



Comité Nacional Venezolano

## III CONGRESO VENEZOLANO DE REDES Y ENERGÍA ELÉCTRICA

Marzo 2012

B4-46

### Esquema de Compensación para Sistemas Eléctricos Ferroviarios por Control de Potencia Instantánea

**A. Bueno\***                      **J. Aller\***                      **A. Berzoy\*\***                      **J. Restrepo\*\***  
\* Dpto. Conversión y Transporte de Energía. Universidad Simón Bolívar  
\*\* Dpto. Electrónica y Circuitos. Universidad Simón Bolívar

#### RESUMEN

Los sistemas de tracción eléctrica para transporte de bienes y personas utilizan diferentes esquemas de transformación que convierten la red eléctrica trifásica en dos sistemas monofásicos desfasados  $\pi/2$  ó  $2\pi/3$  cada uno. Las conexiones al sistema de potencia más utilizadas en la actualidad emplean transformadores en conexión Scott, Le Blanck y delta abierta (V-V). Las cargas asociadas a estos circuitos monofásicos, en general son desequilibradas debido a los itinerarios, a la demanda del sistema de transporte, a las pendientes y a la topología del terreno. Por otro lado, estas cargas utilizan rectificación PWM para alimentar los convertidores del material rodante. Este esquema de rectificación inyecta diversos contenidos armónicos de baja frecuencia al sistema de tracción, los cuales se propagan al sistema de potencia dependiendo de la conexión del transformador y de su orden armónico. Estos armónicos incrementan los desequilibrios en las corrientes de la red trifásica de alimentación. Los sistemas de potencia débiles son susceptibles a presentar problemas ocasionados por la circulación de corrientes armónicas o los desequilibrios. Estos problemas se traducen generalmente en operaciones inadecuadas tanto de los generadores como de las protecciones asociados a estas redes. Por este motivo se plantea la conveniencia de utilizar filtros y compensación de carga para reducir o eliminar estos inconvenientes con la finalidad de ampliar las posibilidades operativas del sistema de tracción.

Este trabajo realiza un desarrollo novedoso en las técnicas de control vectorial en puentes convertidores convencionales y multinivel, utilizados como filtros activos conectados en el sistema trifásico, capaces de balancear y filtrar simultáneamente los efectos de la carga y su contenido armónico, con la finalidad de incrementar las prestaciones y calidad del servicio eléctrico en las condiciones especiales de operación, introducidas por los sistemas de tracción eléctrica. Se utilizan estrategias de control directo de potencia activa y reactiva (DPC) sobre el puente convertidor, empleando algoritmos que optimizan la selección de los vectores espaciales de tensión necesarios para satisfacer los criterios de balance, factor de potencia y reducción armónica en el sistema de potencia.

Las propuestas de control y compensación desarrolladas en este trabajo para convertidores de dos niveles y duales se han validado a nivel experimentalmente, mediante una plataforma modular de electrónica de

Dpto. Conversión y Transporte de Energía Universidad Simón Bolívar. Valle de Sartenejas Baruta Edo. Miranda, 0212-9063736, [bueno@usb.ve](mailto:bueno@usb.ve)

potencia, que permite emular las condiciones de operación del sistema de tracción. Estas validaciones se realizaron en configuraciones de transformación monofásica, Scott y delta abierta.

## **PALABRAS CLAVE**

Tracción Eléctrica, Filtros Activos, Scott, Delta Abierta, Modulación Vectorial, Desequilibrios

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de tracción eléctricos para pasajeros y mercancías utilizan diversas configuraciones en la subestaciones de tracción con la finalidad de alimentar monofásicamente los trenes que integran el sistema, a partir del sistema trifásico de alimentación. En general, el sistema trifásico se transforma en dos alimentadores monofásicos mediante el uso de transformadores especiales como el delta abierta (V - V), Scott o Le Blanc [1]. En una aplicación práctica, los dos alimentadores monofásicos no presentan la misma carga, esto se debe por una parte al flujo de trenes por cada ramal y por otra al perfil del trazado de la vía. Adicionalmente, el uso de rectificadores activos con factor de potencia unitario en el material rodante introduce armónicos al sistema de alimentación que contribuyen al desequilibrio de corriente visto desde el sistema trifásico de alimentación aun cuando la carga en ambos alimentadores sea balanceada [2].

Para mejorar las prestaciones de los sistemas de tracción eléctrica es necesaria la utilización de filtros armónicos y sistemas que permitan corregir el desbalance de corriente en el sistema trifásico propio de la operación de estos sistemas de transporte masivo de carga y pasajeros [3].

Estos problemas de calidad de servicio suelen ser abordado, en la práctica, con el uso de filtros pasivos, conectados a cada uno de los ramales monofásicos de la subestación de tracción. Por lo general, en esta solución se desprecia el acoplamiento existente entre los dos alimentadores [4]. Por otra parte, el filtro pasivo no tiene la capacidad dinámica para adaptarse a los continuos cambios de la demanda del sistema que se traducen en cambios en la carga de cada alimentador.

Diferentes configuraciones de filtros activos se han propuesto en para resolver el problema de desequilibrio y contaminación armónica en sistemas de tracción eléctrica [5]. Todas estas soluciones emplean dos convertidores monofásicos que presentan una barra de corriente continua común. Estos sistemas no permiten la compensación simultánea de contenido armónico y el desequilibrio en el sistema de tracción. Sin embargo, cuando la compensación se hace en el lado trifásico, la definición de potencia activa y reactiva instantánea se puede utilizar en el proceso de compensación de armónicos y desequilibrios [6].

En este trabajo se propone un sistema simultáneo de compensación para el contenido armónico y los desequilibrios en corriente de los sistemas ferroviarios eléctricos que utilizan transformadores delta abierta y Scott en la subestación de tracción. Este sistema de compensación se basa en la utilización de los conceptos de potencia activa y reactiva instantánea [6], utiliza la representación en vectores espaciales de las variables de estado, y la aplicación del control directo de potencia (DPC) para lograr la corrección necesaria minimizando una función de costos obtenidos a partir del error de potencia activa y reactiva instantánea [7].

Las estrategias de control son validadas mediante un sistema modular de electrónica de potencia capaz de emular las condiciones de funcionamiento del sistema de tracción eléctrica, el transformador de tracción delta abierta o Scott y los convertidores del filtro activo[8] .

Los convertidores multinivel son un tema de intensa investigación [9] y varias técnicas de modulación se han desarrollado permitiéndoles obtener ventajas sobre los convertidores convencionales de dos niveles [9]. Una ventaja importante de los convertidores multinivel es la posibilidad de mejorar el contenido armónico de la tensión sintetizándola con una cantidad reducida de conmutaciones. Otra de las ventajas de los convertidores multinivel es la posibilidad de alcanzar mayores niveles de tensión y potencia con dispositivos de energía de menor tensión de interrupción [9]. El aumento de los componentes en los convertidores multinivel resultada en un aumento correspondiente en el número de estados de conmutación válidos, y por lo tanto permite realizar cambios más suave en las variables de estado del sistema y su consiguiente reducción de  $dv/dt$  de la tensión de salida. Entre las diversas topologías multinivel existentes, la estructura de convertidor en cascada tiene la ventaja de que la operación en varios niveles de tensión se pueden obtener mediante el uso de dos convertidores de estándar de dos niveles.

La técnica de compensación es genérica y se puede extender a cualquier configuración del transformador en la subestación de tracción. La tecnología de convertidores multinivel puede facilitar su aplicación industrial, debido a que reduce las especificaciones de los interruptores de electrónica de potencia y el esfuerzo dieléctrico ( $dv/dt$ ) a los que son sometidos los componentes magnéticos, como transformadores de acoplamiento y/o inductores [1].

## II. Sistema de Compensación Para Armónicos y Desbalances

En los sistemas trifásicos equilibrados de tres hilos que alimentan cargas lineales balanceadas la potencia activa y reactiva instantánea es constante e igual a  $p(t) = 3VI \cos(\phi)$  y  $q(t) = 3VI \sin(\phi)$  [6]. Para sistemas trifásicos equilibrados de tres hilos que alimentan cargas desbalanceadas o no lineales la potencia activa y reactiva instantánea presenta una componente oscilatoria con valor medio diferente de cero. Para compensar el desequilibrio de carga y reducir la inyección de armónicos de corriente a la red, el controlador propuesto, que se presenta en la figura 1, tiene por objetivo mantener constante el flujo de potencia activa y reactiva instantáneo desde la fuente de alimentación. En este trabajo esta estrategia se implementa con un filtro activo paralelo conectado directamente al sistema de alimentación mediante un transformador de acoplamiento. Para la aplicación de tracción, el filtro activo se implementa con un convertidor controlado por fuente de tensión (VSC) de dos niveles y dual con una potencia que oscila entre 10% y el 15% de la potencia nominal del transformador de tracción.

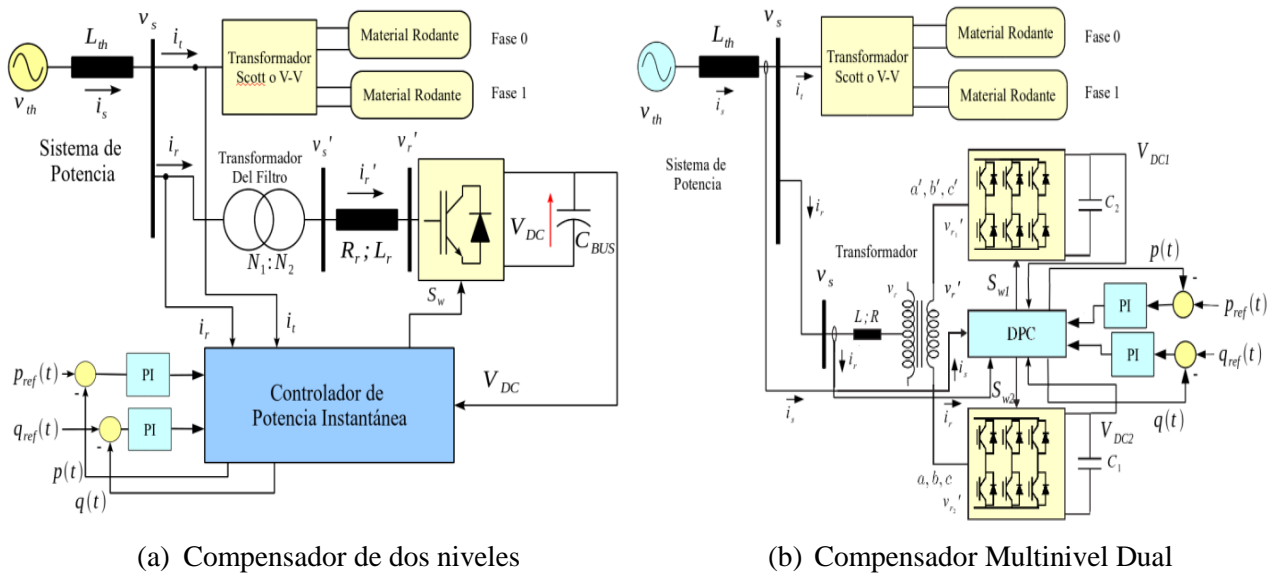


Fig.1 Sistema de compensación propuesto

El controlador censa la potencia aparente instantánea consumida por la carga y calcula e inyecta la potencia requerida para mantener una potencia activa y reactiva instantánea constante en el sistema eléctrico. El esquema de compensación propuesto calcula la tensión del convertidor  $v_r$  requerida para mantener la referencia constante de potencia aparente  $s(t) = p_{ref} + jq_{ref}$ , actuando de esta manera como un filtro armónico y equilibrador de corriente trifásica.

La diferencia entre la potencia de referencia  $p_{ref}$  y la potencia media  $\langle p(t) \rangle$  consumida por el sistema de tracción se almacena como energía en el condensador del bus de corriente continua. Cuando esta diferencia es positiva, la tensión de la barra DC aumenta en caso contrario disminuye. Para estabilizar la tensión en la barra de corriente continua  $p_{ref}$  debe ser igual a la potencia media total consumida por el

sistema de tracción más las pérdidas del filtro. La potencia de referencia reactiva  $q_{ref}$  proporciona un grado adicional de libertad que se puede utilizar para ajustar el factor de potencia del sistema.

En la figura 2 se muestra los esquemas de conexión de los transformadores delta abierta (V - V) y Scott que se utilizan para conectar una subestación de tracción a la red eléctrica trifásica. Estos esquemas de conexión generan dos circuitos de alimentación monofásicos desde a partir de un sistema trifásico. Cada circuito monofásico se utiliza para alimentar un tramo de vía férrea de 60 a 100km.

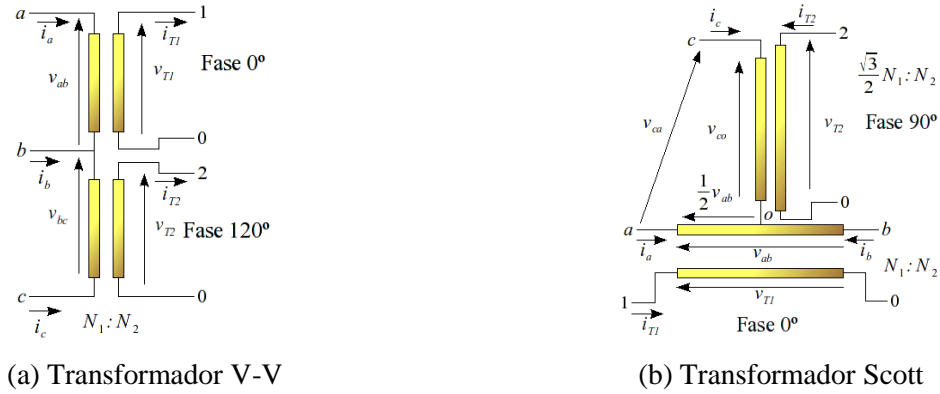


Figura 2: Esquemas de Transformadores de Tracción

### III. Control de Potencia Activa y Reactiva

La potencia aparente instantánea  $s(t)$  es una función de la tensión de alimentación del sistema y de su corriente. La corriente puede ser controlada variando la consigna de disparo del rectificador PWM ( $\bar{v}_r(t)$ ), con la finalidad de obtener los valores de los comandos de  $p_{ref} + jq_{ref}$ . Este vector espacial de tensión ( $\bar{v}_r(t)$ ) se sintetiza en el convertidor utilizando modulación espacial vectorial (SVM). El algoritmo de control de potencia activa y reactiva instantánea se presenta en la figura 3[10]. Este algoritmo consiste en obtener la tensión del rectificador que minimice un función de error cuadrático formulada a partir de los errores de la potencia activa y reactiva instantánea y las referencias. Este algoritmo tiene muchas ventajas sobre los métodos existentes, proporciona una corrección instantánea de la potencia activa y reactiva que fluye en el convertidor, reduce el rizado tanto en la potencia instantánea como en las corrientes resultantes, presenta una baja distorsión armónica y requiere menores tiempos de procesamiento [10].

### IV. Balanceo de Corrientes y Filtrado Armónico Utilizando DPC

El desbalance de tensión en un sistema trifásico se define como el cociente entre la tensión de secuencia negativa  $V_2$  y positiva  $V_1$  ( $V_2/V_1$ ) [11]. Una expresión general para las tensiones y corrientes de un sistema trifásico que presenta desbalance y armónicos, se puede expresar utilizando componentes simétricas y series de Fourier como:

$$x_{a,b,c}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \sqrt{2}X_{n1} \cos(n\omega t + \phi_{n1} - 2\pi k/3) + \sqrt{2}X_{n2} \cos(n\omega t + \phi_{n2} + 2\pi k/3) \right] \quad (1)$$

$$[a \ b \ c] \rightarrow k = [0 \ 1 \ 2]; \forall x \in \{v, i\}$$

El vector espacial de tensión y corriente se puede obtener aplicando la definición del vector espacial [10] a la expresión (1),

$$\bar{v}_s = \sqrt{3} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ V_{n1} e^{j(n\omega t + \alpha_{n1})} + V_{n2} e^{-j(n\omega t + \alpha_{n2})} \right]; \bar{i}_s = \sqrt{3} \sum_{m=1}^{\infty} \left[ I_{m1} e^{j(m\omega t + \beta_{m1})} + I_{m2} e^{-j(m\omega t + \beta_{m2})} \right] \quad (2)$$

y la potencia aparente instantánea ( $\vec{s} = \vec{v}_s \cdot \vec{i}_s^*$ ) se calcula como [10]:

$$\vec{s} = 3 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \left[ V_{n1} I_{m1} e^{j((n-m)\omega t + \alpha_{n1} - \beta_{m1})} + V_{n1} I_{m2} e^{j((n+m)\omega t + \alpha_{n1} + \beta_{m2})} + V_{n2} I_{m1} e^{-j((n+m)\omega t + \alpha_{n2} + \beta_{m1})} + V_{n2} I_{m2} e^{-j((n-m)\omega t + \alpha_{n2} - \beta_{m2})} \right] \quad (3)$$

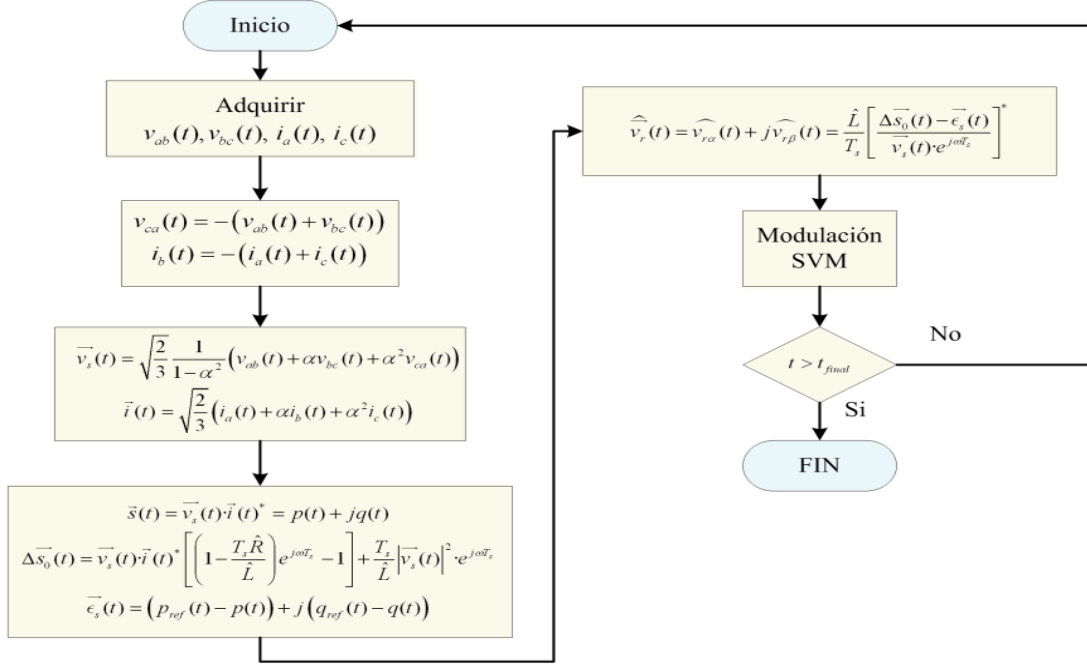


Figura 3: Algoritmo de control para potencia activa y reactiva instantánea

Para obtener potencia aparente instantánea ( $\vec{s}$ ) constante, se debe anular la dependencia con el tiempo de la expresión **Error! Reference source not found.**. Los términos primero y cuarto de la expresión **Error! Reference source not found.** requieren que las distribuciones armónicas de tensión y corriente tengan los mismos armónicos, es decir,  $n = m$ . Esta condición permite por una parte anular la dependencia con el tiempo y por otra filtrar los armónicos de tensión y corriente de ambas secuencias. Con  $n = m$ , la expresión **Error! Reference source not found.** se reduce a:

$$\vec{s} = 3 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ V_{n1} I_{n1} e^{j(\alpha_{n1} + \beta_{n1})} + V_{n1} I_{n2} e^{j(2n\omega t + \alpha_{n1} + \beta_{n2})} + V_{n2} I_{n1} e^{-j(2n\omega t + \alpha_{n2} + \beta_{n1})} + V_{n2} I_{n2} e^{-j(\alpha_{n2} + \beta_{n2})} \right] \quad (4)$$

Para anular la dependencia con el tiempo del segundo y tercer término de la expresión (4), se debe satisfacer:

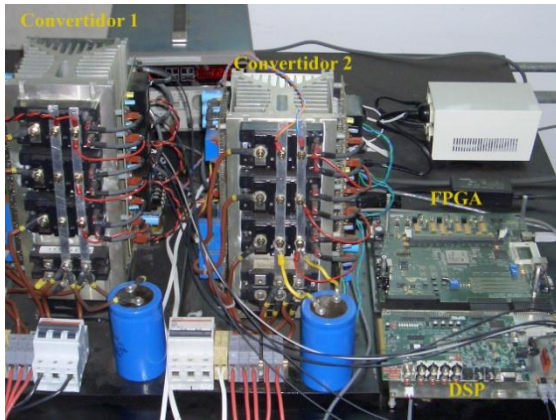
$$\sum_{n=1}^{\infty} \left[ V_{n1} I_{n2} e^{j(2n\omega t + \alpha_{n1} + \beta_{n2})} + V_{n2} I_{n1} e^{-j(2n\omega t + \alpha_{n2} + \beta_{n1})} \right] = 0 \quad (5)$$

La dependencia con el doble de la frecuencia de la expresión (5) se anula sí cada término de la sumatoria es igual a cero. Como la tensión ( $V_{n1}$ ) y corriente ( $I_{n1}$ ) de secuencia positiva son diferentes de cero ( $V_{n1} \neq 0 \wedge I_{n1} \neq 0$ ), la tensión ( $V_{n2}$ ) y la corriente ( $I_{n2}$ ) de secuencia negativa necesitan ser iguales a cero para obtener potencia activa y reactiva constante, satisfaciendo de esta forma la expresión (5)

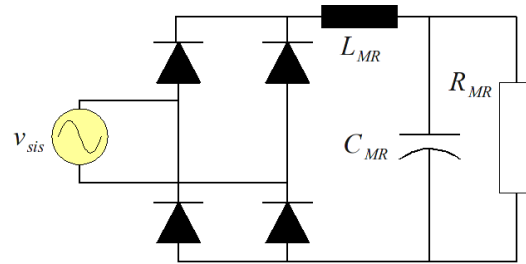
## V. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para la validación experimental se implementó el sistema de tracción y el compensador en un DSP de punto flotante (ADSP-21061-40MHz) utilizando una plataforma de pruebas experimental [8]. La etapa de

potencia de la plataforma utiliza seis IGBT's de 50A, 1200V, con un capacitor de 2200 $\mu$ F a 450V en la barra de corriente continua. El puente se acopla al sistema mediante tres inductores de 7mH y 0,05 $\Omega$ . Las señales del PWM se implementaron a través de un coprocesador de movimiento ADMC - 201AP a una frecuencia de conmutación de 10 kHz. En la figura 6a se presenta una foto de la plataforma utilizada, donde se destacan los dos puentes convertidores, el procesador digital de señales (DSP) y la FPGA para el manejo de los ciclos de trabajo de los convertidores. En la figura 6b se presenta la configuración de la carga no lineal RLC para modelar el contenido armónico introducido por el material rodante al sistema de tracción.



(a) Convertidor dual



(b) Esquema para modelar el contenido armónico del Material Rodante

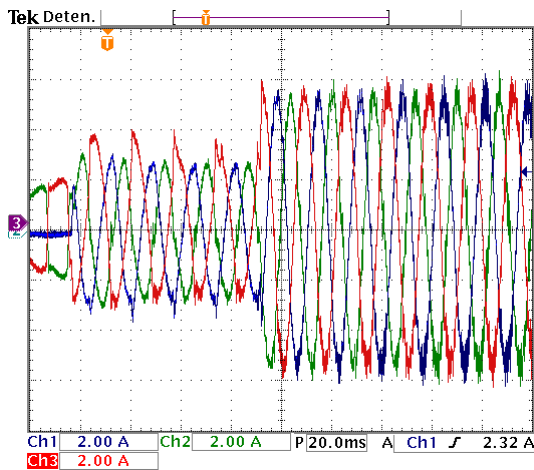
Figura 6: Plataforma con convertidor dual y modelo del material rodante

Para la construcción del transformador de tracción delta abierta y Scott se utilizan dos unidades monofásicas de relación de transformación 480V - 240V : 240V - 120V con una potencia aparente de 1kVA. Para ajustar la relación de transformación en el caso del Scott, cada secundario de las unidades monofásicas se conecta en serie con un transformador variable tipo toroide de 1kVA. La validación experimental se realizó con un sistema de tensiones que presenta un desequilibrio de 1,4% y un THD de 1%, que corresponde principalmente a la quinta armónica. En las figuras 7a y 7b, se presenta la forma de onda de corriente en las tres fases del sistema de potencia para carga no lineal RLC en un alimentador del transformador de tracción tipo delta abierta y el otro en vacío. En la figura 7 se puede observar la forma de onda de corriente con y sin la presencia del compensador utilizando puentes convertidores de dos niveles y dual. La potencia promedio consumida por la carga no lineal es de 115,36 W con un factor de potencia del 96% en atraso. Para evaluar el comportamiento del compensador ante variaciones de las referencias de potencia instantánea, se realiza un cambio de la consigna de potencia activa de 250 W a 500 W en  $t = 75$ ms, manteniendo la referencia de potencia reactiva instantánea en 0var. El compensador implementado con un convertidor de dos niveles y una referencia de potencia activa de 500 W y reactiva de 0 var disminuye el desbalance de corriente de 98% al 2,55% y reduce la distorsión armónica de la corriente de 36,15% a 10,52%. En el caso de la implementación con el convertidor dual, el desbalance de corriente se disminuye del 98,09% al 2,21% y la distorsión armónica de la corriente de 36,15% al 8,024% para la misma consigna de potencia activa y reactiva.

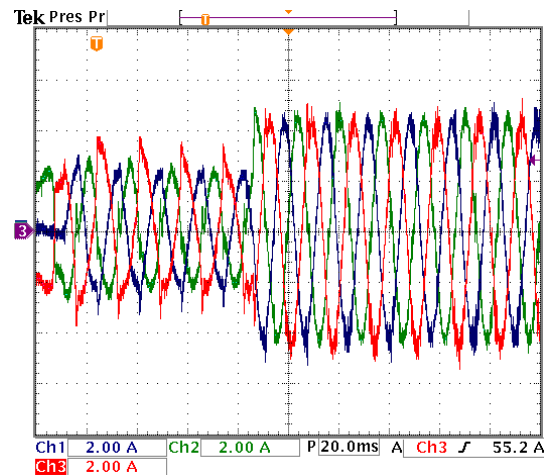
En las figuras 8a y 8b, se presenta la forma de onda de corriente en las tres fases del sistema de potencia para carga no lineal RLC en un alimentador del transformador de tracción tipo Scott y el otro en vacío. En las figuras se puede observar la forma de onda de corriente con y sin la presencia del compensador utilizando puentes convertidores de dos niveles y dual. Para evaluar el sistema de compensación se utilizarán las mismas referencias de potencia que para el transformador V-V. Para el compensador implementado con un convertidor de dos niveles y una referencia de potencia activa de 500 W y reactiva de 0 var disminuye el desbalance de corriente de 96,24% al 0,34% y la distorsión armónica de la corriente



de 37,72% al 12,34%. En el caso con el convertidor dual, el desbalance de corriente se reduce del 96,24% al 1,68% y la distorsión armónica de la corriente de 35,55% al 13,28%, para la misma consigna de potencia activa y reactiva. Para este caso las mejores prestaciones se alcanzan con el compensador implementado con un puente convertidor de dos niveles.

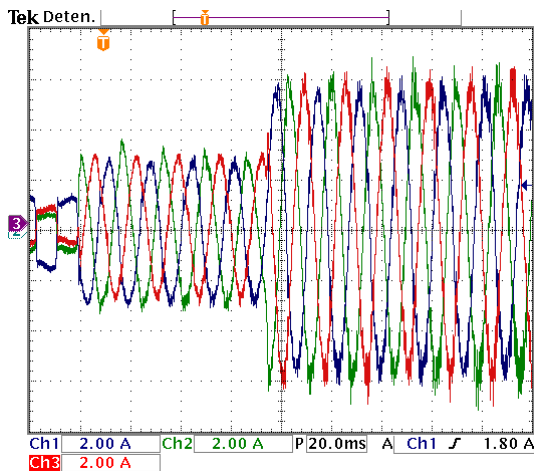


(a) Convertidor de 2 Niveles

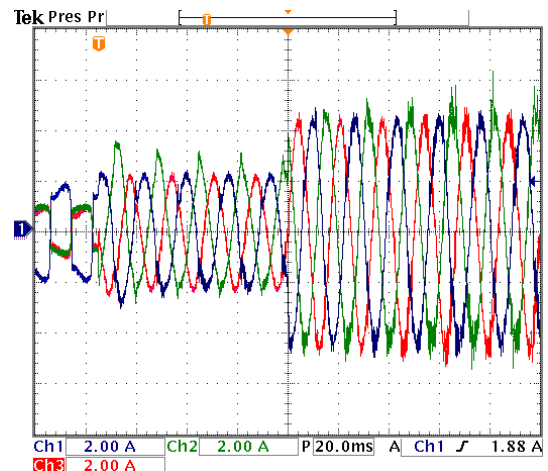


(b) Convertidor Dual

Figura 7 Corriente en el sistema para el compensador con transformador V-V



(c) Convertidor de 2 Niveles



(d) Convertidor Dual

Figura 7 Corriente en el sistema para el compensador con transformador Scott

En la tabla I se presenta el factor de distorsión armónica total de corriente (THD) y el factor de desbalance ( $I_2/I_1$ ) para las configuraciones delta abierta y Scott del transformador de tracción, alimentando una carga no lineal RLC en un devanado y el otro en vacío y utilizando las dos topologías de puente convertidor. El algoritmo de control reduce el desbalance de 98% a menos del 3,4% para ambas conexiones del transformador de tracción. Por otra parte el THD se reduce del 47% al 10%. De las topologías de puente convertidor analizadas el de dos niveles presenta mejores prestaciones para corregir el desbalance de corrientes mientras que el Dual para la reducción de la distorsión armónica total.

## VI. CONCLUSIONES

El sistema de compensación por optimización de potencia activa y reactiva instantánea permite reducir la circulación de corriente de secuencia negativa en la red trifásica que alimenta el sistema de tracción, para las configuraciones delta abierta y Scott del transformador de tracción. Este esquema de control reduce el



THD de corriente a valores permisibles por la normativa internacional y regula el factor de potencia en el punto común de acoplamiento. La implementación del sistema de compensación mediante el algoritmo de control de potencia instantánea por cálculo directo del vector espacial, puede reducir el desequilibrio en las corrientes a valores permisibles por las máquinas eléctricas de corriente alterna ( $< 10\%$ ), bajo las condiciones normales de operación del sistema ferroviario. En condiciones de emergencia o falla, con un solo devanado secundario del transformador de tracción cargado, se reduce el desbalance de 99% a 3%. El algoritmo de compensación es capaz de controlar el factor de potencia consumido en el (PCC) del sistema trifásico bajo todas las condiciones analizadas.

Tabla I: Desbalance y THD en el sistema utilizando compensadores de dos niveles y duales

	Sin Compensar		Compensación 2 Niveles		Compensación Dual	
	THD	$I_2/I_1$	THD	$I_2/I_1$	THD	$I_2/I_1$
V-V	0.3615	0.981	0.1010	0.0254	0.0703	0.0221
Scott	0.3772	0.9662	0.1234	0.0034	0.1328	0.0168

Las diferencias entre los valores esperados y la validación experimental para la carga del rectificador monofásico de diodos se debe, por una parte al desbalance intrínseco en la fuente de alimentación del laboratorio del 1,4%, y por otra a su alta impedancia de cortocircuito que origina una alta sensibilidad en el contenido armónico de las tensiones de la barra, debido a la circulación de armónicas de corriente y al proceso de conmutación del puente. Por esta razón el THD de corriente no puede disminuir en la validación experimental por debajo del 10%.

#### REFERENCIAS

- [1] B. K. Chen and B. S. Guo, "Three phase models of specially connected transformers," (IEEE Trans. Power Delivery, vol. 11, pp. 323–330, Jan.1996).
- [2] G. W. Chang, H. W. Lin, and S. K. Chen, "Modeling characteristicsof harmonic currents generated by high-speed railway traction drive converters," (IEEE Trans. Power Delivery, vol. 19, pp. 766–733, Apr. 2004).
- [3] R. E. Morrison, "Power quality issues on ac traction systems," (in Proceedings Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2000, vol. 2, pp. 709–714, 2000).
- [4] Z. Sun, X. Jiang, D. Zhu, and G. Zhang, "A novel active power quality compensator topology for electrified railway," (IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, pp. 1036–1042, July 2004).
- [5] S. T. Senini and P. J. Wolfs, "Novel topology for correction of unbalanced load in single phase electric traction systems," (in IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC 02., vol. 3, pp. 1208–1212, 2002).
- [6] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes., Instantaneous power theory and applications to power conditioning. (New Jersey: Wiley-IEEE, 2007).
- [7] P. Cortés, J. Rodríguez, P. Antoniewicz, and M. Kazmierkowski, "Direct ower control of an AFE using predictive control," (IEEE Trans. Power Electron., vol. 23, pp. 2516–2523, Sept. 2008).
- [8] M. Giménez, V. Guzmán, J. Restrepo, J. Aller, A. Bueno, J. Viola, A. Millán, and A. Cabello, "Plataforma: Development of an integrated dynamic test system for power electronics systems performance analysis," (Revista de la Facultad de Ingeniería – UCV, vol. 23, no. 3, pp. 91– 92, 2008).
- [9] J. Rodríguez, J.-S. Lai, and F. Z. Peng, "Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications," (IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, pp. 724–738, Aug. 2002).
- [10] J. Restrepo, J. Aller, A. Bueno, J. Viola, A. Berzoy, and T. Habetler, "Direct power control of a dual converter operating as synchronous rectifier," (IEEE Trans. Power Electron. Vol. 26, no. 5, pp. 1140-1417, May. 2011).
- [11] IEEE, "Std 1159-1995 IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality". (IEEE Standards Coordinating Committee, 1995).