

Estrategias de control y análisis de un Acondicionador Unificado de la Calidad de la Energía

Comité de Trabajos de Grado E³T

Juan Camilo Rincón Salazar

Jhon Edicson Joya Calderón



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y DE TELECOMUNICACIONES**



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD de Ingenierías Físico Mecánicas

CARRERA Ingeniería Eléctrica

BUCARAMANGA

2013

Estrategias de control y análisis de un Acondicionador Unificado de la Calidad de la Energía

Juan Camilo Rincón Salazar
Jhon Edicson Joya Calderón

Trabajo de investigación presentado como requerimiento para optar al título de:
Ingeniero Electricista

Director:

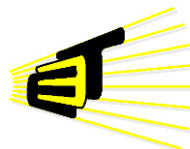
Johann Farith Petit Suárez

Co-Directora:

María Alejandra Mantilla Villalobos



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y DE TELECOMUNICACIONES**



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD de Ingenierías Físico Mecánicas

CARRERA Ingeniería Eléctrica

BUCARAMANGA

2013

AGRADECIMIENTOS

A Dios por estar presente en cada momento de mi vida, a mi padre, a mi madre y mis hermanos por el constante apoyo y su inmensa paciencia durante toda esta etapa de estudio, sin ellos no sería posible este logro. Agradezco a los compañeros de carrera que estuvieron ahí apoyándome en cada una de las actividades académicas. A mis amigos Cristhian y Vero por su ayuda incondicional. De igual manera a los docentes que aportaron su valioso conocimiento para mi formación académica. Por último agradecer de gran manera al profesor Johann por la confianza puesta en nosotros para la ejecución de este proyecto con sus aportes bibliográficos y la revisión de este documento, también agradecer a la profesora María Alejandra por su constante seguimiento y apoyo en la ejecución de este proyecto, por su confianza en nuestra capacidad para realizar este proyecto y sus aportes en investigación ayudaron enormemente la realización de este proyecto.

Jhon Edicson Joya Calderón

AGRADECIMIENTOS

A Dios por acompañarme en los buenos y malos momentos. A mi padre y a mi madre por el esfuerzo realizado para poder terminar mi carrera. A todos mis amigos que estuvieron a lo largo de la carrera con los que aprendí muchas cosas. A cada uno de los profesores que tuve en la carrera quienes dieron lo mejor de ellos para hacer de mí un mejor profesional, en especial a los profesores Johann Petith y María Alejandra Mantilla por su constante apoyo y dedicación para culminar con éxito nuestro proyecto.

Juan Camilo Rincón Salazar

INDICE DE CONTENIDO

Introducción	13
1. Acondicionador Unificado de la calidad de la energía UPQC	14
2. Principio de funcionamiento del UPQC	15
2.1. Principio de operación del UPQC	15
2.2. Modo control de corriente para el inversor paralelo	16
2.3. Modo control de tensión para el inversor serie	16
3. Control del Inversor Serie de un UPQC	16
3.1. Filtro de Kalman	17
3.2. Transformada Park o dq0	19
3.3. Control por histéresis de tensión	23
4. Control del inversor paralelo	24
4.1. Teoría de Fryze	24
4.2. Teoría de Fryze-Buchholz	24
4.3. Control por histéresis de corriente	25
5. Control del lado de continua	25
6. Tipo de carga y perturbaciones a analizar	26
6.1. Perturbaciones	27
7. Simulación y Análisis de resultados de un UPQC	28
7.1. Casos de estudio	28
7.2. Parámetros	29
7.3. Resultados	30
8. Conclusiones y recomendaciones	38
8.1. Conclusiones	38
8.2. Recomendaciones para trabajos futuros	38
Referencias	39
9. ANEXOS	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Acondicionador Unificado de la calidad de la energía UPQC	14
Figura 2. Topología básica del UPQC	14
Figura 3. Tensión en PCC y corriente vista desde la fuente ideales	14
Figura 4. Puente inversor serie	14
Figura 5. Puente inversor paralelo	15
Figura 6. Modo control de corriente	16
Figura 7. Modo control de tensión	16
Figura 8. Diagrama de estimación del filtro Kalman	17
Figura 9. Sistema de coordenadas α - β -0	19
Figura 10. Diagrama de calculo de la referencia	20
Figura 11. Identificación y compensación de huecos o elevaciones de tensión	21
Figura 12. Hueco de tensión	21
Figura 13. Elevación de tensión	21
Figura 14. Diagrama topológico del control por histéresis de tensión	23
Figura 15. Ejemplo de control con banda de histéresis [13]	23
Figura 16. Puente inversor serie	23
Figura 17. Esquema de control con banda de histéresis.....	25
Figura 18. Ejemplo de control con banda de histéresis [2]	25
Figura 19. Disposición del lado de continua de un UPQC	26
Figura 20. Distorsión en la carga	26
Figura 21. Ejemplo una perturbación de corriente	26
Figura 22. Hueco de tensión.....	27
Figura 23. Desbalances en un sistema trifásico	27
Figura 24. Distorsión armónica	27
Figura 25. Ejemplo una perturbación de tensión.....	28
Figura 26. Limitador de corriente.....	30
Figura 27. Tensión en el alimentador	30
Figura 28. Tensión corregida por el inversor serie	31
Figura 29. Corriente en la carga	31
Figura 30. Corriente corregida por el UPQC en las tres fases	31
Figura 31. Ángulo de fase de la tensión en el PCC	31
Figura 32. Ángulo de fase de la corriente del alimentador	31
Figura 33. Tensiones en el alimentador	31
Figura 34. Seguimiento de histéresis de tensión	32
Figura 35. Tensiones corregidas por el inversor serie.....	32
Figura 36. Valor pico de la señal medida por el filtro Kalman	32
Figura 37. Corriente distorsionada por el rectificador puente completo	33
Figura 38. Corrientes balanceadas por el inversor paralelo.....	33
Figura 39. Seguimiento de histéresis de corriente	33
Figura 40. Carga del condensador del lado de continua.....	34
Figura 41. Corriente de referencia para cargar el lado de continua	34
Figura 42. Corrientes corregidas	34
Figura 43. Huecos de tensión	34
Figura 44. Corrección del hueco de tensión	35
Figura 45. Carga del condensador	35
Figura 46. Perturbaciones de corriente en la carga	35
Figura 47. Corrientes corregidas por el UPQC	35
Figura 48. Corrección del factor de potencia	35
Figura 49. Elevación de tensión	37
Figura 50. Tensiones y corrientes corregidas por el UPQC	38

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros caso I	29
Tabla 2. Parámetros caso II	29
Tabla 3. Parámetros caso III	29
Tabla 4. Parámetros caso IV	29
Tabla 5. Parámetros caso V	30
Tabla 6. Parámetros caso VI	30
Tabla 7. Tensión en el alimentador distorsionada	32
Tabla 8. Tensión en el PCC	32
Tabla 9. Corriente en la carga distorsionada	33
Tabla 10. Corriente corregida en el alimentador	33
Tabla 11. Potencias consumida por la carga	33
Tabla 12. Potencias de la carga vista desde el alimentador	34
Tabla 13. Tensión en terminales del alimentador	36
Tabla 14. Tensión en el PCC	36
Tabla 15. Corriente en la carga	36
Tabla 16. Corriente que circula por el alimentador	36
Tabla 17. Potencias del alimentador sin el UPQC	36
Tabla 18. Potencia consumida por la carga	37
Tabla 19. Potencias suministrada por el alimentador	37
Tabla 20. Potencia de la carga vista por el alimentador	37

RESUMEN

TÍTULO:

ESTRATEGIAS DE CONTROL Y ANÁLISIS DE UN ACONDICIONADOR UNIFICADO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA¹

AUTORES: JHON EDICSON JOYA CALDERÓN
JUAN CAMILO RINCÓN SALAZAR²

PALABRAS CLAVES: Calidad de la energía, UPQC, Custom Power Devices, filtro Kalman, transformada DQ0, teoría Fryze-Buchholz, control por histéresis, control PI, inversor tipo fuente de tensión, inversor tipo fuente de corriente.

DESCRIPCIÓN:

La creciente demanda de potencia eléctrica por parte de los consumidores regulados y no regulados, junto con el desarrollo de dispositivos electrónicos que buscan mejorar la calidad de vida, provocan un aumento en el sistema de distribución de perturbaciones significativas, causando así incertidumbre en la calidad del servicio.

Debido a la necesidad de corregir éstas perturbaciones se han desarrollado los *Custom Power Devices* (CPD), dentro de éstos se destaca el Acondicionador unificado de la calidad de la energía (UPQC, *Unified Power Quality Conditioner*) que por medio de la inyección de tensión en serie al alimentador y de corriente en paralelo a la carga, permite compensar perturbaciones en tensión y corriente que afectan la calidad de la energía.

Éste documento realiza una revisión y análisis de un UPQC como dispositivo para compensar algunas de las perturbaciones presentes en las señales de tensión y de corriente en un sistema de distribución, entre éstas perturbaciones se encuentran la distorsión armónica y desbalances tanto en la señal de tensión como de corriente, huecos/elevaciones de tensión y bajo factor de potencia en la red. Se analizó la topología del UPQC paralela a la derecha (inversor serie, en serie al alimentador e inversor paralelo, en paralelo a la carga), el dispositivo de almacenamiento de energía del lado de continua. Se evaluaron diversas estrategias de control como el filtro Kalman, la transformada DQ0, la Teoría de Fryze-Buchholz, control PI y control por histéresis de tensión y de corriente. Con el objetivo de analizar la respuesta del UPQC frente a algunas perturbaciones, se realizaron simulaciones en el software ATP-DRAW obteniendo resultados para el análisis del inversor serie, inversor paralelo y el conjunto serie-paralelo.

¹ Proyecto de grado

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director PhD. Johann Farith Petit Suárez. Codirectora Ing. María Alejandra Mantilla Villalobos

SUMMARY

TITLE:

CONTROL ESTRATEGIES AND ANALYSIS OF AN UNIFIED POWER QUALITY CONDITIONER³

AUTHORS: JHON EDICSON JOYA CALDERÓN
JUAN CAMILO RINCÓN SALAZAR⁴

KEYWORDS: Power Quality, UPQC, Custom Power Devices, Kalman Filter, DQ0 transformation, Fryze-Buchholz Theory, hysteresis control, PI control, voltage source inverter, current source inverter.

DESCRIPTION:

The crescent demand of electrical power from the regulated and unregulated consumers, also develop of electronic devices for the improved quality of life, causes an increment of significant perturbations in the distribution system, causing uncertainty in the quality of the service.

Due the need of correct these perturbations have been developed the Custom Power Devices (CPD), inside this devices highlights the Unified Power Quality Conditioner (UPQC) that via of the injection of voltage in series to the source and the parallel current to the load, compensates the perturbations in voltage and current that affects the power quality.

The document do a revision and analysis of an UPQC how device for the compensation of some perturbations in the voltage and current signals in the distribution systems, inside these perturbations there are armonic distorsion and unbalances in the voltage signal such the current signal, voltage sags/swell and low power factor in the system. The right shunt topology was analyzed (serie inverter, in series with the source and the parallel inverter, parallel to the load), the storage DC device. The control strategies utilized were the Kalman filter, the DQ0 transformation, the Fryze-Buchholz Theory, the PI control and de hysteresis control in voltage and currente. With the purpose of analyzing the UPQC's response to some perturbations, simulations in ATP-DRAW were made and were obtained results to the analysis of serie inverter, parallel inverter and the series-parallel set.

³ Degree Project

⁴ Physucs Mechanical Engineering Faculty. Electrial, Electronic and Telecommunications Engineering. Advisor PhD. Johann Farith Petit Suárez. Subdirector Ing. María Alejandra Mantilla Villalobos

Introducción

El término calidad de suministro eléctrico se refiere a las características de la electricidad en un punto dado de una red eléctrica, evaluadas con relación a un conjunto de parámetros técnicos de referencia [1]. Bajo este esquema un consumidor recibe una calidad de suministro eléctrico que puede contener una combinación de especificaciones como magnitud y duración de huecos y elevaciones de tensión dentro de límites específicos, distorsión armónica en corriente y tensión, desbalances en el sistema de suministro, fluctuación de tensión (*Flicker*) en la fuente y frecuencia de la fuente de suministro de tensión fuera de los límites específicos de operación, entre otras. Las mencionadas perturbaciones que afectan la calidad de la energía se deben en parte a las cargas de los usuarios del servicio que a nivel residencial, comercial e industrial conectan diversos dispositivos electrónicos (que en resumen son en su mayoría cargas no lineales significativas y desbalanceadas), y también a la conexión y desconexión de cargas de alto impacto a la red (cargas con consumo discontinuo de energía que causan transitorios de larga y corta duración) [2]. El actual incremento en el uso de equipos electrónicos y maquinaria industrial en ocasiones conlleva a perturbaciones que afectan la calidad de la energía eléctrica ocasionando pérdidas técnicas y económicas tanto para el distribuidor del servicio eléctrico como para los usuarios del sistema [3], [4], [5].

En el mercado se han desarrollado dispositivos para corregir una o más perturbaciones que se les llama *Custom Power Devices* (CPD) y hace referencia al uso de controladores electrónicos de potencia para sistemas de distribución que mejoren la calidad y la confiabilidad de la potencia que se suministra a los usuarios. Ellos operan empleando estrategias de control para medir parámetros de tensión y de corriente del sistema, y corregir las perturbaciones presentes en estas señales [6]. Con el fin de dar solución a una o más de estas perturbaciones, se usan algunos dispositivos CPD, los cuales están compuestos por convertidores conectados en serie, paralelo o una combinación de ambos. Los más referidos son el Restaurador dinámico de tensión DVR (*Dynamic Voltage Restorer*), Compensador estático para sistemas de distribución DSTATCOM (*Distribution Static Compensator*) y el Acondicio-

nador unificado de la calidad de la energía UPQC (*Unified Power Quality Conditioner*). La función de los dispositivos mencionados anteriormente depende en gran medida de la configuración de su módulo inversor y la conexión a la red. El UPQC es la combinación de un compensador en serie, así como el DVR, y otro en paralelo, así como el DSTATCOM, usado para corregir tanto perturbaciones que afectan la calidad de la señal de tensión para el usuario como la compensación de potencia del usuario hacia el proveedor del servicio eléctrico en el sistema de distribución. La principal ventaja del UPQC frente al DVR o DSTATCOM es que tanto el inversor serie como el paralelo comparten el mismo dispositivo que almacena energía del lado de corriente continua y ofrece mayores opciones de compensación [6].

La función del inversor serie es corregir las perturbaciones que afectan la señal de tensión en el Punto de Conexión Común (PCC) para que la señal de tensión proporcionada a la carga sea idealmente sinusoidal a la frecuencia fundamental, balanceada de secuencia positiva, con valor RMS entre los límites permitidos. La función del inversor en paralelo es compensar la corriente de la carga mediante la inyección de una corriente controlada logrando que la señal de corriente corregida sea sinusoidal y balanceada y además esté en fase con la señal de tensión corregida por el inversor serie, también cargar el dispositivo de almacenamiento de energía del lado de continua y compensar la corriente de la carga corrigiendo las perturbaciones de la señal de corriente que están asociadas a la naturaleza de la carga, ésto se logra mediante la inyección de una corriente controlada para que la señal de corriente corregida sea sinusoidal a la frecuencia fundamental, balanceada y además en fase con la señal de tensión corregida por el inversor serie [7].

En este sentido, el objetivo de este proyecto es analizar el funcionamiento del UPQC y de diferentes estrategias de control, con el fin de mejorar la calidad de la energía. El trabajo se llevó a cabo por medio de etapas que comprenden el análisis del inversor serie, del inversor paralelo y del dispositivo de almacenamiento de energía en continua. Se exponen las estrategias de control de un UPQC y los diversos dispositivos que lo componen. Se hará una descripción de los tipos de carga que se simuló para comprobar el funcionamiento del UPQC frente a determinadas perturbaciones, se procede a analizar el funcionamiento del UPQC tal que cumpla con

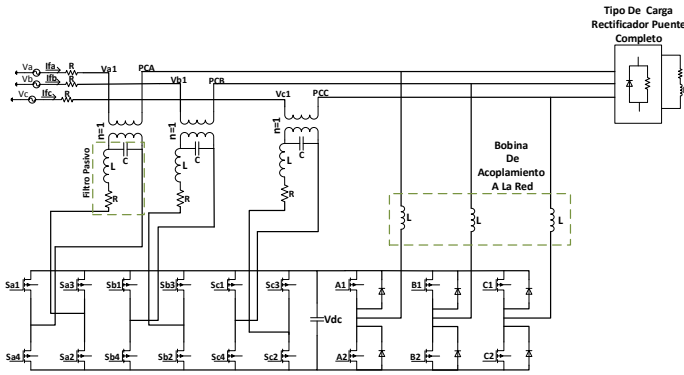


Figura 1. Acondicionador Unificado de la calidad de la energía UPQC

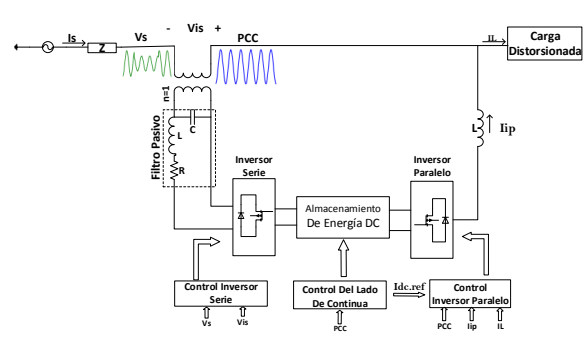


Figura 2. Topología básica del UPQC

las características necesarias para corregir las perturbaciones de tensión y de corriente, y por último se presenta el informe de resultados y el análisis de las simulaciones.

1. Acondicionador Unificado de la calidad de la energía UPQC

La topología de funcionamiento escogida para el UPQC es de configuración Paralela a la derecha, con un módulo inversor en compensación de tensión conectado en serie y un módulo inversor en compensación de corriente conectado en paralelo al punto común de acoplamiento (PCC) como se muestra en la figura 2, haciendo que el PCC conserve características ideales en las señales de tensión y de corriente. Además el UPQC busca que la corriente que circule a través del inversor serie sea la ideal, es decir, a la frecuencia fundamental, de secuencia positiva y que la tensión en terminales del inversor paralelo sea del mismo modo, fundamental de secuencia positiva como se muestra en la figura 3. Para el caso del inversor serie, se utilizó el convertidor de puente completo que se muestra en la figura 4. Para el caso del inversor paralelo, se utilizó el convertidor trifásico trifilar mostrado en la figura 5. El UPQC consta de ambos inversores como se muestra en la figura 1.

Los principales elementos para considerar en el diseño de un UPQC son la capacitancia del dispositivo de almacenamiento de energía del lado de continua, los valores de las bobinas de acople del inversor paralelo, los parámetros de los elementos que componen el filtro pasivo (R, L y C) de acople del inversor serie y la topología de los puentes inversores. Los valores fueron seleccionados de

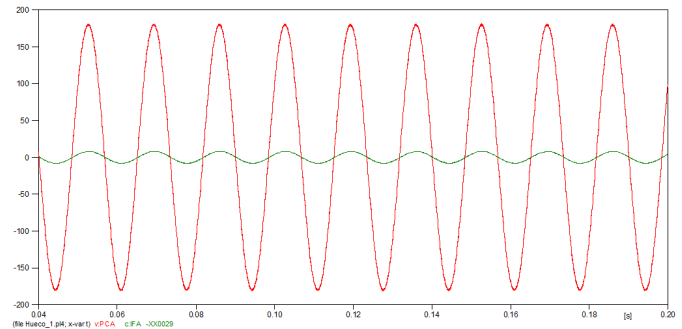


Figura 3. Tensión en PCC y corriente vista desde la fuente ideales

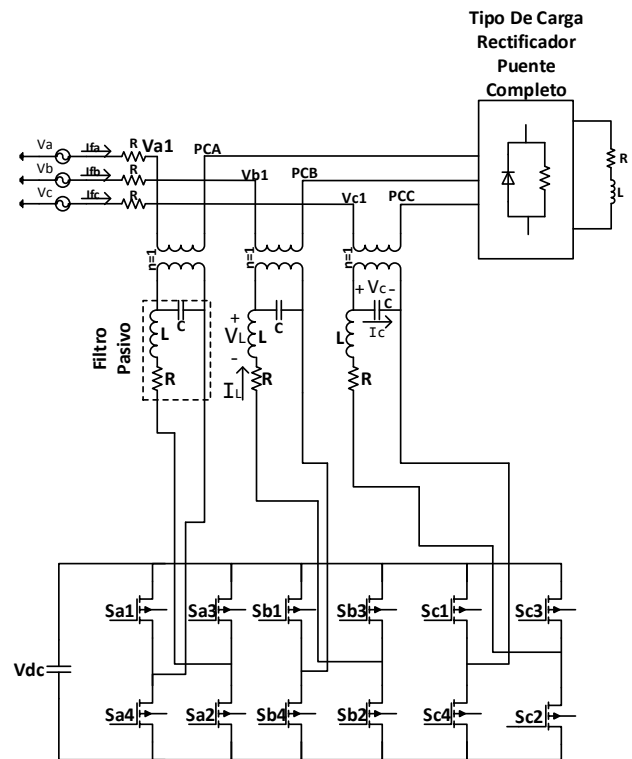


Figura 4. Puente inversor serie

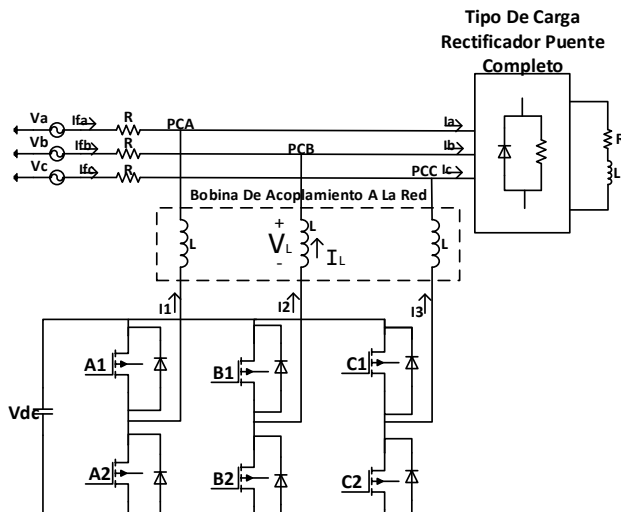


Figura 5. Puente inversor paralelo

manera empírica, tomando como base la capacidad que tiene cada elemento del UPQC para cambiar las condiciones de tensión y de corriente, por ejemplo las bobinas para cambio de corriente en el inversor paralelo y los condensadores para cambios de tensión en el inversor serie. En la ecuación (1) $i_L(t)$ y $v_L(t)$ corresponden a las señales de corriente y de tensión respectivamente en las bobinas, la variación de la corriente con respecto al tiempo está en función de la inductancia mientras que en la ecuación (2) $i_C(t)$ y $v_C(t)$ corresponden a las señales de corriente y tensión respectivamente en las capacitancias, la variación de la tensión con respecto al tiempo está en función de la capacitancia. Las ecuaciones (1) y (2) se deben tener presentes para el periodo de muestreo de las señales de tensión y corriente que se deben analizar para corregir las perturbaciones, además en la conmutación de los transistores de los convertidores.

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{V_L(t)}{L} \quad (1)$$

$$\frac{dV_C(t)}{dt} = \frac{I_C(t)}{C} \quad (2)$$

Los huecos de tensión son las perturbaciones que mayor problema presentan en el funcionamiento del sistema, ya que la pérdida de potencia en el alimentador obliga a que el dispositivo de almacenamiento de energía del lado de continua sea el encargado

de proporcionar el complemento de potencia activa que la carga requiere para su operación, por esta razón es que dentro de los parámetros de diseño se debe considerar la profundidad de los huecos y su duración, esto se hace a través del control del lado de continua donde la tensión de referencia y la capacitancia, se calculan para una determinada profundidad del hueco y duración del mismo. Si el diseño del UPQC no cumple con estas especificaciones puede causar una descarga completa del dispositivo de almacenamiento de energía del lado de continua con lo cual los inversores serie o paralelo no funcionarían de modo que mejoren la calidad de la energía eléctrica, sino generando perturbaciones adicionales a las ya presentes. En el caso del control del lado de continua, la corriente controlada en el inversor paralelo es la encargada de la carga del dispositivo de almacenamiento de energía del lado del continuo, con lo que los elementos de acople al PCC deben estar calculados para permitir el flujo de energía de la red al UPQC y viceversa, el inversor paralelo es el encargado de mantener la energía en el lado de continua frente a un hueco de tensión [8], [9], [10].

2. Principio de funcionamiento del UPQC

El UPQC consta de dos convertidores bidireccionales conectados a un mismo bus de corriente continua y un transformador en serie como se muestra en la figura 1. El convertidor serie se diseña con un pequeño porcentaje de la potencia nominal de la carga y es conectado a la línea de corriente alterna a través de un transformador. Este convertidor es el encargado de corregir las perturbaciones de tensión. El convertidor paralelo lleva a cabo tres funciones al mismo tiempo: elimina las perturbaciones de corriente en la carga, extrae o inyecta potencia reactiva para mejorar el factor de potencia del sistema y por último, mantiene la carga del dispositivo de almacenamiento de energía de corriente continua constante. La potencia suministrada o absorbida por el inversor paralelo es la potencia requerida por el inversor serie para elevar o reducir la tensión en caso de un hueco o una elevación y la potencia necesaria para cubrir las pérdidas [11], [12].

2.1. Principio de operación del UPQC

El proceso llevado a cabo para la operación del UPQC comprende las siguientes etapas:

1. Medir las corrientes y tensiones del sistema necesarias para calcular las señales a inyectar, tanto en el convertidor serie como en el convertidor paralelo.
2. Calcular las señales de referencia que debe seguir los convertidores para realizar la compensación.
3. Mantener la tensión del bus de continua en un valor que permita la controlabilidad del compensador.
4. Determinar las señales de disparo de los inversores tal que las señales generadas por éstos, sigan las señales de referencia deseadas [7].

La topología básica del UPQC se muestra en la figura 2 donde el inversor serie se encarga de corregir las perturbaciones de tensión por medio de un método de control que es independiente al del lado de continua y al inversor paralelo, mientras que el inversor paralelo cumple la función de cargar el lado de continua junto a la corrección de las perturbaciones de corriente y la corrección del factor de potencia.

Las variables a medir para el control del inversor serie son la tensión suministrada por el alimentador (V_s) y la tensión en el PCC. En el control del inversor paralelo se mide la corriente que circula a través de la carga, la corriente inyectada en el PCC y la tensión en el mismo punto, con el objetivo de que el alimentador vea una carga balanceada y factor de potencia unitario. Para el control del lado de continua se miden las tensiones en PCC y la tensión en el condensador empleado como elemento de almacenamiento de energía [13], [14].

2.2. Modo control de corriente para el inversor paralelo

Este modo de operación posibilita que el inversor paralelo del UPQC se comporte como una fuente controlada de corriente como se muestra en la figura 6, la cual debe generar un flujo de potencia no activa hacia la red, permitiendo corregir perturbaciones de corriente en el lado de la carga. Considerando que el inversor serie proporciona una señal de tensión en el PCC sinusoidal, a la frecuencia fundamental y balanceada, ésta a su vez deberá estar en fase con la señal de corriente corregida por el inversor paralelo [2].

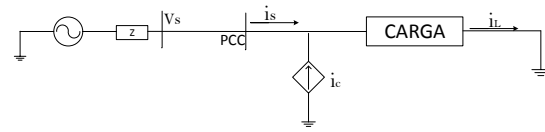


Figura 6. Modo control de corriente

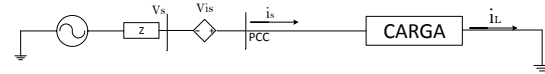


Figura 7. Modo control de tensión

2.3. Modo control de tensión para el inversor serie

Este modo de operación posibilita que el inversor serie del UPQC se comporte como una fuente controlada de tensión acoplada en un punto entre el alimentador y la carga como se muestra en la figura 7, que se encarga de corregir las perturbaciones presentes en el alimentador que afectan a la carga. En el PCC la señal de tensión deberá ser sinusoidal, fundamental y balanceada en cada una de las fases [13].

3. Control del Inversor Serie de un UPQC

Para el control de tensión del inversor serie del UPQC se requiere:

- Realizar la estimación de la señal fundamental de secuencia positiva de la señal de tensión del alimentador (V_s).
- Calcular la señal de referencia a partir de la estimación de la señal fundamental de secuencia positiva.
- Reproducir la señal de referencia por medio del control del inversor serie.

Para lo anterior se emplearon diversos algoritmos como lo son el Filtro Kalman para estimar la magnitud y fase de la señal fundamental de secuencia positiva de la tensión e identificar los cambios en esta magnitud para estimar huecos o elevaciones de tensión. La transformada Park o dq0 calcula la señal de referencia que se requiere para corregir las perturbaciones de tensión presentes en el alimentador. Para el control del inversor con el objetivo de seguir la señal de referencia a partir de la operación de los IGBTs del inversor en modo de

fuerza controlada de tensión, se empleó el control por histéresis de tensión [15], [16], [17], [18].

3.1. Filtro de Kalman

Uno de las herramientas más utilizadas para estimar las componentes fundamental y armónicas de una señal eléctrica es la Transformada rápida de Fourier FFT (*Fast Fourier Transformation*) que ofrece información detallada sobre la magnitud y fase del espectro de la señal en su componente fundamental y componentes armónicas asociadas a ésta. La sencillez del algoritmo hace que sea extensamente utilizado en la estimación de señales en sistemas eléctricos cuyo régimen permanente es de larga duración, es decir, que los cambios en la operación del sistema no ocurran en una jornada de operación de éste, siendo ésta una limitación en éste algoritmo. Otra de las limitaciones de la FFT es que la presencia de ruido en la medida la afecta, perdiendo precisión. Por último y una de las mayores desventajas es que la FFT trabaja en el dominio de la frecuencia con lo que se requiere realizar una conversión desde y hacia el dominio del tiempo para reconstruir la señal de referencia. Considerando que en los procesos de medidas de señales eléctricas el ruido blanco es un elemento que puede afectar el cálculo de éstas y que en los sistemas de distribución el cambio en las características del sistema es algo que ocurre con alta frecuencia, se recurre a un algoritmo que trabaje en el dominio del tiempo y responda lo más rápido posible a cambios dinámicos en las señales como lo es el filtro Kalman.

El filtro Kalman se basa en el modelo de espacio de estados de la señal que se desea medir, este modelo de espacio de estados se representa como:

$$x[n+1] = \phi[n]x[n] + w[n] \quad (3)$$

De la ecuación (3), $x[n]$ representa el vector de estados y es función de la medición de la señal a estimar, $\phi[n]$ es la matriz de transición de estados y $w[n]$ corresponde al vector de ruido blanco asociado a las variaciones no controladas de los estados.

El modelo que representa la señal que se desea medir se muestra en la siguiente ecuación:

$$z[n] = H[n]x[n] + v[n] \quad (4)$$

En la ecuación (4) $z[n]$ es el vector que contiene los datos de la señal medida, $H[n]$ es la matriz de medida de los estados y $v[n]$ es el vector de ruido blanco asociado al error aleatorio en la medida de los datos de la señal y no está relacionado con $w[n]$ de la ecuación (3) [15].

El algoritmo se muestra en la figura 8 y funciona de la siguiente forma:

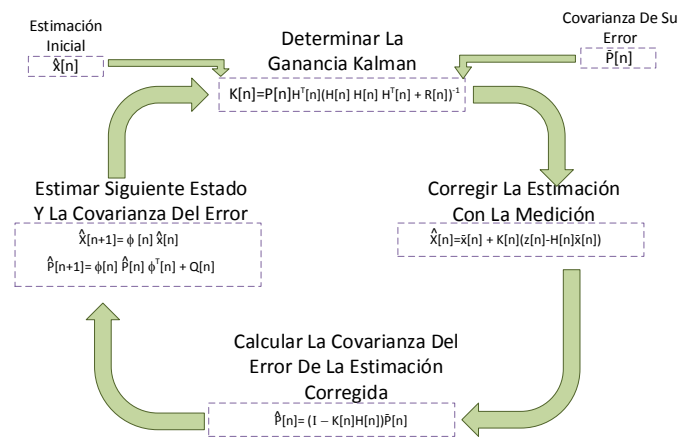


Figura 8. Diagrama de estimación del filtro Kalman

Se estima el estado inicial $\bar{x}[n]$, con esta estimación de estado inicial habrá un error asociado así:

$$e[n] = x[n] - \bar{x}[n] \quad (5)$$

Del anterior error se tendrá una covarianza $P[n]$, que para este caso se realiza una estimación inicial $\bar{P}[n]$. Para minimizar esta covarianza del error, se emplea la ganancia de Kalman $K[n]$, el uso de esta ganancia se muestra en la ecuación (6) y (7) para corregir el estado estimado con la medición.

$$\hat{x}[n] = \bar{x}[n] + K[n](H[n](x[n] - \bar{x}[n]) + v[n]) \quad (6)$$

$$\hat{x}[n] = \bar{x}[n] + K[n](z[n] - H[n]\bar{x}[n]) \quad (7)$$

Luego de corregir la estimación del estado con la medición, se procede a corregir la covarianza del error de la estimación corregida $\hat{P}[n]$:

$$\hat{P}[n] = (I - K[n]H[n])\bar{P}[n] \quad (8)$$

Después de la corrección de la estimación de la medición y de la covarianza del error, se procede a estimar el siguiente estado (3) y la covarianza del

error asociada ese estado, se muestra en la ecuación (10).

$$\hat{P}[n+1] = \phi[n]\hat{P}[n]\phi^T[n] + Q[n] \quad (9)$$

Con el siguiente estado calculado se repite el proceso cíclicamente del filtro de Kalman como se muestra en la figura 8.

En los sistemas eléctricos comúnmente se emplea el modelo de una sumatoria de armónicos para representar la señal de tensión o corriente [15].

Considerando que la señal del sistema se encuentra en estado estacionario, sería:

$$\sum_{k=1}^N A_k \cos(k\omega t + \theta_k) \quad (10)$$

La componente fundamental de esta señal es:

$$Z_1(t) = A_1 \cos(\omega_1 t + \theta_1) \quad (11)$$

De la componente fundamental de la señal en la ecuación (10) se descomponen las señales en cuadratura mostradas en las ecuaciones (12) y (13), donde $A_{1,r}$ y $A_{1,i}$ corresponden a la parte real e imaginaria de la ecuación (11).

$$A_{1,r}(t_n) = A_1 \cos(\omega_1 t_n + \theta_1) \quad (12)$$

$$A_{1,i}(t_n) = A_1 \sin(\omega_1 t_n + \theta_1) \quad (13)$$

En el tiempo:

$$t_{n+1} = \Delta t + t_n \quad (14)$$

Las variables $A_{1,r}$ y $A_{1,i}$ se representan así:

$$A_{1,r}(t_{n+1}) = A_{1,r}(t_n) \cos(\omega_1 \Delta t) - A_{1,i}(t_n) \sin(\omega_1 \Delta t) \quad (15)$$

$$A_{1,r}(t_{n+1}) = A_{1,r}(t_n) \sin(\omega_1 \Delta t) - A_{1,i}(t_n) \cos(\omega_1 \Delta t) \quad (16)$$

Para el k-ésimo armónico las variables: $A_{k,r}$ y $A_{k,i}$ en el caso del modelo mostrado en la ecuación (10) se puede estimar para el tiempo $t_n = n\Delta t$ mediante el modelo de ecuaciones de estado mostrado

en la ecuación (3), donde $x[n]$ sería un vector de estados de longitud $2N$ así:

$$x[n] = [A_{1,r}(n) \quad A_{1,i}(n) \quad A_{2,r}(n) \quad A_{2,i}(n) \quad \dots \quad A_{N,r}(n) \quad A_{N,i}(n)]^T \quad (17)$$

Donde el vector de ruido blanco $w[n]$ no correlacionado de la ecuación (3) con matriz de covarianza:

$$Q = \sigma_q^2 I \quad (18)$$

La matriz I es una matriz identidad de tamaño $2N \times 2N$. Ahora la matriz de transición de estados $\phi[n]$ es una matriz diagonal de tamaño $2N \times 2N$ como se muestra en la ecuación (19) así:

$$\phi = \text{diag}[M_1 \quad M_2 \quad \dots \quad M_N] \quad (19)$$

Donde:

$$M_k = \begin{pmatrix} \cos(k\omega_m \Delta t) & -\sin(k\omega_m \Delta t) \\ \sin(k\omega_m \Delta t) & \cos(k\omega_m \Delta t) \end{pmatrix} \quad (20)$$

Para $k = 1, 2, 3, \dots, N$

El modelo de la medición se representa en la ecuación (4), donde el vector $H[n]$ es constante de longitud $2N$, siendo así:

$$H = [1, 0, 1, 0, \dots, 1, 0] \quad (21)$$

Después de estimar el vector de estados y corregidas sus estimaciones con las mediciones de la señal, la amplitud de la señal fundamental y su fase se puede calcular como se muestra a continuación [15].

$$A_1[n] = \sqrt{A_{1,r}^2[n] + A_{1,i}^2[n]} \quad (22)$$

$$\varphi_1[n] = \arctan\left(\frac{A_{1,i}[n]}{A_{1,r}[n]}\right) \quad (23)$$

3.2. Transformada Park o dq0

Habiendo obtenido la magnitud y fase de la señal fundamental de secuencia positiva que se desea tomar como referencia para que el sistema opere en las condiciones deseadas, se procede a emplear el método de cálculo de referencia que permita extraer la señal que el convertidor serie debe generar para que al ser inyectada a la red permita que la tensión en PCC sea sinusoidal fundamental de secuencia positiva. El método que se empleó fue la transformada Park o dq0, el cual consiste en la transformación de las medidas instantáneas de la red trifásica de secuencia abc a un sistema en los ejes sincronicos de referencia $dq0$. El marco de referencia $dq0$ es ampliamente utilizado en los estudios sobre máquinas eléctricas y sistemas de potencia llamado método de referencia síncrona. Éste método se apoya en el concepto de transformada Clark que permite expresar las variables de la forma f_{abc} en un sistema coordenado equivalente en régimen estacionario $f_{\alpha\beta 0}$ [16], [17], [13]. La expresión utilizada para hacer el cambio de coordenadas en este sistema, se muestra a continuación:

$$f_{\alpha\beta 0} = P \cdot f_{abc} \quad (24)$$

Donde f_{abc} es el vector que consta de las componentes fasoriales asociadas a las tres fases $[f_a f_b f_c]^T$, que varían en el tiempo de forma periódica. Del mismo modo el vector $f_{\alpha\beta 0} = [f_\alpha f_\beta f_0]^T$ corresponde a la representación en el sistema coordenado $\alpha - \beta - 0$ del vector f_{abc} donde los componentes f_α y f_β están en cuadratura [16] [13]. La matriz de transformación P está definida por:

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (25)$$

A partir de este resultado se deduce que una tensión trifásica equilibrada y sinusoidal de componente fundamental realiza una trayectoria circular en el plano $\alpha - \beta$ con radio $\rho = A_1 \cdot \sqrt{3}/2$, siendo A_1 la tensión pico del alimentador a la fundamental de secuencia positiva, con una velocidad angular ω_1 constante, como se muestra en la figura 9.

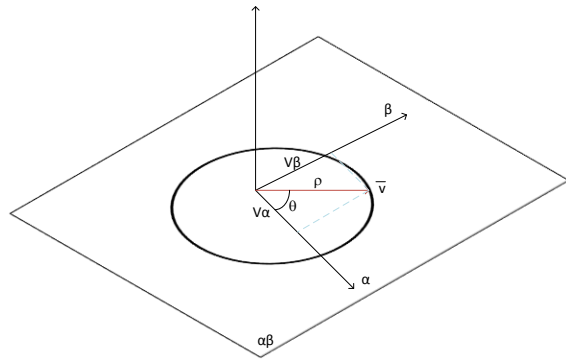


Figura 9. Sistema de coordenadas α - β -0

Para obtener la transformación de Park en un nuevo sistema rotatorio en cuadratura, se debe hacer girar el marco de referencia α - β -0 a la velocidad de rotación ω_1 [16], [17], [13]. El nuevo cambio de coordenadas está dado por la ecuación:

$$f_{dq0} = T \cdot f_{\alpha\beta 0} \quad (26)$$

Del mismo modo la matriz de transformación T se expresa como:

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 & \cos(\varphi_1 - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\varphi_1 + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \varphi_1 & -\sin(\varphi_1 - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\varphi_1 + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (27)$$

Las variables A_1 y φ_1 son la magnitud y la fase respectivamente que proporciona el filtro Kalman. Si se aplica a un sistema trifásico equilibrado, fundamental de secuencia positiva del alimentador como el de la ecuación (28) se pueden obtener los siguientes valores de componentes de la transformada de Park:

$$\begin{pmatrix} V_{f_{faseA}} \\ V_{f_{faseB}} \\ V_{f_{faseC}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_1 \cdot \cos(\omega_1 \cdot t + \theta_1) \\ A_1 \cdot \cos(\omega_1 \cdot t + \theta_1 - \frac{2\pi}{3}) \\ A_1 \cdot \cos(\omega_1 \cdot t + \theta_1 + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \quad (28)$$

$$f_d = \frac{\sqrt{3} \cdot V_{f_{fase}}}{\sqrt{2}} = V_{línea,RMS} \quad (29)$$

$$f_q = 0 \quad f_0 = 0$$

Siendo el objetivo del proyecto que la tensión en el PCC en cada una de las fases sea como en la ecuación (28) se toma como parte de la referencia en el plano $dq0$ las componentes de la ecuación (29) que deben ser comparadas con las calculadas en terminales del alimentador. Según la figura 7, a la tensión V_s se debe adicionar la tensión V_{is} para que la tensión en el PCC sea sinusoidal fundamental de secuencia positiva y equilibrada.

En este sentido el algoritmo de estimación de la referencia se presenta en la figura 10 el cual comienza con la estimación de los parámetros de la señal de tensión en terminales del alimentador (V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}) [13]. En esta figura $V_{faseA}, V_{faseB}, V_{faseC}$ Son las magnitudes de las señales de tensiones en las fases A, B y C de secuencia positiva a la fundamental respectivamente. $\theta_A \theta_B \theta_C$ Son los ángulos de las señales de tensiones en las fases A, B y C, respectivamente.

Considerando que f_s en la ecuación (30) es el vector de la tensión del alimentador en los ejes abc, la ecuación (31) representa la transformada park de dicho vector.

$$f_s = \begin{pmatrix} f_{sa} \\ f_{sb} \\ f_{sc} \end{pmatrix} \quad (30)$$

La transformación a las componentes $dq0$ sería:

$$\begin{pmatrix} f_{ds} \\ f_{qs} \\ f_{0s} \end{pmatrix} = T \cdot \begin{pmatrix} f_{sa} \\ f_{sb} \\ f_{sc} \end{pmatrix} \quad (31)$$

Las componentes que permiten estimar la referencia V_{is} serían:

$$\begin{pmatrix} f_{isd} \\ f_{isq} \\ f_{is0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} f_{ds} \\ f_{qs} \\ f_{0s} \end{pmatrix} \quad (32)$$

Posteriormente aplicando la transformación inversa de Park, se obtiene la señal de tensión V_{is} que se debe inyectar a la red para cumplir con las especificaciones en el PCC:

$$f_{is} = \begin{pmatrix} f_{isa} \\ f_{isb} \\ f_{isc} \end{pmatrix} = T^t \cdot \begin{pmatrix} f_{isd} \\ f_{isq} \\ f_{is0} \end{pmatrix} \quad (33)$$

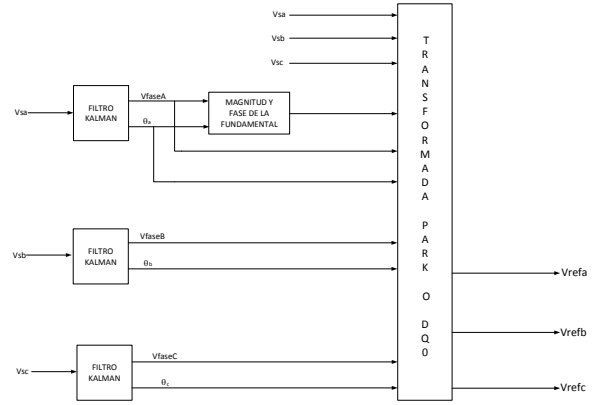


Figura 10. Diagrama de cálculo de la referencia

Donde T^t corresponde a la matriz transpuesta de T que se expresó en la ecuación (27). El diagrama que muestra el proceso de cálculo de la referencia aplicando la transformada Park se muestra en la figura 11 donde:

$$\begin{pmatrix} V_{refa} \\ V_{refb} \\ V_{refc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{isa} \\ f_{isb} \\ f_{isc} \end{pmatrix} \quad (34)$$

- Modificación de la transformada DQ0 en el caso de fallas tipo hueco o elevación de tensión.

Para modificar el algoritmo de la transformada dq0 se emplearon las señales h_1, h_2, h_3 las cuales son variables que miden y comparan la diferencia en el valor del estado anterior y el actual de la magnitud de la tensión y la duración con respecto a la referencia como se muestra en la figura 11. El filtro de Kalman compara el estado anterior y actual de la amplitud de la fundamental de secuencia positiva de la señal de tensión del alimentador, en caso de que la diferencia entre estos valores exceda un límite establecido con anterioridad, las señales h_1, h_2, h_3 enviarán una señal a la transformada dq0 que indica que ocurre una perturbación, ya sea un hueco o elevación de tensión. Si se detecta un hueco o elevación se procede a modificar la transformada dq0 utilizando el algoritmo de energía optimizada [19] [20]. Esta estrategia se encarga de reducir el consumo de energía en lado de continua, inyectando potencia reactiva en lugar de activa para compensar el hueco o la elevación de tensión. Las tensiones y las corrientes del sistema ante la presencia de huecos o elevaciones se observan en las figuras 12 y 13, respectivamente.

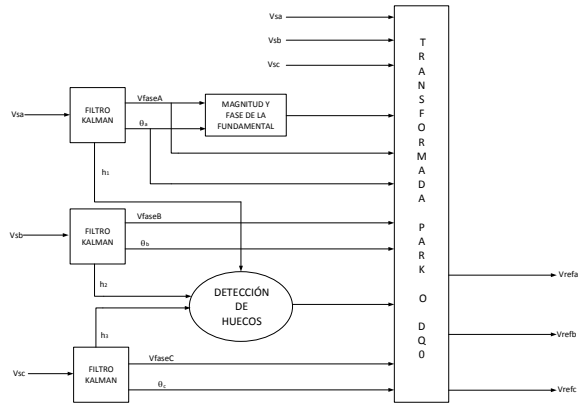


Figura 11. Identificación y compensación de huecos o elevaciones de tensión

Antes de procesar una falla, la señal de tensión en el PCC tendrá la misma magnitud y fase que la señal de tensión de la fundamental de secuencia positiva del alimentador, es decir, $PCC_{pre} = Vfase_{pre}$. Durante la falla la magnitud de la fundamental en la fuente se ve reducida (hueco, figura 12) o elevada (elevación, figura 13) esta se denomina $Vfase$. Después de la compensación la magnitud de la tensión que alimenta la carga está denotada por PCC en las dos gráficas.

En las figuras 12 y 13 los ángulos φ, α, δ , corresponden a la diferencia de ángulo entre PCC e I_s (para el caso del UPQC será de 0°), la diferencia de ángulo entre PCC_{pre} y PCC y el salto de fase entre $Vfase_{pre}$ y $Vfase$, respectivamente. A partir de estas definiciones la potencia activa suministrada por el alimentador durante la perturbación se describe en la siguiente ecuación:

$$P_{in} = \sum_{j=a,b,c} V_{fasej} \cdot I_{sj} \cdot \cos(\psi_j - \alpha + \delta_j) \quad (35)$$

La anterior ecuación no considera las componentes armónicas de tensión ya que la componentes armónicas de corriente son compensadas por el inversor paralelo.

Por otro lado la potencia activa consumida por la carga después de corregida la perturbación se expresa del siguiente modo:

$$P_{out} = \sum_{j=a,b,c} PCC_j \cdot I_{sj} \cdot \cos(\psi_j) \quad (36)$$

El subíndice j representa cada una de las fases que componen el sistema. Considerando que la

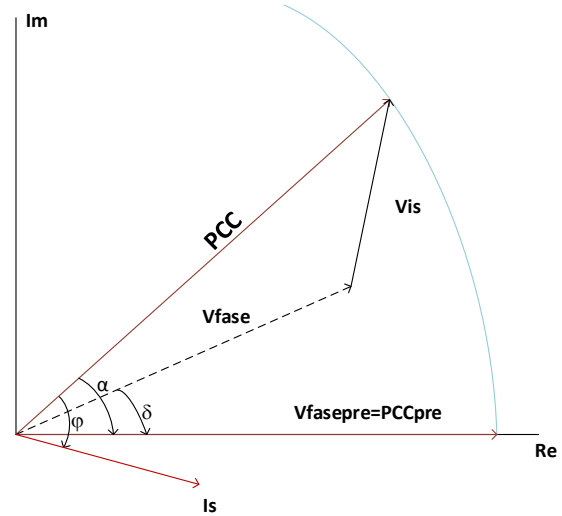


Figura 12. Hueco de tensión

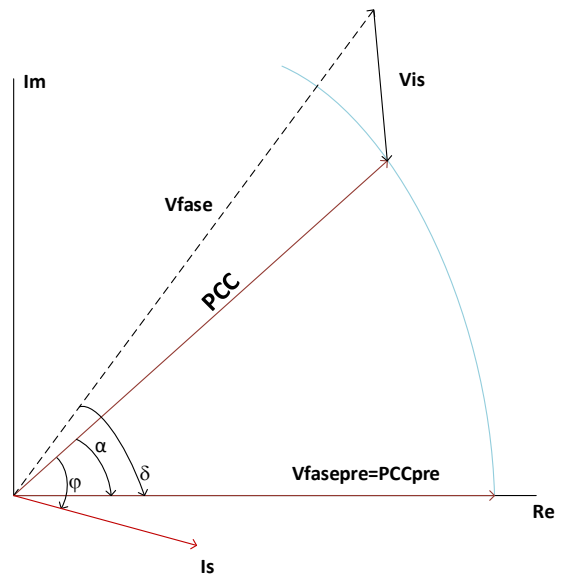


Figura 13. Elevación de tensión

corrección de tensión por el inversor serie y que la corrección en corriente por el inversor paralelo hacen que las variables de nivel de tensión y de corriente sean balanceadas, fundamentales y en fase, esto hace que la potencia en la carga sea vista así:

$$P_{out} = 3 \cdot PCC \cdot I_s \quad (37)$$

Del mismo modo, la potencia que suministraría el inversor serie sacando de las ecuaciones (37) y (38) es:

$$P_{Invs} = 3 \cdot PCC \cdot Is - \sum_{j=a,b,c} Vfase_j \cdot Is_j \cdot \cos(\psi - \alpha + \delta_j) \quad (38)$$

Las expresiones para la potencia reactiva suministrada por la fuente se escriben a continuación:

$$Q_{in} = \sum_{j=a,b,c} Vfase_j \cdot Is_j \cdot \sin(\psi_j - \alpha + \delta_j) \quad (39)$$

$$Q_{out} = \sum_{j=a,b,c} PCC_j \cdot Is_j \cdot \sin(\psi_j) = 0$$

Se observa que siendo el factor de potencia unitario para el caso del UPQC la fuente no suministraría potencia reactiva a la carga: por otro lado, la potencia reactiva que genera el inversor serie del UPQC se muestra en la ecuación:

$$Q_{Invs} = - \sum_{j=a,b,c} Vfase_j \cdot Is_j \cdot \sin(\psi_j - \alpha + \delta_j) \quad (40)$$

De las ecuaciones (39) y (42) que asocian las potencias activa y reactiva del inversor serie respectivamente, se observa que por medio del ajuste de α se puede ajustar el intercambio de potencia entre el UPQC y el alimentador

- Algoritmo de energía optimizada o adelanto de fase.

Este modo de operación se plantea para la compensación de huecos severos de tensión. Se busca que la inyección de potencia activa por parte del UPQC sea mínima. Para este caso se considera que las tensiones V_{fase} y PCC se normalizan a por unidad, para lo cual el valor óptimo de α puede ser calculado como:

$$\frac{dP_{Inv.Serie}}{d\alpha} = 0 \quad (41)$$

Por tanto:

$$\sum_{j=a,b,c} Vfase_j \cdot Is \cdot \sin(\psi_j - \alpha + \delta_j) = 0 \quad (42)$$

Despejando α :

$$\alpha_{opt} = \psi + \beta \quad (43)$$

El ángulo β de la ecuación (43) depende del ángulo δ_j , β se puede estimar según la ecuación (38) donde:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{j=a,b,c} Vfase_j \cdot \sin(\delta_j)}{\sum_{j=a,b,c} Vfase_j \cdot \cos(\delta_j)} \right) \quad (44)$$

El valor de α es el mismo para cada una de las fases, es por esto que depende de las magnitudes y ángulos δ de cada fase, variando α se puede lograr que el inversor serie consuma potencia activa $P_{Invs} < 0$, inyecte potencia activa $P_{Invs} > 0$ o no consuma o inyecte potencia activa $P_{Invs} = 0$.

Analizando el resultado de la ecuación (43) se determina el valor óptimo de α para cualquier perturbación teniendo en cuenta las siguientes condiciones y se calcula el valor de β así:

Si

$$X = [(\sum_{j=a,b,c} Vfase_j \cdot \cos(\delta_j))^2] + [(\sum_{j=a,b,c} Vfase_j \cdot \sin(\delta_j))^2]$$

Y

$$\sqrt{X} \geq 3 \cdot PCC \quad (45)$$

Entonces

$$\alpha_{opt} = \psi + \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{j=a,b,c} Vfase_j \cdot \sin(\delta_j)}{\sum_{j=a,b,c} Vfase_j \cdot \cos(\delta_j)} \right) + \cos^{-1} \left(\frac{3 \cdot PCC}{X} \right) \quad (46)$$

Si no

$$\alpha_{opt} = \psi + \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{j=a,b,c} Vfase_j \cdot \sin(\delta_j)}{\sum_{j=a,b,c} Vfase_j \cdot \cos(\delta_j)} \right) \quad (47)$$

Si se cumple la condición (45), es posible que el UPQC no inyecte potencia activa y esto se expresa en la ecuación (46) donde a la ecuación (43) se adiciona esta condición. Si no se cumple esta condición (45), solo se puede aproximar α para que el UPQC inyecte mínima potencia activa. La condición (45) compara la potencia suministrada por el alimentador (izquierda) con la potencia consumida por la carga (derecha) [20].

Las ecuaciones para la tensión de inyección del inversor serie y la potencia activa requerida bajo esta estrategia son:

$$V_{Inv.Sj} = \quad (48)$$

$$\sqrt{PCC^2 + Vfase_j^2 - 2 \cdot Vfase_j \cdot PCC \cos(\alpha_{opt} - \delta_j)}$$

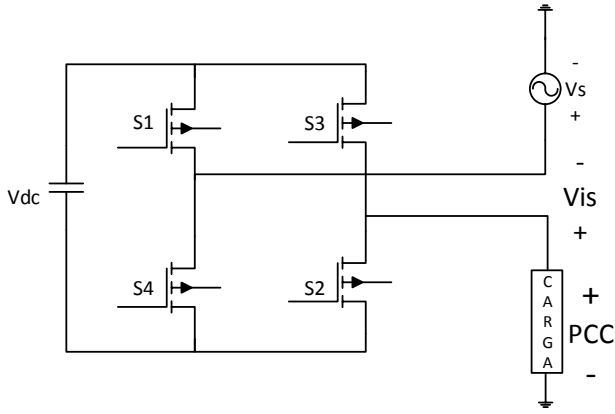


Figura 14. Diagrama topológico del control por histéresis de tensión

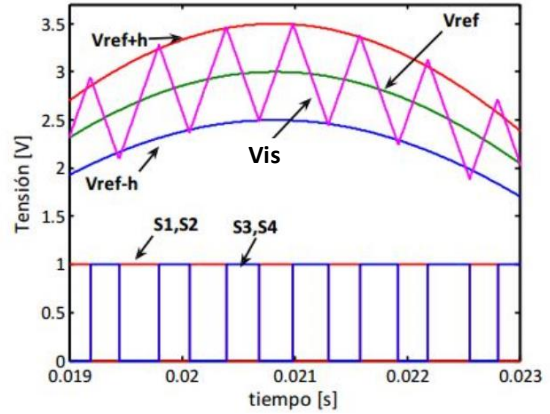


Figura 15. Ejemplo de control con banda de histéresis [13]

$$P_{Inv.S.opt} = 3 \cdot PCC \cdot I_s - \sum_{j=a,b,c} V_{fase_j} \cdot I_s \cdot \text{sen}(\psi_j - \alpha_{opt} + \delta_j) \quad (49)$$

3.3. Control por histéresis de tensión

Este tipo de control consiste en mantener la tensión de salida del inversor serie dentro de unos límites establecidos siguiendo así la señal de referencia obtenida por la transformación de Park, la topología monofásica del funcionamiento de esta técnica de control de lazo cerrado no lineal se muestra en la figura 14, donde el accionamiento de los IGBTs se realiza cumpliendo el siguiente patrón:

$$V_{is} > V_{ref} + h \begin{cases} S_1, S_2 : \text{Cerrados} \\ S_3, S_4 : \text{Abiertos} \end{cases}$$

$$V_{is} < V_{ref} - h \begin{cases} S_1, S_2 : \text{Abiertos} \\ S_3, S_4 : \text{Cerrados} \end{cases}$$

Donde V_{ref} es la señal de tensión que se obtiene de la transformada Park y se toma como la señal de referencia de tensión para el inversor serie del UPQC. Un ejemplo del funcionamiento del control por histéresis de tensión se muestra en la figura 15.

La topología trifásica está conformada por tres ramas monofásicas de IGBTs como se muestra en la figura 16. Estos interruptores operan del mismo modo que en la topología monofásica, es decir, cuando el interruptor Sa1 y Sa2 están cerrados, Sa3 y Sa4 están abiertos y viceversa, de manera

análoga con los interruptores Sb1 y Sb2, Sb3 y Sb4, Sc1 y Sc2, Sc3 y Sc4. Cada conjunto de inversores puente completo sigue las correspondientes señales de referencia V_{refA} , V_{refB} y V_{refC} .

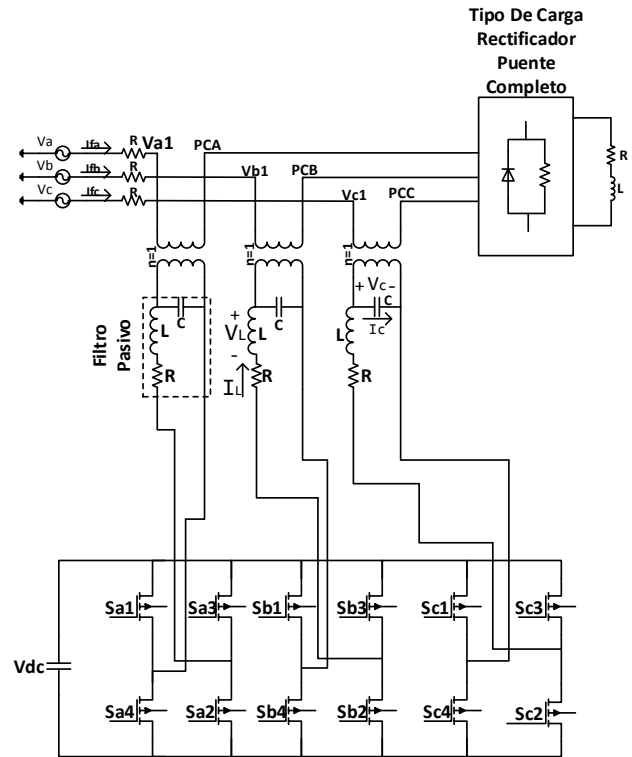


Figura 16. Puente inversor serie

4. Control del inversor paralelo

4.1. Teoría de Fryze

La teoría de Fryze es utilizada en sistemas monofásicos, propone el cálculo de la componente de corriente que requiere la carga que corresponde al consumo de potencia activa (P). En la figura 6 se observa como la corriente i_s es la resta de i_L e i_c , donde la corriente i_c es la corriente que el UPQC debe inyectar para que la corriente i_s sea sinusoidal, balanceada, fundamental y de secuencia positiva. De este modo la corriente i_p de la ecuación (50) corresponde a la corriente asociada a la potencia activa [14].

Para ésto se estima una conductancia equivalente que estará alimentada por la misma tensión de la carga $v(t)$, según la ecuación (52) [21], [22].

$$i_p(t) = \frac{v(t)}{R} \quad (50)$$

$$i_p(t) = \frac{\bar{p}(t)}{v^2} \cdot v(t) = \frac{P}{v^2} \cdot v(t) = G \cdot v(t) \quad (51)$$

$$G = \frac{1}{R} = \frac{P}{V^2} \quad (52)$$

En estas expresiones:

- $v(t)$: Es la tensión instantánea medida en el punto de conexión de la carga.
- V : Es el valor eficaz de la tensión medida en el punto de conexión de la carga.
- G : Es la conductancia de la carga.

Ahora bien la corriente de compensación $i_c(t)$ corresponde al consumo de energía que no implica potencia activa, por lo cual se obtiene al eliminar la corriente activa $i_p(t)$, de la corriente total demanda por la carga, $i_L(t)$ figura 6.

$$i_c(t) = i_L(t) - i_p(t) \quad (53)$$

4.2. Teoría de Fryze-Buchholz

La teoría de Buchholz es una ampliación de la teoría de Fryze a sistemas trifásicos. En esta teoría se introducen los valores colectivos de las señales instantáneas de tensión y corriente, lo mismo que para sus valores eficaces [21] [22].

$$i_{\Sigma}(t) = \|i(t)\| = \sqrt{\sum_{k=1}^N i_k^2(t)} \quad (54)$$

$$v_{\Sigma 0}(t) = \|v(t)\| = \sqrt{\sum_{k=1}^N v_{k0}^2(t)}$$

$$i_{\Sigma} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i_{\Sigma}^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{k=1}^N i_k^2(t)} \quad (55)$$

$$v_{\Sigma 0} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v_{\Sigma 0}^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{k=1}^N v_{k0}^2(t)} \quad (56)$$

En estas ecuaciones,

- $i_{\Sigma}(t)$ Valor colectivo de la señal instantánea de corriente.
- $v_{\Sigma 0}(t)$ Valor colectivo de la señal instantánea de tensión.
- N representa el número de fases del sistema.
- 0 es un nodo de referencia.
- T es el periodo de las señales de tensión y de corriente.
- u_k e i_k son los valores eficaces correspondientes a la k-ésima fase.

Por otra parte, la potencia instantánea colectiva se define como:

$$P_{\Sigma}(t) = \sum_{k=1}^N v_{k0}(t) i_k(t) \quad (57)$$

Y la potencia activa colectiva se define como:

$$P_{\Sigma} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} P_{\Sigma}(t) dt \quad (58)$$

Con los valores colectivos de la potencia activa y el valor eficaz de la tensión, se calcula una conductancia equivalente que permite obtener la componente activa de corriente.

$$i_{pk}(t) = \frac{P_{\Sigma}}{v_{\Sigma 0}^2(t)} \quad v_{\Sigma 0}(t) = G_c v_{k0}(t) \quad (59)$$

La corriente de compensación ahora queda definida para $k = a, b, c$ así:

$$i_{ck}(t) = i_{Lk}(t) - i_{pk}(t) \quad (60)$$

Donde:

- i_{ck} es la corriente de compensación.
- i_{Lk} es la corriente total de la carga.
- i_{pk} es la componente de la corriente que transporta potencia activa.

De esta forma, la corriente de compensación no contribuye al consumo de la potencia activa P_{Σ} y pueden ser generadas por el compensador, mientras que por la red circulará la corriente de menor valor eficaz colectivo que lleva la misma potencia activa, dada por [21], [22], [14], [2]:

$$i = G_e V_{\Sigma 0} \quad (61)$$

Como se mencionó anteriormente, el inversor serie cumple la función de corregir la tensión del alimentador para que la tensión en el PCC sea sinusoidal, fundamental y de secuencia positiva. De este modo la teoría de Fryze-Buchholz permite estimar la corriente que hace posible que el alimentador proporcione solo potencia activa fundamental y de secuencia positiva, haciendo que la señal de corriente i_s de la figura 6 sea sinusoidal, fundamental, de secuencia positiva y en fase con la tensión en el PCC.

4.3. Control por histéresis de corriente

Esta clase de controlador es un control de conmutación donde la señal a controlar se mide y es comparada con la señal de referencia. En esta estrategia de control, la corriente inyectada i_f se compara con la corriente de referencia i_{ref} , logrando así una banda de histéresis fija h con límites inferior y superior donde se permite que la corriente de salida pueda variar, consiguiendo que el error en la corriente logre mantenerse dentro de los límites establecidos por la banda de histéresis. De esta manera cuando el error alcanza el límite superior de la banda $i_{ref} + h$, los interruptores son conmutados para que la corriente disminuya. Por otro lado, cuando el error alcanza un límite inferior de la banda $i_{ref} - h$, de nuevo los interruptores se conmutan para hacer que la corriente aumente [21], [23].

En la figura 17 se observa que al momento de alcanzar el error el límite superior de la banda i_{ref} ,

los IGBTs son conmutados para que la corriente disminuya. Del mismo modo, cuando el error consigue llegar al límite inferior de la banda i_{ref} , los IGBTs son conmutados nuevamente para que la corriente aumente [21], [23]. En la figura 18 se observa el funcionamiento del control de histéresis [21].

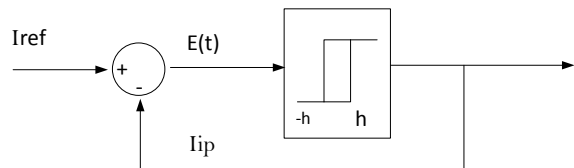


Figura 17. Esquema de control con banda de histéresis

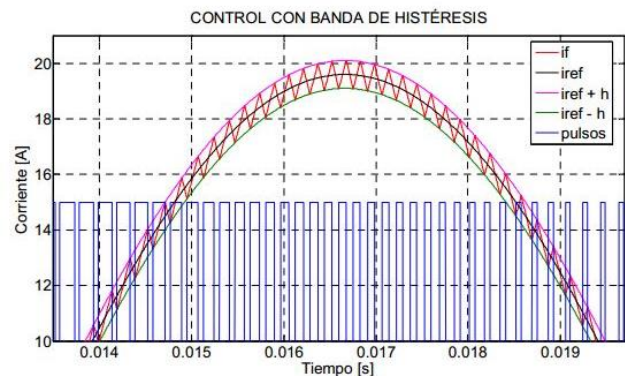


Figura 18. Ejemplo de control con banda de histéresis [2]

Para el caso de la topología trifásica estará conformada por tres ramas de IGBTs como se muestra en la figura 5. Estos interruptores operan de la siguiente manera: cuando el interruptor A1 está abierto, A2 está cerrado y viceversa; de manera análoga con los interruptores B1 y B2, C1 y C2.

5. Control del lado de continua

La principal diferencia entre el UPQC, el DVR y DSTATCOM, es que el primero comparte un mismo dispositivo de almacenamiento de energía en continua que soporta al inversor serie y al inversor paralelo como se muestra en la figura 19. Existe un amplio número de técnicas de control para cargar el condensador del lado de continua, algunas de estas técnicas utilizan la corriente que circula a través del inversor paralelo y el método de cálculo de referencia se adiciona a la señal de corriente de referencia

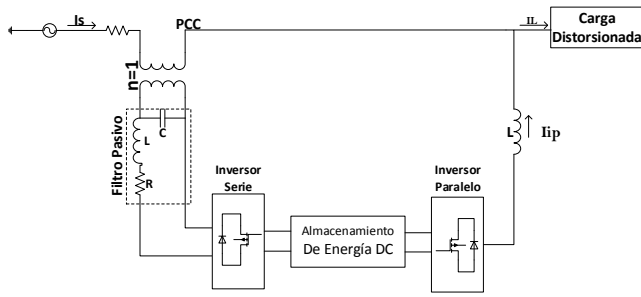


Figura 19. Disposición del lado de continua de un UPQC

que es calculada anteriormente, logrando así que la tensión en el condensador del lado de continua se cargue simultáneamente mientras se controla el inversor paralelo. Dentro de las técnicas de control se encuentran la PI (Proporcional Integral), la lógica difusa (*Fuzzy Logic*) y redes neuronales artificiales ANN (*Artificial Neural Networks*) [24].

El controlador PI, se basa en una técnica de control lineal de lazo cerrado en el cual se estima la corriente que se requiere para que la tensión en el condensador del lado de continua se mantenga en la referencia estimada según la ecuación (62), donde la constante proporcional K_p y K_i se pueden calcular de manera experimental.

$$i_{refdc,k}(t) = (K_p e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau) \cdot \frac{v_{k0}(t)}{\sqrt{\sum_{k=1}^N v_{k0}^2(t)}} \quad (62)$$

$$e(t) = U_{dcref} - u_{dc}(t) \quad (63)$$

La variable $i_{refdc,k}$ corresponde a la señal que se debe adicionar a la referencia de corriente para que el condensador del lado de continua se cargue, la variable $e(t)$ corresponde al error del sistema y en la ecuación (63) se expresa como la diferencia entre la tensión de referencia en el condensador del lado de continua (U_{dcref}) y el valor instantáneo medido en éste ($u_{dc}(t)$).

La velocidad de carga del dispositivo de almacenamiento de energía es fundamental para una respuesta correcta del UPQC, ya que tanto el inversor serie como el inversor paralelo, dependen de la energía que se almacena en el mismo. La capacidad de carga también es un factor importante para la respuesta del UPQC, ya que frente a contingencias de transferencia de energía como huecos o elevaciones

de tensión el balance de energía de este dispositivo permite que las condiciones de operación sean las ideales para el funcionamiento de las estrategias de control de los inversores.

Para la carga del dispositivo de almacenamiento de energía del lado de continua se considera que la corriente a través del inversor paralelo sea el encargado de esta función, por lo cual el control PI resulta muy efectivo, con la limitación de no controlar la corriente que circula a través del inversor serie del UPQC [14].

6. Tipo de carga y perturbaciones a analizar

En los últimos años el aumento en la electrónica de consumo ha hecho que los sistemas de rectificación de tensión sean muy comunes en usuarios residenciales, comerciales e industriales. Un ejemplo de esta carga consta de un circuito RL conectado a la red mediante un rectificador (para el caso trifásico, un rectificador puente completo) y desbalances entre las fases, como se muestra en la figura 20. Las señales de corriente en cada una de las fases se muestran en la figura 21 .

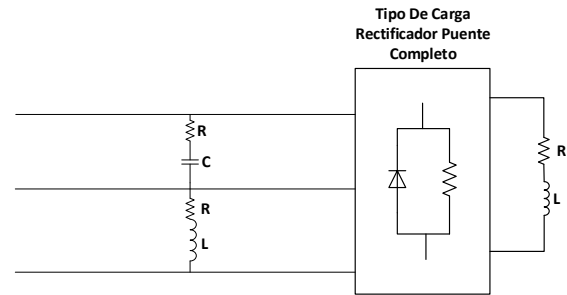


Figura 20. Distorsión en la carga

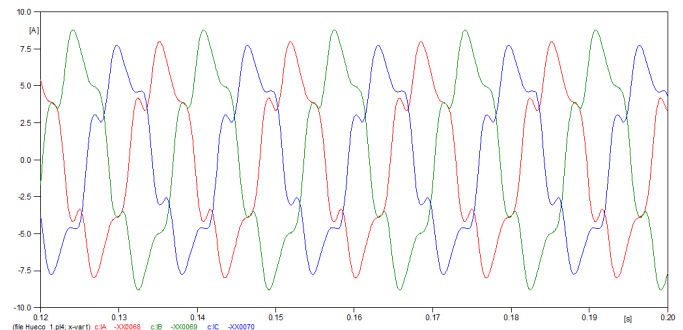


Figura 21. Ejemplo una perturbación de corriente

6.1. Perturbaciones

■ Huecos y elevaciones de tensión.

Algunas de las perturbaciones en la señal de tensión son en su mayoría generadas por fallas en el sistema del alimentador, un ejemplo claro son las fallas en sistemas trifásicos como las fase-tierra o las fase-fase que generan los llamados huecos y elevaciones de tensión. Éstos huecos de tensión pueden generarse por operación de otros usuarios de la red en el arranque de grandes motores de inducción, las elevaciones pueden generarse en las conmutaciones de la red o desconexiones de grandes cargas. Las características de los huecos y elevaciones de tensión son del carácter de la amplitud o profundidad y de la duración del mismo, que puede variar desde medio ciclo de onda hasta 1 minuto para redes de 60 [Hz], la figura 22 muestra las características típicas de un hueco de tensión en donde Δt representa la duración del hueco, las variables U_H y ΔU la magnitud y la profundidad del hueco respectivamente.

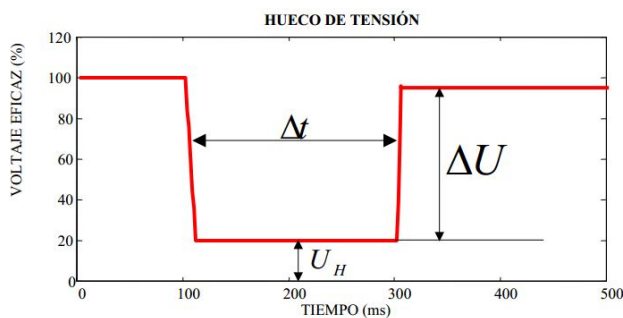


Figura 22. Hueco de tensión

■ Desbalances

Otra perturbación presente en las señales de tensión y corriente de sistemas trifásicos es el desbalance de las fases de la red como se muestra en la figura 23 en cuyo caso cada fase no se encontrará separada de las otras dos 120° . Un hueco de tensión por ejemplo puede añadir lo que se llama un salto de fase, que haría que la fase de la tensión se desplace en el transcurso de un hueco.

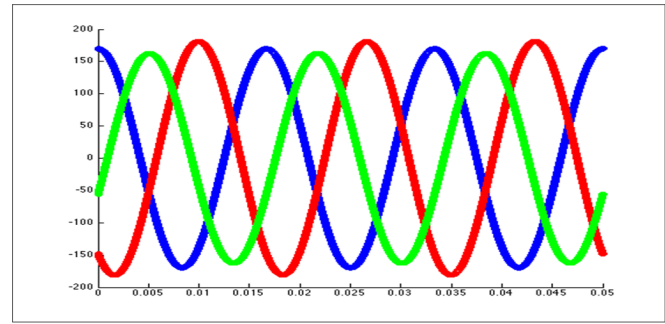


Figura 23. Desbalances en un sistema trifásico

■ Distorsión armónica

También una de las perturbaciones presentes en las señales de tensión y corriente como se muestra en la figura 24 que desmejoran la eficiencia de potencia en el sistema eléctrico en el cual está presente y es la deformación en la forma de onda de la señal con respecto a la onda sinusoidal [25].

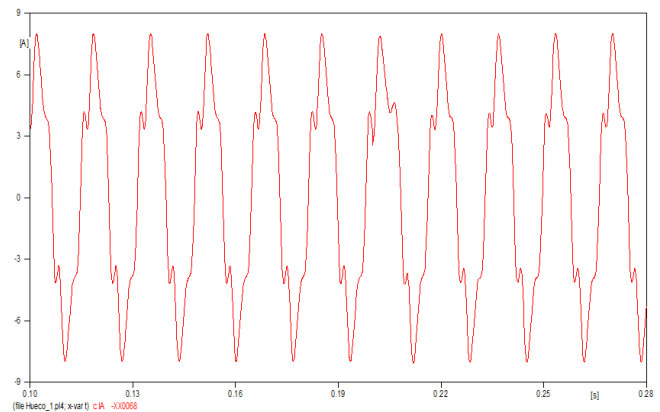


Figura 24. Distorsión armónica

Otro factor que desmejora la calidad de la energía es un bajo factor de potencia, esto se debe a cargas con presencia de elementos que consumen o generan reactivos como circuitos RL, RC o una combinación de ambos.

El diseño que se empleó para emular las perturbaciones de tensión fue de una fuente de tensión en la cual se pudiera programar distorsión armónica en sus magnitudes, selección de la fase para sus desbalances y magnitud y duración de los huecos o elevaciones de tensión [13]. Los desbalances en tensión provienen del alimentador y por esa razón el desfase no es tan significativo como en el caso de la corriente, por otro lado los huecos y su duración no pueden exceder los límites de la capacidad

del dispositivo de almacenamiento de energía del lado de continua. En la figura 25 se muestra un ejemplo de perturbaciones de tensión en el lado del alimentador.

7. Simulación y Análisis de resultados de un UPQC

La herramienta computacional empleada para las simulaciones fue *Alternative Transient Program* (ATP) también llamado *Electromagnetics Transient Program* (EMTP ATP) que es un software de distribución libre para uso académico y en su estructura de simulación mantiene dos métodos de estructura de control, estos métodos son los TACS y los MODELS. El método de control utilizado en el proyecto fue el basado en los MODELS que permiten tener una estructura de programación por medio de declaraciones de código de ejecución.

7.1. Casos de estudio

Se analizaron 6 casos de estudio:

- Caso I: Simulación de las estrategias de control utilizando fuentes controladas de tensión y corriente.

Se simularon las estrategias de control mediante fuentes controladas de tensión y de corriente cuyos valores eran las salidas de los algoritmos de la transformada dq0 y la teoría Fryze-Buchholz, las cuales eran las señales de referencia de tensión y corriente, respectivamente. Las perturbaciones utilizadas en éste caso fueron distorsión armónica de tensión en el alimentador, desbalances de tensión en el alimentador y distorsión armónica en

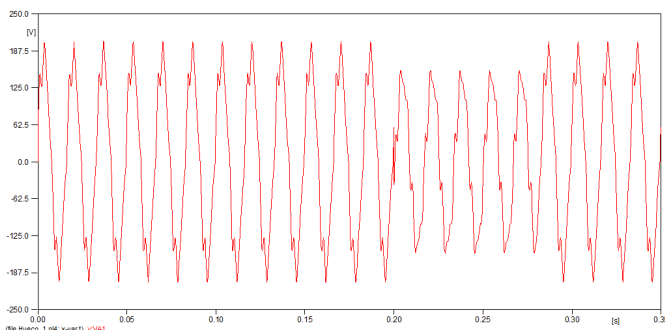


Figura 25. Ejemplo una perturbación de tensión

la corriente de la carga por medio de un rectificador trifásico puente completo (véase Anexo B1).

- Caso II: Compensación de distorsión armónica y desbalance de tensión con el inversor serie.

Por medio de una fuente de tensión tipo MODEL en ATP se simuló una señal de tensión con componentes armónicas de quinto y séptimo orden, además sus ángulos de fase desequilibrados. Se empleó únicamente el inversor serie, cuyo lado de continua correspondía a una fuente de tensión de corriente continua (véase Anexo B2).

- Caso III: Compensación de distorsión armónica, desbalance de corriente y corrección del factor de potencia con el inversor paralelo.

Se simuló únicamente el inversor paralelo del UPQC cuyo lado de continua era alimentado por una fuente de tensión de corriente continua, la perturbación de corriente fue la distorsión armónica generada por un rectificador trifásico puente completo (véase Anexo B3).

- Caso IV: Simulación del control PI para la carga del condensador del lado de continua.

En este caso se sustituyó la fuente de corriente continua del caso III por un condensador, se implementó el control PI y se modificó la corriente de referencia del inversor paralelo del caso III (véase Anexo B4).

- Caso V: Compensación de perturbaciones de tensión y de corriente por medio de un UPQC.

Este caso reunió el inversor serie del caso II y el inversor paralelo del caso IV, compartiendo el mismo lado de continua, al mismo tiempo se simularon las condiciones más desfavorables que el UPQC pudo corregir. Las perturbaciones adicionales fueron huecos de tensión, desbalances y distorsión armónica implementados en las fuentes de tensión tipo MODEL del caso II y desbalances

de corriente utilizando una rama RL y RC entre diferentes fases de la carga del caso IV (véase Anexo B5).

- Caso VI: Compensación de elevaciones de tensión para el caso V.

Se simuló el mismo circuito del caso V, modificando los valores de la fuente tipo MODEL en el alimentador para así realizar una elevación de tensión.

7.2. Parámetros

Para las simulaciones se consideró que la impedancia de la carga era significativamente mayor a la impedancia en el conductor del alimentador. Se seleccionó una resistencia de $60 [\Omega]$ para los primeros casos de simulación y una bobina de $10 [mH]$ en los casos en los que se busco reducir el factor de potencia. Los parámetros restantes fueron seleccionados de manera empírica. Los parámetros utilizados para la simulación de los casos I al VI se presentan en las tablas 1 a la 6.

- Caso I:

Parámetro	Nombre	Valor
Resist. de la línea	R_L	0.001 $[\Omega]$
Resist. Inv. Serie	R_1	0.01 $[\Omega]$
Resist. Inv. Serie	R_2	0.01 $[\Omega]$
Resist. Inv. Serie	R_3	0.01 $[\Omega]$
Resist. Inv. Serie	R_4	10 $[M\Omega]$
Induc. acople Inv. Paralelo	L_p	50 $[mH]$
Tensión del alimentador	V_s	10777.8 $[V]$
Resist. correc. rectificador	R_a	0.001 $[\Omega]$
Resist. de Carga	R_C	10000 $[\Omega]$

TABLA 1
PARÁMETROS CASO I.

- Caso II:

Parámetro	Nombre	Valor
Resist. de la línea	R_L	0.05 $[\Omega]$
Capac. Filtro pasivo	C_s	950 $[\mu F]$
Induc. Filtro pasivo	L_s	0.1 $[mH]$
Resist. Filtro pasivo	R_s	1 $[\Omega]$
Resist. corrección Inv. Serie	R_{is}	1 $[m\Omega]$
Tensión del lado de continua	V_{dc}	450 $[V]$
Tensión del alimentador	V_s	180 $[V]$
Amp. Armónico 5		0.1 $[p.u]$
Amp. Armónico 7		0.05 $[p.u]$
Induc. Línea de la carga	L_L	15 $[mH]$
Resist. correc. rectificador	R_a	1 $[m\Omega]$
Resist. de Carga	R_C	60 $[\Omega]$

TABLA 2
PARÁMETROS CASO II

- Caso III:

Parámetro	Nombre	Valor
Tensión del alimentador	V_s	180 $[V]$
Resist. correc. rectificador	R_{a1}	0.1 $[\Omega]$
Resist. correc. rectificador	R_{a2}	50 $[k\Omega]$
Resist. correc. Inver. Paralelo	R_5	0.01 $[m\Omega]$
Resist. correc. Inver. Paralelo	R_6	0.01 $[m\Omega]$
Cond. correc. rectificador	C_a	2000 $[mF]$
Induc. de Carga	L_c	10 $[mH]$
Resist. acople. Inv. Paralelo	R_p	0.5 $[\Omega]$
Induc. acople. Inv. Paralelo	L_p	0.3 $[mH]$
Resist. de Carga	R_C	60 $[\Omega]$
Tensión lado de continua	V_{dc}	450 $[V]$

TABLA 3
PARAMETROS CASO III

- Caso IV:

Parámetro	Nombre	Valor
Tensión del alimentador	V_s	180 $[V]$
Induc. Línea de la carga	L_L	30 $[mH]$
Resist. correc. rectificador	R_{a1}	0.1 $[\Omega]$
Resist. correc. rectificador	R_{a2}	50 $[k\Omega]$
Resist. correc. Inver. Paralelo	R_5	0.01 $[m\Omega]$
Resist. correc. Inver. Paralelo	R_6	0.01 $[m\Omega]$
Cond. correc. rectificador	C_a	2000 $[mF]$
Induc. de Carga	L_c	10 $[mH]$
Resist. acople. Inv. Paralelo	R_p	0.5 $[\Omega]$
Induc. acople. Inv. Paralelo	L_p	0.3 $[mH]$
Resist. de Carga	R_C	60 $[\Omega]$
Condensador lado de continua	C_{dc}	1000 $[\mu F]$

TABLA 4
PARAMETROS CASO IV

- Caso V:

Para el correcto funcionamiento del dispositivo de almacenamiento del lado de continua y el inversor

serie como se muestra en la figura 26, la necesidad de este limitador de corriente se debe a que la estrategia de control para el lado de continua depende sólo de la corriente que aporta el inversor paralelo, debido a esto la corriente que circula a través del secundario del transformador de acople del inversor serie, la inducción de dicha corriente no controlada, provoca que el control del lado de continua no funcione como se espera, ubicando este limitador de corriente es posible reducir considerablemente el aporte de corriente del inversor serie en la carga del dispositivo de almacenamiento del lado de continua.

Parámetro	Nombre	Valor
Tensión fund. del alimentador	V_s	180 [V]
Amplitud quinto armónico		0.12 [pu]
Amplitud séptimo armónico		0.8 [pu]
Fase ₁		60 [°]
Fase ₅		0 [°]
Fase ₇		-60 [°]
Profundidad del hueco		20 %
Salto de fase		-35 [°]
Induc. Línea de la carga	L_L	2 [mH]
Resist. correc. rectificador	R_{a1}	0.001 [Ω]
Resist. correc. rectificador	R_{a2}	52 [Ω]
Cond. correc. rectificador	C_a	10 [mF]
Resist. correc. Inver. Paralelo	R_5	0.01 [mΩ]
Resist. correc. Inver. Paralelo	R_6	0.01 [mΩ]
Resistencia limitador	R	1 [Ω]
Condensador limitador	C	20 [μF]
Capac. Filtro pasivo	C_s	10 [μF]
Induc. Filtro pasivo	L_s	1.1 [mH]
Resist. Filtro pasivo	R_s	0.07 [Ω]
Resist. Rta. hueco	R_f	1 [Ω]
Resist. corrección Inv. Serie	R_{is}	1 [mΩ]
Tensión Ref. lado continua	V_{dc}	450 [V]
Induc. de Carga	L_c	10 [mH]
Induc. acople. Inv. Paralelo	L_p	8 [mH]
Resist. de Carga	R_C	60 [Ω]
Condensador lado de continua	C_{dc}	840.03 [μF]

TABLA 5

PARAMETROS CASO V

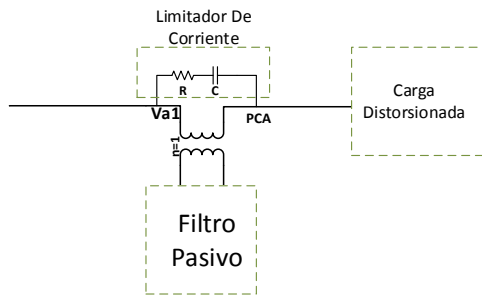


Figura 26. Limitador de corriente

- Caso VI:

Parámetro	Nombre	Valor
Tensión fund. del alimentador	V_s	180 [V]
Amplitud quinto armónico		0.12 [pu]
Amplitud séptimo armónico		0.8 [pu]
Fase ₁		60 [°]
Fase ₅		0 [°]
Fase ₇		-60 [°]
Elevación de tensión		30 %
Salto de fase		-35 [°]
Induc. Línea de la carga	L_L	2 [mH]
Resist. correc. rectificador	R_{a1}	0.001 [Ω]
Resist. correc. rectificador	R_{a2}	52 [Ω]
Cond. correc. rectificador	C_a	10 [mF]
Resist. correc. Inver. Paralelo	R_5	0.01 [mΩ]
Resist. correc. Inver. Paralelo	R_6	0.01 [mΩ]
Resistencia limitador	R	1 [Ω]
Condensador limitador	C	20 [μF]
Capac. Filtro pasivo	C_s	10 [μF]
Induc. Filtro pasivo	L_s	1.1 [mH]
Resist. Filtro pasivo	R_s	0.07 [Ω]
Resist. Rta. hueco	R_f	1 [Ω]
Resist. corrección Inv. Serie	R_{is}	1 [mΩ]
Tensión Ref. lado continua	V_{dc}	450 [V]
Induc. de Carga	L_c	10 [mH]
Induc. acople. Inv. Paralelo	L_p	8 [mH]
Resist. de Carga	R_C	60 [Ω]
Condensador lado de continua	C_{dc}	840.03 [μF]

TABLA 6

PARÁMETROS CASO VI

7.3. Resultados

- Caso I: Simulación de las estrategias de control utilizando fuentes controladas de tensión y corriente.

La tensión en el alimentador se observa en la figura 27.

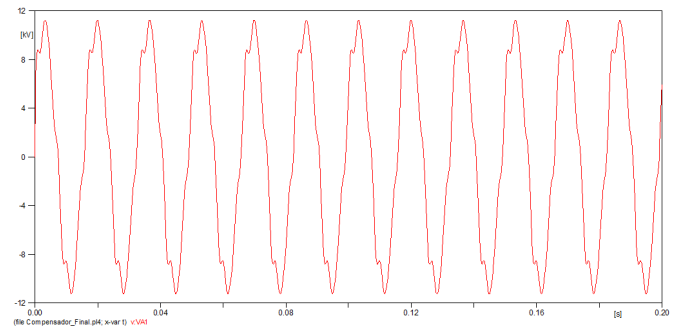


Figura 27. Tensión en el alimentador

La tensión corregida por el UPQC en las tres fases se observa en la figura 28.

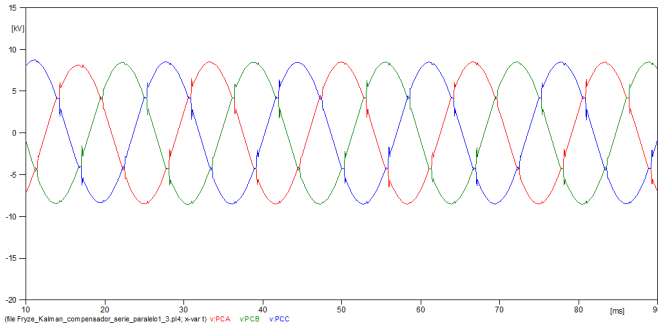


Figura 28. Tensión corregida por el inversor serie

La corriente en la carga se muestra en la figura 29, los picos observados se deben a la conmutación de los interruptores, éstos no pudieron ser corregidos sino hasta la simulación en el caso V.

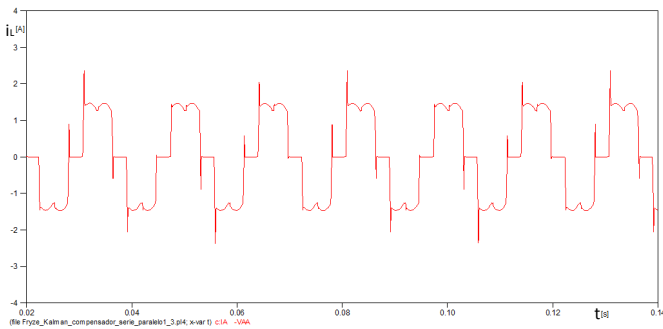


Figura 29. Corriente en la carga

La corriente corregida por el UPQC en las tres fases se muestra en la figura 30.

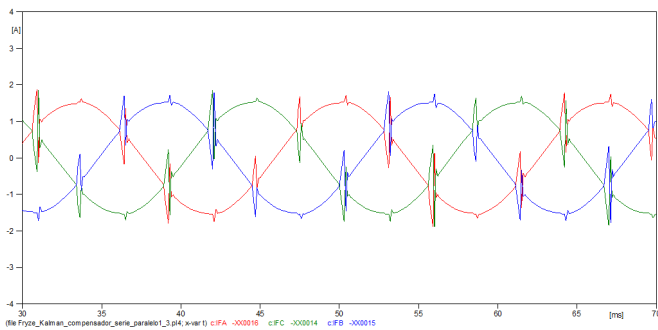


Figura 30. Corriente corregida por el UPQC en las tres fases

Según se observa en las figuras 28 y 30, se pudo corregir en gran parte el desbalance de tensión y la distorsión armónica en la corriente. En las figuras 31 y 32 se observan los ángulos de fase de las componentes fundamentales de secuencia positiva de la tensión en PCC y de la corriente del alimentador,

respectivamente. Ambas señales se encuentran en fase, corrigiendo el factor de potencia.

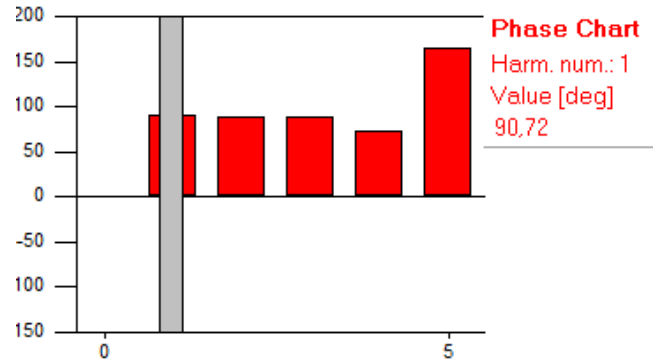


Figura 31. Ángulo de fase de la tensión en el PCC

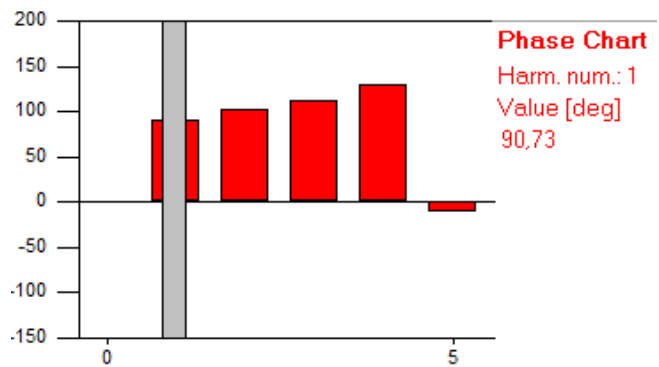


Figura 32. Ángulo de fase de la corriente del alimentador

Caso II: Compensación de distorsión armónica y desbalance de tensión con el inversor serie.

La figura 33 muestra las tensiones en el alimentador en todas sus fases.

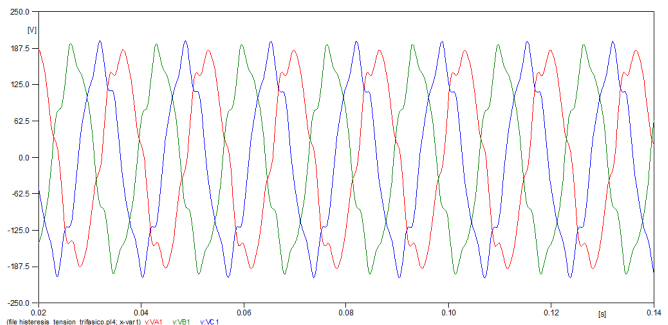


Figura 33. Tensiones en el alimentador

Parámetro	Va1	Vb1	Vc1
Magnitud v_1	127,279	125,723	126,077
Fase $_1$ [r]	0,5412	-2,255	2,1101
Magnitud v_5	12,7279	12,7349	12,7279
Fase $_5$ [r]	0,78364	2,1799	-1,8343
Magnitud v_7	6,3639	6,3625	6,3674
Fase $_7$ [r]	0,9058	2,3020	-1,7118
THD	0,1118	0,1132	0,1128
V.Eficaz	128,0722	126,527	126,8778

TABLA 7

TENSIÓN EN EL ALIMENTADOR DISTORSIONADA.

El seguimiento de histéresis hecho a la señal de referencia por parte del inversor serie es mostrado en la figura 34, donde la señal de color rojo es el seguimiento de histéresis y la señal de color verde es la señal de referencia.

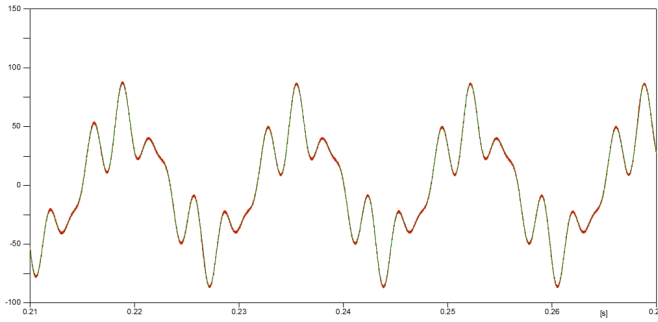


Figura 34. Seguimiento de histéresis de tensión

Las tensiones corregidas por el inversor serie se muestran en la figura 35.

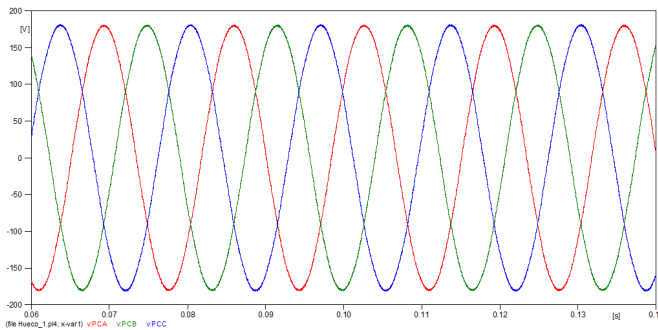


Figura 35. Tensiones corregidas por el inversor serie

Como se observa en la figura 35, se logró corregir el desbalance de tensión y la distorsión armónica en el PCC.

Parámetro	PCA	PCB	PCC
Magnitud v_1	129,4712	129,754	129,471
Fase $_1$ [r]	0,5244	-1,5364	2,6337
Magnitud v_5	1,1646	1,0875	1,545
Fase $_5$ [r]	-2,7209	-1,1042	1,2263
Magnitud v_7	0,8118	1,7671	1,3279
Fase $_7$ [r]	1,6265	-0,7648	2,8379
THD	0,0109	0,0106	0,0157
V.Eficaz	129,479	129,771	129,487

TABLA 8

TENSIÓN EN EL PCC.

En la tabla 8 se observa la reducción en los desbalances en magnitud y fase con respecto a la tabla 7, además la reducción de la $THD = 0,0,1118$ en la fase A (la menor THD de las tres fases) de la tabla 7 con respecto a la $THD = 0,01574$ (la mayor THD de las tres fases) en la fase C de la tabla 8, la reducción de THD es de 85,84 % en el caso más desfavorable.

La salida del filtro kalman se observa en la figura 36, que muestra la estimación de la magnitud de la fundamental de tensión de secuencia positiva.

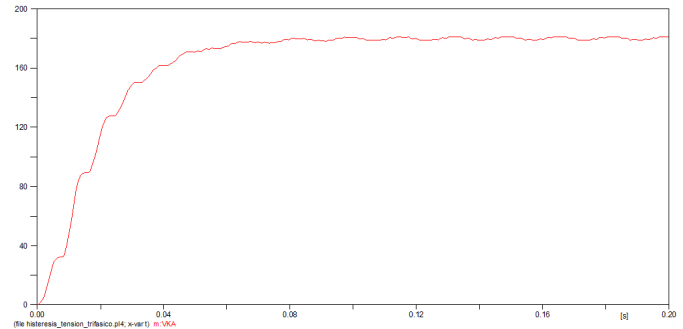


Figura 36. Valor pico de la señal medida por el filtro kalman

- Caso III: Compensación de distorsión armónica, desbalance de corriente y corrección del factor de potencia con el inversor paralelo.

En la figura 37 se observan las corrientes distorsionadas por el rectificador trifásico puente completo.

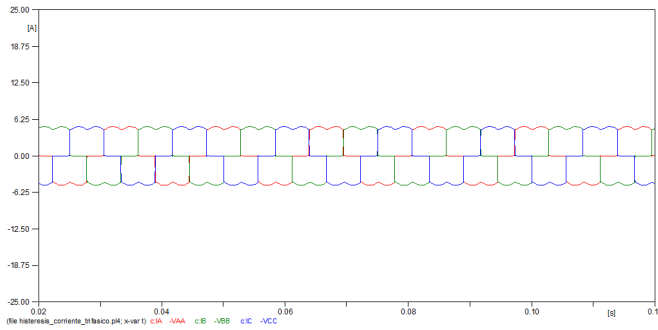


Figura 37. Corriente distorsionada por el rectificador puente completo

Las corrientes balanceadas por el inversor paralelo se observa en la figura 38.

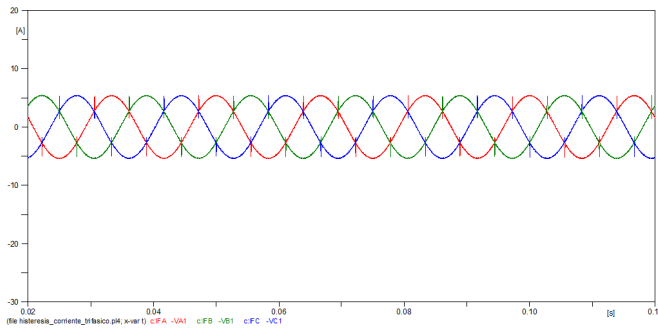


Figura 38. Corrientes balanceadas por el inversor paralelo

El seguimiento de histéresis de corriente realizado por el inversor paralelo se observa en la figura 39. Los picos observados en la figura 38 se deben a cambios bruscos en la señal de corriente del inversor paralelo mostrado en la figura 39, donde la señal de color rojo es el seguimiento de histéresis y la señal de color verde es la señal de referencia.

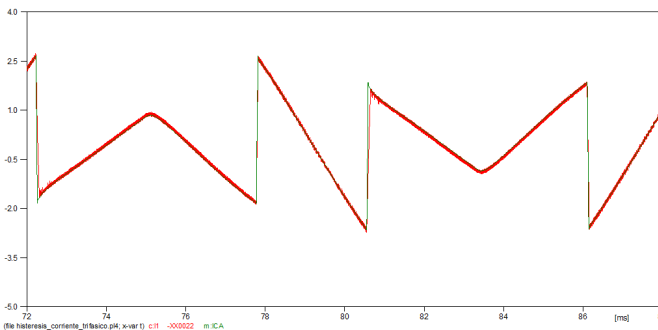


Figura 39. Seguimiento de histéresis de corriente

Parámetro	I_a	I_b	I_c
Magnitud v_1	3,7646	3,7646	3,7646
Fase $_1$ [r]	1,5614	-0,5330	-2,6268
Magnitud v_5	0,8393	0,8393	0,8393
Fase $_5$ [r]	-1,6465	0,4490	2,5429
Magnitud v_7	0,4367	0,4366	0,4366
Fase $_7$ [r]	1,5891	-0,5053	-2,5988
THD	0,2513	0,2513	0,2513
V.Eficaz	3,8817	3,8817	3,8817

TABLA 9

CORRIENTE EN LA CARGA DISTORSIONADA.

Parámetro	I_{fa}	I_{fb}	I_{fc}
Magnitud v_1	3,7965	3,7965	3,7957
Fase $_1$ [r]	1,5756	-0,5187	-2,6127
Magnitud v_5	0,0207	0,0205	0,0210
Fase $_5$ [r]	0,0734	2,1607	-2,035
Magnitud v_7	0,0221	0,0119	0,0121
Fase $_7$ [r]	2,6389	0,5323	-1,5694
THD	0,0079	0,0078	0,0080
V.Eficaz	3,7966	3,7966	3,7959

TABLA 10

CORRIENTE CORREGIDA EN EL ALIMENTADOR.

En la tabla 9 se observa que el rectificador trifásico puente completo no desbalancea la carga, por lo cual se requirió en un caso posterior introducir un desbalance en la carga para analizar el comportamiento del UPQC frente a desbalances en la señal de corriente, del mismo modo se observa una $THD = 0,2513$, la cual es significativamente mayor que la observadas en el caso II donde se analizó la THD de la señal de tensión en el alimentador. La reducción de la THD en la señal de corriente se observa en la tabla 10 donde se reduce un 96 % con respecto a la THD de la tabla 9 en el caso más desfavorable.

Parámetro	Fase $_A$	Fase $_B$	Fase $_C$	3ϕ
S.Aparente	479,239	479,238	479,238	1437,716
P.Activa	464,764	464,764	464,767	1394,296
Q.Reactiva	-4,3804	-4,3804	-4,0559	-12,816
D.Corriente	116,812	116,8084	116,8084	350,429
S.Fundam	464,7852	464,7852	464,7852	1394,3556
P.Fundam	464,7645	464,7645	464,7675	1394,297
Q.Fundam	4,3804	4,3804	4,0559	12,816

TABLA 11

POTENCIAS CONSUMIDA POR LA CARGA.

Parámetro	Fase _A	Fase _B	Fase _C	3φ
S.Aparente	468,7286	468,7283	468,6415	1406,0984
P.Activa	468,7081	468,7081	468,6199	1406,0361
Q.Reactiva	2,2905	2,2905	2,4536	7,0347
D.Corriente	3,7415	3,6997	3,7655	11,206
S.Fundam	468,7137	468,7137	468,6264	1406,0538
P.Fundam	468,7081	468,7081	468,6199	1406,0361
Q.Fundam	2,29054	2,29054	2,45369	7,03477

TABLA 12

POTENCIAS DE LA CARGA VISTA DESDE EL ALIMENTADOR.

En la tabla 11 se observa un bajo factor de potencia debido a la distorsión armónica presente en $D_I = 350,4292[VAr]$, ya que la potencia reactiva es considerablemente menor $Q = -12,8167[VAr]$, al corregir la distorsión armónica por medio del inversor paralelo en la tabla 12 se observa una reducción considerable en la potencia $D_I = 11,2068[VAr]$, así logrando que la potencia aparente $S = 1406,098[V A]$ y la potencia activa $P = 1406,0362[W]$ tengan valores muy cercanos y de este modo un factor de potencia muy cercano a la unidad.

- Caso IV: Simulación del control PI para la carga del condensador del lado de continua.

La carga del condensador del lado de continua se observa en la figura 40. Se observa la presencia de un rizo el cual se origina por la señal de referencia del inversor paralelo que permite cargar el condensador del lado de continua. Variando las constantes K_p y K_i se logra una respuesta más rápida pero con rizados más pronunciados o rizados menos pronunciados con respuesta más lenta.

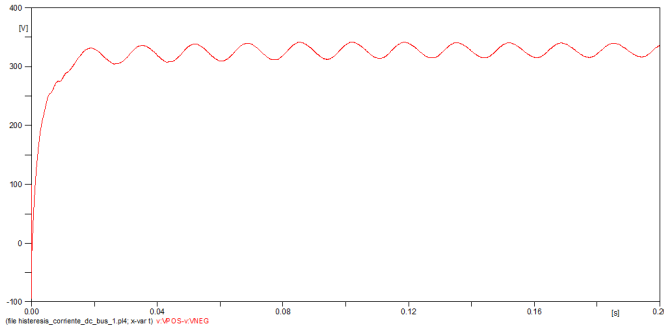


Figura 40. Carga del condensador del lado de continua

La figura 41 muestra el seguimiento realizado por la corriente de referencia que permite cargar el condensador del lado de continua.

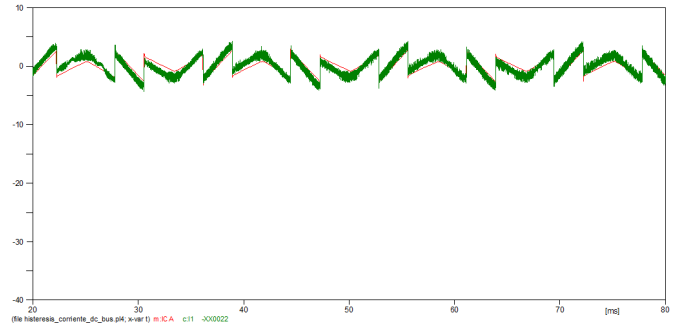


Figura 41. Corriente de referencia para cargar el lado de continua

Las corrientes corregidas por el UPQC se muestran en la figura 42.

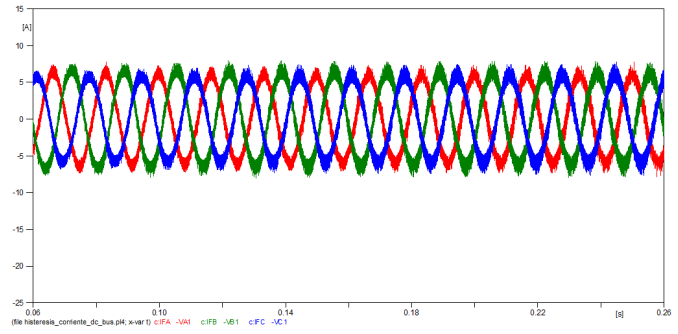


Figura 42. Corrientes corregidas

- Caso V: Compensación de perturbaciones de tensión y de corriente por medio de un UPQC.

La figura 43 muestra el hueco de tensión, distorsión armónica y desbalances de tensión del alimentador en cada una de las fases.

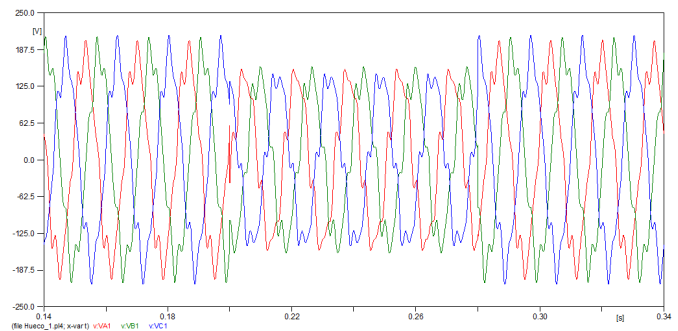


Figura 43. Huecos de tensión

La corrección del hueco de tensión por el UPQC se muestra en la figura 44 en color rojo.

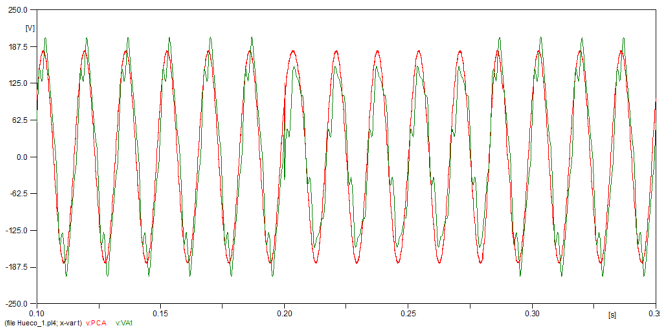


Figura 44. Corrección del hueco de tensión

La carga del condensador del lado de continua con la caída de tensión al momento de compensar el hueco se observa en la figura 45, donde en color rojo se muestra la señal de la tensión en el condensador y en color verde la señal de tensión del alimentador.

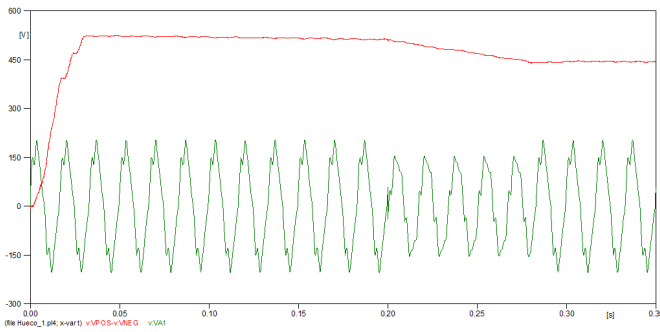


Figura 45. Carga del condensador

Las perturbaciones de corriente en la carga se muestran en la figura 46; las corrientes corregidas por el UPQC se muestran en la figura 47.

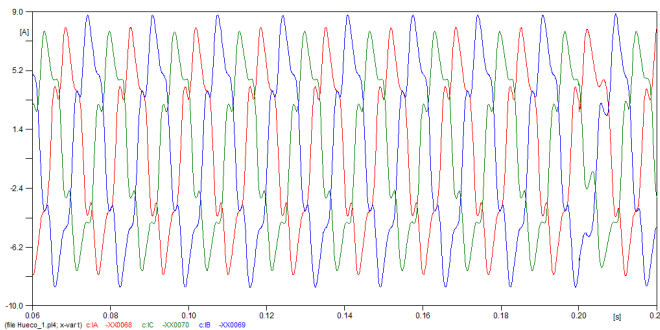


Figura 46. Perturbaciones de corriente en la carga

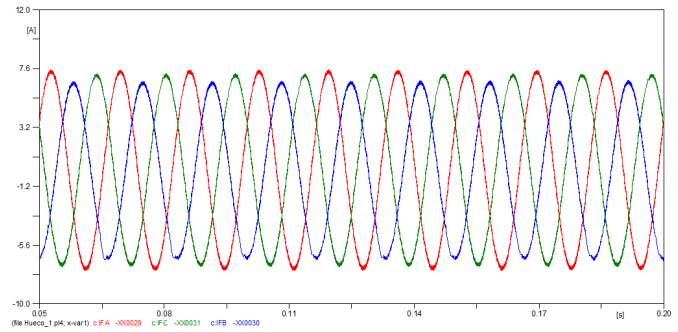


Figura 47. Corrientes corregidas por el UPQC

El desbalance mostrado en la figura 47 es debido a la topología del inversor paralelo ya que tiene tres ramas y no puede compensar la componente homopolar.

La figura 48 muestra la corrección del factor de potencia. La gráfica verde corresponde a la tensión en PCC y la gráfica roja corresponde a la corriente del alimentador. Donde en la señal de color verde es la corriente corregida por el inversor paralelo y la señal de color rojo es la tensión en el punto de conexión común corregida por el inversor serie.

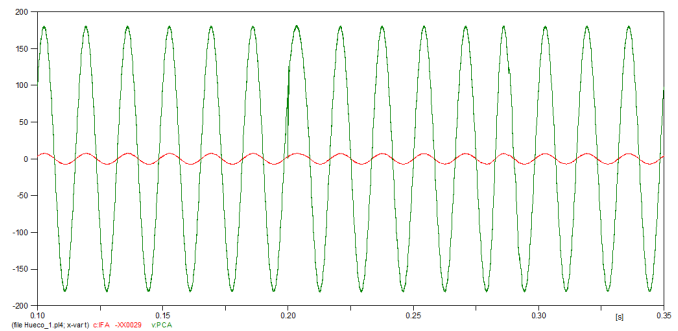


Figura 48. Corrección del factor de potencia

Los resultados obtenidos en este caso V se muestran en las tablas 13, 14, 15, 16, donde THD es la distorsión armónica total de la señal (*Total Harmonic Distorsion*), y 17, 18, 19 y 20 donde S corresponde a la potencia aparente en [VA], P a la potencia activa en [W], Q a la potencia reactiva en [VAr], D a la potencia de distorsión en [VAr] de la cual hay una componente debida a la distorsión armónica de corriente y otra a la distorsión armónica de tensión.

Parámetro	Va1	Vb1	Vc1
Magnitud v_1	127,067	126,996	126,996
Fase ₁ [r]	0,3483	-1,3962	2,6179
Magnitud v_5	15,2735	15,2735	15,2735
Fase ₅ [r]	0,3478	0,6967	0,5223
Magnitud v_7	10,1823	10,1823	10,1823
Fase ₇ [r]	-0,69995	1,7434	-2,6197
THD	0,14446	0,14446	0,14446
V.Eficaz	128,3861	128,3161	128,3161

TABLA 13

TENSIÓN EN TERMINALES DEL ALIMENTADOR

Parámetro	Ifa	Ifb	Ifc
Magnitud v_1	4,9928	5,0678	5,00419
Fase ₁ [r]	0,5932	-1,5034	2,6825
Magnitud v_5	0,00534	0,03184	0,004483
Fase ₅ [r]	0,34609	0,9655	0,5536
Magnitud v_7	0,01802	0,0309	0,0148
Fase ₇ [r]	-1,2903	1,64408	2,733
THD	0,00376	0,00876	0,003099
V.Eficaz	4,9929	5,0680	5,00421

TABLA 16

CORRIENTE QUE CIRCULA POR EL ALIMENTADOR

Parámetro	Pca	Pcb	Pcc
Magnitud v_1	127,2792	127,2085	127,279
Fase ₁ [r]	0,5864	-1,5046	2,6825
Magnitud v_5	0,0654	0,1330	0,2332
Fase ₅ [r]	0,9787	0,4762	0,6634
Magnitud v_7	0,4906	0,5182	0,4447
Fase ₇ [r]	-1,3278	1,0473	3,0211
THD	0,00388	0,0042	0,003945
V.Eficaz	127,2801	127,2096	127,2802

TABLA 14

TENSIÓN EN EL PCC

Al comparar la tabla 13 con la 14 se observa una reducción considerable en la THD de la señal de tensión que proporciona el alimentador y la tensión en PCC. De las tablas 15 y 16 se observa una gran reducción la THD de la señal de corriente de la carga, además de la reducción del desbalance presente por las ramas RL y RC conectadas entre líneas.

Parámetro	Ia	Ib	Ic
Magnitud v_1	4,8458	5,4560	4,7928
Fase ₁ [r]	0,7826	-1,3978	2,7209
Magnitud v_5	0,9560	0,9504	0,9419
Fase ₅ [r]	-2,2410	-0,1321	1,9513
Magnitud v_7	0,3098	0,2750	0,2994
Fase ₇ [r]	-1,6193	2,5918	0,5861
THD	0,2074	0,1813	0,2062
V.Eficaz	4,9489	5,5450	4,8936

TABLA 15

CORRIENTE EN LA CARGA

En la tabla 17 se muestran las potencias suministradas por el alimentador sin considerar la corrección de tensión y de corriente aportadas por el UPQC, es decir, se relacionan las tensiones V_1 y las corrientes I_L , se observa una alta demanda de potencia debida a la distorsión armónica de corriente y de tensión comparándola con la potencia activa y reactiva que tendría que suministrar la fuente sin el UPQC.

Parámetro	Fase _A	Fase _B	Fase _C	3ϕ
S.Apapente	635,3716	711,5142	627,9288	1974,814
P.Activa	559,966	715,855	617,1707	1892,99
Q.Reactiva	248,877	-9,6869	76,611	315,801
D.Tensión	88,9518	100,1535	87,9783	277,0837
D.Corriente	127,6956	125,6423	125,5111	378,849
S.Fundam	615,742	692,896	608,664	1917,303
P.Fundam	558,5964	692,8959	605,4402	1856,932
Q.Fundam	259,0527	-1,08839	62,5657	320,53

TABLA 17

POTENCIAS DEL ALIMENTADOR SIN EL UPQC

La tabla 18 muestra la potencia consumida por la carga, la relación entre la tensión en el PCC y la corriente de la carga I_L . En la tabla 18 se observa una reducción considerable en la potencia de distorsión debida a la tensión comparándola con la tabla 11, ya que el inversor serie del UPQC operó reduciendo la distorsión armónica en la señal de tensión.

Parámetro	Fase _A	Fase _B	Fase _C	3φ
S.Aparente	629,8983	705,3784	622,8593	1958,136
P.Activa	605,0233	690,206	609,53	1904,76
Q.Reactiva	120,180	164,417	469,9929	754,591
D.Tensión	2,3986	2,9192	2,407	7,725
D.Corriente	127,908	125,8522	125,7906	379,5516
S.Fundam	616,77	694,0542	610,02	1920,8442
P.Fundam	604,94	690,098	609,5703	1904,609
Q.Fundam	120,2194	74,0635	23,5417	217,7859

TABLA 18
POTENCIA CONSUMIDA POR LA CARGA

La potencia real suministrada por el alimentador se muestra en la tabla 19, esto es la relación entre la tensión V_1 y la corriente I_s , se observa una considerable reducción en la potencia debida a la distorsión armónica de corriente y potencia reactiva con respecto a la tabla 17, manteniendo aún alta la potencia de distorsión debida a la señal de tensión.

Parámetro	Fase _A	Fase _B	Fase _C	3φ
S.Aparente	641,0213	650,3101	642,1222	1933,454
P.Activa	615,7394	640,6872	634,3487	1890,775
Q.Reactiva	153,701	-68,7395	40,8918	125,8538
D.Tensión	91,6516	93,0275	91,8593	276,538
D.Corriente	2,3887	5,6392	1,9698	9,9978
S.Fundamental	634,4308	643,5966	635,5146	1913,542
P.Fundamental	615,505	639,9046	634,19	1899,6
Q.Fundamental	153,8039	-68,8374	41,011	125,9774

TABLA 19
POTENCIAS SUMINISTRADA POR EL ALIMENTADOR

La potencia de la carga vista por el alimentador se muestra en la tabla 20, en esta tabla se relacionan las señales de tensión en PCC y las de corriente del alimentador I_s , se observa que la potencia aparente trifásica $S = 1917,139[VA]$ y la potencia activa trifásica $P = 1917,109[W]$ tienen un valor muy cercano, en cuyo caso el factor de potencia es muy cercano a la unidad, además una baja potencia reactiva $Q = 5,12[Var]$, de distorsión por tensión $D_V = 7,7[Var]$ y distorsión por corriente $D_I = 10,02[Var]$ comparadas con la tabla 17.

Parámetro	Fase _A	Fase _B	Fase _C	3φ
S.Aparente	635,4993	644,702	636,938	1917,139
P.Activa	635,499	644,702	636,938	1917,109
Q.Reactiva	4,325	0,7986	-0,00199	5,12232
D.Tensión	2,4714	2,7115	2,51326	7,6962
D.Corriente	2,3926	5,6486	1,9742	10,0156
S.Fundamental	635,49	644,67165	636,93	1917,091
P.Fundamental	635,475	644,671	636,93	1917,076
Q.Fundamental	4,3255	0,7876	0	5,1131

TABLA 20
POTENCIA DE LA CARGA VISTA POR EL ALIMENTADOR

De éstas tablas se puede concluir que el UPQC es un dispositivo que puede suplir perturbaciones en la red eléctrica que afectan la calidad de energía que se ve presente como pérdidas del sistema debido a señales de tensión y de corriente.

- Caso VI: Compensación de elevaciones de tensión para el caso V.

La figura 49 muestra la elevación de tensión, distorsión armónica y desbalances de tensión en el alimentador en cada una de las fases.

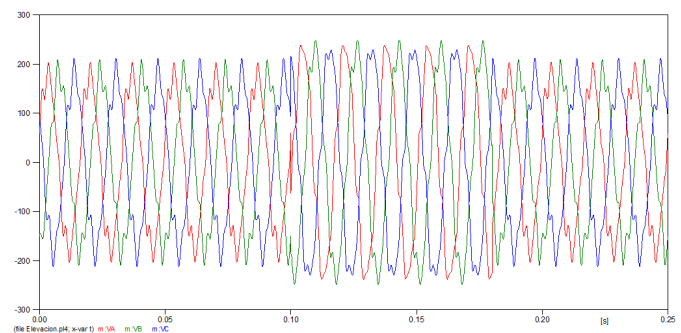


Figura 49. Elevación de tensión

Las tensiones y corrientes corregidas por el UPQC en las tres fases se observan en la figura 50. Se pudo corregir hasta un 30% la elevación de tensión, el desbalance de tensión y la distorsión armónica.

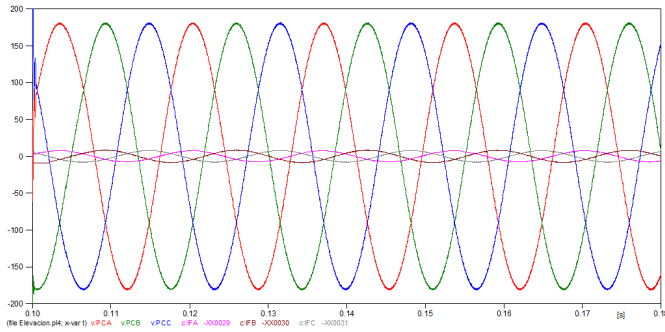


Figura 50. Tensiones y corrientes corregidas por el UPQC

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

1. Se verificó que el UPQC es efectivo para compensar las perturbaciones de tensión y de corriente, tales como distorsión armónica, desbalances en la carga, huecos de tensión, elevación de tensión y corrección del factor de potencia.
2. El conjunto de algoritmos filtro de Kalman y transformada dq0 son efectivos para estimar señales de referencia de tensión, del mismo modo la teoría de Fryze-Buchholz para estimar la señal de referencia de corriente y el control PI para la carga del condensador del lado de continua.
3. El filtro Kalman puede ser usado para la sincronización de las señales de referencia en las estrategias de compensación y energía optimizada o adelanto de fase para la corrección de fallas tipo huecos o elevaciones de tensión.
4. El inversor serie no puede compensar huecos de tensión sin energía externa en la red. En el caso del UPQC se puede lograr mediante la coordinación del inversor paralelo y el dispositivo de almacenamiento de energía del lado de continua.
5. Se requirió implementar un limitador de corriente conformado por una rama RC en paralelo al secundario del transformador de acople del inversor serie para que el control PI de la carga del lado de continua solo dependiera de la corriente inyectada por el inversor paralelo.
6. Se observó que al implementar el control por histéresis en el inversor serie y en el inversor paralelo la banda de histéresis de

tensión dependía del valor del condensador del filtro pasivo del inversor serie, del mismo modo la banda de histéresis de corriente dependía del valor de la bobina de acople del inversor paralelo.

7. Para el funcionamiento del inversor serie, se requirió seleccionar los valores del filtro pasivo, de modo que la tensión inyectada por el UPQC fuera la correcta para la corrección de las perturbaciones en la señal de tensión.

8.2. Recomendaciones para trabajos futuros

Al terminar este proyecto, hay cabida para recomendaciones que pueden ser tenidas en cuenta para mejorar el desempeño del UPQC en trabajos futuros y para el desarrollo de proyectos similares.

1. Implementación del UPQC en hardware.
2. En este proyecto se utilizó el control por histéresis en el inversor serie y en el inversor paralelo. Sin embargo, se podrían implementar técnicas de control (*Deadbeat*, Control PI y modulación por ancho de pulso *PWM*), debido a su fuerte utilización y ventajas frente al control convencional presentadas en la literatura actual.
3. Verificar el funcionamiento de otras estrategias de control para cargar el dispositivo de almacenamiento de energía del lado de continua (Lógica Difusa y redes neuronales artificiales).
4. Simular una topología diferente del UPQC como la paralela a la izquierda y realizar una comparación entre DVR - DSTATCOM y el UPQC.

REFERENCIAS

- [1] C. A. Ardila Ríos and A. Salamanca Ramírez, “Restaurador dinámico de tensión (dvr): Análisis y estrategias de control,” Pregrado, Universidad Industrial De Santander, 2010.
- [2] J. A. Romero Cárdenas and M. A. Gómez García, “Análisis, modelado y control de un compensador estático para sistemas de distribución,” Pregrado, Universidad Industrial de Santander, 2010.
- [3] “Norma técnica colombiana ntc 61000-4-30,” ICONTEC, p. 69, 12 2012.
- [4] E. J. Navas García and B. A. Jiménez Rivera, “Revisión de los métodos de monitorización de la calidad de la energía eléctrica,” Pregrado, Universidad Industrial De Santander, 2004.
- [5] A. M. Salinas Cala and s. J. Corredor Montero, “Diseño del prototipo del módulo para la monitorización de las perturbaciones de tensión para una unidad constructiva en el análisis de los parámetros de calidad de potencia eléctrica con base en el estándar iec 61000-4-30,” Pregrado, Universidad Industrial De Santander, 2009.
- [6] B. Angelo, Handbook of power quality, Ltd, Ed. Jon Wiley & Sons, 2008.
- [7] G. L. Aridam Ghosh, “Power quality enhancement using custom power devices,” Kluwers Power Electronics and Power Systems Series, 2002.
- [8] M. A. Mantilla Villalobos and J. F. Petit Suárez, “Compensadores estáticos de potencia: Visión general y revisión del estado del arte,” UIS Ingenierías, vol. 9, pp. 1–13, 2010.
- [9] N. Woodley, A. Sundaram, B. Coulter, and D. Morris, “Dynamic voltage restorer demonstration project experience,” in Conf. Electric Power Supply Industry (CEPSI), 1998.
- [10] J. G. Nielsen, F. Blaabjerg, and N. Mohan, “Control strategies for dynamic voltage restorer compensating voltage sags with phase jump,” IEEE, vol. 2, pp. 1267 – 1273, 2001.
- [11] B. J. Quirl, B. K. Johnson, and H. L. Hess, “Mitigation of voltage sags with phase jump using a dynamic voltage restorer,” IEEE, pp. 647–654, 2006.
- [12] a. Emadi, A. Nasiri, and S. B. Bekiarov, Uninterruptible Power Supplies and Active Filters, S. E. Muhammad H. Rashid, Ed. CRC Press, 2005.
- [13] C. D. Conde Prieto and M. C. Gamboa González, “Estudio del uso de compensadores activos (custom power devices) para el mejoramiento de la calidad de la energía eléctrica en los sistemas de distribución,” Pregrado, Universidad Industrial De Santander, 2011.
- [14] M. A. Mantilla Villalobos, “Modelado y simulación en tiempo real de un compensador estático de potencia para sistemas de distribución,” Pregrado, Universidad Industrial De Santander, 2011.
- [15] C. A. Duarte Gualdrón, “Técnicas de procesamiento de señales para la monitorización de la calidad de la energía eléctrica,” Maestría, Universidad Industrial De Santander, 2004.
- [16] S. Alepuz Meléndez, “Aportación al control del convertido cc/ca de tres niveles,” Ph.D. dissertation, Universidad Politécnica Cataluña, 2004.
- [17] M. Pietzsch García, “Convertidores cc/ca para la conexión directa a red de sistemas fotovoltaicos: comparación entre topologías de 2 y 3 niveles,” Pregrado, Universidad Politécnica de Cataluña, 2004.
- [18] W. Jing, X. Ai Qin, and S. Yueyue, “A survey on control strategies of dynamic voltage restorer,” in 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2008.
- [19] I.-Y. Chung, D.-J. Won, S.-Y. Park, S.-I. Moon, and J.-K. Park, “The dc link energy control method in dynamic voltage restorer system,” International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 25, pp. 525–531, 2003.
- [20] D. M. Vilathgamuwa, A. A. D. R. Perera, and S. S. Choi, “Voltage sag compensation with energy optimized dynamic voltage restorer,” Power Delivery, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, pp. 928–936, 2003.
- [21] J. Petit, “Control de filtros activos de potencia para la mitigación de armónicos y mejora del factor de potencia en sistemas desequilibrados (in spanish),” Ph.D. dissertation, Universidad Carlos III de Madrid, Oct 2007.
- [22] V. Staudt, “Fryze - buchholz - depenbrock: A time-domain power theory,” June 2008, pp. 1–12.
- [23] N. S. Castebianco Rodríguez, “Filtros activos control por dsp de un filtro activo para la compensación de corrientes armónicas,” Pregrado, Universidad Industrial de Santander, 2006.
- [24] A. Jaya Laxmi, G. Tulasi Ram Das, K. Uma Rao, K. Sreekanthi, and K. Rayudu, “Different control strategies for unified power quality conditioner at load side,” Industrial Electronics and Applications, pp. 1 – 7, 2006.
- [25] M. Jovica, “Voltage dips causes and consequences,” in EES-UETP Course: Voltages Dips- Causes, Effects and Mitigation, Junio 2001.

9. ANEXOS

A.1 Código Model para Filtro Kalman:

```

MODEL kalmanupqc4

INPUT Vin

OUTPUT Amp1, Fase1, Idf

DATA frec{dflt:60}
      ti{dflt:5e-3}
      R{dflt:100}
      q{dflt:15}
      condx1{dflt:0}
      condx2{dflt:0}
      tole{dflt:0.05}

VAR  P1[1..6],P2[1..6],P3[1..6],P4[1..6],P5[1..6],P6[1..6]
      X[1..6],Xo[1..6],Amp1,Amp3,Amp5,Fase1,Fase3,Fase5
      Po1[1..6],Po2[1..6],Po3[1..6],Po4[1..6],Po5[1..6],Po6[1..6],K[1..6]
      numK[1..6],denK,est1[1..6],PF1[1..6],PF2[1..6]
      fa1,fa2,fa3,fa4,fa5,fa6
      PF3[1..6],PF4[1..6],PF5[1..6],PF6[1..6],tr,Id,val,magn,Idf,est2
      x1,x2,x3,x4,x5,x6,fic1,fis1,fic3,fis3,fic5,fis5,arm1,arm3,arm5

init
magn:=0
val:=0
tr:=0
Id:=1
Xo[1]:=condx1
Xo[2]:=condx2
Xo[3]:=condx1
Xo[4]:=condx2
Xo[5]:=condx1
Xo[6]:=condx2
Po1[1]:=q
Po1[2..6]:=0
Po2[1]:=0
Po2[2]:=q
Po2[3..6]:=0
Po3[1..2]:=0
Po3[3]:=q
Po3[4..6]:=0
Po4[1..3]:=0
Po4[4]:=q
Po4[5..6]:=0
Po5[1..4]:=0

```

```

Po5[5]:=q
Po5[6]:=0
Po6[1..5]:=0
Po6[6]:=q
fic1:=cos(frec*2*pi*timestep)
fis1:=sin(frec*2*pi*timestep)
fic3:=cos(3*frec*2*pi*timestep)
fis3:=sin(3*frec*2*pi*timestep)
fic5:=cos(5*frec*2*pi*timestep)
fis5:=sin(5*frec*2*pi*timestep)
endinit

EXEC

P1[1..6]:=Po1[1..6]
P2[1..6]:=Po2[1..6]
P3[1..6]:=Po3[1..6]
P4[1..6]:=Po4[1..6]
P5[1..6]:=Po5[1..6]
P6[1..6]:=Po6[1..6]
X[1..6]:=Xo[1..6]

denK:=P1[1]+P3[1]+P5[1]+P1[3]+P3[3]+P5[3]+P1[5]+P3[5]+P5[5]+R
numK[1]:=P1[1]+P1[3]+P1[5]
numK[2]:=P2[1]+P2[3]+P2[5]
numK[3]:=P3[1]+P3[3]+P3[5]
numK[4]:=P4[1]+P4[3]+P4[5]
numK[5]:=P5[1]+P5[3]+P5[5]
numK[6]:=P6[1]+P6[3]+P6[5]
K[1..6]:=numK[1..6]/denK

est1[1]:=X[1]
est1[2]:=0
est1[3]:=X[3]
est1[4]:=0
est1[5]:=X[5]
est1[6]:=0
est2:=Vin-est1[1]-est1[2]-est1[3]-est1[4]-est1[5]-est1[6]
X[1]:=X[1]+K[1]*est2
X[2]:=X[2]+K[2]*est2
X[3]:=X[3]+K[3]*est2
X[4]:=X[4]+K[4]*est2
X[5]:=X[5]+K[5]*est2
X[6]:=X[6]+K[6]*est2

fa1:=P1[1]+P3[1]+P5[1]
fa2:=P1[2]+P3[2]+P5[2]
fa3:=P1[3]+P3[3]+P5[3]
fa4:=P1[4]+P3[4]+P5[4]
fa5:=P1[5]+P3[5]+P5[5]
fa6:=P1[5]+P3[5]+P5[5]

P1[1]:=P1[1]-K[1]*fa1
P1[2]:=P1[2]-K[1]*fa2
P1[3]:=P1[3]-K[1]*fa3
P1[4]:=P1[4]-K[1]*fa4
P1[5]:=P1[5]-K[1]*fa5

```

```
P1[6]:=P1[6]-K[1]*fa6
```

```
P2[1]:=P2[1]-K[2]*fa1
P2[2]:=P2[2]-K[2]*fa2
P2[3]:=P2[3]-K[2]*fa3
P2[4]:=P2[4]-K[2]*fa4
P2[5]:=P2[5]-K[2]*fa5
P2[6]:=P2[6]-K[2]*fa6
```

```
P3[1]:=P3[1]-K[3]*fa1
P3[2]:=P3[2]-K[3]*fa2
P3[3]:=P3[3]-K[3]*fa3
P3[4]:=P3[4]-K[3]*fa4
P3[5]:=P3[5]-K[3]*fa5
P3[6]:=P3[6]-K[3]*fa6
```

```
P4[1]:=P4[1]-K[4]*fa1
P4[2]:=P4[2]-K[4]*fa2
P4[3]:=P4[3]-K[4]*fa3
P4[4]:=P4[4]-K[4]*fa4
P4[5]:=P4[5]-K[4]*fa5
P4[6]:=P4[6]-K[4]*fa6
```

```
P5[1]:=P5[1]-K[5]*fa1
P5[2]:=P5[2]-K[5]*fa2
P5[3]:=P5[3]-K[5]*fa3
P5[4]:=P5[4]-K[5]*fa4
P5[5]:=P5[5]-K[5]*fa5
P5[6]:=P5[6]-K[5]*fa6
```

```
P6[1]:=P6[1]-K[6]*fa1
P6[2]:=P6[2]-K[6]*fa2
P6[3]:=P6[3]-K[6]*fa3
P6[4]:=P6[4]-K[6]*fa4
P6[5]:=P6[5]-K[6]*fa5
P6[6]:=P6[6]-K[6]*fa6
```

```
x1:=X[1]
x2:=X[2]
x3:=X[3]
x4:=X[4]
x5:=X[5]
x6:=X[6]
```

```
Amp1:=NORM(x1,x2)
if x[1]>=0 then
    Fase1:=atan(x2/x1)+pi/2
else
    Fase1:=atan(x2/x1)+3*pi/2
endif
```

```
Amp3:=NORM(x3,x4)
Fase3:=atan(x4/x3)+pi/2
Amp5:=NORM(x5,x6)
Fase5:=atan(x6/x5)+pi/2
```

```

Xo[1]:=fic1*X[1]-fis1*X[2]
Xo[2]:=fis1*X[1]+fic1*X[2]
Xo[3]:=fic3*X[3]-fis3*X[4]
Xo[4]:=fis3*X[3]+fic3*X[4]
Xo[5]:=fic5*X[5]-fis5*X[6]
Xo[6]:=fis5*X[5]+fic5*X[6]

PF1[1]:=fic1*P1[1]+fis1*P2[1]
PF1[2]:=fic1*P1[2]+fis1*P2[2]
PF1[3]:=fic1*P1[3]+fis1*P2[3]
PF1[4]:=fic1*P1[4]+fis1*P2[4]
PF1[5]:=fic1*P1[5]+fis1*P2[5]
PF1[6]:=fic1*P1[6]+fis1*P2[6]

PF2[1]:=-fis1*P1[1]+fic1*P2[1]
PF2[2]:=-fis1*P1[2]+fic1*P2[2]
PF2[3]:=-fis1*P1[3]+fic1*P2[3]
PF2[4]:=-fis1*P1[4]+fic1*P2[4]
PF2[5]:=-fis1*P1[5]+fic1*P2[5]
PF2[6]:=-fis1*P1[6]+fic1*P2[6]

PF3[1]:=fic3*P3[1]+fis3*P4[1]
PF3[2]:=fic3*P3[2]+fis3*P4[2]
PF3[3]:=fic3*P3[3]+fis3*P4[3]
PF3[4]:=fic3*P3[4]+fis3*P4[4]
PF3[5]:=fic3*P3[5]+fis3*P4[5]
PF3[6]:=fic3*P3[6]+fis3*P4[6]

PF4[1]:=-fis3*P3[1]+fic3*P4[1]
PF4[2]:=-fis3*P3[2]+fic3*P4[2]
PF4[3]:=-fis3*P3[3]+fic3*P4[3]
PF4[4]:=-fis3*P3[4]+fic3*P4[4]
PF4[5]:=-fis3*P3[5]+fic3*P4[5]
PF4[6]:=-fis3*P3[6]+fic3*P4[6]

PF5[1]:=fic5*P5[1]+fis5*P6[1]
PF5[2]:=fic5*P5[2]+fis5*P6[2]
PF5[3]:=fic5*P5[3]+fis5*P6[3]
PF5[4]:=fic5*P5[4]+fis5*P6[4]
PF5[5]:=fic5*P5[5]+fis5*P6[5]
PF5[6]:=fic5*P5[6]+fis5*P6[6]

PF6[1]:=-fis5*P5[1]+fic5*P6[1]
PF6[2]:=-fis5*P5[2]+fic5*P6[2]
PF6[3]:=-fis5*P5[3]+fic5*P6[3]
PF6[4]:=-fis5*P5[4]+fic5*P6[4]
PF6[5]:=-fis5*P5[5]+fic5*P6[5]
PF6[6]:=-fis5*P5[6]+fic5*P6[6]

Po1[1]:=PF1[1]*fic1+q
Po1[2]:=PF1[2]*fis1

Po2[1]:=PF2[1]*-fis1
Po2[2]:=PF2[2]*fic1+q

Po3[3]:=PF3[3]*fic3+q
Po3[4]:=PF3[3]*fis3

```

```

Po4[3]:=PF4[3]*-fis3
Po4[4]:=PF4[4]*fic3+q

Po5[5]:=PF5[5]*fic5+q
Po5[6]:=PF5[6]*fis5

Po6[5]:=PF6[5]*-fis5
Po6[6]:=PF6[6]*fic5+q

magn:=Amp1-val
if t=0 then
Id:=1
else
Id:=0
endif

if abs(magn)>tole and t>10e-3 then
Id:=0
endif

if Id=0 then
tr:=tr+timestep
endif

if tr>ti*1e-3 then
Id:=1
tr:=0
endif

Idf:=Id
val:=Amp1

ENDEXEC

ENDMODEL

```

A.2 Código Model para la Transformada Park [13]:

Tomado del proyecto de grado “Restaurador Dinámico De Tensión (DVR): Análisis y simulación de control. Ardila Ríos y Salamanca Ramírez.

```

MODEL park5

INPUT Va,Vb,Vc,Vka,PhA,Idfa,Vkb,PhB,Idfb,Vkc,PhC,Idfc

OUTPUT VaC,VbC,VcC2,FAT,Vh1,Vh2,Vh3

Data Magp {dflt:180}
      fp   {dflt:0.998}
      ta   {dflt:5}
      r    {dflt:10}
      sim  {dflt:1}

VAR FAT,VaC,VbC,VcC2,dfase,qfase,ofase,dcfase,qcfase,ocfase,FaseA

```

```
Vh1,Vh2,Vh3,wr,dpre,qppe,opre,dcpre,qcpre,ocpre,Vapre,Vbpre,Vcpre,ele,hue
,x,y
aolp,wx,Voa,Vob,Voc,da,db,dc,Vafase,Vbfase,Vcfase,Magpre1,Magpre
```

```
init
```

```
wr:=0
wx:=0
FaseA:=0
```

```
dfase:=0
qfase:=0
ofase:=0
```

```
dcfase:=0
qcfase:=0
ocfase:=0
```

```
Vafase:=0
Vbfase:=0
Vcfase:=0
```

```
VaC:=0
VbC:=0
VcC2:=0
```

```
Vh1:=0
Vh2:=0
Vh3:=0
```

```
endinit
```

```
EXEC
```

```
FAT:= Idfa and Idfb and Idfc
```

```
if sim=3 then FAT:=1 endif
```

```
Magpre:=Magp
```

```
wr:=wr+timestep*120*pi
if wr>=2*pi then wr:=0 endif
if t>ta*1e-3 then
  if (0.95*Magpre)>Vka or FAT=0 then
    if FaseA>2*pi then
      FaseA:=0
    else
      FaseA:=FaseA+timestep*120*pi
    endif
  elseif (1.05*Magpre)<Vka or FAT=0 then
    if FaseA>2*pi then
      FaseA:=0
    else
      FaseA:=FaseA+timestep*120*pi
    endif
  else

```

```

        FaseA:=PhA
    endif

dpre:=2/3*(Va*sin(FaseA)+Vb*sin(FaseA-2*pi/3)+Vc*sin(FaseA+2*pi/3))
qpre:=2/3*(Va*cos(FaseA)+Vb*cos(FaseA-2*pi/3)+Vc*cos(FaseA+2*pi/3))
opre:=1/3*(Va+Vb+Vc)

dcpre:=Magpre-dpre
qcpre:=-qpre
ocpre:=-opre

Vapre:=(dcpre*sin(FaseA)+qcpre*sin(FaseA+90*pi/180)+ocpre)/r
Vbpre:=(dcpre*sin(FaseA-2*pi/3)+qcpre*sin(FaseA-
2*pi/3+90*pi/180)+ocpre)/r
Vcpre:=(dcpre*sin(FaseA+2*pi/3)+qcpre*sin(FaseA+2*pi/3+90*pi/180)+ocpre)/
r

dfase:=2/3*(Va*sin(FaseA)+Vb*sin(FaseA-2*pi/3)+Vc*sin(FaseA+2*pi/3))
qfase:=2/3*(Va*cos(FaseA)+Vb*cos(FaseA-2*pi/3)+Vc*cos(FaseA+2*pi/3))
ofase:=1/3*(Va+Vb+Vc)

Magpre1:=sqrt(3/2)*Vka
dcfase:=Magpre1-dfase*sqrt(3/2)
qcfase:=-qfase
ocfase:=-ofase

Vafase:=(dcfase*sin(FaseA)+qcfase*sin(FaseA+90*pi/180)+ocfase)/r
Vbfase:=(dcfase*sin(FaseA-2*pi/3)+qcfase*sin(FaseA-
2*pi/3+90*pi/180)+ocfase)/r
Vcfase:=(dcfase*sin(FaseA+2*pi/3)+qcfase*sin(FaseA+2*pi/3+90*pi/180)+ocfa
se)/r

if (1.05*Magpre)<Vka or (1.05*Magpre)<Vkb or (1.05*Magpre)<Vkc then
ele:=1
else
ele:=0
endif

IF (0.95*Magpre)>Vka or (0.95*Magpre)>Vkb or (0.95*Magpre)>Vkc or FAT=0
or ele=1 THEN
    hue:=1
    ELSE
    hue:=0
ENDIF

IF hue=1 then

--Cálculo deltas

    da:=(PhA)-(FaseA)
    db:=(PhB)-(FaseA)+120*pi/180
    dc:=(PhC)-(FaseA)-120*pi/180
--

    x:=Vka*cos(da)+Vkb*cos(db)+Vkc*cos(dc)
    y:=Vka*sin(da)+Vkb*sin(db)+Vkc*sin(dc)

```

```

--Condición compensación con cero energía activa

wx:=3*Magpre*fp/sqrt(x**2+y**2);
if sqrt(x**2+y**2)>=3*Magpre*fp then

    aolp:=acos(fp)+atan(y/x)-acos(3*Magpre*fp/sqrt(x**2+y**2))

else
    aolp:=acos(fp)+atan(y/x)
endif

Voa:=(Magpre*sin(120*pi*t+aolp+(FaseA-wr))-Va)/r
Vob:=(Magpre*sin(120*pi*t+aolp+((FaseA-120*pi/180)-wr))-Vb)/r
Voc:=(Magpre*sin(120*pi*t+aolp+((FaseA+120*pi/180)-wr))-Vc)/r

ELSE

Voa:=0
Vob:=0
Voc:=0
da:=0
db:=0
dc:=0

Vapre:=0
Vbpre:=0
Vcpre:=0
if sim<>2 then

Vafase:=0
Vbfase:=0
Vcfase:=0

endif
ENDIF

ELSE

Vapre:=0
Vbpre:=0
Vcpre:=0

Vafase:=0
Vbfase:=0
Vcfase:=0

Voa:=0
Vob:=0
Voc:=0
da:=0
db:=0
dc:=0

ENDIF

```

```

if sim=1 then
  VaC:=Vapre
  VbC:=Vbpre
  VcC2:=Vcpre

elsif sim=2 or sim=3 then

VaC:=Vafase
VbC:=Vbfase
VcC2:=Vcfase

else

  VaC:=Voa
  VbC:=Vob
  VcC2:=Voc

endif

Vh1:=Va-VaC
Vh2:=Vb-VbC
Vh3:=Vc-VcC2

ENDEXEC

ENDMODEL

```

A.3 Código Model para la Fryze:

```

MODEL fryzeupqcl

INPUT Vaa,Vbb,Vcc,Ia,Ib,Ic

OUTPUT Ipa,Ipb,Ipc,ICa, ICb, ICc

DELAY CELLS(Pm2): 1/frec/timestep +1

DATA frec {dflt:60}
      ini {dflt:0}

VAR Ve,pt,per,Pa,Pb,Pc,Pp,Pm2,potm,Ipa,Ipb,Ipc,ICa,ICb,ICc,Ge

init

per:= recip(frec)
histdef(Pm2) := 0
integral(Pp) := 0
IF ini <0 THEN potm:=0 ELSE potm:=ini ENDIF
pt:=0

endinit

```

```

EXEC

Ve:=NORM(Vaa,Vbb,Vcc)
Pa:=Vaa*Ia
Pb:=Vbb*Ib
Pc:=Vcc*Ic
Pp:=Pa+Pb+Pc
Pm2:=integral(Pp)
pt:=delay(Pm2,per)
potm:=(Pm2 - delay(Pm2,per))/per
Ge:=potm/(Ve**2)
Ipa:=Ge*Vaa
Ipb:=Ge*Vbb
Ipc:=Ge*Vcc
ICa:=Ia-Ipa
ICb:=Ib-Ipb
ICc:=Ic-Ipc

ENDEXEC

ENDMODEL

```

A.4 Código Model para la histéresis de Tensión:

```

MODEL histe

INPUT  VAp,VAn,VBp,VBn,VCp,VCn,VRa,VRb,VRc
OUTPUT sa1, sa2, sa3, sa4, sb1, sb2, sb3, sb4, sc1, sc2, sc3, sc4
  DATA h      {dflt:0.05}
        INVS {dflt:-1}

VAR sa1, sa2, sa3, sa4, sb1, sb2, sb3, sb4, sc1, sc2, sc3, sc4,
    Vpa, Vpb, Vpc, Vsva, Vsvb, Vsvc, Viva, Vivb, Vivic

init
sa1:=0
sa2:=0
sa3:=0
sa4:=0
sb1:=0
sb2:=0
sb3:=0
sb4:=0
sc1:=0
sc2:=0
sc3:=0
sc4:=0
Vsva:=0
Vsvb:=0

```

```

Vsvc:=0
Viva:=0
Vivb:=0
Vivc:=0
endinit

EXEC

Vpa:=VAp-VAn
Vsva:=(INVS)*VRa+h
Viva:=(INVS)*VRa-h

Vpb:=VBp-VBn
Vsvb:=(INVS)*VRb+h
Vivb:=(INVS)*VRb-h

Vpc:=VCp-VCn
Vsvc:=(INVS)*VRc+h
Vivc:=(INVS)*VRc-h

if Vpa>Vsva then
  sa1:=0
  sa2:=0
  sa3:=1
  sa4:=1
endif
if Vpb>Vsvb then
  sb1:=0
  sb2:=0
  sb3:=1
  sb4:=1
endif
if Vpc>Vsvc then
  sc1:=0
  sc2:=0
  sc3:=1
  sc4:=1
endif

if Vpa<Viva then
  sa1:=1
  sa2:=1
  sa3:=0
  sa4:=0
endif
if Vpb<Vivb then
  sb1:=1
  sb2:=1
  sb3:=0
  sb4:=0
endif
if Vpc<Vivc then
  sc1:=1
  sc2:=1
  sc3:=0
  sc4:=0
endif

```

```
ENDEXEC
ENDMODEL
```

A.5 Código Model para la histéresis de Corriente:

```
MODEL histeresisupqc4

INPUT IRE1, IRE2, IRE3, I1, I2, I3

OUTPUT Coa1, Coa2, Cob1, Cob2, Coc1, Coc2

DATA frec{dflt:60}
      hist{dflt:0.05}
      tole{dflt:0.05}

VAR Coa1, Cob1, Coc1, Coa2, Cob2, Coc2, h, Ihap, Ihbp, Ihcp, Ihan, Ihbn,
Ihcn

init
h:=hist
Ihap:=0
Ihbp:=0
Ihcp:=0
Ihan:=0
Ihbn:=0
Ihcn:=0
Coa1:=0
Coa2:=0
Cob1:=0
Cob2:=0
Coc1:=0
Coc2:=0
endinit

EXEC

Ihap:=IRE1+h
Ihbp:=IRE2+h
Ihcp:=IRE3+h
Ihan:=IRE1-h
Ihbn:=IRE2-h
Ihcn:=IRE3-h

if I1>=Ihap then
Coa1:=0
Coa2:=1
endif

if I2>=Ihbp then
Cob1:=0
```

```

Cob2:=1
endif

if I3>=Ihcp then
Coc1:=0
Coc2:=1
endif

if I1<=Ihan then
Coa1:=1
Coa2:=0
endif

if I2<=Ihbn then
Cob1:=1
Cob2:=0
endif

if I3<=Ihcn then
Coc1:=1
Coc2:=0
endif

ENDEXEC

ENDMODEL

```

A.6 Código Model Control PI lado continua:

```

MODEL busdcl

INPUT  VPOS,VNEG,VFA,VFB,VFC,ICA,ICB,ICC

OUTPUT IRE1,IRE2,IRE3

Data  Kp    {dflt:1}
      Ki    {dflt:0.1}
      corr {dflt:0.0001}
      UDCREF{dflt:450}

VAR
IREFA,IREFB,IREFC,ERROR,VCON,INTE,IRE1,IRE2,IRE3,CPI,DIVA,DIVB,DIVC,URMS

INIT
ERROR:=0
IREFA:=0
IREFB:=0
IREFC:=0
IRE1:=0
IRE2:=0
IRE3:=0
histdef(INTE):=0
integral(ERROR):=0
ENDINIT

```

```

EXEC
URMS:=sqrt((2/3)*(VFA**2+VFB**2+VFC**2))
VCON:=VPOS-VNEG
ERROR:=UDCREP-VCON
INTE:=integral(ERROR)
CPI:=Kp*ERROR+Ki*INTE
DIVA:=VFA/(URMS+corr)
DIVB:=VFB/(URMS+corr)
DIVC:=VFC/(URMS+corr)

IREFA:=CPI*DIVA
IREFB:=CPI*DIVB
IREFC:=CPI*DIVC

IRE1:=IREFA+ICA
IRE2:=IREFB+ICB
IRE3:=IREFC+ICC

ENDEXEC
ENDMODEL

```

A.7 Código Model Fuente de alimentación [13]:

Tomado del proyecto de grado "Restaurador Dinámico De Tensión (DVR): Análisis y simulación de control. Ardila Ríos y Salamanca Ramírez.

```
MODEL fharm
```

```

OUTPUT VSAL
DATA Varmag {dflt:0}-- PORCENTAJE DE REDUCCIÓN O ELVACIÓN
  Frec {dflt:60}
  Amp1 {dflt:120}
  t1 {dflt:-1}
  t2 {dflt:-1}
  Fase {dflt:0}
  Varfase {dflt:0}
  Varfrec {dflt:0}
  nH_a {dflt:0}
  nH_b {dflt:0}
  nH_c {dflt:0}
  Amp_Ha {dflt:0}
  Amp_Hb {dflt:0}
  Amp_Hc {dflt:0}
  Fase_Ha {dflt:0}
  Fase_Hb {dflt:0}
  Fase_Hc {dflt:0}
  th1 {dflt:-1}
  th2 {dflt:-1}

```

```
VAR M, VSAL, cam, ay1, t23
```

```

init
t23:=-1
endinit
EXEC

if Varmag<>0 then
  M:= 1+Varmag
  cam:= Ampl*M*cos(Frec*2*pi*t+Fase*pi/180)
endif
if Varfase<>0 then
  cam:= Ampl*cos(Frec*2*pi*t+Varfase*pi/180+Fase*pi/180)
endif
if Varfrec<>0 then
  cam:=Ampl*cos((Frec+Varfrec)*2*pi*t+Fase*pi/180)
endif
if Varfase<>0 and Varfrec<>0 then
  cam:=Ampl*cos((Frec+Varfrec)*2*pi*t+Fase*pi/180+Varfase*pi/180)
endif

if Varmag<>0 and Varfrec<>0 then
  cam:=M*Ampl*cos((Frec+Varfrec)*2*pi*t+Fase*pi/180)
endif

if Varmag<>0 and Varfase<>0 then
  cam:=M*Ampl*cos(Frec*2*pi*t+Varfase*pi/180+Fase*pi/180)
endif

if Varmag<>0 and Varfrec<>0 and Varfase<>0 then
  cam:=M*Ampl*cos((Frec+Varfrec)*2*pi*t+Fase*pi/180+Varfase*pi/180)
endif

IF Varmag<>0 or Varfase<>0 or Varfrec<>0 then

  if t1=0 then
    Vsal:=cam
    if t>t2 then
      Vsal:= Ampl*cos(Frec*2*pi*t+Fase*pi/180)
    endif
    else

    IF t<=t1 then

      VSAL := Ampl*cos(Frec*2*pi*t+Fase*pi/180)

    ENDIF
    IF t>=t1 then
      IF t<t2 then
        VSAL := cam
      endif
    endif
    if t>t2 then

      VSAL := Ampl*cos(Frec*2*pi*t+Fase*pi/180)
    endif
  endif
endif

```

```
        endif
    endif
else
    VSAL := Ampl*cos(Frec*2*pi*t+Fase*pi/180)
endif

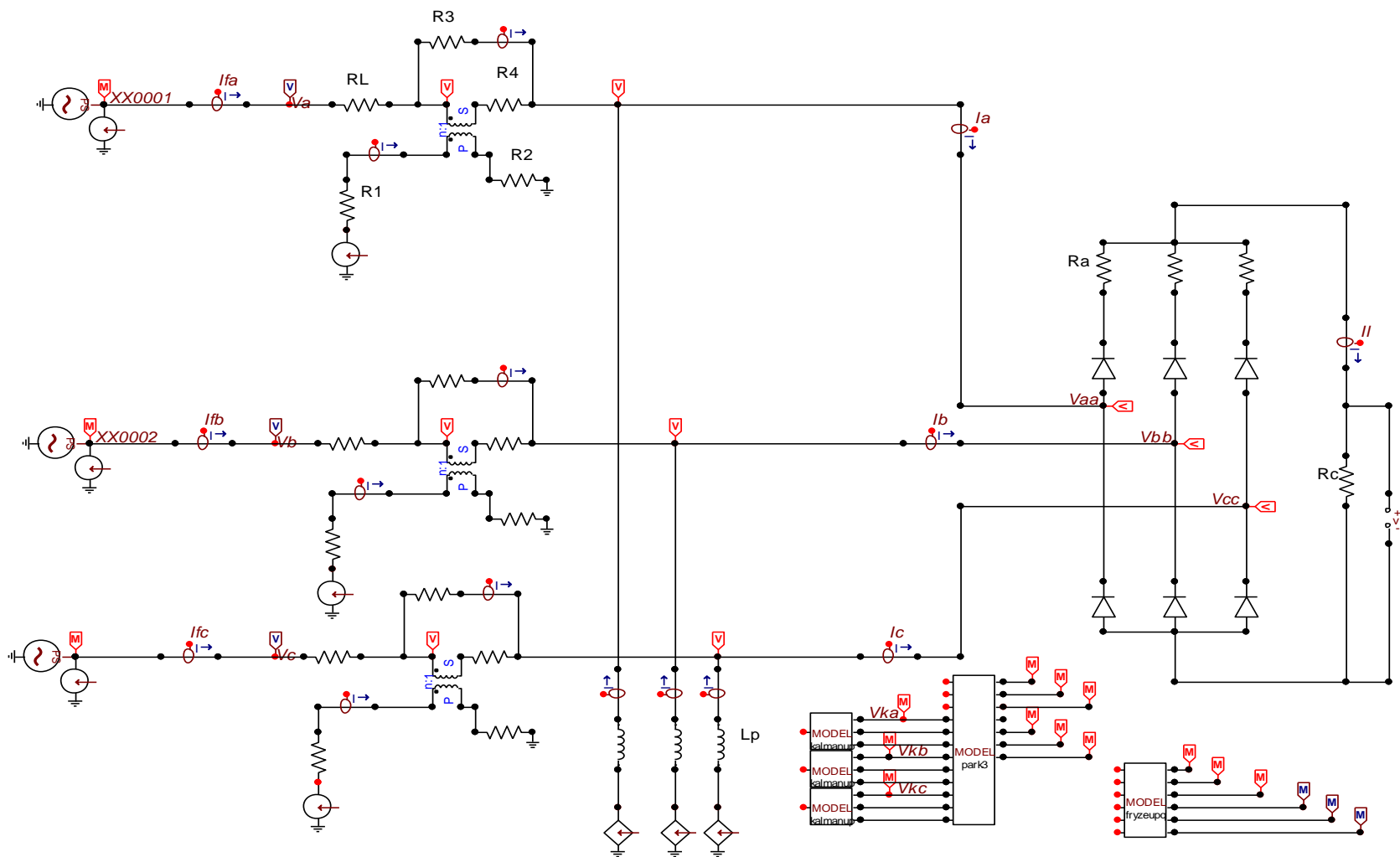
if Amp_Ha<>0 or Amp_Hb <>0 or Amp_Hc<>0 THEN
if t>=th1 and t<=th2 then

Vsal:=Vsal+Ampl*Amp_Ha*cos(nH_a*Frec*2*pi*t+Fase*pi/180+Fase_Ha*pi/180)+A
mpl*Amp_Hb*cos(nH_b*Frec*2*pi*t+Fase*pi/180+Fase_Hb*pi/180)

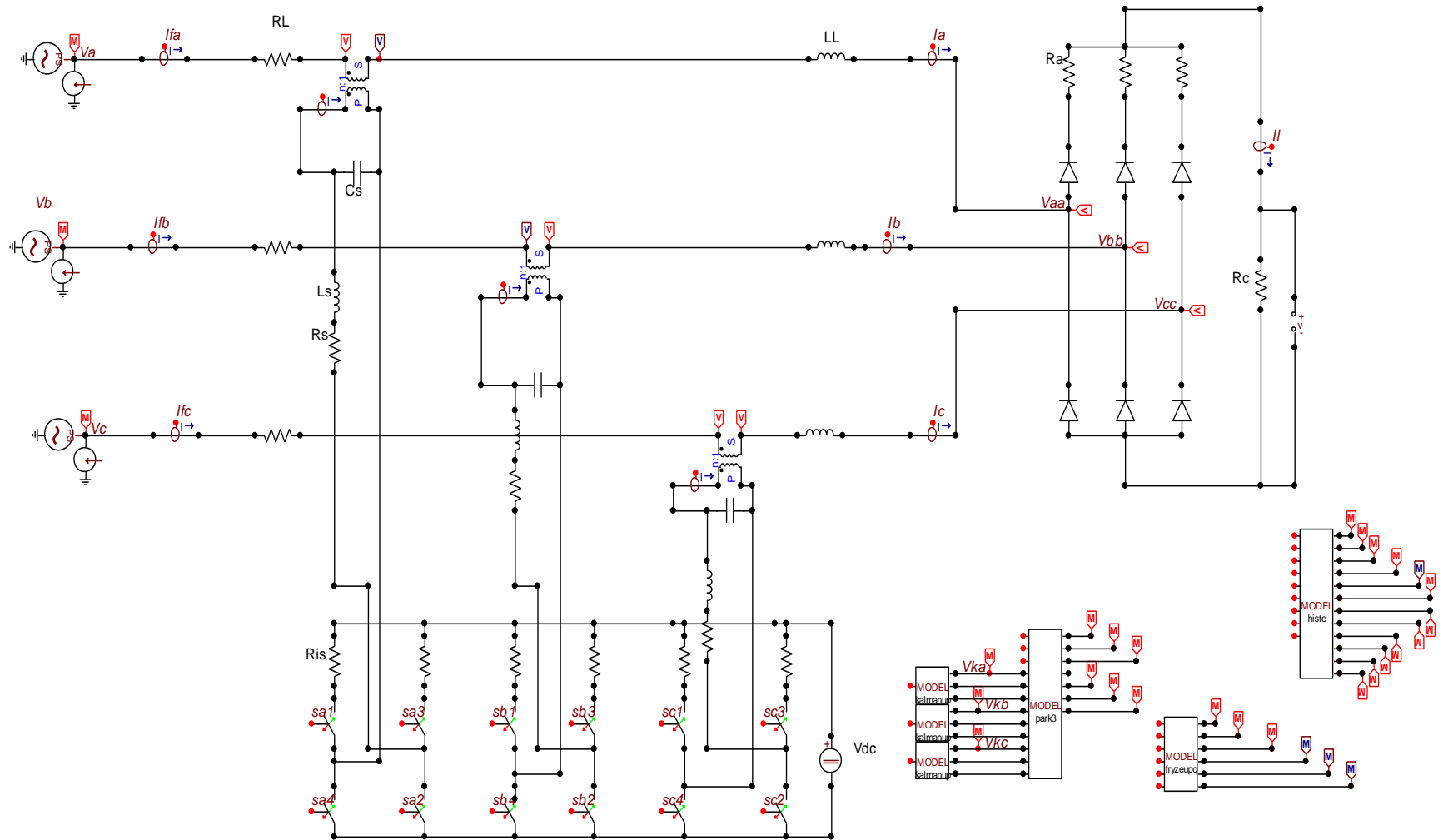
Vsal:=Vsal+Ampl*Amp_Hc*cos(nH_c*Frec*2*pi*t+Fase*pi/180+Fase_Hc*pi/180)
endif
endif

ENDEXEC
ENDMODEL
```

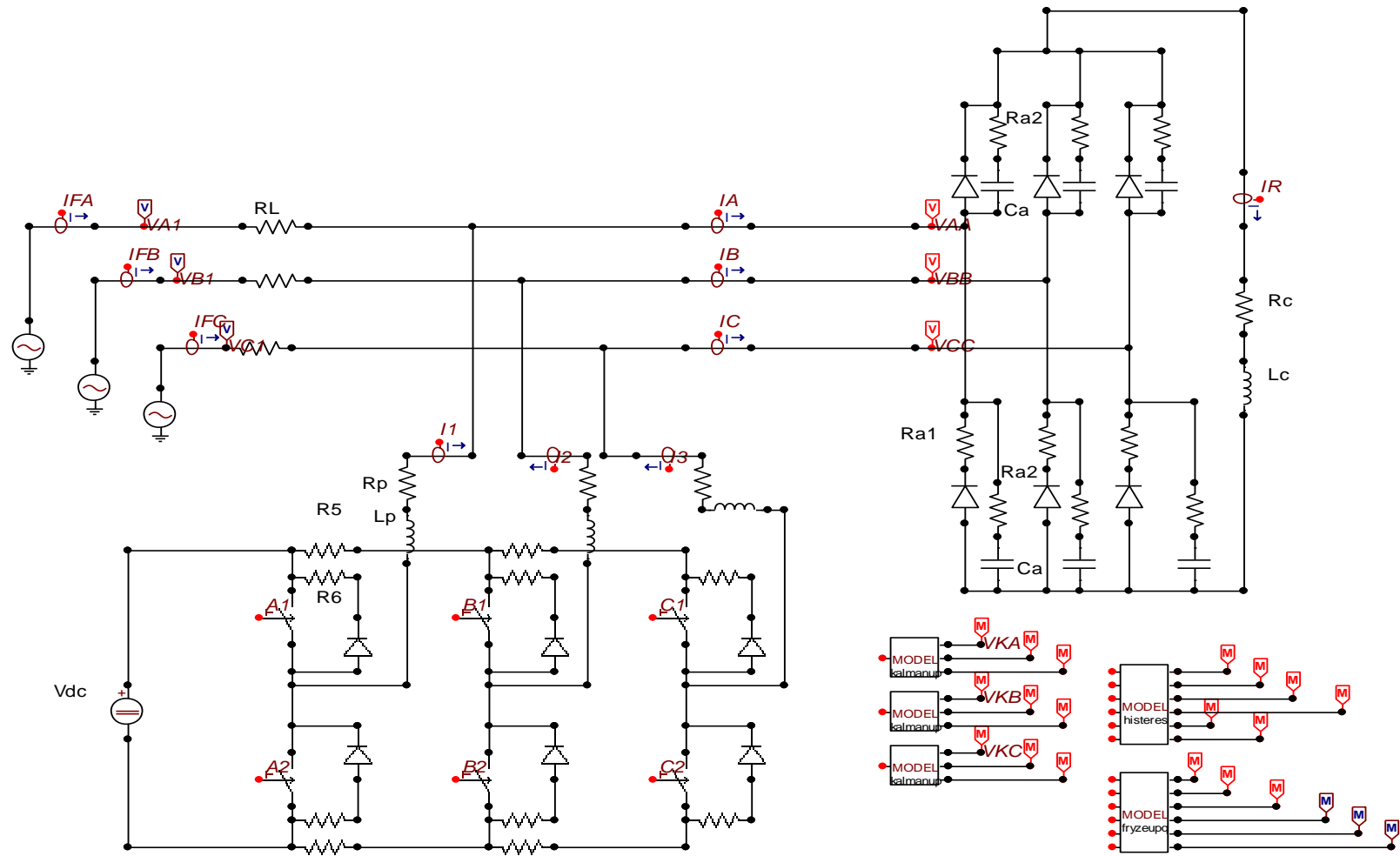
B.1 Esquemático para las simulaciones de las estrategias de control.



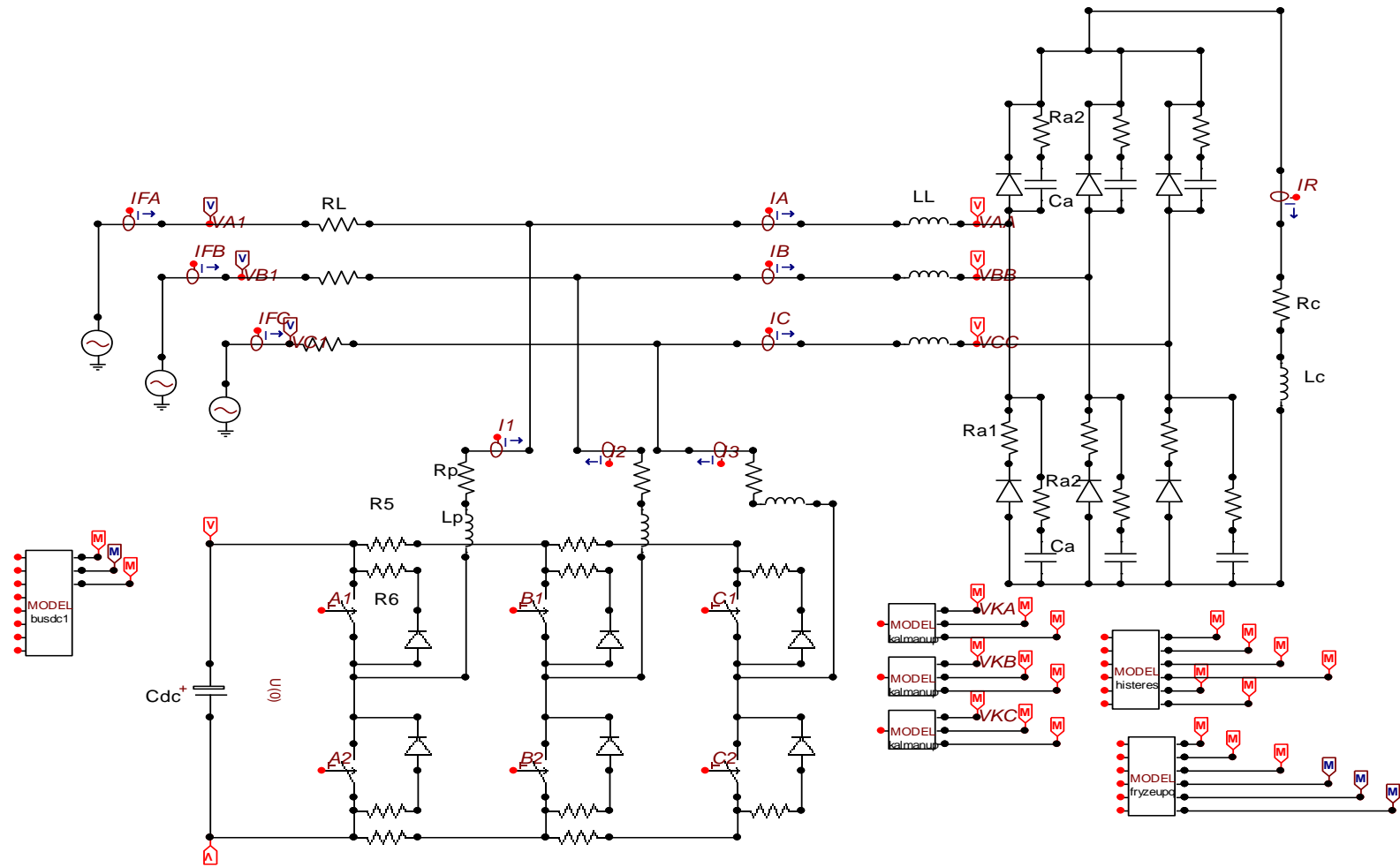
B.2 Esquemático del inversor serie.



B.3 Esquemático del inversor paralelo



B.4 Esquemático de la carga del lado de continua.



B.5 Esquemático del UPQC completo para la mitigación de hueco.

