

Mejoramiento de la calidad de energía mediante un dispositivo de energía regulable

Hugo Rodriguez¹, Pablo Sanchez, Fernando Jurado² y David Granados

Departamento de Distribución¹, Departamento de la Maestría en Ingeniería Eléctrica²
Comisión Federal de Electricidad CFE¹, Instituto Tecnológico Superior de Irapuato ITESI².
Irapuato Gto, México
fejurado@itesi.edu.mx

Abstract—Recently, the power quality problems have gained a significant attention due a rampant rise of non-linear loads and renewable energy integration into the power system. Deviation from pure sinusoidal voltage and current signals, and frequency variation have a considerable impact on the system performance and equipment. Among different techniques and power quality improvement strategies, Custom Power Devices (CPDs), using electronic power controllers, are promising in improving the power quality. This research work aims to implement a voltage regulator CPD that resulted in a better power quality obtention. Therefore, they are highly recommended for the intrinsic linkage between power distribution system and loads connected at customer end.

Keyword— *Voltage Sags / Swells.*

Resumen— Recientemente, la problemática de la calidad de energía ha ido en aumento por el desmesurado uso de cargas no lineales y la integración de energía renovable al sistema. La desviación de señales voltaje y corriente sinusoidal puro, así como la variación de frecuencia tienen un impacto considerable en el rendimiento de los equipos. Entre las diferentes técnicas y estrategias del mejoramiento de la calidad de la energía, están los dispositivos de energía personalizados (DPP), que utilizan controladores electrónica de potencia. Esta investigación tiene como objetivo implementar un regulador de voltaje (DPP) resultante en una mejor obtención de calidad de energía. Por lo tanto, son muy recomendables para el enlace intrínseco entre el sistema de distribución de energía y las cargas conectadas al consumidor.

Palabras claves—*Depresiones, elevaciones de voltaje.*

I. INTRODUCCIÓN

El concepto de calidad de la energía se refiere a una amplia variedad de fenómenos y disturbios eléctricos que su caracterizan por la tensión, corriente en un lapso y determinado punto común del sistema de potencia. Estos fenómenos o perturbaciones eléctricas son anomalías en las señales eléctricas que presentan variaciones de magnitud con respecto a su valor nominal durante un intervalo de tiempo. El estándar internacional IEEE 1159, y de la mano del estándar europeo EN 50160, categorizan estos fenómenos de acuerdo con los umbrales de tiempo que presentan. (IEEE, 2009) Tabla 1. La problemática referente a la calidad puede originarse en pérdidas de producción muy costosas cuando se trabaja en procesos críticos; creando un dilema tanto para el consumidor de energía como para la empresa suministradora.

Cuando el problema que causó las pérdidas económicas y de producción se originó dentro de la misma empresa en el lado de la medición, es claro que los esfuerzos para solucionar el problema deben ser también internos, sin embargo, la causa del problema también puede haberse originado del lado de la fuente. La solución óptima entonces, puede ser la aplicación de algún equipo que permita el mejoramiento de la calidad en uno o ambos lados.

Tabla 1. Categorías y características típicas de los fenómenos electromagnéticos en los sistemas de potencia.

Categorías y características de fenómenos electromagnéticos en sistemas de potencia			
Categoría	Contenido Típico Espectral	Duración Típica	Magnitud Típica del Voltaje
1.0 Transitorios			
1.1 Impulsos			
1.1.1 Nanosegundos	5 ns de elevación	<50 ns	
1.1.2 Microsegundos	1 μ s de elevación	50 ns - 1 ms	
1.1.3 Milisegundos	0.1 ms de elevación	> 1 ms	
1.2 Oscilatorios			
1.2.1 Baja Frecuencia	< 5kHz	0.3 - 50 ms	0 - 4 pu
1.2.2 Frecuencia Media	5 - 500 kHz	20 μ s	0 - 8 pu
1.2.3 Alta Frecuencia	0.5 - 5MHz	5 μ s	0 - 4 pu
2.0 Variaciones de Corta duración			
2.1 Instantáneas			
2.1.1 depresión de voltaje		0.5 - 30 ciclos	0.1 -0.9 pu
2.1.2 Elevación de voltaje		0.5 - 30 ciclos	1.1 - 1.8 pu
2.2 Momentáneas			
2.2.1 Interrupción		0.5 ciclos - 3 seg	< 0.1 pu
2.2.2 depresión de voltaje		30 ciclos - 3 seg	0.1 -0.9 pu
2.2.3 Elevación de voltaje		30 ciclos - 3 seg	1.1 - 1.4 pu
2.3 Temporal			
2.3.1 Interrupción		3 seg - 1 min	< 0.1 pu
2.3.2 depresión de voltaje		3 seg - 1 min	0.1 -0.9 pu
2.3.3 Elevación de voltaje		3 seg - 1 min	1.1 - 1.2 pu
3.0 Variaciones de larga duración			
3.1 Interrupción sostenida		> 1 min	0.0 pu
3.2 Bajo voltaje		> 1 min	0.8 -0.9 pu
3.3 Sobrevoltaje		> 1 min	1.1 - 1.2 pu
4.0 Desbalance en voltaje		Estado Estable	0.5 - 2%
5.0 Distorsión de Forma de Onda			
5.1 Componente de directa		Estado Estable	0 - 0.1%
5.2 Contenido armónico	0 -100th H	Estado Estable	0 - 20%
5.3 Interarmónicas	0 - 6 kHz	Estado Estable	0 - 2%
5.4 Muestras en el voltaje		Estado Estable	
5.5 Ruido	Banda amplia	Estado Estable	0 - 1%
6.0 Fluctuaciones de Voltaje	< 25 Hz	Intermitente	0.1 - 7%
7.0 Variaciones en la Frecuencia		<10 seg	

Los equipos para la mitigación de la problemática de la calidad de energía han existido desde hace ya algún tiempo, los cuales consistieron en un primer momento de filtros pasivos compuestos por inductores y capacitores. Estos dispositivos aún siguen vigentes y se utilizan con relativa frecuencia en aplicaciones de distribución y transmisión. Uno de los principales inconvenientes sobre los elementos pasivos es que se vuelven voluminosos en aplicaciones de alto nivel de potencia, así como el hecho de que estas técnicas convencionales no son flexibles y de ninguna manera pueden igualar el rendimiento de los controladores a base de electrónica de potencia.

Los dispositivos personalizados de potencia DPP ha sido conocido por un grupo especializado de ingenieros en sistemas de distribución desde 1988, tres años más tarde, el concepto fue introducido a los expertos de la industria en un taller realizado por el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (EPRI) en San Diego, California (Ghosh, 2012).

Los dispositivos de potencia describen el valor agregado que las empresas eléctricas y los proveedores de servicios ofrecerán en términos de potencia eléctrica a sus clientes en el futuro. El mejoramiento del nivel de fiabilidad de esta potencia, caracterizada por menor variación de su magnitud y reducción de interrupciones se procederá en una solución integrada a los problemas actuales; en los cuales, una característica destacada es la aplicación de controladores electrónicos de potencia a sistemas de distribución de servicios públicos, clientes industriales, comerciales y parques industriales.

Por ello los dispositivos personalizados de potencia son una de las dos respuestas estratégicas y tecnológicas factibles a la problemática de la calidad de la energía que actualmente surgen en las industrias, oficinas de alto impacto. La otra respuesta es el desarrollo de equipos individuales de uso final que funcionan con baja potencia y bajo voltaje. A continuación, se desglosa la descripción puntual de la tecnología de los dispositivos personalizados de potencia, destacando en específico los dispositivos de compensación y regulación de voltaje.

II. DESCRIPCION DE LOS DISPOSITIVOS PERSONALIZADOS DE POTENCIA

Los dispositivos de alimentación personalizables han sido desarrollados recientemente para mitigar los problemas de calidad de la energía en los sistemas de distribución. El acondicionador activo de voltaje (AAV), el acondicionador activo de potencia (AAP), el compensador estático de distribución (CED), el restaurador dinámico de voltaje (RDV) y acondicionador unificado de calidad de energía (AUCE) son los principales dispositivos personalizados de potencia, entre los disturbios que compensan están las depresiones de voltaje, elevaciones de voltaje, bajo factor de potencia, armónicos y fluctuaciones de voltaje. Estos dispositivos son conectados en la red de distribución en el nodo de carga a fin de aumentar su efectividad. (Ghosh, 2012).

Acondicionador Activo de Voltaje

El acondicionador activo de voltaje es un dispositivo semiconductor basado en transistores IGBT como interruptores controlados que se utiliza para proteger cargas sensibles de las perturbaciones eléctricas de la calidad de energía más comunes del sistema eléctrico. El compensador puede mitigar eficazmente las caídas de voltaje de hasta un 70% y también el desequilibrio de voltaje para cargas críticas con una respuesta muy rápida para cumplir con la mayoría de los requisitos estándar de calidad, como el IEEE Std 1100-1999. La estructura del dispositivo se basa en un convertidor ca/ca para suministrar la potencia de compensación requerida de la red, un filtro pasa bajas LC con una resistencia de amortiguación R, un transformador de inyección y un interruptor de derivación. (Farhoodnea, 2014). A continuación, se presenta el diagrama del acondicionador. Ver Figura 1

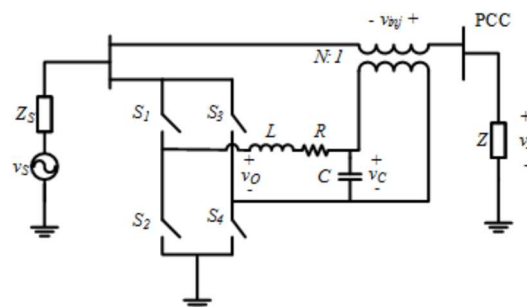


Figura 1. Diagrama esquemático del Acondicionador de Voltaje.

El AAP es un dispositivo con topología en paralelo mediante un inversor de fuente de voltaje (VSI) que se puede utilizar para regular variaciones de voltaje y para mitigar disturbios de la red eléctrica. Se constituye mediante un condensador de compensación, un convertidor de ca/cc y un convertidor de potencia de cc/ca, donde la unidad de ca/cc proporciona la potencia de compensación de cc requerida para el AAP y la unidad de cc/ca inyecta la corriente requerida para compensar los disturbios. En la Figura 2 se muestra el esquema del dispositivo.

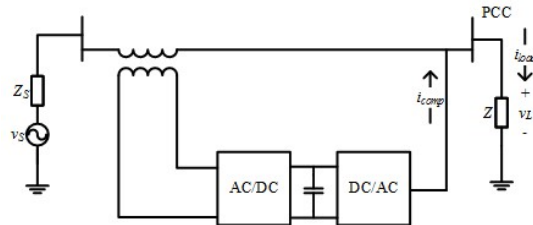


Figura 2. Diagrama esquemático de un Acondicionador de Potencia

Compensador Estático de Distribución.

El Compensador estático de distribución es un dispositivo diseñado para la compensación de la carga, la distorsión armónica, contenido armónico y el desbalance entre otros disturbios típicos en los sistemas eléctricos. El controlador de compensación opera continuamente monitoreando las tensiones y las corrientes de carga mediante este proceso determinar la cantidad requerida de compensación óptima viable para el sistema ca compensando una variedad de disturbios.

La conexión del dispositivo a la red eléctrica se lleva a cabo en derivación con la fuente de alimentación y es usado para mejorar el perfil del voltaje del sistema, eliminar el contenido armónico de corriente proveniente de la fuente y mantiene la estabilidad de voltaje. Este dispositivo también puede estabilizar el voltaje de la fuente a un voltaje de referencia cuando trabaja en modo de control de voltaje inyectando la cantidad de potencia reactiva apropiada (Kabeel, 2016). En la Figura 3 se puede apreciar el esquemático del compensador.

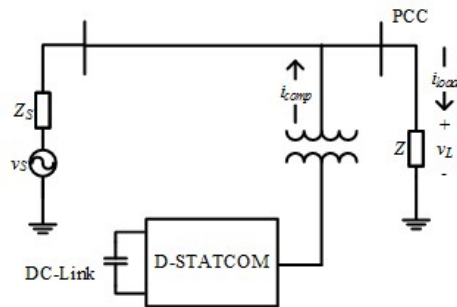


Figura 3. Diagrama del Compensador

Restaurador Dinámico de Voltaje.

El restaurador dinámico es uno de los dispositivos más significativos en la regulación de energía es un dispositivo con un alto grado de aplicación en sistemas con cargas sensibles y/o críticas ante disturbios de voltaje tales como los depresiones y elevaciones de voltaje, desbalances de voltaje del lado de la fuente. Las cargas sensibles se caracterizan por requerir un suministro de energía con una alta calidad en voltaje

y frecuencia, las cargas críticas estas al no contar con una alta calidad de energía eléctrica podrían dejar de funcionar adecuadamente.

El regulador dinámico se ha propuesto para proteger a las cargas críticas y sensibles de los disturbios salvo las interrupciones (Ghosh, 2012). Está conectado en serie con un alimentador de distribución y es capaz de generar o absorber la potencia real y reactiva en sus terminales de ca.

El regulador es un dispositivo serie, cuyo principio básico de operación consiste en insertar un voltaje de magnitud y frecuencia requerida por la carga. El compensador en serie puede restaurar el voltaje a la amplitud y forma de onda deseada, aun cuando el voltaje proveniente de la fuente pueda estar desbalanceado o distorsionado.

El principio fundamental del regulador es simple, inyecta una tensión de alimentación en serie. Idealmente, esta tensión está en cuadratura con la corriente de línea para que el regulador se comporte como un capacitor o un inductor con el fin de aumentar o reducir el voltaje en terminales de la carga. En este modo de operación, el regulador no tiene ningún intercambio de potencia real con el sistema eléctrico en estado estacionario.

Los componentes principales del regulador son muy similares a los de AAV, pero la principal diferencia es la presencia de una unidad de almacenamiento de energía dc en el regulador para proporcionar la potencia necesaria y poder corregir los disturbios de voltaje. En la Figura 4 se puede apreciar el dispositivo.

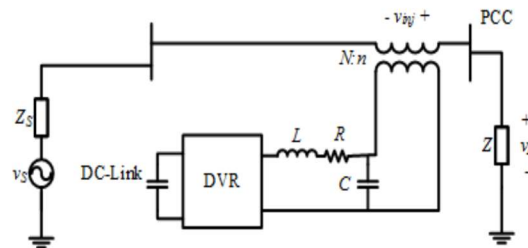


Figura 4. Esquemático del Restaurador de Voltaje.

Revisión de los DPP alrededor del mundo.

El primer prototipo de regulación de voltaje del mundo ubicado en una de las principales redes de distribución de Estados Unidos, construido por la compañía Westinghouse para el Electric Power Research Institute (EPRI) fue instalado en agosto de 1996 en un sistema de distribución de 12.7 kV de la Duke Power Company en Carolina del Norte a fin de proteger ante disturbios provenientes de la red a una planta automatizada dedicada a la manufactura de hilo y tejeduría (Woodley, 1999).

En un sistema de distribución de 22 kV en Stanhope, Victoria, Australia se implementó otro regulador para proteger una planta procesadora de leche. El ahorro resultado de la instalación del dispositivo se estima en más de \$ 100.000 USD por año (N. H. Woodley, 1998).

La instalación de los dispositivos Custom Power aún no está del todo documentada. Por lo tanto, es complejo obtener el estado actual de la instalación, sin embargo, han demostrado ser una opción cada vez más viable para problemas específicos de la calidad de la energía.

Según el IEEE P1409 Custom Power Task Force, la cantidad de DCP en servicio hasta mayo de 2000 era la siguiente (Domijan, 2005).

- Interruptores de transferencia: 23 dispositivos
- Compensadores serie: 7 dispositivos
- Compensadores en derivación: 17 dispositivos

III. ESTRATEGIAS DE CONTROL EN LOS DPP

Una parte vital para el rendimiento general de los DPP es la estrategia de control que se implemente en un dispositivo, de la cual dependerá de igual manera la eficacia en su operación según lo indica (Albers A, 2014). El control de un dispositivo compensador DPP se realiza en tres etapas.

En la primera etapa, las señales de tensión y corriente se detectan utilizando transformadores de potencial (TP), transformadores de corriente (TC), sensores de efecto Hall y amplificadores de aislamiento para recopilar información precisa del sistema.

En la segunda etapa, se generan las órdenes de compensación en términos de niveles de corriente o tensión basándose en diferentes métodos de control y configuraciones de dispositivos.

En la tercera etapa de control, las señales de disparo para los dispositivos de estado sólido de los DPP se generan ya sea en lazo abierto o lazo cerrado. Entre los esquemas de lazo abierto los más populares son la modulación de ancho de pulso (MAP) y la modulación de ancho de pulso sinusoidal (MAPS), mientras que, para el de lazo cerrado, el control por histéresis es la forma más común de control para sistemas de orden inferior. Para sistemas de segundo orden y superiores se pueden utilizar el control deslizante, el regulador cuadrático lineal (RCL), control por cambio de polos, el control dead-beat y los filtros Kalman (Rahman, 2015)

Actualmente es posible implementar algoritmos complejos como la lógica difusa, redes neuronales y algoritmos genéticos para mejorar el rendimiento dinámico y de estado estable de estos dispositivos (Pal, 2008)

Clasificación de los dispositivos personalizables de potencia

Primeramente, los dispositivos descritos como DPP se pueden clasificar en base a sus distintas topologías, número de fases, así como por el tipo de convertidor en el cual basan su funcionamiento. La segunda clasificación está basada en el número de fases, tales como dos hilos (monofásica) y sistemas trifásicos de tres o cuatro hilos. La tercera clasificación se basa en los dos principales convertidores usados, los cuales están basados principalmente en el VSI y en segundo lugar en el CSI. El uso del inversor de fuente de voltaje es más popular que el inversor de fuente de corriente debido a su flexibilidad para poder realizar convertidores multinivel, multipaso y de topología en cadena. Aunado a lo anterior, la topología de los convertidores de voltaje puede intercambiar una cantidad considerable de potencia real con dispositivos de almacenamiento de energía según (Pal, 2008).

Costos de la Calidad de la Energía

A fin de cuantificar los costos derivados de los problemas de calidad de la energía, y la existencia de encuestas de diferentes grupos de clientes en diferentes países sobre el costo de las interrupciones. El primer reporte de costos por problemas de calidad de la energía lo realizó el Instituto de Investigación en Energía Eléctrica (EPRI) en 1993, con un costo estimado de 26 mil millones de dólares por año solo para los Estados Unidos según lo indica (Institute., 1993).

Más recientemente, el mismo EPRI calculo el costo total de interrupciones de energía para el sector industrial, incluidas las causadas por una mala calidad de energía, en 119 mil millones de dólares en 2001 para los Estados Unidos. Según el Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, el 67% de las interrupciones son de tipo momentáneo mientras que el 33% son interrupciones sostenidas. La ventaja de cuantificar el costo de las interrupciones para los usuarios del servicio eléctrico es importante para determinar el nivel de inversión que es apropiado para corregir las quejas sobre la calidad del suministro o para establecer el precio de una tarifa de calidad premium para los clientes seleccionados (K. H., 2001).

En base en el estudio previo y a modo de ejemplificar el desempeño de uno de los reguladores de la tecnología de los dispositivos personalizados de potencia (DPP) se presenta el regulador dinámico de

voltaje que estará operando en diferentes escenarios adversos a la calidad de la energía. En donde se analiza y estudia la respuesta dinámica y de estado estacionario del regulador ante las problemáticas de factor de potencia, depresión y elevación de voltaje, distorsión armónica y desbalance de fases. El circuito esquemático de estudio se muestra en la Figura 5. La carga lineal ZL es $ZLa=60 \Omega$, $ZLb=70 \Omega$ y $ZLc=80+j70 \Omega$.

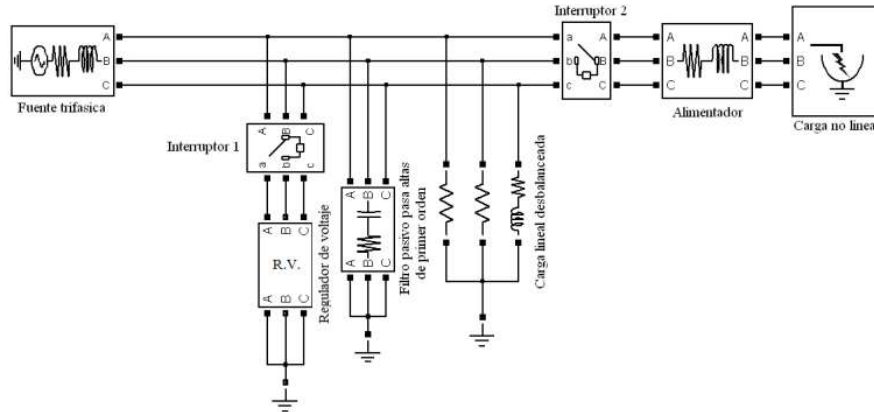


Figura 5. Desempeño digital del regulador.

En la Figura 6 se puede corroborar su eficacia para suprimir el efecto armónico en la corriente que se presenta por un conjunto de tres fuentes que incluye hasta un 7 armónico. En la ecuación 1 se ilustra matemáticamente estas corrientes armónicas.

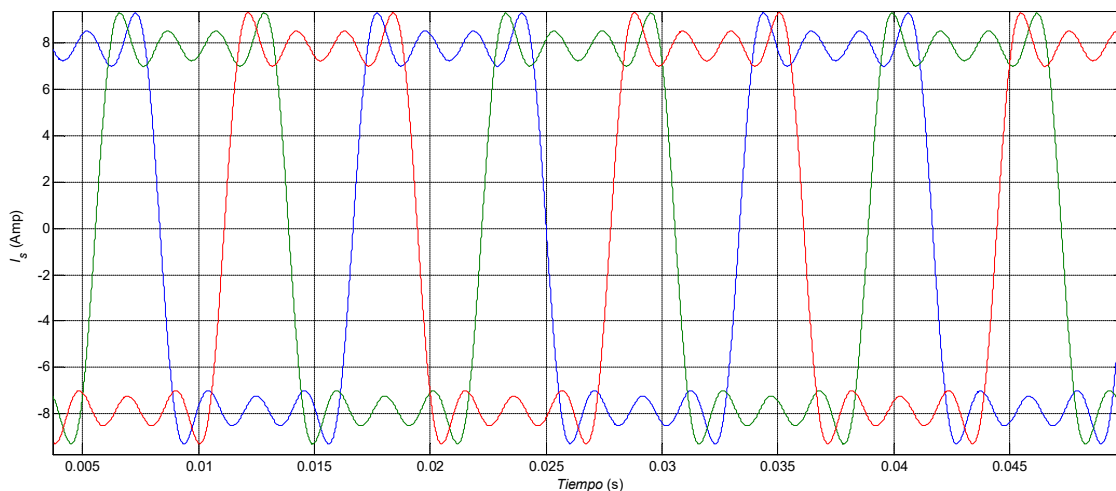


Figura 6. Mitigación del contenido armónico.

$$i_{la} = 10\text{sen}\omega t + \frac{10}{3}\text{sen}3\omega t + \frac{10}{5}\text{sen}5\omega t + \frac{10}{7}\text{sen}7\omega t. \tag{Ec 1}$$

$$i_{lb} = 10\text{sen}(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \frac{10}{3}\text{sen}(3\omega t - 2\pi) + \frac{10}{5}\text{sen}(5\omega t - \frac{10\pi}{3}) + \frac{10}{7}\text{sen}(7\omega t - \frac{14\pi}{3}). \tag{Ec 2}$$

$$i_{lc} = 10\text{sen}(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + \frac{10}{3}\text{sen}(3\omega t + 2\pi) + \frac{10}{5}\text{sen}(5\omega t + \frac{10\pi}{3}) + \frac{10}{7}\text{sen}(7\omega t + \frac{14\pi}{3}). \tag{Ec 3}$$

El caso de estudio digital, así como los parámetros utilizados son los mismos que para el circuito mostrado en la Figura 5 con una pequeña modificación para efectos de apreciar la incorporación de las fuentes de corriente armónicas de la Figura 6 se fija la referencia de voltaje del regulador en 400 V de

0.25 s a 0.35 s y después se cambia a 440 V en 0.35 s. Donde el regulador entra en operación a los 0.05 s después de energizar el sistema. El voltaje en las terminales del punto común de acoplamiento es de 400 Volts hasta los 0.35 s y de 440 Volts después de los 0.35 s.

La Figura 7 se muestra que el compensador mantiene el voltaje en la referencia deseada independiente de los cambios en el voltaje de referencia y de las corrientes de carga altamente distorsionadas.

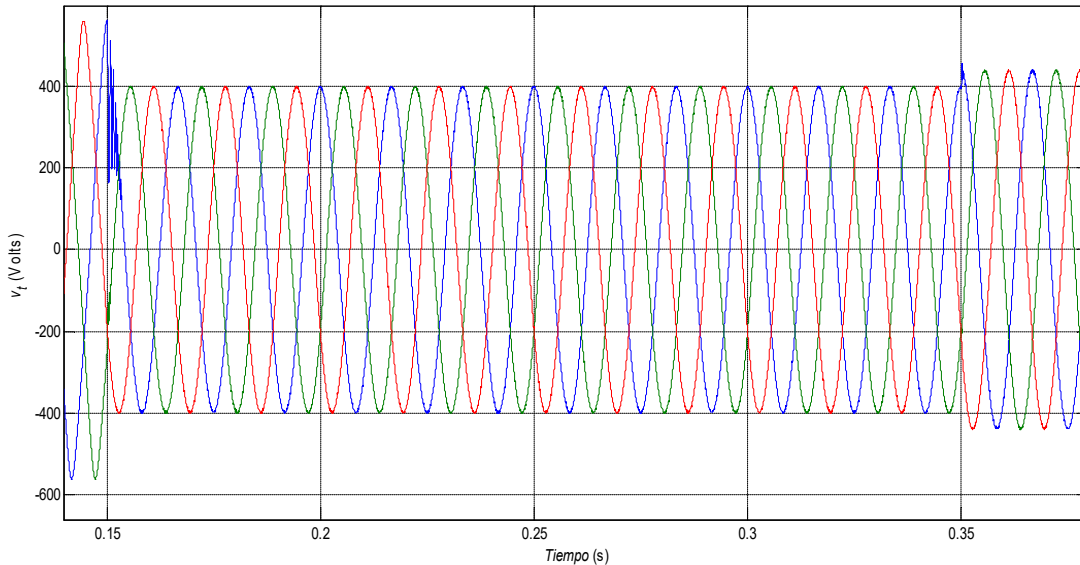


Figura 7 Voltaje en terminales del PCC, vt

En la Figura 8 se muestra la corriente del sistema de la red is. Del tiempo $t=0$ s al tiempo $t=0.15$ s, esta corriente es entregada por la fuente trifásica del circuito de la Figura 5 cuyo voltaje de entrada es de 440 Volts, y el valor pico de corriente está por encima de 17 Amperes. En el tiempo de $t=0.15$ s entra el regulador estableciendo una regulación de voltaje en el PCC con un valor de referencia de voltaje de 400 volts hasta el tiempo de $t=0.35$ s; en estas condiciones la corriente es de aproximadamente 10.5 Amperes, en el tiempo de $t=0.35$ s se hace un cambio de referencia final de voltaje a 440 Volts.

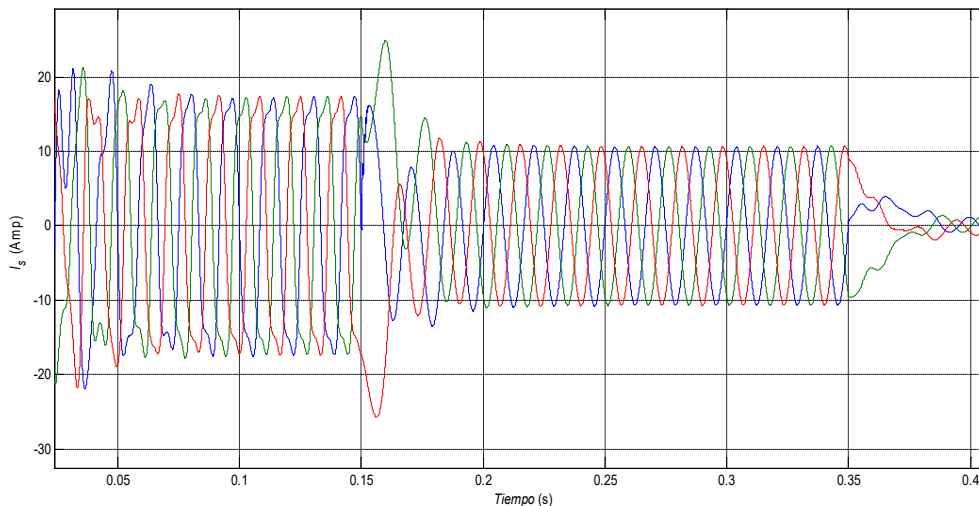


Figura 8 Corriente del sistema Is

Obsérvese que la corriente mostrada en la Figura 8 decrece dramáticamente cuando la referencia de voltaje en el PCC cambia de 400 Volts a 440 V. Note también que la corriente i_s tiene una magnitud aún mayor durante el tiempo que el regulador no está operando. Estos datos de las magnitudes de corriente están estrictamente asociados a los intercambios de potencia reactiva en el PCC. Por ejemplo, durante el periodo de tiempo en que el regulador no está conectado al PCC, el voltaje en ese bus puede alcanzar una magnitud superior a la establecida de 440 Volts dado que el voltaje de la fuente es menor por lo tanto se infiere que la carga en conjunto con el capacitor fijo inyecta reactivos al sistema en el PCC, esto a su vez implica que gran parte de la corriente i_s sea reactiva con un factor de potencia adelantado.

Cuando se conecta el regulador y se le asigna llevar el voltaje en el PCC a 400 Volts, se infiere también que el compensador debe demandar reactivos del sistema para lograr bajar el voltaje de 440 a 400 Volts; a juzgar por la Figura 8, se sabe que la potencia reactiva demandada por el regulador -carga es inferior a la potencia reactiva inyectada por el capacitor-carga durante los primeros 0.15 s. Finalmente el voltaje ahora se regula en 440 Volts y se espera que la potencia reactiva demandada por el sistema sea en este caso inferior al caso en cual el voltaje era regulado a 400 Volts. Todo esto es confirmado en la Figura 9.

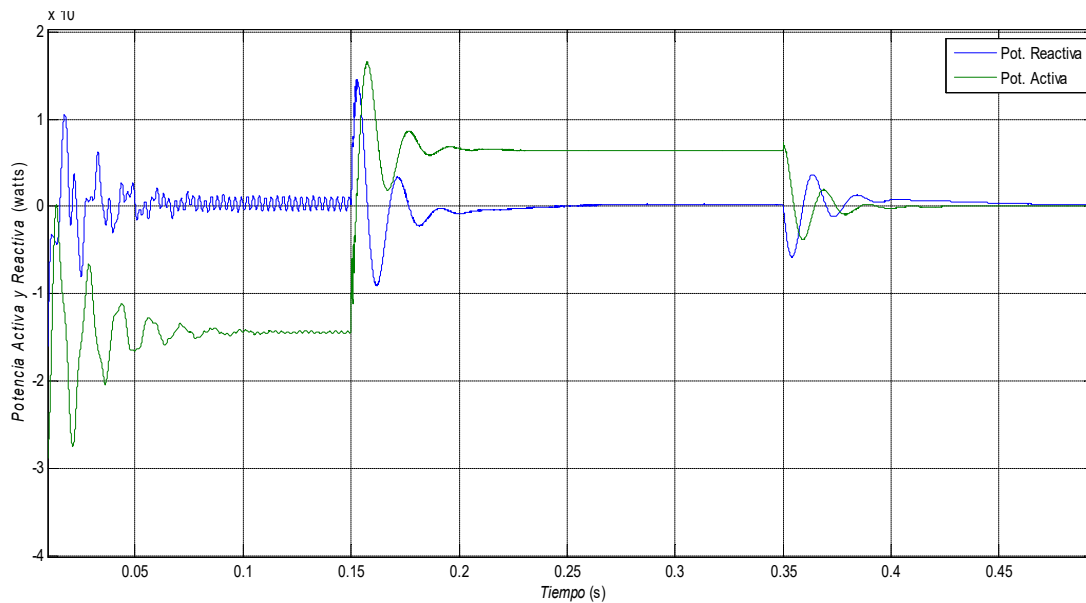


Figura 9 Potencia del sistema IsMV

De la presente simulación del regulador y de los datos diseñados para el análisis de este se puede determinar la eficacia antes mencionada de los DPP en el momento de interactuar ante depresiones de voltaje, desbalances e incluso en circuitos fluctuantes de voltaje.

BIBLIOGRAFÍA

- Albers A, W. D. (2014). Adaption of the TRIZ method to the development of electric energy storage systems. *CIRP*, 509-514.
- Domijan, A. M. (2005). Custom power devices: An interaction study. *IEEE*, 1111-1118.
- Farhoodnea, M. M. (2014). A comparative study on the performance of custom power devices for power quality improvement. *IEEE*, 153-157.
- G, H. N. (1995). Introducing Custom Power. *IEEE Spectrum*, 32(6), 41-48.
- Ghosh, A. &. (2012). Ghosh, A. Power quality enhancement using custom power devices. *Springer Science & Business Media.*, 9.
- IEEE. (2009). Recommended Practices on Monitoring Electric Power Quality. *IEEE*, 50-59.
- Institute., E. P. (1993). Estimating the cost of power quality. *IEEE Spectrum*, 40-41.
- K. H., & E. (2001). Cost of power interruptions to electricity consumers in the United States. *IEEE*, 1845-1855.
- Kabeel, M. A. (2016). Kabeel, M. A., Abdelsalam, A. A., A modified DSTATCOM topology for power quality enhancement. *Power system conference*, 367-372.
- N. H. Woodley, A. S. (1998). N. H. Woodley, A. Sundaram, B Dynamic voltage restorer demonstration project experience. *CEPSI*, 561-569.
- Pal, Y. S. (2008). A review of compensating type custom power devices for power quality improvement. *Pal, Y., Swarup, A., & Singh, B. A review of compensating type custom power system technology and IEEE Power India Conference*, 150-157.
- Rahman, S. A. (2015). Voltage sag and swell mitigation based on modulated carrier PWM. *Rahman, S. A., Janakiraman, P. A., & Somasundaram, P. (2015). Voltage sag and swell mitigation. International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 78-85.
- Woodley, N. H. (1999). Experience with an inverter-based dynamic voltage restorer. *IEEE Transaction on power Delivery*, 1181-1186.