

Armónicas y Resonancia Paralelo

Por Jorge de los Reyes y Armando Llamas, Departamento de Ingeniería Eléctrica ITESM, Campus Monterrey
jdelosre@academ01.mty.itesm.mx, allamas@academ01.mty.itesm.mx

Este texto apareció publicado originalmente en el tomo 1 de las Memorias de la Décima Reunión de Verano de Potencia, celebrada por el Tecnológico de Monterrey. Está disponible en: <http://www.mty.itesm.mx/etie/deptos/ie/profesores/allamas/cursos/ueee/armonicas/08Resonancia.PDF>. Sus autores, amablemente, cedieron sus derechos para su publicación en nuestra revista.

Introducción

En la actualidad el uso de las llamadas cargas no sinusoidales es cada vez más común en la industria, edificios comerciales, casas, etc. La carga no sinusoidal es aquella cuya característica V-I no es una línea recta la cual corresponde a una carga resistiva, o bien, una elipse que corresponde a una carga inductiva-resistiva o capacitiva. Este tipo de cargas son alimentadas con voltajes casi sinusoidal, pero la corriente que extraen es no sinusoidal y de ahí que la característica V-I sea no lineal. Cuando se tienen cargas que consumen potencia reactiva —motores, reactores y transformadores—, el factor de potencia es pobre y se corrige con capacitores. Cuando se tiene una combinación de cargas que toman corriente con distorsión y cargas que consumen reactivos de desplazamiento, la corrección del factor de potencia con bancos de capacitores puede dar lugar a una resonancia paralelo excitada. Esta condición se manifiesta con el disparo de los ITMs —Interruptores Termo Magnéticos— o la apertura de los fusibles que protegen a

los capacitores. Al colocar capacitores, el factor de potencia que se corrige es de desplazamiento, no el de distorsión; pero, en cambio, se logra bajar la frecuencia de resonancia del sistema a niveles donde esta pueda ser excitada por las cargas no lineales que el sistema alimenta. Al situar capacitores para corregir el factor de potencia, en realidad, se construye un circuito que es conocido como circuito tanque, el cual visto desde la carga —la combinación no lineal e inductiva— nos representa la condición de resonancia paralelo. Cuando existe resonancia paralelo se presenta distorsión elevada en los voltajes y sobre corrientes en los capacitores, por eso es que operan las protecciones.

En las secciones siguientes se presenta una explicación simplificada del fenómeno de resonancia paralelo, un caso industrial, un caso en una instalación comercial, la implementación y simulación de un circuito monofásico que exhibe la excitación de la frecuencia de resonancia y las recomendaciones para corregir factor de potencia en presencia de distorsión.

Explicación simplificada

Se dice que un circuito que tenga inductancia y capacitancia está en resonancia cuando el voltaje y la corriente están en fase a una frecuencia dada, es decir, cuando la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva se anulan. Estamos interesados en la condición de resonancia paralelo que provoca que la impedancia que ve una corriente que se inyecta sea muy elevada como lo veremos más adelante. La figura 1 muestra un diagrama unifilar muy simplificado de un sistema de potencia típico que alimenta a una carga que consume corriente no lineal en paralelo con un banco de capacitores para corregir el factor de potencia

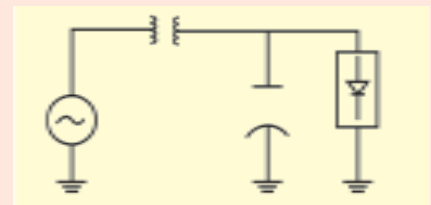


Figura 1 Diagrama unifilar de un sistema de potencia que alimenta a una carga no lineal

En la figura 2 se observa la representación de este sistema de potencia en un circuito eléctrico equivalente. Las cargas no lineales se pueden representar como fuentes de corriente en paralelo, cada una operando a distinta frecuencia. La suma de estas corrientes da como resultado la corriente total que es consumida por la carga no sinusoidal.

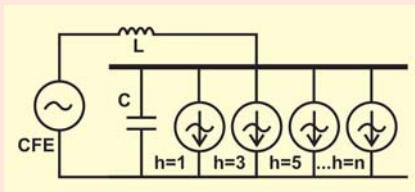


Figura 2 Circuito eléctrico equivalente del sistema de potencia de la figura 1

Dado que este circuito tiene fuentes de corriente que operan a distintas frecuencias, puede aplicarse el teorema de superposición y resolverlo para cada frecuencia. Así, para la frecuencia de 60 Hz, que el circuito contiene una fuente de voltaje, una fuente de corriente, la inductancia y la capacitancia. La figura 3 muestra como quedan interconectados estos elementos a la frecuencia de 60 Hz.

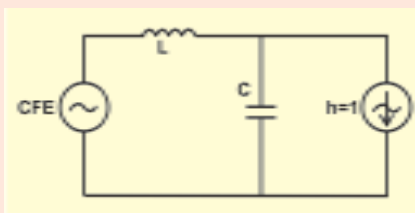


Figura 3 Circuito eléctrico equivalente para una frecuencia de 60 Hz

La figura 4 expone los elementos a frecuencias distintas de 60 Hz. Se tiene ahora a la inductancia, la capacitancia y la fuente de corriente de interés, todos en paralelo. Este circuito presenta una frecuencia de resonancia la cual viene dada por la siguiente expresión:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

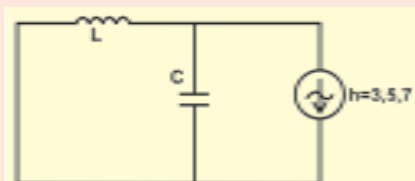


Figura 4 Circuito eléctrico equivalente para frecuencias distintas de fuente de voltaje

Para obtener la corriente del capacitor se aplica la técnica de división de corriente y queda:

$$I_c = I_h \times \frac{\omega L}{\omega L - \frac{1}{\omega C}}$$

A partir de esta ecuación, se podrá observar que conforme se varíe la frecuencia ω , va llegar un momento en que el denominador de dicha ecuación se haga cero o casi cero, lo cual trae como consecuencia un aumento considerable en la corriente que circula por el capacitor. De esta forma, se observa que no se necesita estar exactamente en la frecuencia de resonancia para obtener corrientes elevadas en el capacitor, sino que basta con estar un poco cerca. En un sistema de potencia real, la corriente no se va hacer infinita o excesivamente grande, porque los conductores y las uniones presentan una resistencia inherente la cual limita en cierta medida la corriente. El circuito simplificado indica que si los valores de capacitancia y de inductancia dan lugar a una resonancia que coincida con una de las armónicas presentes en la carga no lineal, el voltaje en el capacitor se haría infinito, obviamente esto no es posible. La carga no está formada por fuentes sino por elementos pasivos. Si la impedancia del sistema de alimentación y el banco de capacitores bloquea la corriente de cierta armónica, entonces el valor de la fuente de corriente que representa a dicha armónica se haría pequeño.

Ejemplos

Ejemplo industrial

En una industria con problemas con el factor de potencia, se decide instalar bancos de capacitores para mejorarlo. Dicha industria tenía cargas no lineales. Cuando se instalaron los bancos, por recomendaciones del fabricante se colocaron protecciones al 200 % para evitar que estuvieran operando con frecuencia. El

problema no quedó resuelto, el factor de potencia seguía siendo bajo y no se sabía si al colocar más capacitores se produciría resonancia. En una visita que se hizo a la planta, se tomaron varias muestras de las formas de onda de corriente y voltaje en los capacitores con y sin la carga. Cuando no había carga, el voltaje de línea a tierra era de 270 V rms y la corriente demandada por los capacitores era de 30 A rms. La figura 5 muestra las formas de onda de corriente y voltaje del banco de capacitores. Obsérvese que la corriente presenta algo de distorsión lo cual es típico en instalaciones industriales y comerciales debido a que los capacitores presentan una impedancia baja a las corrientes de alta frecuencia que se encuentran en la red.

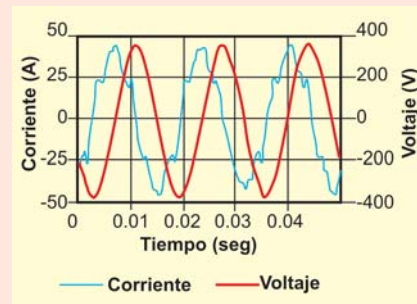


Figura 5 Voltaje y corriente en el banco de capacitores de la planta industrial cuando las cargas no lineales están afuera

En la figura 6 se muestran las formas de onda de corriente y voltaje en el capacitor una vez que la carga no lineal demanda corriente no sinusoidal. Bajo estas condiciones, el valor efectivo de la corriente aumentó de 30 a 34.5 A rms, y el valor del voltaje cayó de 270 V rms a 242 V rms. El aumento de corriente indica que se está en presencia de una condición de resonancia. Al obtener el espectro de armónicas de esta corriente, había resonancia alrededor de la armónica 16. Este mismo resultado fue el que se obtuvo al hacer un análisis en la frecuencia del circuito eléctrico equivalente que representaba a la planta industrial. Dado que la corriente que demandaba la carga no lineal tenía

bastante contenido de armónicas, era obvio que se estaba excitando la frecuencia de resonancia del sistema. Se observa como al entrar en resonancia, el voltaje del capacitor deja de ser sinusoidal y toma la forma como de una onda triangular. La corriente tiene un alto contenido de armónica 16, esta corriente en los capacitores no es común y acorta la vida útil de los mismos.

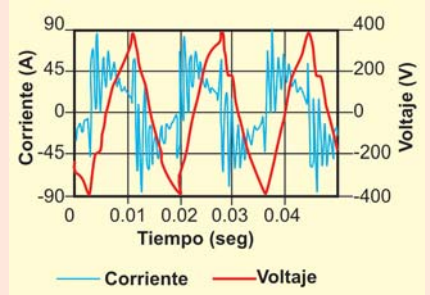


Figura 6 Voltaje y corriente en el banco de capacitores de la planta industrial cuando las cargas no lineales están dentro

Ejemplo comercial

La figura 7, por ejemplo, muestra el voltaje y la corriente en un filtro de quinta armónica sintonizado apropiadamente, por ejemplo, a la 4.6.

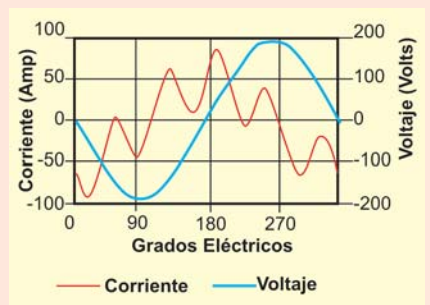


Figura 7 Voltaje y corriente en filtro bien sintonizado

En la figura 8 se observa el voltaje y la corriente de un filtro de armónicas sintonizado por arriba de la quinta,

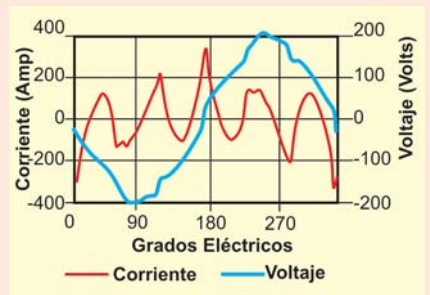


Figura 8 Voltaje y corriente en filtro mal sintonizado

5.5. La corriente aumentó de 50 a 130 A, y el voltaje presenta un alto contenido de quinta armónica. Sin embargo, en esta figura puede apreciarse que no hay sobrevoltaje porque el pico se mantiene en los 200 volts y el valor rms medido no cambió significativamente.

Implementación monofásica

La figura 9 muestra el circuito usado para observar el fenómeno de resonancia. Este es un circuito RLC que alimenta a una carga no lineal conectada en paralelo con el capacitor. La carga no lineal consiste en un puente de rectificación con un capacitor conectado entre las terminales de CD del puente para lograr mantener un voltaje rectificado casi constante el cual alimenta a un foco de 200 W. Esta carga si es conectada a la línea directamente, consume corriente en la forma como lo hacen las computadoras, televisores y videograbadoras.

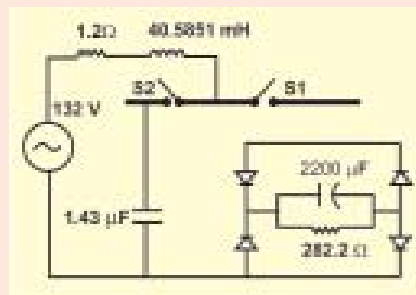


Figura 9 Circuito usado para analizar el fenómeno de resonancia en la armónica no. 11

Para determinar a qué frecuencia de resonancia se sintonizaría el circuito, se empleó el producto Pspice y se hicieron varias simulaciones con distintos valores de inductores y capacitores sintonizados a la 3^{ra}, 5^{ta}, 7^{ma}, 9^{na}, y 11^{na}. De todas estas se escogió la 11^{na} armónica porque fue la primera en el espectro que elevó a más del doble el valor efectivo de la corriente en el capacitor respecto a la condición sin carga. En armónicas más bajas, el mismo sistema es capaz de amortiguar la amplificación de las corrientes por lo que a primera vista parece que el fenómeno de resonancia no se

presenta. Para tener un punto de referencia y ver cuánto se eleva la corriente en el circuito implementado respecto a ese punto, se calcula primero cuanto vale la corriente en estado estable cuando S1 está abierto y S2 cerrado. La fuente de voltaje es de 132 V rms, 60 Hz, la cual se asume que es ideal, es decir, sin distorsión armónica. Bajo estas condiciones, los valores de las reactancias inductiva y capacitiva son:

$$X_L = 120\pi \times 40.585 \times 10^{-3} = 15.3\Omega$$

$$X_C = \frac{1}{120\pi \times 1.43 \times 10^{-6}} = 1854.95\Omega$$

y la corriente que circula es:

$$I = \frac{132}{12 + j(15.3 - 1854.95)} = 71.7 \text{ mA}$$

En pruebas hechas en laboratorio, la corriente medida fue de 76 mA. Esta pequeña diferencia se debe principalmente a que la fuente de voltaje en el laboratorio no es ideal, debido a que presenta algo de distorsión armónica. La figura 10 muestra el voltaje y la corriente medidos en el capacitor y en los cuales se aprecia la distorsión, sobre todo en la corriente.

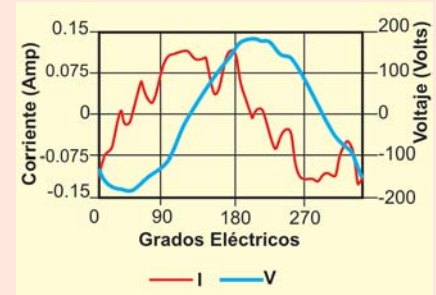


Figura 10 Voltaje y corriente en el Circuito RLC con S1 abierto y S2 cerrado

El segundo caso que se analiza es cuando se tiene S2 abierto y S1 cerrado con el objeto de ver cuál es la corriente que consume la carga no lineal. Para obtener este valor se procedió a hacer una simulación y, de esta manera, determinar el valor efectivo de la corriente. En la simulación la corriente que es demandada por la carga es de 830 mA rms y en pruebas hechas en laboratorio,

resultó ser de 847 mA rms. En las figura 11 y 12 se recogen las formas de onda de corriente y voltaje medidas y simuladas.

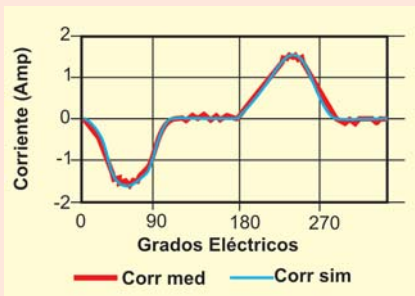


Figura 11 Corriente en el Circuito RLC con S1 cerrado y S2 abierto

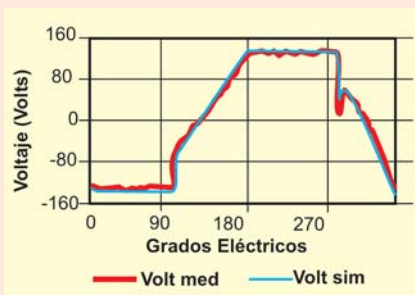


Figura 12 Voltaje en la carga no lineal con S1 cerrado y S2 abierto

Una vez conocidas las dos condiciones de operación por separado del circuito, debe observarse cómo se comporta cuando S1 y S2 están cerrados. Para este caso, la corriente del capacitor aumentó de 76 mA rms a 196 mA rms, que equivale a poco más de 2,5 veces.

La figura 13 representa la forma de onda de la corriente medida y simulada del capacitor. Obsérvese que ya la corriente no es sinusoidal y presenta bastante distorsión. De igual forma, el voltaje del capacitor, que es el que se aplica a la carga, presentó un incremento en la distorsión por el hecho de tener resonancia.

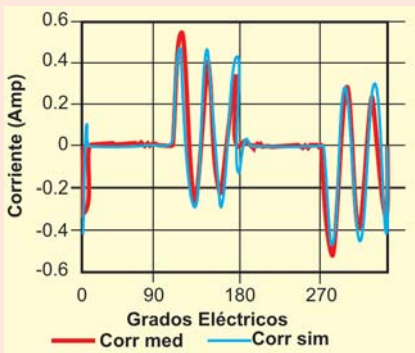


Figura 13 Corriente en el capacitor medida y simulada del Circuito RLC con carga

La figura 14 indica el voltaje medido y simulado del capacitor. En esta prueba se pudo comprobar que el voltaje del capacitor no presentó un aumento considerable porque su valor con y sin carga se mantuvo alrededor de los 131 V rms.

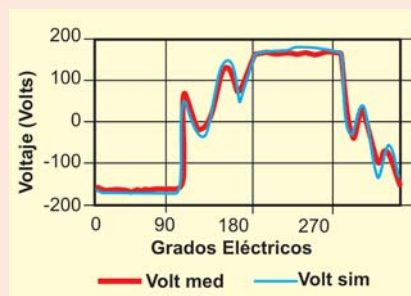


Figura 14 Voltaje en el capacitor medido y simulado del Circuito RLC con carga

Para comprobar que realmente se tiene resonancia en la armónica 11, se obtuvo el espectro de Fourier de las formas de onda de las figuras 13 y 14 el cual se expresa en la figura 15. En esta figura puede verse que efectivamente la armónica que está en mayor porcentaje presente es la once.

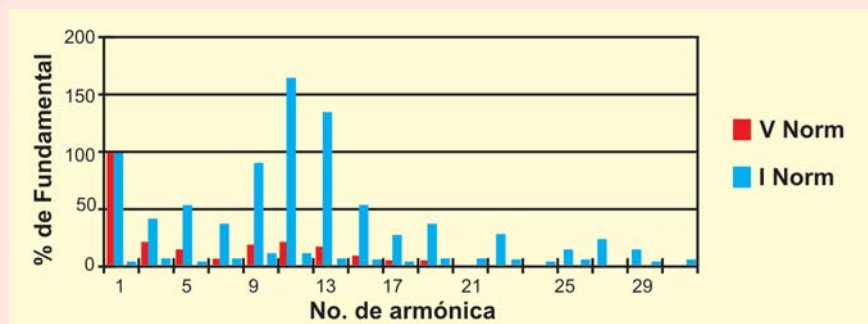



Figura 15 Espectro normalizado del voltaje y la corriente del capacitor

Sin embargo, se observa que también hay armónicas de otras frecuencias como la 3^{ra}, 5^{ta}, etc., y la razón de su presencia es que como son demandadas por la carga, encuentran un camino de más baja impedancia a través del capacitor que del inductor conforme la frecuencia aumenta.

Conclusiones

Cuando en una instalación eléctrica se tiene un bajo factor de potencia en presencia de cargas no lineales, resulta siempre muy arriesgado tratar de corregirlo sin antes hacer un análisis del sistema de potencia en cuestión. Cuando se hizo la implementación monofásica, la resonancia se obtuvo ajustando el valor de inductancia. En un sistema de potencia real el valor de la inductancia no se puede modificar, es fijo, pero en cambio el que sí puede cambiarse es de la capacitancia al ir agregando kVAR's al sistema, y el resultado final es el mismo. Como la frecuencia de resonancia es inversamente proporcional a la capacitancia, añadir kVAR's significa bajar esta frecuencia a niveles donde esta puede ser excitada por las cargas no lineales que existan en el sistema, si es que existen. Si nuestro sistema tuviera cargas lineales, no habría tanto problema, pero hoy son cada vez más numerosas las cargas no lineales en instalaciones eléctricas por lo que resulta factible excitar la frecuencia de resonancia del sistema al agregar capacitores. Ante este tipo de situación lo más recomendable es hacer un estudio del sistema, ya sea mediante simulaciones, o bien, mediciones en el campo. 

Referencias bibliográficas

- [1] IEEE Std 141-1993. "IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants, Red Book", págs. 456-458.
- [2] IEEE Std 399-1990, "IEEE Recommended Practice for Industrial and Comercial Power Systems Analysis, Brown Book, págs. 243-244.
- [3] Hayt, William H. and Kemmerly, Jack E. *Análisis de Circuitos en Ingeniería*. 4ta. Edición. México: Mc Graw Hill, 1987, págs. 407-409.