

FILTRO ACTIVO DE MÍNIMO COSTO AJUSTADO A LA  
CARGA DE UN HORNO DE ARCO Y A LAS  
REGLAMENTACIONES SOBRE EMISIÓN ARMÓNICA  
APLICABLES

autor

Gonzalo Casaravilla

Puesta en consideración para  
los requerimientos curriculares del título de  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA  
de la  
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA ORIENTAL DEL URUGUAY  
JULIO HERRERA Y REISSIG 565, MONTEVIDEO, URUGUAY

© Derechos de autor de Gonzalo Casaravilla, 2000

Email: [gcp@iie.edu.uy](mailto:gcp@iie.edu.uy)

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA ORIENTAL DEL URUGUAY  
INSTITUTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Los abajo firmantes certificamos que hemos leído el presente trabajo titulado “**Filtro activo de mínimo costo ajustado a la carga de un horno de arco y a las reglamentaciones sobre emisión armónica aplicables**” hecho por **Gonzalo Casaravilla** y encontramos que el mismo satisface los requerimientos curriculares que la Facultad de Ingeniería exige para la tesis del título de **Maestría en Ingeniería Eléctrica**.

Fecha: Mayo de 2000

Director de Tesis: \_\_\_\_\_  
Prof. Cesar Briozzo, M.Sc.

Director Académico: \_\_\_\_\_  
Prof. Ventura Nunes

Tribunal examinador: \_\_\_\_\_  
Ing. Julia Antmann

\_\_\_\_\_  
Prof. Ventura Nunes

\_\_\_\_\_  
Prof. Cesar Briozzo, M.Sc.

\_\_\_\_\_  
Prof. Edson Watanabe, Dr. Ing.

\_\_\_\_\_  
Prof. Rafael Canetti

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA ORIENTAL DEL  
URUGUAY

Fecha: Mayo de 2000

Autor: **Gonzalo Casaravilla**  
Titulo: **Filtro activo de mínimo costo ajustado a la carga  
de un horno de arco y a las reglamentaciones sobre  
emisión armónica aplicables**  
Instituto: **Ingeniería Eléctrica**  
Grado: **Maestría en Ingeniería Eléctrica (M.Sc.)**

Se autoriza a través de la presente a la Universidad de la República Oriental del Uruguay a hacer circular y copiar esta tesis con propósitos no comerciales por requerimientos de individuos o instituciones.

---

Firma del autor

El autor se reserva otros derechos de publicación o utilización de la tesis y/o de extractos de la misma sin su autorización escrita.

El autor declara que obtuvo permiso explícito para el uso de todo material con derecho de autor que aparece en esta tesis (excepto extractos o menciones de trabajos académicos con autorización similar a la actual, cuyo uso es expresamente identificado

*a mis compañeras en la vida:  
mi esposa Silvia,  
mis hijas Emilia y Malena*

# Indice

Indice	vi
Resumen	vii
Agradecimientos	ix
Introducción	1
<b>1 Teoría de la potencia instantánea</b>	<b>6</b>
1.1 Introducción	6
1.2 Enunciados y ecuaciones de teoría de la potencia instantánea	7
1.2.1 Sistema trifásico no ideal	7
1.2.2 Expresión de corrientes y tensiones en función de secuencias y armónicas	8
1.2.3 Transformada de Clarke	9
1.2.4 Enunciado de la Teoría	10
1.2.5 Interpretación de las potencias $p_0$ , $p$ y $q$	10
1.2.6 Teoría aplicada en régimen estacionario de un sistema no ideal	12
1.3 Aplicación a los filtros activos	14
1.4 Filtro activo shunt para eliminar armónicos de corriente	15
1.4.1 Espectro de $p$ y $q$	16
1.4.2 Cálculo de las potencias que deberá tomar el filtro	16
1.4.3 Cálculo de las corrientes que deberá tomar el filtro	20
1.5 Evolución de la teoría y estado de situación actual	21
1.5.1 Desarrollos similares, críticas y comparaciones	21
1.5.2 Aplicaciones de la teoría fuera del área de los filtros activos	23
1.6 Conclusiones del capítulo	24
<b>2 Hornos de arco</b>	<b>25</b>
2.1 Introducción	25
2.2 Ciclo de trabajo típico de un horno de arco	26
2.3 Modelo eléctrico de un horno de arco	26
2.4 Modelo dinámico del arco eléctrico	31



# Resumen

En este trabajo se presenta una forma de diseñar un filtro activo shunt en una aplicación real utilizando la teoría de la potencia activa, reactiva instantánea y adaptándose a la reglamentación aplicable en cuanto a límites de emisión armónica permitida.

El orden en que está organizado el trabajo corresponde al desarrollo de la metodología de análisis propuesta: conocer la reglamentación mediante la cual se nos medirá y sancionará, conocer la carga que representa un horno de arco, para finalmente diseñar el filtro seleccionando estrategias de control e indicadores de costo.

En el capítulo 1 se presenta la teoría de la potencia activa y reactiva instantánea la que se enfoca principalmente en las aplicaciones shunt y en la eliminación de armónicos residuales en las corrientes de línea.

Entre las conclusiones del mismo se destacan los aportes originales de este trabajo tendientes a mejorar la comprensión en el dominio de la frecuencia de esta teoría, ya que ésta es, básicamente, en el dominio del tiempo.

La carga del ejemplo adoptado para este trabajo es la siderurgia Laisa S.A. por lo que en el capítulo 2 se presenta el funcionamiento típico del horno de arco. Se presentan sus ecuaciones características y la forma de control. Queda manifiesta la extrema aleatoriedad del proceso y las dificultades para su caracterización.

En el capítulo ?? se analiza la reglamentación existente internacional y regional. En particular se estudia la Reglamentación Argentina y se compara con las recomendaciones de la IEEE. La conclusión de que la reglamentación Argentina es, por lo menos, el doble menos exigente que la IEEE, hace reflexionar respecto al camino a seguir en nuestro país en donde no hay, hasta ahora, reglamentación al respecto.

En el capítulo ?? se describen las instalaciones del horno de arco elegido como carga a compensar, los registros de tensión y corriente obtenidos, para finalmente modelar la carga típica con la que deberá lidiar el filtro.

Con este último cometido se elabora y propone una forma de modelar la carga a los efectos de diseñar un filtro activo adaptándose a las reglamentaciones aplicables.

Se concluye en este capítulo que los hornos de arco tienen una diversidad de cargas posibles que al momento de modelar *la carga* se deben aplicar métodos estadísticos. En particular, y para este caso de estudio, no es necesario intentar compensar armónicos en los peores momentos, aprovechando el 5% de tiempo en que puedo excederme y no ser penalizado (así lo establece la reglamentación).

En el capítulo ?? se analiza extensamente el diseño del filtro y se determinan los grados de libertad del diseño, en donde se introducen novedosos conceptos de modulación del grado de inyección de corriente respecto a los cálculos teóricos a los efectos de mantener bajo control la distorsión.

También se analiza el diseño del filtro pasa altos interno del filtro activo que separa las frecuencias de la corriente que se eliminan y las que no se alteran.

Finalmente se llega a valores característicos constructivos del filtro activo como ser tensiones nominales, su capacitor en el bus de continua y corrientes máximas por las llaves de su inversor.

En el capítulo ?? se describen algunas otras tareas que puede hacer el filtro activo una vez instalado. En particular estudia su utilización para compensar corrientes homopolares y potencia reactiva. Es interesante destacar que si bien el filtro se lo diseña inicialmente para cierta tarea, con un simple cambio en la estrategia de control, puede brindar otras prestaciones.

Si bien cada capítulo tiene sus conclusiones específicas, en el capítulo ?? se ven las conclusiones generales en donde se destaca que cualquier acercamiento a clientes con este tipo de cargas con distorsiones armónicas considerables debe ser gradual, y quizás, este allí la explicación de lo poco restrictiva hacia los usuarios que resulta la reglamentación Argentina usada como referencia.

Finalmente el capítulo ?? describe las tareas que nos hubiese gustado poder agregar a este trabajo, las que serán importantes hacer pensando en la aplicación tecnológica estudiada y los futuros aportes a la teoría de la potencia instantánea que quedan planteados a partir de este trabajo.



# Agradecimientos

A la Universidad de la República por haberme dado la oportunidad de realizar esta Tesis de maestría como parte de las actividades propias de mi actividad Docente, destacándose en particular, las autoridades del IIE, la SCAPA del IIE y la CSIC.

A la Profesora Ventura Nunes, quien ha aportado toda su experiencia en su calidad de Directora Académica de la Maestría, creando asimismo, como Jefa del Departamento de Potencia que integro, las condiciones necesarias para poder realizar esta actividad dentro del plan de actividades del mismo.

Al Profesor César Briozzo, Director de Tesis de Maestría, indispensable en aquellos aspectos en los que indiscutiblemente es referente Nacional al respecto, cuyo rigor y esmero mejoraron este trabajo.

A la UFRJ-COPPE<sup>1</sup>, personificados en el Profesor Edson Watanabe, que posibilitó la realización de pasantías en dicho centro de formación de postgrados y que le dio a esta tesis un impulso significativo con su especial experiencia en el tema de la misma.

A la empresa UTE<sup>2</sup> y muy especialmente al Ing. Daniel Castagna por el suministro de los datos adquiridos en campo en los que se basa este trabajo.

Al Profesor André Fonseca quien me ayudó a poder documentar este trabajo enseñándome los misterios del editor de texto L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

Montevideo, Mayo de 2000  
Gonzalo Casaravilla

---

<sup>1</sup>Universidad Federal de Río de Janeiro, coordinación de Programas de Postgraduación en Ingeniería

<sup>2</sup>Usinas y Transmisiones Eléctricas del Estado

# Introducción

La pregunta hecha por alguien

*¿Podría un filtro activo utilizarse para resolver este problema que tengo?*

es un trabajo de Ingeniería aplicada que

*debe unir teoría, políticas y soluciones armónicamente conjugadas.*

Los sistemas eléctricos de transmisión y distribución están sufriendo desde hace algunas décadas y en forma creciente las consecuencias de la adopción de nuevas tecnologías en la producción industrial. Se ha venido instalando equipamientos, que si bien cada vez son más eficientes y sofisticados, tienen como contrapartida una interacción con los sistemas de distribución y transmisión de energía eléctrica existentes que perjudica de múltiples formas la performance y calidad del servicio ofrecido por estos últimos.

Esto es fácil entender a nivel domiciliario, en donde un simple Dimmer (aquel que nos permite regular la intensidad lumínica), nos ofrece prestaciones satisfactorias. Si casualmente tenemos la radio en AM conectada cerca del Dimmer, notaremos que se produce un ruido molesto. Este ruido puede ser de fácil solución alejando la radio del lugar.

En cambio el proveedor del servicio eléctrico deberá soportar las ondas de corrientes armónicas que este simple dispositivo introduce en la red de distribución.

De la misma forma, a nivel industrial existen equipos convertidores de energía, que transforman la tensión alterna entregada por el servicio eléctrico en tensiones y corrientes adecuadas para distintos procesos industriales como carga de baterías, procesos de electrólisis, control de velocidad de motores, fundiciones en hornos de arco, soldaduras, etc.

Estos convertidores, si bien ofrecen desde el punto de vista del proceso industrial muy buenas características técnico económicas, se transforman en el peor enemigo del sistema de distribución de energía por su particular forma de consumirla.

Todos estos convertidores introducen en la red de distribución armónicos de corriente que se transformarán en distorsiones en la tensión suministrada a otros usuarios, pérdidas por calentamiento y por lo tanto pérdida de capacidad de los elementos constitutivos de la red de distribución y transmisión como ser transformadores, líneas, bancos de condensadores, reactores y cables eléctricos e interferencias electromagnéticas en otros servicios basados en la electrónica (telefonía, radio, computadoras, PLC, equipos médicos, etc.).

Un claro ejemplo de esto es la experiencia que se ha tenido con una siderúrgica de plaza. Cuando operaba su horno de arco, nadie en el barrio podía escuchar la radio o ver televisión sin molestias. La *solución* fue conectar a este consumidor de tan solo 12MVA de potencia contratada en el sistema de sub transmisión (red de 150kV) llevándole el problema a éste, a un costo posiblemente elevado y sin la eliminación del problema, dado que el gran contenido de armónicos sigue estando presente en el sistema eléctrico, con las consecuencias ya descritas.

Otro ejemplo de influencia perjudicial en el sistema eléctrico, si se quiere aún más grave que el anterior, por su dispersión, es el consumo fuertemente no lineal del equipamiento asociado a todos los ambientes de oficina. Tanto la iluminación, basada en tubos fluorescentes, como los sistemas de computación, introducen también corrientes armónicas. La magnitud del problema es evidente cuando se constata la proliferación de estos equipos.

Una forma clásica de solucionar parcialmente el problema de armónicos es la utilización de filtros pasivos, pero éstos presentan grandes problemas. Su falta de control continuo hace que su inserción cambie la dinámica del sistema generándose oscilaciones e inestabilidades en el mismo. Por otra parte no son selectivos.

Al poner un filtro en bornes del sistema, este filtrará todos los armónicos, los que genera y quiere eliminar el causante del problema y los generados por otras fuentes externas de armónicos provenientes de instalaciones vecinas. Esto causa sobrecargas no previstas en el filtro instalado debido al consumo adicional respecto al previsto.

Surgen por tanto en consideración los filtros activos paralelos (shunt), que además de disminuir o eliminar los armónicos de corriente no deseados, potencialmente podrían lograr un buen funcionamiento integral para todo el sistema y ofrecer la capacidad

de seleccionar qué armónicos filtrar y cuánto.

Si se resuelve adecuadamente los problemas asociados a su control, su empleo puede llegar a difundirse incluso como solución general al problema de los sistemas eléctricos en cuanto a su estabilidad, balance de potencia reactiva, desbalances de tensión y calidad general del servicio.

Esta tecnología, de bases teóricas establecidas, es en este momento motivo de investigación intensiva debido a que la evolución de la Electrónica de Potencia y la velocidad de procesamiento de los sistemas de control permiten su implementación real.

La teoría de la potencia instantánea (Akagi et al., 1983) se ha utilizado para compensar desbalances y armónicos obteniéndose resultados notables, pero de costo relativamente elevado, cuando son llevados a la práctica en forma indiscriminada. En particular, los hornos de arco causan gran distorsión, llegando a valores extremos de 30% que, si se pretende compensar toda, el filtro activo asociado puede resultar muy grande y costoso.

La tecnología de los filtros activos utilizando la teoría de la potencia instantánea ya he sido probada y es aplicada en forma masiva fundamentalmente en Japón. Trabajos como (Akagi, 1997) y (Akagi, 1998) con claros referentes al respecto llegando a establecer precios a mediano plazo que harán de estas aplicaciones una rutina frecuente y obligada.

*¿Hay reglas de juego claras?*

Si bien desde el punto de vista purista es deseable la compensación total, todo lo que se haga mas allá de lo que nos exijan las normas y reglamentaciones aplicables será sin retorno económico y por tanto un mal trabajo de Ingeniería.

Todo esto deberá estar guiado por una reglamentación clara y aplicable. Hoy en día en Uruguay no hay tradición ni reglamentación aplicable contra *malos* clientes desde el punto de vista de la contaminación armónica que introducen en las redes de donde se alimentan. En la región, lo mas avanzado parece ser un decreto Argentino que tiene problemas políticos y técnicos para ser aplicado, pero es sin lugar a duda el referente más fuerte que debe tener Uruguay pensando en un mercado eléctrico regional integrado.

La utilización de filtros paralelos se presenta potencialmente muy factible, dado que no requiere modificaciones mayores de la instalación existente para su conexión

y es de realización modular, lo cual permite su utilización racional, re-ubicación, crecimiento progresivo, etc, todas estas virtudes que hacen económica y técnicamente más factible su implementación y aplicación.

*¿Qué podemos aportar en este campo de investigación?*

La teoría de la potencia instantánea se basa esencialmente en expresiones analíticas en el dominio del tiempo y ha sido poco explorado su traslado al dominio de la frecuencia (Monteiro, 1997), lo cual resulta atractivo cuando se debe diseñar el filtro pasa altos que separa qué armónicos de corriente se quiere sintetizar con el filtro y cuales no.

Por otra parte, no hay antecedentes de trabajos que modulen el grado de inserción de corriente resultante del cálculo teórico de tal modo de mantener bajo control la distorsión armónica de corriente.

*¿Por qué el tema de la tesis?*

La selección del tema específico de la tesis tiene tres claras razones. Primero y más importante, el tema nos apasionó desde el momento que el Prof. Watanabe diera su conferencia sobre la teoría de la potencia instantánea en el Instituto de Ingeniería Eléctrica a fines de 1998.

En segundo lugar, inicialmente el tema de maestría estaba centrado en aplicaciones de la Electrónica de Potencia en los sistemas Eléctricos de Potencia y como caso de estudio aplicado se había elegido el horno de arco que finalmente se utilizó como ejemplo.

Las herramientas y vertiente de estudio eran las tecnologías FACTS. Luego de la citada conferencia, no quedó duda hacia donde encaminar el esfuerzo. El tema era interesante, tenía campo para investigar, tenía una aplicación Nacional y se enmarcaba en las líneas de trabajo del Departamento que integro.

Como tercer y último factor, la colaboración de personal de UTE (Empresa Eléctrica del Estado) que facilitó para el estudio del caso en particular datos que de otra forma hubiese sido imposible conseguir.

*¿Qué aportaremos en nuestro entorno tecnológico?*

No se cuenta en el país con el conocimiento teórico ni práctico de los filtros activos controlados con la teoría de la potencia instantánea. El contar con dicho conocimiento contribuirá a la solución técnico práctica del problema planteado, conocimiento que permita comprender todos los aspectos involucrados, las diferentes opciones tecnológicas, la evolución futura de las mismas y la capacidad de diseño y especificación de requerimientos para su posterior implementación en la Industria Nacional o regional.

# Capítulo 1

## Teoría de la potencia instantánea

### 1.1 Introducción

La teoría de la potencia instantánea activa y reactiva, en la forma que actualmente se conoce con notación y definiciones claras y prácticas de ser utilizada, fue presentada en (Akagi et al., 1983) y (Akagi et al., 1984). En sus 16 años de existencia ha tenido logros y críticas los cuales se verán en el apartado 1.5.1. Si bien su aplicación inmediata son los filtros activos, los cuales serán tratados en el apartado 1.3, tiene muchas otras vertientes de aplicación las que serán vistas en el apartado 1.5.2.

Sin lugar a duda el gran avance que han tenido éstas, como otras aplicaciones, ha venido de la mano de los avances en la Electrónica de Potencia. El trabajo (Akagi, 1997) plantea, solo para Japón, el estado de situación de la Electrónica de Potencia y sus aplicaciones en los Sistemas Eléctricos de Potencia. En este Artículo y en (Akagi, 1996) se consigna el gran impacto de los filtros activos en este país, en donde en 1996 ya se contaba con 500 equipos instalados, con equipos que se separan en dos campos, compensación de armónicos y compensación de desbalances de tensión. Las potencias de los mismos van desde 50kVA a 60MVA, en donde las aplicaciones shunt prevalecen netamente sobre las aplicaciones serie. Es solo en la categoría de filtros activos shunt donde se encuentran fabricantes con productos estándar. En (Akagi, 1998) se comenta que equipos desde 10kVA a 2MVA construidos con IGBTs deberán arribar al precio de 200-300U\$ el kVA.

El mayor emprendimiento con filtros activos es el set de 3 filtros activos de 16MVA/12MW (total 48MVA) instalados en el sistema de trenes bala japonés (las máquinas toman energía en forma monofásica de un sistema trifásico) con el objetivo de compensar desbalances de tensión compensando la secuencia negativa del primer armónico cuando pasa el tren por cada centro de transformación.

## 1.2 Enunciados y ecuaciones de teoría de la potencia instantánea

### 1.2.1 Sistema trifásico no ideal

#### Armónicos de tensión y corriente

Los sistemas reales tienen formas de corriente y tensión que no siempre son todo lo sinusoidales que nos gustaría. En el caso de tener un sistema en régimen estacionario (Watanabe et al., 1993), podemos establecer que tanto la corriente como la tensión pueden ser representadas por su descomposición en las componentes de Fourier (espacio de funciones sinusoidales de frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental).

La expresión 1.2.1.1 para la corriente, y 1.2.1.2 para la tensión, muestran esta descomposición en donde los ángulos  $\delta$  y  $\phi$  son respectivamente el desfase entre la componente particular y la fundamental. Las letras a, b y c son las tres fases del sistema trifásico.

$$i_k(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{kn} \sin(\omega_n t + \delta_{kn}); \quad k = (a, b, c) \quad (1.2.1.1)$$

$$v_k(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_{kn} \sin(\omega_n t + \phi_{kn}); \quad k = (a, b, c) \quad (1.2.1.2)$$

Dado que estamos tratando con sistemas trifásicos reales, en los cuales las componentes armónicas en la tensión son generalmente relativamente menores que las de corriente. Por otra parte a medida que subimos desde la BT (baja tensión) en distribución a AT (alta tensión) en generación o transmisión, las componentes armónicas de tensión y corriente deberían ser cada vez relativamente menores.

#### Desbalances de carga

El otro aspecto que hace que un sistema trifásico no sea ideal es que la carga no es balanceada. La forma clásica para representar este aspecto es la descomposición de los vectores (fasores) del sistema trifásico en sus componentes simétricas (Fortescue, 1918) directa, inversa y homopolar. Esta descomposición se puede aplicar a la corriente y a la tensión y para cada una de las armónicas de ambas ternas. En 1.2.1.3 se ve como quedan las secuencias de corriente y en 1.2.1.4 las de tensión con el operador  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$  que no es otra cosa que una rotación en el espacio complejo de



120°. Por ejemplo  $V_{+1}$  es secuencia positiva de la componente fundamental y  $V_{-3}$  es la secuencia negativa de la tercera armónica de tensión.

$$\begin{bmatrix} I_{0n} \\ I_{+n} \\ I_{-n} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{an} \\ I_{bn} \\ I_{cn} \end{bmatrix} \quad (1.2.1.3)$$

$$\begin{bmatrix} V_{0n} \\ V_{+n} \\ V_{-n} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (1.2.1.4)$$

## 1.2.2 Expresión de corrientes y tensiones en función de secuencias y armónicas

Si combinamos las expresiones 1.2.1.1 de la corriente en función del tiempo y sus armónicas, la descomposición en componentes simétricas vista en 1.2.1.3 y el hecho de que las fases para un sistema horario (directo) están a 120° entre sí ( fase a adelantada respecto a la fase de b, etc.) , podemos escribir la expresión de la corriente como muestra 1.2.1.5

En forma similar se puede escribir para la tensión 1.2.1.6.

Se recuerda que la definición de armónicos supone, tal como se expresó en el apartado 1.2.1, funcionamiento en régimen estacionario.

$$\begin{aligned} i_{an} &= \sqrt{2}I_{0n} \sin(w_n t + \delta_{0n}) + \\ &\quad \sqrt{2}I_{+n} \sin(w_n t + \delta_{+n}) + \\ &\quad \sqrt{2}I_{-n} \sin(w_n t + \delta_{-n}) \\ i_{bn} &= \sqrt{2}I_{0n} \sin(w_n t + \delta_{0n}) + \\ &\quad \sqrt{2}I_{+n} \sin(w_n t + \delta_{+n} - \frac{2\pi}{3}) + \\ &\quad \sqrt{2}I_{-n} \sin(w_n t + \delta_{-n} + \frac{2\pi}{3}) \\ i_{cn} &= \sqrt{2}I_{0n} \sin(w_n t + \delta_{0n}) + \\ &\quad \sqrt{2}I_{+n} \sin(w_n t + \delta_{+n} + \frac{2\pi}{3}) + \\ &\quad \sqrt{2}I_{-n} \sin(w_n t + \delta_{-n} - \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (1.2.1.5)$$

$$\begin{aligned}
 v_{an} &= \sqrt{2}V_{0n} \sin(w_n t + \phi_{0n}) + \\
 &\quad \sqrt{2}V_{+n} \sin(w_n t + \phi_{+n}) + \\
 &\quad \sqrt{2}V_{-n} \sin(w_n t + \phi_{-n}) \\
 v_{bn} &= \sqrt{2}V_{0n} \sin(w_n t + \phi_{0n}) + \\
 &\quad \sqrt{2}V_{+n} \sin(w_n t + \phi_{+n} - \frac{2\pi}{3}) + \\
 &\quad \sqrt{2}V_{-n} \sin(w_n t + \phi_{-n} + \frac{2\pi}{3}) \\
 v_{cn} &= \sqrt{2}V_{0n} \sin(w_n t + \phi_{0n}) + \\
 &\quad \sqrt{2}V_{+n} \sin(w_n t + \phi_{+n} + \frac{2\pi}{3}) + \\
 &\quad \sqrt{2}V_{-n} \sin(w_n t + \phi_{-n} - \frac{2\pi}{3})
 \end{aligned} \tag{1.2.1.6}$$

### 1.2.3 Transformada de Clarke

Una de las tantas transformaciones (directa e inversa) de un sistema trifásico a uno bifásico ortogonal (ya que el primero es redundante para definir un vector en un plano) es la transformada de Clarke (Clarke, 1943). En 1.2.1.7 se aprecia la aplicación de esta transformación para el fasor de corriente y en 1.2.1.8 para la tensión, quedando por tanto definidas las componentes  $x_o, x_\alpha, x_\beta$  (x es corriente o tensión).

$$\begin{bmatrix} i_o \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{1.2.1.7}$$

$$\begin{bmatrix} v_o \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \tag{1.2.1.8}$$

Las transformadas inversas para pasar del sistema  $(0, \alpha, \beta)$  al sistema  $(a, b, c)$  son las indicadas en 1.2.1.9 y 1.2.1.10 respectivamente.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{1.2.1.9}$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_o \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (1.2.1.10)$$

### 1.2.4 Enunciado de la Teoría

La definición de potencia instantánea homopolar  $p_0$ , potencia instantánea  $p$  y potencia reactiva instantánea  $q$  queda determinada por 1.2.1.11 en donde ya se ha introducido, lo cual es aceptado ya internacionalmente, el cambio de signo de  $q$  respecto del original propuesto en (Akagi et al., 1983) para que  $q$  de valores medios positivos con corrientes atrasadas (inductivas) respecto al fundamental positivo de tensión. El desarrollo de 1.2.1.11 arroja la definición de  $p_0$  en 1.2.1.12, de  $p$  en 1.2.1.13 y de  $q$  en 1.2.1.14.

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (1.2.1.11)$$

$$p_0 = v_0 \cdot i_0 \quad (1.2.1.12)$$

$$p = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta \quad (1.2.1.13)$$

$$q = v_\beta \cdot i_\alpha - v_\alpha \cdot i_\beta \quad (1.2.1.14)$$

### 1.2.5 Interpretación de las potencias $p_0$ $p$ y $q$

La potencia instantánea de un sistema trifásico está claramente definida tal como muestra 1.2.1.15. Si sustituimos en esta ecuación las ecuaciones del vector de tensión y corriente tal como muestran 1.2.1.10 y 1.2.1.9 obtendremos operando 1.2.1.16.

$$p_3 = v_a \cdot i_a + v_b \cdot i_b + v_c \cdot i_c = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}^t \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \quad (1.2.1.15)$$

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \right\}^t \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_o \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \\
 & \begin{bmatrix} i_o \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}^t \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}^t \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}}_I \begin{bmatrix} v_o \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \\
 & \begin{bmatrix} i_o \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}^t \begin{bmatrix} v_o \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta + v_o \cdot i_o \quad (1.2.1.16)
 \end{aligned}$$

Si observamos 1.2.1.12 y 1.2.1.13 vemos que se puede decir, sin lugar a dudas, que la potencia activa instantánea trifásica es la suma de  $p_0$  y  $p$  definidos en el apartado 1.2.4 lo cual queda plasmado en 1.2.1.17.

$$p_3 = p_0 + p \quad (1.2.1.17)$$

Por otra parte sustituyendo en 1.2.1.14 las definiciones de  $v_\alpha$ ,  $v_\beta$ ,  $i_\alpha$  e  $i_\beta$  que se derivan de 1.2.1.7 y 1.2.1.8 se obtiene 1.2.1.18.

$$q = v_\beta \cdot i_\alpha - v_\alpha \cdot i_\beta = \frac{1}{3} [(v_a - v_b)i_c + (v_b - v_c)i_a + (v_c - v_a)i_b] \quad (1.2.1.18)$$

Si tenemos un sistema trifásico de tensiones equilibradas,  $(v_a - v_b)$  es un vector rotado  $90^\circ$  respecto de  $v_c$ , lo mismo para  $(v_b - v_c)$  respecto de  $v_a$  etc, por lo que esta reactiva instantánea, en un sistema equilibrado de tensiones, no es otra cosa que lo que sería el cálculo de la potencia desfasando las tensiones  $90^\circ$  ( $Q = \sqrt{3}V \cdot I \cdot \sin \phi$ ), cosa que por ejemplo, hace un medidor electromecánico de reactiva. En este caso en vez de usar valores eficaces, se usa el valor instantáneo, lo cual trae como consecuencia que el valor medio de  $q$ , que denotaremos como  $\bar{q}$ , coincidirá exactamente con  $Q$ .

Las unidades de  $q$  se definen como Volt-Ampere-Imaginario, (IVA) por sus siglas en inglés (Akagi et al., 1983), en analogía de los VAR asignados a la potencia reactiva  $Q$ .

Los valores de  $p_0$ ,  $p$  y  $q$ , al ser valores instantáneos, tienen, si estamos en régimen, un cierto valor medio  $\bar{p}_0$ ,  $\bar{p}$  y  $\bar{q}$ , por lo que se puede definir  $\tilde{p}_0$ ,  $\tilde{p}$  y  $\tilde{q}$  tal como muestran 1.2.1.19, 1.2.1.20 y 1.2.1.21 respectivamente.

$$p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0 \quad (1.2.1.19)$$

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (1.2.1.20)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (1.2.1.21)$$

### 1.2.6 Teoría aplicada en régimen estacionario de un sistema no ideal

La teoría de la potencia instantánea se formaliza en el dominio del tiempo. Sin embargo, interesa relacionarla con lo que pasa en el dominio de la frecuencia cuando el fenómeno en estudio está en régimen estacionario. A cada componente de frecuencia en función de sus secuencias de corriente y tensión en el sistema (a, b, c) definidas en 1.2.1.6 y 1.2.1.6 se le puede aplicar la transformada de Clarke de acuerdo a las ecuaciones 1.2.1.7 y 1.2.1.8. En las ecuaciones 1.2.1.22 y 1.2.1.23 se ven como quedan las expresiones de las corrientes y tensiones en el sistema (0,  $\alpha$ ,  $\beta$ ) teniendo en cuenta todas las frecuencias.

$$\begin{aligned} i_\alpha(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3}I_{+n} \sin(w_n t + \delta_{+n}) + \\ &\quad \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3}I_{-n} \sin(w_n t + \delta_{-n}) \\ i_\beta(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3}I_{+n} \cos(w_n t + \delta_{+n}) + \\ &\quad \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3}I_{-n} \cos(w_n t + \delta_{-n}) \\ i_0(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{6}I_{0n} \sin(w_n t + \delta_{0n}) \end{aligned} \quad (1.2.1.22)$$

$$\begin{aligned}
 v_\alpha(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3}V_{+n} \sin(w_n t + \phi_{+n}) + \\
 &\quad \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3}V_{-n} \sin(w_n t + \phi_{-n}) \\
 v_\beta(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3}V_{+n} \cos(w_n t + \phi_{+n}) + \\
 &\quad \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3}V_{-n} \cos(w_n t + \phi_{-n}) \\
 v_0(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{6}V_{0n} \sin(w_n t + \phi_{0n}) \tag{1.2.1.23}
 \end{aligned}$$

El comentario más destacable de las expresiones 1.2.1.22 y 1.2.1.23 es la constatación del hecho de que hay un completo desacople entre las secuencias positivas y negativas respecto a la homopolar. En las expresiones  $\alpha$  y  $\beta$  no aparece la homopolar y viceversa.

Luego sustituyendo en 1.2.1.12, 1.2.1.13 y 1.2.1.14 las expresiones 1.2.1.22 y 1.2.1.23, operando convenientemente y separando términos, obtenemos las expresiones 1.2.1.24, 1.2.1.25, 1.2.1.26, 1.2.1.27, 1.2.1.28 y 1.2.1.29 de  $\bar{p}_0$ ,  $\tilde{p}_0$ ,  $\bar{p}$ ,  $\tilde{p}$ ,  $\bar{q}$  y  $\tilde{q}$  respectivamente. Nuevamente se destaca el no acoplamiento entre la potencia  $p_0$  homopolar con  $p$  o  $q$  en donde solo aparecen secuencias mayores o menores que cero.

$$\bar{p}_0(t) = \sum_{n=1}^{\infty} +3V_{0n}I_{0n} \cos(\phi_{0n} - \delta_{0n}) \tag{1.2.1.24}$$

$$\begin{aligned}
 \tilde{p}_0(t) &= \\
 &+ \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} +3V_{0m}I_{0n} \cos[(w_m - w_n)t + \phi_{0m} - \delta_{0n}] \right\} \\
 &+ \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} -3V_{0m}I_{0n} \cos[(w_m + w_n)t + \phi_{0m} + \delta_{0n}] \right\} \tag{1.2.1.25}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{p}(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} +3V_{+n}I_{+n} \cos(\phi_{+n} - \delta_{+n}) + \\
 &\quad \sum_{n=1}^{\infty} +3V_{-n}I_{-n} \cos(\phi_{-n} - \delta_{-n}) \tag{1.2.1.26}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{p}(t) = & \tag{1.2.1.27} \\
& + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} +3V_{+m}I_{+n} \cos[(w_m - w_n)t + \phi_{+m} - \delta_{+n}] \right\} \\
& + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} +3V_{-m}I_{-n} \cos[(w_m - w_n)t + \phi_{-m} - \delta_{-n}] \right\} \\
& + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} -3V_{+m}I_{-n} \cos[(w_m + w_n)t + \phi_{+m} + \delta_{-n}] \right\} \\
& + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} -3V_{-m}I_{+n} \cos[(w_m + w_n)t + \phi_{-m} + \delta_{+n}] \right\}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\bar{q}(t) = & \sum_{n=1}^{\infty} +3V_{+n}I_{+n} \sin(\phi_{+n} - \delta_{+n}) + \\
& \sum_{n=1}^{\infty} -3V_{-n}I_{-n} \sin(\phi_{-n} - \delta_{-n}) \tag{1.2.1.28}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{q}(t) = & \tag{1.2.1.29} \\
& + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} +3V_{+m}I_{+n} \sin[(w_m - w_n)t + \phi_{+m} - \delta_{+n}] \right\} \\
& + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} -3V_{-m}I_{-n} \sin[(w_m - w_n)t + \phi_{-m} - \delta_{-n}] \right\} \\
& + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} -3V_{+m}I_{-n} \sin[(w_m + w_n)t + \phi_{+m} + \delta_{-n}] \right\} \\
& + \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} +3V_{-m}I_{+n} \sin[(w_m + w_n)t + \phi_{-m} + \delta_{+n}] \right\}
\end{aligned}$$

### 1.3 Aplicación a los filtros activos

Como se verá en la sección 1.5.1, la teoría de la potencia instantánea  $pq^1$ , pese a sus 16 años de existencia (Akagi et al., 1983) (Akagi and Kim, 1999), sigue teniendo que buscar aceptación, con la excepción de los diseñadores en el área de la electrónica de potencia. Es en esta área en que la teoría tiene su inmediata aplicación, y son los filtros activos que la aprovechan al máximo de sus posibilidades. Las primeras aplicaciones

---

<sup>1</sup>Esta denominación no es Internacionalmente aceptada pero es igualmente ampliamente utilizada

surgieron por la necesidad de eliminar armónicos de corriente y equilibrar sistemas mediante filtros shunt. Ya desde el trabajo (Akagi et al., 1983) como de los siguientes (Akagi et al., 1984), (Penello, 1992), (Penello et al., 1992), (Aredes, 1996), (Aredes and Watanabe, 1995), se presenta al filtro shunt como solución de estos problemas y se analizan sus ventajas, problemas y soluciones.

Luego para cerrar el ciclo de compensación y eliminar toda perturbación en la tensión y desacoplar el sistema eléctrico de la carga que alimenta, surge la idea del filtro serie. Nuevamente Akagi y sus socios plantean la posibilidad de seguir explorando la utilización de la teoría pq en este camino (Peng et al., 1988). Luego trabajos como (Fujita and Akagi, 1991) trabajan con la combinación de filtros pasivos shunt y serie activos, trabajos como (Hafner et al., 1997) tratan la integración de filtros shunt y pasivos y trabajos como (Aredes, 1996), (Aredes and Watanabe, 1995), (Akagi and Fujita, 1995) combinan filtros shunt y serie para llegar incluso a plantear conceptos como el del UPQC (Unified Power Quality Conditioner).

Otro aspecto no menor es la diversidad de sistemas de distribución existentes, en donde la existencia de neutro a no, hace surgir diferentes vertientes de estudio. Trabajos como (Aredes, 1996), (Aredes and Watanabe, 1995) y (Aredes et al., 1997) exploran este aspecto en donde el cuarto conductor del sistema eléctrico marca la diferencia y hace incluso que diferentes mutaciones de la teoría inicial presentada en (Akagi et al., 1983) sean coincidentes o no (Akagi and Kim, 1999).

## 1.4 Filtro activo shunt para eliminar armónicos de corriente

En este apartado veremos como utilizar la teoría de la potencia instantánea a los efectos de disminuir la distorsión armónica de un sistema trifásico. Este podrá ser de tres o cuatro hilos ya que la eventual corriente homopolar no será eliminada por no contribuir esta tarea al objetivo de reducir la distorsión armónica.

La fig. 1.1 muestra la topología básica de un filtro activo shunt en donde ve la medida de las corrientes y tensiones en la carga o red y el control que calcula las corrientes que debe tomar el inversor. Las inductancias entre el inversor y la red son a los efectos de desacoplar ésta del inversor y muchas veces son la propia impedancia de cortocircuito del transformador que se debería poner para adaptar niveles de tensión.

Como ya se ha comentado, la utilización de filtros activos shunt para mejorar



Figura 1.1: Topología básica de un Filtro Activo shunt

Figura 1.2: Contribución de armónicos y secuencias al espectro de  $\tilde{p}$  (y  $\tilde{q}$ )

la carga que supone para el sistema eléctrico determinado consumo con armónicos y desbalances ha sido tratado en numerosos trabajos en los que se destaca (Penello et al., 1992) mostrando que la teoría pq es a la *carte* en donde basta elegir qué se quiere compensar.

En nuestro caso lo único que queremos compensar son las armónicos de corriente, por lo que toda corriente armónica con índice diferente de +1 y -1 deberá ser compensada.

En este trabajo solo se aportará aspectos respecto a la interpretación de que es lo que se está haciendo cuando se filtra p y q, como se verá, con un pasa altos, para obtener la potencia  $\tilde{p}$  y  $\tilde{q}$  que determinarán las corrientes a sintetizar por parte del inversor del filtro activo.

### 1.4.1 Espectro de p y q

Observando (1.2.1.26) vemos que  $\bar{p}$  tiene un espectro con una barra en continua a la que aportan todas las frecuencias y secuencias de las tensiones y corrientes. Observando (1.2.1.27) podemos analizar como contribuyen al espectro de  $\tilde{p}$  las frecuencias y secuencias. Lo mismo vale para  $\tilde{q}$  analizando 1.2.1.28 y 1.2.1.29 pero para simplificar, en lo que sigue se hablará solo de p. La fig. (1.2) muestra esta dependencia, en donde la primera fila de cada una de las cuatro submatrices muestra armónico y secuencia de corriente, la primera columna muestra armónicos y secuencias de tensión, y dentro de la tabla se indica el orden del armónico donde contribuyen las parejas corrientes/tensiones elegidas. Por ejemplo,  $I_{+3}$  y  $V_{+1}$  tienen en la tabla un 2 por lo que contribuyen a la segunda barra del espectro de  $\tilde{p}$  (100 Hz para el caso de redes de 50Hz).

### 1.4.2 Cálculo de las potencias que deberá tomar el filtro

Supongamos por un momento que solo tenemos  $V_{+1}$  y  $V_{-1}$ .

La fig. 1.3, en su sección A, muestra todas las potencias presentes en el espectro de p (solo se representa hasta  $I_{+4}$  e  $I_{-4}$ ). Si calculamos la potencia que consume la carga con solo utilizar la secuencia  $V_{+1}$ , la potencia que tendremos es la de la sección B de

Figura 1.3: Proceso de filtrado de  $\bar{p}_{+1}$  y  $\bar{p}_{-1}$ 

la tabla. Luego si le filtramos con un pasa altos quitando la barra de continua ( $\bar{p}$ ), lo que nos queda es lo de la sección C. Con esta potencia resultante de acuerdo a C, sintetizamos una corriente con nuestro inversor imponiendo que este tome justamente esta potencia instantánea.

Luego en la realidad, tendremos también  $V_{-1}$ , por lo que nuestro filtro activo tomara todo lo mostrado en la sección D de la tabla, pero habremos eliminado la parte de  $\bar{p}$  asociada a  $V_{+1}$ .

Concluiremos que cuando se filtra la continua de  $p$  para extraer  $\bar{p}$ , habiendo sido  $p$  calculada con solo la secuencia fundamental positiva, la  $\bar{p}$  resultante sintetizará la corriente del filtro que tomará las potencias de todas las armónicas menos la  $\bar{p}$  asociada a la secuencia de tensión  $V_{+1}$ .

Por tanto, el filtro también tomará la potencia  $\bar{p}$  asociada con la secuencia  $V_{-1}$  de tensión. Si lo que se pretende es solo tomar con el filtro potencias asociadas con armónicos diferentes de +1 y -1, deberemos eliminar esta potencia asociada con  $V_{-1}$ , por lo que procederemos en forma similar calculando una nueva  $p$  con la corriente resultante de la primera cuenta y utilizando como tensión solo la secuencia negativa  $V_{-1}$  (fig. 1.3 sección E). Por tanto si pasamos este resultado nuevamente por el filtro pasa alto, estaremos quitando la potencia asociada a la pareja  $V_{-1}$  e  $I_{-1}$  (fig. 1.3 sección F). Finalmente lo que queda (fig. 1.3 sección G) es exclusivamente de responsabilidad de los armónicos que se pretende eliminar (Monteiro, 1997).

No se debe pasar por alto, que también estamos quitando con el filtro la potencia  $\bar{p}$  asociada a las parejas  $V_{+1}I_{-1}$  y  $V_{-1}I_{+1}$  pues caen en la segunda barra (2's en la fig. 1.2) pero de cualquier forma, es hasta hoy inevitable.

La fig. 1.4 muestra esquemáticamente el significado de hacer las dos extracciones de potencia  $\bar{p}$  en serie para el caso de tener tensiones  $V_{+1}$  y  $V_{-1}$ . Al solo tener  $V_{+1}$  y  $V_{-1}$ , se puede decir que solo tendremos potencias instantáneas  $p_{+1}^-$ ,  $p_{-1}^-$ ,  $p_{+1}^+$  y  $p_{-1}^+$  en donde se definió, por ejemplo,  $p_{+1}^-$  como la  $\bar{p}$  que depende de  $V_{+1}$ , etc.

La primera tarea es eliminar  $p_{+1}^-$  para lo cual se utiliza  $V_{+1}$  en el cálculo de  $p$  y se filtra su valor de continua. Por tanto el filtro tomaría  $p_{-1}^- + p_{+1}^+ + p_{-1}^+$ . En el extremo inferior derecho de la fig. 1.4 se definió el símbolo que representa esta primera tarea.

Luego, para eliminar  $p_{-1}^-$ , se repite el procedimiento haciendo los cálculos con  $V_{-1}$ . En este caso el símbolo definido establece que se está utilizando  $V_{-1}$  como tensión de

Figura 1.4: Esquema gráfico de extracción secuencial de potencias instantáneas  $p_{+1}^-$  y  $p_{-1}^-$  para sintetizar el filtro activo que toma solamente las potencias  $p_{+1}^{\sim}$  y  $p_{-1}^{\sim}$ .

referencia .

Como resultado obtenemos finalmente que la red solo entrega la potencia  $p_{+1}^- + p_{-1}^-$  y que el filtro entrega la potencia restante  $p_{+1}^{\sim} + p_{-1}^{\sim}$  de la potencia que consume la carga.

Esta forma didáctica de mostrar lo que sería el procedimiento genérico para ir quitando una a una las porciones de potencia que no se desea filtrar, se podría haber hecho desde un comienzo utilizando como tensión en la cuenta de cálculo de  $p$ , ambas secuencias  $V_{+1}$  y  $V_{-1}$ .

En este momento lector se estará preguntando que pasa si no se cumple la hipótesis hecha inicialmente de que solo tenemos  $V_{+1}$  y  $V_{-1}$ . Si aparecieran mas secuencias armónicas, el filtro ya tiene calculadas sus corrientes que toman la potencia determinada en la tabla de la fig. 1.3 sección G, por lo que estas nuevas secuencias harán que se generen nuevas potencias armónicas en  $\bar{p}$  y  $\tilde{p}$  tal a lo mostrado en la propia fig. 1.3 sección H, las cuales el filtro tomará y eliminará de la línea.

Finalmente y como por ejemplo, en la frecuencia 1, primera barra de  $\tilde{p}$  (1's en la fig. 1.2), caen todos los armónicos; lo mismo se puede establecer para la segunda barra etc. Cualquiera que sea el método que se utilice para filtrar  $p$ , para separar lo que se quiere sintetizar con el filtro o no, se debe tener en cuenta que los armónicos están completamente mezclados en el espectro y es imposible, al menos con un filtro pasa altos simple, actuar exclusivamente sobre uno sin alterar otro. La ventaja de usar un pasa altos es que elimina todo o nada. Si una barra de  $\tilde{p}$  es filtrada parcialmente, hay que tener cuidado con la fase que introduce el filtro pasa alto, ya que incluso, podríamos estar aumentando dicha armónica en la corriente de línea, por ejemplo al hacerle la fase  $180^\circ$ .

### 1.4.3 Cálculo de las corrientes que deberá tomar el filtro

Hasta el momento hemos calculado la potencia que debe tomar el filtro. En nuestro caso particular queremos que el filtro tome la potencia  $\tilde{p}$  y  $\tilde{q}$  que se obtienen a la salida del filtro pasa altos luego de haber sacado  $p_{+1}^-$ ,  $q_{+1}^-$ ,  $p_{-1}^-$  y  $q_{-1}^-$ .

La pregunta es:

*¿Luego de definidas las potencias a sintetizar con el filtro activo, cómo*

*obtengo las corrientes que debe tomar mi inversor?*

Observando 1.2.1.11 podemos ver que la submatriz que define  $p$  y  $q$  es invertible, por lo que en 1.4.1.1 quedan definidas las corrientes en coordenadas  $\alpha$  y  $\beta$ . En este caso particular 1.4.1.2 define las corrientes del filtro dado que lo que queremos es un filtro que tome dichas potencias, y dado que la convención adoptada calcula potencias salientes debemos invertir el signo. Para el cálculo deberemos utilizar las tensiones  $v_\alpha$  y  $v_\beta$  reales con todas sus secuencias y frecuencias. Finalmente para pasar a coordenadas (a, b c) recurrimos a 1.2.1.9 que define la transformada inversa de la transformada de Clarke por lo que las corrientes del filtro activo serán las indicadas en 1.4.1.3.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (1.4.1.1)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{p}^* \\ -\tilde{q}^* \end{bmatrix} \quad (1.4.1.2)$$

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} \quad (1.4.1.3)$$

## 1.5 Evolución de la teoría y estado de situación actual

### 1.5.1 Desarrollos similares, críticas y comparaciones

Quizás uno de los mejores indicadores de que la teoría de la potencia instantánea está en desarrollo y que queda terreno para seguir investigando, es que su propio creador figure como el primer y último referente en la materia. Desde su primer trabajo presentando la teoría (Akagi et al., 1983), hasta su último trabajo (Akagi and Kim, 1999), el emblemático Akagi sigue aportando en medio de críticas, logros y realizaciones. En este último trabajo (Akagi and Kim, 1999) se presenta una comparación entre la teoría inicialmente presentada por Akagi en el 83 con una modificación de la misma hecha por uno de sus discípulos en (Nabae et al., 1995). Como primera conclusión

establece que ambas teorías son correctas pero que la segunda tiene problemas para compensar corrientes homopolares si el filtro es sin fuente de energía independiente.

El trabajo (Komatsu and Kawabata, 1997) intenta desacreditar la clásica teoría pq y propone la teoría *Extendida*. Reporta tener mejores resultados para sistemas con gran desbalance de tensiones. En opinión de quien suscribe el artilugio que utiliza al desfasar el sistema de tensiones en  $90^\circ$  es en el cálculo posible, pero tendrá problemas en un sistema real en donde nada es periódico y la dinámica del sistema impondrá sus reglas. Es verdad que la teoría pq clásica puede tener problemas con grandes desbalances de tensión <sup>2</sup>, pero la realidad indica que los casos en los que es deseable utilizar un filtro activo el problema no es el desbalance de tensión sino el de carga y los armónicos de corriente. En general, los sistemas trifásicos en sistemas eléctricos son equilibrados en tensión y no se presentan estos problemas.

Finalmente del trabajo (Depenbrock, 1993) se pueden reproducir dos párrafos que muestran el espíritu de competitividad que hay en torno a este tema.

*All mentioned basic contributions to the FBD<sup>3</sup> -method have been published in German and seem to be widely unknown in the English speaking world.*

Solo que el método se llame como el autor marca la puja que hay en ser el detentor de las ideas, pero el tono indica además una actitud al menos molesta. Luego en otra parte del artículo dice:

*These equations were later independently confirmed in [9] using matrix notations, the result for the special case  $m=3$  are the same as derived in a somewhat different way in [10] using complex space vector notation*

Tan cierta es la afirmación de que la propuesta de Akagi (referencia [10] de la cita de Depenbrock) es de alguna forma derivada por otro camino diferente del método de Depenbrock, que luego de leer y releer el artículo del mismo, llegar a esta conclusión es más que una tarea trivial.

Nuestra conclusión es que la teoría presentada por Akagi<sup>4</sup>, es consistente teórica y físicamente, fácil de entender y aplicar, y algo de extrema importancia práctica es el hecho de que los resultados reales ya logrados aplicándola están a la vista y han sido aceptados.

---

<sup>2</sup>Recordar del apartado 1.4.2 la frase "No se debe pasar por alto, que también estamos quitando con el filtro la potencia  $\tilde{p}$  asociada a las parejas  $V_{+1}I_{-1}$  y  $V_{-1}I_{+1}$  pues caen en la segunda barra (2's en la fig. 1.2) pero de cualquier forma, es hasta hoy inevitable".

<sup>3</sup>Fryze, Buchholz and Depenbrock

<sup>4</sup>Es reconocido por muchas personas su autoría y propuesta inicial

### 1.5.2 Aplicaciones de la teoría fuera del área de los filtros activos

Hay numerosas vertientes de estudio en donde se ha aplicado la teoría pq con resultados satisfactorios.

El trabajo (Aredes et al., 1998) muestra como esta teoría es directamente aplicable en el campo de los FACTS <sup>5</sup>.

En (Oliveira and Watanabe, n.d.) propone usar la teoría pq para medir potencias.

En (Barbosa et al., 1998) se integran paneles solares fotovoltaicos a la red mediante un inversor comandado con la teoría pq.

Luego el trabajo (Verdelho and Soares, 1997) aplica la teoría para un rectificador hecho con 6 llaves IGBT de modo de rectificar y mantener factor de potencia y distorsión controlados.

Digno de mención, por el grado de generalidad con que se aplica la teoría, es el trabajo (Barbosa et al., n.d.) en donde se extrae el ripple de tensión a la salida de un rectificador mediante un filtro activo serie en el bus de continua, se extraen los armónicos de corriente mediante un filtro shunt en barras de alterna y todo esto sin fuente de energía independiente. Si bien esta aplicación esta lejos de ser industrializada, muestra la gran versatilidad de la teoría.

---

<sup>5</sup>Flexible AC Transmission Systems

## 1.6 Conclusiones del capítulo

- Se ha documentado la teoría de la potencia activa y reactiva instantánea mostrándose clara y de fácil utilización práctica.
- La potencia activa instantánea trifásica es la misma que la definición convencional.
- Si las tensiones son equilibradas, la potencia reactiva  $\bar{q}$ , es igual a la potencia reactiva  $Q$  convencional.
- Si bien esta teoría se desarrolla en el dominio del tiempo, su traslado al dominio de la frecuencia está claramente establecido.
- Los filtros activos shunt son especialmente aptos para aplicar esta teoría en sistemas equilibrados de tensión con el objeto de eliminar armónicos de corriente y desbalances de carga.
- También son adecuados para compensar reactiva y corrientes homopolares.
- Hay en funcionamiento variadas aplicaciones industriales que utilizan esta teoría en el campo de la mejora de calidad de forma de onda de corriente y tensión.
- Se han realizado aportes a los efectos de ubicar, en el espectro de las potencias activa y reactiva instantáneas, las contribuciones de las secuencias de tensiones y corrientes. En particular, se ha establecido claramente que tan mezclados están éstos en dichos espectros.
- Se han realizado aportes a los efectos de comprender, desde el punto de vista del balance energético, de forma gráfica y didáctica, las etapas de separar de la potencia de la carga, primero, las potencias asociadas a armónicos superiores y  $V_{+1}$  y luego, dichos armónicos y  $V_{-1}$ .

# Capítulo 2

## Hornos de arco

### 2.1 Introducción

La utilización de esta forma de fundir y realizar aleaciones de metales es sin duda una de las maneras más eficientes desde el punto de vista energético, pero por su sencillez se transforma en la más perjudicial para el sistema eléctrico del que se alimenta. Básicamente se basa en realizar corto circuitos trifásicos sumamente desbalanceados, limitados por una gran reactancia de corto circuito.

El calor necesario en el proceso de fundición se genera por efecto Joule en la resistencia del arco eléctrico y en la propia carga fundida.

El calor generado en dicho arco eléctrico se transmite a la carga por los tres medios posibles que son radiación, convección y conducción. Los diferentes tipos de hornos de arco determinan qué forma de transmisión de calor es la más preponderante.

Los hornos de arco se clasifican en *Abiertos* y *Sumergidos*. (Cordeiro, 1997).

Los *Abiertos* se caracterizan porque los arcos que generan el calor se establecen entre los electrodos del arco y la carga y entre los propios electrodos. Este tipo de horno se utiliza para fundir metales y también puede servir para su refinamiento. Estos hornos son fundamentalmente utilizados para la producción de aceros comunes y para la refusión de chatarra e hierro fundido. De acuerdo a la forma que se transmite el calor se clasifican a su vez en de arco *Indirecto* y de arco *Directo*. Los primeros (Stassano, Bassanese, etc.), utilizan básicamente la radiación en la parte de reverberación del movimiento circular del arco. Los segundos utilizan la radiación de todo el arco y el hecho de que sus posiciones son aleatorias.

Los hornos de arco tipo *Sumergido* tienen sus electrodos inmersos en el material al cual le están entregando calor y se produce una cavidad llamada *zona de reacción del electrodo*. A diferencia del denominado *Abierto*, no existen arcos entre electrodos.



Este tipo de horno se utiliza para producir aleaciones de hierro como ser hierro-silicio, hierro-magnesio, hierro-cromo, hierro-boro, etc y hierros con alto contenido de aluminio. La forma en que el calor generado en el arco eléctrico se transmite al material que está siendo fundido también es básicamente por la radiación, pero la mayor parte del calor que funde el material es debido al efecto joule en la propia carga, calor que se transmite por conducción y algo por convección.

## 2.2 Ciclo de trabajo típico de un horno de arco

Los hornos de arco también se clasifican de acuerdo a su tamaño y esto está también asociado al tipo de tarea que realiza. Básicamente hay dos tareas que realizan los hornos de arco, la fundición inicial del material y la oxidación o refinamiento. La primera está caracterizada por una gran aleatoriedad del arco ya que dentro del horno coexisten trozos sólidos y líquidos. En la segunda el horno solo tiene masa líquida y el arco es mucho más estable y controlable.

Dependiendo del tamaño de la acería estas tareas se realizan en un único horno o en varios.

En acerías grandes la fundición se realiza por lo que se denomina un horno de arco de *gran potencia* que tiene la ventaja de realizar la tarea mas rápido ya que la velocidad en que se realiza este proceso de fundición está inversamente relacionada con la potencia de alimentación del mismo. Luego, la oxidación y refinamiento se hacen en hornos más pequeños. En el caso que nos ocupa ambos procesos se realizan en el mismo horno de arco y se agrega una recarga de material antes de iniciar la oxidación. Luego de la recarga, el proceso es menos drástico ya que coexisten materia sólida (la recién agregada) y la materia líquida de la primera carga. En el capítulo ?? donde se presentan los datos registrados se verá en los hechos este comportamiento.

## 2.3 Modelo eléctrico de un horno de arco

La forma clásica de modelar un horno de arco es el de una *resistencia*  $R$ , que será variable, pero que tiene una inductancia serie para limitar y estabilizar la corriente. Por un lado, limitar la corriente dado que  $R$  puede llegar a tener valores muy bajos. Por otro lado, estabilizarla ya que como se verá en el apartado siguiente, la realidad indica que un arco eléctrico tiene un modelo un poco más complicado que una resistencia. En particular toma un valor menor con el aumento de la corriente

Figura 2.1: Modelo trifásico de un horno eléctrico de arco

y temperatura lo que llevaría a una realimentación positiva inaceptable. La fig. 2.1 muestra por tanto el modelo trifásico a adoptar. Se pueden hacer varios cálculos interesantes para comprender mejor el punto de trabajo deseado de funcionamiento para el arco eléctrico.

Asumiendo un sistema trifásico balanceado, se puede establecer que la potencia consumida por el horno de arco es

$$P = 3 \cdot R \cdot I^2 \quad (2.3.2.1)$$

y sustituyendo en esta el valor de corriente

$$I = \frac{E/\sqrt{3}}{(R^2 + X^2)} \quad X = L \cdot \omega \quad (2.3.2.2)$$

arroja el resultado

$$I = E^2 \cdot \frac{R}{(R^2 + X^2)} \quad (2.3.2.3)$$

Definida la potencia aparente como

$$S = 3 \cdot \frac{E}{\sqrt{3}} \cdot I \quad (2.3.2.4)$$

sustituyendo I de acuerdo a 2.3.2.2 vemos como queda S en función de R, X y E

$$S = E^2 \frac{1}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (2.3.2.5)$$

Por otra parte, definida la potencia reactiva como

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.3.2.6)$$

resulta

$$Q = E^2 \frac{X}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (2.3.2.7)$$

Operando convenientemente, se puede establecer que P y Q cumplen la ecuación

$$P^2 + Q^2 = Q \frac{E^2}{X} \quad (2.3.2.8)$$

que en el plano P, Q definen una circunferencia tal como muestra la fig. 2.2. Este diagrama circular, nos muestra como al variar R desde un valor nulo (corto circuito)

Figura 2.2: Lugar geométrico de P y Q en un horno de arco

hasta R infinito (circuito abierto), iremos cambiando la potencia consumida tanto activa como reactiva tendiendo un máximo la activa que llamaremos  $P_M$  cuando el valor de R toma el valor de X (circuito con impedancias adaptadas). El valor de  $P_M$  es

$$P_M = Q_M = \frac{E^2}{2.X} \quad (2.3.2.9)$$

y tiene un valor de  $\cos\varphi$  de  $45^\circ$ .

En la realidad, la resistencia R está compuesta por un valor residual fijo fruto de cableados, barras y resistencia de transformadores aguas arriba, que determina una variación de a que valor de R se tiene la máxima potencia *entregada* en la carga a fundir en el horno. Redefiniendo  $R = R_p + R_u$ , en donde  $R_u$  es la resistencia del arco y  $R_p$  es la resistencia de pérdidas, se obtienen (Cordeiro, 1997) que el nuevo punto de acoplamiento  $R_u$  para dar máxima potencia  $P_{Mreal}$  en la carga queda determinada por

$$R_u = \sqrt{R_p^2 + X^2} \quad (2.3.2.10)$$

siendo  $P_{Mreal}$  determinado por

$$P_{Mreal} = R_u \cdot I^2 = \sqrt{R_p^2 + X^2} \cdot I^2 = \frac{\sqrt{R_p^2 + X^2} \cdot E^2}{(R_p + R_u)^2 + X^2} = \frac{\sqrt{R_p^2 + X^2} \cdot E^2}{2(R_p + \sqrt{R_p^2 + X^2})} \quad (2.3.2.11)$$

la potencia consumida por el sistema es

$$P_w = P_u + P_p = (R_u + R_p) \cdot I^2 \quad (2.3.2.12)$$

por lo que la potencia consumida por el sistema  $P_{LIM}$  cuando se está en el punto de máxima potencia en la carga queda

$$P_{LIM} = \frac{(\sqrt{R_p^2 + X^2} + R_p) \cdot E^2}{X^2 + (\sqrt{R_p^2 + X^2} + R_p)^2} = \frac{E^2}{2\sqrt{R_p^2 + X^2}} \quad (2.3.2.13)$$

En estas condiciones se puede decir que se está en un punto de máxima potencia consumida por el sistema y que rebasado el mismo solo aumentaremos el consumo de reactiva y disminuirá la activa. Comparando con 2.3.2.9, el resultado encontrado, al

tener en cuenta las pérdidas, da menor valor en la potencia consumida por la línea en condiciones de máxima potencia en la carga.

El nuevo lugar geométrico de  $P_u$  y  $Q$  queda determinado por

$$\left(\frac{R_p}{R_u} + 1\right)^2 P_u^2 + Q^2 = Q \frac{E^2}{X} \quad (2.3.2.14)$$

La fig. 2.3 muestra dicho lugar geométrico superpuesto con el de  $P$ ,  $Q$  ya visto en la fig. 2.2. Se tomaron valores que podrían corresponder a este caso en estudio con  $E = 440V$ ,  $I_n = 10kA$ ,  $X = 0.0125\Omega$  y  $R_p = 0.005\Omega$ .

Figura 2.3: Lugar geométrico de  $P$  y  $Q$  en un horno de arco teniendo en cuenta las pérdidas

Las expresiones de  $P$ ,  $P_u$  y  $Q$  en función de  $I$  quedan finalmente como

$$P = 3\sqrt{\frac{E}{3I^2} - X} \cdot I^2 \quad (2.3.2.15)$$

$$P_u = P - P_p = P - 3R_p I^2 \quad (2.3.2.16)$$

$$Q = \sqrt{3E^2 I^2 - 9\left(\frac{E}{3I^2} - X\right) I^4} \quad (2.3.2.17)$$

y la fig. 2.4 muestra su andamio gráfico. Se ha marcado la zona de trabajo en la que se debe operar ya que mas allá de la misma se aumentan las pérdidas con resultados adversos en cuanto a potencia útil y factor de potencia (definido este último como  $P/S$ ).

El control del horno de arco regula la posición de los electrodos de modo de mantener la corriente en dicha zona de trabajo. Si es necesario se modifica adicionalmente el tap de los transformadores o una eventual reactancia variable intercalada en el sistema.

## 2.4 Modelo dinámico del arco eléctrico

El modelado de la impedancia del arco eléctrico como una resistencia  $R$  utilizado en el apartado anterior, es útil a los efectos de comprender en régimen estacionario el

Figura 2.4: P, Q, Pu, Pp y factor de potencia al variar I (Ru)

comportamiento de un horno de arco. Sin embargo, si bien es correcto decir que un arco eléctrico tiene características resistivas en el sentido de que la tensión en sus bornes es dependiente de la corriente que circula entre ellos, esta relación no es lineal. Un modelo propuesto por Ayrton en 1902, retomado y simplificado en (de Melo, 1997) establece que la tensión del arco eléctrico es de la forma que muestra 2.4.2.1 donde se asumió condiciones de alta corriente. Sin esta última restricción la dependencia con la propia corriente aparece en el valor de la tensión de arco.

$$V = (A + B \cdot L_a) \text{sig}(I_a) \quad (2.4.2.1)$$

Asimismo, y también reportado en (Schau and Stade, 1994), a los efectos de modelar dinámicamente el comportamiento de arco se deben tener en cuenta sus alinealidades e interacciones entre arcos. El propio trabajo (Schau and Stade, 1994) plantea un modelo en que la tensión de arco tiene una característica aleatoria ajustada con registros reales para los procesos de fusión y oxidación, y establece refinamientos como asumir que la corriente comienza a fluir cuando la tensión llega hasta la tensión de arco, lo que no es otra cosa que suponer que el arco se comporta como un par de zeners contrapuestos de tensiones aleatorias. En el trabajo (Dan et al., 1994) se muestra el resultado de comparar el modelo propuesto en (Schau and Stade, 1994) con otro similar propuesto en (Dan and Mohacsi, 1994)(Dan and Mohacsi, 1994), pero llegan a la conclusión de que ambos modelos, si bien dan valiosa información a los efectos de simular su funcionamiento de régimen, no da buenos resultados en los armónicos superiores al fundamental, por lo que no se presentan como adecuados para simulaciones dinámicas en donde se quiera llegar hasta tal ancho de banda. También concluyen diciendo que la decisión de cuál modelo es más acertado debe tomarse contrastando resultados con registros reales. El modelo presentado en (Mayordomo et al., 1997), similar al (Dan et al., 1994) y (de Melo, 1997), llega a conclusiones similares respecto a la bondad del mismo para realizar estudios armónicos pero sugiere la utilización de un módulo más detallado a los efectos de modelar interarmónicos que en nuestro caso también están presentes.

Cualquiera sea el modelo utilizado, es un hecho que la carga de un horno de arco es lo menos parecido a un proceso periódico, por lo que un análisis armónico empieza

a tener soporte limitado. En este caso de estudio, se dispone de múltiples registros reales, con una diversidad de situaciones que en su momento se analizarán, pero que terminarán concluyendo que lo que se necesita para diseñar el filtro activo es saber cuál es el perfil de las corrientes trifásicas distorsionadas y desbalanceadas contra las que se debe diseñar. Si se quisiese modelar el horno de arco a partir de calibrar uno de los modelos vistos a partir de los registros disponibles hay que tener en cuenta que estos se tomaron en barras de alta, y hasta llegar, de acuerdo al esquema eléctrico de nuestro caso, a la corriente y tensión de los electrodos, median cálculos que serán motivo de un futuro trabajo junto con el modelo de horno de arco a adoptar.

# Bibliografía

- Akagi, H. (1996). New trends in active filters for power conditioning, *IEEE Trans. on Ind. Applications* **Vol. 32(6)**: 1312–1322.
- Akagi, H. (1997). Applications of power electronics to power systems in japan, *CO-BEP'97, Brazil*.
- Akagi, H. (1998). Advanced power electronics based on active filtering and energy storage for power conditioning.
- Akagi, H. and Fujita, H. (1995). A new line conditioner for harmonic compensation, *IEEE Trans. on Power Delivery* **Vol. 10(3)**: 1570–1575.
- Akagi, H., Kanazawa, Y. and Nabae, A. (1983). Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits, *Proceedings of the IPEC'83 - Int. Power Electronics Conf., Tokyo* pp. 1375–1386.
- Akagi, H., Kanazawa, Y. and Nabae, A. (1984). Instantaneous reactive power compensator comprising switching devices without energy storage components, *IEEE Trans. Ind. Appl.* **Vol. 20 (3)**: 625–630.
- Akagi, H. and Kim, H. (1999). The theory of instantaneous power in three-phase four-wire systems: A comprehensive approach, *IEEE IAS'99*.
- Aredes, M. (1996). *Active power line conditioners*, PhD thesis, Technical University of Berlin.
- Aredes, M., Hafner, J. and Heumann, K. (1997). Three-phase four-wire shunt active filter control strategies, *IEEE Trns. on Pwr. Electronics* **Vol. 12(2)**: 311–318.
- Aredes, M., Heumann, K. and Watanabe, E. H. (1998). An univesal active power line conditioner, *IEEE Trans. on Pwr. Delivery* **Vol. 13(2)**: 545–551.

- Aredes, M. and Watanabe, E. H. (1995). New control algorithms for series and shunt three-phase four-wire active power filters, *IEEE Trns. on Power Delivery* **Vol. 10(3)**: 1649–1656.
- Barbosa, P. G., a. Santisteban, J. and Watanabe, E. H. (n.d.). Shunt-series active power filter for rectifiers ac and dc sides.
- Barbosa, P., Rolim, L., Watanabe, E. H. and Hanitsch, R. (1998). Control strategy for grid-connected DC-AC converters with load power factor correction, *IEEE Proc. Gener. Transm. and Distrib.* **Vol. 145(5)**: 487–491.
- Clarke, E. (1943). *Circuit analysis of A-C power systems, Vol. I- Symmetrical and related components*, John Wiley and Sons. Inc.
- Cordeiro, S. (1997). *Reactor série limitador de corrente para fornos de arco*, Master's thesis, PUC - Rio de Janeiro - Brazil.
- Cox, M. D. and Williams, T. B. (1990). Induction varhour and solid-state varhaor meter performances on nonlinear loads, *IEEE Trans. on Power Delivery* **Vol. 5(4)**.
- Czarnecky, L. (1988). Orthogonal decomposition of the currents in a three-phase nonlinear asymmetrical circuit with a non-sinusoidal voltage, *IEEE Tran. on Inst. and Measure* **Vol. 35(1)**.
- Czarnecky, L. and Swietlicki, T. (1990). Powers in non-sinusoidal networks: their interpretation, analysis and measurement, *IEEE Trans. on Instr. and Measure* **Vol. 39(2)**.
- Dan, A. M. and Mohacsi, A. (1994). Computer simulation of a three-phase a.c. electric arc furnace and its reactive power compensation, *IEEE Proc. ICHPS VI* .
- Dan, A., Mochasi, A., Stade, D., Schau, H. and Kramer, S. (1994). Comparision of different ways to simulate arc power quality impacts, *IEEE Proc. ICHPS VI* pp. 429–435.
- de la Electricidad Argentina, E. N. R. (1997a). Base metodológica para el control de la emisión de perturbaciones. producto téc. - etapa dos.
- de la Electricidad Argentina, E. N. R. (1997b). Decreto 99/97.



- de Melo, E. F. (1997). Simulacao de forno de arco trifásico através do PSpice, *COBEP-Brazil* pp. 771–776.
- Dempenbrock, M. (1993). The FBD-method, a generally applicable tool for analyzing power relations, *IEEE Trans. on Power Systems* **Vol. 8(2)**: 381–387.
- Duffey, C. and Stratford, R. (1986). Update of harmonics standard IEEE-519: IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems, *IEEE Tran. Ind. Appl.* p. Vol. 25(6).
- Emmanuel, A. E. (1990). Powers in nonsinusoidal situations, *IEEE Trans. on Power Delivery* **Vol. 5(3)**.
- Enslin, J. H. R. and van Wyk, J. D. (1988). Measurements and compensation of fictitious power under nonsinusoidal voltage and current conditions, *IEEE Trans. on Instrm. and Measur.* **Vol. 37(3)**.
- Filipki, R. (1991). Polyphase apparent power and power factor under distorted waveform conditions, *IEEE Tran. on Power Delivery* **Vol. 6(3)**.
- Fortescue, C. L. (1918). Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks, *AIEE Transactions* **Vol. 37**: 1027–1140.
- Fujita, H. and Akagi, H. (1991). A practical approach to harmonic compensation in power systems-series connection of passive and active filters, *IEEE Trans. on Ind. Applications* **Vol. 27(6)**: 1020–1025.
- Hafner, J., mauricio Aredes and Heumann, K. (1997). A shunt active power filter applied to high voltage distribution lines, *IEEE Trans. on Power Delivery* **Vol. 12(1)**: 266–262.
- Komatsu, Y. and Kawabata, T. (1997). Characteristics of three phase active power filter using extension pq theory, *IEEE ISIE'97* pp. 302–307.
- Kusters, N. L. and Moore, W. (1980). *IEEE Tran. Power App. and Sys.* **Vol. PAS-99( 5)**.
- Makram, E. B., Haines, R. B. and Girgis, A. A. (1992). Effect of harmonic distortion on reactive power measurement, *IEEE Trans. Ind. Appl.* **Vol. 28(4)**.

- Mayordomo, J. G., Beites, L., Asensi, R., Izzeddine, M., Zabala, L. and Amantegui, J. (1997). A new frequency domain arc furnace model for iterative harmonic analysis, *Trans. Power Delivery*.
- Monteiro, J. (1997). *Filtros híbridos Ativo/Passivo de potência: Modelagem no domínio da frequência*, Master's thesis, COPPE - UFRJ.
- Nabae, H., Nakano, H. and Togasawa, S. (1995). An instantaneous distortion current compensator without and coordinate transformation, *IEEE Int. Power. Elec. Conf. (IPEC-Yokohama)* **Vol. 114(3)**: 1651–1655.
- Oliveira, J. J. R. and Watanabe, E. H. (n.d.). Real time monitoring system for three-phase circuits.
- Page, C. H. (1980). Reactive power in nonsinusoidal situations, *IEEE tran. Inst. Measure* **Vol. IM-29(4)**.
- Penello, L. F. (1992). *Filtro activo de potencia shunt*, Master's thesis, COPPE/URFJ, Brazil.
- Penello, L., Watanabe, E. and Aredes, M. (1992). Filtro ativo de potência com seleção da potência a ser compensada, *Proceedings of the IX congresso Brasileiro de Automática* **Vol. 2**: 786–791.
- Peng, F. Z., Akagi, H. and Nabae, A. (1988). A new approach to harmonic compensation in power systems, *IEEE/IAS Ann. Meeting Conf.* pp. 874–880.
- Schau, H. and Stade, D. (1994). Mathematical modelling of three-phase arc furnaces, *IEEE Proc. ICHPS VI* pp. 422–428.
- Sharon, D. (1973). Reactive power definitions and power factor improvement in nonlinear systems, *Proceedings IEE* **Vol. 120**.
- Slomovitz, D. (1999). Están las empresas eléctricas computando correctamente el factor de potencia a sus usuarios?, *IEEE Enc. Inst. y Med. Sec. Uruguay*.
- Slomovitz, D. and Uturbey, W. (1997). Efecto de la distorsión armónica en los componentes de las redes eléctricas y su corrección mediante electrónica de potencia, *Technical report*.

- Stepherd, W. and Zakikhani, P. (1972). Suggestes definitiosn of reactive power for nonsinusoidal systems, *Proceedings IEE* **Vol. 119**.
- Verdelho, P. and Soares, V. (1997). A unity factor PWM voltage rectifier based on the instantaneous active and reactive current id-iq method, *IEEE ISIE97* pp. 411–416.
- Watanabe, E. H., Stephan, R. and Aredes, M. (1993). New concepts of instamtaneous active and reactive powers in electrical systems with generic loads, *IEEE Trans. on Power Delivery* **Vol. 8(2)**: 607–703.
- Willems, J. L. (1992). A new interpretation of the akagi-nabae power components for nonsinusoidal three-phase situations, *IEEE Trans. Inst. and Measur.* **Vol. 41(4)**.
- Zamora, M. I. and Macho, V. (1997). *Distorsión armónica producida por convertidores estáticos*, Iberdrola S.A.