Más allá del estándar: el desafío de la compensación de reactivo con alto contenido de distorsión armónica

Claves técnicas, criterios de ubicación y pasos de diseño para mitigar armónicas, eliminar riesgos de resonancia y optimizar la eficiencia energética en baja y media tensión.

Ing. Daniel Gómez
Leyden
leyden.com.ar



Compensación de reactivo en baja y media tensión con alto contenido de distorsión armónica
Vea el video aquí

La compensación del factor de potencia y el filtrado de armónicas son fundamentales para lograr eficiencia energética en sistemas eléctricos de baja, media y alta tensión.

¿Por qué se compensa reactiva y se filtran armónicas? Principalmente, para reducir pérdidas provocadas por la circulación de corriente reactiva de la carga y para reducir la caída de tensión. Se suman otras consecuencias favorables como el control de la cantidad de energía consumida por los usuarios, la eliminación de multas gracias al mejoramiento del factor de potencia, y la reducción de uno de los gases de efecto invernadero.

La normativa vigente para media y alta tensión es IEC 60871, ANSI IEEE C37-99, ANSI IEEE 1036, IEEE Std 18 y NEMA CP1; para baja tensión, IEC 60831. Vale mencionar también NBR 5282 e IRAM 2236.

Compensación de reactiva y filtrado de armónicas

Las pérdidas eléctricas en una línea se generan por las componentes activa y reactiva de la corriente de la carga.

Las pérdidas causadas por la componente activa no se pueden reducir. Las pérdidas provocadas por la componente reactiva sí: mediante la incorporación de bancos de capacitores y/o filtros de armónicas según corresponda en cada caso.

URL estable: https://www.editores.com.ar/node/8649

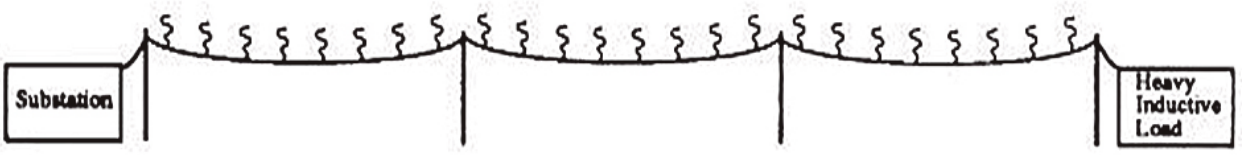


Figura 1. Conexión entre una subestación y un alimentador. Las pérdidas están representadas por los 'rulitos' de la línea

Las pérdidas causadas por la componente activa no se pueden reducir. Las pérdidas provocadas por la componente reactiva sí

Las pérdidas eléctricas y por lo tanto el calentamiento en una línea y la emisión de dióxido de carbono son proporcionales al cuadrado de la corriente total que la atraviesa (ver figura 1).

Una de las primeras indagaciones para resolver el problema de la línea es el lugar de instalación de un banco de capacitores. El objetivo inicial es situarlo lo más cerca posible de las cargas, de ese modo se logra una importante reducción de la corriente que circula por la línea. Si se sitúa en un punto intermedio, solamente disminuyen las pérdidas entre el banco y la subestación. Si se sitúa en las subestaciones, no recupera ninguna pérdida en las líneas y solamente es útil para reducir el nivel de pérdidas en los transformadores de rebaje.

Una de las primeras indagaciones para resolver el problema de la línea es el lugar de instalación de un banco de capacitores

Asimismo, la ubicación depende del interés por mejorar las caídas de tensión. Con un banco de capacitores ubicado en alguna punta de la línea, se puede mejorar el perfil de tensiones.

Entonces, la ubicación depende del objetivo que se pretende: mejorar pérdidas o caída de tensión propiamente dicho (ver figura 2).

Yendo al banco de capacitores en sí mismo, es menester hacer otro tipo de análisis para determinar cuál es la opción adecuada: estándar, con filtro de armónicas, filtro desintonizado, un filtro amortiguado, un filtro tipo 'C'. De lo contrario, se corre riesgo de amplificar el problema inicial.

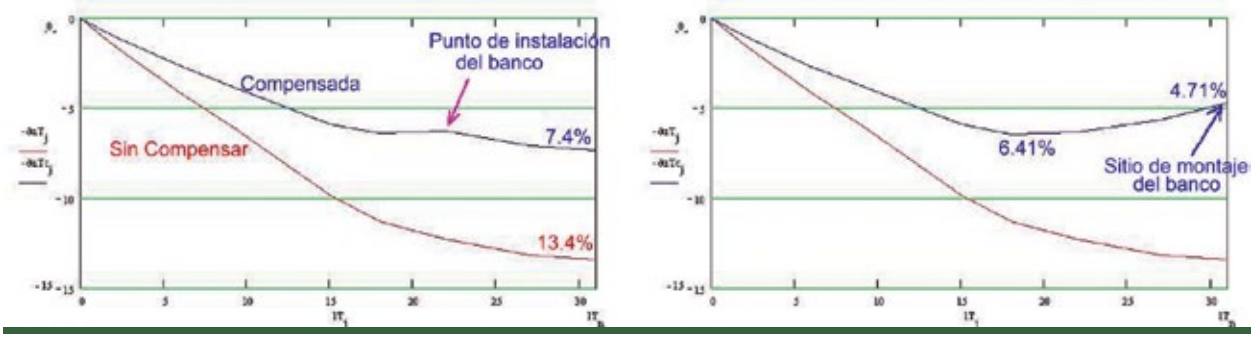


Figura 2. Caso real sin compensación y con compensación de reactiva en alimentadores de media tensión

Se corre riesgo de amplificar el problema inicial

Se deben tener en cuenta, en primer lugar, los tipos de cargas vinculadas a esa línea. En los sistemas de energía eléctrica actuales, caracterizados por el desarrollo y aplicación de la electrónica de potencia, se debe analizar cómo compensar la energía reactiva consumida por los usuarios: cargas lineales (una resistencia, una inductancia, un capacitor), cargas no lineales (una fuente switching, soldaduras de arco, rectificadores, grúas pórtico, acerías), y determinar el grado de distorsión armónica.

Cuando lo estándar no sirve

En la figura 3 se ve una onda senoidal y una carga distorsiva que, dependiendo de la carga, puede ser quinta o séptima si hay un rectificador de seis pulsos, o décimo primera y décimo tercera. Esas corrientes armónicas circulan por la red, pasan por las impedancias y generan caídas de tensiones armónicas que deforman la onda senoidal y la transforman en una onda con cierto porcentaje de distorsión armónica. Entonces, se debe calcular THD desde tensión o de corriente y en consideración de los límites fijados por la normativa.

Si se coloca un banco de capacitores estándar, podría ocurrir que si en esa red había componentes armónicas, empieza a sintonizarse en distintas frecuencias (ver figura 4) y el banco no funcionará correctamente.

Es importante entender que existen aplicaciones en donde instalar un banco de capacitores estándar puede amplificar el problema que se pretendía resolver (ver figura 5).

Existen aplicaciones en donde instalar un banco de capacitores estándar puede amplificar el problema que se pretendía resolver

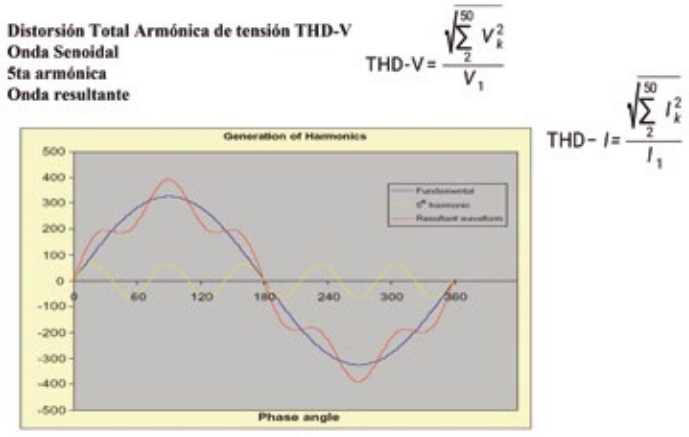


Figura 3. Distorsión total armónica de tensión (THDv)

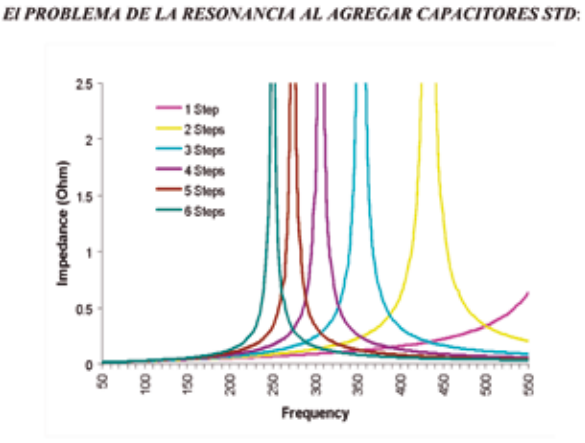


Figura 4

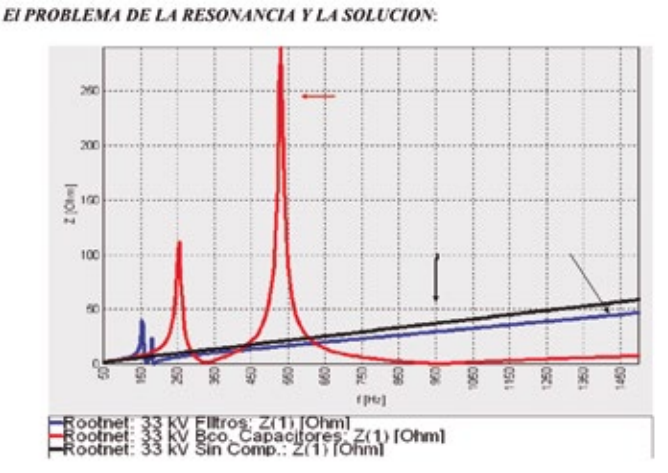


Figura 5. El problema de la resonancia y la solución

La elección de banco correcta requiere cálculos (ver figura 6). Y en este caso, con el agregado de reactores desintonizados del 7%, se elimina la posibilidad de amplificación de armónicas por resonancia (ver figura 7). Lo que antes llevaba a una condición de resonancia, ahora se aleja del punto de desintonía.

La normativa internacional establece ciertos niveles de distorsión admisibles para el punto de acoplamiento común. Y en el caso de corriente, la IEEE también aporta indicaciones: por ejemplo, si la relación de corriente de cortocircuito está por debajo de veinte, permite una distorsión del 5%; si la red es más dura, permite una distorsión mayor.

Cuando existe un porcentaje importante de cargas no lineales y la distorsión armónica es importante, se utilizan filtros de armónicas pasivos: desintonizados, sintonizados o amortiguados.

Se utilizan filtros de armónicas pasivos: desintonizados, sintonizados o amortiguados.

El PROBLEMA DE LA RESONANCIA:

FRECUENCIA DE RESONANCIA

Se define frecuencia de resonancia (Wo ó fo)del circuito R-L-C serie, al valor de frecuencia en la cual se cumple que:

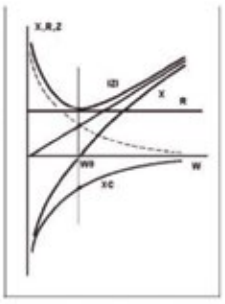
$$XL = XC$$

A la frecuencia de resonancia fo la corriente toma su valor máximo, la ZT su valor mínimo (ZT=R) y el defasaje entre V e I es cero (Q = 0°).

Calculando:

$XL = XC$ $\quad \frac{1}{Wo\,C} = 1 \cdot \frac{1}{Wo\,L}$ $\quad Wo^2 = 1 \cdot \frac{1}{LC}$

$Wo := \sqrt{\frac{1}{LC}}$ $\quad Wo := \frac{1}{\sqrt{LC}}$ $\quad fo := \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$



FRECUENCIA DE RESONANCIA:

La factor de desintonía p(%) refleja la relación entre la reactancia del reactor y la reactancia del capacitor a la frecuencia fundamental. La frecuencia de resonancia de un circuito filtro resonante serie se indica indirectamente por p.

$$p = 100 \cdot \frac{X_L}{X_C} = 100 \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot L \cdot C$$

Ejemplo:

p= 7% $\quad f_R$=189 Hz

p= 5.67% $\quad f_R$=210 Hz

Con el agregado de reactores desintonizados del 7%, eliminamos la posibilidad de amplificación de armónicas por resonancia

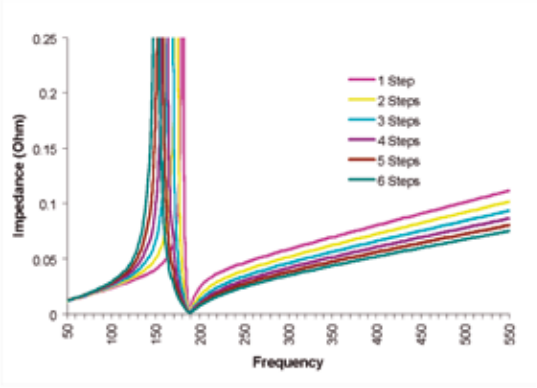


Figura 7

FRECUENCIA DE RESONANCIA:

$$f_s = f_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{p}}$$

Ejemplo:

p = 7% $\quad f_1$ = 50 Hz

$$f_s = 50 \cdot \frac{1}{\sqrt{0.07}} = 189\ \text{Hz}$$

$$f_s = 50 \cdot \sqrt{\frac{S_T \cdot 100}{Q_C \cdot u_c}} \qquad f_s = 50 \cdot \sqrt{\frac{630.100}{250.5}} = 355\ \text{Hz}$$

Figura 6. Detalle de los cálculos

Tensión de la barra en el PCC	Distorsión en cada armónica	THD
< 69 kV	3%	5%
69-161 kV	1,5%	2,5%
> 161 kV	1%	1,5%

Tabla 1. Límites establecidos por la IEEE 519. Distorsiones en tensión

	Armónicas impares en porcentaje en función del orden armónico					
	v<11	11=v<17	17=v<23	23=v<35	v>=35	THD $I_{máx.}$
$I_{CC}/I_{IL} < 20$	4%	2%	1,5%	0,6%	0,3%	5%
$20 < I_{CC}/I_{IL} < 50$	7%	3,5%	2,5%	1%	0,5%	8%
$50 < I_{CC}/I_{IL} < 100$	10%	4,5%	4%	1,5%	0,7%	12%
$100 < I_{CC}/I_{IL} < 1.000$	12%	5,5%	5%	2%	1%	15%
$I_{CC}/I_{IL} > 1.000$	15%	7%	6%	2,5%	1,4%	20%

Tabla 2. Límites establecidos por la IEEE 519. Distorsiones en tensión

Las armónicas pares deben limitarse al 25% del valor de las impares dados arriba.
I_{CC} es la corriente de cortocircuito máxima para el PCC.
I_{IL} es la máxima corriente de carga fundamental en el PCC.
THD $I_{máx.}$ es la distorsión armónica total de la corriente de carga máxima.



Figura 8. Caso de aplicación de filtros de armónicas desintonizados: ET Distrocuyo

- Potencia total: 15 MkVAr - (6+9) MVAr
- Tensión: tres de 13,2 kV, 50Hz
- Maniobra mediante llaves de vacío
- Capacitores con fusibles internos
- Frecuencia de desintonía: fija de 189 Hz

Pasos a seguir en el diseño de una instalación para filtrado de armónicas

» Recolectar información sobre la instalación, el tipo de cargas (si es un rectificador controlado, el número de pulsos, ángulos de conducción máximos y mínimos), la topología del circuito con todos los datos de la red: transformadores, cables, niveles de tensión, etc.

» De acuerdo a la información de los fabricantes de los equipos generadores de corrientes armónicas, determinar en forma aproximada el nivel de cada armónica, eliminando aquellos que por las características del circuito no aparecen.

» Medir y analizar las características de la red y la carga, flujos de carga, formas de onda de tensión y corrientes en cada punto, por un período de siete días de modo de poder evaluar los casos más desfavorables. En muchos casos es sumamente importante la evaluación en situaciones de baja carga por ser estos los lapsos en los cuales la red se torna

más reactiva y con mayor posibilidad de efectos resonantes.

- Elaboración de un modelo con distintas alternativas de solución, no solo en lo que se refiere a la protección de los capacitores contra efectos resonantes, sino también a la eliminación de armónicas en la corriente tomada desde la red que en algunos casos puede estar sujeta a penalización. Validar el modelo con las mediciones.
- Habiendo hecho un exhaustivo análisis técnico-económico, proponer la solución más conveniente.
- Luego de la instalación y puesta en servicio, realizar las mediciones correspondientes para verificar que se cumplió lo previsto.

Nota del editor

El presente artículo fue elaborado por Alejandra Bocchio, de la redacción de Editores SRL, en base a parte de la presentación oral titulada "Compensación de reactivo en baja y media tensión con alto contenido de distorsión armónica" que el Ing. Daniel Gómez llevó a cabo en el Foro de Ingeniería Eléctrica celebrado en Córdoba los pasados 15 y 16 de octubre de 2024.

Glosario de siglas

- ANSI: *American National Standards Institute*, 'Instituto Nacional Estadounidense de Normas'
- ET: estación transformadora
- FIE: Foro de Ingeniería Eléctrica
- IEC: *International Electrotechnical Commission*, 'Comisión Electrotécnica Internacional'
- IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 'Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos'
- IRAM: Instituto Argentino de Normalización y Certificación
- NBRNBR: *Norma Brasileira*, 'norma brasilera'
- NEMA: *National Electrical Manufacturers Association*, 'Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos', de Estados Unidos
- ST: subestación transformadora
- THD: *Total Harmonic Distortion*, 'distorsión armónica total'
- THDv: *Total Harmonic Voltage Distortion*, 'distorsión armónica total de tensión'