



UNDÉCIMO ENCUENTRO REGIONAL
IBEROAMERICANO DEL CIGRÉ – XI ERIAC

COMITÉ NACIONAL PARAGUAYO DEL CIGRE
22 al 26 de mayo 2005 – Hernandarias – Paraguay

**PROCEDIMIENTO OPTIMIZADO PARA EL CÁLCULO DE ARMÓNICAS EN LA INCLUSIÓN DE
BANCOS DE COMPENSACIÓN DE REACTIVO EN SISTEMAS DE POTENCIA DE AT**

P. E. ISSOURIBEHERE, F. ISSOURIBEHERE, V. F. CORASANITI
IITREE-UNLP
Argentina

Resumen – Se describe un procedimiento considerado óptimo para el cálculo de armónicas en un sistema de EAT de interconexión de agentes de un mercado único, en el que se incluye una nueva instalación. Se ilustran los pasos a seguir para calcular en el nodo modificado la solicitación armónica de los elementos y prever el cumplimiento de la normativa de calidad de onda vigente en la República Argentina. Se innova aplicando un método de cálculo incremental para estimar el efecto marginal armónico en el resto de los nodos de la red.

Palabras clave: Reactivo - Armónicas - Efecto marginal – Resonancias

1 INTRODUCCIÓN

En los Sistemas de Interconexión Eléctrica, regidos por normas de calidad, mantener la forma de la onda de tensión “limpia” es un requisito esencial. La responsabilidad le cabe a todos los Agentes. La deformación de la onda de tensión en régimen estacionario, o cuasi, se representa por el contenido armónico. El fenómeno tiene origen principalmente en cargas perturbadoras que absorben corrientes no lineales. La deformación resultante se debe al efecto de esas corrientes sobre el Sistema. Esa deformación también resulta sensible a las modificaciones de la red, como lo son la introducción de nuevas líneas, generadores, compensaciones de reactivo y otros elementos que, aunque lineales, cambian la reacción del sistema.

La introducción de toda nueva carga en la red, de porte relevante y presuntamente perturbadora, debe ser motivo de estudio en cuanto a la adaptación del sistema a esa alteración.

Los perfiles y flujos de las armónicas suelen modificarse sustancialmente ante la inclusión de bancos

de compensación de reactivo, lo que se debe a que las armónicas tienen especial predilección por los capacitores.

Los estudios de armónicas se realizan en régimen permanente sobre modelos similares a aquellos en los que se estudia el sistema en régimen industrial.

Para los estudios en régimen de frecuencia industrial realizados en el Sistema Argentino de Interconexión en EAT se utilizan programas de cálculo de alto nivel que utilizan una Base de Datos completa que incluye los modelos de todos los elementos pasivos, cargas y generadores.

Un estudio de armónicas se realiza de igual manera y con base al modelo de frecuencia industrial.

El modelo pasivo debe ser adaptado a aquellas frecuencias armónicas de interés, teniendo en cuenta debidamente el carácter de distribuido de ciertos elementos y las variaciones con la frecuencia de los concentrados, incluso las cargas. Deben modelarse correctamente los factores de mérito de los circuitos, en particular en proximidades de las resonancias. Esta adaptación suele ser factible, lográndose un resultado compatible con el grado de exactitud esperable en este tipo de estudios.

El estudio de armónicas en grandes redes tiene como especial dificultad el desconocimiento de la ubicación y del valor – en magnitud y fase – de cada una de las fuentes de armónicas. Esta es la gran diferencia respecto a los estudios clásicos, en los que los generadores están descriptos con todo detalle.

Las fuentes armónicas, en razón de su naturaleza fluctuante, no pueden ser descriptas acabadamente a través de los resultados de mediciones universales en la red, si es que estas pudieran hacerse.

El método utilizado por el IITREE, aplicado a estudios de casos en el SADI, que permite resolver

adecuadamente los problemas de ingeniería planteados, se explica a continuación.

2 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE ARMÓNICAS

El procedimiento para el cálculo de armónicas en un sistema interconectado existente, en el que se proyecta realizar una modificación de importancia, consiste en:

- Determinar mediante mediciones la situación armónica preexistente en el nodo en cuestión. Evaluar el cumplimiento de las regulaciones sobre contaminación armónica actual. Obtener datos para validar el modelo de cálculo a utilizar.
- Modelar la red pasiva en un programa adecuado, incluyendo el sistema hasta nodos lejanos.
- Excitar el modelo con los valores medidos en el nodo principal. Obtener los nuevos niveles de armónicas en ese nodo con la inclusión del nuevo elemento. Verificar el nuevo grado de compatibilidad armónica del nodo y obtener los datos de sollicitación del elemento, necesarios para su dimensionamiento.
- Excitar el modelo pasivo de red con generadores armónicos en el nodo de referencia, de valores correspondientes a los incrementales de ese nodo (obtenidos del paso anterior). Determinar en todos los nodos vecinos de influencia la alteración armónica en ellos (en módulo), obteniendo así el efecto exclusivo de la modificación.

El procedimiento - utilizado ya en estudios para diversas Estaciones Transformadoras del Sistema Argentino de Interconexión en 500 kV (SADI) - se ejemplificará en lo que sigue con los realizados en una de ellas, como ejemplo, en la que se prevé la incorporación de compensación reactiva en derivación. La compensación a instalar consta de dos bancos de capacitores de 50 MVar cada uno en la barra de 132 kV.

3 APLICACIÓN A UN CASO

3.1 Situación armónica en el nodo

Se realizan mediciones de armónicas de tensión y corriente en 132 kV, en la E. T. 500/132 kV en la cual se va a instalar el banco de compensación de reactivo.

El objeto principal de realizar las mediciones es:

- Verificar el grado de contaminación armónica preexistente en el nodo a efectos de dilucidar en el futuro eventuales controversias por la inclusión del banco de compensación.
- Validar el modelo de red a utilizar en los estudios eléctricos.

En la Fig. 1 se presenta el diagrama esquemático de la red y los puntos donde se realizaron las mediciones.

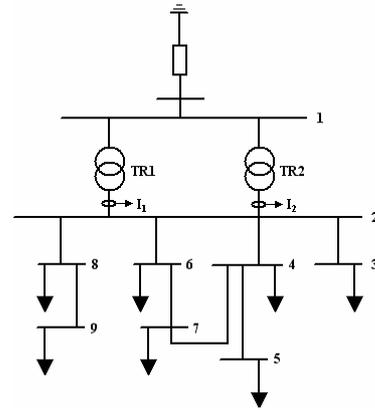


Fig. 1–Esquema de la red y puntos de medición.

En la Fig. 2 se muestra el perfil de THD (*Total Harmonic Distortion*) en valores en [%] de la tensión en las tres fases.

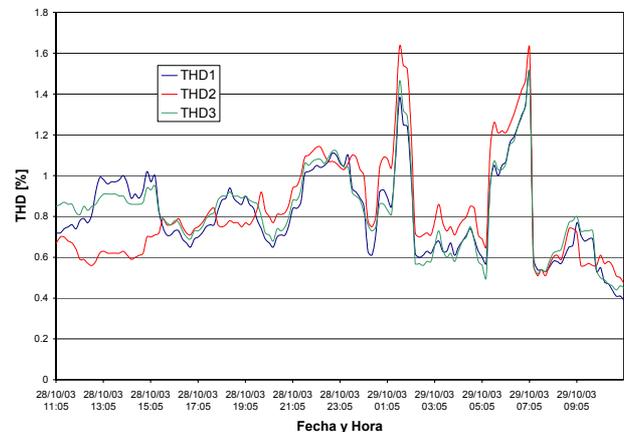


Fig. 2– Perfil de THD en la tensión. Transformador 1.

Se efectúa un análisis estadístico de las mediciones, obteniendo los valores medios, máximos y P_{95} (*Percentil 95*: valor superado sólo por el 5 % de los registros [cercano al máximo]) tanto del THD como de todas las armónicas hasta la 40ª. En la Fig. 3 aparece una síntesis de este procesamiento estadístico.

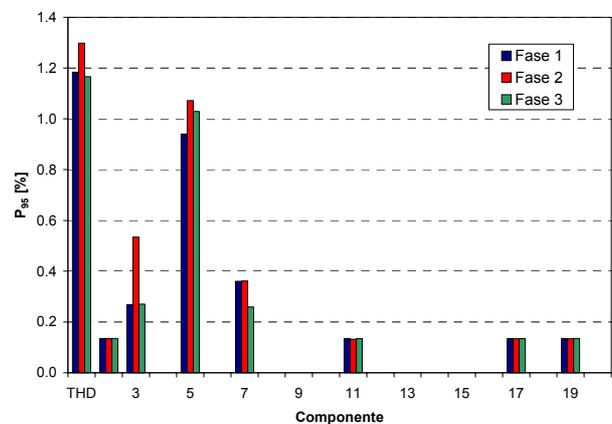


Fig. 3 – Gráfico de barras para las armónicas de tensión representadas a través de su P_{95} . Transformador 1.

Desde esta gráfica se concluye que la armónica más importante, varios órdenes por encima de las demás, es la 5ª. De todos modos, los niveles de armónicas registrados son compatibles con los estándares de calidad, como se observa en la Fig. 4, que muestra los perfiles de THD y 5ª armónica, junto con los límites establecidos en la Res. ENRE 184/00 para éstas.

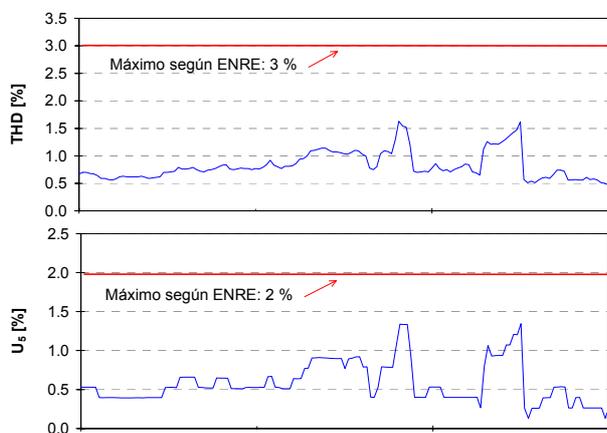


Fig. 4 – THD y 5ª armónica en la tensión. Transformador 1.

Las mediciones realizadas en el nodo de interés son de fundamental importancia para la validación del modelo de red.

3.2 Obtención del modelo de red

Para el modelado de la red eléctrica aledaña a la ET, tanto para la red de 500 kV como de 132 kV, se obtienen los datos de los flujos de carga de las Guías de Referencia del SADI.

Los valores de frecuencia industrial obtenidos en los estudios de flujos de armónicas surgen del modelado de dicho escenario de flujo de carga correspondiente a un escenario pico de demanda, condición para la cual se conectarán los bancos de compensación de reactivo.

En consideración a que el banco se instala en conexión doble estrella con centro aislado, su inclusión no influye sobre las armónicas de modo homopolar (múltiplos de 3), por lo que la representación es válida sólo para las secuencias directa e inversa (modos a los que corresponden el resto de las armónicas).

Con respecto a los modelos utilizados en las simulaciones, estos son equivalentes en 132 kV del tipo RL paralelo. Las líneas de 500 kV y 132 kV fueron modeladas como de parámetros distribuidos. Los transformadores fueron representados con sus respectivas reactancias de cortocircuito, teniendo en cuenta el incremento de las pérdidas a las frecuencias armónicas de interés. En el caso de los generadores se modelaron con sus respectivas reactancias de secuencia inversa conectadas a tierra y en los puntos donde se realizaron equivalentes de cortocircuito fueron modelados con sus respectivas impedancias de cortocircuito.

3.3 Validación del modelo de red

A los efectos de validar el modelo de red realizado, se simulan las condiciones de operación del sistema en las cuales se realizaron las mediciones.

En estas condiciones de funcionamiento se inyectan corrientes armónicas en la barra de 132 kV del modelo de valores coincidentes con los que se midieron en la ET.

Los valores medios de las armónicas de tensión individuales, junto con la distorsión total de tensión se muestran en la Tabla II. En esta tabla se representaron los límites máximos permitidos por el ENRE en la Resolución 184/00 [1] y la Norma IEEE 519/92 [2], y los valores que surgen de la medición y la simulación.

TABLA II. DISTORSIONES EN LA TENSIÓN DE BARRAS DE 132 KV SIMULADAS Y MEDIDAS.

	THD	2	5	7	11	17	19
Límites IEEE	2.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Límites ENRE	3	1.5	2	2	1.5	1	1
Medición	1.16	0.13	1.07	0.36	0.13	0.13	0.13
Simulación	1.18	0.13	1.09	0.36	0.13	0.13	0.13

Es posible realizar una comparación de cada armónica de tensión para los valores medidos y simulados. Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 5.

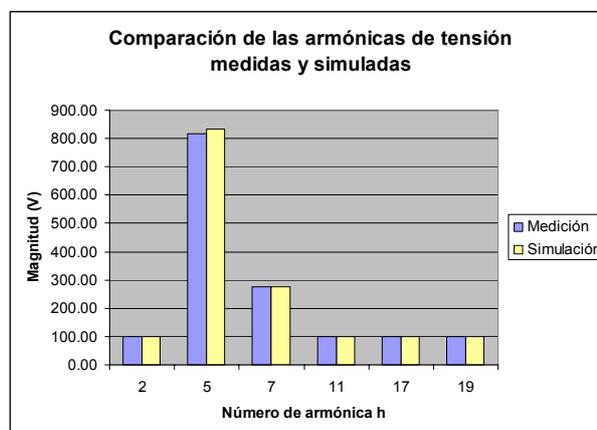


Fig. 5 – Comparación entre las distorsiones de tensión medidas y simuladas.

El grado de concordancia se considera aceptable para validar el modelo de red utilizado para el estudio, en especial en aquellas armónicas que –por ser predominantes– importan en el dimensionamiento de los bancos.

3.4 Impedancia de red vista desde la barra de 132 kV

A los efectos de estudiar la respuesta del modelo de red obtenido, se realiza un barrido en frecuencia desde la barra de 132 kV, de forma tal de obtener la impedancia

de la red en función de la frecuencia. Los resultados se muestran en la Fig. 6.

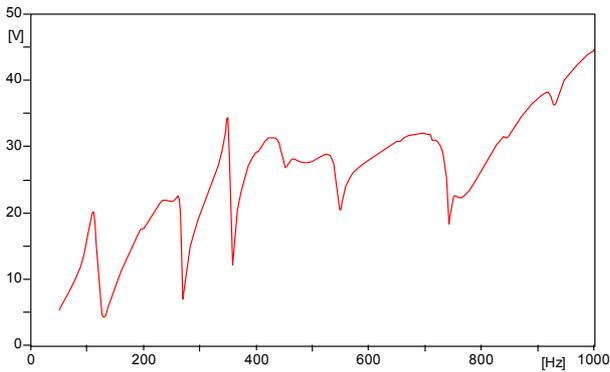


Fig. 6 – Impedancia vista desde la barra de 132 kV.

De la Fig. 6 se obtiene que el valor de la impedancia a la frecuencia de la 5ª armónica es de 21.5 Ω. Con el propósito de estimar a partir de las mediciones la impedancia que la red presenta en 132 kV a la armónica 5ª, se confeccionó el gráfico I_5 vs. U_5 de la Fig. 7. En dicha gráfica se ha representado la recta que mejor aproxima a la nube de puntos que surge de la correlación.

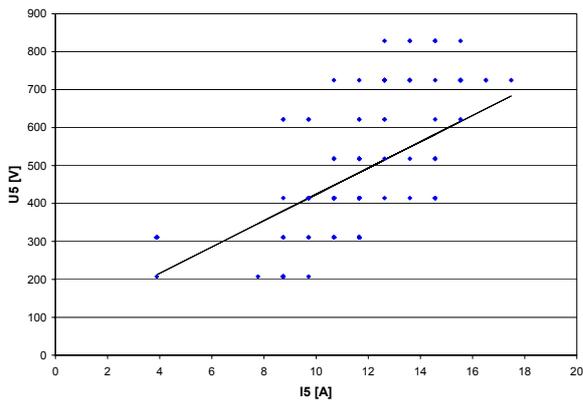


Fig. 7 – Diagrama I_5 vs. U_5 en 132 kV.

A partir del resultado de las mediciones es posible realizar el circuito equivalente de la Fig. 8. El valor del generador de tensión es la tensión de 5ª armónica residual que esta presente para corriente nula, (ordenada al origen de la recta de la Fig. 7). La pendiente de la recta permite estimar el valor de la impedancia de 5ª armónica, resultando aproximadamente de 20 Ω.

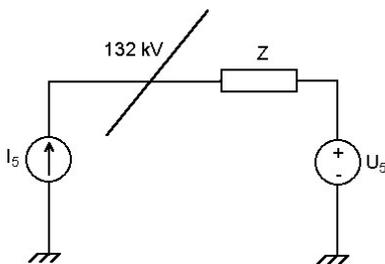


Fig. 8 – Impedancia vista desde la barra de 132 kV.

La reactancia de cortocircuito de los transformadores es del orden de 15 %. Dado que además la potencia instalada es de 300 MVA x 2 = 600 MVA, se llega a que la reactancia de cortocircuito a 50 Hz es 4,3 Ω. Por lo tanto a 250 Hz (5ª armónica) esta impedancia sería de 21,5 Ω.

4 ESTUDIOS REALIZADOS AL INCLUIR EL BANCO DE COMPENSACIÓN

Aplicado el banco (un módulo de 50 MVAR en cada barra), se obtiene:

- i) Efecto de las armónicas sobre el banco. Determinación de la sollicitación según su norma constructiva IEC 60871.
- ii) Nueva situación del nodo. Verificación de las normas de calidad (Res. ENRE 184/00 y norma IEEE 519/92).

Esta parte del procedimiento permite concluir con la verificación del nodo.

El no cumplimiento de los requerimientos llevará a una modificación del proyecto del banco (conversión en filtros, etc.).

4.1 Impedancia de red vista desde la barra de 132 kV

Se realiza el barrido en frecuencia en la barra de 132 kV donde se conecta el banco de capacitores y se comparan las respuestas en frecuencia con y sin la compensación *shunt*. Los resultados se presentan en la Fig. 9.

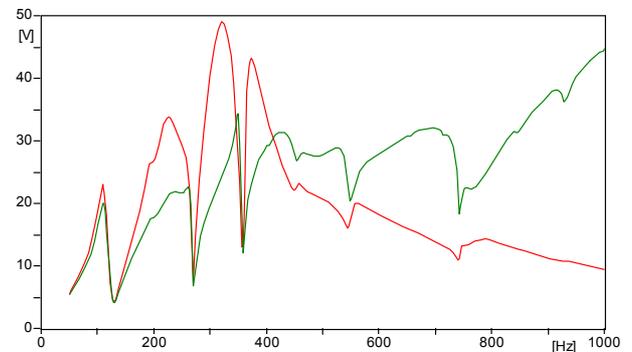


Fig. 8 – Impedancia vista desde la barra de 132 kV. (--- con compensación --- sin compensación).

A los efectos de cuantificar la modificación de la impedancia del sistema se realiza, en la Tabla III, la comparación de la impedancia de la red para el caso sin y con los dos bancos de compensación.

TABLA III. VARIACIÓN DE LA IMPEDANCIA

Nº de armónica	Impedancia sin compensación	Impedancia con Compensación	Cociente
1	5.43	5,60	1,03
2	16.03	18,98	1,18
5	21.63	28,88	1,34
7	34.29	27.65	0.81
11	20.54	17.93	0,87

17	31.64	12.62	0,40
19	40.21	10.43	0,26

4.2 Distorsión en la barra de 132 kV

Se realiza el flujo de armónicas inyectando las corrientes armónicas obtenidas en las mediciones en la barra de 132 kV donde se conectan los bancos de capacitores.

En la Fig. 10 se muestra la distorsión de tensión obtenida en la barra de 132 kV.

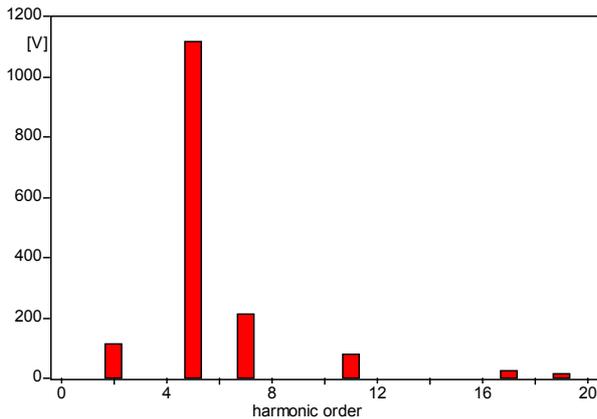


Fig. 10—Contenido armónico de la tensión en 132 kV.

De los resultados de las simulaciones se observa que existe una resonancia entre los bancos de capacitores y la red a una frecuencia entre la 5° y 7° armónica.

Los valores de las armónicas de tensión individuales, junto con la distorsión total de tensión se muestran en la Tabla IV. En esta tabla se representaron los límites máximos permitidos por [1] y [2].

TABLA IV. DISTORSIONES EN 132 KV

	THD	2	5	7	11	17	19
Límites IEEE	2.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Límites ENRE	3	1.5	2	2	1.5	1	1
Simulación	1.51	0.15	1.47	0.28	0.05	0.04	0.02

4.3 Solicitación del banco de capacitores

Del flujo de armónicas del apartado anterior se obtienen la tensión aplicada al banco y la corriente circulando por el mismo.

Además, en el afán de demostrar el estado de sollicitación de las baterías para aquellos casos extremos – no detectados actualmente - en los que las barras pudieran alcanzar su máxima contaminación, se analizan dos casos de distorsión definidos por los límites impuestos por [1] y por [2]. El motivo de este estudio es analizar la peor condición de operación del banco, ya que no es admisible una distorsión de tensión mayor en la barra de 132 kV.

Se calculan los valores eficaces de las tensiones y corrientes con respecto a los valores nominales del banco. Luego se verifican con los valores límites

establecidos por la norma IEC-60871 [3]. En la Tabla VI se presentan los resultados para todas las alternativas.

TABLA VII. VALORES EFICACES TOTALES EN EL BANCO DE COMPENSACIÓN

Caso		Valores Eficaces	(%) de valores Nominales	Norma IEC 60871
Caso actual	U	80029	105	110
	I	462	106	130
Niveles ENRE	U	80058	105	110
	I	466	107	130
Niveles IEEE	U	80047	105	110
	I	463	106	130

De la simulación se observa que la sollicitación del banco de capacitores no alcanza los límites impuestos por [3]. Cabe aclarar que en dicho cálculo del aumento del valor eficaz de la tensión en el banco no sólo se tiene en cuenta el aumento de la tensión debido a las frecuencias armónicas sino también el debido al aumento de la tensión de frecuencia fundamental por la compensación, el cual en este caso es de aproximadamente 5%.

4.4 Distorsión en nodos vecinos

Dado que dentro de un sistema las armónicas pueden manifestarse a distancia (en especial de AT, debido a fenómenos de línea, a que los factores de méritos son altos y por lo tanto son de temer magnificaciones por resonancias no buscadas), es importante analizar el efecto del banco de compensación en nodos vecinos.

Es posible obtener la alteración (en módulo) de la distorsión armónica de cada uno de los nodos del circuito, debida al nuevo banco, haciendo uso del “Teorema de Compensación” cuyo enunciado es el siguiente:

“Si la admitancia Y de cualquier nodo se modifica en un valor ΔY (por ejemplo al incluir el banco de compensación), el incremento de tensión ΔU que se produce en ese nodo es el que produciría una fuente de corriente $I_c = -U_0 \cdot \Delta Y$ ”. Donde U_0 es la tensión del nodo previa a la inserción del banco de compensación.

En la Fig. 11-(a), la tensión U_0 del nodo es la que resulta de la fuente de corriente I y una admitancia de circuito Y . Cuando se introduce una modificación en la admitancia ΔY (en este caso igual a Y_c o admitancia del banco de compensación), la tensión del nodo pasa a ser $U = U_0 + \Delta U$, es decir el cambio de tensión es de ΔU , como se muestra en la Fig. 11-(b).

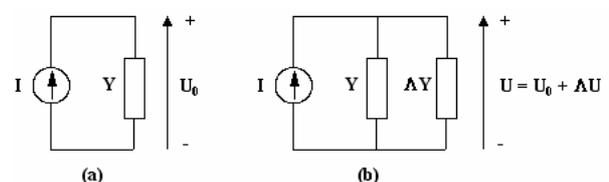


Fig. 11–Variación de la tensión del nodo al incluir la admitancia ΔY .

$$I = (U_0 + \Delta U)(Y + \Delta Y) = I + U_0 \cdot \Delta Y + \Delta U(Y + \Delta Y) \quad [1]$$

Despejando entonces para ΔU resulta:

$$\Delta U = \frac{-U_0 \cdot \Delta Y}{(Y + \Delta Y)} \quad [2]$$

La ecuación [2] significa que el valor del cambio de tensión ΔU , puede obtenerse con el circuito original, con la nueva admitancia incluida en el nodo y eliminando la fuente de corriente original y colocando una nueva fuente de corriente de valor $I_c = -U_0 \cdot \Delta Y$. Puede comprobarse que es muy simple la extensión de este razonamiento a redes con múltiples nodos.

Es importante tener en cuenta que este método permite obtener el módulo del cambio de tensión en los diversos nodos de la red.

Los resultados obtenidos de la aplicación de este procedimiento de cálculo de la distorsión en nodos vecinos de la red se detallan en la tabla VIII. En esta tabla se muestra la variación de la distorsión de 5° armónica en los diversos nodos de la red, en por ciento respecto de la tensión nominal del sistema.

TABLA VIII. DISTORSIONES EN NODOS DE LA RED

N° de nodo	Nivel de tensión [kV]	ΔU_5 [%]
1	500	0.12
2	500	0.13
3	132	0.4
4	132	0.4
5	132	0.4
6	132	0.4
7	132	0.4
8	132	1.57
9	132	2.23

De la Tabla VIII se observa que las variaciones de tensión de 5° armónica en los nodos vecinos de la red son bajas a excepción de los nodos 8 y 9 en los cuales la contribución a la distorsión de tensión propia del nodo podría ser de importancia.

La contribución de este efecto marginal sobre la distorsión real del nodo en cuestión puede estimarse mediante expresiones conocidas, con respaldo experimental, de adición entre fuentes de armónicas. Según el orden armónico la adición puede ser desde aritmética hasta cuadrática.

Este estudio es de suma importancia en sistemas eléctricos en los que las responsabilidades están repartidas entre agentes. Por ejemplo, se establece que es responsabilidad del proveedor del banco no alterar indebidamente la situación armónica de la red. El primer paso de este procedimiento permite asegurar que el proyecto cumpla con las reglas en el nodo de

instalación del banco, mientras que el segundo paso permite tener indicios fundados del eventual efecto nocivo a distancia de esa instalación.

4.5 Resultados del caso

Para este ejemplo de aplicación del método se encuentra que:

- Los niveles de armónicas en las barras de 132 kV de la ET no se alterarán sustancialmente por la inclusión de los bancos de proyecto (2 x 50 MVar). Con base a las mediciones previas en el nodo y los resultados de este estudio se prevé que los límites de la Norma IEEE Std. 519-1992 y de la Resolución ENRE 184/00 se cumplirán.
- Los bancos a instalar, según sus diseños de proyecto, no sufrirán sobrecargas por armónicas, ni aún para un incremento al límite de norma de las condiciones de armónicas de tensión en la barra.
- La inclusión del banco de capacitores en las barras de 132 kV de la ET altera la situación de contaminación armónica preexistente en los nodos vecinos. Sin embargo, el estudio ha determinado que el presunto incremento es leve, excepto en dos de ellos.

5 CONCLUSIONES

Por lo expuesto, este método mixto de medición y estudio en modelos, se considera óptimo para evaluar armónicas ante modificaciones significativas en grandes sistemas de interconexión de EAT compartido por Agentes que, con diversos roles, deben contribuir al recurso de red común. El método permite:

- Asegurar el resultado en el nodo a alterar, es decir, que se cumplan las normas de contaminación y que la nueva instalación se proyecte y dimensione adecuadamente a la sollicitación del fenómeno.
- Inferir el efecto incremental sobre nodos lejanos (lo único que hace falta conocer para evaluar la responsabilidad atribuible a la nueva obra).

El procedimiento no requiere conocer el “plantel” de generadores armónicos de todos los nodos de la red en cuestión, como es necesario en los estudios de armónicas clásicos. Este requisito es sustituido por la información obtenida de una única medición en el nodo de interés, la que es insoslayable.

Los resultados de los efectos de transferencia sobre nodos lejanos le permite al Operador decidir sobre aquellos nodos que debería verificar mediante mediciones.

6 REFERENCIAS

- [1] “Resolución ENRE 184/00: “Base Metodológica para el Control de la Calidad del Producto Técnico. Etapa 2”
- [2] IEEE Std. 519-1992, Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
- [3] IEC 60871 Shunt capacitors for a.c. power systems having a rated voltage above 1000 V.