro Tipo C

A continuación se presentan los resultados de distorsión armónica (individual, total), junto al factor de interferencia telefónica tanto para el nodo rectificador como inversor:

Tabla 7. Resultados de distorsión de tensión e interferencia telefónica

Armónico	Rectificador	Inversor
	Dn [%]	Dn [%]
11	0,019	0,062

Armónico	Rectificador	Inversor
	Dn [%]	Dn [%]
13	0,010	0,039
23	0,032	0,060
25	0,011	0,020
35	0,005	0,002
37	0,007	0,003
47	0,012	0,019
49	0,011	0,017
THD	0,04%	0,10%
THFF	0,08%	0,14%

Se observa que la distorsión individual resulta menor a un 1% para todos los armónicos considerados. Igualmente el THD y el THFF se encuentran por debajo de los límites establecido en 3.4.1 teniendo como resultado un diseño de filtros de ac que cumplen con los límites internacionales.

Adicionalmente y según los resultados de 3.3 se realiza un análisis con la menor impedancia de red del sistema tanto para la estación rectificadora e inversora para evaluar el caso de mayor distorsión

Tabla 8. Resultados de distorsión de tensión e interferencia telefónica

Armónico	Rectificador	Inversor
	Dn [%]	Dn [%]

Armónico	Rectificador	Inversor
	Dn [%]	Dn [%]
11	0,031	0,868
13	0,024	0,556
23	0,349	0,244
25	0,090	0,127
35	0,022	0,019
37	0,012	0,021
47	0,054	0,076
49	0,050	0,075
THD	0,37%	1,07%
THFF	0,67%	0,80%

Finalmente mediante el circuito equivalente para la distorsión armónica se verificaron los resultados encontrados anteriormente, tal como se ilustra a continuación:

Armónico	Rectificador	
	Dn [%]	
11	0,031	Simulación
	0,038	Cto Equivalente

Una vez más se corrobora que no se sobrepasan los límites internacionales.

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS

Mediante este trabajo se buscó identificar las principales consideraciones en la metodología convencional para el diseño de los filtros de la red de ac cuando se poseen enlaces HVdc, para esto, se implementó para cada aspecto en la metodología clásica automatismos u optimizaciones para dejar de manera general cada aspecto de análisis para cualquier caso que se requiera estudiar.

La información durante la etapa de la metodología posee grandes impactos en el diseño final del filtro debido a que un diseño sobre-dimensionado llevaría a tener filtros más caros pero un diseño sub-dimensionado llevaría a tener bajos rendimientos o problemas en la red.

El modelo propuesto para realizar los análisis consiste en un enlace con similares características a las que en un futuro (2018) poseería el enlace entre Colombia y Panamá, tomando como referencia el modelo “Cigre Benchmark Model For HVdc Controls” del software PSCAD.

Los análisis en el diseño de los filtros de ac mostraron lo siguiente:

Los reactivos necesarios para las estaciones convertoras son determinados de acuerdo a las características del enlace (número de pulsos y cantidad de potencia a transmitir); hecho esto, la magnitud de los sub-bancos se definen de acuerdo al cambio

máximo de tensión permitida en la barra ac. El rango de variación de la tensión ante la conexión o desconexión de un sub-banco no debe ser muy amplio; lo anterior para evitar problemas de operación en el sistema y en los equipos.

Para determinar el cambio de tensión por conmutación de un sub-banco, es necesario establecer este valor mediante simulaciones, teniendo en cuenta el  $dV/dQ$  sobre el nodo de interés y que la variación de este valor va depender de la fortaleza del nodo del punto de conexión.

Se verificó que el cambio de tensión por conmutación de un sub-banco es inferior al 1% máximo propuesto.

Por lo general las corrientes armónicas inyectadas por los convertidores son calculadas mediante expresiones matemáticas según la literatura especializada o en su defecto se usan valores típicos del contenido armónico de dicho armónico, esto implica valores más conservativos que frecuentemente son más altos que los medidos en una simulación.

Se midieron las corrientes armónicas generadas por los convertidores tanto para el caso normal de operación y variación en variables del sistema (frecuencia, tensión) y para condiciones de falla más comunes según la literatura internacional (fallas trifásicas, monofásicas a tierra en ambos extremos del enlace y bloqueos de conmutación), encontrándose que estos valores siempre tienden a ser menor que los calculados con expresiones matemáticas.

Las mediciones de los niveles de armónicos de pre-existentes reales (background) son significativas para complementar las simulaciones y evitar experiencias operativas desafortunadas que se tuvieron en el pasado como con el diseño de los filtros de ac del proyecto de HVdc Ibiúna - Itaipú.

Un estudio de la impedancia en función de la frecuencia es de suma importancia al momento de analizar el contenido armónico en un sistema ya que da indicios de posibles condiciones de resonancia que estos a su vez producen altos niveles de distorsión en los voltajes armónicos cuando la resonancia ocurre a la frecuencia del armónico asociado.

Teniendo presente lo anterior, es claro que la metodología tradicional realiza simplificaciones para obtener la impedancia en función de la frecuencia ya sea por razones como falta de información disponible para la red de ac, tiempos en la ejecución del cronograma planteado. Sin embargo se debe tener en cuenta que con la simplificación anterior, es muy probable que el diagrama circular no corresponda a las características reales del sistema. Es por esto que es necesario realizar dicho análisis con la mayoría de las condiciones esperadas en la operación de la red de ac.

De los resultados obtenidos se observó que no se presentan polos de magnitud elevada a los armónicos característicos en los nodos analizados vistos para las estaciones convertoras y para todos los escenarios analizados.

Los armónicos individuales medidos en la barra de conexión de ac de las estaciones rectificadoras e inversoras, no superan los límites establecidos en la norma IEEE 519.1992, por lo que se establece que el diseño de los filtros de ac quedó diseñado acorde a las necesidades del punto de conexión. Igualmente se observa que la distorsión total de tensión junto al factor de interferencia telefónica resulta menor a los límites internacionales usados en proyectos de HVdc. Se realizó un análisis con la menor impedancia de red del sistema tanto para la estación rectificadora e inversora para evaluar el caso de mayor distorsión, una vez más se corrobora que no se sobrepasan los límites internacionales.

Por lo general los filtros activos shunt son más usados que los filtros series, debido a que el hecho de colocar un equipo serie, implicaría debe soportar plena corriente en estado estable, corrientes de cortocircuito, voltaje pleno de la red y sobretensiones, además de las pérdidas.

#### ➤ Trabajo Futuro

En el presente trabajo se enfatizó en cómo debería realizarse o abordarse las diferentes etapas en la metodología para la especificación de los filtros de ac. Como trabajos de investigación futuros se podría continuar con otros tópicos relacionados con el tema de análisis de armónicos en presencia de enlaces HVdc como el estudio de inestabilidad armónica en donde el sistema de control desarrolla un rol importante, ya que este podría excitar un polo en el análisis de la impedancia del sistema de ac lo cual se

traduciría en una sobretensión y en la necesidad de instalar un filtro para este polo, tal como sucedió en el caso de Chateauguay en Canadá.

#### REFERENCIAS

- [1] Fernando Cattán Jusan, “Methodology Aspects of Harmonic Performance Calculation and Reactive Power Compensation Design”, Furnas, Brasil, 2011.
- [2] Puming Li, Quanrui Hao, The Algorithm for the Parameters of AC Filters in HVDC Transmission System, IEEE, 2008.
- [3] G. Rogers, R. Fuentes, G. Olguin, J.M. Santos, Diseño preliminar sistema de filtros de armónicas ac para el proyecto HVdc AYSÉN-SIC, CIGRE, 2009.
- [4] IEC/TR 62001. “High-Voltage Direct Current (HVDC) Systems - Guidebook to the Specification and Design Evaluation of AC Filters”, IEC Standard, October 2009.
- [5] H.Zhao, H.Zhao, M.Zhao and YWang, “Computer simulation and measurements of HVDC Harmonics”, IEE Proc-Genes. Transin. Distrib. Vol. 146, No. 2, March 1999.
- [6] Millán Idi, Cardona Hugo. Modelo general para la planeación de sistemas HVDC: aplicación a los estudios técnicos de la interconexión Colombia – Panamá. Medellín, 2007. 200 p. Trabajo de grado (Magister en Ingeniería con énfasis en

Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica) Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de Ingeniería. Facultad de Eléctrica y Electrónica.

- [7] Fabián Alonso Elgueta Jaque, “CONTROL DE SISTEMAS HVDC”, Universidad de Chile, 2008
- [8] K. Kanngiesser, H. Huang, H. Peter Lips, N. Christl, G Wild, D. Retzmann, P. Riedel, K Sadek, C. Storer, M Gumbert, HVDC Systems and Their Planning. SIEMENS AG Rev. 4. 631p, 2004.
- [9] High Voltage Direct Current Transmission – [en línea]. <Disponible en: <http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-transmission/hvdc/> >
- [10] ABB Suecia. [en línea]. <Disponible en: [www.abb.com/hvdc](http://www.abb.com/hvdc)>
- [11] UPME. PLAN DE EXPANSIÓN DE REFERENCIA GENERACIÓN - TRANSMISIÓN 2013 – 2027. BOGOTÁ DC. DICIEMBRE DE 2013.

## AUTORES

*Juan David PALENCIA PENAGOS.* Ingeniero Electricista de la Universidad Pontificia Bolivariana. Actualmente está realizando la Maestría en Ingeniería con énfasis en Transmisión y Distribución de Energía en la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín. Con experiencia en problemas de planeación y operación de sistemas Interconectados nacionales e internacionales.

*Jhon Albeiro CALDERON SERNA.* Ingeniero Electricista, Magíster en Ingeniería de la Universidad Nacional sede Medellín. Adscrito al Grupo de Investigación en Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica TyD-UPB. Actualmente trabaja en ISA y es docente de la Escuela de Ingenierías de la U.P.B en el área de postgrados.