



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

SISTEMA DE CONTROL PARA UN COMPENSADOR TRIFÁSICO DE REACTIVOS Y BALANCEADOR DE CARGAS CONTAMINANTES

MARCOS EDUARDO ORCHARD CONCHA

Memoria para optar al grado de
Ingeniero Civil Industrial
Diploma en Ingeniería Eléctrica

Profesor Supervisor:
JUAN W. DIXON R.

Santiago de Chile, 2001



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

SISTEMA DE CONTROL PARA UN COMPENSADOR TRIFÁSICO DE REACTIVOS Y BALANCEADOR DE CARGAS CONTAMINANTES

MARCOS EDUARDO ORCHARD CONCHA

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

JUAN DIXON R.

LUIS MORÁN T.

DAVID WATTS C.

Para completar las exigencias del grado
de Ingeniero Civil Industrial, Diploma en Ingeniería Eléctrica

Santiago de Chile, 2001

A Dios por todas aquellas personas que de una u otra forma han sido parte de mi vida; por las herramientas y oportunidades que me ha brindado para ayudarme en cumplir mis sueños.

A Yamille, mi esposa, con quién he compartido y compartiré la maravilla de la vida.

A mis padres, hermanos y tíos, por el esfuerzo y cariño que me han entregado y que ha moldeado mi vida.

A mi nona, que siempre confió en mí.

A todos quienes son parte de mi historia: amigos, compañeros y profesores de colegio en Antofagasta.

Gracias, de corazón.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres Pedro y Norma y a mis hermanos Sebastián y Paola, por todo el amor y apoyo que me han brindado incondicionalmente durante toda mi vida.

A mi amada esposa Yamille, con quien he compartido las alegrías y esfuerzos de estos seis años. Por su amor, comprensión y apoyo que siempre han hecho de mí un mejor ser humano.

También deseo agradecer a todas las personas e instituciones que hicieron posible el desarrollo de mi carrera profesional y la elaboración de este trabajo, en especial a mi profesor guía Ph.D. Juan Dixon, por su constante ayuda y buena disposición, a la Fundación Juan Pablo II por su apoyo económico todos estos años y al padre Brahm, ya que sin él este logro no hubiese sido posible.

Gracias a los profesores de la Facultad de Matemática, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Departamento de Ingeniería en Sistemas de nuestra Universidad que me dieron la oportunidad de trabajar en ayudantías y proyectos de investigación, especialmente al profesor Ph.D. Aldo Cipriano por toda la confianza y respaldo que me ha brindado en todas las actividades realizadas en conjunto.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	vii
INDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
I INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Aspectos básicos del balance y compensación de cargas trifásicas.....	1
1.2 Objetivos de la memoria.....	3
1.3 Organización de contenidos.....	5
II DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO COMPENSADOR – BALANCEADOR DE CARGAS TRIFÁSICAS.....	6
2.1 Configuración del equipo TBC.....	6
2.1.1 Principios de conexión para condensadores de cada rama.....	9
2.1.2 Principios de conexión para inductores de cada rama.....	11
2.2 Cálculo de susceptancias necesarias para balance y compensación de cargas trifásicas.....	12
III ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA EL EQUIPO TBC.....	16
3.1 Sistema Experto de Control para equipo TBC.....	17
3.1.1 Controlador Proporcional del error de magnitud y fase.....	20
3.1.2 Controlador Proporcional Adaptivo Difuso del error de magnitud.....	22
3.2 Sistema de Control basado en evaluación directa de componentes en cuadratura de corrientes de línea.....	25

3.3	Simulación y análisis comparativo de los sistemas de control propuestos.	27
3.3.1	Sistema Experto de Control basado en un Controlador Proporcional del error de magnitud y fase.....	28
3.3.2	Sistema Experto de Control basado en un Controlador Proporcional Adaptivo Difuso del error de magnitud	30
3.3.3	Sistema de Control basado en evaluación directa de componentes en cuadratura de corrientes de línea.	32
IV	DESCRIPCIÓN DEL FILTRO ACTIVO TRIFÁSICO “SHUNT”.....	34
4.1	Principio de funcionamiento.	34
4.2	Sistema de control proporcional integral en filtro activo “ <i>shunt</i> ”.	38
V	BALANCE Y COMPENSACIÓN DE CARGAS TRIFÁSICAS CONTAMINANTES.	42
5.1	Limitaciones para la utilización de filtros activos o equipos TBC para el balance y compensación de cargas trifásicas contaminantes.	42
5.2	Interconexión “ <i>Shunt</i> ” del equipo TBC y Filtro Activo: Principio de funcionamiento.....	44
5.3	Ventajas comparativas de la configuración propuesta y criterios de diseño.	46
VI	SIMULACIÓN DE LA INTERCONEXIÓN “SHUNT” DE EQUIPO TBC EN MEDIA TENSIÓN Y FILTRO ACTIVO DE POTENCIA EN BAJA TENSIÓN.....	48
6.1	Descripción del modelo utilizado para la simulación de la operación a media tensión.	49
6.1.1	Diseño de modelo de simulación para equipo TBC.	51
6.1.2	Diseño de modelo de simulación para equipo FAP.....	54
6.2	Resultado de la operación para la configuración propuesta: Cargas desbalanceadas no contaminantes de armónicas.....	56
6.3	Resultado de la operación para la configuración propuesta: Cargas desbalanceadas contaminantes de armónicas.....	62
6.3.1	Carga contaminante: Puentes de media onda y onda completa.	63

6.3.2 Carga contaminante: Corrientes en la carga con componentes desde 3 ^{ra} a 11 ^{va} armónicas.....	69
VII CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS	75
7.1 Conclusiones respecto a la solución de la problemática de compensación, balance y cancelación de armónicos para sistemas de alta potencia.	75
7.2 Conclusiones respecto de los sistemas de control factibles de implementar para el equipo TBC.	76
7.3 Conclusiones respecto de la configuración propuesta para los equipos TBC y FAP.....	77
7.4 Desarrollos futuros.....	78
BIBLIOGRAFIA.....	80
A N E X O S.....	85
Anexo A : Programa de Simulación para Sistema de Control Proporcional (Lenguaje C++).	86
Anexo B : Programa de Simulación para Sistema de Control Difuso (Lenguaje C++).	93
Anexo C : Programa de Simulación para Sistema de Control Directo (Lenguaje C++).	100
Anexo D : Programa N°1 de Graficación en ambiente Matlab.....	104
Anexo E : Programa N°2 de Graficación en ambiente Matlab.	105

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3.1: Base de conocimiento del sistema experto de control	19
Tabla 3.2: Sistema experto de control. Control proporcional	21
Tabla 3.3: Sistema experto de control. Control proporcional difuso	25
Tabla 3.4: Parámetros de carga industrial trifásica utilizada en simulación de métodos de control	28
Tabla 6.1: Valores para elementos capacitivos e inductivos, rama <i>i</i> equipo TBC.....	51
Tabla 6.2: Hitos relevantes en sistema de control equipo TBC.....	53
Tabla 6.3: Valores de elementos constitutivos equipo FAP.	55
Tabla 6.4: Parámetros del lazo de control del equipo FAP.....	55
Tabla 6.5: Parámetros del transformador reductor de tensión	56
Tabla 6.6: Parámetros de Carga Industrial Lineal.....	57
Tabla 6.7: Parámetros <i>R-L</i> de carga para el puente de diodos media onda.....	63
Tabla 6.8: Parámetros <i>R-L</i> de carga para el puente de diodos onda completa.....	63

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1: Carga trifásica y equipo compensador - balanceador.....	7
Figura 2.2: Configuración de una rama del equipo TBC.....	8
Figura 2.3: Circuito de conexión de condensadores.....	9
Figura 2.4: Circuito de conexión de inductores.....	11
Figura 3.1: <i>Fuzzificación</i> del error de magnitud para corrientes de línea.....	24
Figura 3.2: Determinación de componente en cuadratura de una corriente dada.....	27
Figura 3.3: Resultados simulación de Sistema Experto basado en un controlador proporcional.....	29
Figura 3.4: Resultados simulación de Sistema Experto basado en un controlador proporcional adaptivo difuso.....	31
Figura 3.5: Resultados de simulación para sistema de control basado en evaluación directa de componentes en cuadratura.....	33
Figura 4.1: Configuración “ <i>Shunt</i> ” para Filtro Activo Trifásico.....	35
Figura 4.2: Compensación de carga no lineal.....	35
Figura 4.3: Esquema método de control proporcional integral.....	40
Figura 5.1: Interconexión entre Filtro Activo Shunt y Equipo TBC.....	44
Figura 6.1: Esquema básico de interconexión para red de media tensión.....	50
Figura 6.2: Esquema de la implementación para equipo TBC en media tensión.....	52
Figura 6.3: Esquema de la implementación para equipo FAP.....	55

Figura 6.4: Operación de configuración propuesta: Carga industrial no contaminante.	58
Figura 6.5: Respuesta dinámica control equipo TBC. Carga industrial no contaminante.	59
Figura 6.6: Corrientes en equipo FAP. Carga industrial no contaminante.	60
Figura 6.7: Corrientes en equipo TBC. Carga industrial no contaminante.	61
Figura 6.8: Operación de la configuración propuesta. Carga industrial: puentes de diodos.	64
Figura 6.9: Resultados de sistema de control equipo TBC. Carga industrial: puentes de diodos.	65
Figura 6.10: Corrientes en equipo FAP. Carga industrial: puentes de diodos.	66
Figura 6.11: Corrientes en equipo TBC. Carga industrial: puentes de diodos.	67
Figura 6.12: Análisis de frecuencia. Carga industrial: puentes de diodos.	68
Figura 6.13: Operación de la configuración propuesta. Carga industrial: componentes 3 ^{ra} a 11 ^{va} armónicas.	70
Figura 6.14: Resultados de sistema de control equipo TBC. Carga industrial: componentes 3 ^{ra} a 11 ^{va} armónicas.	71
Figura 6.15: Corrientes en equipo FAP. Carga industrial: componentes 3 ^{ra} a 11 ^{va} armónicas.	71
Figura 6.16: Corrientes en equipo TBC. Carga industrial: componentes 3 ^{ra} a 11 ^{va} armónicas.	72
Figura 6.17: Análisis de frecuencia. Carga industrial: componentes 3 ^{ra} a 11 ^{va} armónicas.	73

RESUMEN

El presente trabajo estudia estrategias de control para un sistema capaz de eliminar armónicos de corriente, generar o absorber potencia reactiva y corregir desbalances en cargas trifásicas. El sistema consiste en la interconexión *shunt* de un equipo Compensador Binario Tiristorizado (TBC) y un Filtro Activo de Potencia (FAP) que utiliza PWM para activar válvulas IGBT. En dicha configuración, el equipo TBC compensa la potencia reactiva fundamental y balancea la carga evitando corrientes de *inrush* y generando una despreciable cantidad de armónicos, mientras que el equipo FAP elimina el contenido armónico de la carga y compensa la pequeña cantidad de potencia reactiva fundamental residual a la operación del TBC.

El desempeño del equipo TBC es comparado para tres estrategias de control. La primera de ellas basa su operación en un sistema experto, el cual aplica control proporcional (con parámetros fijos) a una señal de error que indica las diferencias de magnitud entre las corrientes de línea y/o el desfase entre dichas corrientes y sus respectivos voltajes fase - neutro. La segunda estrategia incorpora el concepto de “adaptividad”, para ajustar los valores de los parámetros del control proporcional del sistema experto. La tercera estrategia, basada en un estudio analítico del sistema, utiliza muestras de las corrientes de línea en la carga para definir las susceptancias a conectar entre cada fase.

El equipo FAP, opera de modo de forzar las corrientes de línea en la fuente de voltaje a ser sinusoidales. Para ello posee dos lazos de control, el primero es un control PI dedicado a mantener estable el voltaje del condensador de la barra continua y el segundo está encargado de la modulación PWM para una referencia de corriente.

La estrategia de control propuesta permite un funcionamiento independiente para cada equipo, de modo de aprovechar al máximo las ventajas que cada uno de ellos ofrece en la solución del problema. De este modo, se consiguen respuestas estables en tiempos inferiores a tres ciclos, asegurando el balance y compensación en el caso de cargas contaminantes que posean un comportamiento altamente variante en el tiempo.

ABSTRACT

The present work studies control strategies for a system able to eliminate current harmonics, generate or absorb reactive power and correct unbalances in three-phase loads. The system consists in a shunt interconnection of a Thyristor Binary Compensator (TBC) and a PWM - IGBT Active Power Filter (APF).

In the proposed configuration, the TBC compensates fundamental reactive power and balances the load avoiding inrush currents and generating a negligible amount of harmonics, while APF eliminates load harmonics and compensates the residual reactive power after TBC operation.

TBC performance is compared for three control strategies. First of them bases its operation on an expert system, that applies proportional control (with fixed parameters) to an error signal that indicates the magnitude differences between line currents and/or phase differences between that currents and its respective phase-neutral voltages. Second strategy incorporates the “adaptivity” concept to adjust the parameters of the proportional control of the expert system. Third strategy, based on an analytic study of the system, utilizes samples of load line currents to define the amount of susceptances that is necessary to connect between each phase.

APF equipment forces source line currents to be sinusoidal. In order to do this two control loops are implemented, the first is a PI control dedicated to keep stable the voltage of APF capacitor and the second makes the PWM modulation for a current reference.

The proposed control strategy allows an independent operation of each equipment, trying to optimize the utilization of the advantages that each equipment offers for problem solution. Then, it is possible to obtain stable responses in less than three cycles, obtaining a reliable balance and power factor correction for highly dynamic loads.

I INTRODUCCIÓN.

El presente capítulo tiene por objeto ilustrar acerca de los motivos y objetivos de este trabajo de memoria, así como la organización de sus contenidos.

En primer lugar se exponen los aspectos básicos de balance y compensación para sistemas de alta potencia, que en definitiva motivan el desarrollo del presente trabajo.

Posteriormente, se muestran los objetivos principales y específicos que se pretenden alcanzar con el trabajo propuesto.

Para finalizar, se describe la organización de los contenidos de los distintos capítulos de la memoria y la forma en que cada capítulo contribuye a la solución de la problemática propuesta.

1.1 Aspectos básicos del balance y compensación de cargas trifásicas.

Desde el punto de vista eléctrico, el objetivo del balance y compensación de cargas trifásicas radica en equilibrar la potencia activa que es entregada desde la fuente de alimentación hacia una carga industrial y a la vez reducir o cancelar la potencia reactiva demandada por la misma.

Dentro de las principales razones que justifican la corrección de los desequilibrios de potencia activa y reactiva en la carga se encuentra el hecho de que no es económico suministrar la demanda de potencia reactiva directamente desde el sistema eléctrico. Además, en caso de grandes desequilibrios en los consumos de potencia, el sistema es muy débil para mantener en los terminales un voltaje con variaciones aceptables.

Adicionalmente, la existencia de cargas contaminantes de armónicas afecta tanto las corrientes de línea como los voltajes de alimentación, introduciendo distorsiones que afectan la eficiencia de los sistemas de distribución.

La fenomenología anteriormente descrita es altamente perjudicial desde el punto de vista eléctrico, ya que afecta el desempeño de los equipos que se encuentran conectados a la red, acortando su vida útil, y exponiéndolos a un riesgo de destrucción en caso de perturbaciones importantes de la alimentación. Además las sobretensiones y/o sobrecorrientes muchas veces interrumpen la faena productiva de las industrias, con las consiguientes pérdidas económicas.

Por otra parte, al analizar la misma temática anterior, esta vez desde el punto de vista legal, se tiene que la materia de calidad de la energía eléctrica es de suma importancia tanto para las empresas generadoras y distribuidoras como para los consumidores, especialmente industriales [Ley98]. La razón de este interés recae en los criterios económicos involucrados en este concepto, ya que el marco legislativo establece multas para quienes excedan los límites permisibles en la normativa técnica vigente.

A partir del año 1998 la CNE (Comisión Nacional de Energía) ha estado avocada a establecer los estándares que permitan asegurar una mejora sustancial de la calidad del suministro de energía eléctrica [Ley98]. Este hecho obedece a las tendencias internacionales de tornar más rigurosos los límites que definen el concepto de calidad de suministro.

Al respecto Chile, conforme a la Ley General de Servicios Eléctrico y a través del Decreto Supremo N° 327 publicado en el Diario Oficial del 10 de septiembre de 1998, se establecen criterios para la regularización del factor de potencia de cargas industriales, componentes de secuencia negativa, fenómenos “*flicker*” y contenido armónico en la red. (Comisión Nacional de Energía).

Es así como en la legislación, para el caso del factor de potencia de cargas industriales (definido como la razón entre la potencia activa y aparente del consumo) se especifica en el artículo 294 un mínimo aceptable de 93% inductivo para el cálculo de los precios de la energía a nivel de distribución. Si este límite no es respetado, la industria incurre en gastos por concepto de multas adicionales de acuerdo al contrato que haya suscrito.

Respecto a las componentes de secuencia negativa, un consumo no debe exceder su existencia más allá de un 2% de la componente de secuencia positiva durante el 95% del tiempo. Este factor está directamente relacionado con los desbalances en las cargas, los cuales inherentemente generan dichas componentes indeseables.

Por último, el contenido armónico para tensiones menores a 110 [KV] debe estar restringido a un 5% del voltaje nominal para las armónicas 3^a y 7^a, mientras que en el caso de la 5^a armónica es aceptado un 6% del voltaje nominal. Por este motivo, para el caso de industrias contaminantes tales como los hornos de arco, etc. se hace necesaria la utilización de equipos dedicados a la reducción y/o eliminación de las armónicas generadas.

Esta realidad, eléctrica y económica, motiva fuertemente la investigación de nuevas topologías destinadas a la compensación y balance de cargas industriales trifásicas, como es el caso del presente trabajo. Dichas topologías deben ser capaces de asegurar una respuesta apropiada frente a cargas cuyos requerimientos de potencia reactiva o corrientes armónicas son altamente variables en el tiempo.

1.2 Objetivos de la memoria.

De acuerdo con la problemática presentada en la sección precedente, el primer objetivo general de este trabajo de memoria, consiste en la investigación, diseño y validación de un sistema de control para un compensador trifásico de reactivos y balanceador de cargas.

Lo anterior incluye el estudio del equipo que va a ser controlado que en este caso corresponde a un compensador binario tiristorizado, TBC (*“Thyristored Binary Compensator”*) [Dixon99II], el cual es capaz de compensar y equilibrar los consumos de potencia asociado a una carga conectada a una red de tensión mayor a 13.8 [KV].

Por otra parte, dentro de los objetivos específicos se persigue que el sistema de control cumpla con las siguientes características:

1. Ser capaz de calcular con precisión los valores de las susceptancias que es necesario conectar entre cada una de las fases del sistema eléctrico para lograr factor de potencia unitario y corrientes equilibradas en la carga.
2. Lograr una rápida respuesta dinámica que permita realizar la compensación de cargas dinámicas, en un número de ciclos no superior a 3.
3. Ser capaz de entregar soluciones estables de modo que no sean interferidas por perturbaciones ajenas a los cambios de carga (por ejemplo transitorios propios de las líneas de transmisión).
4. Posibilitar su implementación en tiempo real, idealmente con un número mínimo de variables sensadas, de modo que sea económico y sencillo de llevar a cabo.

Adicionalmente, el presente trabajo de memoria se extiende para concretar un segundo objetivo general el cual está referido a solucionar la problemática de cancelación de armónicos presentes en la carga. Para ello se propone el estudio teórico, análisis y validación a través de simulaciones de un sistema basado en la conexión en cascada del equipo TBC estudiado y un filtro activo paralelo (FAP) [Contard97].

Para satisfacer este segundo objetivo general se proponen los siguientes objetivos específicos:

1. El estudio de la configuración propuesta, analizando sus ventajas comparativas respecto de otras soluciones al problema, las precauciones y limitaciones que deben considerarse en la operación conjunta de ambos equipos.
2. La validación del estudio teórico anterior mediante la simulación del sistema interconectado bajo distintas condiciones de carga (cargas lineales y no lineales) para una red de alta potencia.

1.3 Organización de contenidos.

La memoria se encuentra organizada en cuatro áreas fundamentales. La primera de ellas, correspondiente a los capítulos 2 y 3, se refiere a la descripción del problema de compensación y balance de carga en alta potencia y su solución a través de un compensador binario tiristorizado (TBC). Respecto de este equipo se describen los fundamentos analíticos de funcionamiento (capítulo 2) y se analizan tres posibles estrategias de control en forma teórica, evaluándose sus resultados a través de simulaciones (capítulo 3).

La segunda área que compone el presente trabajo de memoria corresponde a un estudio de un filtro activo paralelo (FAP) que permite compensar, balancear y cancelar armónicos en la carga, a potencias bajas o moderadas. Las descripciones y principios de funcionamiento pertinentes a este tema se exponen en el capítulo 4.

Una tercera área contenida en el capítulo 5 muestra la configuración propuesta, consistente en la operación en cascada del equipo TBC con el equipo FAP. Este último diseñado para una potencia de operación baja (que mejore su desempeño y costo) y conectado a la red a través de un transformador reductor de tensión. Se señalan las ventajas de esta configuración y las consideraciones a tomar en cuenta para la operación conjunta de los equipos.

En el capítulo 6, se presentan los resultados obtenidos a través de simulaciones para distintas condiciones de carga, junto con los correspondientes análisis que avalan el contenido del capítulo anterior.

Finalmente, el capítulo 7 de este trabajo se refiere a las conclusiones y desarrollos futuros para el tema trabajado en esta memoria.

II DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO COMPENSADOR – BALANCEADOR DE CARGAS TRIFÁSICAS.

En el presente capítulo se analizarán las características relevantes del equipo *Compensador-Balanceador* de cargas trifásicas, en adelante TBC (Thyristor Binary Compensator), cuyo sistema de control es uno de los objetivos del presente trabajo. Inicialmente se explica la configuración básica que permite al equipo equilibrar las corrientes de una carga industrial y simultáneamente lograr un máximo aprovechamiento de la potencia entregada por la alimentación. Posteriormente se analizan los momentos óptimos de conexión para cada uno de los elementos de potencia involucrados en el equipo, así como las bases para la estrategia básica de control que determine cuáles deben ser los elementos en cuestión que deben ser conectados [DelVall01].

2.1 Configuración del equipo TBC.

El equipo *Compensador-Balanceador* [DelVall01] de cargas trifásicas ha sido concebido como una red de susceptancias en configuración delta que es conectada en paralelo a la carga industrial, tal como se aprecia en la figura 2.1, donde $B_{ij}^{(c)}$ representa la susceptancia de compensación e Y_{ij} la carga existente entre las fases de alimentación i y j .

La compensación y el balance de carga se realiza mediante la adecuada conexión de susceptancias entre cada una de las fases de modo que, para la fuente de alimentación, todo el conjunto sea equivalente a una carga resistiva equilibrada.

Bajo este esquema, para un correcto funcionamiento del equipo, el diseño del sistema de control debe considerar la resolución de dos problemas independientes [Gyugyi78]. El primero radica en procurar una adecuada conexión de los elementos de potencia dentro del equipo que representan físicamente a las susceptancias previamente calculadas. El segundo problema consiste en calcular el valor de las susceptancias que es necesario conectar entre cada fase con el fin de

lograr el efecto de compensación y balance anteriormente mencionado, cuestión que depende directamente de la carga trifásica existente.

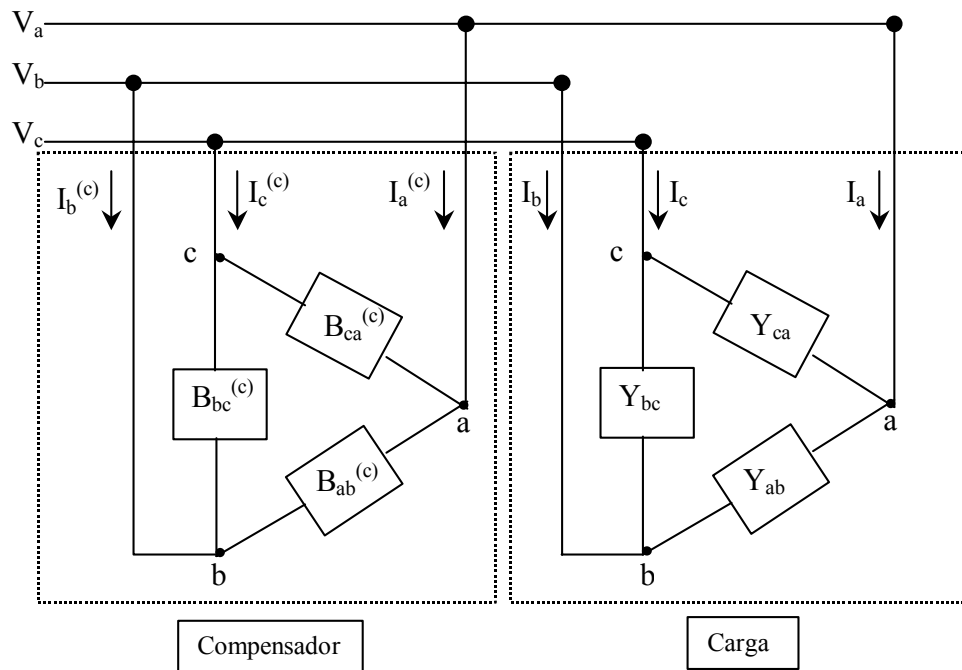


Figura 2.1: Carga trifásica y equipo compensador - balanceador

La compensación y el balance de carga se realiza mediante la adecuada conexión de susceptancias entre cada una de las fases de modo que, para la fuente de alimentación, todo el conjunto sea equivalente a una carga resistiva equilibrada.

Bajo este esquema, para un correcto funcionamiento del equipo, el diseño del sistema de control debe considerar la resolución de dos problemas independientes. El primero radica en procurar una adecuada conexión de los elementos de potencia dentro del equipo que representan físicamente a las susceptancias previamente calculadas [DeVall01]. El segundo problema consiste en calcular el valor de las susceptancias que es necesario conectar entre cada fase con el fin de lograr el efecto de compensación y balance anteriormente mencionado, cuestión que depende directamente de la carga trifásica existente.

Con el fin de solucionar el primer problema mencionado, el equipo incorpora un versátil diseño basado en la existencia de tres estructuras idénticas conectadas en configuración delta. Cada una de esas estructuras, en adelante denominadas “ramas”, se basa en la existencia de una cadena binaria de capacitores [Maffr98] controlados mediante interruptores unidireccionales de potencia consistentes en un tiristor (en conexión de cátodo común) con su respectivo diodo en conexión antiparalela [Dixon99II]. Adicionalmente se tiene una inductancia conectada en paralelo con el sistema, la cual a su vez está en serie con dos tiristores en antiparalelo, tal como muestra la figura 2.2.

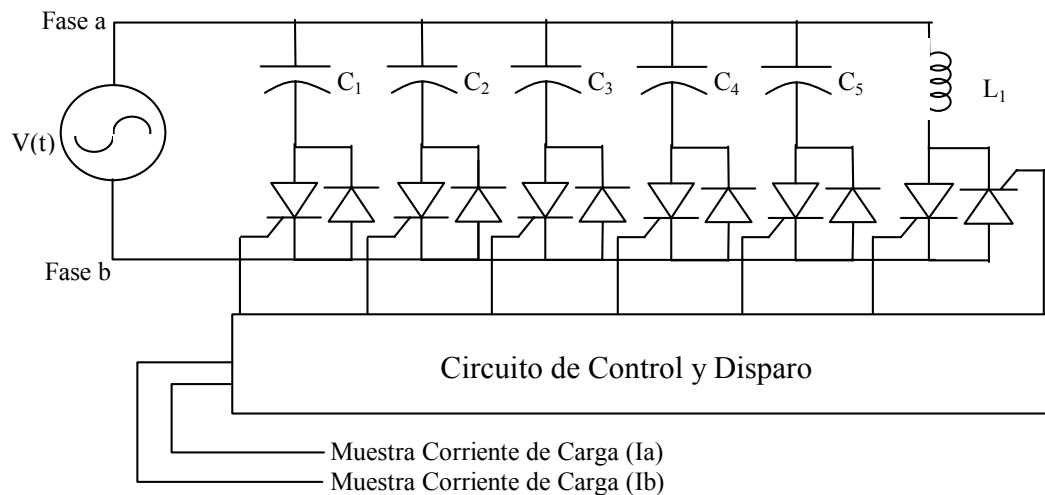


Figura 2.2: Configuración de una rama del equipo TBC

Las capacidades en cada rama se fijan de modo de producir un escalamiento binario (potencia de 2) entre ellas. De esta forma, la capacidad del condensador de la segunda rama (C_2) duplica en valor al de la primera (C_1), el de la tercera rama (C_3) duplica al de la segunda (C_2) y así sucesivamente. El valor de la inductancia del sistema queda fijado de modo de tener una absorción de reactivos equivalente a la suma de las capacidades de cada rama, para las condiciones de operación normales, para las que está diseñado el sistema [DelVall01].

Esta última característica es la que permite una variación lineal, pero escalonada de la capacidad total de compensación [Dixon99II], ya sea absorbiendo o

entregando reactivos al sistema eléctrico al cual se está conectado, en función de la conexión o desconexión de los elementos de cada rama. La precisión de la variación queda determinada por el condensador de menor valor. A su vez, la capacidad total de compensación la determina la suma de todas las capacidades individuales.

Los circuitos de conexión existentes, explicados en detalle posteriormente, permiten la conexión y/o desconexión suave de los condensadores e inductancias, de modo de evitar las corrientes de “*inrush*” y la generación de armónicas hacia el sistema eléctrico [Maffr98]. Por otra parte, el cálculo de los valores de las susceptancias a conectar será analizado con profundidad, a la luz de las ecuaciones que rigen la dinámica del proceso.

2.1.1 Principios de conexión para condensadores de cada rama.

Para determinar el momento óptimo de conexión en el caso de los condensadores, se analizará la configuración propuesta para una de las ramas tal como muestra la figura 2.3 [Maffr98].

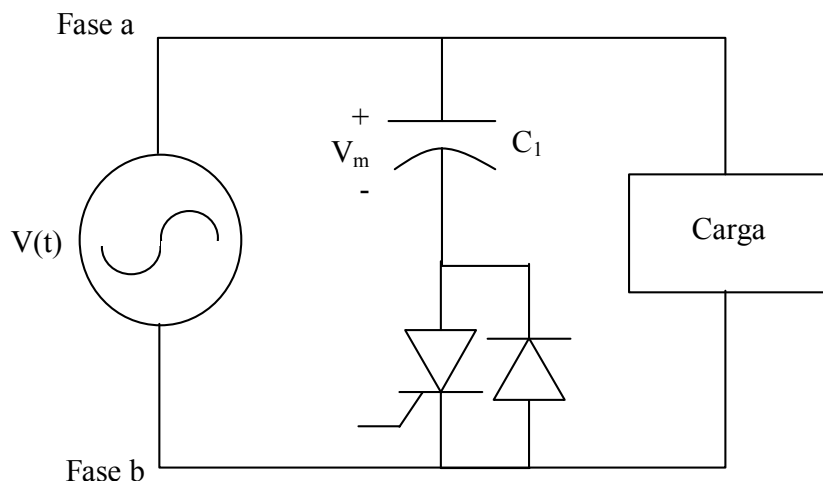


Figura 2.3: Circuito de conexión de condensadores

Mientras el tiristor esté apagado, el condensador se carga a través del diodo al voltaje máximo negativo $-V_m$ entre las fases correspondientes. El condensador no se puede descargar puesto que el tiristor se encuentra apagado, de modo que la rama se comporta como circuito abierto.

Para poder obtener una conexión suave, es necesario que se cumplan dos condiciones. La primera de ellas es que la variación de tensión al momento de disparar el tiristor sea nula, y la segunda es que el voltaje ánodo-cátodo en el tiristor sea nulo. Matemáticamente es posible demostrar que ambas condiciones se cumplen cuando $v(t)$ alcanza su valor máximo negativo de tensión. Por lo tanto el encendido del tiristor y la descarga del condensador debe comenzar cuando $\omega t = 270^\circ$. A partir de ese instante debido a que $\sin(270^\circ) = -\cos(0^\circ)$, si el tiristor se enciende, se tiene que la tensión en el condensador para $\omega t_0 \geq 270^\circ$ está dada por la ecuación 2.1 [Dixon99II].

$$V_c(t_0) = -V_m \cos(\varpi \cdot t_0) \quad (2.1)$$

Luego, la corriente en el condensador se rige por la siguiente expresión [DelVall01]:

$$i_c = C \cdot \left. \frac{dV_c}{dt} \right|_{t=t_0} = C \cdot V_m \left. \frac{d}{dt} (-\cos(\varpi \cdot t)) \right|_{t=t_0} = C \cdot V_m \operatorname{sen}(\varpi \cdot t_0) \quad (2.2)$$

Esto muestra que la corriente en el condensador comienza a crecer desde cero en forma sinusoidal hasta completar un ciclo. Cuando la corriente en el tiristor se hace nula (o tiende a hacerse negativa), dicho elemento se apaga por lo que el condensador completa el ciclo de corriente a través del diodo en antiparalelo quedando nuevamente cargado a $-V_m$.

2.1.2 Principios de conexión para inductores de cada rama.

Considerando el circuito de la figura 2.4, es posible constatar que cuando los tiristores están apagados no existe circulación de corriente a través de la inductancia. Sin embargo, al momento de conectar los tiristores se establece una corriente cuya magnitud depende del ángulo de disparo respectivo de cada tiristor, el cual es medido a partir de los cruces por cero del voltaje.

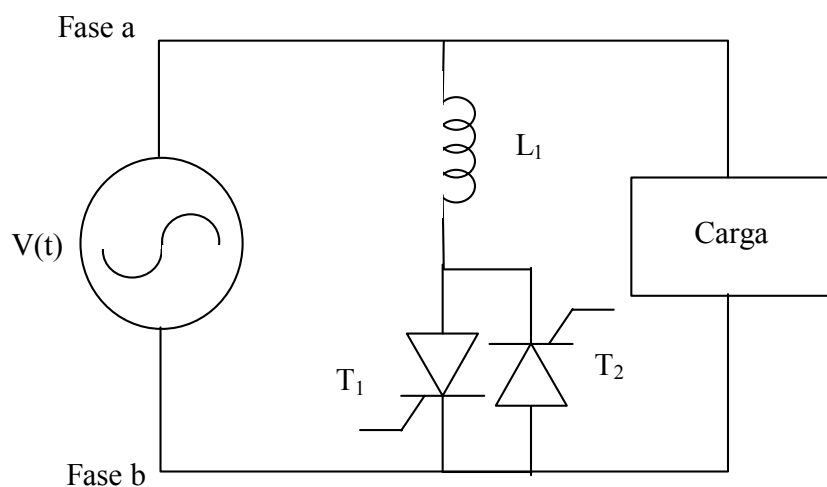


Figura 2.4: Circuito de conexión de inductores

Dado que la forma de onda requerida para la corriente es sinusoidal, se requiere que los semiciclos positivo y negativo de corriente sean simétricos, por lo que los ángulos de disparo de los tiristores **T1** y **T2** deben ser idénticos [Moran90], es decir:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha \quad (2.3)$$

Además, se tiene que el rango de variación de α es:

$$\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi \quad (2.4)$$

Matemáticamente es posible demostrar que la corriente a través de la inductancia sólo es sinusoidal pura si $\alpha = 90^\circ$.

Conforme a lo anterior, los tiristores deben encenderse con un ángulo de disparo $\alpha = 90^\circ$. De este modo la corriente crece desde cero en forma sinusoidal, sin distorsiones, al igual que en el caso de los condensadores.

2.2 Cálculo de susceptancias necesarias para balance y compensación de cargas trifásicas.

El método mediante el cuál se determina el valor de las susceptancias que es necesario conectar entre cada fase del sistema eléctrico, con el fin de lograr una compensación y balance de una carga trifásica, se basa en suponer un cierto grado de conocimiento acerca de sus características más importantes.

De este modo, suponiendo que la carga entre dos fases i, j cualesquiera (ver figura 2.1) se representa a través de una admitancia conocida:

$$Y_{ij} = G_{ij} + j \cdot B_{ij} \quad (2.5)$$

Y asumiendo una fuente de voltaje balanceada y con rotación de fase positiva, es decir:

$$V_a = V \quad V_b = a^2 V \quad V_c = a V \quad (2.6)$$

donde:

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -0.5 + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.7)$$

Se tiene que las corrientes de línea en la carga se obtienen de las siguientes expresiones [Gyugyi78]:

$$I_a = \{Y_{ab} \cdot (1 - a^2) - Y_{ca} \cdot (a - 1)\} \cdot V \quad (2.8)$$

$$I_b = \{Y_{bc} \cdot (a^2 - a) - Y_{ab} \cdot (1 - a^2)\} \cdot V \quad (2.9)$$

$$I_c = \{Y_{ca} \cdot (a - 1) - Y_{bc} \cdot (a^2 - a)\} \cdot V \quad (2.10)$$

Analizando las componentes de secuencia positiva, negativa y cero de las corrientes anteriormente calculadas, es posible demostrar que siempre existen valores de susceptancias capaces de compensar y balancear la carga. En efecto, si se obtienen las secuencias cero, positiva y negativa para un sistema sin neutro conectado, considerando la transformación dada por las ecuaciones (2.11) a (2.13):

$$I_{a0} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} = 0 \quad (2.11)$$

$$I_{a1} = \frac{I_a + a \cdot I_b + a^2 \cdot I_c}{3} \quad (2.12)$$

$$I_{a2} = \frac{I_a + a^2 \cdot I_b + a \cdot I_c}{3} \quad (2.13)$$

Se deduce que las componentes para las corrientes de línea en la carga son:

$$I_{a0} = 0 \quad (2.14)$$

$$I_{a1} = (Y_{ab} + Y_{bc} + Y_{ca}) \cdot V \quad (2.15)$$

$$I_{a2} = -(a^2 Y_{ab} + Y_{bc} + a Y_{ca}) \cdot V \quad (2.16)$$

Si se realiza un cálculo análogo al anterior para el sistema *Compensador-Balanceador*, se tiene que las componentes de secuencia están dadas por:

$$I_{a0}^{(c)} = 0 \quad (2.17)$$

$$I_{a1}^{(c)} = j(B_{ab}^{(c)} + B_{bc}^{(c)} + B_{ca}^{(c)}) \cdot V \quad (2.18)$$

$$I_{a2}^{(c)} = -j(a^2 B_{ab}^{(c)} + B_{bc}^{(c)} + aB_{ca}^{(c)}) \cdot V \quad (2.19)$$

El balance de la carga trifásica exige que la secuencia negativa del conjunto *compensador-carga* debe ser nula. Adicionalmente si se desea corregir el factor de potencia, debe cumplirse que la secuencia positiva de la corriente tenga sólo componente real. Ambas condiciones se resumen en las siguientes expresiones [Gyugyi78]:

$$I_{a2}^{(c)} + I_{a2} = 0 \quad (2.20)$$

$$I_{a1}^{(c)} + \text{Im}(I_{a1}) = 0 \quad (2.21)$$

Reemplazando las ecuaciones (2.14) a (2.19) en las expresiones (2.20) y (2.21), y considerando la solución del sistema de ecuaciones anterior, se tiene que las susceptancias para el sistema *Compensador-Balanceador* quedan determinadas por las siguientes expresiones:

$$B_{ab}^{(c)} = k \cdot \left(-\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Im}(I_{a1}) - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Im}(I_{a2}) + \text{Re}(I_{a2}) \right) \quad (2.22)$$

$$B_{bc}^{(c)} = k \cdot \left(-\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Im}(I_{a1}) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \text{Im}(I_{a2}) \right) \quad (2.23)$$

$$B_{ca}^{(c)} = k \cdot \left(-\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Im}(I_{a1}) - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \text{Im}(I_{a2}) - \text{Re}(I_{a2}) \right) \quad (2.24)$$

$$k = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot V} \quad (2.25)$$

Finalmente, es posible utilizar la definición inicial para las corrientes de línea en función de las admitancias de carga ilustrada en las ecuaciones (2.8) a (2.10), para obtener expresiones de las susceptancias de compensación que dependen únicamente de datos explícitos referidos a la carga [Gyugyi78].

$$B_{ab}^{(c)} = -B_{ab} + \frac{G_{ca} - G_{bc}}{\sqrt{3}} \quad (2.26)$$

$$B_{bc}^{(c)} = -B_{bc} + \frac{G_{ab} - G_{ca}}{\sqrt{3}} \quad (2.27)$$

$$B_{ca}^{(c)} = -B_{ca} + \frac{G_{bc} - G_{ab}}{\sqrt{3}} \quad (2.28)$$

A pesar de que el planteamiento anterior fue resuelto para un caso estático, es posible hacer la extensión para cargas que varíen en el tiempo, aplicando un sistema de control apropiado que sea capaz de seguir la dinámica que presente la carga industrial. La implementación del mencionado control se analizará con detalle en el capítulo siguiente.

III ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA EL EQUIPO TBC

En el presente capítulo se analiza la aplicación de tres estrategias de control para el equipo TBC, que cumplen con el objetivo de calcular los valores de las susceptancias que es necesario conectar entre cada una de las fases del sistema eléctrico para lograr factor de potencia unitario y corrientes equilibradas en la carga.

Todos los métodos estudiados se basan en el conocimiento de variables eléctricas básicas en un sistema de potencia, tales como las magnitudes de las corrientes en la carga o el desfase existente entre las ondas de tensión y voltaje (medido en milisegundos o grados sexagesimales según corresponda). La obtención de dichas variables es factible de implementar mediante sensores de corriente de línea (LEM) y transformadores de toma de muestra de tensión.

Cada método es simulado mediante rutinas elaboradas en lenguaje C++, basándose en las ecuaciones diferenciales que gobiernan el sistema eléctrico, consistente en el equipo TBC y la carga industrial.

El primer método corresponde a un sistema experto con control proporcional que intenta anular tanto la diferencia que pudiese existir entre las magnitudes de las tres corrientes de línea como la diferencia temporal existente entre el cruce por cero con pendiente positiva de las formas de onda de la corriente a través de una fase y el respectivo voltaje de línea.

La segunda técnica incorpora el concepto de *adaptividad* [Wang93], modificando las ganancias relacionadas con el controlador proporcional anteriormente definido de acuerdo al resultado de la *fuzzificación* de las variables controladas en sendos conjuntos asociados a estados de desequilibrio más o menos importantes en el sistema.

La tercera estrategia de control se basa en el estudio analítico de las expresiones para las corrientes y voltajes de línea en el caso de cargas desbalanceadas. La ley de control resultante calcula el valor de las susceptancias a conectar para lograr el balance y compensación de la carga tan sólo evaluando mediciones de las corrientes de línea en los instantes adecuados [Gyugyi78].

Las técnicas presentadas se basan en estrategias sencillas que permiten lograr un reducido tiempo de respuesta y un alto grado de estabilidad en la variable controlada, de modo de ser factibles de implementar para la compensación y balance de cargas industriales dinámicas.

3.1 Sistema Experto de Control para equipo TBC.

Un sistema experto es aquel que es capaz de realizar acciones de control basándose en información que describe el estado actual del proceso y en un conjunto de reglas de decisión que conforman la base de conocimiento existente acerca del comportamiento de dicho proceso [Suge93]. El método de evaluación de las reglas incluye alternativas tan sencillas como la lógica convencional o de mediana complejidad como es el caso de la lógica difusa [Tang87] y relajación de restricciones de operación.

Independiente del método utilizado para la evaluación del conjunto de reglas, la confección de la base de conocimiento debe describir el comportamiento del proceso tanto dentro de los rangos de operación típicos como en los límites críticos de estabilidad para que las acciones de control aseguren la convergencia a una solución estable.

En el caso del equipo TBC esto equivale a determinar qué tipo de susceptancias (inductivas o capacitivas) es adecuado conectar, entre cada fase de la alimentación, con el fin de disminuir el desbalance existente en una carga industrial en particular. La presente sección presenta los criterios básicos que deben considerarse en la conexión de susceptancias, de modo de lograr balance o compensación de una carga, en función de la diferencia de magnitud que exista entre las corrientes de línea y el desfase (medido en [mseg]) entre los respectivos voltajes fase-neutro y dichas corrientes.

Con el fin de simplificar la solución del problema, se ha decidido resolver en forma inicial el desbalance existente en la carga, si existiese. Una vez que la diferencia de magnitud entre las corrientes de línea sea pequeña, el problema de

compensación de carga trifásica se reduce a la compensación de la corriente de sólo una de las fases, debido a que la simetría existente entre las fases de un sistema balanceado obliga a inyectar o consumir la misma cantidad de reactivos en cada una de ellas para realizar una compensación equilibrada.

Para el caso de balance de carga de un sistema eléctrico cuya fuente de voltaje se asume balanceada y con rotación de fase positiva *a-b-c* (acápite 2.2), se ha procedido a vincular las variaciones que es necesario realizar en las susceptancias conectadas entre las fases de alimentación *i* y *j* (ΔB_{ij}) con la condición de adelanto o atraso que posea la corriente de línea I_i . Dependiendo de la existencia o ausencia de la condición mencionada la variación de magnitud que experimenta la corriente en cuestión ante un incremento positivo de las susceptancias conectadas a la fase respectiva puede ser positiva o negativa.

La Tabla 3.1 resume las acciones de control recomendadas para el balance de cargas trifásicas, en relación con el signo de las variaciones de susceptancias, generadas tras un exhaustivo estudio realizado a través de la simulación del procedimiento. Dichas acciones están orientadas a realizar un balance “eficiente” de cargas y por tanto contribuyen en forma simultánea a mantener un factor de potencia muy cercano a uno, con lo que se simplifica el problema posterior de compensación.

Según este esquema, la decisión del sistema experto depende de la relación existente entre las magnitudes de cresta de las corrientes de línea I_{am} , I_{bm} e I_{cm} , procurando disminuir la magnitud de la corriente con mayor valor de cresta y aumentar la magnitud de la corriente con menor valor de cresta, de modo de establecer un criterio de convergencia dentro del punto de operación del sistema eléctrico.

La magnitud de la variación de cada susceptancia conectada entre las fases de alimentación dependerá directamente del método de control que se esté utilizando. En este sentido es útil relacionar dicho incremento con el valor absoluto de las diferencias de magnitud entre las corrientes de línea.

Tabla 3.1: Base de conocimiento del sistema experto de control

Condición atraso-adelanto	Relación entre magnitudes de corrientes de línea	Variación de susceptancia
I_a atrasa a V_a	$I_{am} > I_{bm} \quad I_{bm} > I_{cm}$	$\Delta B_{ab} > 0$
	$I_{am} > I_{bm} \quad I_{am} > I_{cm} \quad I_{cm} \geq I_{bm}$	$\Delta B_{ab} > 0$
	$I_{bm} > I_{am} \quad I_{bm} > I_{cm} \quad I_{cm} \geq I_{am}$	$\Delta B_{ab} < 0$
	$I_{cm} > I_{am} \quad I_{cm} > I_{bm} \quad I_{bm} \geq I_{am}$	$\Delta B_{ab} < 0$
I_a adelanta a V_a	$I_{am} > I_{bm} \quad I_{am} > I_{cm} \quad I_{cm} \geq I_{bm}$	$\Delta B_{ab} > 0$
	$I_{bm} > I_{am} \quad I_{bm} > I_{cm} \quad I_{am} \geq I_{cm}$	$\Delta B_{ab} < 0$
	$I_{bm} > I_{am} \quad I_{bm} > I_{cm} \quad I_{cm} \geq I_{am}$	$\Delta B_{ab} < 0$
	$I_{cm} > I_{am} \quad I_{cm} > I_{bm} \quad I_{am} \geq I_{bm}$	$\Delta B_{ab} > 0$
I_b atrasa a V_b	$I_{am} > I_{bm} \quad I_{am} > I_{cm} \quad I_{cm} \geq I_{bm}$	$\Delta B_{bc} < 0$
	$I_{bm} > I_{am} \quad I_{bm} > I_{cm} \quad I_{am} \geq I_{cm}$	$\Delta B_{bc} > 0$
	$I_{bm} > I_{am} \quad I_{bm} > I_{cm} \quad I_{cm} \geq I_{am}$	$\Delta B_{bc} > 0$
	$I_{cm} > I_{am} \quad I_{cm} > I_{bm} \quad I_{am} \geq I_{bm}$	$\Delta B_{bc} < 0$
I_b adelanta a V_b	$I_{am} > I_{bm} \quad I_{bm} > I_{cm}$	$\Delta B_{bc} > 0$
	$I_{bm} > I_{am} \quad I_{bm} > I_{cm} \quad I_{am} \geq I_{cm}$	$\Delta B_{bc} > 0$
	$I_{cm} > I_{am} \quad I_{cm} > I_{bm} \quad I_{am} \geq I_{bm}$	$\Delta B_{bc} < 0$
	$I_{cm} > I_{am} \quad I_{cm} > I_{bm} \quad I_{bm} \geq I_{am}$	$\Delta B_{bc} < 0$
I_c atrasa a V_c	$I_{am} > I_{bm} \quad I_{bm} \geq I_{cm}$	$\Delta B_{ca} < 0$
	$I_{bm} > I_{am} \quad I_{bm} > I_{cm} \quad I_{am} \geq I_{cm}$	$\Delta B_{ca} < 0$
	$I_{cm} > I_{am} \quad I_{cm} > I_{bm} \quad I_{am} \geq I_{bm}$	$\Delta B_{ca} > 0$
	$I_{cm} > I_{am} \quad I_{cm} > I_{bm} \quad I_{bm} \geq I_{am}$	$\Delta B_{ca} > 0$
I_c adelanta a V_c	$I_{am} > I_{bm} \quad I_{bm} \geq I_{cm}$	$\Delta B_{ca} < 0$
	$I_{am} > I_{bm} \quad I_{am} > I_{cm} \quad I_{cm} \geq I_{bm}$	$\Delta B_{ca} < 0$
	$I_{bm} > I_{am} \quad I_{bm} > I_{cm} \quad I_{cm} \geq I_{am}$	$\Delta B_{ca} > 0$
	$I_{cm} > I_{am} \quad I_{cm} > I_{bm} \quad I_{bm} \geq I_{am}$	$\Delta B_{ca} > 0$

El problema de compensación es activado una vez que el balance de carga está en su fase final y queda reducido a inyectar o absorber tantos reactivos como sea necesario con el fin de anular el desfase existente entre las ondas de corriente de línea y sus respectivos voltajes fase-neutro. La estrategia de control se basa en la medición del desfase entre las ondas de corriente y voltaje correspondientes a una de las tres fases involucradas mediante la detección de los

cruces por cero con pendiente positiva. Posteriormente se calcula a través de algún método de control convencional la cantidad de reactivos que es necesario inyectar o absorber para anular dicho desfase. El resultado de este cálculo se aplica a las dos fases restantes en forma directa puesto que el sistema es simétrico cuando está equilibrado.

A continuación se detalla la implementación de dos métodos de control utilizados para determinar la magnitud de las variaciones de la susceptancia conectada entre cada fase. Ambos métodos aseguran inicialmente la convergencia de la estrategia de balance de carga (de acuerdo al conjunto de reglas del sistema experto) y posteriormente calculan la cantidad de reactivos que es necesario inyectar o absorber para lograr compensación de carga en un sistema balanceado.

3.1.1 Controlador Proporcional del error de magnitud y fase.

El método de control proporcional del error de magnitud y fase relaciona, mediante una constante proporcional [Driank96], las variaciones de las susceptancias con la diferencia entre las magnitudes de cresta de las corrientes de línea (en el caso del balance de cargas trifásicas) o con la magnitud del desfase entre las ondas de corriente y voltaje de una fase determinada (en el caso de la compensación de reactivos).

El valor para cada constante proporcional es fijo y elegido de acuerdo a la respuesta del método de control frente a distintos tipos de perturbaciones.

En concordancia con el criterio de convergencia que sustenta las reglas de la base de conocimiento para el sistema experto, se procura lograr eficientemente una disminución de la magnitud de la corriente con mayor valor de cresta y un aumento en la magnitud de la corriente con menor valor de cresta. Tomando en cuenta este factor y mediante un estudio empírico basado en simulaciones de sistemas desequilibrados, se han especificado las acciones del control proporcional del error de magnitud en el conjunto de reglas del sistema experto tal como lo muestra la Tabla 3.2. Dichas acciones, enfocadas a lograr un balance en la carga

industrial trifásica, dependen de la constante proporcional G_d y del valor absoluto de la diferencia existente entre las magnitudes cresta de las corrientes especificadas.

Tabla 3.2: Sistema experto de control. Control proporcional

Condición atraso-adelanto	Relación entre magnitudes de corrientes de línea	Variación de susceptancia
I_a atrasa a V_a	$I_{am} > I_{bm} \quad I_{bm} > I_{cm}$	$\Delta B_{ab} = G_d \quad I_{am} - I_{bm} $
	$I_{am} > I_{bm} \quad I_{am} > I_{cm} \quad I_{cm} \geq I_{bm}$	$\Delta B_{ab} = G_d \quad I_{cm} - I_{am} $
	$I_{bm} > I_{am} \quad I_{bm} > I_{cm} \quad I_{cm} \geq I_{am}$	$\Delta B_{ab} = -G_d \quad I_{cm} - I_{am} $
	$I_{cm} > I_{am} \quad I_{cm} > I_{bm} \quad I_{bm} \geq I_{am}$	$\Delta B_{ab} = -G_d \quad I_{am} - I_{bm} $
I_a adelanta a V_a	$I_{am} > I_{bm} \quad I_{am} > I_{cm} \quad I_{cm} \geq I_{bm}$	$\Delta B_{ab} = G_d \quad I_{bm} - I_{cm} $
	$I_{bm} > I_{am} \quad I_{bm} > I_{cm} \quad I_{am} \geq I_{cm}$	$\Delta B_{ab} = -G_d \quad I_{am} - I_{bm} $
	$I_{bm} > I_{am} \quad I_{bm} > I_{cm} \quad I_{cm} \geq I_{am}$	$\Delta B_{ab} = -G_d \quad I_{bm} - I_{cm} $
	$I_{cm} > I_{am} \quad I_{cm} > I_{bm} \quad I_{am} \geq I_{bm}$	$\Delta B_{ab} = G_d \quad I_{am} - I_{bm} $
I_b atrasa a V_b	$I_{am} > I_{bm} \quad I_{am} > I_{cm} \quad I_{cm} \geq I_{bm}$	$\Delta B_{bc} = -G_d \quad I_{bm} - I_{cm} $
	$I_{bm} > I_{am} \quad I_{bm} > I_{cm} \quad I_{am} \geq I_{cm}$	$\Delta B_{bc} = G_d \quad I_{am} - I_{bm} $
	$I_{bm} > I_{am} \quad I_{bm} > I_{cm} \quad I_{cm} \geq I_{am}$	$\Delta B_{bc} = G_d \quad I_{bm} - I_{cm} $
	$I_{cm} > I_{am} \quad I_{cm} > I_{bm} \quad I_{am} \geq I_{bm}$	$\Delta B_{bc} = -G_d \quad I_{am} - I_{bm} $
I_b adelanta a V_b	$I_{am} > I_{bm} \quad I_{bm} > I_{cm}$	$\Delta B_{bc} = G_d \quad I_{bm} - I_{cm} $
	$I_{bm} > I_{am} \quad I_{bm} > I_{cm} \quad I_{am} \geq I_{cm}$	$\Delta B_{bc} = G_d \quad I_{cm} - I_{am} $
	$I_{cm} > I_{am} \quad I_{cm} > I_{bm} \quad I_{am} \geq I_{bm}$	$\Delta B_{bc} = -G_d \quad I_{cm} - I_{am} $
	$I_{cm} > I_{am} \quad I_{cm} > I_{bm} \quad I_{bm} \geq I_{am}$	$\Delta B_{bc} = -G_d \quad I_{bm} - I_{cm} $
I_c atrasa a V_c	$I_{am} > I_{bm} \quad I_{bm} \geq I_{cm}$	$\Delta B_{ca} = -G_d \quad I_{bm} - I_{cm} $
	$I_{bm} > I_{am} \quad I_{bm} > I_{cm} \quad I_{am} \geq I_{cm}$	$\Delta B_{ca} = -G_d \quad I_{cm} - I_{am} $
	$I_{cm} > I_{am} \quad I_{cm} > I_{bm} \quad I_{am} \geq I_{bm}$	$\Delta B_{ca} = G_d \quad I_{cm} - I_{am} $
	$I_{cm} > I_{am} \quad I_{cm} > I_{bm} \quad I_{bm} \geq I_{am}$	$\Delta B_{ca} = G_d \quad I_{bm} - I_{cm} $
I_c adelanta a V_c	$I_{am} > I_{bm} \quad I_{bm} \geq I_{cm}$	$\Delta B_{ca} = -G_d \quad I_{am} - I_{bm} $
	$I_{am} > I_{bm} \quad I_{am} > I_{cm} \quad I_{cm} \geq I_{bm}$	$\Delta B_{ca} = -G_d \quad I_{cm} - I_{am} $
	$I_{bm} > I_{am} \quad I_{bm} > I_{cm} \quad I_{cm} \geq I_{am}$	$\Delta B_{ca} = G_d \quad I_{cm} - I_{am} $
	$I_{cm} > I_{am} \quad I_{cm} > I_{bm} \quad I_{bm} \geq I_{am}$	$\Delta B_{ca} = G_d \quad I_{am} - I_{bm} $

En el momento en que la diferencia existente entre las magnitudes cresta de las corrientes de línea sea menor que un umbral fijo ΔI_u , es activado el control proporcional del error de fase. Dicho control calcula la variación que es necesario

realizar en el valor de las susceptancias conectadas entre las fases del sistema eléctrico de modo de anular el desfase existente entre las formas de onda de corriente y voltaje de cada fase. Dado que al momento de activarse dicho control el sistema se encuentra prácticamente balanceado, las variaciones en las susceptancias se considerarán iguales por lo que sólo es necesario conocer el desfase en una de las líneas de alimentación.

Denominando t_c al tiempo en [mseg] que transcurre entre el cruce por cero con pendiente positiva para la onda de voltaje y corriente de la fase elegida, se calcula la variación de susceptancia aplicando una constante proporcional G_t al medido desfase.

De este modo, las variaciones finales ΔB_{ij}^f que es necesario realizar en las susceptancias del TBC se obtienen de las siguientes expresiones.

$$\Delta B_{ab}^f = \Delta B_{ab} + G_t t_c \quad (3.1)$$

$$\Delta B_{bc}^f = \Delta B_{bc} + G_t t_c \quad (3.2)$$

$$\Delta B_{ca}^f = \Delta B_{ca} + G_t t_c \quad (3.3)$$

3.1.2 Controlador Proporcional Adaptivo Difuso del error de magnitud.

La elección de un valor fijo para las constantes de proporcionalidad de las leyes de control presenta inconvenientes y por tanto dificulta la priorización de las acciones de control para un punto de operación determinado del sistema eléctrico [Mam74]. A modo de ilustración considérese el caso en que la diferencia de magnitudes de cresta entre dos corrientes de línea (por ejemplo fases *a* y *b*) sea pequeña pero que difieran bastante de la tercera (en este caso, *c*); para efectos de reducción del tiempo de respuesta es conveniente controlar la conexión de susceptancias utilizando distintas constantes proporcionales para manejar ambas diferencias de magnitud, de modo que el sistema experto otorgue mayor énfasis al balance de la fase *c* respecto del ajuste de magnitudes entre las fases *a* y *b*.

Frente a esta problemática, el método de control proporcional adaptivo difuso [Wang93] del error de magnitud y fase determina los valores asignables a las constantes de proporcionalidad de las leyes de control, de acuerdo al resultado de la *fuzzificación* de los errores de magnitud existentes en las corrientes de línea, de modo de que dichos valores se adapten a las condiciones de balance existentes en la carga.

El control del error de fase, sin embargo, se efectúa mediante el control proporcional ya explicado al no detectarse mejoras significativas en el tiempo de respuesta al utilizar *adaptividad* en la determinación de la constante G_t .

En la implementación del método de control, el valor absoluto de las diferencias existentes entre las magnitudes de cresta de las corrientes de línea (identificadas mediante variables E_{ij} , de acuerdo a las ecuaciones 3.4, 3.5 y 3.6) se *fuzzifican* en tres conjuntos (error pequeño, error medio y error grande [Mam74]) analizando el nivel de pertenencia (μ_p ij , μ_m ij y μ_g ij respectivamente) de cada una de ellas según se aprecia en la figura 3.1.

$$E_{ab} = \|I_{am} - I_{bm}\| \quad (3.4)$$

$$E_{bc} = \|I_{bm} - I_{cm}\| \quad (3.5)$$

$$E_{ca} = \|I_{cm} - I_{am}\| \quad (3.6)$$

El valor final de la constante de proporcionalidad, que afecta a un determinado error de magnitud de corriente en las leyes de control del sistema experto, se obtiene ponderando valores definidos para ganancias pequeñas, medianas o grandes (G_p , G_m o G_g respectivamente) con los niveles de pertenencia de dicho error a cada conjunto difuso anteriormente definido, según las ecuaciones ilustradas en (3.7) a (3.9):

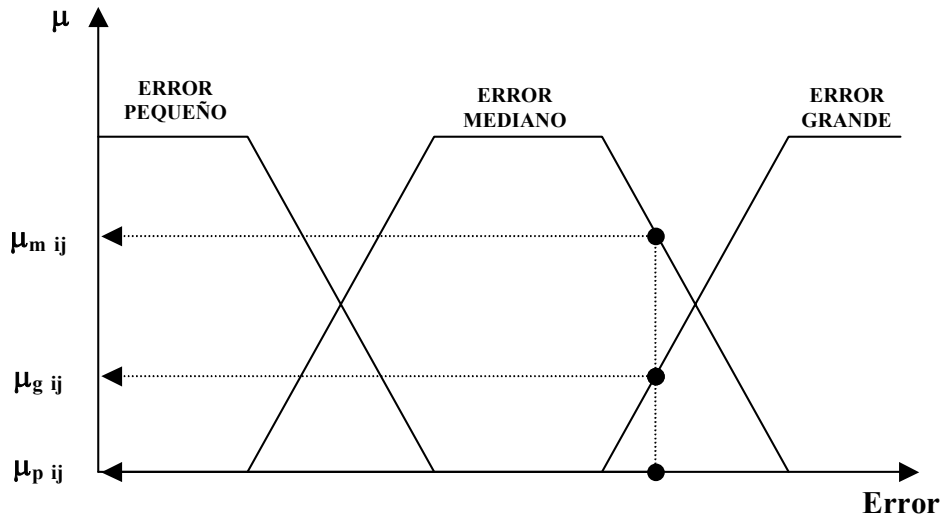


Figura 3.1: Fuzzificación del error de magnitud para corrientes de línea.

$$G_{ab} = \mu_{p ab} G_p + \mu_{m ab} G_m + \mu_{g ab} G_g \quad (3.7)$$

$$G_{bc} = \mu_{p bc} G_p + \mu_{m bc} G_m + \mu_{g bc} G_g \quad (3.8)$$

$$G_{ca} = \mu_{p ca} G_p + \mu_{m ca} G_m + \mu_{g ca} G_g \quad (3.9)$$

Definiendo t_c y G_t de forma análoga a la sección 3.1.1, las variaciones finales ΔB_{ij}^f que es necesario realizar en las susceptancias del TBC se obtienen de las ecuaciones (3.10) a (3.12):

$$\Delta B_{ab}^f = \Delta B_{ab} + G_t t_c \quad (3.10)$$

$$\Delta B_{bc}^f = \Delta B_{bc} + G_t t_c \quad (3.11)$$

$$\Delta B_{ca}^f = \Delta B_{ca} + G_t t_c \quad (3.12)$$

Finalmente, de acuerdo a lo anterior, el sistema experto de control queda definido por la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Sistema experto de control. Control proporcional difuso

Condición atraso-adelanto	Relación entre magnitudes de corrientes de línea	Variación de susceptancia
I_a atrasa a V_a	$I_{am} > I_{bm} \quad I_{bm} > I_{cm}$	$\Delta B_{ab} = G_{ab} \quad I_{am} - I_{bm} $
	$I_{am} > I_{bm} \quad I_{am} > I_{cm} \quad I_{cm} \geq I_{bm}$	$\Delta B_{ab} = G_{ca} \quad I_{cm} - I_{am} $
	$I_{bm} > I_{am} \quad I_{bm} > I_{cm} \quad I_{cm} \geq I_{am}$	$\Delta B_{ab} = -G_{ca} \quad I_{cm} - I_{am} $
	$I_{cm} > I_{am} \quad I_{cm} > I_{bm} \quad I_{bm} \geq I_{am}$	$\Delta B_{ab} = -G_{ab} \quad I_{am} - I_{bm} $
I_a adelanta a V_a	$I_{am} > I_{bm} \quad I_{am} > I_{cm} \quad I_{cm} \geq I_{bm}$	$\Delta B_{ab} = G_{bc} \quad I_{bm} - I_{cm} $
	$I_{bm} > I_{am} \quad I_{bm} > I_{cm} \quad I_{am} \geq I_{cm}$	$\Delta B_{ab} = -G_{ab} \quad I_{am} - I_{bm} $
	$I_{bm} > I_{am} \quad I_{bm} > I_{cm} \quad I_{cm} \geq I_{am}$	$\Delta B_{ab} = -G_{bc} \quad I_{bm} - I_{cm} $
	$I_{cm} > I_{am} \quad I_{cm} > I_{bm} \quad I_{am} \geq I_{bm}$	$\Delta B_{ab} = G_{ab} \quad I_{am} - I_{bm} $
I_b atrasa a V_b	$I_{am} > I_{bm} \quad I_{am} > I_{cm} \quad I_{cm} \geq I_{bm}$	$\Delta B_{bc} = -G_{bc} \quad I_{bm} - I_{cm} $
	$I_{bm} > I_{am} \quad I_{bm} > I_{cm} \quad I_{am} \geq I_{cm}$	$\Delta B_{bc} = G_{ab} \quad I_{am} - I_{bm} $
	$I_{bm} > I_{am} \quad I_{bm} > I_{cm} \quad I_{cm} \geq I_{am}$	$\Delta B_{bc} = G_{bc} \quad I_{bm} - I_{cm} $
	$I_{cm} > I_{am} \quad I_{cm} > I_{bm} \quad I_{am} \geq I_{bm}$	$\Delta B_{bc} = -G_{ab} \quad I_{am} - I_{bm} $
I_b adelanta a V_b	$I_{am} > I_{bm} \quad I_{bm} > I_{cm}$	$\Delta B_{bc} = G_{bc} \quad I_{bm} - I_{cm} $
	$I_{bm} > I_{am} \quad I_{bm} > I_{cm} \quad I_{am} \geq I_{cm}$	$\Delta B_{bc} = G_{ca} \quad I_{cm} - I_{am} $
	$I_{cm} > I_{am} \quad I_{cm} > I_{bm} \quad I_{am} \geq I_{bm}$	$\Delta B_{bc} = -G_{ca} \quad I_{cm} - I_{am} $
	$I_{cm} > I_{am} \quad I_{cm} > I_{bm} \quad I_{bm} \geq I_{am}$	$\Delta B_{bc} = -G_{bc} \quad I_{bm} - I_{cm} $
I_c atrasa a V_c	$I_{am} > I_{bm} \quad I_{bm} \geq I_{cm}$	$\Delta B_{ca} = -G_{bc} \quad I_{bm} - I_{cm} $
	$I_{bm} > I_{am} \quad I_{bm} > I_{cm} \quad I_{am} \geq I_{cm}$	$\Delta B_{ca} = -G_{ca} \quad I_{cm} - I_{am} $
	$I_{cm} > I_{am} \quad I_{cm} > I_{bm} \quad I_{am} \geq I_{bm}$	$\Delta B_{ca} = G_{ca} \quad I_{cm} - I_{am} $
	$I_{cm} > I_{am} \quad I_{cm} > I_{bm} \quad I_{bm} \geq I_{am}$	$\Delta B_{ca} = G_{bc} \quad I_{bm} - I_{cm} $
I_c adelanta a V_c	$I_{am} > I_{bm} \quad I_{bm} \geq I_{cm}$	$\Delta B_{ca} = -G_{ab} \quad I_{am} - I_{bm} $
	$I_{am} > I_{bm} \quad I_{am} > I_{cm} \quad I_{cm} \geq I_{bm}$	$\Delta B_{ca} = -G_{ca} \quad I_{cm} - I_{am} $
	$I_{bm} > I_{am} \quad I_{bm} > I_{cm} \quad I_{cm} \geq I_{am}$	$\Delta B_{ca} = G_{ca} \quad I_{cm} - I_{am} $
	$I_{cm} > I_{am} \quad I_{cm} > I_{bm} \quad I_{bm} \geq I_{am}$	$\Delta B_{ca} = G_{ab} \quad I_{am} - I_{bm} $

3.2 Sistema de Control basado en evaluación directa de componentes en cuadratura de corrientes de línea.

El sistema de control, basado en la evaluación directa de las componentes en cuadratura de corrientes de línea, calcula en forma exacta el valor de las susceptancias que deben conectarse entre cada fase, sobre la base de la

evaluación de una expresión analítica que depende únicamente de parámetros de la carga industrial. Dicha expresión se obtiene a partir de las ecuaciones (2.22) a (2.25) desarrolladas en el acápite 2.2 y tomando en cuenta la relación existente entre las impedancias y las corrientes de línea en la carga dadas por (2.8) a (2.10).

Agrupando convenientemente los términos en las ecuaciones mencionadas, se obtiene una relación directa entre las componentes en cuadratura de cada corriente de línea en la carga y las susceptancias que es necesario conectar entre cada fase. Dicha relación se ilustra en las ecuaciones (3.13) a (3.15) en donde la componente en cuadratura de cada corriente de línea se calcula como la componente imaginaria del conjugado del fasor respectivo [Gyugyi78].

$$B_{ab}^{(c)}(\sqrt{3}V) = -\frac{1}{\sqrt{3}} \left[\operatorname{Im} \left(\frac{V_a^*}{V} I_a \right) + \operatorname{Im} \left(\frac{V_b^*}{V} I_b \right) - \operatorname{Im} \left(\frac{V_c^*}{V} I_c \right) \right] \quad (3.13)$$

$$B_{bc}^{(c)}(\sqrt{3}V) = -\frac{1}{\sqrt{3}} \left[\operatorname{Im} \left(\frac{V_b^*}{V} I_b \right) + \operatorname{Im} \left(\frac{V_c^*}{V} I_c \right) - \operatorname{Im} \left(\frac{V_a^*}{V} I_a \right) \right] \quad (3.14)$$

$$B_{ca}^{(c)}(\sqrt{3}V) = -\frac{1}{\sqrt{3}} \left[\operatorname{Im} \left(\frac{V_c^*}{V} I_c \right) + \operatorname{Im} \left(\frac{V_a^*}{V} I_a \right) - \operatorname{Im} \left(\frac{V_b^*}{V} I_b \right) \right] \quad (3.15)$$

La sencillez de la implementación del método de control radica en el hecho de que la magnitud de la componente en cuadratura de una corriente dada es factible de medir mediante simple muestreo. Para lograrlo basta con sensar el valor de la corriente en el momento en que el voltaje de línea respectivo tenga su cruce por cero con pendiente positiva (ver figura 3.2). Esta característica es la que finalmente permite la aplicación del método en tiempo real.

Considerando lo anteriormente expuesto, las ecuaciones en (3.13) a (3.15) pueden describirse de acuerdo a las expresiones en (3.16) a (3.18), las que finalmente resumen la ley de control propuesta en el método. Dicha ley de control tiene la ventaja de depender únicamente de las corrientes de línea de la carga

industrial, por lo que es innecesaria la definición de referencias para las magnitudes o fases de las corrientes de línea en la fuente de voltaje del sistema.

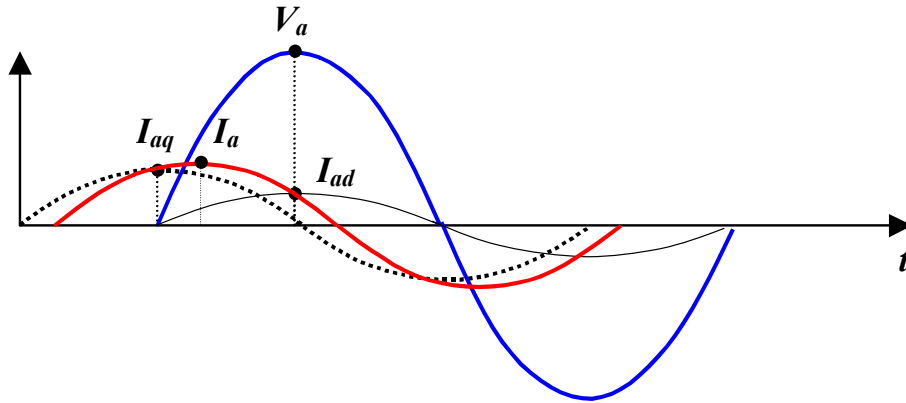


Figura 3.2: Determinación de componente en cuadratura de una corriente dada

$$B_{ab}^{(c)}(\sqrt{3}V) = -\frac{1}{\sqrt{3}} \left[i_a(t) \left. \frac{\partial V_a}{\partial t} \right|_{V_a=0} + i_b(t) \left. \frac{\partial V_b}{\partial t} \right|_{V_b=0} - i_c(t) \left. \frac{\partial V_c}{\partial t} \right|_{V_c=0} \right] \quad (3.16)$$

$$B_{bc}^{(c)}(\sqrt{3}V) = -\frac{1}{\sqrt{3}} \left[i_b(t) \left. \frac{\partial V_b}{\partial t} \right|_{V_b=0} + i_c(t) \left. \frac{\partial V_c}{\partial t} \right|_{V_c=0} - i_a(t) \left. \frac{\partial V_a}{\partial t} \right|_{V_a=0} \right] \quad (3.17)$$

$$B_{ca}^{(c)}(\sqrt{3}V) = -\frac{1}{\sqrt{3}} \left[i_c(t) \left. \frac{\partial V_c}{\partial t} \right|_{V_c=0} + i_a(t) \left. \frac{\partial V_a}{\partial t} \right|_{V_a=0} - i_b(t) \left. \frac{\partial V_b}{\partial t} \right|_{V_b=0} \right] \quad (3.18)$$

3.3 Simulación y análisis comparativo de los sistemas de control propuestos.

La efectividad de los métodos de control propuestos ha sido verificada mediante simulación con rutinas diseñadas en lenguaje C++. Dichas rutinas emulan las corrientes de línea en un sistema trifásico carente de neutro y con una barra infinita con un voltaje de 380 [V_{eff}] como fuente de alimentación. La carga industrial es emulada a través de ramas R-L-C paralelo en configuración delta, cuyos parámetros se ilustran en la Tabla 3.4. Las figuras siguientes ilustran los resultados

obtenidos más concluyentes y resumen los aspectos más importantes del comportamiento de los métodos de control estudiados.

En cada caso, el sistema de control se activa 0.05 [seg] después de iniciada la simulación, de modo de ajustar condiciones iniciales similares para cada método de control.

Tabla 3.4: Parámetros de carga industrial trifásica utilizada en simulación de métodos de control

Parámetro	Valor
R_{ab}	200 [Ω]
R_{bc}	150 [Ω]
R_{ca}	200 [Ω]
L_{ab}	0.5 [H]
L_{bc}	-----
L_{ca}	0.5 [H]
C_{ab}	-----
C_{bc}	16 [μ F]
C_{ca}	-----

3.3.1 Sistema Experto de Control basado en un Controlador Proporcional del error de magnitud y fase

La figura 3.3 muestra la respuesta del TBC ante la existencia de la carga industrial desequilibrada definida en la Tabla 3.4. Para una mejor visualización, en los gráficos de voltaje v/s corriente, esta última señal se identifica por el color verde.

Se aprecia como el método de control va paulatinamente disminuyendo la diferencia entre las magnitudes de cresta y el desfase de cada corrientes de línea. Sin embargo, el tiempo de respuesta del método es bastante elevado (cercano a los 0.15 [seg]) lo que dificultaría el balance de cargas dinámicas.

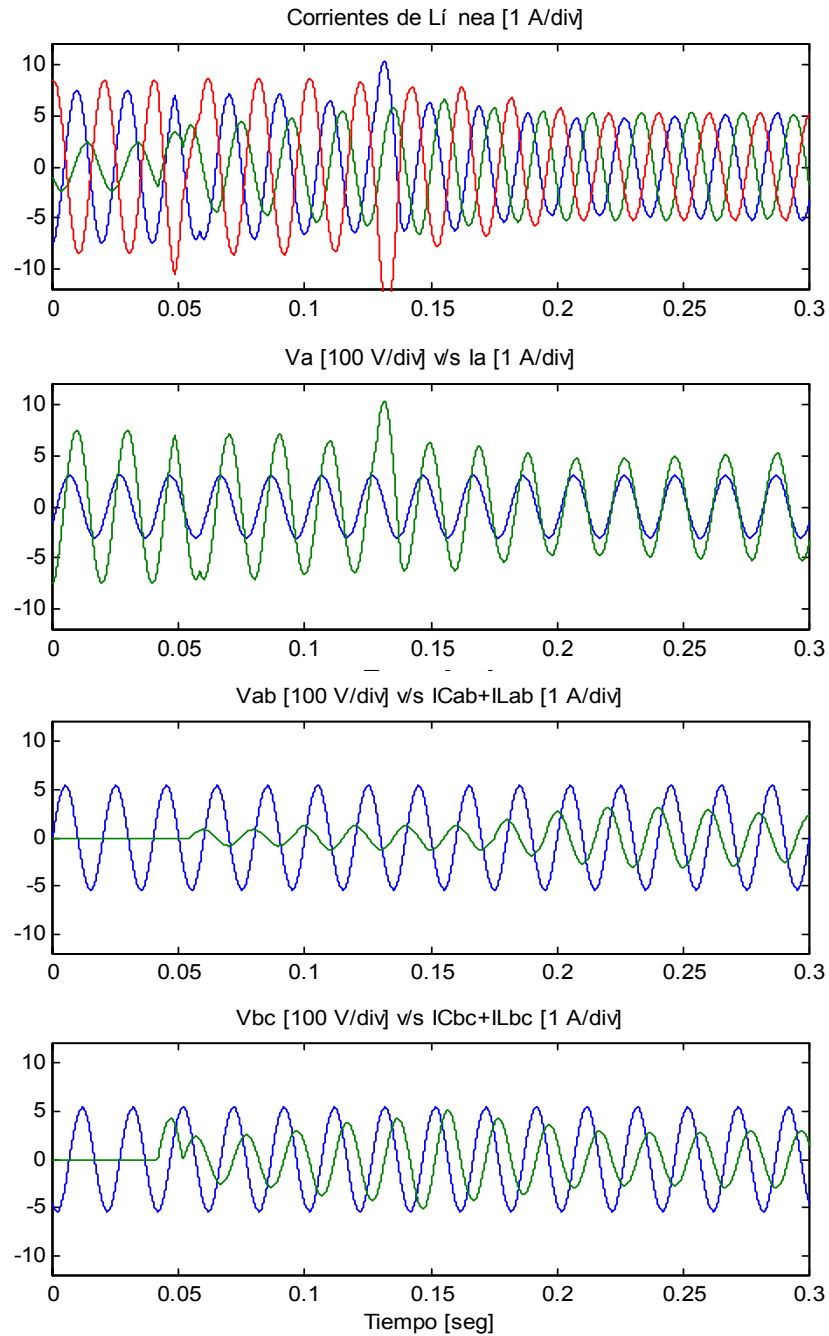


Figura 3.3: Resultados simulación de Sistema Experto basado en un controlador proporcional.

Adicionalmente, se aprecia una oscilación importante en las magnitudes de cresta de las corrientes de línea, probablemente causada por la utilización de una constante de proporcionalidad de valor fijo que es independiente del grado de desbalance existente en la carga, por lo que la sintonía de parámetros que sean efectivos para distintos puntos de operación es complicada.

El concepto de *adaptividad*, que se muestra a continuación, intenta solucionar este tipo de comportamientos no deseables, a través de una dependencia directa entre el desbalance existente y los valores de las constantes de proporcionalidad.

3.3.2 Sistema Experto de Control basado en un Controlador Proporcional Adaptivo Difuso del error de magnitud

La figura 3.4 muestra la respuesta del TBC ante la existencia de la carga industrial desequilibrada definida en la Tabla 3.4, utilizando el concepto de adaptividad en las ganancias proporcionales. Para mejor visualización en los gráficos de voltaje v/s corriente, esta última señal se ha identificado con color verde.

Se aprecia como el tiempo de respuesta del método de control disminuye considerablemente respecto al anterior (estabilización a los 0.09 [seg]), y cómo las oscilaciones en las magnitudes de las corrientes son amortiguadas por la *adaptividad* de las ganancias en las leyes de control.

El método, sin embargo, aún posee un tiempo de respuesta elevado para su utilización en cargas altamente dinámicas (la estabilización se produce en casi 5 ciclos) por lo que el método de control basado en evaluación directa cobra importancia dentro del set de métodos analizados.

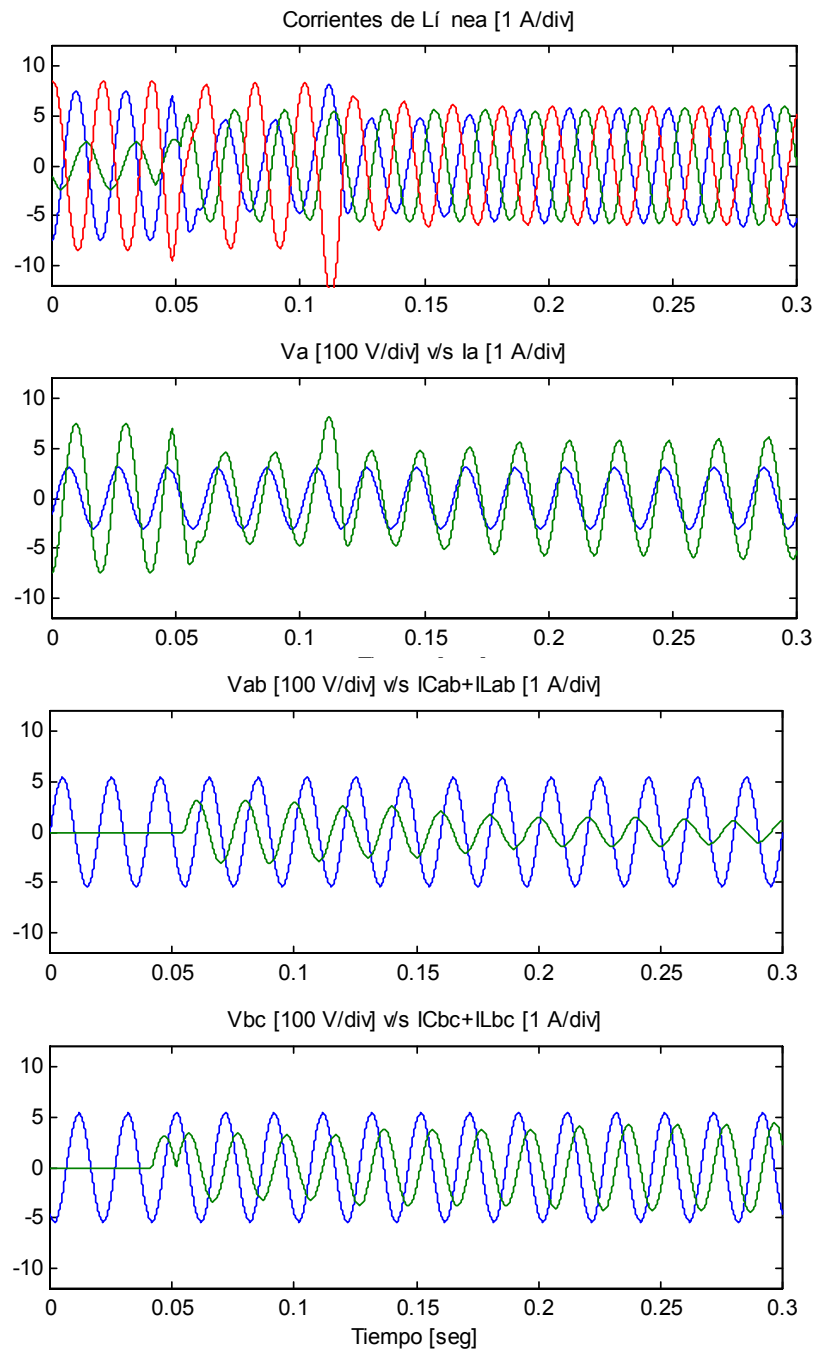


Figura 3.4: Resultados simulación de Sistema Experto basado en un controlador proporcional adaptivo difuso.

3.3.3 Sistema de Control basado en evaluación directa de componentes en cuadratura de corrientes de línea.

La evaluación de una expresión analítica directa en una ley de control permite un tiempo de respuesta casi instantáneo, lo que puede apreciarse claramente en la figura 3.5 donde se muestra la respuesta del TBC ante la existencia de la carga industrial desequilibrada definida en la Tabla 3.4.

Básicamente este método sólo requiere conocer los valores de las componentes en cuadratura durante el ciclo anterior para determinar los valores exactos para balancear y compensar la carga, lo que explica la estabilidad del sistema de control y su efectividad. Los gráficos de voltaje v/s corriente, donde esta última señal se identifica por el color verde, muestran en forma gráfica la mencionada efectividad en la compensación.

Adicionalmente, la oscilación en las magnitudes de las corrientes de línea es mínima por lo que la efectividad del método de control se incrementa. Este fenómeno se aprecia claramente en el primer gráfico de la figura 3.5.

Realizando un análisis comparativo entre los resultados previamente expuestos, el sistema de control basado en la evaluación directa de las corrientes de cuadratura de las corrientes de línea se presenta como el más apropiado para efectos de una implementación de control para el equipo TBC.

En efecto, tomando en cuenta el tiempo de respuesta y la simpleza en la implementación de la solución, el mencionado método aventaja bastante a los mencionados en las secciones 3.3.1 y 3.3.2.

Adicionalmente, el hecho de que el sistema de control depende sólo de las corrientes en la carga, otorga estabilidad en la solución del problema de control. Por tanto los fenómenos propios de las líneas de transmisión no intervienen en el cálculo de la cantidad de susceptancias a conectar.

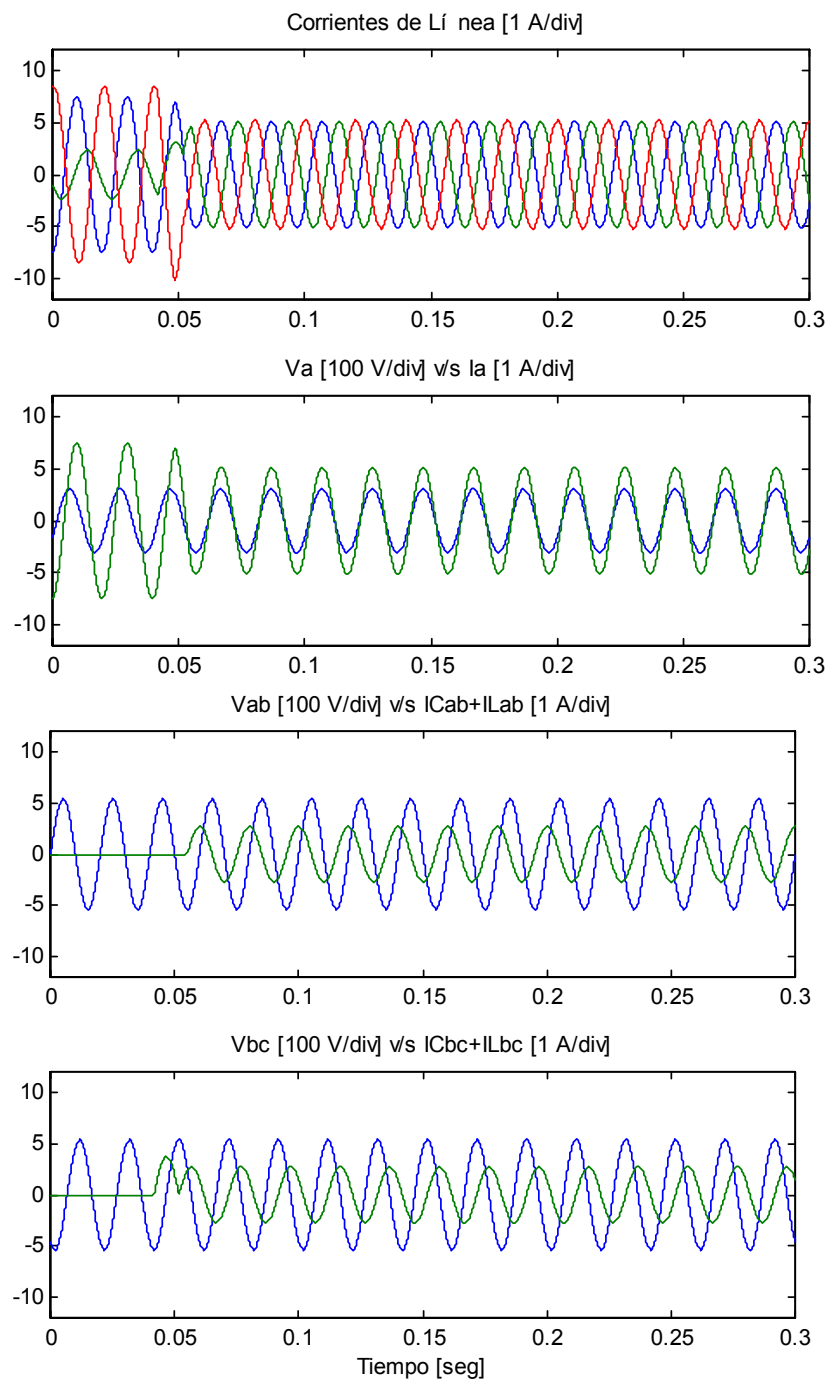


Figura 3.5: Resultados de simulación para sistema de control basado en evaluación directa de componentes en cuadratura

IV DESCRIPCIÓN DEL FILTRO ACTIVO TRIFÁSICO “SHUNT”.

El equipo TBC anteriormente estudiado por sí solo es suficiente para lograr formas de onda sinusoidales y en fase con los voltajes en la carga, si es que ésta no es contaminante. En efecto, la generación de armónicas de corriente por parte de la carga perturba la forma de onda de voltaje, dificultando el encendido de los tiristores presentes en el TBC y por ende influyendo en la correcta operación del equipo.

Dado que la eficiencia de los filtros activos paralelos ha sido ampliamente comprobada en el caso de cargas contaminantes, es interesante analizar una configuración en la que el equipo TBC realice el balance y compensación de cargas contaminantes de alta potencia ayudado por un filtro activo “*shunt*” de potencia baja o moderada encargado únicamente de la cancelación de las corrientes armónicas.

En el presente capítulo se resumen los aspectos más importantes del principio de funcionamiento y control de filtros activos “*shunt*”, los cuales serán imprescindibles a la hora de analizar su funcionamiento en conjunto con el equipo TBC para el balance y compensación de cargas trifásicas.

4.1 Principio de funcionamiento.

La configuración “*shunt*” de un filtro activo de potencia (fig. 4.1) permite su utilización como una fuente de corriente encargada de generar el aporte que la red necesita para lograr corrientes sinusoidales en la fuente del sistema eléctrico, independiente de la condición de carga existente [Contar97].

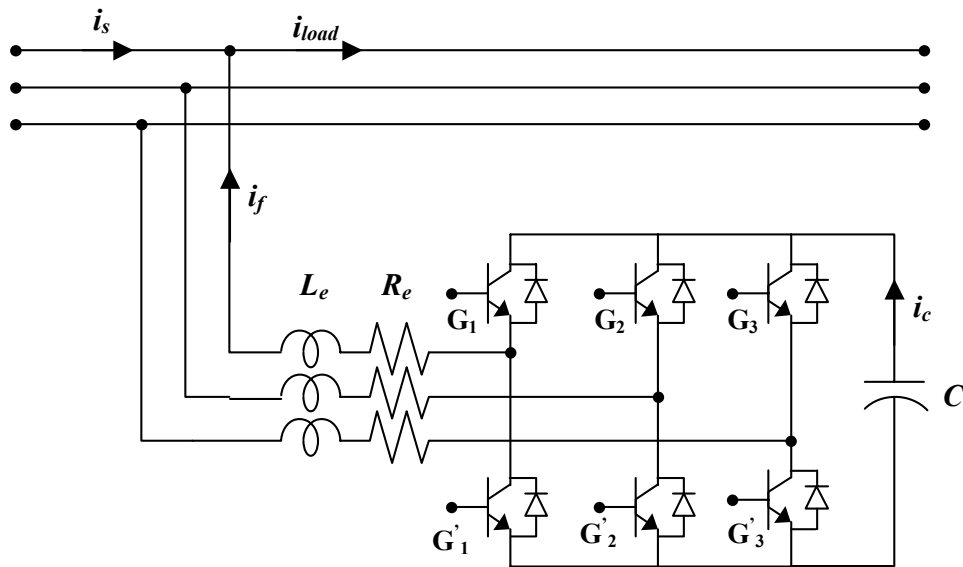


Figura 4.1: Configuración “Shunt” para Filtro Activo Trifásico.

Para el logro del objetivo mencionado, la energía almacenada en el condensador localizado en la barra de voltaje continuo, es empleada en la inyección de las corrientes armónicas y reactivas resultantes de la diferencia entre una referencia de corriente sinusoidal y la corriente de carga, tal como se muestra en la figura 4.2.

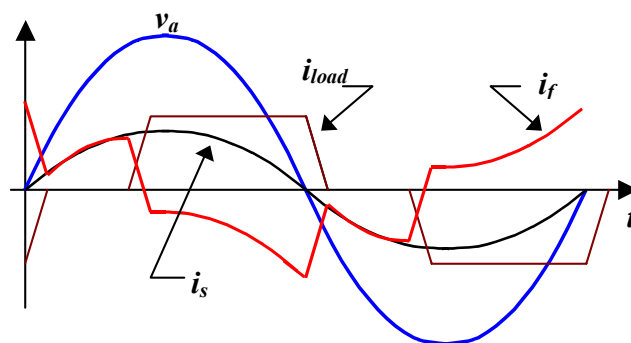


Figura 4.2: Compensación de carga no lineal

Adicionalmente, el filtro activo “*shunt*” es capaz de compensar cargas trifásicas dentro del rango de operación para el que esté diseñado. De este modo la corriente generada i_f contiene una componente i_{fd} en fase con el voltaje, otra componente i_{fq} en cuadratura y una última componente i_{fh} que agrupa a los armónicos [Contar97].

$$i_f = i_{fd} + i_{fq} + \sum_h i_{fh} \quad (4.1)$$

$$i_f = I_{fd} \sqrt{2} \text{sen}(\omega t) + I_{fq} \sqrt{2} \cos(\omega t) + \sum_h I_{fh} \sqrt{2} \text{sen}(h\omega t - \phi_h) \quad (4.2)$$

La inductancia de entrada L_e actúa como limitador de la pendiente de las corrientes inyectadas a la red. Ella es vital en la absorción de las diferencias de voltaje entre la tensión del sistema y el voltaje de salida del inversor. La resistencia de entrada R_e en tanto, representa las pérdidas óhmicas propias de los elementos constitutivos del equipo.

La operación adecuada del filtro activo paralelo implica un balance entre las potencias instantáneas activas y fluctuantes suministradas (ya sea por la fuente del sistema eléctrico o el condensador de la barra de continua) y consumidas por la carga. Para efectos de esbozar la estrategia de control del equipo, es necesario realizar un análisis que establezca la naturaleza de dicho balance. Dentro de este análisis se asumirá que los voltajes aplicados al filtro y a la carga son iguales, balanceados y definidos por la ecuación (2.6).

Por un lado, se tiene la potencia instantánea total del sistema las corrientes de línea en la carga i_{load} quedan descritas de acuerdo la ecuación (4.3), donde $i_{load\ jd}$ es la componente en fase con el voltaje V_j e $\hat{i}_{load\ j}$ corresponde a la suma de corrientes en cuadratura y armónicas para una de las líneas del sistema eléctrico. Adicionalmente, es posible expresar la potencia instantánea de la carga en función de las corrientes anteriormente descritas, como lo muestra la ecuación (4.4).

$$i_{load\ j} = i_{load\ jd} + \hat{i}_{load\ j} \quad (4.3)$$

$$P_{load} = V_a i_{load\ a} + V_b i_{load\ b} + V_c i_{load\ c} = P_{load} + \hat{P}_{load} \quad (4.4)$$

Donde:

P_{load} es la potencia activa promedio de la carga.

\hat{P}_{load} es la potencia fluctuante de la carga.

Realizando un análisis análogo para la potencia instantánea generada por el filtro activo en el lado alterno, resultan las ecuaciones (4.5) y (4.6) que la relacionan con el voltaje fase-neutro aplicado y las corrientes entregadas:

$$i_{fj} = i_{fjd} + \hat{i}_{fj} \quad (4.5)$$

$$p_f = V_a i_{fa} + V_b i_{fb} + V_c i_{fc} = P_f + \hat{P}_f \quad (4.6)$$

Despreciando las pérdidas ocasionadas en las conmutaciones de los elementos semiconductores y en las bobinas de entrada al filtro, la potencia instantánea de salida del filtro activo debe ser igual a la de entrada que corresponde, en el diagrama de la figura 4.1, a la suministrada por el condensador de la barra de continua, por lo que debe verificarse la relación (4.7).

$$p_f = u_c C \frac{\partial u_c}{\partial t} \quad (4.7)$$

Donde u_c es el voltaje en bornes del condensador C . La potencia promedio existente en este último elemento durante un período de tiempo T puede relacionarse con la potencia activa P_f entregada por el filtro mediante la siguiente expresión:

$$P_f = \frac{1}{2T}C[u_c^2(T) - u_c^2(0)] = \frac{\Delta W_c}{T} \quad (4.8)$$

Esta última expresión induce una relación matemática implícita entre las corrientes de salida del filtro (específicamente la amplitud de las componentes i_{fd} en fase con el voltaje) y las variaciones de potencia en el condensador ΔW_c . De hecho, en régimen permanente, ΔW_c es nulo con lo que el filtro activo no suministra potencia activa a la carga contaminante.

Las relaciones anteriormente descritas permiten diseñar la estrategia de control que se analiza en profundidad en la siguiente sección.

4.2 Sistema de control proporcional integral en filtro activo “shunt”.

El método de control proporcional integral aplicado a filtros activos “shunt” pretende forzar a las corrientes de línea en la fuente, mediante la inyección de potencia, de modo de lograr formas de onda sinusoidales y en fase con los correspondientes voltajes fase-neutro. Su implementación está basada en la existencia de dos lazos de control independientes.

El primer lazo corresponde a un controlador PI destinado a mantener el voltaje u_c en el condensador de barra de continua del filtro, en un valor fijado por una referencia $u_{c\ ref}$. La variable manipulada del lazo corresponde a la amplitud efectiva I_s de las referencias para las corrientes de línea en la fuente. La existencia de este

lazo se sustenta en las relaciones matemáticas entre las potencias instantáneas del filtro, la carga y la fuente de voltaje del sistema.

En efecto, la conservación de la potencia instantánea indica que si las corrientes en la fuente son balanceadas, con factor de potencia unitario y libre de armónicas se cumple:

$$p_s = P_s = P_{load} - P_f = 3V I_s = P_{load} - \frac{\Delta W_c}{T} \quad (4.9)$$

$$\hat{p}_f = \hat{p}_{load} \quad (4.10)$$

Despejando el valor efectivo de la corriente en la fuente en función de la variación de potencia en el condensador se obtiene [Contar97]:

$$I_s = \frac{1}{3V} \left[P_{load} - \frac{\Delta W_c}{T} \right] = \frac{1}{3V} \left[P_{load} - \frac{C}{2T} \Delta u_c^2 \right] \quad (4.11)$$

Si el valor real de I_s es distinto de $P_{load}/(3V)$, el voltaje en el condensador crecerá o disminuirá de acuerdo a la expresión (4.11). De esta forma el controlador calcula el valor efectivo $I_{s\ ref}$ que deberían tener las corrientes de línea en la fuente para mantener un valor estable en el voltaje del condensador, de acuerdo a las variaciones que percibe en él. Posteriormente se fuerza a las corrientes de línea de la fuente a ser sinusoidales y con valor efectivo dado por $I_{s\ ref}$ mediante un segundo lazo de control rápido.

Este segundo lazo de control compara el valor real de las corrientes de línea en la fuente con referencias generadas internamente a través de imágenes de los voltajes fase–neutro respectivos que tienen amplitud $I_{s\ ref}$. Las señales de error son utilizadas para generar una modulación por ancho de pulso (PWM) que en definitiva

es usada para encender o apagar las válvulas de potencia a través de circuitos de conmutación adecuados. El esquema de control puede observarse en la figura 4.3.

Finalmente, es interesante agregar que, de un estudio de estabilidad para las ganancias proporcional e integral (K_p y K_i respectivamente) del controlador expuesto, se obtiene que existe una importante relación entre el voltaje del condensador, la ganancia proporcional del controlador y el cociente entre el valor de la capacidad y el de la inductancia de entrada del filtro.

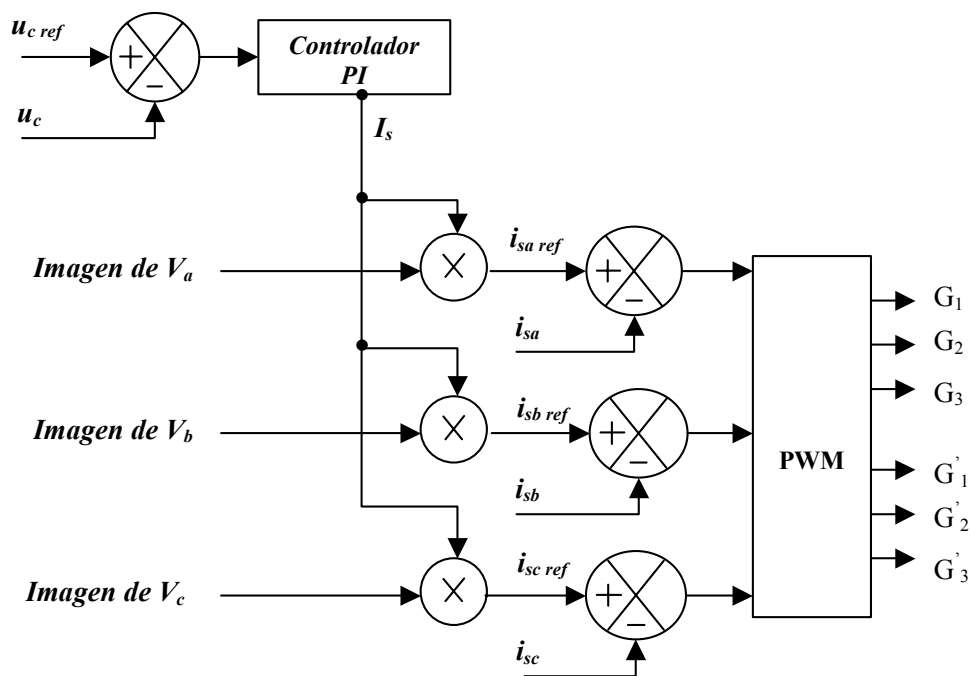


Figura 4.3: Esquema método de control proporcional integral.

La corriente fundamental máxima que puede consumir (entregar) el filtro activo para mantener regulación en el voltaje del condensador también depende del factor de potencia existente en la carga, no pudiéndose operar con cargas cuyo factor de potencia sea nulo. Dichas relaciones de dependencia, reflejadas en las ecuaciones (4.12) y (4.13) establecen criterios de diseño entre los elementos constitutivos del equipo [Contar97].

$$I_{s \max} < \frac{Cu_c}{3K_p L_e} \quad (4.12)$$

$$I_{s \max} < \frac{V \cos \varphi}{2R_e} \quad (4.13)$$

Donde:

$I_{s \max}$: Valor efectivo máximo de la fundamental de corriente entregada por el filtro

u_c : Voltaje en el condensador de la barra continua

C : Capacitancia conectada en la barra continua

L_e : Inductancia de entrada al filtro activo

R_e : Pérdidas ohmicas en el filtro activo

$\cos \varphi$: Factor de potencia de la carga

V : Voltaje efectivo fase-neutro (alimentación filtro activo)

V BALANCE Y COMPENSACIÓN DE CARGAS TRIFÁSICAS CONTAMINANTES.

El presente capítulo analiza el problema de balance y compensación de cargas trifásicas contaminantes, tomando en cuenta las alternativas existentes de solución y proponiendo una configuración (basada en la interconexión de los equipos TBC y filtro activo “*shunt*” previamente estudiados) que aprovecha las potencialidades de cada uno y soluciona las limitaciones más importantes que cada equipo posee al operar en forma separada.

Inicialmente se analizan las ventajas y desventajas existentes en la utilización de cada equipo por separado frente a cargas contaminantes, para posteriormente analizar en detalle el esquema de interconexión propuesto. Finalmente, se presentan las ventajas más importantes de la configuración y los criterios básicos de diseño que deben ser tomados en cuenta para el dimensionamiento de cada sección constitutiva de ésta.

5.1 Limitaciones para la utilización de filtros activos o equipos TBC para el balance y compensación de cargas trifásicas contaminantes.

El balance y compensación de cargas trifásicas contaminantes presenta una doble problemática, pues es necesario inyectar a la red tanto los reactivos que la carga requiera (para que las fundamentales de corriente queden balanceadas y en fase) como las corrientes armónicas que consume la carga (de modo que no sean suministradas por la red).

Los filtros activos “*shunt*”, al actuar como fuentes de corriente, llevan a cabo esta tarea en forma muy eficiente al forzar una forma de onda sinusoidal y en fase para la corriente de línea en la fuente. Sin embargo, si los requerimientos de potencia en la carga son elevados existen dificultades en el diseño de estos equipos. Estas dificultades son producto de que las válvulas de conmutación forzada tienen un costo relativamente elevado y su utilización en altos niveles de potencia conlleva diversos inconvenientes relacionados con los requerimientos de voltaje, corriente y

velocidad de conmutación. Por otra parte, en caso de que la carga trifásica aumentara su capacidad sería necesario un re-dimensionamiento del equipo que en la mayoría de los casos implicaría cambios en muchas de sus componentes.

La utilización de equipos TBC tiene la ventaja de que las válvulas de potencia utilizadas (tiristores y diodos de potencia) son más económicas y manejan potencias mucho mayores. Pueden ser utilizadas con relativa sencillez a altos niveles de potencia. Adicionalmente, la velocidad de conmutación necesaria en los tiristores es baja (50 [Hz]) y el diseño de elementos capacitivos y reactores está suficientemente estudiado y probado para niveles elevados de potencia, por lo que el balance y compensación de las fundamentales de corriente podrían ser llevadas a cabo de acuerdo a lo estudiado en el capítulo 2.

Sin embargo, la existencia de armónicas de corriente en la carga usualmente produce importantes distorsiones en el voltaje en la carga, lo que genera (especialmente en el caso de los elementos capacitivos) fuertes componentes de armónicas a través de las válvulas unidireccionales de potencia que componen el equipo TBC. Dichas corrientes afectan drásticamente la operación del equipo y por tanto, en condiciones especiales, pueden forzar el apagado de las válvulas durante el semiciclo de conducción o producir notables perturbaciones durante su encendido.

Ante esta dificultad, la utilización de filtros pasivos sintonizados para eliminar las componentes armónicas en el voltaje en la carga es poco factible en el caso de cargas altamente dinámicas, por lo que sólo ayudaría a solucionar el problema de balance y compensación para casos bastante específicos de carga trifásica.

En cuanto al dimensionamiento de los equipos TBC y FAP debe considerarse que en general la capacidad necesaria para compensar la potencia armónica de la carga es bastante menor que para realizar el balance y/o compensación de la misma. De este modo, la capacidad del filtro activo “*shunt*” debe dimensionarse conforme a los requerimientos de compensación de armónicas mientras que el equipo TBC tiene que ser capaz de satisfacer los requisitos de balance y compensación de las fundamentales de corriente.

La implementación de la idea anteriormente desarrollada se explica a continuación.

5.2 Interconexión “*Shunt*” del equipo TBC y Filtro Activo: Principio de funcionamiento.

La configuración propuesta para la interconexión entre el filtro activo de potencia y el equipo TBC con el objeto de lograr el balance y compensación de cargas trifásicas contaminantes se muestra en la figura 5.1.

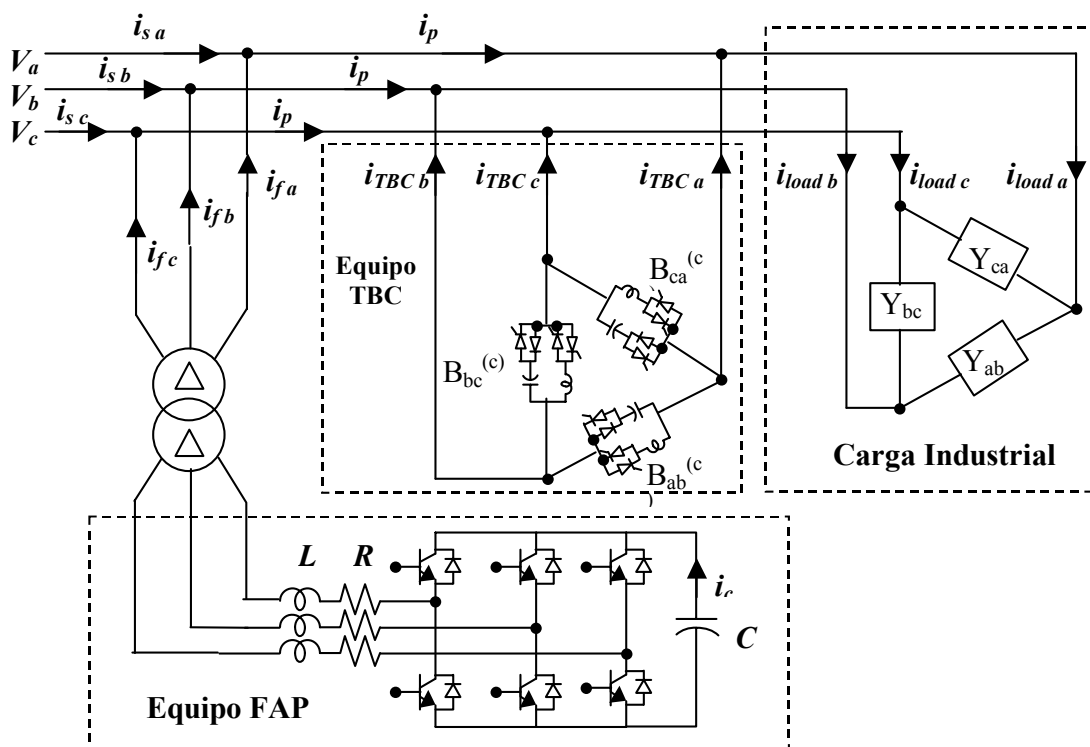


Figura 5.1: Interconexión entre Filtro Activo Shunt y Equipio TBC

En la topología mostrada en la figura 5.1, el Filtro Activo de potencia (en adelante, equipo FAP) y el equipo TBC trabajan en forma independiente en la tarea

de compensación. Sin embargo, las potencialidades que cada uno de los equipos ofrecen se combinan de modo interesante.

El equipo TBC muestrea las corrientes de línea en la carga i_{load} y analizando sus componentes de frecuencia fundamental. Posteriormente, calcula mediante el sistema de control basado en evaluación directa de las componentes en cuadratura de corriente, el valor de las susceptancias que es necesario conectar entre cada fase del sistema eléctrico para balancear y compensar dichas fundamentales de corriente.

Puesto que la conexión de las mencionadas susceptancias se realiza mediante un escalamiento binario, siempre existe una diferencia entre el valor teórico y práctico equivalente a la mitad de la potencia reactiva que el condensador de menor valor de cada rama es capaz de inyectar a la red.

Por su parte, el equipo FAP en configuración “*shunt*” mide las corrientes directamente en la fuente del sistema eléctrico, por lo cual considera al conjunto TBC-carga industrial como una única carga dinámica. Puesto que esta “carga” se encuentra balanceada y con factor de potencia muy cercano al unitario, el objetivo del filtro activo se reduce a compensar una pequeña diferencia de potencia reactiva e inyectar las armónicas de corriente necesarias para que la forma de onda de la corriente i_s de la fuente sea sinusoidal.

La operación del equipo FAP para esta configuración sigue el esquema general de dos lazos presentado en la sección 4.2. Sin embargo, es necesario considerar la razón de transformación entre las corrientes en el primario y secundario del transformador reductor de tensión. Dicho factor se incorpora en el esquema de control en un ajuste de la ganancia proporcional del controlador PI, de modo de adecuar la respuesta del lazo a las necesidades de corriente en el lado de alta tensión, notablemente menores a las que existirían si la carga consumiese la misma potencia en baja tensión.

Adicionalmente, dado que las líneas de transmisión son inductivas, la inyección por parte del FAP de los componentes armónicos que la carga trifásica requiere, permite mejorar la forma de onda del voltaje en la carga, lo que contribuye

a una mejor operación del equipo TBC en cuanto a la calidad de las corrientes que circulan por los elementos pasivos y al cálculo mismo de las susceptancias a conectar (que dependen de la magnitud V del voltaje).

Finalmente es interesante destacar que aparte de los factores ya mencionados, la operación del equipo TBC es independiente de la operación del equipo FAP, por lo que depende únicamente de las condiciones existentes en la carga trifásica.

5.3 Ventajas comparativas de la configuración propuesta y criterios de diseño.

La interconexión de los equipos TBC y FAP en configuración paralelo presenta una serie de ventajas que en definitiva hacen atractiva su utilización frente a otras metodologías. Dichas ventajas, que a continuación se enumeran, serán verificadas a través de la simulación de distintas condiciones de carga en el siguiente capítulo.

- Los sistemas de control de cada uno de los equipos son completamente independientes y con rangos de estabilidad conocidos. Incluso en el caso del equipo TBC, la única limitante real del lazo de control es la máxima potencia reactiva que cada rama puede inyectar o absorber.
- La operación del equipo TBC se ve beneficiada por la inyección de armónicas que proporciona el equipo FAP, lo que ayuda a mantener una tensión sinusoidal en la carga. De este modo, la conexión de los elementos capacitivos en cada rama del TBC se realiza sin generar corrientes de “*inrush*” indeseables.
- Dado que el equipo TBC varía la cantidad de reactivos inyectados en forma discreta, existe un error de cuantización equivalente a la mitad de la potencia reactiva que inyectaría el condensador de menor valor de cada rama. La utilización del equipo FAP permite suplir esa diferencia además de la generación de las armónicas necesarias en la carga contaminante.

- Dado que el equipo TBC utiliza válvulas de gran potencia como los tiristores y diodos, es posible concebir su diseño para altos niveles de tensión. De este modo las necesidades de balanceo y compensación en grandes cargas industriales se satisfacen mediante la utilización de un equipo TBC de alta potencia en conjunto con un equipo FAP diseñado sólo para generar los niveles de potencia necesarios para cubrir el contenido armónico de la carga y los errores de cuantización en la inyección de reactivos. Este factor influye fuertemente en la evaluación económica de proyectos, dados los aún elevados costos de las válvulas de conmutación forzada para altos niveles de potencia.
- Un incremento en las necesidades de reactivos de la carga industrial puede suplirse mediante la instalación en cada rama del equipo TBC, de un condensador cuyo valor corresponda al doble de la mayor capacitancia actualmente instalada en cada rama. No existe necesidad, por tanto, de alterar el diseño del equipo FAP o de modificar alguna de sus componentes, lo que incurre en un importante ahorro en la inversión.

En resumen, la configuración propuesta para la interconexión de los equipos TBC y FAP reúne una serie de ventajas por cuanto logra aprovechar las cualidades inherentes a cada uno de los equipos en la solución de un problema común. Los controles, al ser independientes, permiten una buena operación del conjunto y un efectivo tiempo de respuesta en la compensación de cargas dinámicas, sin que ello signifique una gran exigencia para los componentes involucrados.

La calidad de las corrientes a través del TBC depende fuertemente de la capacidad del equipo FAP para mantener una tensión sinusoidal en sus terminales. De este factor dependerá la calidad del balance y compensación que el equipo TBC logre y por ende de la topología propuesta.

VI SIMULACIÓN DE LA INTERCONEXIÓN “SHUNT” DE EQUIPO TBC EN MEDIA TENSIÓN Y FILTRO ACTIVO DE POTENCIA EN BAJA TENSIÓN.

El estudio del desempeño de la configuración propuesta en el capítulo anterior, bajo distintas cargas industriales, ha sido realizado a través de la simulación de un modelo eléctrico para la conexión “*shunt*” de los equipos TBC y FAP a la red de media tensión (12 - 15 [KV]) en el software **PSIM**. La elección de los niveles de tensión se fundamenta en la posible aplicación de la configuración en el balance y compensación de cargas industriales moderadas. El presente capítulo muestra los resultados obtenidos y los principales análisis que de ellos se obtienen.

Las condiciones que determinan las cargas utilizadas en las simulaciones buscan emular la operación de la configuración propuesta ante industrias que poseen desbalances en la utilización de la potencia activa, requerimientos de compensación de potencia reactiva y que en forma adicional son fuente de armónicas de corriente. En este sentido, básicamente se ha dividido el estudio considerando por separado la operación bajo cargas lineales y contaminantes, de modo de apreciar en forma detallada las interacciones existentes entre los equipos TBC y FAP en cada situación.

En el primer caso (cargas lineales), el equipo TBC tiene como objetivo el balance y compensación de la carga industrial en niveles de potencia elevados, mientras que el equipo FAP se limita a entregar los reactivos necesarios para ajustar el error remanente de compensación que se debe a la conexión binaria de elementos capacitivos de un valor fijo. Mientras que en el segundo caso (cargas contaminantes), es relevante el análisis de las corrientes existentes a través de los elementos constitutivos del TBC y la capacidad de la configuración propuesta para realizar el balance y compensación de cargas bajo esas condiciones.

La descripción del modelo utilizado en las simulaciones previamente mencionadas, así como la elección de sus parámetros más determinantes y la implementación del método de control expuesto en el acápite 3.2 se encuentran detallados a continuación.

6.1 Descripción del modelo utilizado para la simulación de la operación a media tensión.

La operación de los equipos TBC y FAP en redes de media tensión (12-15 [KV]) implica una serie de precauciones relacionadas con la seguridad de los elementos semiconductores constitutivos de cada uno de ellos. A pesar de que actualmente el estado del arte permite la fabricación de elementos pasivos (reactores y capacitores) y grupos de tiristores para dichos niveles de tensión a costo relativamente bajo, aún es complicada la utilización de interruptores de conmutación forzada y rápida como los IGBT's. Estos últimos semiconductores resultan adecuados para la operación del FAP, que requiere de frecuencias de conmutación por sobre los 5 [KHz] para un buen funcionamiento. Sin embargo, los niveles de voltaje de operación de estos elementos no sobrepasan actualmente los 2,5 [KV] y su conexión en serie no es sencilla.

La interconexión “*shunt*” propuesta en la configuración teórica (figura 5.1) permite una solución factible para esta dificultad mediante la conexión del equipo FAP a través de un transformador trifásico reductor de tensión, posibilitando su operación a voltajes bastante menores. Para efectos del diseño del modelo de simulación, se consideró un banco de transformadores trifásicos en delta, que reduce la tensión desde los 12 [KV] de la red (voltaje típico de media tensión para Santiago de Chile) a 400[V], como es usual en numerosas empresas de la capital.

En forma adicional, las válvulas unidireccionales de potencia del equipo TBC deben estar provistas de sus sistemas de protección pertinentes con el fin de limitar la posibilidad de destrucción y considerar una cadena de tiristores en serie en caso de tensiones mayores a 20 [KV]. En este sentido, dado que el método de conexión de los elementos reactivos y capacitivos para el método de control propuesto (ver capítulo acápite 2.1 y 3.2) minimizan las variaciones de voltaje en los tiristores conectados a elementos capacitivos, sólo es necesaria la utilización de inductancias en serie a las válvulas a modo de “*snubbers*”. En el caso de las inductancias, sin embargo, es recomendada la utilización de circuitos *R-C* en paralelo con los elementos semiconductores con el fin de limitar las variaciones bruscas de voltaje sobre éstos que pudiesen resultar en daños de los elementos involucrados.

El esquema global básico para la implementación en software **PSIM** de la configuración propuesta, que resume las características mencionadas anteriormente, se presenta en la figura 6.1.

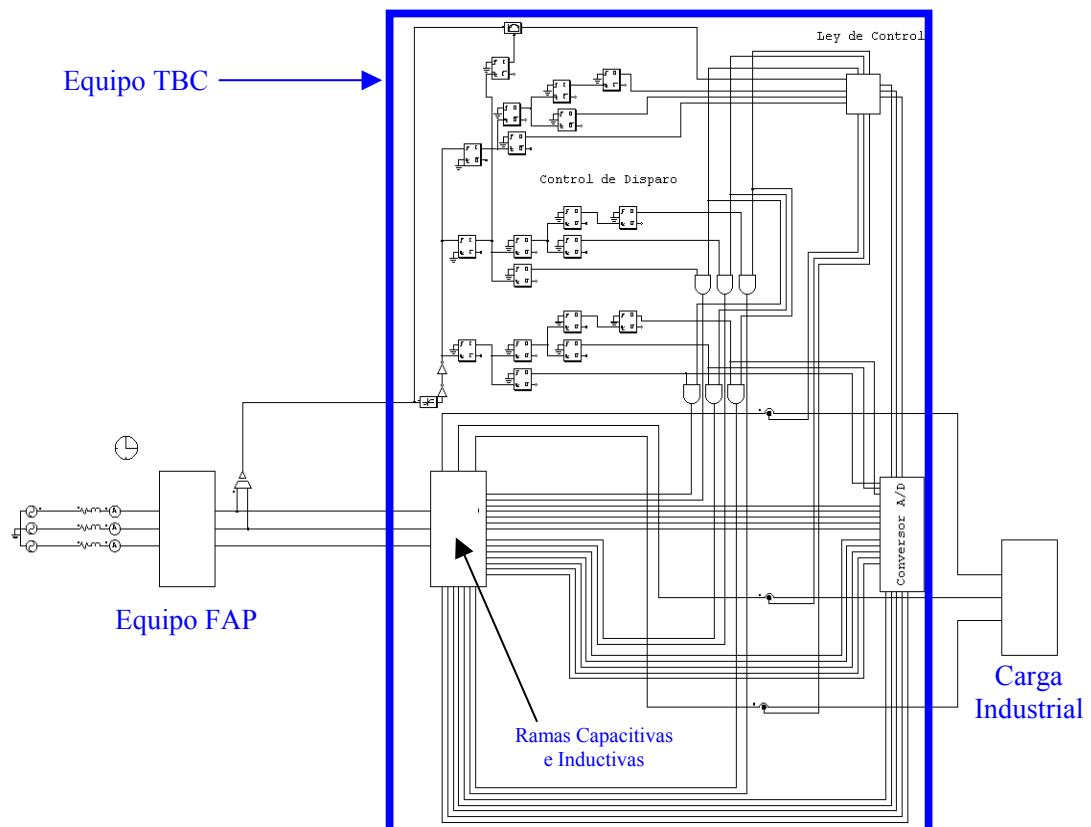


Figura 6.1: Esquema básico de interconexión para red de media tensión.

Dentro de los bloques que conforman el sistema de la figura 6.1 se encuentra el equipo FAP (encargado de la cancelación de armónicos en la corriente de la fuente), el equipo TBC, del cual es posible observar un bloque que contiene los elementos de potencia y su correspondiente sistema de control y finalmente la carga industrial trifásica. Se asume, para efectos del estudio, que la fuente de voltaje posee una impedancia de entrada conocida y que está ausente de armónicos de voltaje, por lo que toda la contaminación proviene de la operación de la carga y el equipo FAP.

Se procede a continuación a desarrollar los modelos implementados para cada uno de los equipos involucrados.

6.1.1 Diseño de modelo de simulación para equipo TBC.

El diseño del modelo de simulación para el equipo TBC ha considerado la existencia de cinco condensadores y un inductor entre cada par de fases, de modo que la potencia reactiva por fase que es posible inyectar varía entre (-701.203, 701.203) [KVar]. Los valores de los condensadores están escalados en forma binaria de modo de obtener variaciones lineales en la compensación y el valor de la inductancia se ha determinado de modo de absorber la misma cantidad de reactivos que inyectan la totalidad de los condensadores de la rama. La tabla 6.1 resume los valores utilizados.

Tabla 6.1: Valores para elementos capacitivos e inductivos, rama i equipo TBC.

Elemento	Valor	Unidad	KVAr
C_{1i}	0.50	[μ F]	-22.62
C_{2i}	1.00	[μ F]	-45.24
C_{3i}	2.00	[μ F]	-90.48
C_{4i}	4.00	[μ F]	-180.95
C_{5i}	8.00	[μ F]	-361.91
L_i	653.00	[mH]	701.203
$L_{i \text{ snubber}}$	1.00	[mH]	-----

Un esquema detallado de la implementación del equipo TBC, donde se aprecia la interconexión delta de sus tres ramas constitutivas se muestra en la figura 6.2.

Las entradas que se aprecian en la figura 6.2 (que ilustra las conexiones internas del bloque “Ramas Capacitivas e Inductivas” de la figura 6.1) corresponden

a los voltajes de línea del equipo y a las señales de disparo de cada uno de los tiristores que conforman los sistemas de disparo. Estas señales de disparo son las resultantes del sistema de control del equipo TBC, que en definitiva elige los elementos que deben conectarse para lograr balance y compensación de la carga trifásica.

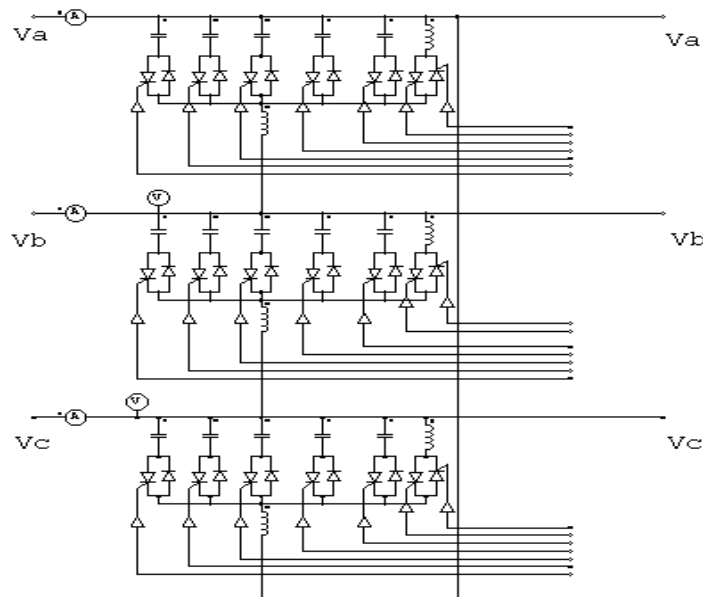


Figura 6.2: Esquema de la implementación para equipo TBC en media tensión.

La implementación del sistema de control para el equipo TBC (ver acápite 3.2) ha sido llevada a cabo mediante la utilización de circuitos de muestra de tensión y corriente. La forma de onda de la tensión entre las fases *a* y *b* del sistema es sensada para su utilización en la sincronización del control. Mediante comparadores se procede a detectar los cruces por cero con pendiente positiva de la señal de voltaje muestreada con el fin de generar el reloj maestro del sistema. Para todos los efectos prácticos se supone una barra infinita como fuente de tensión, por lo que el desfase entre las señales de voltaje fase-fase es conocido (6,666[mseg]).

La utilización de elementos monoestables permite la generación de señales digitales cuyos flancos de subida corresponden a la activación de señales de

disparo de elementos semiconductores o al muestreo de cada una de las tres corrientes de línea en la carga. Los momentos de conexión de los elementos capacitivos se realiza sólo cuando el voltaje fase-fase respectivo pase por su valor mínimo (15[mseg] después del cruce por cero con pendiente positiva) mientras que la conexión de los elementos inductivos es llevada a cabo cuando el voltaje respectivo alcanza su valor máximo (5[mseg] después del cruce por cero con pendiente positiva).

Finalmente, las corrientes de línea a través de la carga son muestreadas en momentos en los que el respectivo voltaje fase-neutro tiene su cruce por cero con pendiente positiva. La tabla 6.2 resume los hitos más importantes dentro del sistema de control implementado.

Los valores obtenidos para el voltaje de cresta fase-fase y las corrientes de línea en la carga son utilizados para evaluar directamente la ley de control expresada por las ecuaciones (3.16) a (3.18).

Para un correcto funcionamiento de la metodología de control ante la presencia de cargas contaminantes, se ha utilizado un filtro pasabanda sintonizado a 50[Hz] para las señales que provienen de las corrientes de línea en la carga. De este modo, el equipo TBC ajustará la compensación y balance de carga de acuerdo a las fundamentales de corriente. La sintonización de los parámetros del filtro se realizó de modo de aceptar una banda de ± 15 [Hz] en torno a la frecuencia central.

El resultado de la evaluación, llevada a cabo por el sistema de control, es posteriormente binarizado en cinco dígitos con el fin de proceder a la conexión de los elementos de potencia. Si la ley de control indica la necesidad de absorber reactivos, se procede a conectar la inductancia de la rama correspondiente y el número de condensadores necesarios para lograr la absorción indicada (complemento binario). Finalmente la conexión de los elementos de potencia se realiza a través de pulsos de 5[mseg] de duración dirigidos a las compuertas de disparo de los tiristores.

Tabla 6.2: Hitos relevantes en sistema de control equipo TBC.

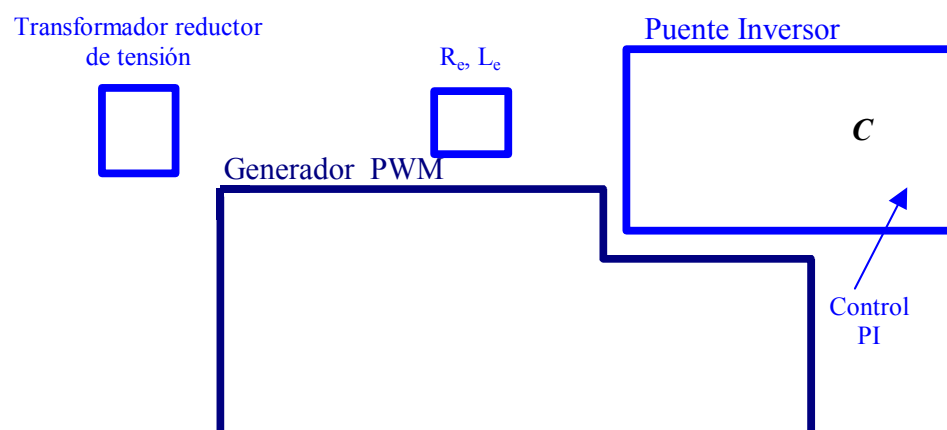
Tiempo ([mseg] respecto	Evento
-------------------------	--------

cruce por cero con pendiente positiva de V_{ab})	
1.666	Muestreo de corriente I_a en la carga Conexión de condensador C_{bc}
5.000	Conexión de inductancia L_{ab} Muestreo de voltaje V_{ab} (Valor peak)
8.333	Muestreo de corriente I_b en la carga Conexión de condensador C_{ca}
11.666	Conexión de inductancia L_{bc}
15.000	Muestreo de corriente I_c en la carga Conexión de condensador C_{ab}
18.333	Conexión de inductancia L_{ca}

6.1.2 Diseño de modelo de simulación para equipo FAP.

El diseño del modelo de simulación para el equipo FAP de 300[KVA] y de su sistema de control proporcional-integral sigue el esquema funcional descrito en el acápite 4.2. Un esquema detallado de la implementación del equipo FAP se muestra en la figura 6.3.

La referencia de voltaje para el condensador que actúa como elemento acumulador de energía del filtro (C) ha sido fijada en 1100[V_{dc}], asegurando de este modo un buen funcionamiento del sistema de control para una tensión efectiva entre fases de 400[V] sin exponer a los elementos de conmutación forzada a sobretensiones peligrosas.



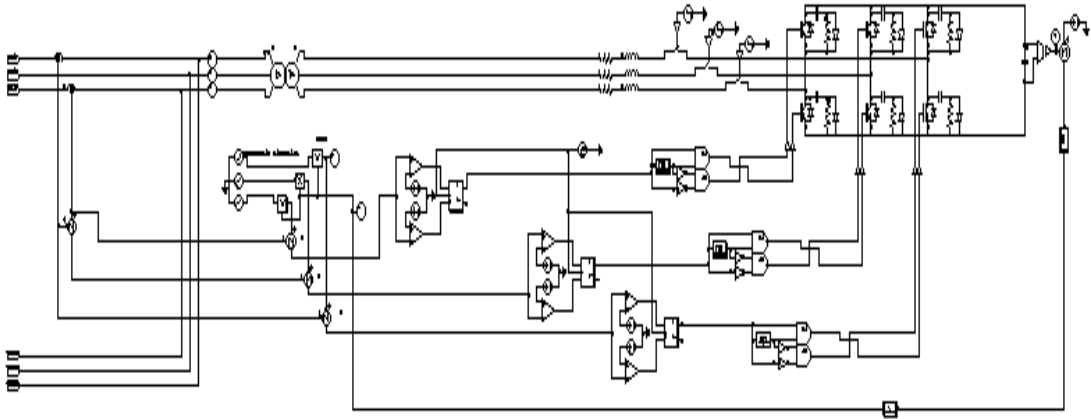


Figura 6.3: Esquema de la implementación para equipo FAP

Para una adecuada presentación de los parámetros que definen la implementación del equipo FAP, se ha procedido a agrupar los valores de los elementos de potencia constitutivos en la tabla 6.3, mientras que los parámetros que definen el lazo de control se encuentran en la tabla 6.4.

Tabla 6.3: Valores de elementos constitutivos equipo FAP.

Elemento	Valor	Unidad
R_e	0.05	$[\Omega]$
L_e	1.10	$[\text{mH}]$
C	4700	$[\mu\text{F}]$

Tabla 6.4: Parámetros del lazo de control del equipo FAP.

Elemento	Valor	Unidad
K_p	0.034	---
K_i	1.700	---
Ref V_C	1100.000	$[\text{V}_{\text{dc}}]$

Los parámetros del transformador reductor de tensión se han determinado a partir de valores típicos de estos elementos en industrias alimentadas desde la barra de 12[KV] en la capital (reactancia 6.4% base 1[MVA] y 12[KV]). La tabla 6.5 muestra dichos valores expresados en $[\Omega]$, tal como el simulador los considera.

Tabla 6.5: Parámetros del transformador reductor de tensión

Elemento	Valor	Unidad
R_{eq}	1.00	$[\Omega]$
X_{eq}	9.21	$[\Omega]$
V_{prim}	12.0	[KV]
V_{sec}	400	[V]

El ajuste de los parámetros del controlador PI que mantiene el voltaje en el condensador de barra continua del equipo FAP, fue realizado considerando los niveles de corriente que es capaz de entregar a la red, que son del orden de 25[A] para una fundamental de corriente en el lado de alta tensión del transformador.

A continuación, se procede a detallar los resultados obtenidos mediante la utilización del modelo presentado para distintas condiciones de carga.

6.2 Resultado de la operación para la configuración propuesta: Cargas desbalanceadas no contaminantes de armónicas.

La operación de la configuración propuesta bajo cargas no contaminantes, está básicamente orientada a utilizar la capacidad del equipo FAP para inyectar o absorber reactivos en un rango de operación determinado por la menor capacitancia de las ramas del equipo TBC. De este modo, la acción conjunta de ambos equipos permite conectar el valor exacto de susceptancias necesario para lograr el efecto deseado sobre la carga industrial.

Esta condición de operación ha sido simulada considerando una carga trifásica desbalanceada en configuración delta. Dicha carga está compuesta de dos ramas de resistencia en serie con inductancia y una rama de resistencia en serie con un capacitor. Los parámetros de la carga, que se encuentran resumidos en la tabla 6.6, otorgan distintos grados de desfase entre cada una de las corrientes de línea y los respectivos voltajes fase-neutro.

Tabla 6.6: Parámetros de Carga Industrial Lineal

Impedancia	R [Ω]	L [mH]	C [μF]	P [KW]	Q [KVA_r]
Z_{ab}	1300	260	----	110.33	6.930
Z_{bc}	1200	----	10	112.11	-29.74
Z_{ca}	400	180	----	119.73	5.640

Con el fin de apreciar claramente la respuesta dinámica de cada uno de los equipos involucrados, fuertemente relacionada con los sistemas de control implementados, se ha habilitado la operación del TBC a partir de los 0.0733[seg] de simulación. En el caso del equipo FAP, por motivos análogos, sólo se posibilita su acción a partir de los 0.1133[seg] de simulación.

La carga trifásica, sin embargo, se mantiene inalterable durante el transcurso de la simulación de modo de no afectar las conclusiones que se obtengan a partir de la respuesta del sistema, ilustrada en la figura 6.4.

En dicha figura puede apreciarse durante los primeros instantes de tiempo el desbalance existente entre las corrientes de línea en la fuente del sistema (que corresponden a las corrientes en la carga al no estar en operación la configuración propuesta). Tal como se mencionó previamente, el desequilibrio no involucra sólo magnitudes, puesto que existe un notable desfase entre las corrientes de línea y sus respectivos voltajes (se aprecia en la figura 6.4 dicho fenómeno para la fase *a* del sistema).

La respuesta de la configuración propuesta, permite realizar el balance y compensación de la carga en tan sólo un ciclo de voltaje. Inmediatamente después de conectarse el equipo TBC, comienza a inyectar y/o absorber potencia reactiva de acuerdo a la evaluación directa de las muestras de corriente en la carga obtenidas previamente en la ley de control (ver esquema de la figura 6.1). Dado que las condiciones en la carga no varían durante la simulación, la cantidad de reactivos inyectados y/o absorbidos se mantiene estable en el tiempo.

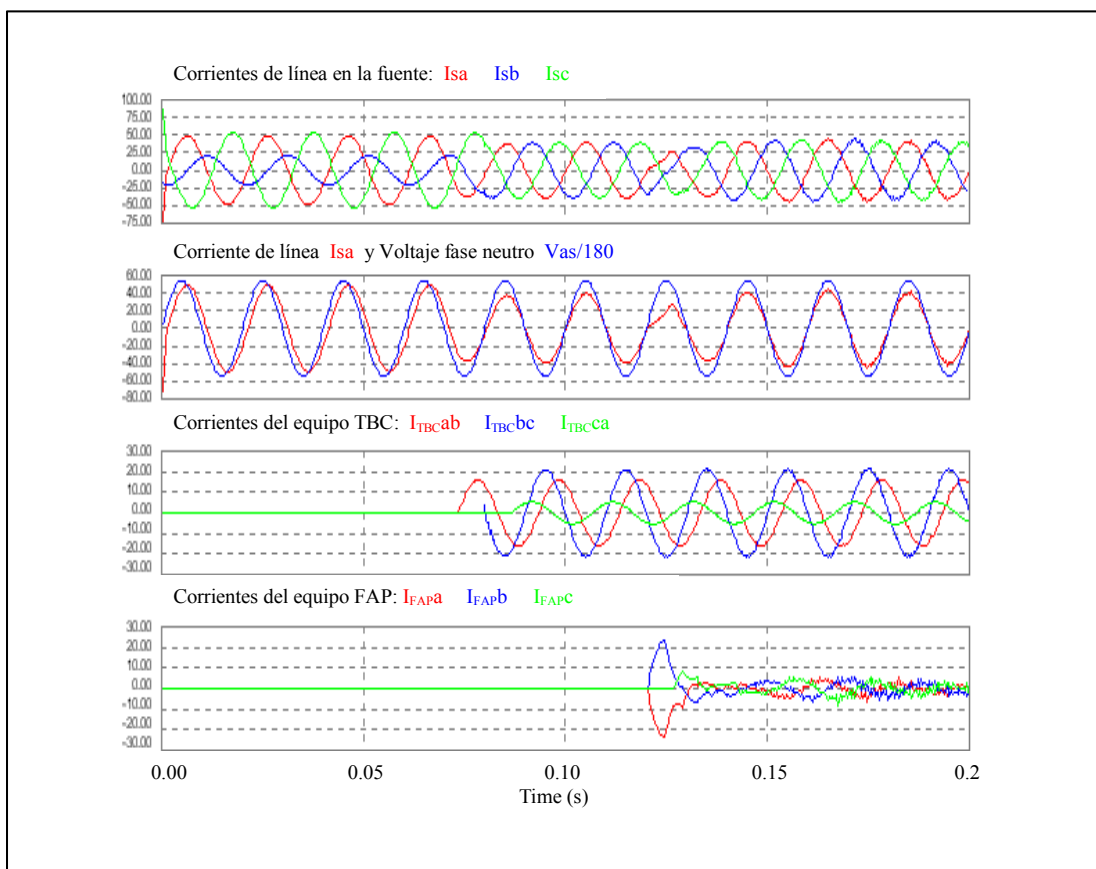


Figura 6.4: Operación de configuración propuesta: Carga industrial no contaminante.

Las conexiones de los elementos capacitivos e inductivos se produce en forma limpia, sin provocar mayores perturbaciones en el sistema eléctrico y lográndose una compensación suave de las formas de onda con un tiempo de

respuesta que bordea un ciclo. La buena aproximación de la metodología de control del equipo TBC permite acotar fuertemente el aporte realizado por el equipo FAP el cual, tal como se había anticipado, se limita a entregar la cantidad de reactivos necesaria para lograr compensar el error de cuantización del bit menos significativo del equipo TBC.

Respecto a la dinámica de los sistemas de control implementados, en el caso del equipo TBC es sorprendente su estabilidad. La figura 6.5 permite analizar el proceso de decisión respecto de la cantidad de susceptancias que debían conectarse entre cada fase del equipo. Al depender dicho número exclusivamente de las condiciones en la carga, no es influenciado por la posterior conexión del equipo FAP. Esta característica es la que otorga estabilidad a la configuración propuesta, en tanto asegura la compensación y balance de la carga en lo que a grandes niveles de potencia se refiere por parte del equipo TBC y por lo tanto protegiendo el desempeño del filtro activo de potencia.

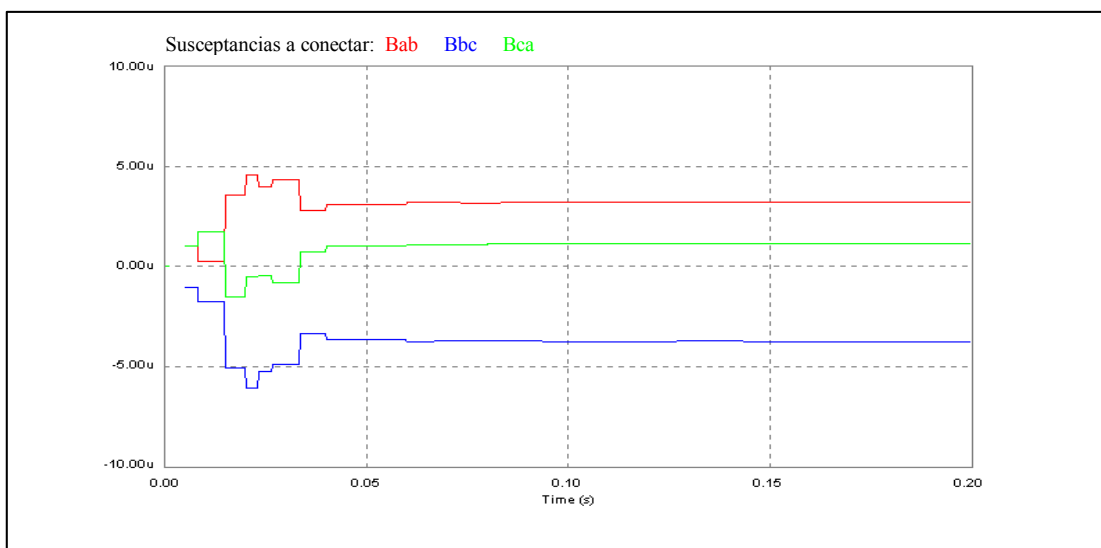


Figura 6.5: Respuesta dinámica control equipo TBC. Carga industrial no contaminante.

La respuesta dinámica del filtro activo (ver figura 6.6, donde se comparan los aportes respecto a los voltajes fase-neutro) se caracteriza por una corriente relativamente elevada en el momento de conexión, debido en gran parte al error integral acumulado en el controlador PI que regula el voltaje del condensador de continua. Sin embargo, una vez que el período transiente ha finalizado (aproximadamente 1 ciclo), se aprecia una excelente calidad de las formas de onda resultantes tanto en el caso de la corriente de línea en la fuente como en las corrientes a través de los elementos del equipo TBC.

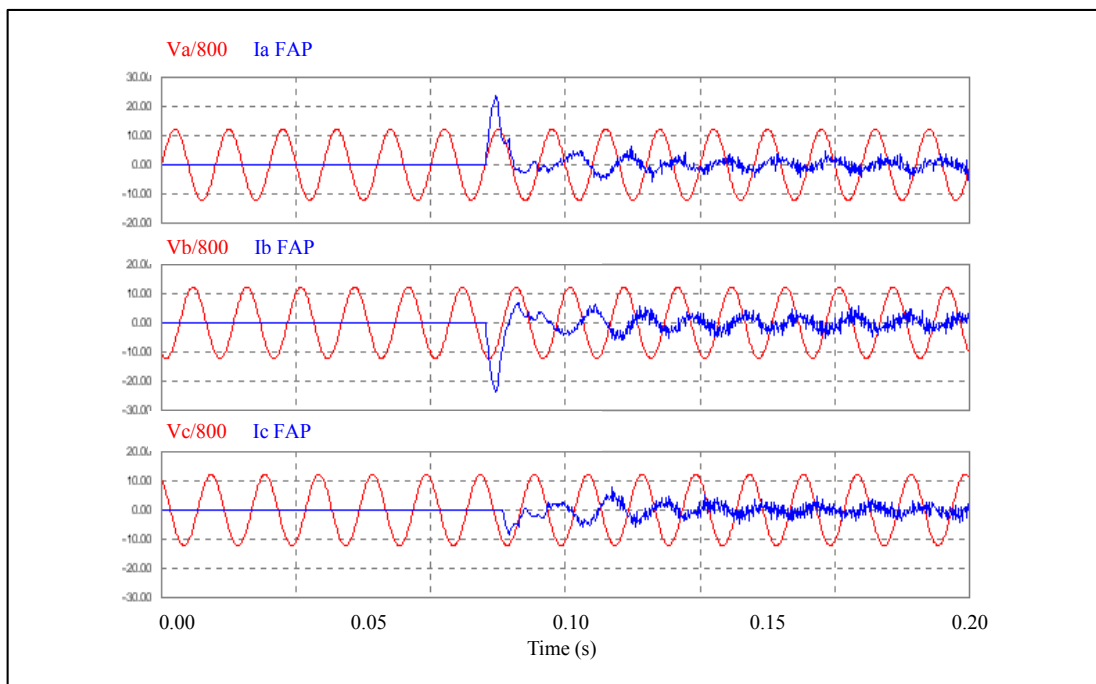


Figura 6.6: Corrientes en equipo FAP. Carga industrial no contaminante.

Adicionalmente, es interesante observar en la figura 6.7 la calidad de la conexión de los elementos capacitivos e inductivos. Es así como, con el fin de compensar la carga, el equipo TBC logra inyectar corrientes inductivas a través de la rama conectada entre las fases **b,c** del sistema y capacitivas entre las fases **a,b** y **c,a**

respectivamente, lo que concuerda plenamente con los resultados del sistema de control ilustrados en figura 6.4.

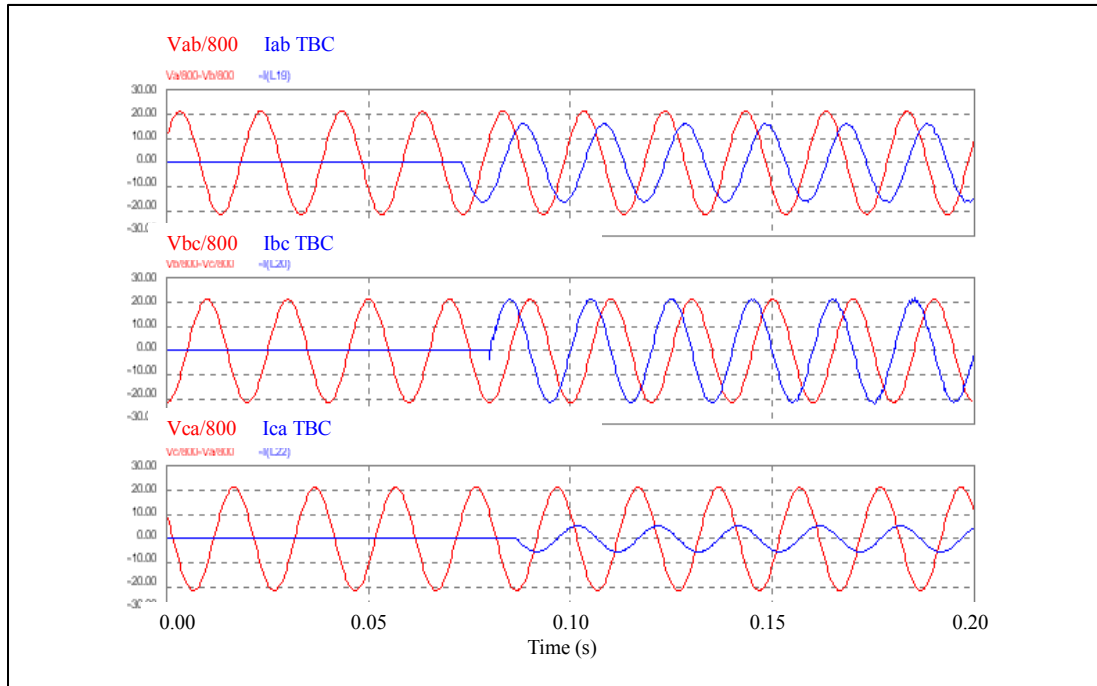


Figura 6.7: Corrientes en equipo TBC. Carga industrial no contaminante.

En ocasiones, pueden detectarse situaciones en que la potencia reactiva que es necesario entregar varía alternadamente entre valores positivos y negativos, lo que puede traer dificultades al obligar a conectar y desconectar repetidamente los inductores de cada rama. Esta situación se soluciona fácilmente adoptando un rango de seguridad en el control en torno al cero para la conexión de los elementos inductivos, puesto que para esos puntos de operación el equipo FAP puede suplir fácilmente las diferencias de potencia requeridas.

A modo de conclusión de los resultados obtenidos es importante considerar la rápida respuesta de la configuración en realizar el balance de carga (un ciclo de voltaje), la ausencia de corrientes de “*inrush*” durante la conexión de elementos capacitivos y/o inductivos, la calidad de las formas de onda logradas en la

fuerza del sistema eléctrico (en cuanto a factor de potencia y magnitud) y la posibilidad de utilizar el equipo FAP conectado a través de un transformador reductor de tensión para entregar o absorber los reactivos necesarios para ajustar la respuesta.

6.3 Resultado de la operación para la configuración propuesta: Cargas desbalanceadas contaminantes de armónicas.

La operación de la configuración propuesta cobra su mayor relevancia frente a cargas contaminantes. De acuerdo a lo expuesto en la sección 6.1.1, el equipo TBC basa toda su operación en función de la fundamental de 50[Hz] de las señales de corriente muestreadas (obtenida mediante un filtro sintonizado). Sin embargo, la calidad de la corriente a través de los elementos capacitivos e inductivos, y por ende la calidad de la inyección y/o absorción de reactivos, depende en gran parte de la calidad del voltaje en la carga. La utilización del equipo FAP, en tanto, ayuda en la generación del principal contenido armónico de la carga lo que se traduce en la obtención de corrientes de línea sinusoidales en la fuente y voltajes más estables en los bornes del TBC. Es interesante acotar que en este caso, el equipo FAP sólo debe aportar con la potencia involucrada en el contenido armónico de la señal.

Para efectos de simulación de cargas contaminantes se han implementado dos casos. En el primero, la carga contaminante utilizada en las simulaciones consiste en la conexión en paralelo entre un puente de diodos de media onda que alimenta una carga resistiva en serie con un inductor (cuyos parámetros se resumen en la tabla 6.7) y un puente de diodos de onda completa que alimenta una carga de similares características (cuyos parámetros se resumen en la tabla 6.8).

La segunda carga contaminante, en tanto, consiste en un filtro activo de potencia que está forzado a crear una corriente con componentes desde la 3^{ra} a la 11^{va} armónicas. Las características del filtro activo de carga son análogas a las presentadas anteriormente en la tabla 6.3 y 6.4.

Tabla 6.7: Parámetros R - L de carga para el puente de diodos media onda.

Impedancia	R	L
Z_{load}	1200[Ω]	20[mH]

Tabla 6.8: Parámetros R - L de carga para el puente de diodos onda completa.

Impedancia	R	L
Z_{load}	900[Ω]	20[mH]

En ambos casos, la carga contaminante se encuentra conectada en paralelo a la carga lineal descrita en tabla 6.6.

6.3.1 Carga contaminante: Puentes de media onda y onda completa.

Con el fin de apreciar la respuesta dinámica de cada uno de los equipos involucrados se ha habilitado la operación del TBC a partir de los 0.0733[seg] de simulación. En el caso del equipo FAP, por motivos análogos, sólo se posibilita su acción a partir de los 0.1133[seg] de simulación.

La respuesta de los equipos TBC y FAP presentada en la figura 6.8 muestra durante los primeros instantes de tiempo el grado de distorsión, desbalance y desfase de las corrientes de línea respecto de las tensiones de alimentación. De acuerdo a estas características, las corrientes simuladas son muy semejantes a las corrientes reales que se pueden obtener de procesos contaminantes como los hornos de arco.

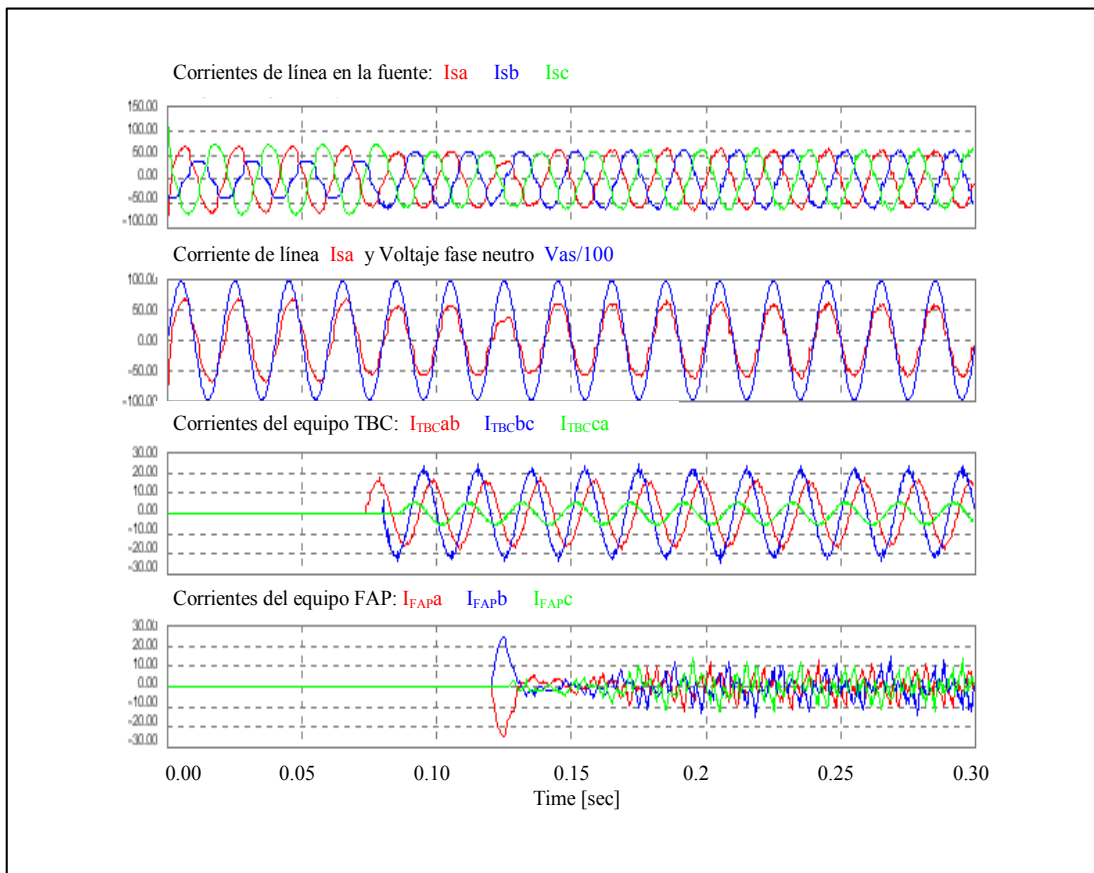


Figura 6.8: Operación de la configuración propuesta. Carga industrial: puentes de diodos.

La activación del equipo TBC permite realizar el balance y compensación de la carga en aproximadamente un ciclo de voltaje, lo cual implica una respuesta dinámica muy alta considerando que la carga tiene contenido armónico. Sin embargo, es importante recordar que un filtro de corriente sintonizado a 50[Hz] se encarga de tratar las señales de corriente de carga muestreadas con el fin de ser ingresadas al sistema de control.

En el caso del equipo TBC la inyección y/o absorción de potencia reactiva se lleva a cabo de acuerdo a la evaluación directa de las muestras de corriente en la carga obtenidas, en la ley de control (ver figura 6.9), lo que implica

conectar una susceptancia capacitiva entre los terminales **a, b** y **c, a** del equipo y una inductiva entre los terminales **b, c**.

La decisión del sistema de control, se mantiene respecto del caso anterior, lo cual resulta concordante dado que la carga lineal no ha experimentado variaciones y la carga no lineal empleada no implica un aporte en la potencia reactiva de la carga sino sólo en potencia armónica.

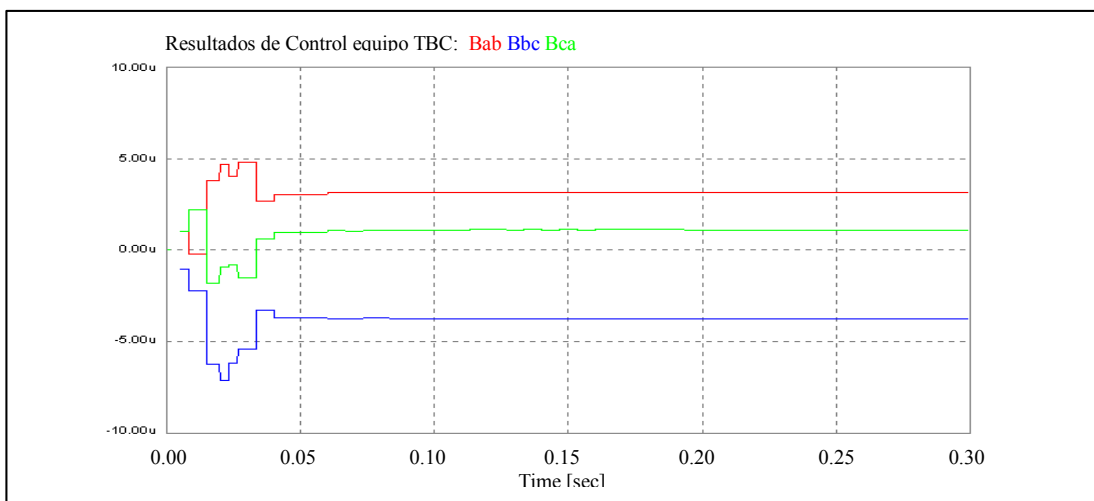


Figura 6.9: Resultados de sistema de control equipo TBC. Carga industrial: puentes de diodos.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, es bajo cargas contaminantes cuando la operación del equipo FAP cobra mayor valor, dado que el equipo TBC es incapaz de inyectar las componentes armónicas de corriente necesarias para que la corriente en la fuente sea sinusoidal.

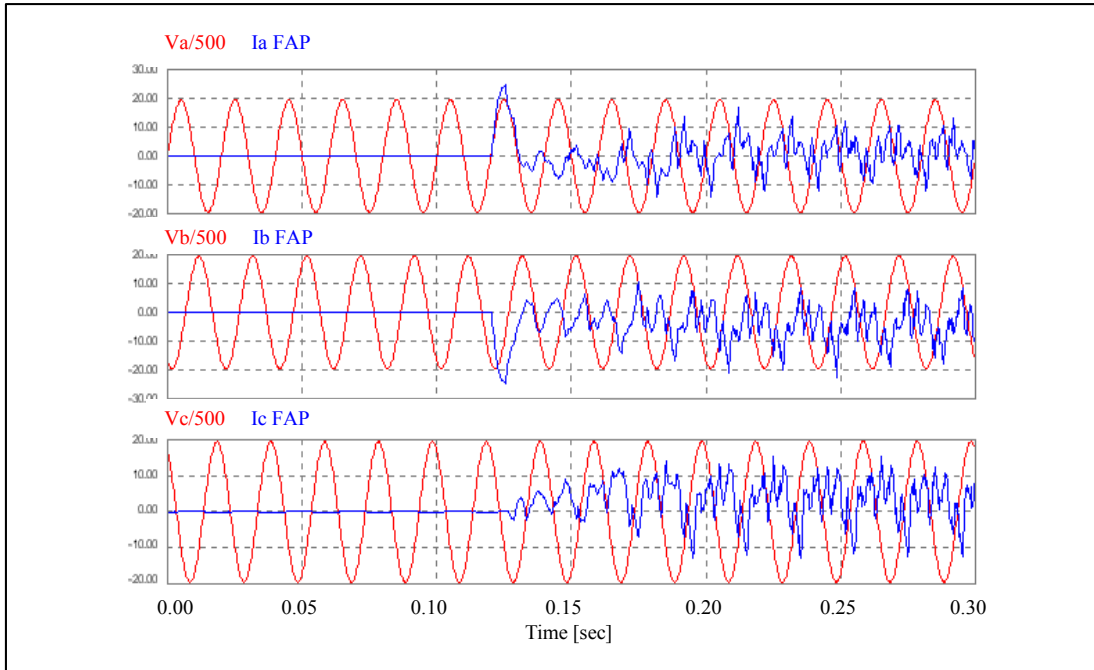


Figura 6.10: Corrientes en equipo FAP. Carga industrial: puentes de diodos.

Tal como se había analizado en forma teórica en el capítulo 5, el equipo FAP debe tratar de filtrar una señal de corriente que se encuentra prácticamente en fase con el voltaje, lo que definitivamente implica menores requerimientos de capacidad. Su aporte, que puede visualizarse referido a los voltajes fase-neutro del sistema en la figura 6.10, básicamente consiste en contenido armónico además de la pequeña corriente fundamental destinada a cancelar el error de cuantización del bit menos significativo del equipo TBC.

La figura 6.8 muestra que el equipo FAP logra minimizar los armónicos de la carga contaminante una vez que el equipo TBC ha realizado la compensación y balance de las componentes fundamentales. Sin embargo, existe un pequeño contenido armónico relacionado con la señal de conmutación de los IGBT's que es ingresado a la red y afecta ligeramente las corrientes en los condensadores (ver figura 6.11). Este fenómeno es inevitable por tanto las líneas tienen carácter

inductivo y siempre existirán pequeñas variaciones en el voltaje en la carga producto de la contaminación residual de las corrientes de línea.

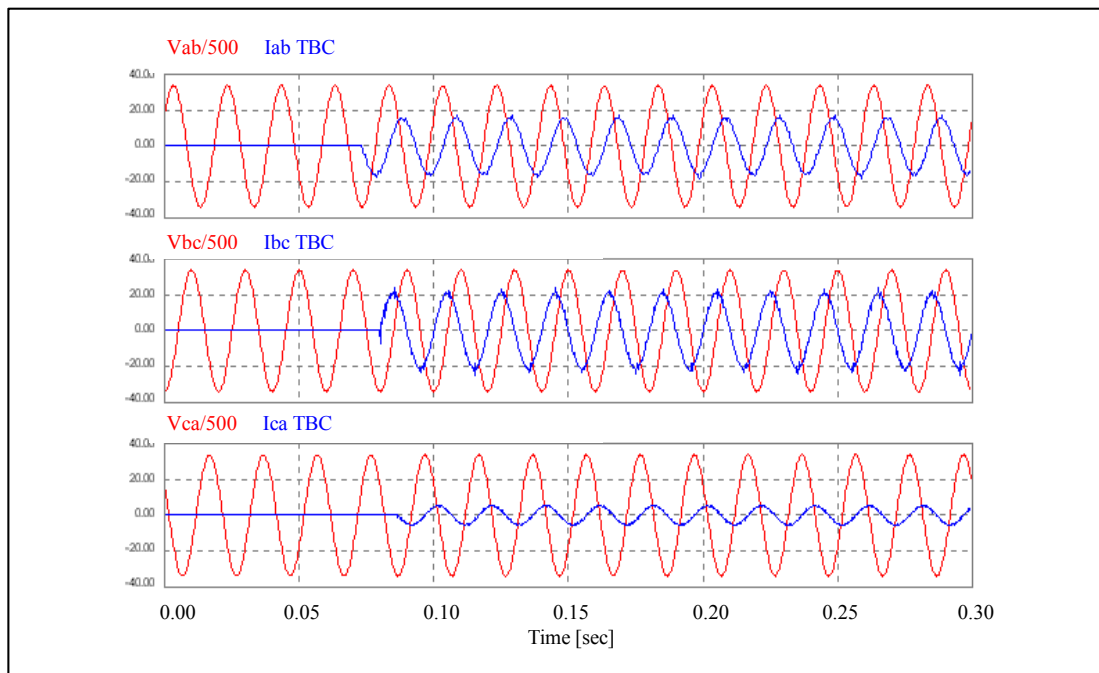


Figura 6.11: Corrientes en equipo TBC. Carga industrial: puentes de diodos.

Adicionalmente, al igual que la simulación anterior y como puede observarse en la figura 6.11, las conexiones de los elementos capacitivos e inductivos se produce en forma limpia, sin provocar corrientes de “*inrush*” incluso cuando el equipo FAP no está funcionando. La figura 6.11 además muestra claramente que las corrientes inyectadas por el equipo TBC están de acuerdo a los resultados de las leyes de control mostradas en la figura 6.8, lo que implica una corriente elevada y capacitiva para $I_{ab}^{(c)}$, elevada e inductiva para $I_{bc}^{(c)}$ y levemente capacitiva para $I_{ca}^{(c)}$.

Es interesante observar el desempeño de la configuración propuesta en términos de la transformada de Fourier de las señales de corriente de la carga y en la fuente.

Analizando la figura 6.12, que contiene una comparación en el dominio de la frecuencia para las señales mencionadas, es posible observar el efecto de compensación y balance de carga (realizado en su mayor parte por el equipo TBC) a través de la disminución de la fundamental de corriente. Adicionalmente, existe para todo el espectro de frecuencias, en especial para la quinta y séptima armónicas, una disminución en las magnitudes que se debe en gran parte al desempeño del equipo FAP.

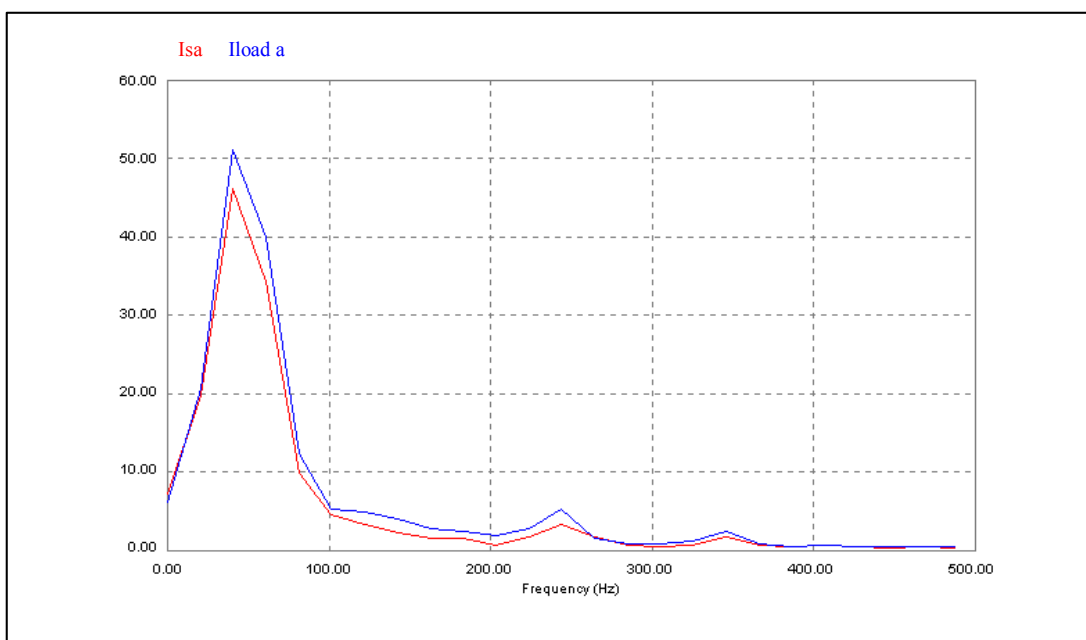


Figura 6.12: Análisis de frecuencia. Carga industrial: puentes de diodos.

Es justamente esa acción conjunta de ambos equipos la que permite cumplir con los objetivos principales de lograr formas de onda sinusoidales y en fase para las corrientes de línea en la fuente para voltajes en el rango de media tensión, a

pesar de que la capacidad del equipo FAP es bastante reducida en comparación al equipo TBC.

En conclusión, el desempeño global de la configuración propuesta cumple satisfactoriamente con el objetivo inicialmente planteado, siempre y cuando los requerimientos de carga se enmarquen dentro de los rangos de operación de los equipos.

6.3.2 Carga contaminante: Corrientes en la carga con componentes desde 3^{ra} a 11^{va} armónicas.

Al igual que en la simulación anterior, para poder apreciar la respuesta dinámica de cada uno de los equipos involucrados en el sistema, se ha activado la operación del TBC comienza a partir de los 0.0733[seg] de simulación. En el caso del equipo FAP su conexión se efectúa a los 0.1133[seg] de simulación.

Los resultados obtenidos para una carga contaminante generadora de componentes entre la 3^{ra} a 11^{va} armónicas se muestran en la figura 6.13, particularmente durante los primeros 0.0733 [seg] de simulación, donde las corrientes de línea en la fuente son idénticas a la de la carga.

Como es posible observar en esta figura, las condiciones iniciales de corrección de factor de potencia existentes en la carga son suplidas por el equipo TBC, no así los requerimientos de compensación de armónicos los cuales son satisfechos una vez llevada a acabo la conexión del equipo FAP.

En ambos casos (operación del TBC y FAP), la respuesta dinámica es muy buena ya que la compensación y balance de carga se realiza aproximadamente un ciclo después de la conexión de cada equipo, lo que confirma la utilización de esta configuración en cargas dinámicas.

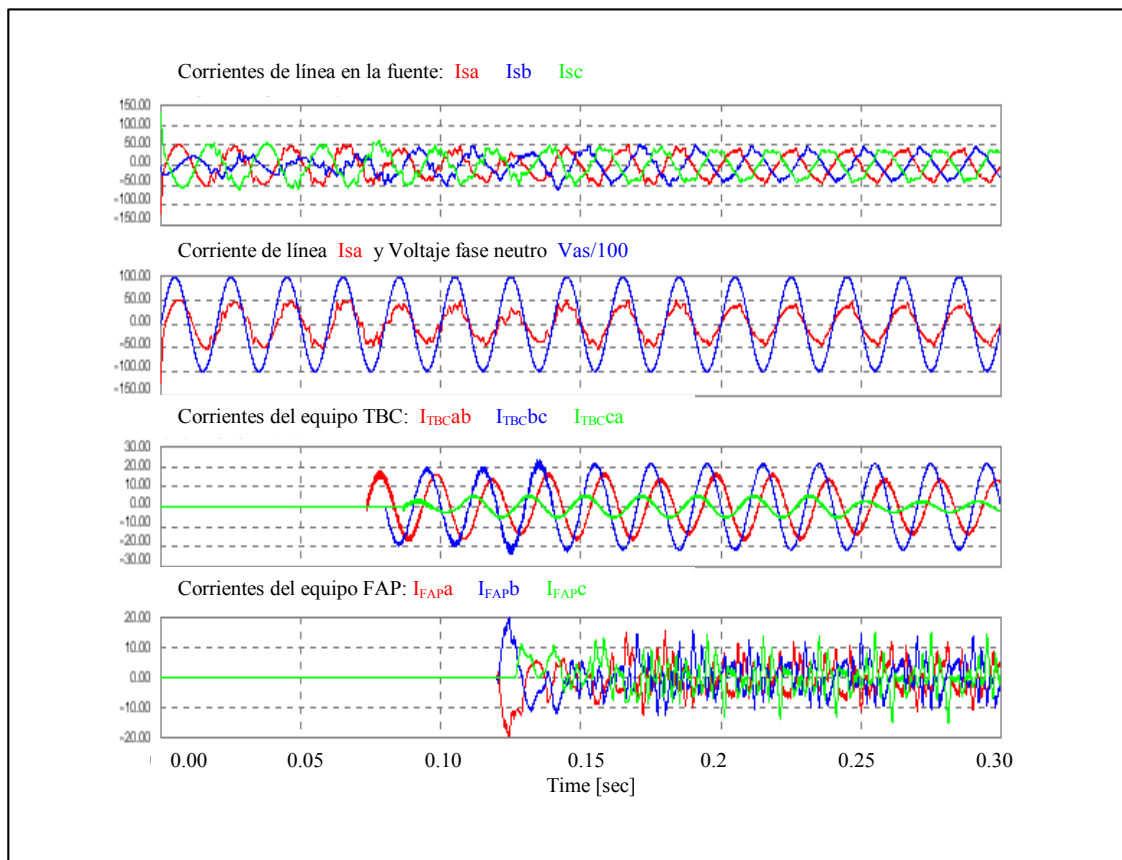


Figura 6.13: Operación de la configuración propuesta. Carga industrial: componentes 3^{ra} a 11^{va} armónicas.

La figura 6.14 muestra el resultado del proceso de control del equipo TBC. En este caso, la carga emulada por un filtro activo tampoco introduce desfases considerables entre las corrientes y los voltajes respectivos, por lo cual el resultado del control no varía respecto de los casos anteriores. Esta particularidad indica que el control directo basado en la evaluación de las componentes en cuadratura de las corrientes de carga posee una estabilidad muy alta, incluso bajo condiciones de operación con cargas altamente contaminantes, esto debido a la existencia de un filtro de corriente apropiadamente sintonizado que se aplica a las muestras de corriente de carga.

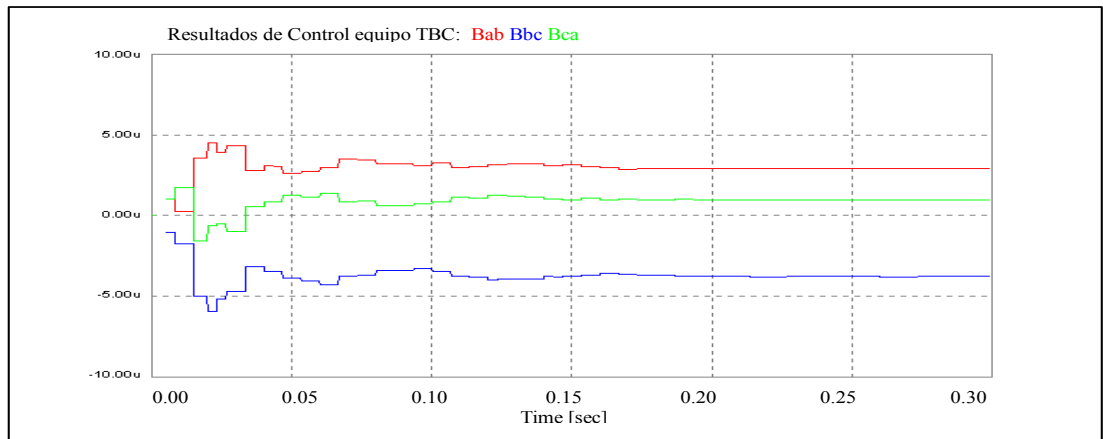


Figura 6.14: Resultados de sistema de control equipo TBC. Carga industrial: componentes 3^{ra} a 11^{va} armónicas.

La figura 6.15 muestra la relación existente entre las corrientes aportadas por el filtro activo y los respectivos voltajes fase-neutro.

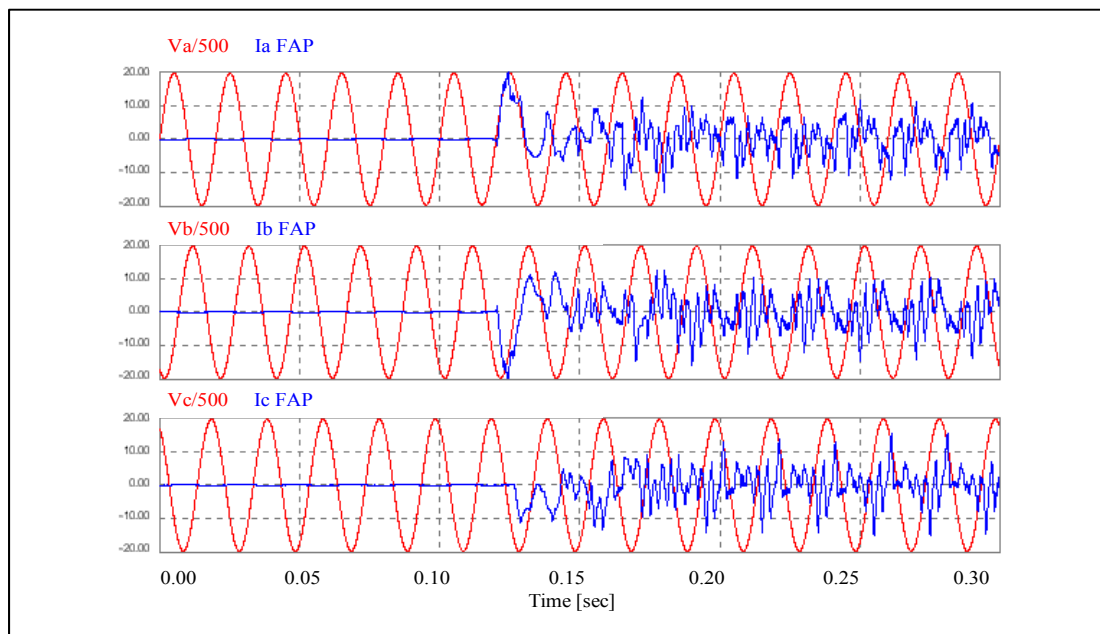


Figura 6.15: Corrientes en equipo FAP. Carga industrial: componentes 3^{ra} a 11^{va} armónicas.

Dado que la carga tiene componentes armónicas diversas, en este caso particular, las corrientes aportadas por el equipo FAP también poseen una alta variabilidad de armónicos. Además se agrega una pequeña cantidad de reactivos que compensan las diferencias generadas por el bit menos significativo del TBC.

La figura 6.16 muestra las corrientes aportadas por el equipo TBC. Es posible constatar que la conexión y desconexión de las susceptancias (condensadores e inductores) , al igual que en los casos anteriores, se llevan a cabo sin generar corrientes de “*inrush*” indeseables.

Respecto del contenido armónico relacionado con la señal de conmutación de los IGBT's, es posible observar en la figura, que éste afecta en muy poca medida a las corrientes de compensación, por lo cual es posible afirmar que casi no existe introducción de armónicos a la red salvo los que genera la misma carga y que son compensador por el equipo FAP.

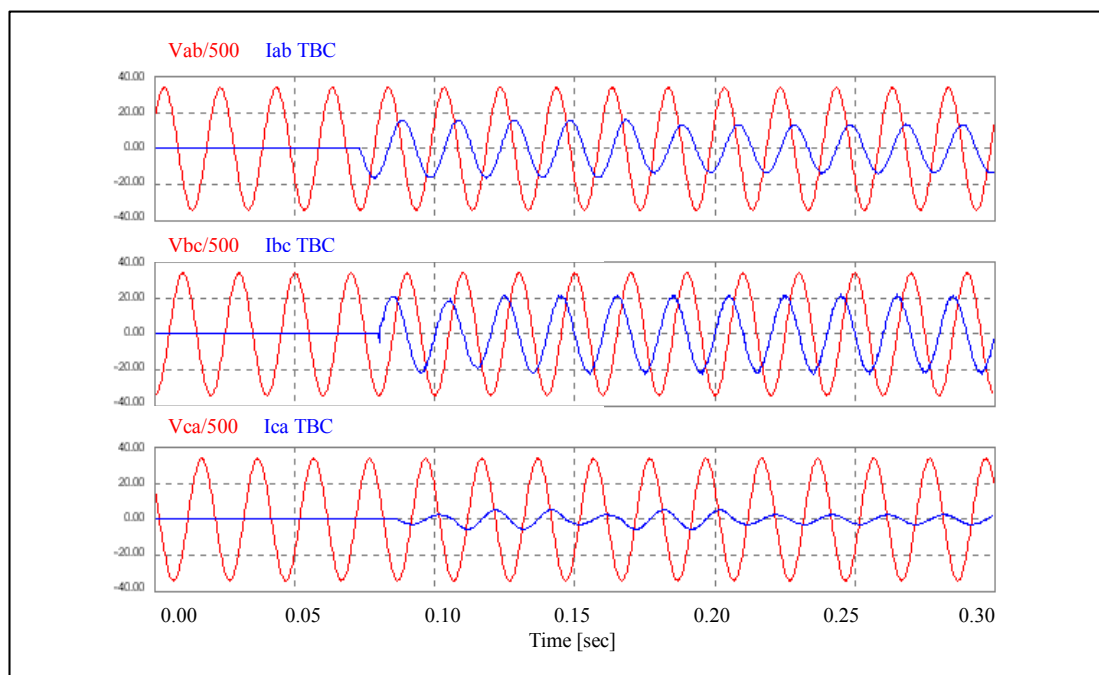


Figura 6.16: Corrientes en equipo TBC. Carga industrial: componentes 3^{ra} a 11^{va} armónicas.

Si bien las resultantes finales de las corrientes de línea no son enteramente sinusoidales, al analizar el desempeño de la configuración propuesta en términos de la transformada de Fourier (ver figura 6.17), la comparación de las señales de corriente de la carga y en la fuente indica que existe una disminución efectiva de las componentes armónicas, prácticamente para todo el rango de frecuencia ubicado entre la 3^{ra} y la 11^{va} armónicas exceptuando una pequeña distorsión en torno a la 7^{ma} armónica.

Por su parte la componente fundamental de 50 [Hz] se ve fuertemente disminuida principalmente por la acción del equipo TBC y en mucha menor medida del equipo FAP, ya que se cancelan los requerimientos de potencia reactiva.

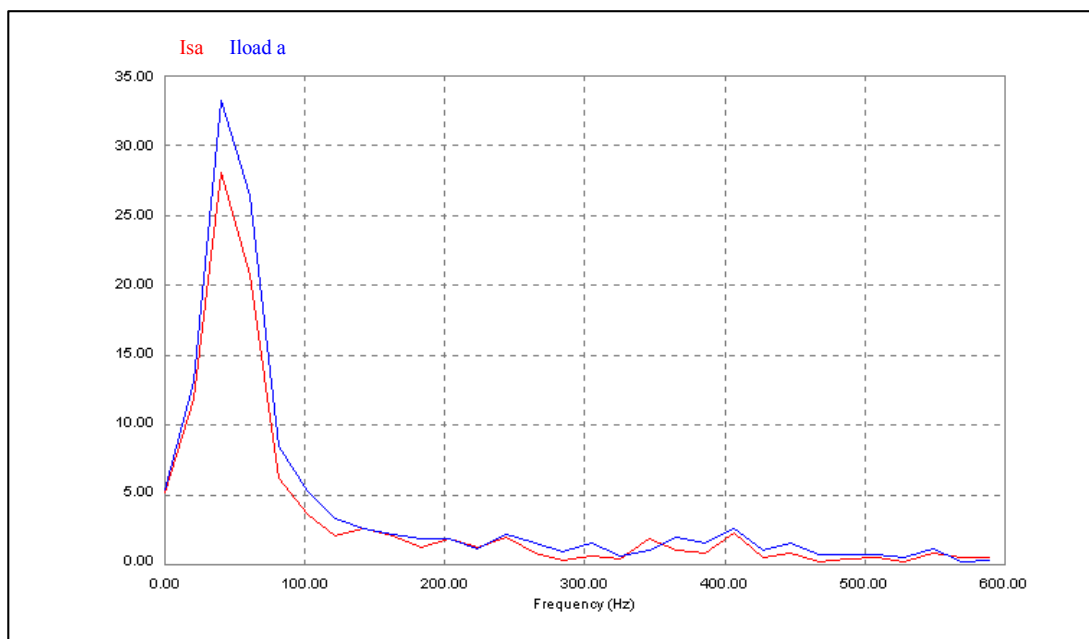


Figura 6.17: Análisis de frecuencia. Carga industrial: componentes 3^{ra} a 11^{va} armónicas.

Finalmente, de todas las pruebas realizadas puede concluirse, en cuanto al desempeño de la configuración propuesta, que el balance y compensación de carga

a alta potencia es realizada en forma satisfactoria por el equipo TBC en base al análisis de las fundamentales de las señales de corriente muestreadas, lográndose respuestas dinámicas en tan sólo un ciclo de onda.

El equipo FAP en tanto, mantiene una operación independiente del desempeño del equipo TBC utilizando su capacidad en el mejoramiento de las formas de onda de las señales de corriente presentes en la fuente del sistema. En este sentido, la eficiencia de los lazos de control implementados y las inferencias teóricas desarrolladas en los distintos capítulos del presente trabajo han sido corroboradas mediante las simulaciones presentadas.

VII CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

Luego del trabajo llevado a cabo, tanto en la investigación teórica como en la validación de resultados a través de simulaciones, es posible señalar como conclusión general que los objetivos propuestos al inicio del presente trabajo (acápites 1.2) se han cumplido en forma satisfactoria. Esto es, se ha llevado a cabo la investigación, diseño y validación de un sistema de control para un equipo TBC.

Los resultados obtenidos indican que dicho sistema es capaz de calcular con precisión los valores de las susceptancias que es necesario conectar entre cada una de las fases del sistema eléctrico para lograr factor de potencia unitario y corrientes equilibradas en la carga. Además la respuesta dinámica no supera los 2 ciclos antes de entregar una solución estable.

Además, la problemática de cancelación de armónicos presentes en la carga se ha resuelto mediante la validación de una topología de interconexión “*shunt*” entre el equipo TBC estudiado y un filtro activo paralelo (FAP).

Adicionalmente, en las siguientes secciones se presentan las conclusiones específicas respecto a las temáticas centrales que se han desarrollado a partir del presente trabajo de memoria.

7.1 Conclusiones respecto a la solución de la problemática de compensación, balance y cancelación de armónicos para sistemas de alta potencia.

Luego del estudio de las relaciones analíticas básicas conducentes al balance y corrección del factor de potencia de cargas trifásicas para alta potencia, se ha verificado que el equipo TBC permite resolver esta problemática sencilla y eficazmente.

Dentro de las ventajas de este equipo se puede mencionar que el TBC se compone de tiristores y diodos que son válvulas unidireccionales robustas, lo que permite su operación a niveles de potencia elevados. Además, las conexiones en el TBC son suaves y evitan fenómenos de “*inrush*” si el voltaje en los bornes está dentro de un rango aceptable de contenido armónico. Sin embargo, el equipo TBC no incluye en su operación la cancelación de las componentes armónicas de la carga.

Por su parte, el equipo FAP, resuelve en forma eficiente las tres componentes de interés del problema, es decir, la compensación, balance y cancelación de armónicos de la carga. Esto, debido a que el sistema de control fuerza a las corrientes de líneas a ser sinusoidales y en fase con el voltaje respectivo, además esta operación se realiza en un tiempo de respuesta reducido.

Sin embargo, las limitaciones existentes en alta tensión para las válvulas de conmutación forzada que incluye el filtro activo (IGBTs), hace que su implementación para redes a partir de los 13.8 [KV] sea poco viable tanto desde el punto de vista de la robustez del equipo, como desde el punto de vista económico.

De este modo, la configuración propuesta de un equipo TBC diseñado para media o alta tensión, en conexión en cascada con un equipo FAP construido en baja tensión y conectado a la red a través de un transformador reductor de tensión, resulta muy interesante.

7.2 Conclusiones respecto de los sistemas de control factibles de implementar para el equipo TBC.

Para llevar a cabo el sistema de control del equipo TBC, se analizaron tres posibles estrategias: sistema experto con controlador proporcional del error de magnitud y fase, sistema experto con controlador proporcional adaptivo difuso del error de magnitud y sistema de control basado en evaluación directa de componentes en cuadratura de las corrientes de línea.

La efectividad de los métodos de control propuestos fue verificada mediante simulación con rutinas diseñadas en lenguaje C++. Al hacer un análisis comparativo entre los resultados de simulación obtenidos, el sistema de control basado en la evaluación directa de las corrientes en cuadratura de las corrientes de línea se presenta como el más apropiado para efectos de una implementación de control para el equipo TBC.

La conclusión anterior se basa en la consideración del tiempo de respuesta, estabilidad en la solución y simpleza en la implementación. En todos estos aspectos, el mencionado método de control aventaja bastante a los dos restantes. En efecto, el hecho que el sistema de control se base en muestras de las corrientes y voltaje de carga, hace que la solución sea estable, ya que los fenómenos propios de las líneas de transmisión no intervienen en el cálculo de la cantidad de susceptancias a conectar. Además, las muestras son fácilmente obtenibles mediante sensores LEM o “transformadores de muestra”, por lo que la implementación del control es económica.

7.3 Conclusiones respecto de la configuración propuesta para los equipos TBC y FAP.

La interconexión del equipo TBC y FAP permite aprovechar las cualidades de cada equipo con sistemas de control independientes y destinados a balancear y corregir el factor de potencia en la carga y cancelar sus componentes armónicas. El equipo TBC se encarga de resolver el problema a niveles de potencia elevados, mientras que el FAP, operando a baja tensión, corrige el error de compensación en el TBC (producido por la conexión de elementos binariamente seleccionados) e inyecta las corrientes armónicas que sean necesarias.

Además de las ventajas que cada equipo posee en forma independiente, la interconexión de los equipos TBC y FAP en configuración paralelo presenta una serie de ventajas conjuntas tal como se señala a continuación:

- Dado que el equipo TBC varía la cantidad de reactivos inyectados en forma discreta, existe un error de cuantización equivalente a la mitad de la potencia reactiva que inyectaría el condensador de menor valor de cada rama. La utilización del equipo FAP permite suplir esa diferencia además de generar las armónicas necesarias para compensar la carga contaminante.
- La operación del equipo TBC se ve beneficiada por la inyección de armónicas que proporciona el equipo FAP, ya que ayuda a mantener una tensión sinusoidal en la carga.

En cuanto a las precauciones que existen en la operación conjunta, es necesario considerar que la calidad de las corrientes a través del TBC depende fuertemente de la capacidad del equipo FAP para mantener una tensión sinusoidal en sus terminales. De este factor se sostiene la calidad del balance y compensación que el equipo TBC logre y por ende de la topología propuesta.

Las conclusiones precedentes se obtienen a partir de los análisis teóricos estudiados y son validados de acuerdo con las simulaciones realizadas en el capítulo 6. De hecho, los dos primeros experimentos a los que fue sometido el sistema *Compensador-Balanceador* muestran las ventajas recién presentadas (simulación con cargas desbalanceadas no contaminantes de armónicas y cargas desbalanceadas contaminantes de armónicas respectivamente).

7.4 Desarrollos futuros

A modo de desarrollo futuro cabe comentar que, al tratarse esta memoria de un trabajo orientado a satisfacer requerimientos de alta potencia, se hace difícil presentar resultados prácticos. Sin embargo, las simulaciones realizadas avalan la construcción de un prototipo experimental a baja tensión.

En estas circunstancias, para poder obtener resultados que den una visión representativa del comportamiento del conjunto *compensador-filtro activo* en alta

tensión, el prototipo debería considerar las limitaciones del equipo FAP y su interacción con el transformador reductor de tensión, ya que estos son los principales impedimentos para la operación eficiente de la topología propuesta.

En efecto, la conexión directa del equipo FAP a la red eléctrica hace prescindir de la problemática de transferencias de potencia del lado secundario al primario del transformador de tensión, lo cual es revelante en la operación a voltajes más elevados. Respecto a este tema la elección de los valores de diseño del prototipo del equipo FAP debe ser estudiada con detenimiento, ya que si la capacidad del filtro activo es insuficiente para los requerimientos de carga, el desempeño del equipo TBC se ve perjudicado ya que la distorsión en los voltajes de carga hacen que los condensadores dejen de proporcionar al sistema corrientes puramente sinusoidales.

BIBLIOGRAFIA

- [Andrew96] ANDREW, R. and ZELAYA, H. (1996) **Transient Response of a Static Var Shunt Compensator**. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 11, N° 3, May 1996.
- [Arrill94] ARRILLAGA, J. (1994) **Armónicos en Sistemas de Potencia**. Universidad de Cantabria, Electra de Viesgo, 1994.
- [Braae79] BRAAE, M. and RUTHERFORD, D. A. (1979) **Theoretical and linguistic aspects of the fuzzy logic controller**. Automática, Vol. 15, pp. 553-577.
- [Buck96] BUCKLEY, J. (1996) **Stability and the fuzzy controller**. Fuzzy Sets and Systems, Vol. 77, N° 2, pp. 167-173.
- [Byerl82] BYERLY, R., POZNAMIAK, D. and TAYLOR, E. (1982) **Static Raective Power Compensation of Power Transmission Lines**. IEEE Trans. on PAS., Vol. PAS-101 N°10, October 1982.
- [Contar97] CONTARDO, J. M. (1997) **Filtro Activo Paralelo con Control Difuso en la Barra Continua**. Memoria para optar al grado de Ingeniero Civil Industrial mención Electricidad, Departamento de Ingeniería Eléctrica. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [DelVall01] DEL VALLE, Y. E. (2001) **Construcción de un Compensador Binario Tiristorizado e Interconexión con un Filtro Activo Paralelo para la Compensación de Cargas Trifásicas Contaminantes**. Memoria para optar al grado de Ingeniero Civil Industrial mención Electricidad, Departamento de Ingeniería Eléctrica. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [Dixon99I] DIXON, J., CONTARDO, J. M. and MORÁN, L. A. (1999) **A Fuzzy-Controlled Active Front-End Rectifier with Current Harmonic Filtering Characteristics and Minimum Sensing Variables**. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 14, N° 4, July 1999.

- [Dixon99II] DIXON, J., DEL VALLE, Y., ORCHARD, M., MORÁN, L. y MAFFRAND, C. (1999) **Nueva Topología para un Compensador de Reactivos libre de Armónicos, usando Válvulas Unidireccionales.** XIII Congreso de Ingeniería Eléctrica, 1999.
- [Dixon95] DIXON, J., GARCÍA, J. and MORAN, L. (1995) **Control System for Three Phase Active Power Filter which simultaneously Compensates Power Factor and Unbalanced Loads.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 42, N° 6, December 1995.
- [Dixon97] DIXON, J. and VEAS, D. (1997) **Open Loop Var Compensator for Industrial Applications, Using a Simple PWM Pattern.** IEE Proceedings on Elect. Power Appl., Vol. 144, N°4, July 1997.
- [Driank96] DRIANKOV, D., HELLENDORRN, H. and REINFRANK, M. (1996) **An introduction to fuzzy control.** Springer, second edition, 1996.
- [Frank71] FRANK, H. and LANDSTROM, B. (1971) **Power correction with Thyristor-Controlled Capacitors.** ASEA Journal, Vol. 45, N°6, 1971, pp. 180-184.
- [Gyugyi78] GYUGYI, L. OTTO, R. A. and PUTMAN, T. H. (1978) **Principles and Applications of Static, Thyristor-Controlled Shunt Compensators.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, N° 5, Sept/Oct 1978.
- [Lee90] LEE, CH. (1990) **Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller.** IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Vol. SMC-20, N° 2, pp. 404-435.
- [Ley98] Ley General de Servicios Eléctrico. Decreto Supremo N° 327 publicado en el Diario Oficial del 10 de septiembre de 1998.
- [Maeda96] MAEDA, H., ASAOKA Sh., and MURAKAMI Sh. (1996) **Dynamical fuzzy reasoning and its application to system modelling.** Fuzzy Seta and Systems, Vol. 80, N° 1, pp. 101-109.

- [Maffr98] MAFFRAND, C., DIXON, J. y MORÁN, L. (1998) **Binary Controlled, Static VAR Compensator, Based on Electronically Switched Capacitors**. Power Electronics Specialists Conference, PESC'98, pp. 1392-1396.
- [Mam74] MAMDANI, E. H. (1974) **Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant**. Proceeding of the IEEE, Vol. 121, N° 12, pp. 1585-1588.
- [Mehta95] MEHTA, P. and DARWISH, M. (1995) **Active Reactive Power Controller**. IEE Proceeding on Elect, Power Appl., Vol 142, N° 6, November 1995.
- [Moran90] MORÁN, L. (1990) **High Performance Solid-State VAR Compensators**. Ph. D. Thesis presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the degree of Doctor of Philosophy at Concordia University Montreal, Quebec, Canada.
- [Moran95] MORÁN, L. and RIVERA, A. (1995) **Desarrollo de un Sistema de Control para un Compensador Conmutado por Tiristores**. XI Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica, 1995.
- [Moran92] MORÁN, L. and RIVERA, A. (1992) **Desarrollo de un Esquema de Control para un Compensador Estático de Reactivos del tipo Condensador Conmutado por Tiristores**. X Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica, 1992.
- [Rashid95] RASHID, M. (1995) **Electrónica de Potencia. Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones**. Prentice Hall Hispanoamericana S.A., 1995
- [Ruth76] RUTHERFORD, D. and BLOORE, G. (1976) **The implementation of fuzzy algorithms for control**. Proceedings of IEEE, Vol. 64, N° 4, pp. 572-573.
- [Smith95] SMITH, L. (1995) **A Practical Approach in Substation Capacitor Bank Applications to Calculating, Limiting and Reducing the Effects of**

- Transient Current.** IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, N°4, July/August 1995.
- [Steep76] STEEPER, D. and STRATFORD, R. (1976) **Reactive Compensation and Harmonic Supresion for Industrial Power Systems using Thyristor Converters.** Transactions on Industry Applications, Vol. 1A-12, N°3, May/June 1976.
- [Suge93] SUGENO, M. and YASUKAWA, T. (1993) **A fuzzy logic based approach to qualitative modelling.** IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 1, N° 1, pp. 7-31.
- [Takag85] TAKAGI, T. and SUGENO, M. (1985) **Fuzzy identification of systems and its applications to modelling and control.** IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-15, N° 1, pp. 116-132.
- [Takah89] TAKAHASHI, I. and SU, G. (1989) **A 500 Hz Power System, Power Converter and Transmission Lines.** IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, IAS'89, pp. 988-1002.
- [Tanak92] TANAKA, K. and SUGENO, M. (1992) **Stability análisis and design of fuzzy control systems.** Fuzzy Sets and Systems, Vol. 42, N° 2, pp.135-156.
- [Tang87] TANG, K. L. and MULHOLLAND, R. J. (1987) **Comparing fuzzy logic with classical controller designs.** IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-17, N° 6, pp.1085-1087.
- [Wang93] WANG, L. X. (1993) **Adaptive fuzzy systems and control: design and stability análisis.** Prentice Hall, 1993.

ANEXOS

**ANEXO A : PROGRAMA DE SIMULACIÓN PARA SISTEMA DE
CONTROL PROPORCIONAL (LENGUAJE C++).**

```

#include<graphics.h>
#include<stdio.h>
#include<conio.h>
#include<math.h>
#include<dos.h>
#include<process.h>
#include<stdlib.h>
#include<ctype.h>
#include<time.h>

//Punteros para grabar en archivo
FILE *fin,*finw;

float Rlab=200,Rlbc=150,Rlca=200;
float Llab=0.5,Llbc=0,Llca=0.5;
float Clab=0.0000,Clbc=0.000016,Clca=0.0000;
double ti=0;
float pi=3.1415954;
float Vff=380;
float Va,Vb,Vc;
float Vab,Vbc,Vca,Ia,Ib,Ic;
float Cab=0,Cbc=0,Cca=0;
float ICab=0,ICbc=0,ICca=0;
float ILab=0,ILbc=0,ILca=0;
float Iloadab,Iloadbc,Iloadca;
int tda=0,tdb=0,tdc=0,Kab=0,Kbc=0,Kca=0;
float Xab=0,Xbc=0,Xca=0,Xab_1=0,Xbc_1=0,Xca_1=0;
float Iam=0,Ibm=0,Icm=0,Diab=0,Dibc=0,Dica=0;
float fpa=0,fpb=0,fpb=0;
int hita=0,hitb=0,hitc=0,control=0;
float
AuxCbc=0,AuxLab=0,AuxCca=0,AuxLbc=0,AuxCab=0,AuxLca=0;
float tc=0,tv=167,ek=0,Proporcional=0,Integral=0;
////////////////////////////////////

void factor_pota()
{
if (tda==0)
{
if (Va<0) fpa=-1;
if (Va==0) fpa=0;
if (Va>0) fpa=1;
}
}

```

```

tc=ti-2000*floor(ti/2000);
if (tc>=1000) tc=tc-2000;
};
return;
};

void factor_potb()
{
if (tdb==0)
{
if (Vb<0) fpb=-1;
if (Vb==0) fpb=0;
if (Vb>0) fpb=1;
};
return;
};

void factor_potc()
{
if (tdc==0)
{
if (Vc<0) fpc=-1;
if (Vc==0) fpc=0;
if (Vc>0) fpc=1;
};
return;
};
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
void Sist_Control()
{
float DXab=0,DXbc=0,DXca=0,G,Ki,P,Imin=0.005;

if (control==1)
{

P=1.5;
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////Cálculo de DXab
if (fpa==1)
{
if ((Iam>Ibm) & (Ibm>Icm) ) {DXab=P*Diab;};
if ((Iam>Ibm) & (Iam>Icm) & (Icm>=Ibm) ) {DXab=P*Dica;};
if ((Ibm>Iam) & (Ibm>Icm) & (Icm>=Iam) ) {DXab=-P*Dica;};
if ((Icm>Iam) & (Icm>Ibm) & (Ibm>=Iam) ) {DXab=-P*Diab;};
}

else
{

```

```

if ((Iam>Ibm) & (Iam>Icm) & (Icm>=Ibm) )      {DXab=P*Dibc;};
if ((Ibm>Iam) & (Ibm>Icm) & (Iam>=Icm) )      {DXab=-P*Diab;};
if ((Ibm>Iam) & (Ibm>Icm) & (Icm>=Iam) )      {DXab=-P*Dibc;};
if ((Icm>Iam) & (Icm>Ibm) & (Iam>=Ibm) )      {DXab=P*Diab;};
};

//////////////////////////////////////Cálculo de DXbc
if (fpb==1)
{
if ((Iam>Ibm) & (Iam>Icm) & (Icm>=Ibm) )      {DXbc=-P*Dibc;};
if ((Ibm>Iam) & (Ibm>Icm) & (Iam>=Icm) )      {DXbc=P*Diab;};
if ((Ibm>Iam) & (Ibm>Icm) & (Icm>=Iam) )      {DXbc=P*Dibc;};
if ((Icm>Iam) & (Icm>Ibm) & (Iam>=Ibm) )      {DXbc=-P*Diab;};
}

else
{
if ((Iam>Ibm) & (Ibm>Icm) )                    {DXbc=P*Dibc;};
if ((Ibm>Iam) & (Ibm>Icm) & (Iam>=Icm) )      {DXbc=P*Dica;};
if ((Icm>Iam) & (Icm>Ibm) & (Iam>=Ibm) )      {DXbc=-P*Dica;};
if ((Icm>Iam) & (Icm>Ibm) & (Ibm>=Iam) )      {DXbc=-P*Dibc;};
};

//////////////////////////////////////Cálculo de DXca
if (fpc==1)
{
if ((Iam>Ibm) & (Ibm>Icm) )                    {DXca=-P*Dibc;};
if ((Ibm>Iam) & (Ibm>Icm) & (Iam>=Icm) )      {DXca=-P*Dica;};
if ((Icm>Iam) & (Icm>Ibm) & (Iam>=Ibm) )      {DXca=P*Dica;};
if ((Icm>Iam) & (Icm>Ibm) & (Ibm>=Iam) )      {DXca=P*Dibc;};
}

else
{
if ((Iam>Ibm) & (Ibm>Icm) )                    {DXca=-P*Diab;};
if ((Iam>Ibm) & (Iam>Icm) & (Icm>=Ibm) )      {DXca=-P*Dica;};
if ((Ibm>Iam) & (Ibm>Icm) & (Icm>=Iam) )      {DXca=P*Dica;};
if ((Icm>Iam) & (Icm>Ibm) & (Ibm>=Iam) )      {DXca=P*Diab;};
};

//////////////////////////////////////Determinación valores de salida
Xab_1=Xab;
Xbc_1=Xbc;
Xca_1=Xca;

Xab=Xab+floor(DXab)*0.00000125;
Xbc=Xbc+floor(DXbc)*0.00000125;
Xca=Xca+floor(DXca)*0.00000125;

```

```

if ((abs(Diab)<=1.5) & (abs(Dibc)<=1.5) & (abs(Dica)<=1.5))
{
G=0.0175;
Ki=0;
ek=tc-tv;
Proporcional=G*ek;
Integral=Integral+Ki*ek;

Xab=Xab+floor(Proporcional+Integral)*0.00000125;
Xbc=Xbc+floor(Proporcional+Integral)*0.00000125;
Xca=Xca+floor(Proporcional+Integral)*0.00000125;
};

if (Xab<0) {AuxCab=Xab+0.00003875; AuxLab=1;}
else {AuxCab=Xab;AuxLab=0;};
if (Xbc<0) {AuxCbc=Xbc+0.00003875; AuxLbc=1;}
else {AuxCbc=Xbc;AuxLbc=0;};
if (Xca<0) {AuxCca=Xca+0.00003875; AuxLca=1;}
else {AuxCca=Xca;AuxLca=0;};

if (AuxCab> 0.00003875) AuxCab= 0.00003875;
if (AuxCbc> 0.00003875) AuxCbc= 0.00003875;
if (AuxCca> 0.00003875) AuxCca= 0.00003875;
if (AuxCab< 0) AuxCab= 0;
if (AuxCbc< 0) AuxCbc= 0;
if (AuxCca< 0) AuxCca= 0;

};
return;
}
////////////////////////////////////

void sistema()
{
while (!kbhit())
{
Va=Vff*sqrt(2)/sqrt(3)*sin(100*pi*ti/100000-pi/6);
Vb=Vff*sqrt(2)/sqrt(3)*sin(100*pi*ti/100000-2*pi/3-pi/6);
Vc=Vff*sqrt(2)/sqrt(3)*sin(100*pi*ti/100000+2*pi/3-pi/6);

Vab=Va-Vb;
Vbc=Vb-Vc;
Vca=Vc-Va;
}
}

```

```

control++;
if (control==2) control=0;

if ((ti-2000*floor(ti/2000))==0) Sist_Control();

if (((ti-2000*floor(ti/2000))==167)&(ti>=4000))
    Cbc=AuxCbc;

if (((ti-2000*floor(ti/2000))==500)&(ti>=4000))
    Kab=AuxLab;

if (((ti-2000*floor(ti/2000))==833)&(ti>=4000))
    Cca=AuxCca;

if (((ti-2000*floor(ti/2000))==1167)&(ti>=4000))
    Kbc=AuxLbc;

if (((ti-2000*floor(ti/2000))==1500)&(ti>=4000))
    Cab=AuxCab;

if (((ti-2000*floor(ti/2000))==1833)&(ti>=4000))
    Kca=AuxLca;

ICab=Vff*sqrt(2)*100*pi*Cab*sin(100*pi*ti/100000+pi/2);

ICbc=Vff*sqrt(2)*100*pi*Cbc*sin(100*pi*ti/100000 -
    2*pi/3+pi/2);

ICca=Vff*sqrt(2)*100*pi*Cca*sin(100*pi*ti/100000 +
    2*pi/3+pi/2);

ILab=Vff*sqrt(2)/(double)(100*pi*0.26)*sin(100*pi*ti/
    100000-pi/2);

ILbc=Vff*sqrt(2)/(double)(100*pi*0.26)*sin(100*pi*ti/
    100000-2*pi/3-pi/2);

ILca=Vff*sqrt(2)/(double)(100*pi*0.26)*sin(100*pi*ti/
    100000+2*pi/3-pi/2);

//Corrientes en la carga.
if(Llab!=0)
Iloadab=Vff*sqrt(2)/(double)(100*pi*Llab)*sin(100*pi*ti/
    100000-pi/2);
else Iloadab=0;

```

```

if (Llbc!=0)
Iloadbc=Vff*sqrt(2)/(double)(100*pi*Llbc)*sin(100*pi*ti/
    100000-2*pi/3-pi/2);
else Iloadbc=0;

if (Llca!=0)
Iloadca=Vff*sqrt(2)/(double)(100*pi*Llca)*sin(100*pi*ti/
    100000+2*pi/3-pi/2);
else Iloadca=0;

Iloadab=Vab/Rlab+Iloadab;
Iloadbc=Vbc/Rlbc+Iloadbc;
Iloadca=Vca/Rlca+Iloadca;

Iloadab=Iloadab+Vff*sqrt(2)*100*pi*Clab*sin(100*pi*ti/
    100000+pi/2);
Iloadbc=Iloadbc+Vff*sqrt(2)*100*pi*Clbc*sin(100*pi*ti/
    100000-2*pi/3+pi/2);
Iloadca=Iloadca+Vff*sqrt(2)*100*pi*Clca*sin(100*pi*ti/
    100000+2*pi/3+pi/2);

//Corrientes de línea.
Ia=ICab+Kab*ILab-ICca-Kca*ILca+Iloadab-Iloadca;
Ib=ICbc+Kbc*ILbc-ICab-Kab*ILab+Iloadbc-Iloadab;
Ic=ICca+Kca*ILca-ICbc-Kbc*ILbc+Iloadca-Iloadbc;

if (Ia>=0) { hita=1; factor_pota();}
else {hita=0;tda=0;};
if (Ib>=0) { hitb=1; factor_potb();}
else {hitb=0;tdb=0;};
if (Ic>=0) { hitc=1; factor_potc();}
else {hitc=0;tdc=0;};

if (tda==500) {Iam=Ia;};
if (tdb==500) {Ibm=Ib;};
if (tdc==500) {Icm=Ic;};

Diab=fabs(Iam-Ibm);
Dibc=fabs(Ibm-Icm);
Dica=fabs(Icm-Iam);

if (hita==1) tda++;
if (hitb==1) tdb++;
if (hitc==1) tdc++;

if (ti==40000) printf("OK\n");

```

```
fprintf(fin,"%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f
        %f %f %f\n",ti*0.00001,Va,Vb,Vc,Ia,Ib,Ic,
        Iloadab,Iloadbc,Iloadca,ICab+Kab*ILab,
        ICbc+Kbc*ILbc,ICca+Kca*ILca,fpa);
ti++;
};
fclose(fin);
}

void main()
{
//Se definen los punteros para abrir y anexar al archivo
fin=fopen("C:\\MATLAB\\BIN\\YMemoria\\balance.dat","a");
finw=fopen("C:\\MATLAB\\BIN\\YMemoria\\balance.dat","w");
fprintf(finw,"");
clrscr();
sistema();
return;
}
```


ANEXO B : PROGRAMA DE SIMULACIÓN PARA SISTEMA DE CONTROL DIFUSO (LENGUAJE C++).

```

#include<graphics.h>
#include<stdio.h>
#include<conio.h>
#include<math.h>
#include<dos.h>
#include<process.h>
#include<stdlib.h>
#include<ctype.h>
#include<time.h>

//Punteros para grabar en archivo
FILE *fin,*finw;

float Rlab=200,Rlbc=150,Rlca=200;
float Llab=0.5,Llbc=0,Llca=0.5;
float Clab=0.0000,Clbc=0.000016,Clca=0.0000;
double ti=0;
float pi=3.1415954;
float Vff=380;
float Va,Vb,Vc;
float Vab,Vbc,Vca,Ia,Ib,Ic;
float Cab=0,Cbc=0,Cca=0;
float ICab=0,ICbc=0,ICca=0;
float ILab=0,ILbc=0,ILca=0;
float Iloadab,Iloadbc,Iloadca;
int tda=0,tdb=0,tdc=0,Kab=0,Kbc=0,Kca=0;
float Xab=0,Xbc=0,Xca=0,Xab_1=0,Xbc_1=0,Xca_1=0;
float Iam=0,Ibm=0,Icm=0,Eiab=0,Eibc=0,Eica=0;
float fpa=0,fpb=0,fpb=0;
int hita=0,hitb=0,hitc=0,control=0;
float
AuxCbc=0,AuxLab=0,AuxCca=0,AuxLbc=0,AuxCab=0,AuxLca=0;
float tc=0,tv=167,ek=0,dek=0,Proporcional=0;
////////////////////////////////////

void factor_pota()
{
if (tda==0)
{
if (Va<0) fpa=-1;
if (Va==0) fpa=0;
if (Va>0) fpa=1;
}
}

```

```

tc=ti-2000*floor(ti/2000);
if (tc>=1000) tc=tc-2000;
};
return;
};

void factor_potb()
{
if (tdb==0)
{
if (Vb<0) fpb=-1;
if (Vb==0) fpb=0;
if (Vb>0) fpb=1;
};
return;
};

void factor_potc()
{
if (tdc==0)
{
if (Vc<0) fpc=-1;
if (Vc==0) fpc=0;
if (Vc>0) fpc=1;
};
return;
};
/////////////////////////////////////////////////////////////////
void Sist_Control()
{
float DXab=0,DXbc=0,DXca=0,G,GP,GPch;
float Pab,Pbc,Pca,Pmax=3,Pmed=2.25,Pmin=1.75;
float uha,uhb,uhc,uma,umb,umc,alpha;

if (control==1)
{
/////////////////////////////////////////////////////////////////Control Fuzzy Pab,Pbc,Pca
uma=(-Eiab*0.666+2)*Pmed;
uha=(Eiab*0.666-1)*Pmax;

if (Eiab<0.5) Pab=Pmin;
if ((Eiab>=0.5)&(Eiab<1.5))
Pab=(-Eiab+1.5)*Pmin+(Eiab-0.5)*Pmed;
if ((Eiab>=1.5)&(Eiab<3)) Pab=uha+uma;
if (Eiab>=3) Pab=Pmax;

umb=(-0.666*Eibc+2)*Pmed;

```

```

uhb=(0.666*Eibc-1)*Pmax;

if (Eibc<0.5)                Pbc=Pmin;
if ((Eibc>=0.5)&(Eibc<1.5))
    Pbc=(-Eibc+1.5)*Pmin+(Eibc-0.5)*Pmed;
if ((Eibc>=1.5)&(Eibc<3))    Pbc=uhb+umb;
if (Eibc>=3)                Pbc=Pmax;

umc=(-0.666*Eica+2)*Pmed;
uhc=(0.666*Eica-1)*Pmax;

if (Eica<0.5)                Pca=Pmin;
if ((Eica>=0.5)&(Eica<1.5))
    Pca=(-Eica+1.5)*Pmin+(Eica-0.5)*Pmed;
if ((Eica>=1.5)&(Eica<3))    Pca=uhc+umc;
if (Eica>=3)                Pca=Pmax;

////////////////////////////////////Cálculo de DXab
if (fpa==1)
{
if ((Iam>Ibm)&(Ibm>Icm))      {DXab=Pab*Eiab;};
if ((Iam>Ibm)&(Iam>Icm)&(Icm>=Ibm)) {DXab=Pca*Eica;};
if ((Ibm>Iam)&(Ibm>Icm)&(Icm>=Iam)) {DXab=-Pca*Eica;};
if ((Icm>Iam)&(Icm>Ibm)&(Ibm>=Iam)) {DXab=-Pab*Eiab;};
}

else
{
if ((Iam>Ibm)&(Iam>Icm)&(Icm>=Ibm)) {DXab=Pbc*Eibc;};
if ((Ibm>Iam)&(Ibm>Icm)&(Iam>=Icm)) {DXab=-Pab*Eiab;};
if ((Ibm>Iam)&(Ibm>Icm)&(Icm>=Iam)) {DXab=-Pbc*Eibc;};
if ((Icm>Iam)&(Icm>Ibm)&(Iam>=Ibm)) {DXab=Pab*Eiab;};
};

////////////////////////////////////Cálculo de DXbc
if (fpb==1)
{
if ((Iam>Ibm)&(Iam>Icm)&(Icm>=Ibm)) {DXbc=-Pbc*Eibc;};
if ((Ibm>Iam)&(Ibm>Icm)&(Iam>=Icm)) {DXbc=Pab*Eiab;};
if ((Ibm>Iam)&(Ibm>Icm)&(Icm>=Iam)) {DXbc=Pbc*Eibc;};
if ((Icm>Iam)&(Icm>Ibm)&(Iam>=Ibm)) {DXbc=-Pab*Eiab;};
}

else
{
if ((Iam>Ibm)&(Ibm>Icm))      {DXbc=Pbc*Eibc;};

```

```

if ((Ibm>Iam) & (Ibm>Icm) & (Iam>=Icm) ) {DXbc=Pca*Eica;};
if ((Icm>Iam) & (Icm>Ibm) & (Iam>=Ibm) ) {DXbc=-Pca*Eica;};
if ((Icm>Iam) & (Icm>Ibm) & (Ibm>=Iam) ) {DXbc=-Pbc*Eibc;};
};

//////////////////////////////////////Cálculo de DXca
if (fpc==1)
{
if ((Iam>Ibm) & (Ibm>Icm) ) {DXca=-Pbc*Eibc;};
if ((Ibm>Iam) & (Ibm>Icm) & (Iam>=Icm) ) {DXca=-Pca*Eica;};
if ((Icm>Iam) & (Icm>Ibm) & (Iam>=Ibm) ) {DXca=Pca*Eica;};
if ((Icm>Iam) & (Icm>Ibm) & (Ibm>=Iam) ) {DXca=Pbc*Eibc;};
}

else
{
if ((Iam>Ibm) & (Ibm>Icm) ) {DXca=-Pab*Eiab;};
if ((Iam>Ibm) & (Iam>Icm) & (Icm>=Ibm) ) {DXca=-Pca*Eica;};
if ((Ibm>Iam) & (Ibm>Icm) & (Icm>=Iam) ) {DXca=Pca*Eica;};
if ((Icm>Iam) & (Icm>Ibm) & (Ibm>=Iam) ) {DXca=Pab*Eiab;};
};

//////////////////////////////////////Determinación valores de salida
Xab_1=Xab;
Xbc_1=Xbc;
Xca_1=Xca;

Xab=Xab+floor(DXab)*0.00000125;
Xbc=Xbc+floor(DXbc)*0.00000125;
Xca=Xca+floor(DXca)*0.00000125;

if ((abs(Eiab)<=3) & (abs(Eibc)<=3) & (abs(Eica)<=3) )
{
G=0.0175;
Proporcional=G*ek;

Xab=Xab+floor(Proporcional)*0.00000125;
Xbc=Xbc+floor(Proporcional)*0.00000125;
Xca=Xca+floor(Proporcional)*0.00000125;
};

if (Xab<0) {AuxCab=Xab+0.00003875; AuxLab=1;}
else {AuxCab=Xab;AuxLab=0;};
if (Xbc<0) {AuxCbc=Xbc+0.00003875; AuxLbc=1;}
else {AuxCbc=Xbc;AuxLbc=0;};
if (Xca<0) {AuxCca=Xca+0.00003875; AuxLca=1;}

```

```

else {AuxCca=Xca;AuxLca=0;};

if (AuxCab> 0.00003875) AuxCab= 0.00003875;
if (AuxCbc> 0.00003875) AuxCbc= 0.00003875;
if (AuxCca> 0.00003875) AuxCca= 0.00003875;
if (AuxCab< 0) AuxCab= 0;
if (AuxCbc< 0) AuxCbc= 0;
if (AuxCca< 0) AuxCca= 0;

};

return;
}
////////////////////////////////////

void sistema()
{
while (!kbhit())
{
Va=Vff*sqrt(2)/sqrt(3)*sin(100*pi*ti/100000-pi/6);
Vb=Vff*sqrt(2)/sqrt(3)*sin(100*pi*ti/100000-2*pi/3-pi/6);
Vc=Vff*sqrt(2)/sqrt(3)*sin(100*pi*ti/100000+2*pi/3-pi/6);
Vab=Va-Vb;
Vbc=Vb-Vc;
Vca=Vc-Va;

control++;
if (control==2) control=0;

if ((ti-2000*floor(ti/2000))==0) Sist_Control();

if ((ti-2000*floor(ti/2000))==167)&(ti>=4000)
    Cbc=AuxCbc;

if ((ti-2000*floor(ti/2000))==500)&(ti>=4000)
    Kab=AuxLab;

if ((ti-2000*floor(ti/2000))==833)&(ti>=4000)
    Cca=AuxCca;

if ((ti-2000*floor(ti/2000))==1167)&(ti>=4000)
    Kbc=AuxLbc;
if ((ti-2000*floor(ti/2000))==1500)&(ti>=4000)
    Cab=AuxCab;

if ((ti-2000*floor(ti/2000))==1833)&(ti>=4000)
    Kca=AuxLca;

```

```

ICab=Vff*sqrt(2)*100*pi*Cab*sin(100*pi*ti/100000+pi/2);
ICbc=Vff*sqrt(2)*100*pi*Cbc*sin(100*pi*ti/100000 -
    2*pi/3+pi/2);
ICca=Vff*sqrt(2)*100*pi*Cca*sin(100*pi*ti/100000 +
    2*pi/3+pi/2);
ILab=Vff*sqrt(2)/(double)(100*pi*0.26)*sin(100*pi*ti/
    100000-pi/2);
ILbc=Vff*sqrt(2)/(double)(100*pi*0.26)*sin(100*pi*ti/
    100000-2*pi/3-pi/2);
ILca=Vff*sqrt(2)/(double)(100*pi*0.26)*sin(100*pi*ti/
    100000+2*pi/3-pi/2);

//Corrientes en la carga.
if (Llab!=0)
Iloadab=Vff*sqrt(2)/(double)(100*pi*Llab)*sin(100*pi*ti/
    100000-pi/2);
else Iloadab=0;

if (Llbc!=0)
Iloadbc=Vff*sqrt(2)/(double)(100*pi*Llbc)*sin(100*pi*ti/
    100000-2*pi/3-pi/2);
else Iloadbc=0;

if (Llca!=0)
Iloadca=Vff*sqrt(2)/(double)(100*pi*Llca)*sin(100*pi*ti/
    100000+2*pi/3-pi/2);
else Iloadca=0;

Iloadab=Vab/Rlab+Iloadab;
Iloadbc=Vbc/Rlbc+Iloadbc;
Iloadca=Vca/Rlca+Iloadca;

Iloadab=Iloadab+Vff*sqrt(2)*100*pi*Clab*sin(100*pi*ti/
    100000+pi/2);
Iloadbc=Iloadbc+Vff*sqrt(2)*100*pi*Clbc*sin(100*pi*ti/
    100000-2*pi/3+pi/2);
Iloadca=Iloadca+Vff*sqrt(2)*100*pi*Clca*sin(100*pi*ti/
    100000+2*pi/3+pi/2);

//Corrientes de línea.
Ia=ICab+Kab*ILab-ICca-Kca*ILca+Iloadab-Iloadca;
Ib=ICbc+Kbc*ILbc-ICab-Kab*ILab+Iloadbc-Iloadab;
Ic=ICca+Kca*ILca-ICbc-Kbc*ILbc+Iloadca-Iloadbc;

if (Ia>=0) { hita=1; factor_pota();}

```

```

    else {hita=0;tda=0;};
if (Ib>=0) { hitb=1; factor_potb();}
    else {hitb=0;tdb=0;};
if (Ic>=0) { hitc=1; factor_potc();}
    else {hitc=0;tdc=0;};

if (tda==500) {Iam=Ia;};
if (tdb==500) {Ibm=Ib;};
if (tdc==500) {Icm=Ic;};

Eiab=fabs(Iam-Ibm);
Eibc=fabs(Ibm-Icm);
Eica=fabs(Icm-Iam);

if (hita==1) tda++;
if (hitb==1) tdb++;
if (hitc==1) tdc++;

if (ti==30000) printf("OK\n");
fprintf(fin,"%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f
        %f %f %f\n",ti*0.00001,Va,Vb,Vc,Ia,Ib,Ic,
        Iloadab,Iloadbc,Iloadca,ICab+Kab*ILab,
        ICbc+Kbc*ILbc,ICca+Kca*ILca,fpa);
ti++;
};
fclose(fin);
}

void main()
{
//Se definen los punteros para abrir y anexar al archivo
fin=fopen("C:\\MATLAB\\BIN\\YMemoria\\balance.dat","a");
finw=fopen("C:\\MATLAB\\BIN\\YMemoria\\balance.dat","w");
fprintf(finw,"");
clrscr();
sistema();
return;
}

```

ANEXO C : PROGRAMA DE SIMULACIÓN PARA SISTEMA DE CONTROL DIRECTO (LENGUAJE C++).

```

#include<graphics.h>
#include<stdio.h>
#include<conio.h>
#include<math.h>
#include<dos.h>
#include<process.h>
#include<stdlib.h>
#include<ctype.h>
#include<time.h>

//Punteros para grabar en archivo
FILE *fin,*finw;

float Rlab=200,Rlbc=150,Rlca=200;
float Llab=0.5,Llbc=0,Llca=0.5;
float Clab=0.0000,Clbc=0.000016,Clca=0.0000;
double ti=0;
float pi=3.1415954;
float Vm,Vff=380;
float Va,Vb,Vc;
float Vab,Vbc,Vca,Ia,Ib,Ic;
float Cab=0,Cbc=0,Cca=0;
float ICab=0,ICbc=0,ICca=0;
float ILab=0,ILbc=0,ILca=0;
float Iloadab,Iloadbc,Iloadca;
int Kab=0,Kbc=0,Kca=0;
float Xab=0,Xbc=0,Xca=0;
float Ipa=0,Ipb=0,Ipc=0;
int control=0;
float
AuxCbc=0,AuxLab=0,AuxCca=0,AuxLbc=0,AuxCab=0,AuxLca=0;
////////////////////////////////////

void Sist_Control()
{
if (control==1)
{
Xab=floor((-Ipa-Ipb+Ipc)/sqrt(3)/Vm/100/pi/0.00000125)
*0.00000125;
Xbc=floor((-Ipb-Ipc+Ipa)/sqrt(3)/Vm/100/pi/0.00000125)
*0.00000125;
Xca=floor((-Ipc-Ipa+Ipb)/sqrt(3)/Vm/100/pi/0.00000125)

```



```

        *0.00000125;
};

if (Xab<0) {AuxCab=Xab+0.00003875; AuxLab=1;}
else {AuxCab=Xab;AuxLab=0;};
if (Xbc<0) {AuxCbc=Xbc+0.00003875; AuxLbc=1;}
else {AuxCbc=Xbc;AuxLbc=0;};
if (Xca<0) {AuxCca=Xca+0.00003875; AuxLca=1;}
else {AuxCca=Xca;AuxLca=0;};

if (AuxCab> 0.00003875) AuxCab= 0.00003875;
if (AuxCbc> 0.00003875) AuxCbc= 0.00003875;
if (AuxCca> 0.00003875) AuxCca= 0.00003875;
if (AuxCab< 0) AuxCab= 0;
if (AuxCbc< 0) AuxCbc= 0;
if (AuxCca< 0) AuxCca= 0;

return;
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////

void sistema()
{
while (!kbhit())
{
Va=Vff*sqrt(2)/sqrt(3)*sin(100*pi*ti/100000-pi/6);
Vb=Vff*sqrt(2)/sqrt(3)*sin(100*pi*ti/100000-2*pi/3-pi/6);
Vc=Vff*sqrt(2)/sqrt(3)*sin(100*pi*ti/100000+2*pi/3-pi/6);
Vab=Va-Vb;
Vbc=Vb-Vc;
Vca=Vc-Va;

control++;
if (control==2) control=0;

if ((ti-2000*floor(ti/2000))==0) Sist_Control();

if ((ti-2000*floor(ti/2000))==167)&(ti>=4000)
    Cbc=AuxCbc;

if ((ti-2000*floor(ti/2000))==500)&(ti>=4000)
    Kab=AuxLab;

if ((ti-2000*floor(ti/2000))==833)&(ti>=4000)
    Cca=AuxCca;
if ((ti-2000*floor(ti/2000))==1167)&(ti>=4000)
    Kbc=AuxLbc;

```

```

if ((ti-2000*floor(ti/2000))==1500)&(ti>=4000)
    Cab=AuxCab;

if ((ti-2000*floor(ti/2000))==1833)&(ti>=4000)
    Kca=AuxLca;

ICab=Vff*sqrt(2)*100*pi*Cab*sin(100*pi*ti/100000+pi/2);
ICbc=Vff*sqrt(2)*100*pi*Cbc*sin(100*pi*ti/100000 -
    2*pi/3+pi/2);
ICca=Vff*sqrt(2)*100*pi*Cca*sin(100*pi*ti/100000 +
    2*pi/3+pi/2);
ILab=Vff*sqrt(2)/(double)(100*pi*0.26)*sin(100*pi*ti/
    100000-pi/2);
ILbc=Vff*sqrt(2)/(double)(100*pi*0.26)*sin(100*pi*ti/
    100000-2*pi/3-pi/2);
ILca=Vff*sqrt(2)/(double)(100*pi*0.26)*sin(100*pi*ti/
    100000+2*pi/3-pi/2);

//Corrientes en la carga.
if (Llab!=0)
    Iloadab=Vff*sqrt(2)/(double)(100*pi*Llab)*sin(100*pi*ti/
        100000-pi/2);
else Iloadab=0;

if (Llbc!=0)
    Iloadbc=Vff*sqrt(2)/(double)(100*pi*Llbc)*sin(100*pi*ti/
        100000-2*pi/3-pi/2);
else Iloadbc=0;

if (Llca!=0)
    Iloadca=Vff*sqrt(2)/(double)(100*pi*Llca)*sin(100*pi*ti/
        100000+2*pi/3-pi/2);
else Iloadca=0;

Iloadab=Vab/Rlab+Iloadab;
Iloadbc=Vbc/Rlbc+Iloadbc;
Iloadca=Vca/Rlca+Iloadca;

Iloadab=Iloadab+Vff*sqrt(2)*100*pi*Clab*sin(100*pi*ti/
    100000+pi/2);
Iloadbc=Iloadbc+Vff*sqrt(2)*100*pi*Clbc*sin(100*pi*ti/
    100000-2*pi/3+pi/2);

Iloadca=Iloadca+Vff*sqrt(2)*100*pi*Clca*sin(100*pi*ti/
    100000+2*pi/3+pi/2);

```

```

//Corrientes de línea.
Ia=ICab+Kab*ILab-ICca-Kca*ILca+Iloadab-Iloadca;
Ib=ICbc+Kbc*ILbc-ICab-Kab*ILab+Iloadbc-Iloadab;
Ic=ICca+Kca*ILca-ICbc-Kbc*ILbc+Iloadca-Iloadbc;

if (ti==167)    Ipa=Ia;
if (ti==500)    Vm=Va-Vb;
if (ti==833)    Ipb=Ib;
if (ti==1500)   Ipc=Ic;

if (ti==30000) printf("OK\n");
fprintf(fin,"%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f\n",
        ti*0.00001, Va, Vb, Vc, Ia, Ib, Ic,
        Iloadab, Iloadbc, Iloadca, ICab+Kab*ILab,
        ICbc+Kbc*ILbc, ICca+Kca*ILca, fpa);
ti++;
};
fclose(fin);
}

void main()
{
//Se definen los punteros para abrir y anexar al archivo
fin=fopen("C:\\MATLAB\\BIN\\YMemoria\\balance.dat","a");
finw=fopen("C:\\MATLAB\\BIN\\YMemoria\\balance.dat","w");
fprintf(finw,"");
clrscr();
sistema();
return;
}

```

**ANEXO D : PROGRAMA N°1 DE GRAFICACIÓN EN
AMBIENTE MATLAB.**

```

load balance.dat;
if (length(balance)>=30000) L=30000;
    balance=balance(1:L,:); end;
if (length(balance)<30000) L=length(balance); end;
figure;

subplot(2,1,1);
plot(balance(1:L,1),balance(1:L,5),balance(1:L,1),balance(1:L,6),balance(1:L,1),balance(1:L,7));
axis([0 0.3 -12 12]);
xlabel('Tiempo [seg]');
title('Corrientes de Línea [1 A/div]');

subplot(2,1,2);
plot(balance(1:L,1),balance(1:L,2)/100,balance(1:L,1),balance(1:L,5));
axis([0 0.3 -12 12]);
xlabel('Tiempo [seg]');
title('Va [100 V/div] v/s Ia [1 A/div]');

```

**ANEXO E : PROGRAMA N°2 DE GRAFICACIÓN EN
AMBIENTE MATLAB.**

```

load balance.dat;
if (length(balance)>=30000) L=30000;
    balance=balance(1:L,:); end;
if (length(balance)<30000) L=length(balance); end;
figure;

subplot(2,1,1);
plot(balance(1:L,1), (balance(1:L,2)-
balance(1:L,3))/100, balance(1:L,1), balance(1:L,11));
axis([0 0.3 -12 12]);
xlabel('Tiempo [seg]');
title('Vab [100 V/div] v/s ICab+ILab [1 A/div]');

subplot(2,1,2);
plot(balance(1:L,1), (balance(1:L,3)-
balance(1:L,4))/100, balance(1:L,1), balance(1:L,12));
axis([0 0.3 -12 12]);
xlabel('Tiempo [seg]');
title('Vbc [100 V/div] v/s ICbc+ILbc [1 A/div]');

```