



Comité Nacional Venezolano

I CONGRESO VENEZOLANO DE REDES Y ENERGÍA ELÉCTRICA

Noviembre 2007

364

Sistema de Compensación para Sistemas de Tracción Eléctricos con Transformador Scott

Bueno, A.; Aller, J. M. y Restrepo, J.

Universidad Simón Bolívar. Valle de Sartenejas. Baruta. Edo. Miranda. Caracas 1080-A.

RESUMEN

En los sistemas eléctricos de tracción para el transporte masivo de pasajeros se utilizan frecuentemente transformadores tipo Scott para la alimentación de las catenarias que suministran energía al material rodante, tal es el caso de Venezuela en el tramo Cúa-Caracas. Este transformador permite convertir de un sistema trifásico de alimentación a dos monofásicos desfasados en noventa grados. En el caso del Ferrocarril Ezequiel Zamora se alimentan cada uno de los tramos Caracas-Charallave y Charallave-Cúa con uno de estos devanados monofásicos. Por la topología del trazado de la vía y la distancia de la misma en cada tramo, la demanda del servicio y la dinámica del tren originan que el consumo de energía en cada circuito monofásico sea desequilibrado, esto se traduce en la circulación de corrientes desbalanceadas en el sistema trifásico que produce hasta un 20% de componente de secuencia negativa en condiciones normales de operación. Este trabajo presenta un sistema de compensación basado en el control mediante vectores espaciales de un rectificador activo por IGBT's. Este controlador optimiza las potencias activas y reactivas instantáneas para balancear el sistema trifásico desequilibrado por la operación normal de los trenes en ambos circuitos. Adicionalmente, el sistema de compensación propuesto permite minimizar el impacto armónico y el factor de distorsión armónica total (THD) introducido al sistema de potencia trifásico de alimentación por los rectificadores activos existentes en el material rodante.

PALABRAS CLAVE

Rectificación Activa, Sistema Ferroviario, Control Vectorial, Potencia activa y reactiva instantánea.

▣ INTRODUCCIÓN

El punto de operación de un sistema ferroviario eléctrico, cambia continuamente en función de la velocidad y la carga de cada uno de los trenes que lo integran. El consumo de potencia de los trenes repercute en el sistema de potencia de alimentación en un bajo factor de potencia, altos contenidos armónicos en la corriente y circulación de corrientes de secuencia negativa en el sistema. En el caso de los sistemas ferroviarios con alimentación a través de transformadores Scott la circulación de corriente de secuencia negativa se acentúa, si ambos devanados (fase 0° y fase 90°) no poseen la misma carga en un instante de tiempo determinado.

Las primeras soluciones planteadas para reducir este problema, fue la utilización de compensadores estáticos de reactivos y filtros armónicos en cada uno de los alimentadores secundarios del Scott sin tomar en cuenta el efecto del acoplamiento entre los dos devanados y su efecto sobre el sistema trifásico de alimentación. Estos esquemas permitieron aumentar el factor de potencia y reducir el contenido armónico de las corrientes inyectadas al sistema trifásico, pero no tienen un mayor efecto sobre los porcentajes de corriente de secuencia negativa inyectadas al sistema de potencia.

Algunos autores [1,2] han propuesto esquemas de filtros activos compuestos por dos convertidores electrónicos monofásicos conectados a cada uno de los alimentadores secundarios del Scott, estos convertidores comparten la alimentación desde una barra de corriente continua. Estos esquemas permiten compensar el alto contenido armónico y la secuencia negativa introducida al sistema de potencia trifásico por la operación del tren, utilizan complejos algoritmos de control y dos puentes convertidores de potencia. Los esquemas de control utilizados en estos trabajos, se basa en determinar la compensación de corriente de cada alimentador a partir de la teoría de potencia reactiva instantánea. En el 2004 Zhuo, Xinjian, Dongqi y Guixin [3], propone un esquema de compensación basado en la teoría de potencia reactiva instantánea con un solo puente convertidor de potencia trifásico, con la utilización de un transformador Scott auxiliar.

En este trabajo se propone un sistema de compensación para sistemas de tracción eléctricos alimentados con transformadores Scott, utilizando un rectificador activo trifásico, basado en los esquemas de control por optimización de potencia activa y reactiva instantánea con la finalidad de reducir el contenido armónico y la secuencia negativa de las corrientes consumidas de la barra de alimentación del sistema trifásico y por otra parte controlar el factor de potencia en dicha barra.

SISTEMA DE COMPENSACIÓN

En la figura 1, se presenta el esquema típico de alimentación de un sistema de tracción eléctrico mediante transformador Scott. El sistema de potencia trifásico de 115 kV es reducido a dos sistemas monofásicos a noventa grados de 25 kV cada uno a través del transformador Scott. En el caso de Venezuela el sistema ferroviario Ezequiel Zamora Etapa I, la fase de 0° del Scott alimenta el tramo Charallave – Caracas mientras que la fase de 90° alimenta al tramo Charallave – Cúa. Por las diferencias de distancia de ambos tramos, pendientes del recorrido, topología del trazado de la vía y flujo de pasajeros la fase de 0° se encuentra normalmente más cargada que la de 90° , lo cual se traduce en una inyección de corriente de secuencia negativa al sistema de potencia de entre el 10 y 20% de la corriente de operación. En la figura 2, se presenta el esquema de control de la compensación propuesta utilizando un rectificador activo trifásico, conectado a la barra del sistema de potencia a través de un transformador elevador, debido a las limitaciones de tensión de los semiconductores de potencia.

MODELO DEL TRANSFORMADOR SCOTT

En la figura 3, se observa un diagrama esquemático del transformador Scott, un modelo ideal de este equipo se puede obtener al determinar la relación de transformación de las tensiones y corrientes, aplicando las leyes de Faraday y Ampere respectivamente:

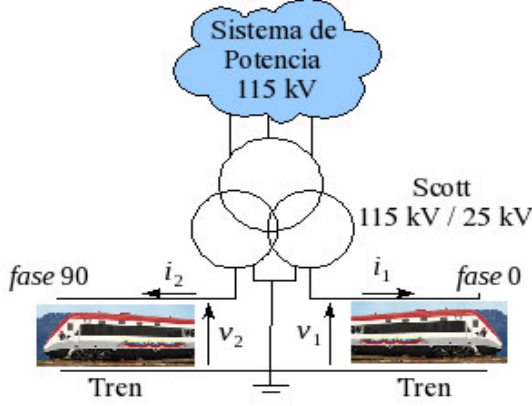


Figura 1: Sistema de tracción con Scott.

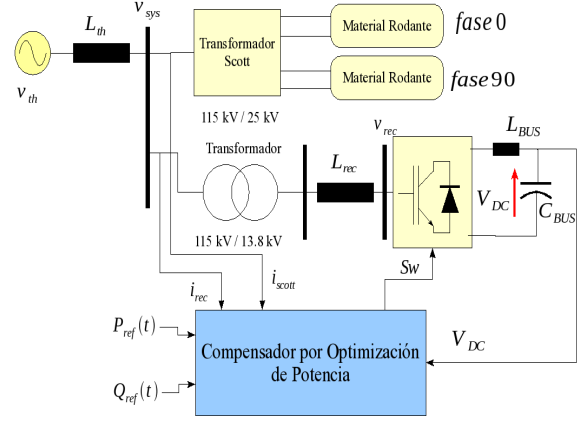


Figura 2: Sistema de compensación propuesto

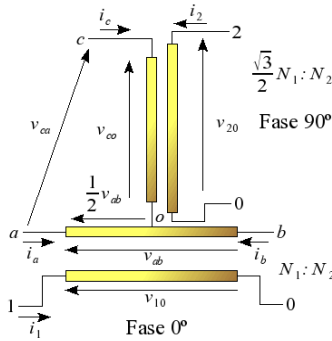


Figura 3: Esquema del transformador Scott

$$v_{ab} = a v_{10} ; v_{co} = \frac{\sqrt{3}}{2} a v_{20} ; \frac{\sqrt{3}}{2} a i_c = i_2 ; \frac{a}{2} (i_a - i_b) = i_1 \quad (1)$$

Donde:

a es la relación de transformación N_1 / N_2 .

Siguiendo las mallas de tensión del primario del transformador Scott se determina la tensión v_{co} , a partir de las tensiones v_{ca} y v_{bc} como:

$$v_{co} = \frac{1}{2} (v_{ca} - v_{bc}) \quad (2)$$

A partir de las expresiones (1), se obtienen las tensiones línea-línea del primario como función de las tensiones del secundario del transformador Scott:

$$v_{ab} = a v_{10} ; v_{bc} = -a \left(\frac{1}{2} v_{10} + \frac{\sqrt{3}}{2} v_{20} \right) ; v_{ca} = -a \left(\frac{1}{2} v_{10} - \frac{\sqrt{3}}{2} v_{20} \right) \quad (3)$$

El vector espacial de la tensión del primario se puede obtener directamente a partir de las tensiones línea-línea mediante la siguiente expresión:

$$\vec{v}_e = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{a}{1-\alpha^2} \{ v_{ab} + \alpha v_{bc} + \alpha^2 v_{ca} \} \quad (4)$$

Donde: α es el número complejo $e^{j\frac{2\pi}{3}}$
 Sustituyendo las tensiones línea-línea obtenidas en (3), en la expresión (4) se obtiene el vector espacial de las tensiones en función de las tensiones bifásicas del transformador Scott:

$$\vec{v}_e = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\alpha}{1-\alpha^2} \{v_{10} - jv_{20}\} \quad (5)$$

Utilizando las expresiones (1) y recordando que en un sistema trifásico sin retorno por neutro la suma de las tres corrientes es cero $i_a + i_b + i_c = 0$, se obtienen las corrientes i_a , i_b e i_c como función de las corrientes que circulan en el lado bifásico i_1 e i_2 :

$$i_a = \frac{1}{a} \left(i_1 - \frac{1}{\sqrt{3}} i_2 \right); \quad i_b = -\frac{1}{a} \left(i_1 + \frac{1}{\sqrt{3}} i_2 \right); \quad i_c = \frac{2}{a\sqrt{3}} i_2 \quad (6)$$

Reemplazando las expresiones (6) en la definición del vector espacial de la corriente, se obtiene:

$$\vec{i}_e = \sqrt{\frac{2}{3}} \{i_a + \alpha i_b + \alpha^2 i_c\} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{1}{a} \left\{ \left(i_1 - \frac{1}{\sqrt{3}} i_2 \right) - \alpha \left(i_1 + \frac{1}{\sqrt{3}} i_2 \right) + \alpha^2 \frac{2}{\sqrt{3}} i_2 \right\} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{1}{a} \{ (1-\alpha) i_1 - \sqrt{3} \alpha^2 i_2 \} \quad (7)$$

MODELO DEL MATERIAL RODANTE

Los trenes se alimentan del sistema bifásico, generalmente cada dirección del recorrido se conecta con una fase determinada. Esto ocasiona desequilibrios en el consumo de potencia porque de acuerdo con los horarios y las características del trazado, cada fase se encuentra cargada diferente. Si un trazado tiene preponderantemente pendiente positiva o negativa, la carga de los trenes en cada ramal será diferente. Los trenes se conectan mediante el pantógrafo a una de las fases, La tensión de la catenaria se rectifica mediante un convertidor electrónico activo que alimenta una barra de corriente continua con una corriente que está en fase con la tensión de la catenaria, pero cuya magnitud depende de las condiciones de carga del sistema. La tensión de la barra de corriente continua posteriormente es invertida electrónicamente para accionar los motores de tracción y alimentar los servicios auxiliares. Los convertidores de corriente alterna a corriente continua que extraen la energía de la catenaria, inyectan corrientes al sistema eléctrico. Un espectro típico de las corrientes armónicas inyectadas al sistema posee un contenido armónico aproximado de 10% de tercera armónica y 1% de quinta armónica, tanto en la operación de tracción como de frenado [4].

Un modelo simple de la carga consiste en considerar que los trenes consumen una corriente proporcional a la tensión del secundario:

$$v_{10} = -k_1 i_1; \quad v_{20} = -k_2 i_2 \quad (8)$$

Los signos negativos se deben a que se ha establecido como convención que las corrientes entran a las bobinas del transformador.

PUENTE RECTIFICADOR ACTIVO

En la figura 4a, se presenta el esquema de un rectificador activo trifásico. El modelo en vectores espaciales del puente rectificador puede ser obtenido modelando los dispositivos semiconductores de potencia como un conjunto de interruptores que varía su estado en cada instante del tiempo

dependiendo de la estrategia de control empleada. Para un puente rectificador con una barra de corriente continua definida en tensión, la posición de los interruptores define el vector espacial de tensión a la entrada del puente \vec{v}_{rec} . Con el vector espacial \vec{v}_{rec} y el de corriente de entrada al rectificador \vec{i}_{rec} se puede estimar la tensión del sistema de potencia utilizando la siguiente expresión:

$$\vec{v}_{sys} = \vec{v}_{rec} + L_{rec} p \vec{i}_{rec} \quad (9)$$

Donde, L_{rec} es la inductancia de choque por fase. El vector espacial de tensión del rectificador \vec{v}_{rec} se obtiene a partir de la siguiente expresión [5]:

$$\vec{v}_{rec} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & e^{j\frac{2\pi}{3}} & e^{j\frac{4\pi}{3}} \end{bmatrix} \cdot [v_a \ v_b \ v_c]^t = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & e^{j\frac{2\pi}{3}} & e^{j\frac{4\pi}{3}} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{Sw}^t \cdot V_{DC} \quad (10)$$

Donde, \mathbf{Sw} es un vector que representa el estado de los interruptores del puente de dimensión 3×1 . En este vector, el elemento "1" corresponde al encendido del interruptor superior, mientras que "0" indica el encendido del interruptor inferior de la misma rama. En la figura 4b, se presentan los posibles vectores espaciales de tensión correspondientes a todas las combinaciones posibles de los interruptores para un puente trifásico.

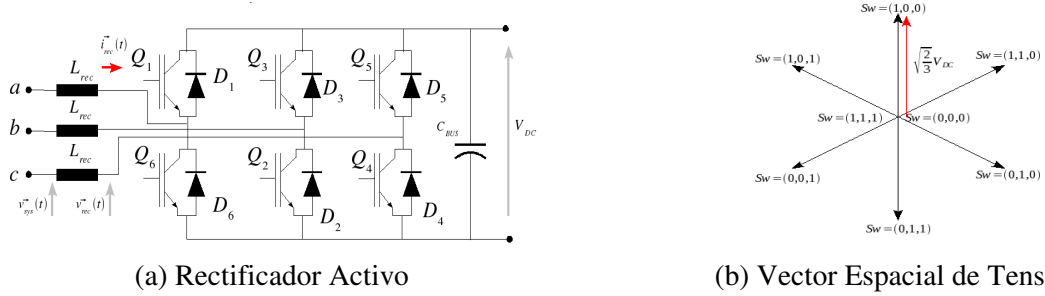


Figura 4: Rectificador activo y vectores espaciales de tensión \vec{v}_{rec} en función del vector de estados \mathbf{Sw} de interruptores

COMPENSADOR POR OPTIMIZACIÓN DE POTENCIA

Calculando la potencia activa y reactiva instantánea en la barra de alimentación del transformador Scott como [5]:

$$\vec{s}(t) = P(t) + jQ(t) = \vec{v}_{sys} \cdot (\vec{i}_{scott} + \vec{i}_{rec})^* \quad (11)$$

Donde:

$$\vec{i}_{scott} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{1}{a} \left\{ (1 - e^{j\frac{2\pi}{3}}) i_1 - \sqrt{3} e^{j\frac{4\pi}{3}} i_2 \right\}; \vec{i}_{rec} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & e^{j\frac{2\pi}{3}} & e^{j\frac{4\pi}{3}} \end{bmatrix} \cdot [i_{a_{rec}} \ i_{b_{rec}} \ i_{c_{rec}}]^t \quad (12)$$

$$\vec{v}_{sys} = \vec{v}_{rec} + (R_{rec} + R_{trx}) \vec{i}_{rec} + (L_{rec} + L_{trx}) p \vec{i}_{rec} \quad (13)$$

El rectificador activo trifásico, puede generar siete posibles vectores espaciales de tensión \vec{v}_{rec} , de acuerdo a las posibles combinaciones de los interruptores que lo conforman. Estas tensiones espaciales se muestran en la figura 4b. Si se establece una función de costo utilizando los errores medios cuadráticos entre la potencia activa y reactiva instantáneas calculadas para una tensión determinada \vec{v}_{rec} y las referencias de potencia activa y reactiva correspondientes, se obtiene:

$$J_k(t + \Delta t) = k_1[\varepsilon P(t) - \Delta P_k]^2 + k_2[\varepsilon Q(t) - \Delta Q_k]^2 \quad (14)$$

Donde:

$$\varepsilon P(t) = P_{ref} - P(t) ; \varepsilon Q(t) = Q_{ref} - Q(t) \quad (15)$$

$$\Delta S_k = \Delta P_k + j \Delta Q_k = \bar{v}_{sys}(t) (\Delta \bar{i})^* \approx \bar{v}_{sys}(t) \left(\frac{\bar{v}_{rec}(k) - \bar{v}_{sys}(t)}{L_{rec} + L_{trx}} \right)^* \Delta t \quad (16)$$

$$\bar{v}_{rec}(k) = \begin{cases} 0, & \forall k = 0,7 \\ \sqrt{\frac{2}{3}} V_{DC} e^{j\frac{2\pi}{6}(k-1)}, & \forall k = 1, \dots, 6 \end{cases} \quad (17)$$

Cuando el vector espacial $\bar{v}_{rec}(k)$ minimiza la función de costo J_k , ecuación (14), en el instante de tiempo t , se obtiene el vector de tensión del puente rectificador que optimiza el flujo de potencia activa y reactiva al sistema. Variando los coeficientes k_1 y k_2 , se privilegia al control de una de las componentes de potencia con respecto a la otra. Escogiendo estos dos coeficientes iguales se obtiene un controlador de potencia aparente instantánea. Cuando la selección del vector espacial de la tensión es capaz de anular en su valor medio a la función de costo, el sistema de control es capaz de ajustar independientemente ambas variables. En caso contrario la selección de los coeficientes k_1 y k_2 , juega un papel importante en el seguimiento de la referencia.

EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL SISTEMA DE COMPENSACIÓN

Para verificar las características del esquema de compensación por potencia activa y reactiva instantánea propuesto, en un sistema de alimentación ferroviaria mediante transformador tipo Scott, se procedió a simular el sistema de potencia de la figura 2, mediante sus ecuaciones en variables de estado deducidas a partir de su modelo en vectores espaciales [5]. Para la resolución del sistema de ecuaciones en variables de estado vectorial se utilizó el método de integración de Runge-Kuta de cuarto orden. El sistema de potencia modelado esta compuesto por: un equivalente thevening del sistema, un transformador Scott, un transformador reductor, un rectificador trifásico activo con IGBT's con sus respectivas inductancias de choque, una carga bifásica que modela las corrientes introducidas por el material rodante y una barra de continua que mantiene la tensión del condensador aproximadamente constante durante la operación del puente.

El sistema de potencia es alimentado por un sistema de tensiones trifásicas sinusoidales, balanceadas de secuencia positiva de valor efectivo uno en por unidad. En la tabla I, se presentan los parámetros utilizados en la simulación para los diferentes componentes que integran el sistema de potencia de la figura 2 en por unidad.

Para evaluar las características dinámicas del compensador se controlará la potencia activa y reactiva instantánea en la barra de alimentación del sistema en $P = 1.0 pu$ y $Q = 0.5 pu$ con cambio en $t = 0.1s$ de la potencia activa a $1.2 pu$ y en la potencia reactiva a $-0.5 pu$ en $t = 0.15s$.

Tabla I: Parámetros para la simulación del sistema de compensación

$L_{th} = 0.037$	$R_{scott} = 0.01$	$L_{scott} = 0.1$	$R_{trx} = 0.01$	$L_{trx} = 0.1$	$R_{rec} = 0.005$	$L_{rec} = 0.05$	$V_{DC} = 3$
------------------	--------------------	-------------------	------------------	-----------------	-------------------	------------------	--------------

Durante la simulación se evaluarán cuatro condiciones diferentes de carga en los devanados secundarios del Scott. Caso 1: operación balanceada con corriente nominal, caso 2: operación

balanceada a corriente nominal con inyección de un 10% de tercer armónico, caso 3: operación con inyección de armónicos con el devanado de 90° al 75% de la carga nominal y el de 0° a 100% y caso 4: operación con inyección de armónicos con el devanado de 90° al 75% de la carga nominal y el de 0° a 50%. En la figura 5, se presenta la potencia activa y reactiva instantánea en la barra de sistema, la cual permanece en los valores de referencia para los cuatro casos. En las figuras 6, 7 y 8 se presenta el oscilograma de corriente en las fases a, b y c que circulan por el Scott, rectificador activo y el sistema de potencia. En la tabla II se presentan los resultados en porcentaje de distorsión armónica total (THD) y porcentaje de circulación de la secuencia positiva y negativa para los corrientes del primario del Scott, rectificador y del sistema.

Tabla II: Porcentaje de THD total por fase y porcentaje de inyección de secuencia positiva y negativa para diferentes condiciones de carga del sistema controlando la potencia activa y reactiva instantánea

Caso	Corriente Scott					Corriente Rectificador					Corriente Sistema				
	THD			Sec (+)	Sec (-)	THD			Sec (+)	Sec (-)	THD			Sec (+)	Sec (-)
	a	b	c			a	b	c			a	b	c		
1	0.0	0.0	0.0	98.59	1.6	0.2	0.2	0.2	65.22	1.53	0.4	0.4	0.4	37.07	0.01
2	9.31	9.57	9.65	91.56	8.27	13.94	15.81	15.10	58.42	8.27	0.5	0.4	0.6	37.16	0.06
3	10.36	10.99	9.69	79.52	9.07	18.13	19.25	15.07	47.26	9.05	0.5	0.9	0.9	37.15	0.04
4	9.88	9.74	10.24	57.31	14.97	22.12	14.83	30.73	27.03	14.92	0.9	2.0	2.8	43.33	0.15

En la figura 5 se puede observar como el sistema de compensación controla los valores de potencia activa y reactiva instantánea manteniendo en factor de potencia controlado, sin retardos ante variaciones de la consigna, por otra parte se puede ver como la estrategia de control del compensador balancea las corrientes en las fases del sistema eliminando la secuencia negativa producida por la circulación de terceros armónicos en el Scott y la operación desbalanceada en sus devanados secundarios. Adicionalmente, el sistema propuesto reduce a valores menores al 1% la circulación de secuencia negativa y los THD de corriente en el sistema cumpliendo lo establecido en las recomendaciones internacional.

CONCLUSIONES

El sistema de compensación propuesto, basado en el control por optimización de potencia activa y reactiva instantánea permite eliminar la circulación de corriente de secuencia negativa en el sistema de potencia que alimenta el sistema de tracción, producto de los armónicos introducidos por los puentes convertidores del material rodante y a la operación desbalanceada en los devanados del transformador Scott.

Este esquema de control reduce el THD de corriente a valores inferiores a lo permitido por la normativa internacional. Adicionalmente, este puente compensador requiere un transformador elevador a fin de acondicionar la tensión del rectificador activo a los niveles de tensión del sistema debido a la limitación en las capacidades de tensión que soportan actualmente los IGBT's.

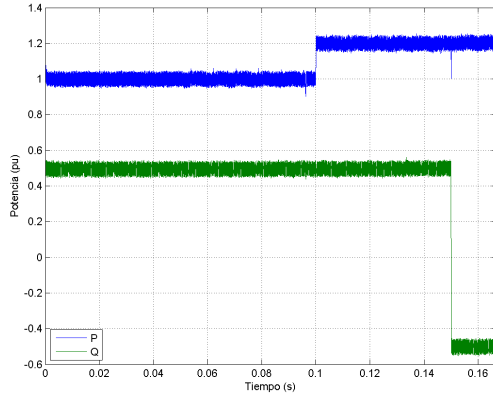


Figura 5: Potencia activa y reactiva instantánea

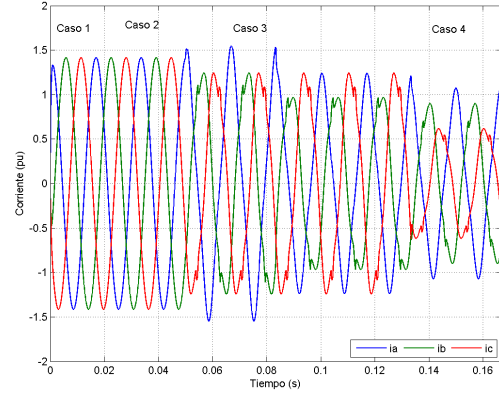


Figura 6: Corriente en el primario del Scott

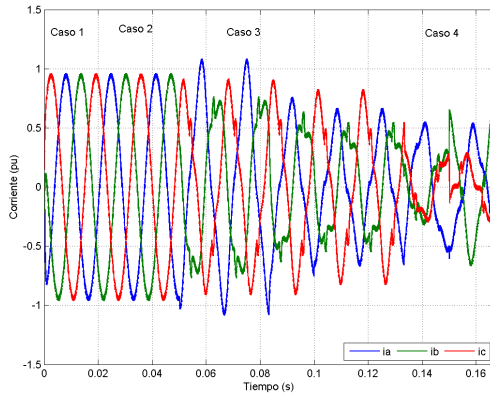


Figura 7: Corriente en el rectificador activo

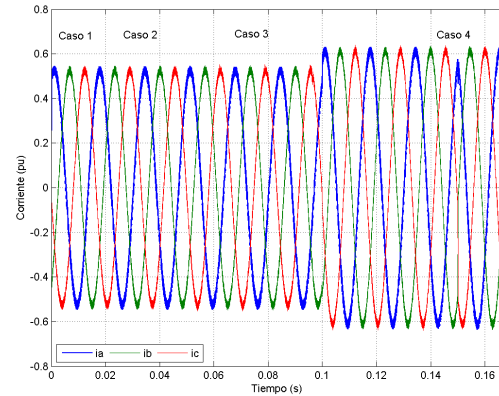


Figura 8: Corriente en el sistema de potencia

BIBLIOGRAFÍA



- [1] S. T. Senini and P. J. Wolfs, "Novel topology for correction of unbalanced load in single phase electric traction systems," (PESC Rec. IEEE Annual Power Electronics Specialists Conf. Cairns, Australia, vol. 3, June 2002, pp. 1208-1212).
- [2] L. Battistelli, D. Lauria, and P. Vernillo, "Control strategy of advanced 25 kV–50 Hz electrified railway systems," (Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 148, pp. 97-104, Jan. 2001).
- [3] Sun, Zhuo, Jiang, Xinjian, Zhu, Dongqi, and Zhang, Guixin: "A novel active power quality compensator topology for electrified railway", (IEEE Transactions on Power Electronics 19(4), 1036 - 1042, 2004).
- [4] Toshiba, "Simulación de armónica alta," (Tech. Rep. DPU-C91-D04, Toshiba, 2004).
- [5] Aller, Jose M., Bueno, Alexander, and Paga, Tomas: "Power system analysis using space-vector transformation", (IEEE Transactions on Power Systems 17(4), 957 - 965, 2002).