



## Mitigación dinámica de armónicas y corrección del factor de potencia

Ing. César Chávez  
*Departamento de Ingeniería de Arteche  
Naucalpan, Edo. de México, México*

John A. Houdek, Miembro de IEEE  
*Presidente de Allied Industrial Marketing  
Milwaukee, WI, EE. UU.*

Resumen: Las cargas dinámicas son comunes en varias aplicaciones industriales como motores, soldadoras, elevadores, trituradoras de roca, trituradoras de automóviles, etc. La mayoría de los motores para estas aplicaciones utilizan rectificadores de CA/CC o UVV para lograr la eficiencia deseada o el control preciso de la velocidad del motor. **El uso de estos elementos produce distorsión de las armónicas en las formas de onda de la corriente y del voltaje, así como FP de retraso. Debido a la condición dinámica (variación rápida) de las cargas, la demanda de kVA crea la necesidad de una gran capacidad del sistema (incluida la generación) y una respuesta rápida, aunque la capacidad completa de kVA sólo se utiliza para satisfacer las demandas de potencia reactiva máxima. Este artículo analiza y demuestra un estudio de caso para el sistema eléctrico de una plataforma petrolera de bombeo marítima, que involucra mitigación de armónicas, corrección del PF y reducción de muestas con una solución dinámica.**

**Palabras clave:** calidad de la energía, cargas dinámicas, armónicas, distorsión de armónicas, factor de potencia, muesca.

### I. INTRODUCCIÓN

Las cargas modernas de electrónica de potencia, como las que se encuentran en las grandes fábricas, no suelen llevarse bien con la calidad de la energía. Esas cargas tienen varias características operativas que, si no se abordan adecuadamente, pueden

disminuir la productividad. Los contratistas eléctricos y los administradores de instalaciones que trabajan en estos entornos deben estar conscientes de estos posibles problemas y cómo identificarlos en el proceso de fabricación.

### II. FACTOR DE POTENCIA Y ARMÓNICAS

Para muchas aplicaciones, el triángulo de factor de potencia clásico es simplificado, ya que no considera los efectos de los voltajes ni las corrientes armónicas que se encuentran en los sistemas actuales de distribución de energía. Las armónicas añaden una tercera dimensión al triángulo clásico del factor de potencia, aumentando así la potencia aparente necesaria para realizar una determinada cantidad de trabajo. La presencia de armónicas requiere que cambie la forma de pensar -y la forma en que mide- el factor de potencia.

Puesto que la potencia aparente para un motor es mayor que la potencia activa, el FP es menor que la unidad. El FP para un sistema que sólo alimenta cargas lineales se denomina factor de potencia de desplazamiento. A menos que las cargas sean de resistencia pura, este FP será menor que la unidad.

Hoy en día, sin embargo, muchos sistemas eléctricos también tienen corrientes armónicas en sus líneas. Las armónicas son causadas por cargas no lineales o pulsadas y su corriente puede hacer que la potencia aparente exceda la potencia activa en una cantidad sustancial.

La potencia aparente para una carga no lineal se puede calcular con la ecuación:

*El Ing. Chávez está con Inelap, Arteche Group, Naucalpan, Edo. de México, 53370, México (correo electrónico: cchavez@arteche.com.mx)*

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + H^2} \quad (1)$$

Where H = Distortion Volt Amperes

La presencia de armónicas aumenta la potencia aparente que se debe entregar para hacer una cierta cantidad de trabajo, bajando así el FP. En estas situaciones, la forma del factor de potencia presente se llama factor de potencia de distorsión. En un sistema que consta de cargas lineales y no lineales, el factor de potencia verdadero (FPV) es una suma de los cosenos tanto del ángulo de desplazamiento como del ángulo de distorsión. Si se introducen corrientes armónicas en un sistema, el FP verdadero será siempre menor que el FP de desplazamiento.

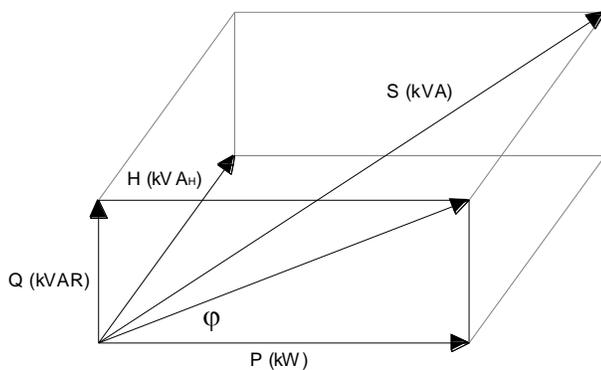


Figura 1. Factor de potencia verdadero = (Factor de potencia de desplazamiento) x (Factor de potencia de distorsión) Relación de factor de potencia para cargas no lineales

### III. ARMÓNICAS

Las cargas no lineales dibujan corrientes no sinusoidales de la fuente de energía. La corriente de la línea CA dibujada es básicamente una onda cuadrada o una onda escalonada dependiendo del diseño del equipo. Estas corrientes armónicas causan caídas de voltaje armónicas en la impedancia de la fuente de alimentación. Esto produce una distorsión del voltaje en la fuente de energía y el flujo de corrientes armónicas en los componentes y cargas del sistema de energía.

Los voltajes y las corrientes armónicas resultantes de cargas lineales han causado problemas en el funcionamiento, fallas en los equipos e incendios. Las armónicas aumentan el calentamiento, disminuyen el factor de potencia, cambian los factores de la cresta, aumentan los puntos de cruce por cero, proporcionan retroalimentación de ruido e influyen en la reactancia inductiva y capacitiva.

### IV. CARGAS DINÁMICAS

Entre los principales problemas relacionados con las cargas dinámicas se encuentra una demanda repentina de corriente interna. Estos tipos de cargas dinámicas dibujan altos niveles de corriente interna durante su ciclo de funcionamiento, que suele durar solo unos cuantos segundos. Estas corrientes de ciclo a ciclo alto pueden hacer que el flujo (corriente de magnetización) del transformador aguas arriba se sature. La saturación por flujo hace que el voltaje secundario del transformador caiga precipitadamente y provoque fallas o un mal rendimiento de la carga, así como la generación de armónicas pares.

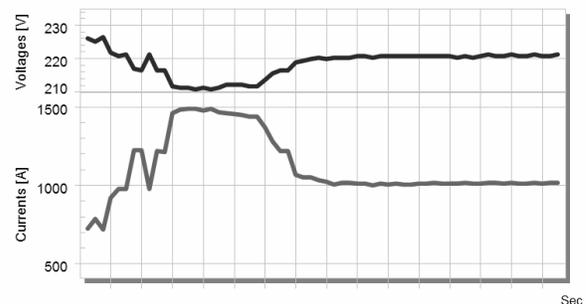


Figura 2. Perfil de corriente y voltaje para una carga dinámica

Además, cuando el voltaje secundario del transformador cae, la fuente identifica esa caída e intenta proporcionar la corriente necesaria para mantener el voltaje del transformador en caída, creando así un componente adicional a la corriente dentro del sistema eléctrico. Este aumento de corriente acentúa la caída de voltaje de la fuente de forma intermitente (debido a la rápida variación de la carga). Si el ciclo de voltaje es repetitivo, puede parecer un parpadeo de iluminación.

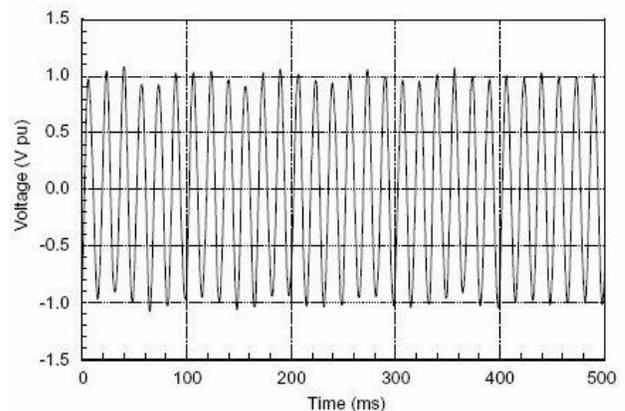


Figura 3. Parpadeo de voltaje

Además, hay operación intermitente para intervalos de tiempo cortos. Cuando se activan por primera vez las cargas dinámicas, por ejemplo motores de variación de par rápido, esta carga requiere una corriente infinita durante algunos ciclos. Durante este período, la fuente que proporciona la energía no puede generar toda la corriente demandada. El resultado es un hueco de voltaje en el motor, y la amplitud de este hueco depende de la corriente de falla disponible y de la impedancia de la red.

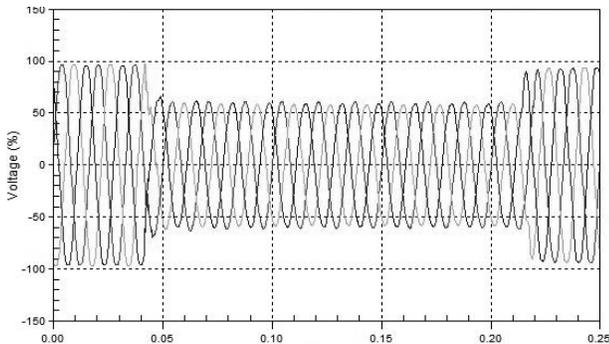


Figura 4. Forma de la onda típica del voltaje

## V. MUESCAS

Cuando se utilizan rectificadores controlados de silicio (RCS) en los controles eléctricos, es posible experimentar la distorsión del voltaje de línea que hace "muecas" en la forma de la onda.

Las muecas de línea son solo eso, una irregularidad en la forma de la onda del voltaje, que aparece en forma de muesca como se ilustra en la Figura 5. Por lo regular están presentes en la forma de la onda durante la conmutación del RCS. La conmutación ocurre cuando un RCS en una fase está encendido para apagar un RCS en otra fase. Durante este muy corto tiempo, se crea un cortocircuito entre las dos fases. Con un cortocircuito, la corriente aumenta y el voltaje disminuye. La perturbación de voltaje resultante se define como una muesca de línea.

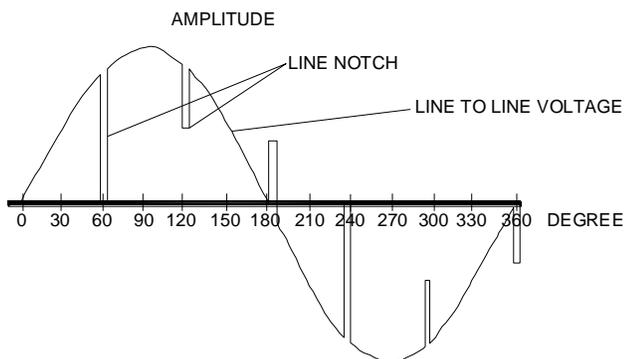


Figura 5. Muesca del voltaje de línea

Cuando hay muecas, particularmente en equipos trifásicos, podemos experimentar cruces por cero adicionales. En lugar de dos cruces por cero en cada ciclo de voltaje, podemos experimentar en realidad cuatro muecas. Estas muecas adicionales le podrían indicar a otros equipos que "se enciendan". Este significa que el equipo puede encenderse en el momento equivocado dando un mal funcionamiento y/o daños.

## VI. CASO DE ESTUDIO: MITIGACIÓN DE ARMÓNICAS Y CORRECCIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA PARA UNA CARGA DINÁMICA

La fuente corriente eléctrica para este ejemplo consiste en tres generadores diésel de 2190 kW, 2738 kVA, 600 voltios, de 3 fases, 60 Hz. que alimentaban el sistema de energía de una plataforma de petróleo marítima ubicada en el Golfo de México. Esta es una configuración típica en todo el mundo.

La carga consta de cuatro RCS de 696 kW que representan el 80% de la carga total del sistema. Estos RCS operan con un factor de potencia de retraso de 0.6, lo crea una demanda excesiva de kVA del sistema de potencia. La demanda típica total del RCS es de 1800 kW con un FP = 0.6, resultando en 3000 kVA; dos generadores diésel de 2738 kVA están en uso (7 días a la semana/24 horas al día); en ocasiones el tercer generador, que se tiene como respaldo, se enciende para satisfacer la demanda reactiva.

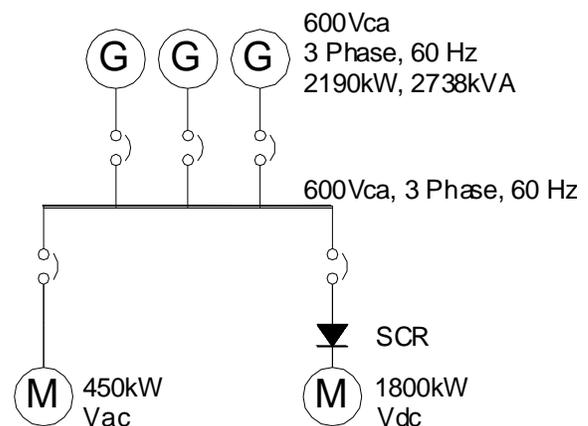


Figura 6. Diagrama simplificado en línea del sistema eléctrico de la plataforma petrolera

La carga de los cuatro RCS está compuesta por motores de perforación de pozos, motores de bombeo de petróleo, motores para grúas; todos

estos motores funcionan con variaciones de par rápidas. La demanda variable es del 40% al 100% en 1 segundo (dependiendo del tipo de proceso de la plataforma). La demanda variable depende del tipo de subsuelo marino.

Con el objetivo de mejorar el factor de potencia y reducir las armónicas, se instaló un compensador Smart VAR (SMARTvar) basado en tiristores trifásicos, de 1800 kVA, 600V, 60Hz, sintonizado en la quinta y séptima armónicas. SMARTvar suministra los VA principales automáticamente cuando son necesarios, insertando y eliminando la reactancia capacitiva del sistema según lo demanden las cargas dinámicas. SMARTvar utiliza dispositivos de conmutación rápida y tecnología de conmutación suave para insertar o eliminar rápidamente la reactancia capacitiva del sistema y hacerlo sin transitorios de conmutación.

El sistema smARTvar consta de secciones de filtro de armónicas pasivas (inductancia [L] y capacitancia [C] conectados en serie) conmutadas por tiristores utilizando técnicas de conmutación de cruce por cero (voltaje). Esto logra la conmutación libre transitoria de los capacitores y el tiempo de respuesta, en promedio, es de 8 milli-segundos.

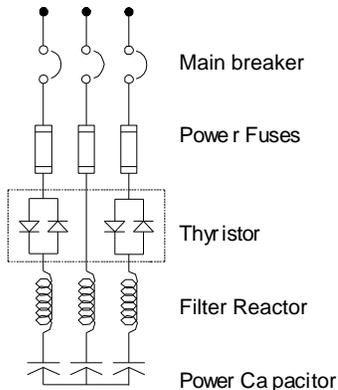


Figure 7. Configuración básica de smARTvar

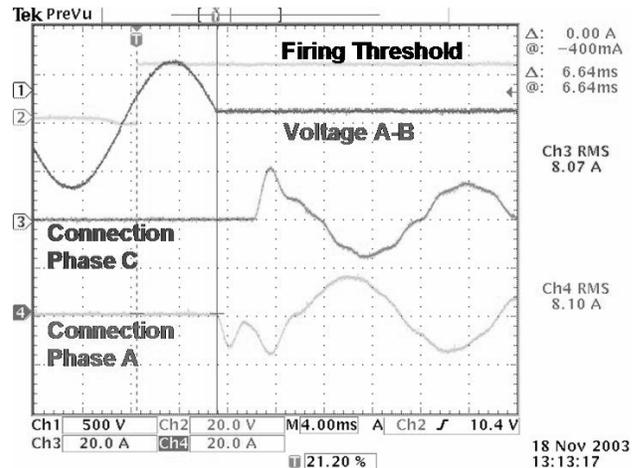


Figura 8. Esquema del funcionamiento del tiristor. Los tiristores toman mediciones de la forma de la onda de voltaje de línea (Voltaje A-B) y cambian las secciones L-C en el cruce por cero de la forma de la onda de voltaje (fase de conexión A y fase de conexión C).

Durante la puesta en marcha del smARTvar, se encontraron muescas severas en la forma de la onda de voltaje y distorsión del voltaje armónico de casi un 15% de DTA-V (distorsión total armónica del voltaje). Las muescas de voltaje causaron múltiples cruces por cero en la forma de la onda de voltaje y fallas en el tiristor del smARTvar. Ocasionalmente se produjo una falla en los tiristores debido a la falsa conexión de cruce por cero. El cliente no estaba al tanto de esta condición del sistema y reportó al fabricante que la instalación cumplía con la norma 519-1992 de IEEE. Respecto a la distorsión de voltaje, la norma permite un máximo de 10% de voltaje por DTA, Tabla 10.2.

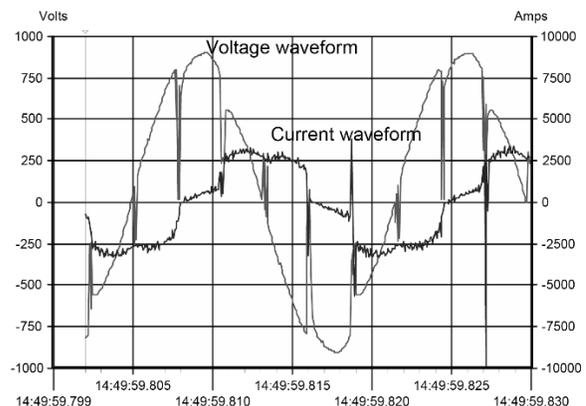


Figura 9. Forma de la onda de voltaje de la plataforma petrolera (con problema severo de muesca) y formas de onda de corriente (antes de la instalación del SmartVAR)

Si la impedancia del sistema de distribución es baja, generalmente el RCS no creará una muesca de voltaje severa que afecte a otros equipos. Sin embargo, en este caso la impedancia del sistema de distribución es alta (línea tenue), por lo que se produjo una muesca de voltaje y con probable impacto en los tiristores SMARTvar.

Los reactores en línea se instalaron para reducir la muesca de voltaje y para permitir el funcionamiento correcto de los tiristores del smARTvar.

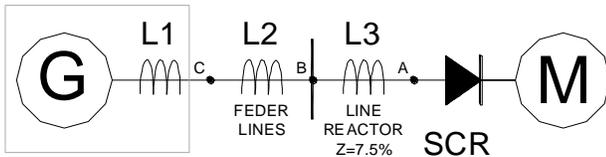


Figura 10. Esquema de los reactores en línea La reducción de la muesca se logró mediante la creación de una red divisora simple de voltaje. La impedancia se agregó, en forma de reactancia inductiva, en serie con el controlador RCS (A), y entre el controlador y el punto de la conexión con SMARTvar (B), así el voltaje de la muesca se distribuyó a través de la nueva impedancia y de la línea pre-existente a la impedancia de la fuente.

La reducción de la muesca puede calcularse como sigue:

$$\text{NotchDepth} = \frac{L1 + L2}{L1 + L2 + L3}$$

Considere que si la nueva impedancia se agrega en algún otro lugar, pero entre el controlador del RCS y el equipo sensible, tendrá un impacto mínimo en el voltaje de la muesca. Colocar la reactancia en el lado opuesto del punto B no ofrece ninguna mejora al problema de muescas.

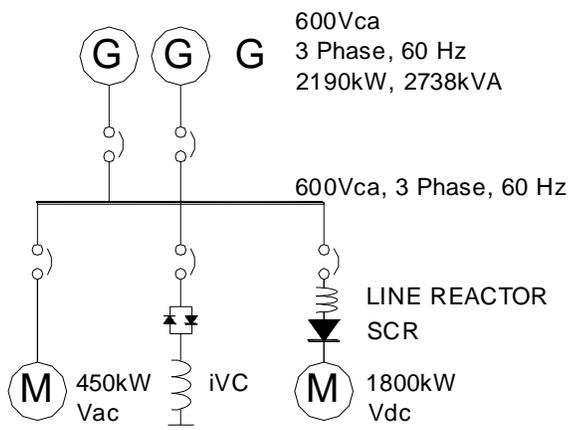


Figura 11. Diagrama simplificado en línea del sistema eléctrico de la plataforma petrolera con reactores en secuencia y compensador de VA dinámico.

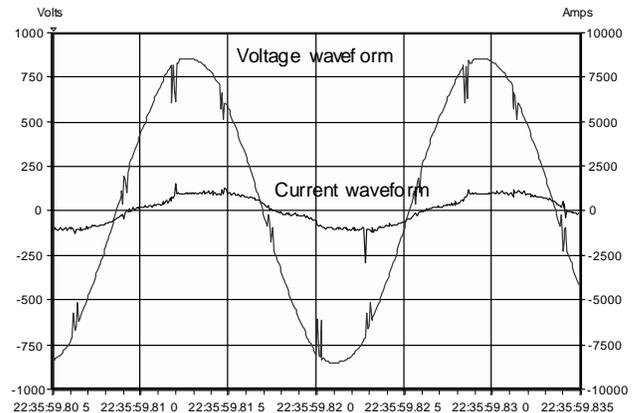


Figura 12. Forma de la onda del voltaje y la corriente (después de alinear los reactores y la instalación del smARTvar)

Resultados logrados con el smARTvar después de la instalación de los reactores en línea:

- La profundidad de la muesca se redujo en un 50%
- La distorsión armónica total de voltaje se redujo a menos del 5%
- La distorsión armónica total de corriente se redujo a menos del 10%
- El factor de potencia verdadero se mejoró a 1.0 en todo momento
- La demanda de kVA se redujo de 3000 a 1800.
- Se creó un mejor ambiente de calidad de energía eléctrica para el resto del equipo.

## VII. CONCLUSIÓN

La demanda de la plataforma marina, la distorsión de la corriente y la distorsión del voltaje se redujeron a niveles aceptables y se mantiene el factor de potencia en la unidad. Esto brindó al cliente la capacidad de dar servicio a todas las cargas a partir de un solo generador.

Todo lo anterior además de los obvios ahorros de energía y el mejor rendimiento de los equipos que operan con un solo generador. Se evitará la emisión de muchas toneladas de CO2 (dióxido de carbono) en el ambiente.

## VIII. AUTORES

**César Chávez** es el gerente del departamento de ingeniería (productos de bajo voltaje) en Arteche, fabricante líder en Norteamérica de sistemas de calidad de energía eléctrica. El Ing. Chávez se graduó como ingeniero eléctrico en el Instituto Politécnico Nacional de México. La carrera del Ing. Chávez involucra las responsabilidades gerenciales en la producción de MCC, ingeniería de campo e ingeniería de diseño. Ha ocupado puestos de responsabilidad en la producción, diseño y puesta en marcha de equipos de calidad de energía eléctrica. El Ing. Chávez tiene amplia experiencia en el diseño, aplicación y puesta en marcha de equipos de compensación reactiva y mitigación armónica. Su experiencia abarca soluciones pasivas y activas.

**John Houdek** (M'1985) se graduó como Licenciado en Tecnología de Ingeniería Eléctrica de la MSOE (Milwaukee School of Engineering), en Milwaukee,

Wisconsin, Estados Unidos en 1981 y un maestría en administración de la Keller Graduate School of Management en Milwaukee, Wisconsin, Estados Unidos en 1989.

Su experiencia incluye más de veinte años de especialización en el diseño y aplicación de equipos de calidad de energía eléctrica como filtros de armónicas y gestión de energía en filtros de conversión de onda senoidal. Como vicepresidente de mercadotecnia y ventas de un fabricante de equipos de calidad de energía eléctrica, Houdek fue responsable de marketing global y soporte técnico de ventas. Houdek es profesor en la MSOE y ofrece seminarios técnicos y capacitación sobre temas de calidad de energía eléctrica y armónicas.