

ESTUDIO DEL USO DE COMPENSADORES ACTIVOS (CUSTOM POWER DEVICES) PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

CARLOS DORIAN CONDE PRIETO

MARÍA CECILIA GAMBOA GONZÁLEZ



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA ELECTRONICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2011

ESTUDIO DEL USO DE COMPENSADORES ACTIVOS (CUSTOM POWER DEVICES) PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Carlos Dorian Conde Prieto

María Cecilia Gamboa González

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero(a) Electricista

Director:

Dr. Johann F. Petit Suárez

Co-Directora:

Ing. María A. Mantilla Villalobos

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA ELECTRONICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2011

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	23
1. PERTURBACIONES DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA Y DISPOSITIVOS <i>CUSTOM POWER</i>	25
1.1 Fenómenos electromagnéticos	25
1.1.1 Transitorio electromagnético.....	26
1.1.1.1 Transitorio oscilatorio.....	26
1.1.1.2 Transitorio tipo impulso	26
1.1.2 Variaciones de corta duración.....	27
1.1.2.1 Huecos de tensión (<i>sag</i> o <i>dip</i>).....	27
1.1.2.2 Elevación de tensión (<i>swell</i>).....	28
1.1.3 Variaciones de larga duración.....	29
1.1.4 Desbalance de tensión	29
1.1.5 Distorsión de la forma de onda	29
1.1.5.1 Armónico.....	29
1.1.5.2 Muesca de tensión (<i>notch</i>).....	30
1.1.6 Fluctuación de tensión (<i>flicker</i>).....	31
1.2 Una introducción a los dispositivos <i>Custom Power</i>	33
1.2.1 Dispositivos <i>Custom Power</i>	33
1.2.1.1 Compensador estático de potencia para sistemas de distribución (DSTATCOM)	34
1.2.1.2 Restaurador dinámico de tensión (DVR).....	35
1.2.1.3 Acondicionador unificado de la calidad de la energía (UPQC)	36
1.2.1.4 Limitador de corriente de estado estable (SSCL).....	37
1.2.1.5 Interruptor de estado estable (SSB).....	39
1.2.1.6 Interruptor de transferencia de estado estable (SSTS).....	40

1.3 Objetivo general.....	41
1.3.1 Objetivos específicos	41
2. ANÁLISIS DEL DSTATCOM.....	42
2.1 Principio de funcionamiento del DSTATCOM.....	42
2.2 DSTATCOM en modo control corriente.....	44
2.2.1 Teoría de la potencia reactiva instantánea pq modificada.....	46
2.2.1.1 Simulaciones y resultados	48
Caso 1: Tensión de suministro ideal y carga lineal equilibrada	49
Caso 2: Tensión de suministro ideal y carga lineal desequilibrada	53
Caso 3: Tensión de suministro ideal y carga no lineal equilibrada	58
Caso 4: Tensión de suministro ideal y carga no lineal desequilibrada.....	61
2.3 DSTATCOM en modo control tensión	65
2.3.1 Compensación basada en la teoría del marco de referencia síncrono $d-q-0$	66
2.3.1.1 El filtro Kalman.....	68
2.3.1.2 Cálculo de las componentes de secuencia positiva, negativa y cero en el marco de referencia $a-b-c$	71
2.3.1.3 Sincronización de la transformada de Park	72
2.3.1.4 Cálculo de las componentes de secuencia positiva y negativa en el marco de referencia síncrono $d-q-0$	73
2.3.1.5 Control de la potencia reactiva	76
2.3.1.6 Análisis del intercambio de potencia	78
2.3.1.7 Simulaciones y resultados	81
2.3.2 Compensación en el marco de referencia $a-b-c$	85
2.3.2.1 Simulaciones y resultados	87
3. ANÁLISIS DEL DVR	91
3.1 Estructura y principio de funcionamiento del DVR	91

3.2 Cálculo de las referencias de las tensiones de compensación.....	94
3.3 Método de compensación propuesto, basado en la teoría $d-q-0$	95
3.3.1 Sincronización del marco de referencia $d-q-0$	96
3.3.2 Esquema de compensación.....	101
3.4 Simulaciones y Resultados.....	103
3.4.1 Caso 1: Simulación del DVR para la compensación de falla monofásica a tierra. .	103
3.4.2 Caso 2: Simulación del DVR para la compensación de armónicos presentes en la fuente de tensión.....	108
3.4.3 Caso 3: Simulación del DVR para la compensación de armónicos presentes en la fuente de tensión, falla monofásica a tierra, no linealidad y desequilibrio en la carga trifásica.....	112
4. ANÁLISIS DEL UPQC.....	116
4.1 Estructura y principio de funcionamiento del UPQC.....	117
4.1.1 Configuraciones del UPQC.....	119
4.2 Cálculo de las referencias de las tensiones y corrientes de compensación.....	120
4.3 Control del UPQC.....	122
4.4 Simulaciones y Resultados.....	124
4.4.1 Caso 1: Presencia de armónicos en la fuente de tensión, falla bifásica y carga lineal balanceada.....	125
4.4.2 Caso 2: Presencia de armónicos en la fuente de tensión, falla bifásica y carga no lineal desbalanceada.....	133
CONCLUSIONES.....	140
APORTES Y TRABAJOS FUTUROS.....	146
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	148
BIBLIOGRAFÍA.....	154
ANEXOS.....	155

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Ejemplo de un transitorio oscilatorio	26
Figura 1.2 Ejemplo de un transitorio tipo impulso.....	27
Figura 1.3 Forma de onda durante un hueco de tensión (<i>sag</i>).....	28
Figura 1.4 Forma de onda de una elevación de tensión (<i>swell</i>)	28
Figura 1.5 Onda con distorsión armónica	30
Figura 1.6 Ejemplo de una muesca de tensión	30
Figura 1.7 Ejemplo de una fluctuación de tensión.....	31
Figura 1.8 Esquema básico unifilar del DSTATCOM	35
Figura 1.9 Esquema básico unifilar del DVR.....	36
Figura 1.10 Esquema básico unifilar del UPQC paralelo izquierdo	36
Figura 1.11 Esquema básico unifilar del UPQC paralelo derecho.....	37
Figura 1.12 Esquema de GTO anti-paralelos.....	38
Figura 1.13 Configuración básica del limitador de corriente de estado estable.....	38
Figura 1.14 Configuración básica del interruptor de estado estable.....	39
Figura 1.15 Configuración básica del interruptor de transferencia de estado estable.....	40
Figura 2.1 Esquema general de la estructura del DSTATCOM.....	43
Figura 2.2 Esquema básico del DSTATCOM en modo control corriente.....	44
Figura 2.3 Tensión de suministro ideal para la simulación del DSTATCOM en modo control corriente.....	49
Figura 2.4 Corrientes demandadas por la carga lineal equilibrada.....	50
Figura 2.5 Corrientes de compensación para el DSTATCOM, modo control corriente – caso 1	51
Figura 2.6 Potencias relacionadas en la compensación del DSTATCOM, modo control corriente - caso 1	51
Figura 2.7 Corriente de la red antes y durante la compensación del DSTATCOM, modo control corriente – caso 1.....	52
Figura 2.8 Relación entre las corrientes de la red y las tensiones en el PCC antes y durante la compensación del DSTATCOM, modo control corriente – caso 1	52
Figura 2.9 Corrientes demandadas por la carga lineal desbalanceada	53
Figura 2.10 Corrientes de compensación para el DSTATCOM, modo control corriente – caso 2.....	55

Figura 2.11 Corrientes de la red, antes y durante la compensación del DSTATCOM, modo control corriente – caso 2.....	55
Figura 2.12 Relación entre las corrientes de la red y las tensiones en el PCC antes y durante la compensación del DSTATCOM, modo control corriente – caso 2.....	56
Figura 2.13 Potencias relacionadas en la compensación del DSTATCOM, modo control corriente - caso 2.....	57
Figura 2.14 Corriente por el neutro antes y durante la compensación del DSTATCOM, modo control corriente – caso 2.....	57
Figura 2.15 Corriente demandada por la carga no lineal equilibrada	58
Figura 2.16 Espectro en frecuencia para la corriente demandada por la carga no lineal equilibrada en la fase A	59
Figura 2.17 Corrientes de compensación para el DSTATCOM, modo control corriente – caso 3.....	59
Figura 2.18 Corrientes de la red, antes y durante la compensación del DSTATCOM, modo control corriente – caso 3.....	60
Figura 2.19 Factor de potencia en el PCC antes y después de la compensación.	60
Figura 2.20 Potencias relacionadas en la compensación del DSTATCOM, modo control corriente - caso 3.....	61
Figura 2.21 Corriente demandada por la carga no lineal desequilibrada.....	62
Figura 2.22 Espectro en frecuencia de las corrientes que demanda la carga no lineal desequilibrada	62
Figura 2.23 Corrientes de compensación para el DSTATCOM, modo control corriente – caso 4.....	63
Figura 2.24 Corrientes de la red, antes y durante la compensación del DSTATCOM, modo control corriente – caso 4.....	63
Figura 2.25 Transformada de Fourier para las corrientes de la red durante la compensación del DSTATCOM, modo control corriente – caso 4.....	64
Figura 2.26 Potencias relacionadas en la compensación del DSTATCOM, modo control corriente - caso 4.....	64
Figura 2.27 Corriente por el neutro antes y durante la compensación del DSTATCOM, modo control corriente – caso 4.....	65
Figura 2.28 Esquema de control del DSTATCOM en modo de control tensión, en el sistema de coordenadas síncrono $d-q-0$	68

Figura 2.29 Diagrama de flujo del filtro Kalman	71
Figura 2.30 Sistema de tensiones trifásicas de secuencia positiva, para obtener las señales de sincronización.....	73
Figura 2.31 Transformación de las tensiones del marco <i>a-b-c</i> al marco <i>d-q-0</i> durante una falla monofásica.....	75
Figura 2.32 Errores de tensión a compensar en el marco <i>d-q-0</i> durante una falla monofásica.	76
Figura 2.33 Esquema de control de la potencia reactiva del DSTATCOM.	77
Figura 2.34 Tensiones de alimentación de la carga en condiciones normales de operación.....	82
Figura 2.35 Relación entre las tensiones en el PCC antes y durante la compensación del DSTATCOM, modo control tensión en <i>d-q-0</i> - falla monofásica	82
Figura 2.36 Corrientes de compensación del DSTATCOM, modo control tensión en <i>d-q-0</i> - falla monofásica.....	84
Figura 2.37 Potencia activa trifásica del DSTATCOM.....	84
Figura 2.38 Esquema de control del DSTATCOM para el marco de referencia <i>a-b-c</i>	85
Figura 2.39 Relación fasorial de las señales unitarias, en fase y en cuadratura con las tensiones en el PCC	86
Figura 2.40 Relación entre las tensiones en el PCC antes y durante la compensación del DSTATCOM, modo control tensión en <i>a-b-c</i> - falla monofásica	88
Figura 2.41 Detalle de las tensiones en el PCC durante la compensación del DSTATCOM, modo control tensión en <i>a-b-c</i> - falla monofásica	88
Figura 2.42 Corrientes de compensación del DSTATCOM, modo control tensión en <i>a-b-c</i> - falla monofásica.....	89
Figura 2.43 Potencia activa trifásica del DSTATCOM.....	89
Figura 3.1 Diagrama esquemático típico de un sistema de distribución compensado por DVR.....	92
Figura 3.2 Principio de operación del DVR.	93
Figura 3.3 Diagrama fasorial de la compensación del DVR	95
Figura 3.4 PLL para la identificación de componentes de secuencia positiva	97
Figura 3.5 Desbalance de tensión con contenido de armónicos	98
Figura 3.6 Angulo de fase del vector de tensión de secuencia positiva.....	99
Figura 3.7 Señales de tensión en los ejes de cuadratura y directo	99

Figura 3.8 Componentes de tensión de secuencia positiva	100
Figura 3.9 Componentes de secuencia positiva de las tensiones de fase.....	101
Figura 3.10 Esquema de compensación de tensión mediante DVR.....	102
Figura 3.11 Tensión de alimentación en la carga en condiciones ideales.	104
Figura 3.12 Tensiones desbalanceadas en la carga, generadas por la falla monofásica - caso 1.....	105
Figura 3.13 Tensiones de compensación del DVR - caso 1.....	106
Figura 3.14 Tensión en la carga, antes y durante la compensación mediante el DVR - caso 1.....	107
Figura 3.15 Potencias del DVR y la carga para la compensación - caso 1.....	107
Figura 3.16 Tensiones en la carga antes y durante la compensación mediante el DVR- caso 2.....	108
Figura 3.17 Componentes armónicas de las tensiones en la carga antes de la compensación mediante el DVR - caso 2	109
Figura 3.18 Componentes armónicas de las tensiones en la carga después de la compensación mediante el DVR - caso 2	109
Figura 3.19 Tensiones de compensación suministradas por el DVR a la red - caso 2 ..	110
Figura 3.20 Tensiones en la carga antes y durante la compensación mediante el DVR	110
Figura 3.21 Corrientes en la red antes y durante la compensación mediante DVR - caso 2	111
Figura 3.22 Potencias del DVR y la carga para la compensación - caso 2.....	112
Figura 3.23 Tensiones en la carga sin compensación - caso 3.....	113
Figura 3.24 Componentes armónicas de las tensiones en la carga antes de la compensación mediante el DVR - caso 3	113
Figura 3.25 Tensiones de compensación suministradas por el DVR a la red - caso 3. .	114
Figura 3.26 Tensiones en la carga antes y durante la compensación mediante el DVR- caso 3.....	114
Figura 3.27 Componentes armónicas de las tensiones en la carga después de la compensación mediante el DVR - caso 3	115
Figura 3.28 Potencias del DVR y la carga para la compensación - caso 3.....	115
Figura 4.1 Configuración básica de un sistema UPQC conectado a la red de distribución	118
Figura 4.2 Configuración del UPQC paralelo izquierdo.....	119

Figura 4.3 Configuración del UPQC paralelo derecho	119
Figura 4.4 Tensiones medidas en el PCC, sin la compensación del UPQC – caso 1....	125
Figura 4.5 Componentes armónicas de las tensiones en la carga antes de la compensación mediante el UPQC - caso 1.....	125
Figura 4.6 Corrientes de la red, sin la compensación del UPQC – caso 1	126
Figura 4.7 Componentes armónicas de las corrientes de la red, antes de la compensación mediante el UPQC - caso 1	126
Figura 4.8 Tensiones en el PCC con compensación, mediante las dos topologías de conexión del UPQC - caso 1.....	127
Figura 4.9 Componentes armónicas de las tensiones en la carga después de la compensación mediante el UPQC - caso 1.....	127
Figura 4.10 Corrientes de la red, antes y durante la compensación con las dos topologías de conexión del UPQC – caso 1	128
Figura 4.11 Componentes armónicas de las corrientes de la red, durante la compensación mediante el UPQC - caso 1.....	128
Figura 4.12 Factor de Potencia en el PCC (fase A), antes y durante la compensación mediante las dos topologías de conexión del UPQC - caso 1.....	128
Figura 4.13 Factor de Potencia en el PCC (fase B), antes y durante la compensación mediante las dos topologías de conexión del UPQC - caso 1.....	129
Figura 4.14 Factor de Potencia en el PCC (fase C), antes y durante la compensación mediante las dos topologías de conexión del UPQC - caso 1.....	129
Figura 4.15 Corrientes de compensación del UPQC, para sus dos topologías de conexión- caso 1.....	130
Figura 4.16 Tensiones de compensación del UPQC, para sus dos topologías de conexión - caso1.....	130
Figura 4.17 Corrientes de compensación y tensiones en la carga (fase A), para las dos topologías de conexión del UPQC – caso 1.....	130
Figura 4.18 Corrientes de compensación y tensiones en la carga (fase B), para las dos topologías de conexión del UPQC – caso 1.....	131
Figura 4.19 Corrientes de compensación y tensiones en la carga (fase C), para las dos topologías de conexión del UPQC - caso 1.....	131
Figura 4.20 Potencia activa trifásica del UPQC en sus dos topologías de conexión–caso 1	132

Figura 4.21 Relación entre la potencia del UPQC en sus dos topologías de conexión – caso 1.....	132
Figura 4.22 Tensiones medidas en el PCC, sin la compensación del UPQC – caso 2..	133
Figura 4.23 Componentes armónicas de las tensiones en la carga antes de la compensación mediante el UPQC - caso 2.....	134
Figura 4.24 Corrientes de la red, sin la compensación del UPQC – caso 2.	134
Figura 4.25 Componentes armónicas de las corrientes de la red, antes de la compensación mediante el UPQC - caso 2.....	135
Figura 4.26 Tensiones en el PCC y corrientes de la red antes y durante la compensación, mediante el UPQC - caso 2	135
Figura 4.27 Factor de Potencia en el PCC, antes y durante la compensación mediante el UPQC - caso 2	136
Figura 4.28 Corrientes de compensación y tensiones en la carga, antes y durante la operación del UPQC – caso 2.....	137
Figura 4.29 Tensiones de compensación del UPQC – caso 2	138
Figura 4.30 Potencia activa trifásica del UPQC – caso 2	139
Figura 4.31 Relación entre la potencia del UPQC en sus dos topologías de conexión – caso 2.....	139

LISTA DE ANEXOS

Anexo A	156
Anexo B	157
Anexo C	158
Anexo D	159
Anexo E	160
Anexo F.....	161
Anexo G.....	162
Anexo H.....	163

ABREVIATURAS

AC	Corriente alterna (<i>Alternating Current</i>)
ATP	Programa de simulación (<i>Alternative Transient Power</i>)
CC ó DC	Corriente directa (<i>Direct Current</i>)
DSP	Procesador digital de señales (<i>Digital Signal Processor</i>)
D-STATCOM	Compensador estático de potencia para sistemas de distribución (<i>Distribution Estatic Compensator</i>)
DVR	Restaurador dinámico de tensión (<i>Dynamic Voltage Restorer</i>)
GTO	Tiristor de desactivación por compuerta (<i>Gate Turn-Off Thyristor</i>)
Hz	Hertz
IEEE	Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos (<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>)
IEC	Comisión electrotécnica internacional (<i>International Electrotechnical Commission</i>)
IGBT	Transistor bipolar de compuerta aislada (<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>)
NTC	Norma técnica colombiana

PCC	Punto común de acoplamiento (<i>Point of Common Coupling</i>)
PI	Controlador proporcional integral
PWM	Modulación por ancho de pulsos (<i>Pulse Width Modulation</i>)
RMS	Valor eficaz (<i>Root Mean Square</i>)
SSB	Interruptor de circuito de estado estable (<i>Solid State Breaker</i>)
SSCL	Limitador de corriente de estado estable (<i>Solid State Circuit Limiter</i>)
SSTS	Interruptor de transferencia de estado estable (<i>Solid State Transfer Switch</i>)
THD	Distorsión armónica total (<i>Total Harmonic Distortion</i>)
UPQC	Acondicionador unificado de la calidad de la energía (<i>Unified Power Flow Controller</i>)
VA	Voltio-Amperio (<i>Volt-Ampere</i>)

SIMBOLOGÍA

f	Frecuencia en Hertz
T	Periodo
C	Condensador
L	Inductancia
ω	Frecuencia [rad/s]
k	Kilo
Δ	Delta o cambio de una señal
δ	Angulo de fase
X_L	Reactancia de acople
$^\circ$	Angulo en grados
pp	Potencia activa
pq	Potencia no activa
pc	Potencia del compensador
i_l	Corriente de la carga
i_s	Corriente del sistema
i_c	Corriente de compensación
K_p	Constante proporcional
K_i	Constante integral
$v_{a,b,c}$	Tensiones de fase en $a-b-c$
$i_{a,b,c}$	Corrientes de línea en $a-b-c$

$u_{a,b,c}$	Vectores unitarios en fase
$w_{a,b,c}$	Vectores unitarios en cuadratura
V_{ref}	Tensión de referencia
$T_{\alpha\beta 0}$	Matriz de transformación de Clarke
P	Matriz de transformación de Park
$v_{\alpha,\beta,0}$	Tensiones de fase en $\alpha-\beta-0$
$i_{\alpha,\beta,0}$	Corrientes de línea en $\alpha-\beta-0$
$i_{d,q,0}$	Corrientes de línea en $d-q-0$
$v_{l_{a,b,c}}$	Tensiones instantáneas en la carga
$p_{3\phi}$	Potencia activa trifásica
p	Potencia activa instantánea
q	Potencia reactiva instantánea
p_0	Potencia de secuencia cero

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DEL USO DE COMPENSADORES ACTIVOS (CUSTOM POWER DEVICES) PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN*

AUTORES: Carlos Dorian Conde Prieto **

María Cecilia Gamboa González **

PALABRAS CLAVES: custom power, calidad de la energía eléctrica, compensación, control proporcional-integral (PI), desbalance, distorsión armónica, factor de potencia, perturbaciones.

DESCRIPCIÓN:

El presente trabajo se enfoca en el análisis de los dispositivos *Custom Power* de tipo compensación (DSTATCOM, DVR y UPQC), con el propósito de evaluar su desempeño en el mejoramiento de la calidad de la energía en los sistemas de distribución.

Entre las opciones de compensación que ofrecen estos dispositivos se encuentran: la mitigación de huecos de tensión, elevaciones de tensión, distorsión armónica, regulación de tensión, desbalance de carga, bajo factor de potencia y circulación de corriente por el neutro; lo cual se logra mediante el suministro a la red de corrientes y/o tensiones de compensación, optimizando así el transporte de energía por la red y las características de las señales de tensión en el punto común de acoplamiento.

Específicamente el trabajo se centra en la aplicación de algunas estrategias de compensación basadas en el dominio del tiempo para la estimación de las señales de referencia que permiten generar las corrientes y/o tensiones de compensación, según sea el caso.

La teoría pq modificada se usa en la compensación de las corrientes de la red, mientras que la compensación de tensión se realiza mediante una teoría basada en el marco de referencia síncrono d-q-0 y otra basada en el marco de referencia a-b-c; cada una de ellas aplicada a modelos de simulación realizados en el software ATP Draw para cada dispositivo de compensación. Además se incluye el uso de herramientas de sincronización del marco de referencia síncrono como el filtro Kalman y el PLL y el uso de controladores PI en la mitigación de perturbaciones de tensión.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Dir. Johann Farith Petit Suárez. Codir. María Alejandra Mantilla Villalobos.

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF ACTIVE COMPENSATORS APPLICATION (CUSTOM POWER DEVICES) FOR IMPROVING THE POWER QUALITY IN DISTRIBUTION SYSTEMS *

AUTHORS: Carlos Dorian Conde Prieto **

María Cecilia Gamboa González **

KEY WORDS: custom power, electric energy quality, compensation, harmonic components, compensation, unbalance, proportional and integral control (PI), power factor, perturbations.

DESCRIPTION

This work focuses on the analysis of the Custom Power Device type compensation (DSTATCOM, DVR and UPQC), in order to evaluate their performance in improving the power quality in distribution systems.

Among the compensation options offered by these devices are: mitigation of voltage dips, lifts voltage, harmonic distortion, voltage regulation, load unbalance, low power factor and current flow in the neutral, which is achieved by providing the network of current and / or compensation voltages, optimizing energy transmission over the network and the characteristics of the voltage signals at the point of common coupling.

Specifically, the work centers on the application of some compensatory strategies based on the time domain for estimating the reference signals for generating currents and / or tensions of compensation as appropriate.

Modified pq theory is used in the compensation currents of the network, while the compensation voltage is performed through a theory based on the synchronous reference frame d-q-0 and another based on the a-b-c frame of reference, each of them is applied in simulation models made in the ATP Draw software for each device compensation. It also includes the use of synchronization tools of synchronous reference frame such as the Kalman filter and the PLL and the use of PI controllers in the mitigation of voltage disturbances.

* Degree Project.

** Physicmechanics engineering faculty. Electric, Electronic and Telecommunications Engineering School. Dir. Johann Farith Petit Suárez. Codir. María Alenjandra Mantilla Villalobos.

INTRODUCCIÓN

La calidad de la energía eléctrica en los sistemas de distribución, puede verse afectada por la presencia de diversas perturbaciones que causan un efecto negativo sobre las señales de tensión y/o corriente. Algunas de estas perturbaciones tienen origen en cargas alimentadas por el sistema eléctrico, las cuales introducen distorsión armónica, bajo factor de potencia y desbalance en las corrientes de la red, entre otras. Por otra parte, hay problemas que afectan la tensión en diversos puntos del sistema, los cuales se pueden presentar por fallas, operaciones de maniobra, descargas atmosféricas o incluso perturbaciones originadas desde la fuente de alimentación, entre otras.

La deficiencia en la calidad de la energía eléctrica, representa un incremento en los costos tanto económicos como ambientales, en todos los procesos comprendidos entre la generación y el consumo de la electricidad. La generación consume mayor cantidad de recursos para poder compensar mayores pérdidas en los procesos de transmisión y distribución, mientras que del lado del consumidor, se produce mal funcionamiento de equipos sensibles y disminución de su tiempo de vida útil, así como deficiencia en los procesos que son movidos por la electricidad [3].

La necesidad de proteger las cargas que son vulnerables a la baja calidad de la energía y a su vez, de compensar las señales de tensión y de corriente en los sistemas de distribución, llevó a desarrollar nuevas tecnologías basadas en electrónica de potencia, las cuales se conocen como *Custom Power*, un concepto que se ha familiarizado desde 1988 y que dispone de dispositivos cuyo objetivo principal es mejorar la calidad de la energía eléctrica [5].

Los *Custom Power* pueden clasificarse como dispositivos de tipo reconfiguración y de tipo compensación. Los de tipo reconfiguración son: limitador de corriente de estado estable (SSCL, *Solid State Circuit Limiter*), interruptor de estado estable (SSB, *Solid State Breaker*) e interruptor de transferencia de estado estable (SSTS, *Solid State Transfer Switch*). Los de tipo compensación son: restaurador dinámico de tensión (DVR, *dynamic voltage restorer*), compensador estático de distribución (DSTATCOM, *Distribution Static*

Compensator) y acondicionador de calidad de la energía unificado (UPQC, *Unified Power Quality Conditioner*).

Este proyecto tiene como objetivo simular los diferentes dispositivos *Custom Power* de tipo compensación mediante modelos realizados en el software ATP Draw, los cuales incluyen diferentes algoritmos de control que han sido estudiados previamente. Los resultados permiten observar el desempeño de los dispositivos y analizar las opciones de compensación que éstos ofrecen.

El trabajo se presenta en cuatro capítulos. En el capítulo 1 se introducen las definiciones de las perturbaciones de la energía eléctrica y de los *Custom Power*. En el capítulo 2 se aborda el estudio, simulación y análisis del DSTATCOM. En el capítulo 3 se aborda el estudio, simulación y análisis del DVR y capítulo 4 se aborda el estudio, simulación y análisis del UPQC. Finalmente se plantean las conclusiones, aportes y trabajos futuros.

1. PERTURBACIONES DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA Y DISPOSITIVOS *CUSTOM POWER*.

La calidad de la energía eléctrica envuelve un conjunto de características físicas de las señales de tensión y corriente, que tienen el propósito de satisfacer las necesidades del cliente [1].

Existen diferentes eventos electromagnéticos que deterioran la calidad de la energía eléctrica en los sistemas de distribución, tales como perturbaciones externas (fenómenos atmosféricos, maniobras y fallas en el sistema) y perturbaciones propias de la red, debido principalmente a los efectos de las cargas conectadas. Estas perturbaciones tienen diferentes características físicas y es necesario identificarlas y seleccionar el dispositivo correcto, capaz de compensar dichas perturbaciones.

Para mitigar los problemas relacionados con la calidad de la energía eléctrica, se han desarrollado diferentes técnicas de compensación como filtros pasivos, filtros activos, filtros híbridos y en las últimas décadas los *Custom Power*, que mejoran el comportamiento de los sistemas eléctricos de distribución, proporcionando protección a los equipos electrónicos y mejoramiento de la calidad en el suministro de energía [5].

En este capítulo se clasifican los diferentes problemas que se presentan en la red de distribución de forma teórica y gráfica. Además, se muestran los dispositivos *Custom Power* de tipo compensación y tipo reconfiguración.

1.1 Fenómenos electromagnéticos.

Estos fenómenos se clasifican según las normas [1, 2] de la siguiente manera: transitorios electromagnéticos (tipo impulso y oscilatorio), armónicos, fluctuaciones de tensión (*flicker*), huecos de tensión (*sags*), sobretensiones (*swells*), desbalances de tensión,

interrupciones, muescas de tensión (*notching*) y variaciones de frecuencia. A continuación se presenta la definición y caracterización de estos fenómenos.

1.1.1 Transitorio electromagnético.

Los transitorios electromagnéticos son eventos de corta duración que se caracterizan por su contenido elevado de componentes de alta frecuencia y se clasifican en: oscilatorios y tipo impulso [2].

1.1.1.1 Transitorio oscilatorio.

Un transitorio oscilatorio es un cambio repentino de frecuencia fundamental de la red en la onda de tensión y/o de corriente, cuyos valores instantáneos cambian de polaridad rápidamente (Figura 1.1). Son causados principalmente por conexión de condensadores, desconexión de transformadores y por la conexión de líneas. Se subdividen por su contenido de frecuencias como se muestra en la tabla 1.1.

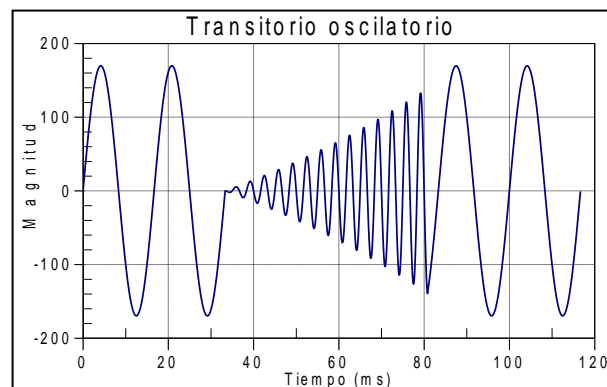


Figura 1.1 Ejemplo de un transitorio oscilatorio.

1.1.1.2 Transitorio tipo impulso.

El transitorio de tipo impulso o impulsivo se define como un cambio súbito a una frecuencia distinta a la fundamental, en condición de estado estacionario para la tensión

y/o la corriente, que es unidireccional en polaridad. En la figura 1.2 se muestra un transitorio de impulso de corriente producido por una descarga atmosférica.

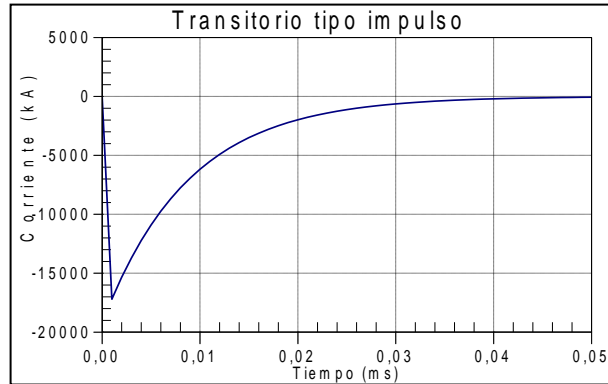


Figura 1.2 Ejemplo de un transitorio tipo impulso.

1.1.2 Variaciones de corta duración

Se definen como la desviación del valor eficaz (valor rms) de la onda de tensión del valor nominal para un tiempo mayor que 0,5 ciclos y menor o igual que un minuto, a frecuencia nominal (60 Hz).

1.1.2.1 Huecos de tensión (*sag o dip*).

Terminología usada para describir la reducción de la magnitud de tensión hasta un 10% de su valor eficaz a la frecuencia nominal. Estos eventos son causados por fallas, conmutación de cargas grandes y arranque de motores, entre otros. Un ejemplo de esta variación se presenta en la figura 1.3.

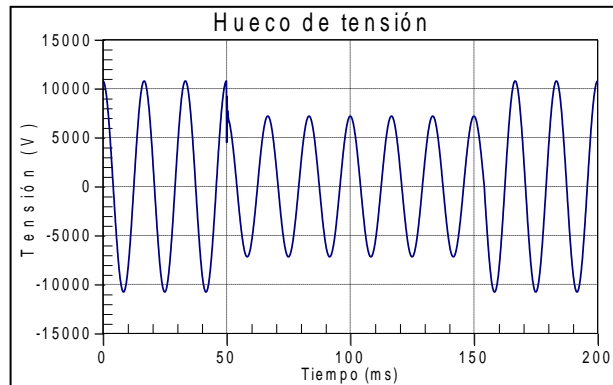


Figura 1.3 Forma de onda durante un hueco de tensión (*sag*).

1.1.2.2 Elevación de tensión (*swell*).

Se define como el incremento del valor eficaz de la tensión a la frecuencia fundamental con una duración entre 0,5 ciclos a 1 minuto y con magnitudes entre 1,1 y 1,8 pu. Las principales causas de las elevaciones de tensión son: la desconexión de cargas grandes y la conexión de grandes bancos de condensadores. La forma de onda característica de este evento se presenta en la figura 1.4.

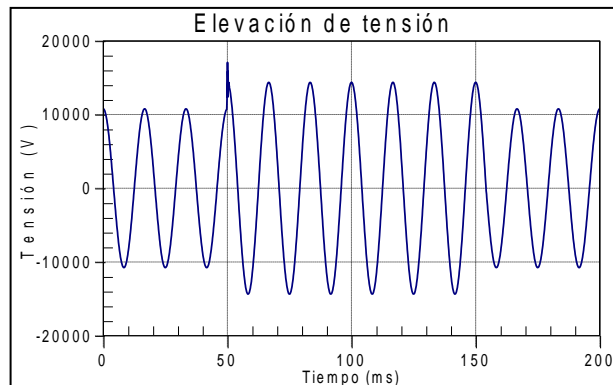


Figura 1.4 Forma de onda de una elevación de tensión (*swell*)

1.1.3 Variaciones de larga duración

Corresponde a la desviación del valor eficaz de la tensión, a partir del valor nominal, para un tiempo mayor que un minuto. Se clasifican en sobretensiones, subtensiones e interrupciones sostenidas. En la tabla 1.1 se presentan las características de estas perturbaciones.

1.1.4 Desbalance de tensión

Es definido como la relación entre la componente de secuencia cero o negativa, con la componente de secuencia positiva. La tensión de secuencia negativa y/o cero en un sistema de potencia, generalmente resulta de una carga desbalanceada, causando corrientes de secuencias negativa o cero [2].

Según [17], la definición más significativa y precisa del desbalance es:

$$\frac{V^-}{V^+} = \frac{|V^-| \angle \theta^-}{|V^+| \angle \theta^+}, \quad \frac{V^0}{V^+} = \frac{|V^0| \angle \theta^0}{|V^+| \angle \theta^+} \quad (1.1)$$

Usualmente, la magnitud de este factor complejo se usa para indicar el grado de desbalance debido tanto a la componente de secuencia negativa como a la componente de secuencia cero, como se aprecia en 1.1.

1.1.5 Distorsión de la forma de onda

Se define como la desviación en estado estable con respecto a una onda sinusoidal ideal cuya frecuencia es la del sistema de potencia.

1.1.5.1 Armónico.

Un armónico es una onda sinusoidal de tensión o corriente cuya frecuencia es múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema. Una señal con distorsión armónica se

define como la suma de varios armónicos, los cuales pueden o no estar en fase con la componente fundamental. En la figura 1.5 se observa una señal con distorsión armónica.

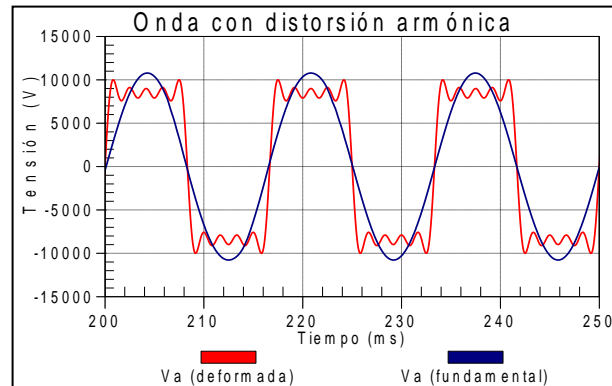


Figura 1.5 Onda con distorsión armónica.

1.1.5.2 Muesca de tensión (*notch*).

Se define como una perturbación periódica sobre la onda de tensión, causada por la operación normal de equipos electrónicos de potencia cuando la corriente es conmutada de una fase a otra. Un ejemplo de esta perturbación se muestra en la figura 1.6.

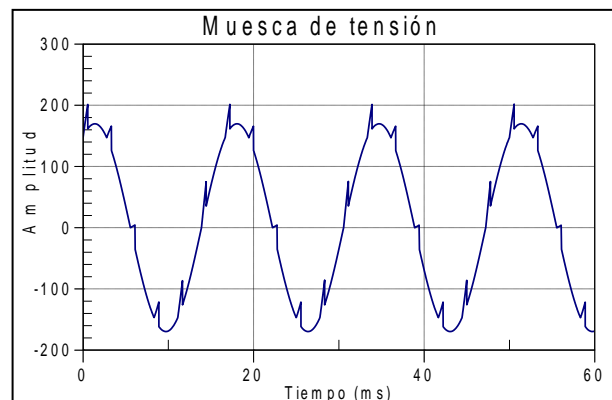


Figura 1.6 Ejemplo de una muesca de tensión.

1.1.6 Fluctuación de tensión (*flicker*)

Son variaciones sistemáticas de la envolvente de la tensión, o una serie de cambios aleatorios de tensión, cuya magnitud normalmente no excede el rango comprendido entre 0.95 y 1.05 pu [2]. La figura 1.7, muestra un ejemplo de este tipo de perturbación.

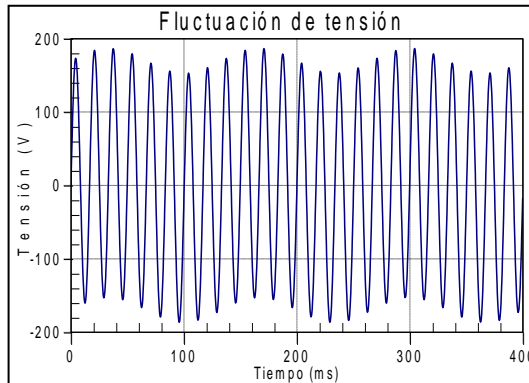


Figura 1.7 Ejemplo de una fluctuación de tensión.

En la tabla 1.1 se observan las categorías de los eventos electromagnéticos que afectan la calidad de energía [2].

Tabla 1.1 Caracterización de los fenómenos electromagnéticos en un sistema de potencia.

Categoría	Contenido espectral típico	Duración típica	Magnitud de tensión típica
1.0 Transitorios			
1.1 Impulsivo			
1.1.1 Nanosegundo	5 ns de elevación	< 50 ns	
1.1.2 Microsegundo	1 μ s de elevación	50 ns – 1 ms	
1.1.3 Milisegundo	0.1 ms de elevación	> 1 ms	
1.2 Oscilatorio			
1.2.1 Baja frecuencia	< 5 KHz	0.3 - 50 ms	0 – 4 pu
1.2.2 Media frecuencia	5 – 500 KHz	20 μ s	0 – 8 pu

1.2.3	Alta frecuencia	0.5 – 5 MHz	5 μ s	0 – 4 pu
2.0	Variaciones de corta duración			
2.1	Instantáneas			
2.1.1	Hueco		0.5 – 30 ciclos	0.1 – 0.9 pu
2.1.2	Elevación		0.5 – 30 ciclos	1.1 – 1.8 pu
2.2	Momentáneas			
2.2.1	Interrupción		0.5 ciclos – 3 s	< 0.1 pu
2.2.2	Hueco		30 ciclos – 3 s	0.1 – 0.9 pu
2.2.3	Elevación		30 ciclos – 3 s	1.1 – 1.4 pu
2.3	Temporales			
2.3.1	Interrupción		3s – 1 min	< 0.1 pu
2.3.2	Hueco		3 s – 1 min	< 0.1 pu
2.3.3	Elevación		3 s – 1 min	1.1 – 1.2 pu
3.0	Variaciones de larga duración			
3.1	Interrupción sostenida		> 1 min	0.0 pu
3.2	Baja tensión		> 1 min	0.8 – 0.9 pu
3.3	Sobretensión		> 1 min	1.1 – 1.2 pu
4.0	Desbalance de Tensión		Estado Estable	0.5 – 2 %
5.0	Distorsión de la forma de onda			
5.1	DC Offset		Estado Estable	0 – 0.1 %
5.2	Armónicos	0 – 100	Estado Estable	0 – 20 %
5.3	Interarmónicos	0 – 6 KHz	Estado Estable	0 – 2 %
5.4	Muesca		Estado Estable	
5.5	Ruido	Ancho de banda	Estado Estable	0 – 1 %
6.0	Fluctuaciones de Tensión	< 25 Hz	Intermitente	0.1 – 7 %
7.0	Variaciones de Frecuencia		< 10 s	

1.2 Una introducción a los dispositivos *Custom Power*

En 1988, en el Instituto de Investigación de Electrónica de Potencia en Palo Alto, California, Narain G. Hingorani estableció por primera vez los conceptos de FACTS y *Custom Power*. Años más tarde el tema se dio a conocer por el mismo autor al publicar el artículo titulado “*Introducing Custom Power*” [5], en la revista Spectrum de la IEEE. En la actualidad existen grupos de trabajo dedicados al estudio de los *Custom Power* como lo es el grupo IEEE 1409, [5, 6, 7].

Los dispositivos *Custom Power* son circuitos basados en electrónica de potencia utilizados como una opción para la compensación de diferentes perturbaciones. Su uso se aplica en sistemas de distribución desde 1 kV hasta 38 kV [3]. Incluyen interruptores estáticos, inversores, convertidores, transformadores de inyección, módulos de control maestro y los módulos de almacenamiento de energía que tienen la capacidad de llevar a cabo la inyección de corriente y tensión dentro de un sistema de distribución [8].

Los dispositivos de compensación son conectados en forma paralela, serie o la combinación de ambas en el punto común de acoplamiento (PCC). Dependiendo del dispositivo que sea conectado a la red, será capaz de mitigar diferentes tipos de perturbaciones, es decir, cada uno de ellos, tiene una forma de conexión específica y unas perturbaciones características que puede mitigar.

1.2.1 Dispositivos *Custom Power*

Los dispositivos *Custom Power* se clasifican en dos tipos: de tipo compensación y de tipo reconfiguración [8].

Dispositivos de tipo compensación:

- Compensador estático de potencia para sistemas de distribución (DSTATCOM, *Distribution Static Compensator*).
- Restaurador dinámico de tensión (DVR, *Dynamic Voltage Restorer*)

- Acondicionador de calidad de la energía unificado (UPQC, *Unified Power Quality Conditioner*).

Estos dispositivos son usados para filtrado activo, balance de carga, corrección del factor de potencia, regulación de tensión, entre otras aplicaciones.

Dispositivos de tipo reconfiguración:

- Limitador de corriente de estado estable (SSCL, *Solid State Circuit Limiter*)
- Interruptor de estado estable (SSB, *Solid State Breaker*)
- Interruptor de transferencia de estado estable (SSTS, *Solid State Transfer Switch*)

Esta clase de dispositivos se basan en tiristores y son utilizados para limitar rápidamente la corriente de falla o interrumpir el suministro. También se utilizan para realizar la transferencia de carga cuando un alimentador presenta condiciones anormales de funcionamiento.

1.2.1.1 Compensador estático de potencia para sistemas de distribución (DSTATCOM)

El DSTATCOM es un compensador de conexión paralela, usado para mitigar perturbaciones que afectan tanto a la onda de corriente como a la onda de tensión, tales como factor de potencia, desbalance de carga, huecos y elevaciones de tensión, entre otras. Opera en dos modos de control: modo control corriente y modo control tensión. Su modo de operación depende del requerimiento de compensación que se necesite [8].

De forma general, este dispositivo funciona como una fuente dependiente de corriente i_c , conectada en paralelo ya sea con la carga como con el sistema. Su esquema básico se observa en la figura 1.8.

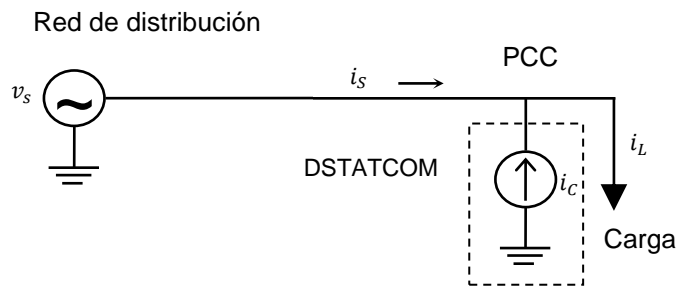


Figura 1.8 Esquema básico unifilar del DSTATCOM

En el capítulo 2 se detalla el funcionamiento, los resultados de compensación, la topología general y estrategias de control utilizadas en la aplicación del DSTATCOM en sus dos modos de operación.

1.2.1.2 Restaurador dinámico de tensión (DVR).

El restaurador dinámico de tensión es un compensador serie, usado generalmente para proteger las cargas sensibles de huecos, elevaciones y armónicos de tensión. Básicamente, el DVR es una fuente de tensión controlada v_c , instalada en serie entre la fuente de suministro de energía v_s y la carga sensible, como se observa en el esquema unifilar de la figura 1.9. Su principio de funcionamiento consiste en inyectar una tensión, capaz de mitigar las perturbaciones relacionadas con la onda de tensión.

El primer DVR fue instalado en Agosto de 1996, a una subestación de 12.47 kV en Anderson, Carolina del Sur, para una planta automatizada de fabricación de alfombras [8]. Con anterioridad a este respecto, el DVR fue instalado por primera vez en el laboratorio de *Waltz Mill*, cerca de *Pittsburgh* para las pruebas de potencia máxima. La próxima instalación del DVR fue hecha en febrero de 1997 en un sistema de distribución de 22 kV en *Stanhope, Victoria, Australia*. Se hizo para proteger una planta de procesamiento diario de leche y el ahorro que se derivó de esta instalación se estima que es de unos \$100.000 (Cien mil dólares) por año [9].

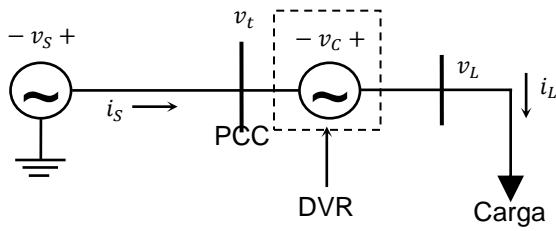


Figura 1.9 Esquema básico unifilar del DVR.

En el capítulo 3, se detalla la topología general, el funcionamiento, las estrategias de control y los resultados de compensación obtenidos a partir del uso del DVR como compensador de las diferentes perturbaciones que afectan la onda de tensión, en un sistema de distribución a 13200 [V].

1.2.1.3 Acondicionador unificado de la calidad de la energía (UPQC)

El UPQC es un dispositivo diseñado para los sistemas de distribución, el cual integra en un solo módulo la compensación serie y paralela de forma simultánea, para mitigar perturbaciones en tensión (huecos, elevaciones, armónicos y regulación, entre otras), y en corriente (desbalance, factor de potencia y armónicos, entre otras). Este compensador tiene dos topologías de conexión a la red, identificadas como paralelo izquierdo y paralelo derecho, la cuales se muestran las figuras 1.10 y 1.11 respectivamente [36]

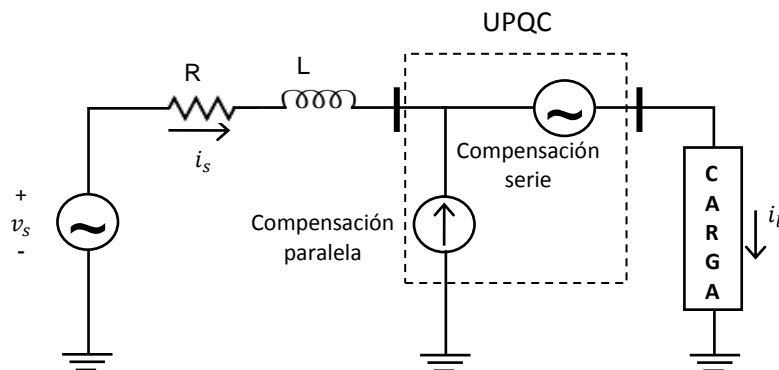


Figura 1.10 Esquema básico unifilar del UPQC paralelo izquierdo.

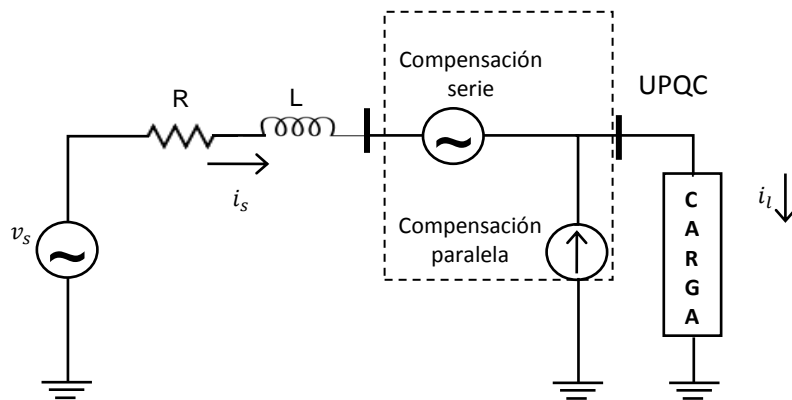


Figura 1.11 Esquema básico unifilar del UPQC paralelo derecho.

En el capítulo 4, se detalla la topología general, las estrategias de control, el funcionamiento y los resultados de compensación obtenidos mediante la utilización del DVR como compensador de las diferentes perturbaciones que afectan la onda de tensión, en un sistema de distribución a 13200 [V].

1.2.1.4 Limitador de corriente de estado estable (SSCL)

El limitador de corriente de estado estable, es un dispositivo utilizado para delimitar corrientes grandes de falla, que afectan el comportamiento normal de los sistemas de distribución y transmisión. Consta de: un tiristor (GTO) de compuertas antiparalelas, el cual es utilizado como interruptor de no retorno (figura 1.12), un inductor limitador de corriente L_m y una red *snubber* utilizada como supresor de picos, todos conectados en paralelo; su combinación se conecta en serie a la red para brindar protección a las diferentes cargas. Además, un limitador de tensión de oxido de zinc se suma a la conexión paralela, para proteger los GTO [8]. La configuración básica de este dispositivo se observa en la figura 1.13, donde los GTO se reemplazan por interruptores ideales.

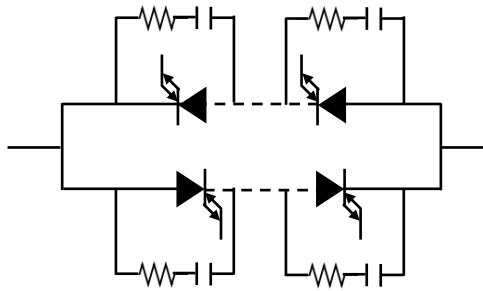


Figura 1.12 Esquema de GTO anti-paralelos.

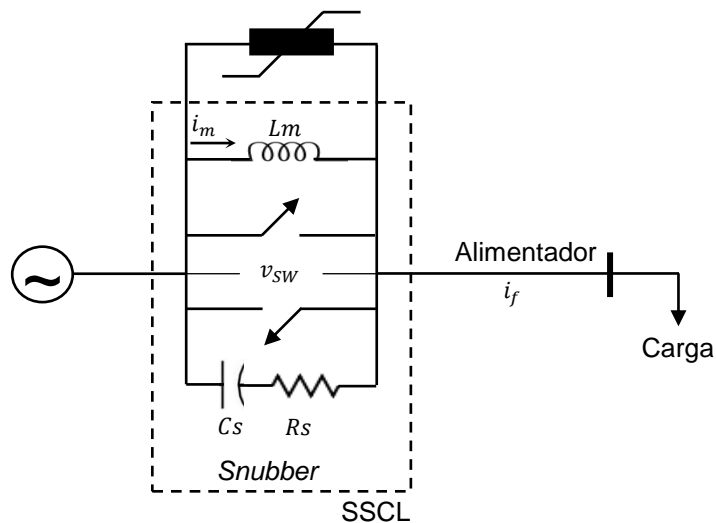


Figura 1.13 Configuración básica del limitador de corriente de estado estable.

- **Principio de funcionamiento:**

Los GTO se encuentran en modo de conducción, permitiendo el paso de la corriente de la línea, bajo condiciones de operación normal del sistema. Una vez se detecta la corriente de falla, los GTO se desactivan, evitando un incremento de corriente perjudicial. La corriente de falla es desviada al capacitor *snubber* para limitar la velocidad a la cual se incrementa la tensión a través de los GTO. Dicha tensión, se aumentará hasta el nivel de

restricción establecido en el limitador de oxido de zinc. La misma tensión aparece en el inductor limitador de corriente L_m hasta alcanzar el valor de restricción, momento en el cual la corriente a través del inductor aumenta linealmente, hasta igualarse con el valor instantáneo de la corriente que fluye por la línea. Después, la corriente será limitada por la impedancia serie total del sistema, que consta de la impedancia del inductor, del limitador de oxido de zinc y de la impedancia de falla. Los GTO vuelven a su operación normal una vez la falla desaparece [8].

1.2.1.5 Interruptor de estado estable (SSB)

El interruptor de estado estable, permite realizar una interrupción rápida en la corriente de falla y protege cargas sensibles. Su configuración básica se observa en la figura 1.14, muy similar al esquema del SSCL de la figura 1.13, excepto que se adiciona un tiristor antiparalelo en serie al inductor limitador de corriente.

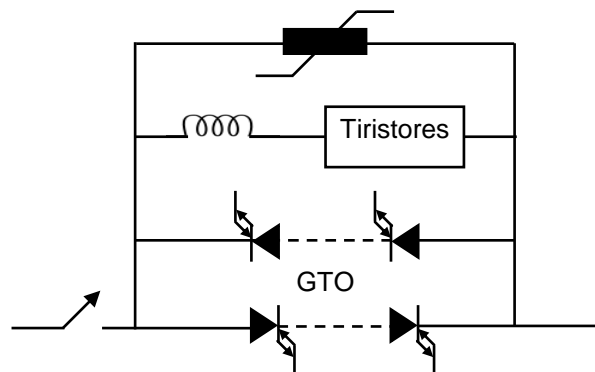


Figura 1.14 Configuración básica del interruptor de estado estable.

- **Principio de funcionamiento:**

Cuando una falla se presenta en el sistema, los GTO antiparalelos se abren y posteriormente realizan un número de operaciones de reconexión. Si la falla persiste, los GTO se bloquean y los tiristores se activan haciendo que la corriente de falla fluya por el limitador de corriente [30]. La corriente a través del limitador es eventualmente eliminada por medio del bloqueo de los tiristores. El supresor de tensión de oxido de zinc, es

utilizado para proteger los dispositivos de electrónica de potencia de las sobretensiones por conmutación.

1.2.1.6 Interruptor de transferencia de estado estable (SSTS)

El interruptor de transferencia de estado estable es un dispositivo adecuado para proteger las cargas sensibles que cuentan con doble suministro de energía eléctrica. Está constituido por un par de tiristores antiparalelos y un par de supresores de oxido de zinc. Además posee una gran ventaja, no requiere de un elemento almacenador de energía para su funcionamiento. En la figura 1.15 se aprecia el esquema básico del SSTS [8].

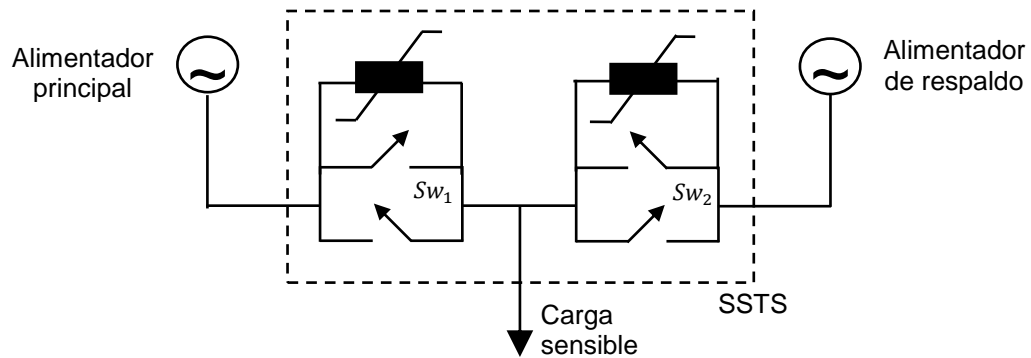


Figura 1.15 Configuración básica del interruptor de transferencia de estado estable.

- **Principio de funcionamiento:**

En funcionamiento normal del sistema eléctrico, la corriente de la línea circula por el interruptor s_{w1} . Al presentarse la falla (una caída o interrupción de tensión) éste interruptor la detecta y realiza una rápida transferencia de carga a un alimentador de respaldo, haciendo que la corriente de la carga circule por el interruptor s_{w2} . La acción de conmutación es llamada *conectar antes de desconectar*, es decir, antes que el s_{w1} se bloquee, s_{w2} es encendido para evitar la no continuidad de la corriente por la carga [8].

1.3 Objetivo general

Estudiar las nuevas tecnologías de compensación (*Custom Power*) para mejorar la calidad de la energía eléctrica en los sistemas de distribución.

1.3.1 Objetivos específicos

- Identificar las opciones de compensación que ofrecen los dispositivos *Custom Power* para mejorar la calidad de la energía eléctrica en los sistemas de distribución.

- Estudiar y verificar modelos para simular los dispositivos *Custom Power* de tipo compensación.

- Analizar y verificar mediante simulaciones el funcionamiento de los dispositivos de tipo compensación: DVR, DSTATCOM y UPQC.

2. ANÁLISIS DEL DSTATCOM

Este capítulo presenta la simulación del compensador estático de potencia para sistemas de distribución en sus dos modos de operación: modo control corriente y modo control tensión, utilizando el software libre ATP Draw y modelándolo de forma ideal mediante fuentes dependientes de corriente, conectadas en paralelo a la red de suministro o a la carga. En la práctica estas fuentes de corriente son realmente fuentes inversoras de tensión [8]. El DSTATCOM será capaz de calcular las corrientes de compensación de tal forma que el intercambio de potencia activa trifásica sea de valor nulo.

Se observará que el DSTATCOM puede inyectar un conjunto de tres corrientes, que dependiendo del modo de compensación pueden ser: equilibradas, desequilibradas, con o sin contenido de armónicos. Será capaz de compensar la distorsión y el desequilibrio presente en las corrientes de la red a causa de la corriente que demanda una carga no lineal y desequilibrada, y simultáneamente puede corregir el factor de potencia [11]. Este dispositivo ofrece soluciones integrales a los problemas relacionados con la calidad de la energía eléctrica.

2.1 Principio de funcionamiento del DSTATCOM

En la figura 2.1 se encuentra la estructura general del DSTATCOM, donde se ilustran los tres lazos de control que rigen su funcionamiento y los puntos de ubicación para las mediciones de tensión y corriente. Este trabajo se enfoca en el control para el cálculo de las señales de referencia que permiten generar las corrientes de compensación, las cuales se inyectan a la red en el punto de conexión mediante fuentes ideales de corriente, como se observa en la figura 2.2. Es decir, los lazos de control del bus de dc y de la fuente inversora no serán estudiados en este trabajo.

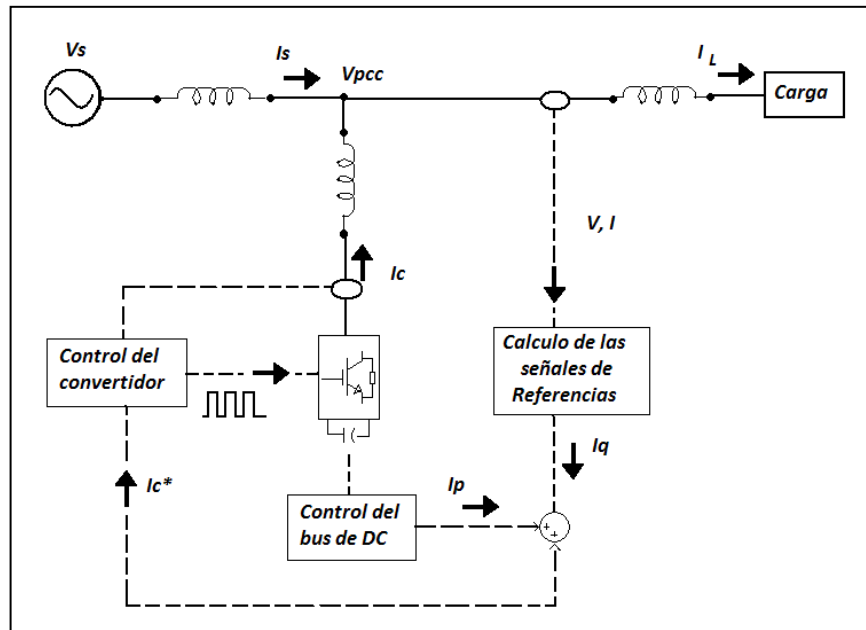


Figura 2.1 Esquema general de la estructura del DSTATCOM.

El principio de funcionamiento del DSTATCOM consiste en inyectar una corriente al sistema de distribución en el punto común de acoplamiento (PCC-*Point of Common Coupling*), llamando así al lugar donde se conecta el dispositivo a la red. Este dispositivo es conectado en paralelo ya sea con la red o con la carga, para mitigar perturbaciones que tienen origen tanto en la demanda como en la red eléctrica. Además, el compensador debe consumir una potencia instantánea de valor medio igual a cero en estado estable [10].

Para que el DSTATCOM cumpla con lo mencionado anteriormente, debe tener la capacidad de [8]:

- ❖ Medir las corrientes y tensiones del sistema necesarias para calcular las señales a inyectar.
- ❖ Calcular las señales de referencia que debe generar el dispositivo para realizar la compensación.

- ❖ Mantener la tensión o la corriente del bus de continua en un valor que permita la controlabilidad del convertidor.
- ❖ Determinar las señales de disparo del inversor tal que las corrientes generadas por éste, sigan las señales de referencia calculadas.

El interés de este proyecto es realizar un análisis del compensador estático de potencia para sistemas de distribución en cuanto a su capacidad para cumplir con los dos primeros ítems, mediante la aplicación de algoritmos de compensación en sus dos modos de operación [8, 10, 16]. El control del inversor no hace parte del desarrollo de este trabajo, pues es un estudio de investigación amplio y abarca otro proyecto.

2.2 DSTATCOM en modo control corriente

Para ilustrar el funcionamiento del DSTATCOM en el modo de operación control corriente, considere la figura 2.2, donde se muestra un sistema trifásico de cuatro hilos. Todos los valores de corrientes y tensiones indicadas en esta figura son cantidades instantáneas. Aquí, la fuente trifásica es balanceada (v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}) y a ella se conecta una carga (Z_{la}, Z_{lb}, Z_{lc}) en disposición estrella (Y).

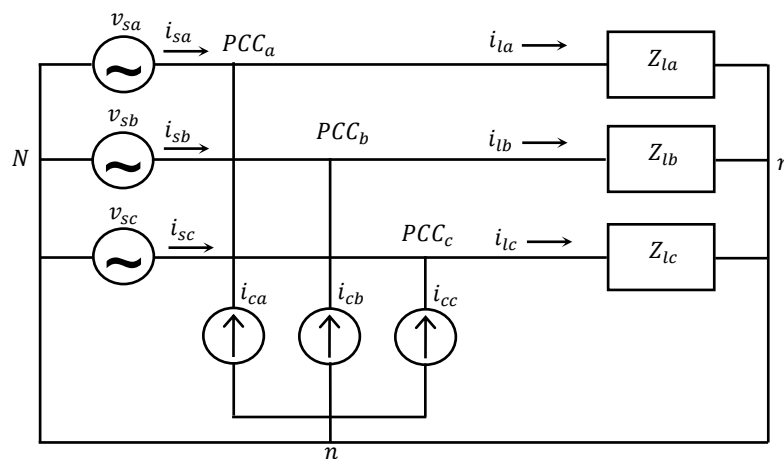


Figura 2.2 Esquema básico del DSTATCOM en modo control corriente.

Paralelo a la carga se ubica el compensador en el PCC, representado por tres fuentes de corriente ideales (i_{ca} , i_{cb} , i_{cc}). Es posible que para cargas desbalanceadas fluya una corriente de secuencia cero por el cuarto hilo desde n hacia N , tal como se muestra en la figura 2.2. Para sistemas trifásicos de tres hilos, el neutro entre la fuente y el compensador no está presente, pero es importante proporcionar un camino para la corriente de secuencia cero cuando la carga es desbalanceada, así que la conexión del neutro entre la carga y el compensador se encuentra activa.

A manera de ejemplo, del diagrama unifilar de la figura 1.7 se asume que la carga es no lineal y tiene un factor de potencia bajo, entonces la corriente instantánea en la carga (i_l) se descompone así:

$$i_l = i_{lp} + i_{lq} + i_{lh} \quad (2.1)$$

Donde i_{lp} e i_{lq} son la parte activa y reactiva respectivamente de la corriente de carga, e i_{lh} es la componente de armónicos. El propósito del compensador es inyectar una corriente de referencia, tal que cancele la parte reactiva y la componente armónica de la corriente de la carga.

Aplicando ley de corrientes de Kirchhoff en el PCC se obtiene:

$$i_l = i_s + i_c \rightarrow i_s = i_l - i_c \quad (2.2)$$

Entonces la corriente de compensación es igual a:

$$i_c = i_{lq} + i_{lh} \quad (2.3)$$

Esta corriente de compensación (i_c) idealmente debe buscar que la corriente que circula por la red (i_s) sea de frecuencia fundamental, estrictamente de secuencia positiva y en fase con la tensión de la fuente en el PCC. De esta manera, previene que cargas perturbadoras afecten a los demás usuarios del servicio eléctrico.

En este modo de operación, el DSTATCOM puede ejercer acciones de corrección del factor de potencia, mitigación de la distorsión armónica de la corriente que demanda la carga, compensación de la componente de continua y de desequilibrios presentes en las corrientes que fluyen por la red de suministro [10, 16]. La potencia activa que entrega la

fuente de suministro, será consumida por las pérdidas en la red y por la parte real de la carga, es decir, el compensador paralelo idealmente no consume potencia activa para realizar la compensación.

Existen diferentes técnicas de compensación que son usadas para generar las corrientes de referencia trifásicas. Estas estrategias de control juegan un papel muy importante en la eficiencia y características del DSTATCOM ya que de ellas depende su rapidez, respuesta transitoria y rendimiento en estado estable [8, 10, 16]. Según la estrategia de compensación, estas se clasifican como basadas en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo. Entre las estrategias en el dominio del tiempo, se destacan [10]:

- ❖ Compensación basada en las teorías de la potencia instantánea.
- ❖ Compensación basada en la teoría del marco de referencia síncrono $d-q-0$.
- ❖ Compensación basada en la teoría de las componentes simétricas instantáneas.
- ❖ Compensación basada en filtros sintonizados y adaptativos.

Por su lado, las teorías de la potencia instantánea permiten calcular el valor instantáneo de las corrientes de referencia, basándose en la descomposición de la potencia instantánea que consume la carga. En este trabajo, se utilizará la teoría pq modificada, la cual fue replanteada a partir de la teoría pq original y es aplicable a sistemas trifásicos de cuatro hilos [10, 11, 14].

2.2.1 Teoría de la potencia reactiva instantánea pq modificada.

Esta teoría tiene como origen la teoría de la potencia reactiva instantánea pq que fue propuesta en 1983 por Akagi, Kanazawa y Nabae [12], la cual ha estado sujeta a diferentes interpretaciones y modificaciones [13]. La base de esta teoría radica en la compensación de un sistema trifásico (de tres y cuatro hilos) mediante la utilización de la transformación de Clarke propuesta en 1943 para pasar del dominio $a-b-c$ al dominio $\alpha - \beta-0$ y viceversa [11, 8].

La transformada de Clarke es utilizada tanto para señales de tensión como para las de corriente y se presenta en la ecuación 2.4:

$$T_{\alpha\beta 0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

La inversa de la ecuación 2.4 es su transpuesta:

$$T^{-1}_{\alpha\beta 0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{3}{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{3}{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Luego para transformar las señales de tensión y de corriente al dominio α - β -0 se utiliza la expresión 2.6, en donde $v_a(t)$, $v_b(t)$ y $v_c(t)$ son las tensiones instantáneas medidas en la red, y $v_\alpha(t)$, $v_\beta(t)$ y $v_0(t)$ representan las tensiones instantáneas transformadas al nuevo dominio:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha(t) \\ v_\beta(t) \\ v_0(t) \end{bmatrix} = T_{\alpha\beta 0} * \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

La teoría pq modificada considera las componentes de secuencia cero de la tensión y de la corriente al momento de calcular la potencia reactiva instantánea q , la cual se define en tres componentes de potencia no activa q_α , q_β y q_0 obtenidas del producto vectorial entre $v_{\alpha\beta 0}$ e $i_{\alpha\beta 0}$ [11, 15]. Partiendo de esta teoría la potencia trifásica del sistema se obtiene de la expresión 2.7:

$$\begin{bmatrix} p_{3\phi} \\ q_\alpha \\ q_\beta \\ q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & v_0 \\ 0 & -v_0 & v_\beta \\ v_0 & 0 & -v_\alpha \\ -v_\beta & v_\alpha & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Y la transformación inversa es:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_0^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & v_0 \\ 0 & -v_0 & v_\beta \\ v_0 & 0 & -v_\alpha \\ -v_\beta & v_\alpha & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{3\phi} \\ q_\alpha \\ q_\beta \\ q_0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Entonces, las corrientes de compensación que debe inyectar el DSTATCOM se citan a continuación en 2.9 para el dominio $\alpha - \beta - 0$ y $a-b-c$, respectivamente:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \\ i_{c0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} - \frac{p_{3\phi}}{v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_0^2} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} i_{ca}(t) \\ i_{cb}(t) \\ i_{cc}(t) \end{bmatrix} = T^{-1}_{\alpha\beta 0} * \begin{bmatrix} i_{c\alpha}(t) \\ i_{c\beta}(t) \\ i_{c0}(t) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

La diferencia entre la teoría pq original y la modificada, consiste en que la original solo aplica a sistemas de tres hilos, mientras que la modificada funciona para sistemas de tres y cuatro hilos. Por lo tanto, para compensar el aporte en la potencia producido por la presencia de componentes de tensión de secuencia cero v_0 , se debe seleccionar la teoría pq modificada.

Hay que indicar que en la teoría pq modificada siempre se cumple el principio de conservación de la potencia, es decir [8]:

$$s^2 = v_{\alpha\beta 0}^2 * i_{\alpha\beta 0}^2 = p_{3\phi}^2 + q_\alpha^2 + q_\beta^2 + q_0^2 \quad (2.10)$$

2.2.1.1 Simulaciones y resultados.

Se aplica la teoría pq modificada para compensar un sistema trifásico tetrafilar con tensión de suministro ideal y los siguientes cuatro escenarios de carga:

- a. Carga lineal.
- b. Carga lineal desequilibrada.
- c. Carga no lineal equilibrada.

d. Carga no lineal desequilibrada.

La tensión de suministro considerada en los cuatro casos, corresponde con las señales en la figura 2.3, cuyos valores son iguales a los expuestos en la ecuación 2.11:

$$v_a(t) = 120\sqrt{2} * \cos(2 * \pi * f * t) \text{ [V]}$$

$$v_b(t) = 120\sqrt{2} * \cos(2 * \pi * f * t - 120^0) \text{ [V]} \quad (2.11)$$

$$v_c(t) = 120\sqrt{2} * \cos(2 * \pi * f * t + 120^0) \text{ [V]}$$

Donde la frecuencia: $f = 60 \text{ Hz}$

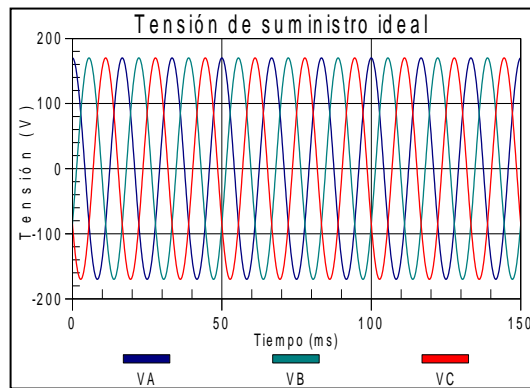


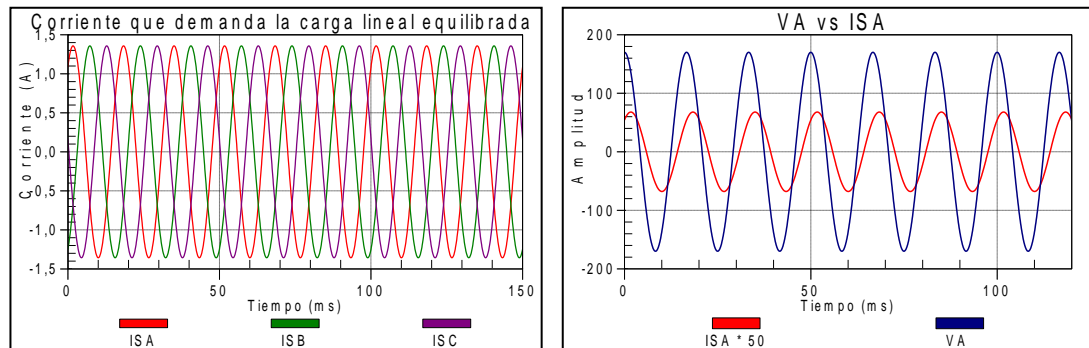
Figura 2.3 Tensión de suministro ideal para la simulación del DSTATCOM en modo control corriente.

Caso 1: Tensión de suministro ideal y carga lineal equilibrada.

En el Anexo A, se observa el circuito realizado en el programa de simulación ATP Draw, donde el valor de la carga equilibrada corresponde a: $R = 100 \Omega$, $L = 200 \text{ mH}$ y el valor de la tensión de suministro igual a la ecuación 2.11.

En la figura 2.4a se muestra la gráfica de las corrientes que alimentan la carga, las cuales corresponden a un conjunto trifásico balanceado. La naturaleza de la carga, tiene implicaciones sobre el factor de potencia, que para este caso es característico de una

carga con componente inductiva con un valor aproximado de 0.8, lo cual produce un corrimiento de fase en atraso de las corrientes con respecto a las tensiones medidas en el PCC, tal como se presenta en la figura 2.4b, para la tensión de alimentación y corriente de la carga de la fase A.

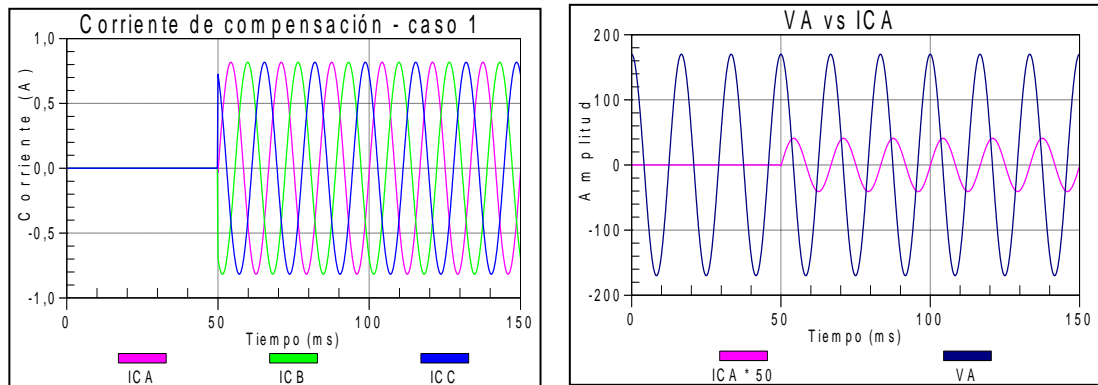


(a) Corrientes trifásicas en la red.

(b) Factor de potencia en la red, fase A.

Figura 2.4 Corrientes demandadas por la carga lineal equilibrada.

Las corrientes de compensación, de acuerdo a la estrategia de control que aplica la teoría pq modificada, buscan lograr un factor de potencia unitario de cara a la red. Estas corrientes inyectadas por el DSTATCOM en el PCC a partir de los 50 [ms], aparecen en la figura 2.5a y constituyen un conjunto balanceado, que cubre los requerimientos de energía reactiva de la carga por cada fase. Siendo así, estas corrientes se mantienen ortogonales con respecto a las tensiones de alimentación y no producen un intercambio de potencia activa entre el DSTATCOM y la red. La figura 2.5b permite ver el desfase entre la corriente de compensación para la fase A y la tensión correspondiente en el PCC, lo cual se replica en las fases B y C.



(a) Corriente trifásica de Compensación.

(b) Desfase entre v_a e i_{ca}

Figura 2.5 Corrientes de compensación para el DSTATCOM, modo control corriente – caso 1.

Para ratificar lo anterior, la figura 2.6 permite ver que antes y durante la compensación, la potencia activa suministrada por la red corresponde exactamente con la potencia de consumo de la carga, mientras que la potencia promedio de intercambio entre el DSTATCOM y la red tiene valor nulo.

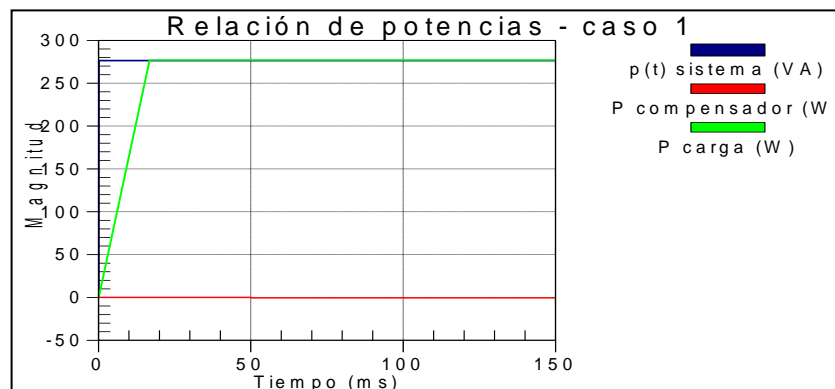


Figura 2.6 Potencias relacionadas en la compensación del DSTATCOM, modo control corriente - caso 1.

El caso presentado específicamente, ilustra el efecto que causa un bajo factor de potencia en las corrientes de la red, sobre la eficiencia del transporte de energía en el sistema de distribución. En este sentido, la compensación busca que las tres corrientes de fase continúen balanceadas, pero su amplitud se disminuya hasta el valor que garantiza el

suministro de potencia activa total de la carga, lo que corresponde con el resultado que aparece en la figura 2.7.

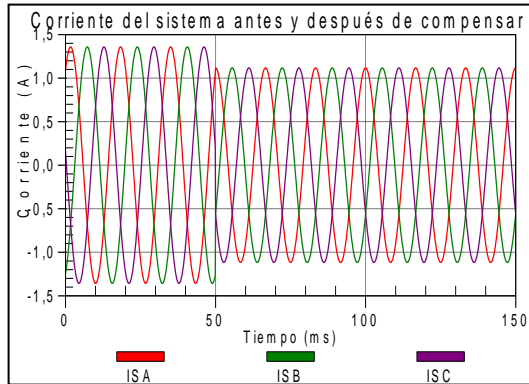


Figura 2.7 Corriente de la red antes y durante la compensación del DSTATCOM, modo control corriente – caso 1.

Así, una vez las corrientes de compensación son inyectadas a partir de los 50 [ms], las corrientes por la red disminuyen su amplitud, mientras conforman un conjunto balanceado y en fase con la tensión correspondiente en el PCC, como se observa en la figura 2.8. Esto mejora substancialmente la eficiencia del sistema de distribución, por lo menos en el tramo de la red comprendido entre el PCC y el siguiente punto de derivación hacia el lado de la fuente.

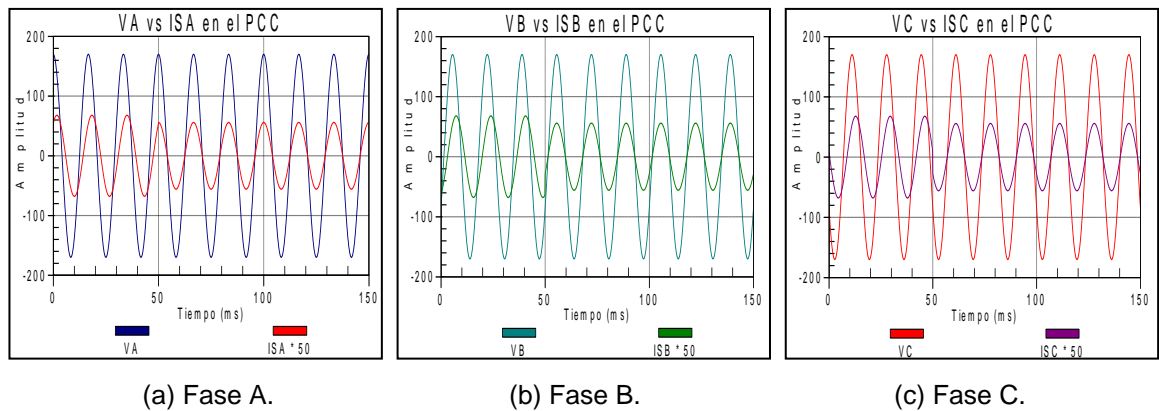


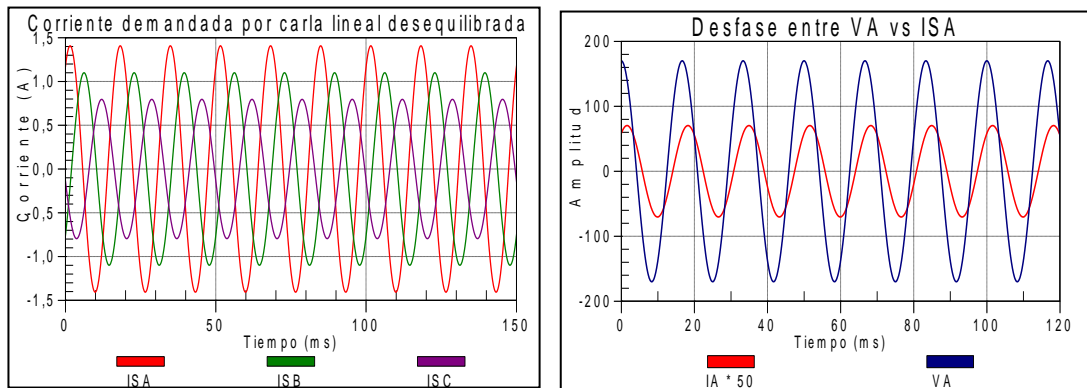
Figura 2.8 Relación entre las corrientes de la red y las tensiones en el PCC antes y durante la compensación del DSTATCOM, modo control corriente – caso 1.

Caso 2: Tensión de suministro ideal y carga lineal desequilibrada.

En el Anexo A se observa el circuito realizado en el programa de simulación ATPDRAW. La tensión de la fuente es igual a la ecuación 2.11 (figura 2.3) y los valores de la carga desequilibrada corresponden a:

- Fase A: $R = 100 \Omega$, $L = 180 \text{ mH}$.
- Fase B: $R = 150 \Omega$, $L = 100 \text{ mH}$.
- Fase C: $R = 200 \Omega$, $L = 200 \text{ mH}$.

Las corrientes que demanda la carga se muestran en la figura 2.9a y su desfase con respecto a la tensión de la fase A en la figura 2.9b. Estas corrientes circulan tanto en la carga como en el sistema.



(a) Conjunto de corrientes trifásicas antes de la compensación.

(b) Factor de potencia en la red de la fase A antes de la compensación.

Figura 2.9 Corrientes demandadas por la carga lineal desbalanceada.

Bajo estas condiciones de carga, las corrientes están conformadas por componentes de secuencia positiva, negativa y cero. La componente de secuencia positiva es propia de sistemas balanceados, mientras que las componentes de secuencia negativa y cero aparecen debido al desbalance. Para conocer el grado de desbalance en corriente se hallan los factores u_2 y u_0 dados en porcentaje de las ecuaciones 2.12 y 2.13 [17, 18].

$$u_2 = \frac{I_2}{I_1} \quad (2.12)$$

$$u_0 = \frac{I_0}{I_1} \quad (2.13)$$

En donde:

- ❖ u_2 : representa el desbalance debido a la componente de corriente de secuencia negativa.
- ❖ u_0 : representa el desbalance debido a la componente de corriente de secuencia cero.
- ❖ I_0, I_1, I_2 : son las componentes de corriente de secuencia cero, positiva y negativa respectivamente, para la frecuencia fundamental.

A partir de las corrientes de la red I_{SA}, I_{SB} e I_{SC} , las cuales expresadas de forma fasorial corresponden con:

$$I_{SA} = 0.9948 \angle -88.19^\circ; \quad I_{SB} = 0.7772 \angle 171.9^\circ; \quad I_{SC} = 0.5624 \angle 45.32^\circ$$

Utilizando la transformación de Fortescue, para la estimación de las componentes de secuencia de las corrientes; para la fase A se tiene:

$$I_0 = 0.098 \angle -120.6^\circ; \quad I_1 = 0.765 \angle -101.2^\circ; \quad I_2 = 0.238 \angle -54.8^\circ$$

Entonces los factores de desbalance para las corrientes en la red antes de la compensación, corresponden a:

$$u_2 = 31.1\%; \quad u_0 = 12.8\%$$

Al conectar el DSTATCOM a la red se busca compensar el desbalance que produce la carga y que el conjunto de corrientes que circulan por la red estén en fase con la tensión

en el PCC. Las corrientes que entrega el compensador se observan en la figura 2.10, las cuales son inyectadas al sistema a partir de los 60 milisegundos.

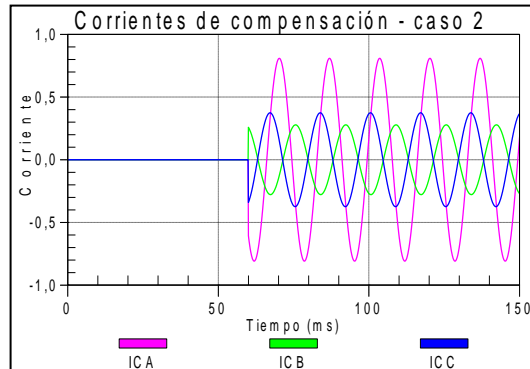


Figura 2.10 Corrientes de compensación para el DSTATCOM, modo control corriente – caso 2.

Como se observa en la figura 2.11, el DSTATCOM se conecta a la red desde los 0.060 [s] y realiza la compensación a partir de este momento, lo cual se manifiesta en el cambio de amplitud y fase de las corrientes por la red.

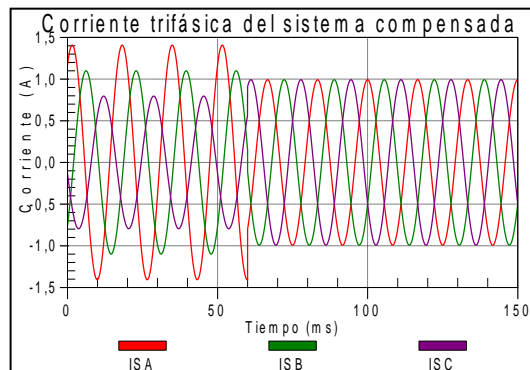
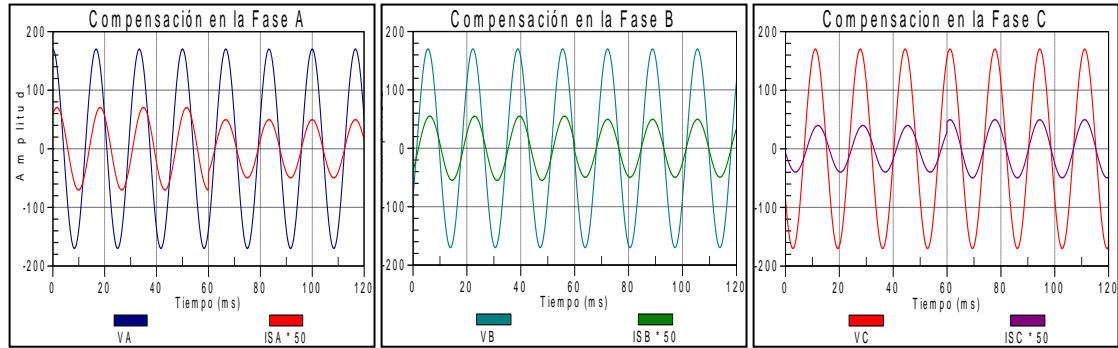


Figura 2.11 Corrientes de la red, antes y durante la compensación del DSTATCOM, modo control corriente – caso 2.

La figura 2.12, muestra la relación de ángulo de fase entre las tensiones en el PCC y las corrientes compensadas en la red. El cambio en las características de amplitud y fase de

las corrientes, permite que alimenten la potencia activa total de la carga, al tiempo que producen un factor de potencia unitario en referencia con las tensiones en el PCC.



(a) Fase A.

(b) Fase B.

(c) Fase C.

Figura 2.12 Relación entre las corrientes de la red y las tensiones en el PCC antes y durante la compensación del DSTATCOM, modo control corriente – caso 2.

La potencia que entrega el DSTATCOM para realizar la compensación a partir del momento que comienza la simulación, se muestra en la figura 2.13, donde se deduce que la red conduce la potencia activa que consume la carga trifásica y el compensador entrega la potencia no activa que demanda cada fase. La potencia activa se distribuye en igual proporción para cada fase lo que hace que las corrientes sean balanceadas y tengan el mínimo valor eficaz posible. La Potencia no activa que requiere la carga, es suministrada por el DSTATCOM. El intercambio neto de potencia entre la red y el compensador es igual a cero.

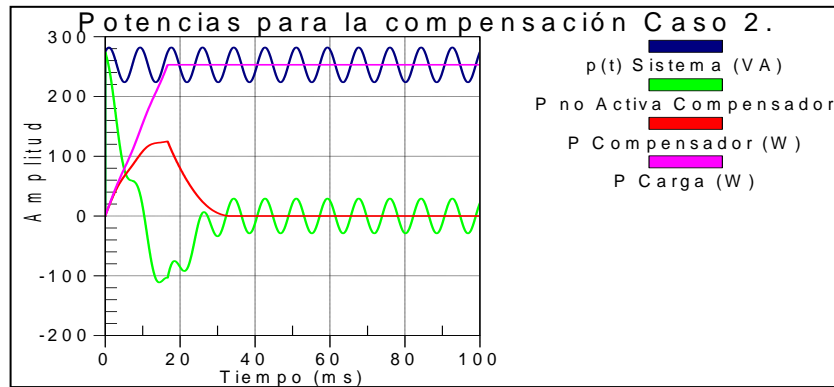


Figura 2.13 Potencias relacionadas en la compensación del DSTATCOM, modo control corriente - caso 2.

La presencia de corriente por el neutro antes y durante la compensación puede verse en la figura 2.14, donde el compensador se conecta a la red a partir de 60 [ms]. Se observa que la teoría $p-q$ modificada que incluye la componente homopolar en el cálculo de las corrientes de compensación, puede hacer que no haya retorno de corriente por el neutro de la red.

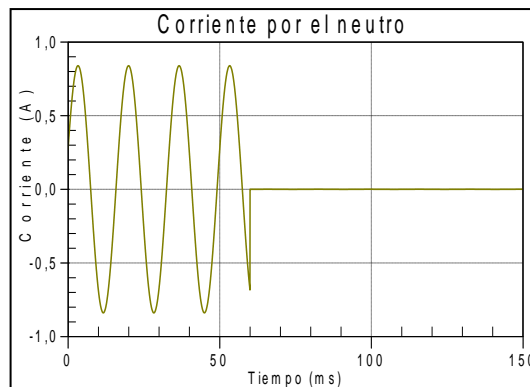
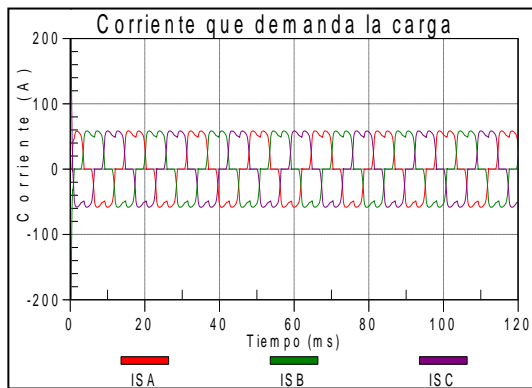


Figura 2.14 Corriente por el neutro antes y durante la compensación del DSTATCOM, modo control corriente – caso 2.

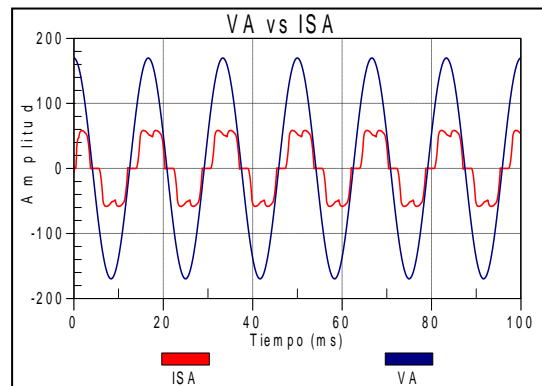
Caso 3: Tensión de suministro ideal y carga no lineal equilibrada.

En este caso, la carga no lineal corresponde a un rectificador trifásico de puente completo que alimenta una carga resistiva pura de valor 5Ω . El circuito correspondiente se muestra en el anexo B, donde la tensión de alimentación es la establecida en la ecuación 2.11.

La corriente que demanda la carga, medida en el PCC antes de compensar y su comportamiento respecto a la tensión de la red para la fase A, se observa en la figura 2.15a y 2.15b respectivamente. La distorsión generada en la corriente es debida a la no linealidad de la carga que registra aparición de armónicos ubicados en las frecuencias múltiplos de la fundamental.



(a) Corriente trifásica que demanda la carga.



(b) Corriente i_{sa} contra tensión v_a

Figura 2.15 Corriente demandada por la carga no lineal equilibrada.

La magnitud del espectro en frecuencia de la corriente i_{sa} se observa en la figura 2.16, las otras corrientes tienen el mismo contenido de armónicos por ser la carga trifásica balanceada.

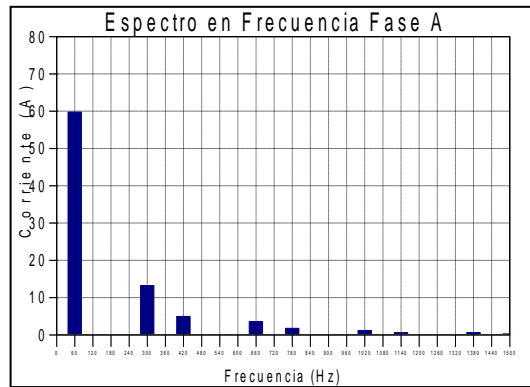
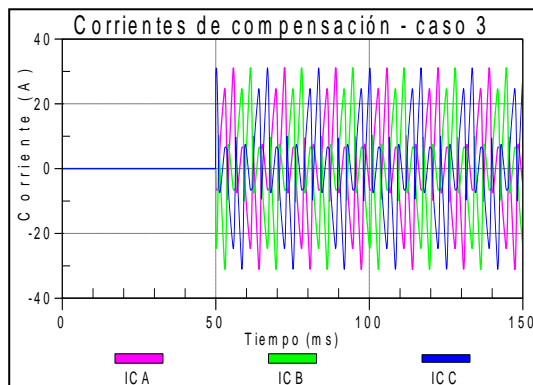
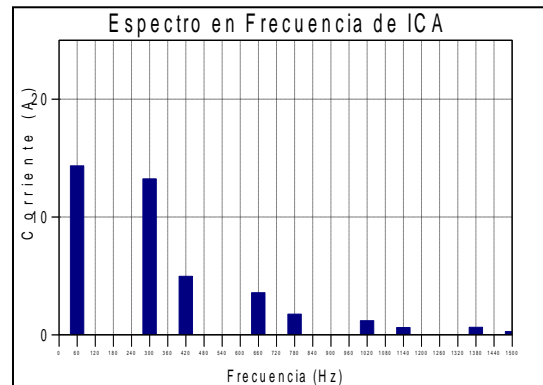


Figura 2.16 Espectro en frecuencia para la corriente demandada por la carga no lineal equilibrada en la fase A.

Nuevamente, se aplica la teoría *pq* modificada (ecuación 2.9), para estimar las corrientes de referencia que deben ser inyectadas por el DSTATCOM en el PCC y llevar a cabo la compensación, las cuales se muestran en la figura 2.17a. Las corrientes de compensación poseen un contenido alto de armónicos cuya transformada de Fourier se observa en la figura 2.17b, que sumados con los armónicos que demanda la carga son anulados para que circule en el sistema una corriente sinusoidal pura y en fase con la tensión, mejorando así la calidad en la energía eléctrica.



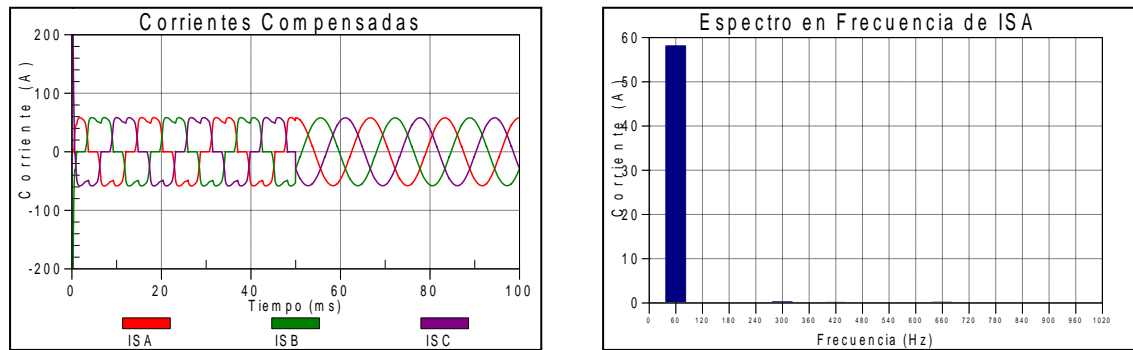
(a) Corrientes inyectadas por el DSTATCOM.



(b) Espectro en frecuencia de la corriente de compensación de la fase A.

Figura 2.17 Corrientes de compensación para el DSTATCOM, modo control corriente – caso 3.

La compensación inicia a los 0.05 [s] y el contenido de armónicos de las corrientes de la red se reduce considerablemente como se puede apreciar en la figura 2.18a y 2.18b, donde se encuentran las corrientes medidas en el PCC y su transformada de Fourier para la fase A en su último ciclo de simulación.



(a) Corrientes trifásicas compensadas.

(b) Espectro en frecuencia de i_{sa} después de la compensación.

Figura 2.18 Corrientes de la red, antes y durante la compensación del DSTATCOM, modo control corriente – caso 3.

La corriente i_{sa} y la tensión v_a en el PCC antes y después de la compensación, se pueden apreciar en la figura 2.19. La acción de control del DSTATCOM sobre las corrientes de la red, hace que se reduzca de forma considerable su contenido de armónicos, a la vez que consigue un factor de potencia unitario en cada una de las fases del sistema en el PCC. La compensación tiene el mismo comportamiento para las fases B y C.

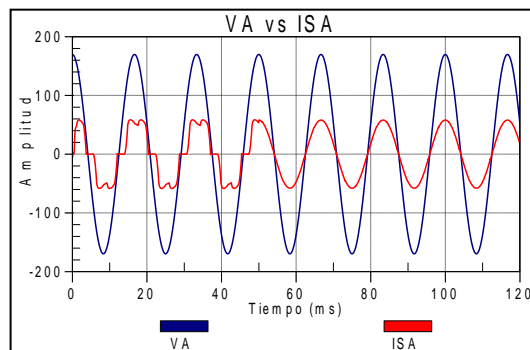


Figura 2.19 Factor de potencia en el PCC antes y después de la compensación.

Las potencias relacionadas en la compensación para el caso 3 se muestran en la figura 2.20, donde se observa que la potencia activa consumida por la carga trifásica es entregada únicamente por el sistema y la demanda no activa es suministrada por el compensador, de esta forma, se garantiza un transporte óptimo de energía eléctrica en la red.

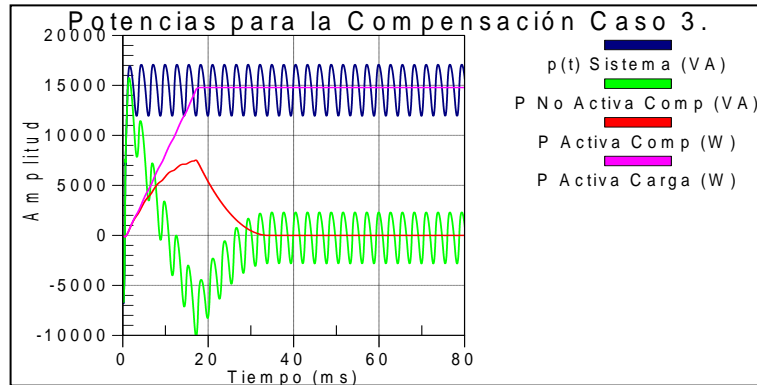


Figura 2.20 Potencias relacionadas en la compensación del DSTATCOM, modo control corriente - caso 3.

Caso 4: Tensión de suministro ideal y carga no lineal desequilibrada.

La carga no lineal desequilibrada corresponde a un puente rectificador trifásico de media onda que alimenta una carga inductiva de valores:

- Fase A: $R = 70 \Omega$, $L = 70 \text{ mH}$.
- Fase B: $R = 80 \Omega$, $L = 100 \text{ mH}$.
- Fase C: $R = 120 \Omega$, $L = 50 \text{ mH}$.

El circuito simulado se observa en el Anexo C. La tensión de suministro es la establecida en la ecuación 2.11.

La carga demanda unas corrientes distorsionadas y desequilibradas mostradas en la figura 2.21, que poseen un contenido alto de armónicos y están compuestas por

corrientes de secuencia positiva, negativa y cero. En la figura 2.22 se observa la transformada de Fourier de estas corrientes para las fases A, B y C respectivamente.

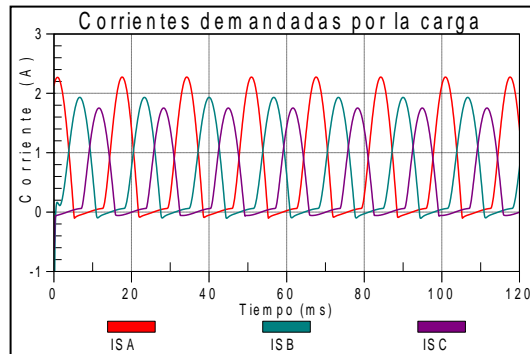


Figura 2.21 Corriente demandada por la carga no lineal desequilibrada.

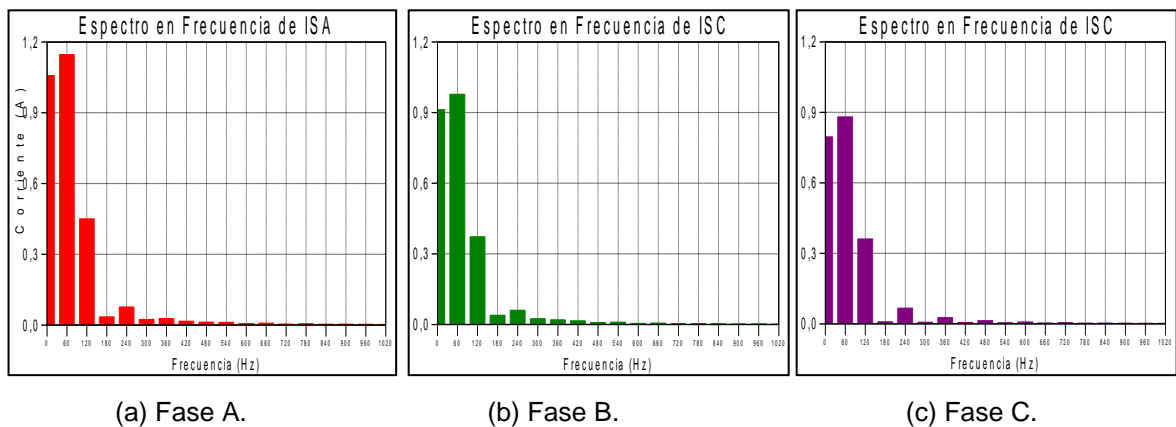


Figura 2.22 Espectro en frecuencia de las corrientes que demanda la carga no lineal desequilibrada.

El DSTATCOM ajusta las corrientes de compensación de manera independiente para cada fase, para que al ser inyectadas en la red de distribución anulen el contenido de armónicos en el PCC, obteniendo una corriente sinusoidal que circule por el sistema. La figura 2.23 muestra las corrientes que inyecta el compensador a la red.

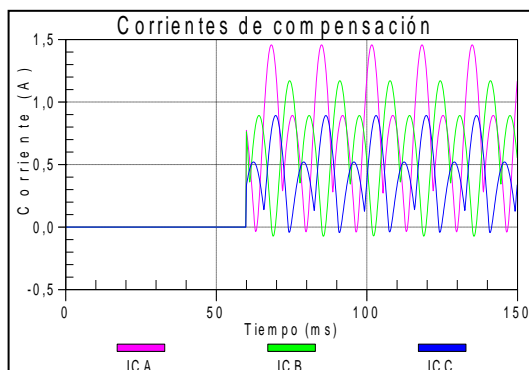


Figura 2.23 Corrientes de compensación para el DSTATCOM, modo control corriente – caso 4.

Se optó que el compensador entre en funcionamiento en un tiempo igual a 60 [ms] para observar las corrientes trifásicas de la red antes y después de la compensación. En la figura 2.24 se evidencia el correcto funcionamiento del DSTATCOM, el cual arroja un conjunto de corrientes trifásicas balanceadas. La disminución en el contenido de armónicos se observa en la figura 2.25, donde la transformada de Fourier para cada fase, comparada con la figura 2.22 indica corrección en las componentes armónicas.

En la figura 2.26 se tiene el resultado esperado que corresponde a un consumo de potencia activa igual a cero por parte del compensador, y un transporte óptimo de energía por la red hacia la carga. La demanda de potencia no activa de la carga es suministrada en su totalidad por el DSTATCOM, este suministro tiene promedio nulo.

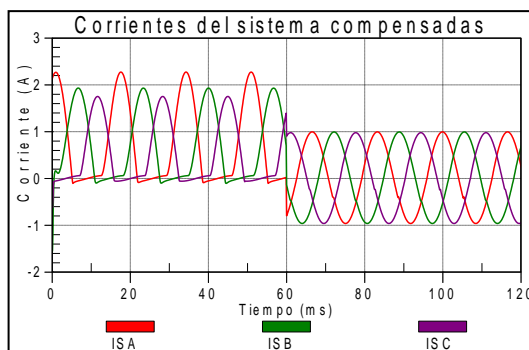
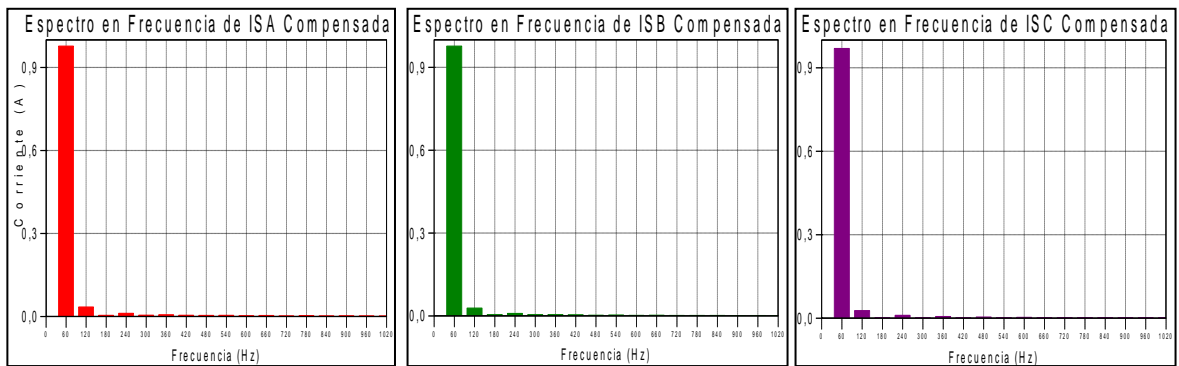


Figura 2.24 Corrientes de la red, antes y durante la compensación del DSTATCOM, modo control corriente – caso 4.



(a) Fase A

(a) Fase A

(a) Fase A

Figura 2.25 Transformada de Fourier para las corrientes de la red durante la compensación del DSTATCOM, modo control corriente – caso 4.

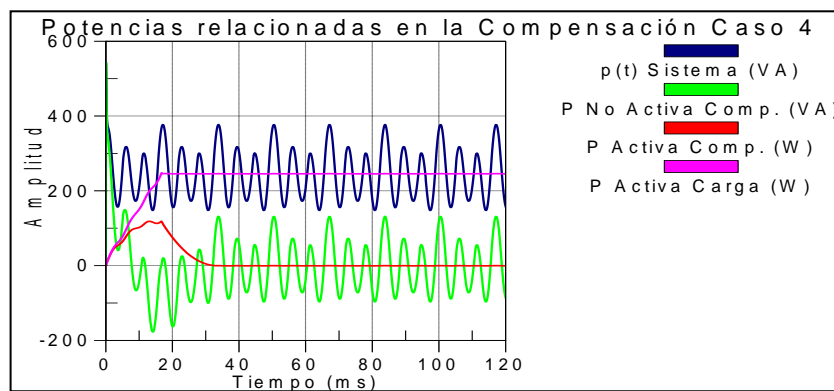


Figura 2.26 Potencias relacionadas en la compensación del DSTATCOM, modo control corriente - caso 4

Con la teoría pq modificada la corriente por el neutro es compensada para evitar su retorno a la red. Esta corriente se puede apreciar en la figura 2.27 antes y durante la compensación, donde es evidente que tiene un valor aproximado a cero una vez entra en funcionamiento el DSTATCOM a los 60 [ms].

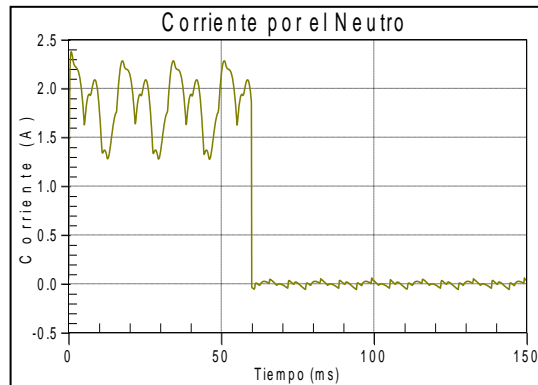


Figura 2.27 Corriente por el neutro antes y durante la compensación del DSTATCOM, modo control corriente – caso 4.

2.3 DSTATCOM en modo control tensión

El objetivo principal del modo control tensión del DSTATCOM, es garantizar que la tensión en el punto común de acoplamiento tenga las condiciones óptimas para las cargas sensibles, es decir, debe mantener un conjunto de tensiones balanceadas y reguladas en un punto de interés del sistema de distribución, durante diferentes eventos que causan perturbaciones en la red. Su esquema básico se observa en la figura 2.2.

En este modo de operación, se consigue mantener la tensión a un nivel deseado mediante la inyección de corrientes al sistema, las cuales son calculadas con un algoritmo que utiliza la diferencia que existe entre la tensión de referencia y el valor de tensión medido en el PCC, estimando así las corrientes de compensación.

Con lo anteriormente expuesto, el dispositivo puede realizar las siguientes acciones:

- Regulación de tensión [19, 20, 15, 24].
- Compensación de variaciones de tensión de corta duración (huecos y elevaciones de tensión) [21, 22, 24, 25].
- Compensación del desbalance de tensión [8, 20].
- Compensación de fluctuaciones de tensión (*voltage flicker*) [21, 23, 26].

Estas perturbaciones pueden ser mitigadas con el menor error posible dependiendo de la técnica de control utilizada. Dentro de las teorías de compensación basadas en el dominio del tiempo se encuentra la teoría del marco de referencia síncrono $d-q-0$ (*SRF, Synchronous Reference Frame*), con el cual se desarrolló el algoritmo que permite simular los resultados que arroja esta estrategia.

Con la compensación se busca que el intercambio de potencia entre el DSTATCOM y la red sea únicamente de energía reactiva, para evitar el descargue del elemento almacenador de energía del bus de DC del convertidor (Ver figura 2.1). Teniendo en cuenta esta condición, el algoritmo debe calcular las corrientes a inyectar en cuadratura con respecto a la tensión en el punto de conexión.

2.3.1 Compensación basada en la teoría del marco de referencia síncrono $d-q-0$

La teoría del marco de referencia síncrono, es un sistema de coordenadas alternativo que está constituido por tres ejes ortogonales $d-q-0$, mediante la aplicación de la transformación de Park en sincronismo con una señal de interés (tensión o corriente), dependiendo del objetivo que se busque con la transformación [11, 16, 44].

La transformada de Park se observa en la ecuación 2.14:

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

La ecuación 2.14 es utilizada para transformar señales del sistema $a-b-c$ al sistema $d-q-0$ como se aprecia en la ecuación 2.15. Esta misma expresión aplica tanto para señales de tensión como de corriente:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

La inversa de 2.14 es su transpuesta y con ella se hace la transformación del dominio $d-q-0$ al dominio $a-b-c$.

La teoría $d-q-0$ tiene dos claros objetivos que son [44]:

- Trabajar en un sistema de coordenadas en el que todas las componentes de tensión y corriente transformadas, permitan una interpretación directa y caractericen claramente a las componentes reales de tensión y corriente.
- Conseguir unas variables transformadas de tensión y corriente que den lugar a una formulación sencilla y fácilmente interpretable.

De esta manera, aplicando la ecuación 2.15, a las señales de tensión y corriente, sincronizando la transformada de Park con las componentes de tensión de secuencia positiva a la frecuencia fundamental, las componentes en $d-q-0$ tienen el siguiente significado:

$v_d \equiv$ Componente de tensión de secuencia positiva y negativa.

$v_0 \equiv$ Componente de tensión de secuencia homopolar.

$i_d \equiv$ Componente directa de corriente (proporcional a la tensión de secuencia positiva y negativa).

$i_q \equiv$ Componente normal de corriente (no activa en cuadratura con la tensión de secuencia positiva y negativa).

$i_0 \equiv$ Componente de corriente de secuencia homopolar.

Para llevar a cabo la compensación con la teoría $d-q-0$, existen diferentes pasos a tener en cuenta para estimar sus componentes y posteriormente realizar el control de potencia reactiva. El esquema de control del DSTATCOM en modo control tensión en el marco de referencia síncrono $d-q-0$ se observa en la figura 2.28.

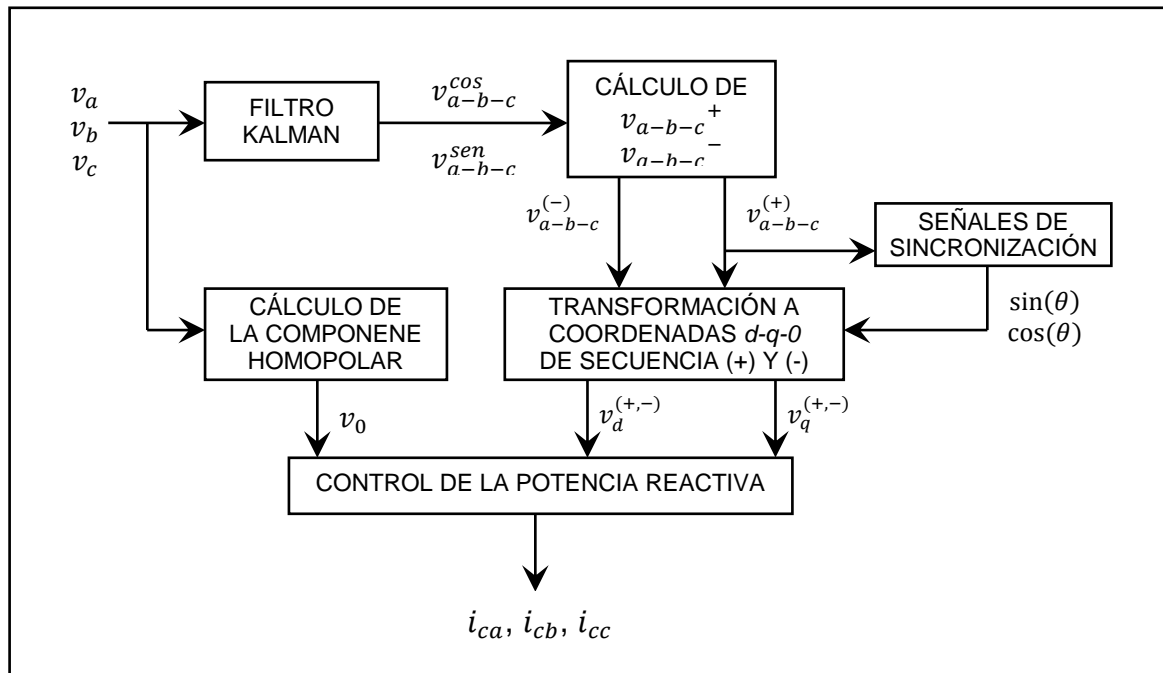


Figura 2.28 Esquema de control del DSTATCOM en modo de control tensión, en el sistema de coordenadas síncrono $d-q-0$.

Como se aprecia en este esquema, se utiliza el Filtro Kalman para obtener las señales en fase ($v_{a,b,c}^{cos}$) y en cuadratura ($v_{a,b,c}^{sen}$) de la tensión trifásica medida en el sistema de distribución. Con el resultado que arroja el filtro, se calculan las componentes de secuencia positiva y negativa de las tensiones del sistema ($v_{a,b,c}^{(+)}$, $v_{a,b,c}^{(-)}$). El sistema de coordenadas $d-q-0$, es sincronizado con las señales unitarias en fase y en cuadratura de secuencia positiva de la fase A ($\cos(\theta)$, $\sin(\theta)$). Finalmente, se estiman las componentes de los ejes directo y en cuadratura del marco de referencia síncrono ($v_d^{(+,-)}$, $v_q^{(+,-)}$) para realizar el control de la potencia reactiva y calcular las corrientes de compensación.

2.3.1.1 El filtro Kalman.

Pertenece a la familia de los filtros adaptativos, conocidos por ser sistemas que pueden ser modificados por sí mismos e implican un algoritmo recursivo para esta operación [27, 28, 45].

El filtro Kalman se basa en las ecuaciones de espacio de estados, utiliza un modelo vectorial para las señales consideradas y realiza un proceso recursivo en los datos de entrada de las señales medidas permitiendo su aplicación en sistemas digitales.

Con la aplicación del filtro, se obtiene la señal en fase y en cuadratura de la tensión medida del sistema, contando únicamente con el valor actual de la señal y su valor un instante inmediatamente anterior. Mediante algoritmos de iteración, el filtro predice el valor que tendrá la señal un instante de tiempo posterior.

Para la señal descrita en el tiempo dada por la ecuación 2.16, una medición en el instante de tiempo t_k puede definirse por 2.17, y la misma señal para el instante $t_k + T_s$, responde a la expresión 2,18 [11, 16, 27, 45].

$$x(t) = A_f \cos(\omega_f t + \phi_f) \quad (2.16)$$

$$x(t_k) = A_f \cos(\omega_f t_k + \phi_f) \quad (2.17)$$

$$x(t_k + T_s) = A_f \cos(\omega_f (t_k + T_s) + \phi_f) \quad (2.18)$$

La expresión 2.18 puede reescribirse como:

$$x(t_k + T_s) = A_f \cos(\omega_f t_k + \phi_f) \cos(\omega_f T_s) - A_f \sin(\omega_f t_k + \phi_f) \sin(\omega_f T_s) \quad (2.18)$$

De la ecuación 2.18, se encuentra que el valor de $x(t_k + T_s)$ es una función de la señal misma y su cuadratura en el instante t_k . Estas dos señales se definen como las variables de estado que permiten hallar el valor de la señal medida en el instante $t_k + T_s$.

En el instante t_k las variables de estado están descritas por:

$$x_1(t_k) = A_f \cos(\omega_f t_k + \phi_f) \quad (2.19)$$

$$x_2(t_k) = A_f \sin(\omega_f t_k + \phi_f)$$

Puede ahora establecerse una ecuación de estados, donde $x_1(t_k)$ y $x_2(t_k)$, son las variables de estado de la señal medida y su cuadratura y $x_1(t_k + T_s)$ y $x_2(t_k + T_s)$ los respectivos estados en el instante $t_k + T_s$, relacionados entre sí por la matriz de transición de estados φ_k presentada en (2.21).

$$\begin{bmatrix} x_1(t_k + T_s) \\ x_2(t_k + T_s) \end{bmatrix} = \varphi_k \begin{bmatrix} x_1(t_k) \\ x_2(t_k) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$\varphi_k = \begin{bmatrix} \cos(\omega_f T_s) & -\text{sen}(\omega_f T_s) \\ \text{sen}(\omega_f T_s) & \cos(\omega_f T_s) \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

La aplicación de este algoritmo durante la compensación del DSTATCOM es para obtener la señal en cuadratura de la tensión, pero además puede obtenerse la magnitud y el ángulo instantáneo de la señal medida, a partir de $x_1(t_k)$ y $x_2(t_k)$, como se muestra en 2.22 y 2.23:

$$A_f = \sqrt{x_1(t_k)^2 + x_2(t_k)^2} \quad (2.22)$$

$$(\omega_f t_k + \phi_f) = \tan^{-1} \left(\frac{x_2(t_k)}{x_1(t_k)} \right) \quad (2.23)$$

Para entender el algoritmo recursivo que aplica el filtro Kalman y la iteración cíclica que realiza cada paso de simulación, remítase a la figura 2.29 donde se observa su diagrama de flujo [11, 28].

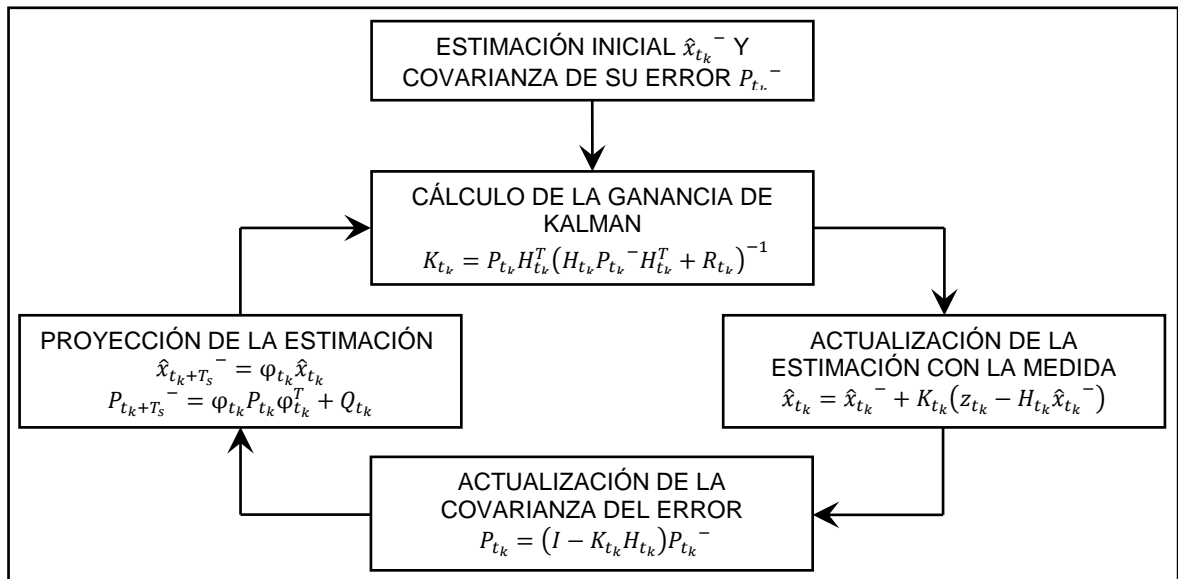


Figura 2.29 Diagrama de flujo del filtro Kalman.

Fuente [45]

Donde:

\hat{x}_{t_k} : Estado de la señal medida en el tiempo k .

P_{t_k} : Covarianza del error en el tiempo k .

K_{t_k} : Ganancia de Kalman para el tiempo k .

R_{t_k} : Matriz de covarianza del vector de ruido V_{t_k} en la medición.

V_{t_k} : Ecuación de ruido blanco, es un error aleatorio de la ecuación de medida.

H_{t_k} : Matriz de medición de los estados.

Z_{t_k} : Vector de los estados de medida.

φ_{t_k} : Matriz de transición de estados. Relaciona el estado en el tiempo $t_k + T_s$ con el tiempo t_k .

Q_{t_k} : Vector de ruido blanco, representa las variables aleatorias de los estados.

$V_{t_k} \neq Q_{t_k}$

2.3.1.2 Cálculo de las componentes de secuencia positiva, negativa y cero en el marco de referencia *a-b-c*.

Las componentes de secuencia positiva y negativa se hallan aplicando las expresiones 2.24 y 2.25 respectivamente [29]. La estimación de la componente de secuencia cero se encuentra aplicando la ecuación 2.26.

$$\begin{bmatrix} v_{a^+} \\ v_{b^+} \\ v_{c^+} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 & 0 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a^{cos} \\ v_a^{sen} \\ v_b^{cos} \\ v_b^{sen} \\ v_c^{cos} \\ v_c^{sen} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$\begin{bmatrix} v_{a^-} \\ v_{b^-} \\ v_{c^-} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 & 0 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a^{cos} \\ v_a^{sen} \\ v_b^{cos} \\ v_b^{sen} \\ v_c^{cos} \\ v_c^{sen} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$v^0 = v_a^0 = v_b^0 = v_c^0 = \frac{1}{3}(v_a + v_b + v_c) \quad (2.26)$$

El método de las componentes simétricas es una analogía del Teorema de Fortescue pero en este caso en el dominio del tiempo. Se transforma un conjunto de tensiones o corrientes trifásicas a tres sistemas de fasores balanceados obteniendo de ellos las señales de sincronización para la transformada de Park.

2.3.1.3 Sincronización de la transformada de Park.

Con las tres componentes de secuencia positiva (v_a^+, v_b^+, v_c^+) calculadas en el ítem anterior, se estima el valor de la tensión en cuadratura con la fase A. Las amplitudes de las dos señales (en fase y en cuadratura) se deben convertir a valor unitario para obtener tan solo $sen(\theta)$ y $cos(\theta)$ como se observa en la figura 2.30.

Para entender este procedimiento y su utilidad, observe la figura 2.30 donde se encuentran ubicadas las tensiones de secuencia positiva v_a^+, v_b^+, v_c^+ . La tensión v_a^{sen} (valor

en cuadratura con la fase A) se halla con las tensiones v_b^+ y v_c^+ como se observa en la ecuación 2.27:

$$v_a^{sen} = \frac{1}{\sqrt{3}}(v_b^+ - v_c^+) \quad (2.27)$$

El valor de la magnitud de la tensión v_a^+ se halla a partir de los valores v_a^+ y v_a^{sen} , ver expresión 2.28:

$$|v_a^+| = \sqrt{(v_a^+)^2 + (v_a^{sen})^2} \quad (2.28)$$

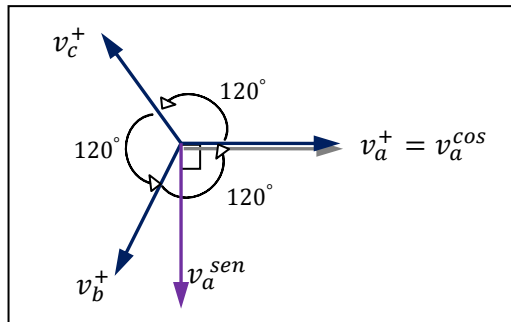


Figura 2.30 Sistema de tensiones trifásicas de secuencia positiva, para obtener las señales de sincronización.

Con la expresión 3.28 se consiguen las señales de sincronización como sigue:

$$\cos(\theta) = \frac{v_a^{cos}}{|v_a^+|} \quad (2.29)$$

$$\sen(\theta) = \frac{v_a^{sen}}{|v_a^+|} \quad (2.30)$$

2.3.1.4 Cálculo de las componentes de secuencia positiva y negativa en el marco de referencia síncrono $d-q-0$.

Como se observa en el diagrama de la figura 2.29, para calcular las tensiones de secuencia positiva y negativa en el marco de referencia síncrono $d-q-0$ se utilizan las tensiones de secuencia positiva y negativa en el sistema $a-b-c$. Es decir, los resultados obtenidos de 2.24 y 2.25 se aplican en las ecuaciones 2.31 y 2.32, donde θ es igual al ángulo instantáneo $\omega_f t_k + \phi_f$ (ecuación 3.23) [29]. El $\cos(\theta)$ y $\sen(\theta)$ observados en estas dos matrices corresponden a las expresiones 2.29 y 2.30 respectivamente.

$$\begin{bmatrix} V_d^+ \\ V_q^+ \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\frac{1}{2}\cos(\theta) + \frac{\sqrt{3}}{2}\sen(\theta) & -\frac{1}{2}\cos(\theta) - \frac{\sqrt{3}}{2}\sen(\theta) \\ -\sen(\theta) & \frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\theta) + \frac{1}{2}\sen(\theta) & -\frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\theta) + \frac{1}{2}\sen(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{a^+} \\ v_{b^+} \\ v_{c^+} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$\begin{bmatrix} V_d^- \\ V_q^- \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\frac{1}{2}\cos(\theta) - \frac{\sqrt{3}}{2}\sen(\theta) & -\frac{1}{2}\cos(\theta) + \frac{\sqrt{3}}{2}\sen(\theta) \\ -\sen(\theta) & -\frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\theta) + \frac{1}{2}\sen(\theta) & \frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\theta) + \frac{1}{2}\sen(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{a^-} \\ v_{b^-} \\ v_{c^-} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Las tensiones de secuencia positiva y negativa transformadas son valores constantes siempre que el sistema esté libre de armónicos, por consiguiente, en condiciones de desbalance se modifican en magnitud. Los valores de referencia de las componentes de los ejes directo, en cuadratura y homopolar que corresponden a un sistema eléctrico en condiciones balanceadas son:

$$\begin{aligned} V_{ref_d}^+ &= 1 \text{ pu} & V_{ref_q}^+ &= 0 \text{ pu} \\ V_{ref_d}^- &= 0 \text{ pu} & V_{ref_q}^- &= 0 \text{ pu} \\ V_{ref}^0 &= 0 \text{ pu} \end{aligned} \quad (2.33)$$

El desbalance de tensión puede que haga aparecer un valor en la componente homopolar, cuya señal oscila a la frecuencia del sistema eléctrico y su magnitud está dada por el valor instantáneo de v^0 .

Para un sistema de distribución de 13.2 kV que alimenta una carga balanceada, donde ocurre un desbalance originado por una falla monofásica que produce una disminución de la amplitud de la tensión de 36% y 2.1% en las fases A y C respectivamente y en la fase

B un incremento de amplitud de 2.5% con respecto a su valor nominal, durante un intervalo de tiempo que va desde 0.1 [s] hasta 0.3 [s], es posible predecir que las componentes en el sistema $d-q-0$ presenten valores diferentes a los de la expresión 2.33 teniendo en cuenta que dicha expresión corresponde a cantidades en pu y que para el ejemplo expuesto la tensión base es de 13.2 kV.

Tabla 2.1 Relación entre las tensiones en $d-q-0$ para el control de la potencia.

Valor de referencia	Valor real transformado	Error en tensión
$V_{ref_d}^+ = 13200 \text{ V}$	$V_d^+ = 11580 \text{ V}$	1620 V
$V_{ref_d}^- = 0 \text{ V}$	$V_d^- = -1583,45 \text{ V}$	1583,45 V
$V_{ref_q}^+ = 0 \text{ V}$	$V_q^+ = 0 \text{ V}$	0 V
$V_{ref_q}^- = 0 \text{ V}$	$V_q^- = 779,65 \text{ V}$	-779,65 V
$V_{ref}^0 = 0 \text{ V}$	$V^0 = 1600 \cos(\omega t + \varphi) \text{ V}$	$-1600 \cos(\omega t + \varphi) \text{ V}$

La representación de la perturbación de tensión en los dos marcos de referencia ($a-b-c$ y $d-q-0$) se observan en la figura 2.31 y los errores con respecto a los valores de referencia se presentan en la figura 2.32. En la tabla 2.1 esta la relación que existe entre los valores de tensión de referencia y el real además de el error entre estas dos cantidades, que comparados con las figuras 2.31 y 2.32 son muy similares.

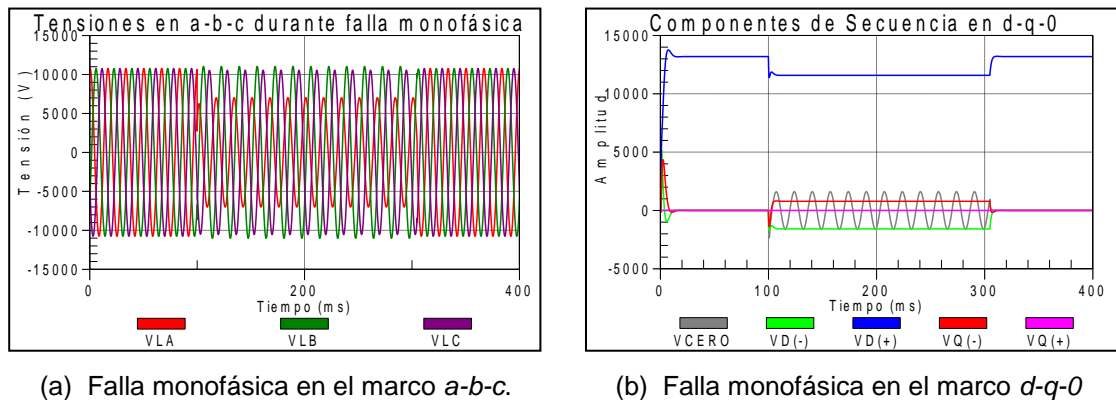


Figura 2.31 Transformación de las tensiones del marco $a-b-c$ al marco $d-q-0$ durante una falla monofásica.

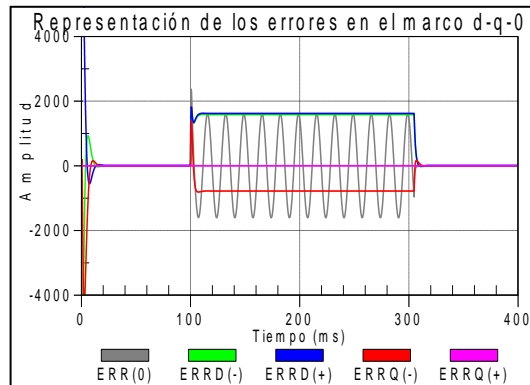


Figura 2.32 Errores de tensión a compensar en el marco $d-q-0$ durante una falla monofásica.

2.3.1.5 Control de la potencia reactiva.

El intercambio de potencia entre el compensador y la red debe ser de promedio cero, para ello, el DSTATCOM debe generar las corrientes de compensación de forma que en estado de operación estable, el compensador no consuma ni entregue potencia activa. En la figura 2.33 se observa un esquema que ilustra la forma en que el DSTATCOM aplica esta estrategia de compensación para realizar el control de intercambio de potencia con la red.

El compensador utiliza cuatro controladores PI que calculan las corrientes de compensación con base en el error hallado en cada componente de secuencia en el marco $d-q-0$. El error para la tensión en el eje directo de secuencia positiva se compensa con una corriente generada en el eje en cuadratura de la misma secuencia, y los errores medidos en las tensiones de eje directo y en cuadratura de secuencia negativa, se compensan con corrientes que se inyectan en el respectivo eje. Así se logra un valor nulo para la potencia trifásica involucrada en la compensación.

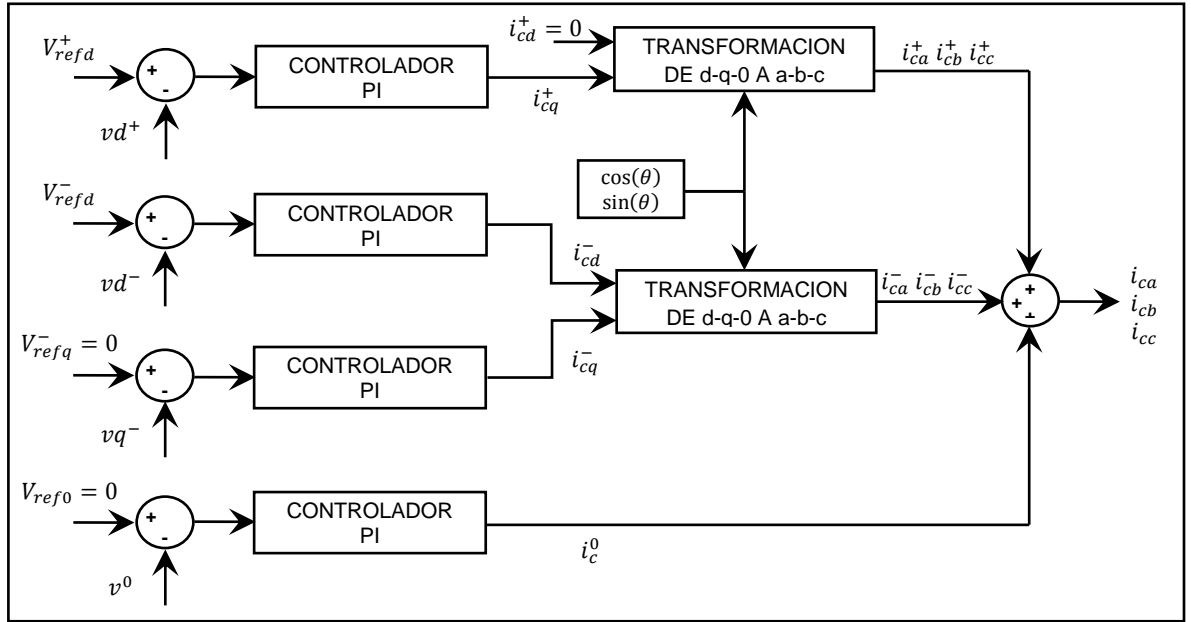


Figura 2.33 Esquema de control de la potencia reactiva del DSTATCOM.

Fuente [29]

La compensación final debe realizarse en el marco de referencia $a-b-c$, por lo que las corrientes calculadas en el marco $d-q-0$ deben transformarse nuevamente por medio de las expresiones dadas en 2.34a y 2.34b. El $\cos(\theta)$ y $\sin(\theta)$ de estas dos ecuaciones, provienen de las expresiones 2.29 y 2.30.

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^+ \\ i_{cb}^+ \\ i_{cc}^+ \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ -\frac{1}{2}\cos(\theta) + \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\theta) & \frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\theta) + \frac{1}{2}\sin(\theta) \\ -\frac{1}{2}\cos(\theta) - \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\theta) & -\frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\theta) + \frac{1}{2}\sin(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd}^+ \\ i_{cq}^+ \end{bmatrix} \quad (2.34a)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^- \\ i_{cb}^- \\ i_{cc}^- \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ -\frac{1}{2}\cos(\theta) - \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\theta) & -\frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\theta) + \frac{1}{2}\sin(\theta) \\ -\frac{1}{2}\cos(\theta) + \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\theta) & \frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\theta) + \frac{1}{2}\sin(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd}^- \\ i_{cq}^- \end{bmatrix} \quad (2.34b)$$

La corriente de secuencia homopolar que permite compensar el error hallado en la componente de tensión homopolar se calcula directamente por medio del controlador PI y tiene el mismo las tres fases:

$$i_{ca}^0 = i_{cb}^0 = i_{cc}^0 = i_c^0 \quad (2.34c)$$

Las corrientes que se inyectan a la red en $a-b-c$ corresponden a la suma de las componentes de las corrientes de secuencia positiva, negativa y cero (2.34a, 2.34b y 2.34c), tal como se muestra en 2.35:

$$i_{ca} = i_{ca}^+ + i_{ca}^- + i_c^0$$

$$i_{cb} = i_{cb}^+ + i_{cb}^- + i_c^0 \quad (2.35)$$

$$i_{cc} = i_{cc}^+ + i_{cc}^- + i_c^0$$

2.3.1.6 Análisis del intercambio de potencia.

Cuando las tensiones en el PCC durante una perturbación, alcancen el objetivo de compensación establecido para el DSTATCOM (en estado estable), pueden describirse como en la ecuación 2.36. Este conjunto de tensiones es balanceado, a la frecuencia fundamental y de secuencia positiva.

$$\begin{aligned} v_a(t) &= \sqrt{2}V\cos(\omega t + \phi) \\ v_b(t) &= \sqrt{2}V\cos(\omega t + \phi - 120^\circ) \\ v_c(t) &= \sqrt{2}V\cos(\omega t + \phi + 120^\circ) \end{aligned} \quad (2.36)$$

El control del intercambio de potencia entre el DSTATCOM y la red, establece que las corrientes inyectadas por el compensador corresponden a cantidades calculadas por medio de controladores PI para ser aplicadas por los ejes: q de secuencia positiva, d y q de secuencia negativa, y la componente homopolar. Sin embargo, las corrientes que el compensador entrega a la red para mitigar los efectos de la componente homopolar, en

condiciones de estado estable para las tensiones compensadas, no generan consumo de potencia activa, por esta razón no se incluye dentro del análisis.

Una acción de control dada por el eje q de secuencia positiva, corresponde a las corrientes de la ecuación 2.37.

$$\begin{aligned} i_{ca_1}(t) &= \sqrt{2}I\cos(\omega t + \phi - 90^\circ) \\ i_{cb_1}(t) &= \sqrt{2}I\cos(\omega t + \phi - 210^\circ) \\ i_{cc_1}(t) &= \sqrt{2}I\cos(\omega t + \phi + 30^\circ) \end{aligned} \quad (2.37)$$

En 2.38 se encuentra el cálculo de la potencia demandada por el DSTATCOM. Las corrientes inyectadas mediante esta acción de control, por estar en cuadratura con las tensiones en el PCC solo demandan potencia reactiva.

$$\begin{aligned} P_{3\phi} &= P_a + P_b + P_c = 0 [W] \\ Q_{3\phi} &= Q_a + Q_b + Q_c = VI + VI + VI = 3VI [VAR] \end{aligned} \quad (2.38)$$

Las corrientes en 2.39 y 2.41 corresponden a acciones de control dadas en los ejes directo y cuadratura de secuencia negativa, respectivamente. Cuando se alcanza el objetivo de compensación para las tensiones en el PCC, hay un flujo de potencia nulo, como se observa en 2.40 y 2.42. Debido a que las corrientes sintetizadas por el convertidor son de secuencia negativa, y las tensiones en el PCC son de secuencia positiva, el producto de estas cantidades no involucra potencia, si no una energía no activa de intercambio entre la red y el inversor [16].

$$\begin{aligned} i_{ca_2}(t) &= \sqrt{2}I\cos(\omega t + \phi) \\ i_{cb_2}(t) &= \sqrt{2}I\cos(\omega t + \phi + 120^\circ) \\ i_{cc_2}(t) &= \sqrt{2}I\cos(\omega t + \phi - 120^\circ) \end{aligned} \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} P_{3\phi} &= P_a + P_b + P_c = VI - \frac{1}{2}VI - \frac{1}{2}VI = 0 [VA] \\ Q_{3\phi} &= Q_a + Q_b + Q_c = \frac{\sqrt{3}}{2}VI - \frac{\sqrt{3}}{2}VI = 0 [VA] \end{aligned} \quad (2.40)$$

$$\begin{aligned}
i_{ca_3}(t) &= \sqrt{2}I\cos(\omega t + \phi + 90) \\
i_{cb_3}(t) &= \sqrt{2}I\cos(\omega t + \phi + 210^\circ) \\
i_{cc_3}(t) &= \sqrt{2}I\cos(\omega t + \phi - 30^\circ)
\end{aligned} \tag{2.41}$$

$$\begin{aligned}
P_{3\phi} &= P_a + P_b + P_c = \frac{\sqrt{3}}{2}VI - \frac{\sqrt{3}}{2}VI = 0 \text{ [VA]} \\
Q_{3\phi} &= Q_a + Q_b + Q_c = -VI + \frac{1}{2}VI + \frac{1}{2}VI = 0 \text{ [VA]}
\end{aligned} \tag{2.42}$$

EL análisis de flujo de potencia muestra que las acciones de control en los ejes: q de secuencia positiva, d y q de secuencia negativa, solo demandan energía reactiva y no activa que puede ser suministrada por un elemento almacenador de energía tal como un banco de capacitores.

Las corrientes descritas en 2.43, corresponden a una acción de control dada en el eje directo de secuencia positiva y transformada al sistema a-b-c.

$$\begin{aligned}
i_{ca_4}(t) &= \sqrt{2}I\cos(\omega t + \phi) \\
i_{cb_4}(t) &= \sqrt{2}I\cos(\omega t + \phi - 120^\circ) \\
i_{cc_4}(t) &= \sqrt{2}I\cos(\omega t + \phi + 120^\circ)
\end{aligned} \tag{2.43}$$

La potencia que entrega el DSTATCOM al hacer control de tensión por el eje directo se calcula en 2.44.

$$\begin{aligned}
P_{3\phi} &= P_a + P_b + P_c = VI + VI + VI = 3VI \text{ [W]} \\
Q_{3\phi} &= Q_a + Q_b + Q_c = 0 \text{ [VAR]}
\end{aligned} \tag{2.44}$$

Según la expresión 2.44, se concluye que una compensación hecha por eje d de secuencia positiva implica un intercambio de potencia activa entre el compensador y la red. Los costos de compensación para este caso serían más elevados e implican el cambio del elemento almacenador de energía a uno que pueda entregar potencia activa.

2.3.1.7 Simulaciones y resultados.

Uno de los eventos más críticos que puede causar perturbaciones de tensión en las redes de distribución, es la falla monofásica, por eso se ha elegido esta clase de falla para mostrar los resultados de la simulación y el funcionamiento del compensador. La perturbación en esta simulación tiene una duración de 200 [ms] con un intervalo de tiempo que va desde 0.1 [s] a 0.3 [s], ver figura 2.32a.

En este modo de operación, se considera una red trifásica de tres hilos, alimentada por una fuente balanceada, sin distorsión armónica y con frecuencia de 60 [Hz], la cual mantiene la tensión en la carga de interés en 13200 [V] línea – línea, durante condiciones de operación normal. La falla a simular (monofásica a tierra) es representada por una resistencia de falla a tierra en la línea de la fase A de valor 2 [Ω], cuya perturbación genera el desbalance mostrado en la figura 2.30a. La carga trifásica es balanceada de valor igual a: $R = 100 \Omega$ y $L = 50 \text{ mH}$. En el anexo D se muestra el circuito realizado en el programa de simulación ATP Draw.

En la figura 2.34 se observa el conjunto de tensiones en la carga de interés bajo condiciones de operación normal, las cuales corresponden con las siguientes expresiones:

$$v_{sa}(t) = \frac{13200\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * \cos(120 * \pi * t + 80.79^{\circ}) \text{ [V]}$$

$$v_{sb}(t) = \frac{13200\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * \cos(120 * \pi * t - 39.22^{\circ}) \text{ [V]} \quad (2.36)$$

$$v_{sc}(t) = \frac{13200\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * \cos(120 * \pi * t - 159.2^{\circ}) \text{ [V]}$$

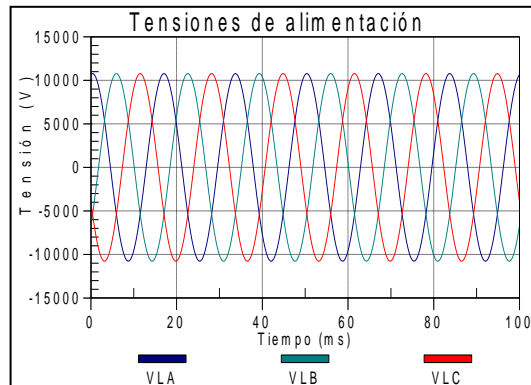
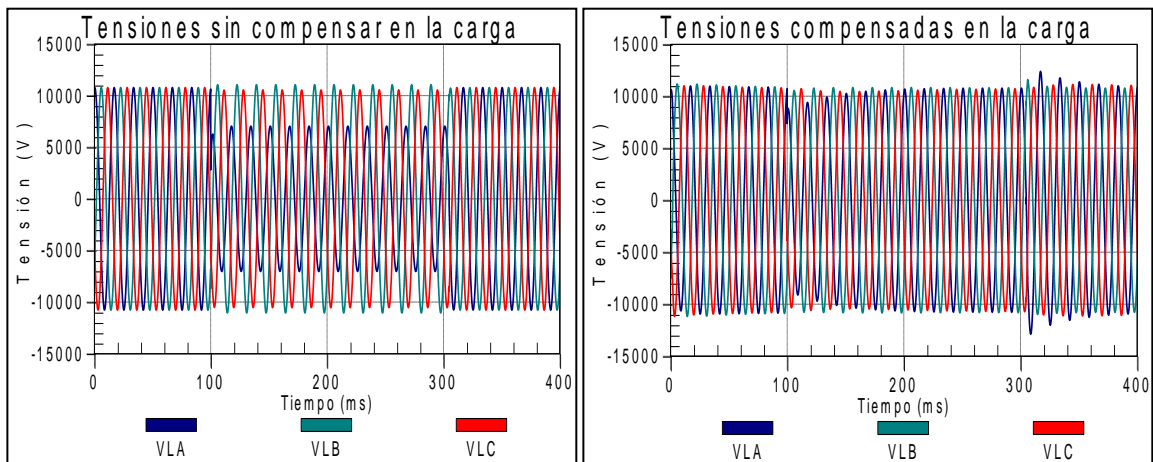


Figura 2.34 Tensiones de alimentación de la carga en condiciones normales de operación.

El DSTATCOM se encuentra en funcionamiento desde el inicio de la simulación, una vez detecte la perturbación de tensión, comenzará a compensar el desbalance provocado por la falla.

En la figura 2.35a y 2.35b se hace la comparación entre la tensión en el PCC antes y después de la compensación.



(a) Tensiones en el PCC sin compensar

(b) Tensiones en el PCC compensadas

Figura 2.35 Relación entre las tensiones en el PCC antes y durante la compensación del DSTATCOM, modo control tensión en $d-q-0$ - falla monofásica

Las tensiones medidas en el PCC bajo condiciones normales de operación, se muestran a continuación dadas como fasor. Dichas cantidades son las tensiones de referencia:

$$V_{la} = 7621 \angle 80.79^\circ \text{ [Vrms]}$$

$$V_{lb} = 7621 \angle -39.22^\circ \text{ [Vrms]}$$

$$V_{lc} = 7621 \angle -159.2^\circ \text{ [Vrms]}$$

En la figura 2.35a se muestran las tensiones que aparecen en el punto de conexión antes, durante y después de la falla sin compensación. Se observa que la falla origina desbalance, haciendo que las tensiones cambien sus amplitudes y ángulos de fase a los siguientes valores:

$$V_{la} = 4968 \angle 64.54^\circ \text{ [Vrms]} \longrightarrow \text{Disminución de la amplitud del 36\%}$$

$$V_{lb} = 7807 \angle -38.56^\circ \text{ [Vrms]} \longrightarrow \text{Elevación de la amplitud del 2.1\%}$$

$$V_{lc} = 7450 \angle -158.2^\circ \text{ [Vrms]} \longrightarrow \text{Disminución de la amplitud del 2.5\%}$$

En la figura 2.35b se muestran las tensiones en el PCC con el compensador conectado a la red. La acción de control que el DSTATCOM ejerce sobre las tensiones, se aplica en el mismo instante en que se detecta la falla, minimizando así el desbalance de tensión en el punto de interés. El contraste se hace evidente al observar el valor de las tensiones de las figuras 2.35a y 2.35b para $t = 100 \text{ [ms]}$, momento en que ocurre la falla.

La compensación realizada por el DSTATCOM, hace que durante la falla las tensiones se aproximen al valor de referencia establecido de modo que para $t = 280 \text{ [ms]}$ las tensiones alcanzan los valores que aparecen a continuación:

$$V_{la} = 7629 \angle 0.21^\circ \text{ [Vrms]}$$

$$V_{lb} = 7635 \angle -120.1^\circ \text{ [Vrms]}$$

$$V_{lc} = 7564 \angle 120.4^\circ \text{ [Vrms]}$$

Este conjunto de tensiones puede considerarse balanceado en magnitud y ángulo. Se encuentra dentro de los límites establecidos para máximos desbalances de magnitud de acuerdo al estándar IEEE Std 1159 - 1995.

El DSTATCOM inyecta corrientes de compensación a la red desde el momento en que se presenta la perturbación. En la figura 2.36 se muestran dichas corrientes, y se observa que la fase que presenta el mayor desbalance de tensión (fase A) requiere la mayor inyección de corriente para corregir la falla.

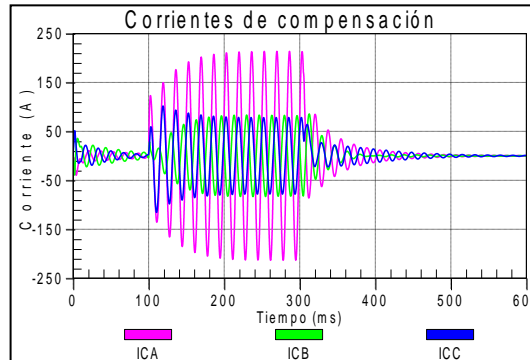


Figura 2.36 Corrientes de compensación del DSTATCOM, modo control tensión en $d-q-0$ - falla monofásica.

El flujo de potencia activa que utiliza el DSTATCOM para inyectar las corrientes de compensación se aprecia en la figura 2.37. Este valor es aproximadamente cero en estado de operación estable, lo que significa que el compensador mitiga la perturbación con potencia no activa.

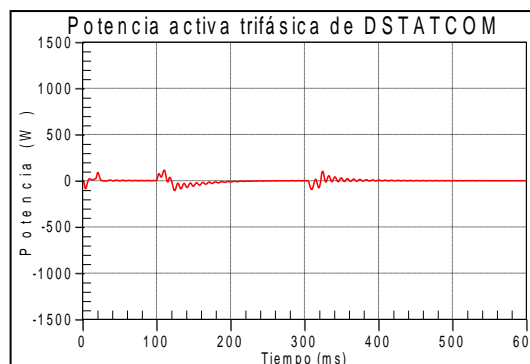


Figura 2.37 Potencia activa trifásica del DSTATCOM.

2.3.2 Compensación en el marco de referencia $a-b-c$.

Existen otras alternativas de compensación que mitigan los problemas relacionados con la calidad de la energía eléctrica. Otra técnica de compensación se enseñará en este apartado basado en el marco de referencia $a-b-c$, cuyo algoritmo de control se observa en el diagrama 2.38. Este esquema de control requiere de la medición constante de la tensión en el PCC (v_a, v_b, v_c) que comparada con un valor de referencia (V_{maxRef}) permite mediante acciones de control PI calcular las corrientes de compensación [15].

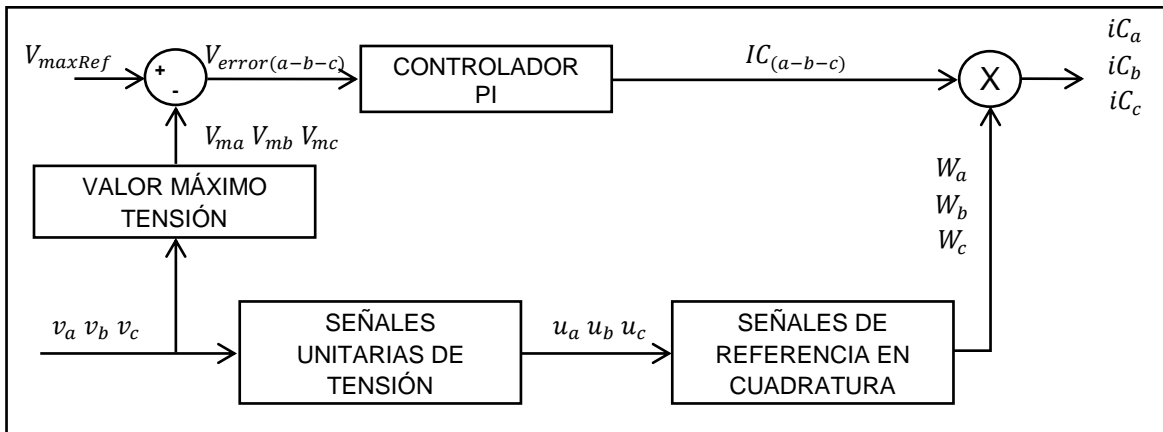


Figura 2.38 Esquema de control del DSTATCOM para el marco de referencia $a-b-c$.

Fuente [15]

El algoritmo de control debe calcular las señales de magnitud unitaria (u_a, u_b, u_c) a partir de las tensiones v_a, v_b y v_c , medidas en el PCC y estimar sus respectivas señales en cuadratura (w_a, w_b, w_c) también de amplitud unitaria, las cuales le dan forma sinusoidal a las corrientes de compensación $I_{C(a-b-c)}$ calculadas por el controlador PI. De esta manera, las corrientes inyectadas por el DSTATCOM están a 90° con respecto a las tensiones en el punto de interés, disminuyendo así la potencia activa requerida por el compensador.

Las ecuaciones 2.37 y 2.38 enseñan la deducción de las señales unitarias:

$$u_a = \frac{v_a}{V_{ma}}; \quad u_b = \frac{v_b}{V_{mb}}; \quad u_c = \frac{v_c}{V_{mc}} \quad (2.37)$$

$$w_a = \frac{-u_b + u_c}{\sqrt{3}}; \quad w_b = \frac{-u_c + u_a}{\sqrt{3}}; \quad w_c = \frac{-u_a + u_b}{\sqrt{3}} \quad (2.38)$$

La representación fasorial de las señales unitarias en fase y en cuadratura con las tensiones en el PCC se aprecia en la figura 2.39.

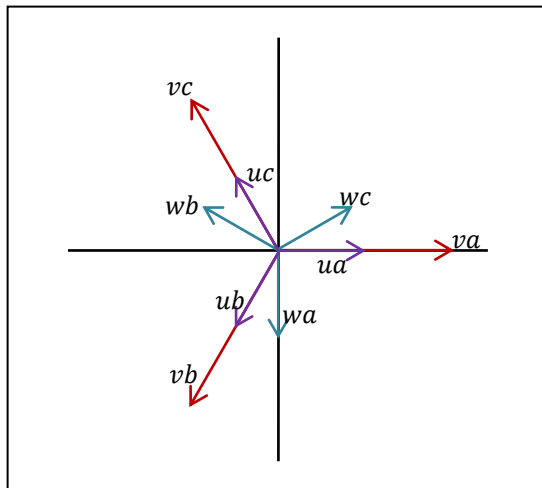


Figura 2.39 Relación fasorial de las señales unitarias, en fase y en cuadratura con las tensiones en el PCC

El controlador PI funciona independientemente para cada fase, a él ingresa el error generado de la diferencia entre el valor máximo de las tensiones medidas y el valor máximo de referencia ($V_{error(a-b-c)}$), arrojando la máxima amplitud de las corrientes de compensación para cada fase ($I_{C(a-b-c)}$). En la expresión 2.39 se muestra el cálculo de la corriente de compensación y en 2.40 el cálculo de la señal de error:

$$I_c(t) = K_{pq} v_{error}(t) + K_{iq} \int_0^t v_{error}(\tau) d\tau \quad (2.39)$$

$$V_{error(a-b-c)} = V_{maxRef} - v_{m(a,b,c)} \quad (2.40)$$

Donde las constantes K_{pq} y K_{iq} son los valores proporcional e integral respectivamente del controlador PI y $v_{m(a,b,c)}$ denota el valor máximo de la tensión medida en el PCC.

Las corrientes de compensación inyectadas por el DSTATCOM son estimadas con la expresión 2.41:

$$i_{c_{qa}} = I_{c_a} w_a ; \quad i_{c_{qb}} = I_{c_b} w_b ; \quad i_{c_{qc}} = I_{c_c} w_c \quad (2.41)$$

2.3.2.1 Simulaciones y resultados.

En el anexo E se observa el modelo simulado en ATP Draw. Los datos del sistema de distribución a simular y la perturbación que se presenta, tienen los mismos valores y características que el sistema compensado con la teoría en el marco de referencia síncrono $d-q-0$, con el objetivo de comparar los resultados de estas dos teorías y obtener conclusiones al respecto.

En la figura 2.40a y 2.40b se observan las tensiones medidas en el PCC antes y después de la compensación respectivamente. El DSTATCOM inyecta corrientes de compensación desde el instante en que detecta la falla y hace que las tensiones lleguen al valor de referencia a los 0.22 [ms].

En la figura 2.41 se hace una ampliación de las tensiones compensadas, dentro del intervalo de tiempo de ocurrencia de la falla. La teoría aplicada en esta compensación, no consigue mantener las tensiones desfasadas 120° entre si, como se evidencia en esta figura, por lo que la hace menos eficiente al compararla con la teoría anterior.

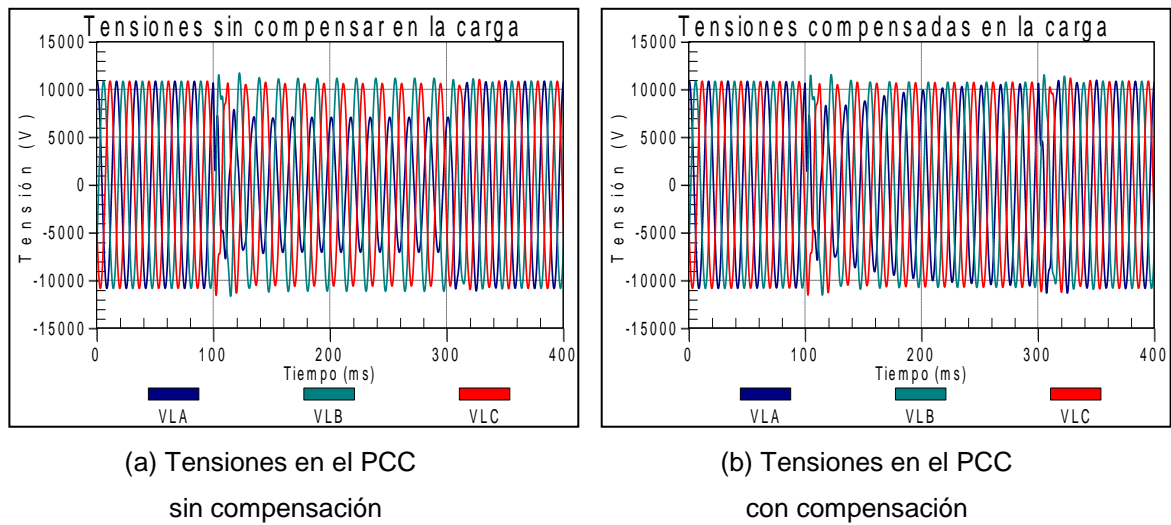


Figura 2.40 Relación entre las tensiones en el PCC antes y durante la compensación del DSTATCOM, modo control tensión en *a-b-c* - falla monofásica.

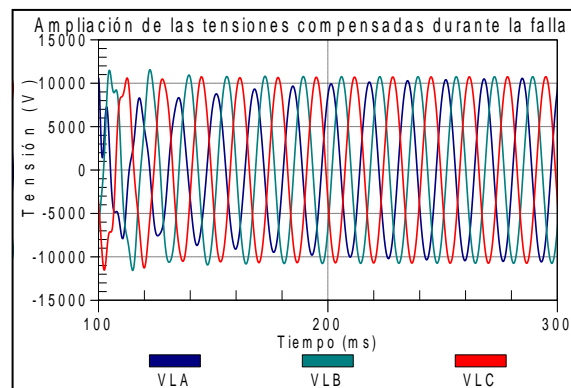


Figura 2.41 Detalle de las tensiones en el PCC durante la compensación del DSTATCOM, modo control tensión en *a-b-c* - falla monofásica.

El cálculo de las corrientes de compensación busca que éstas estén a 90° respecto a las tensiones en el PCC, sin embargo, cuando la falla se presenta, el desbalance de tensión hace que las señales u_a , u_b y u_c no estén desfasadas 120° , por lo tanto las señales w_a , w_b y w_c pueden no ser unitarias ni estar en cuadratura con las tensiones en el punto de conexión, lo cual tiene implicaciones en el intercambio de potencia entre el compensador

y la red. En las figuras 2.42 y 2.43 se encuentran las corrientes de compensación y el consumo de potencia durante la perturbación, respectivamente.

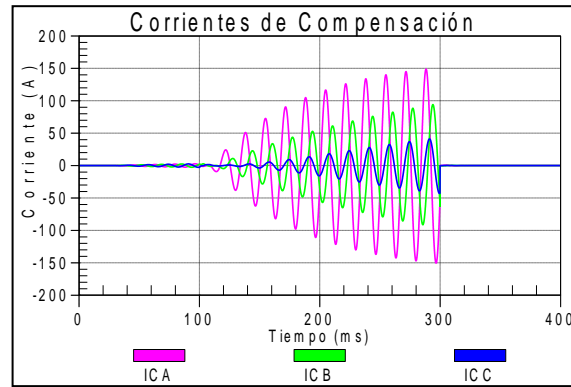


Figura 2.42 Corrientes de compensación del DSTATCOM, modo control tensión en *a-b-c* - falla monofásica.

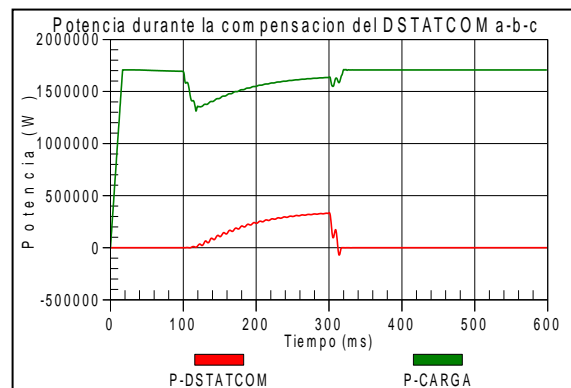


Figura 2.43 Potencia activa trifásica del DSTATCOM.

Esta técnica de compensación se puede aplicar a cargas monofásicas conectadas dentro de un sistema trifásico, siempre que éstas no sean sensibles al corrimiento de fase,

debido a que las corrientes que inyecta el DSTATCOM a la red solo contemplan la restauración de la amplitud de la tensión.

3. ANÁLISIS DEL DVR

Dentro de las soluciones que ofrecen los dispositivos *Custom Power*, y con el fin de atenuar los fenómenos electromagnéticos presentes en las tensiones de los sistemas de suministro, se encuentra el DVR (*Dynamic Voltage Restorer*), con el cual se puede proteger cargas sensibles mediante la inyección directa de tensión en serie entre la fuente de alimentación y la carga. Este compensador, se enfoca en la mitigación de perturbaciones de la onda de tensión, tales como: huecos, elevaciones, armónicos y desequilibrios de tensión.

La fabricación y puesta en servicio de un DVR, es una alternativa económicamente factible y prácticamente realizable, que permite justificar su utilización en la protección de ciertos consumos, aquellos para los que las pérdidas económicas debidas a diversas perturbaciones de tensión pueden ser suficientemente elevadas (empresas farmacéuticas, papeleras, grandes cadenas de montaje, entre otras). El continuo desarrollo tecnológico que rige el mundo actualmente permite augurar el descenso de los costos de un DVR, ampliando por tanto, su campo de aplicación [43].

En este capítulo se abordan los fundamentos de funcionamiento del DVR y se presenta una estrategia para el cálculo de la referencia de las tensiones a inyectar por parte del compensador, así como los resultados obtenidos frente a diferentes escenarios de compensación.

3.1 Estructura y principio de funcionamiento del DVR

La estructura general del DVR se muestra en la figura 3.1. Consta principalmente de una unidad de almacenamiento de energía, un convertidor DC/AC, filtro pasivo de corriente alterna y transformador de acoplamiento [39].

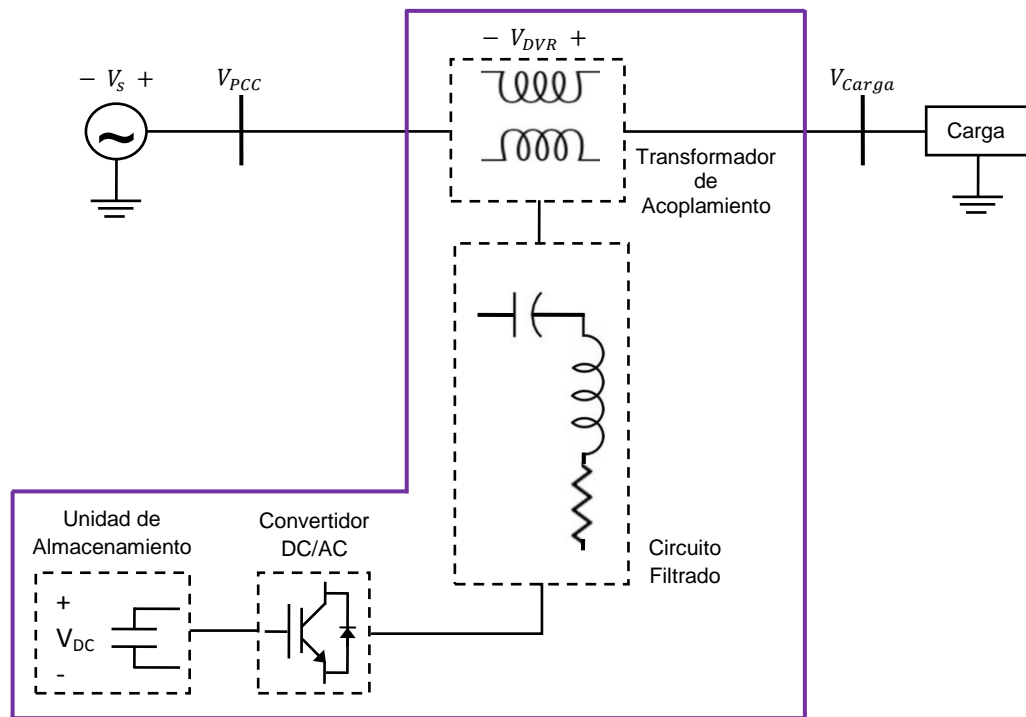


Figura 3.1 Diagrama esquemático típico de un sistema de distribución compensado por DVR.

Fuente [38]

Este trabajo, no incluye el control del convertidor, la estructura del mismo, el control del bus de continua ni el elemento almacenador de energía. Para información al respecto, consultar [38]. Para la inyección de las tensiones de compensación calculadas, el DVR se modela idealmente como una fuente controlada de tensión [8], junto con un transformador de acoplamiento a la red.

La función básica del DVR es generar a través de un convertidor una tensión dinámica controlada, que se suma a la tensión de la red de alimentación por medio de un transformador de acoplamiento. El valor instantáneo de las tensiones de fase a inyectar, es controlado para eliminar los efectos perjudiciales que se pueden generar por perturbaciones en la tensión de alimentación de la carga. Esto significa que cualquier diferencia de tensión con respecto a la tensión de servicio ideal, causada por perturbaciones en el alimentador de ac, debe ser compensada por una tensión

equivalente generada por el convertidor e inyectada a la red eléctrica a través del transformador (ver Figura 3.2) [40].

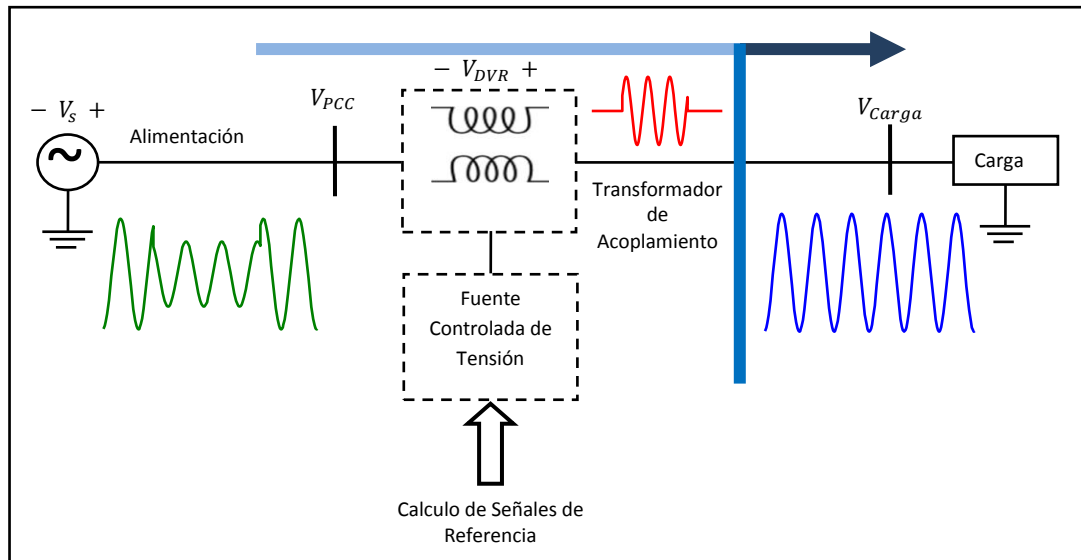


Figura 3.2 Principio de operación del DVR.

Fuente [38]

Las opciones de compensación que puede ofrecer el DVR, incluyen la mitigación de perturbaciones como huecos, elevaciones, armónicos y desequilibrios en la tensión de alimentación. Para que el DVR pueda compensar estas perturbaciones de tensión, debe ser capaz de generar y/o absorber potencia activa y/o reactiva hacia o desde el sistema de alimentación [41]. El intercambio de potencias que se realiza entre DVR y el sistema, dependerán tanto de la topología como de las estrategias de control implementadas [42].

La energía necesaria para generar las tensiones de compensación, es tomada de la unidad de almacenamiento que impone la tensión del bus de continua. Los principales dispositivos de almacenamiento de energía utilizados en el DVR son baterías, condensadores y superconductores magnéticos de almacenamiento de energía (SMES, por sus siglas en inglés *Superconductive Magnetic Energy Storage*) [42]. Sin embargo, se debe mencionar que la unidad de almacenamiento es una de los limitantes en la

capacidad de compensación del DVR, ya que no puede suministrar ni absorber cantidades ilimitadas de energía.

3.2 Cálculo de las referencias de las tensiones de compensación

Existen diferentes estrategias para el cálculo de las tensiones de compensación, que pueden producir comparativamente resultados diferenciados en las tensiones de la carga a proteger, así como también en el intercambio de potencia entre el compensador y la red. Entre las estrategias de compensación documentadas, se cuentan:

Compensación en fase: En esta estrategia la tensión compensada en la carga está en fase con la tensión de alimentación durante la falla, independientemente de la corriente de carga y la tensión de pre-falla, por tanto la magnitud de la tensión inyectada por el DVR es minimizada, pero el salto de fase no es compensado [38].

Compensación pre falla: Este método consiste en seguir la tensión de alimentación continuamente y compensar la tensión en la carga durante la falla a las condiciones de pre-falla, tanto en magnitud como en ángulo de fase; por tanto, dependiendo del salto de fase de la tensión de alimentación el DVR debe inyectar una tensión mayor a la que se necesitaría para restablecer solo la magnitud de la tensión de pre-falla [38].

Compensación en avance de fase o de energía optimizada: En este modo de compensación, solo la magnitud de la tensión restaurada en la carga debe ser mantenida a la magnitud de tensión de pre-falla, mientras que el ángulo de las tensiones compensadas, se ajusta a un valor tal, que el intercambio de potencia entre el DVR y la red se hace mínimo. La estimación de este ángulo permite que la potencia activa inyectada por el DVR pueda ser controlada para que sea positiva, negativa o en algunos casos cero [38].

En este proyecto se presenta un modelo del DVR, que utiliza una estrategia de compensación en fase, pero esta vez no con la tensión residual, sino con la componente de secuencia positiva de las tensiones medidas en el PCC; a la vez que aplica un

Como se muestra en la figura, durante un hueco o una elevación de tensión, no se produce solamente una variación en la magnitud de la tensión, sino que también puede aparecer cierto desfase adicional respecto a la tensión previa a la perturbación. De manera general, el sistema de tensiones a la entrada de un DVR durante una falla no será simétrico, por lo que se debe realizar el cálculo de la tensión de compensación teniendo en cuenta la existencia de tensiones de secuencia directa e inversa, y en algunos casos, también homopolar. Por esta razón, las fases en las que no ocurre falla, también deben ser compensadas para mitigar los efectos del corrimiento de fase. Siendo así, las tensiones de compensación están dadas por la expresión 3.1, en donde el subíndice i puede tomar los valores a, b o c correspondiendo con cada una de las fases del sistema [38,43].

$$V_{DVR_i} = \sqrt{V_{s_i}^2 + V_{carga}^2 - 2 * V_{s_i}^2 * V_{carga}^2 * \cos(\beta_i - \delta_i)} \quad (3.1)$$

Adicionalmente, la forma en que se sincroniza el marco de referencia $d-q-0$ permite que se pueda realizar la compensación de tensión incluso en presencia de armónicos.

3.3.1 Sincronización del marco de referencia $d-q-0$

La formulación del marco de referencia síncrono y la información que se puede inferir a partir de esta transformación aplicada a un conjunto de tensiones, se expuso brevemente en el capítulo 2, en donde se utilizó dentro del algoritmo para estimar las corrientes de compensación en el DSTATCOM. En este caso, se propone la transformación de las tensiones medidas en el PCC ($v_{aPCC}, v_{bPCC}, v_{cPCC}$) utilizando la transformada de Park, dada en la ecuación 3.2 y sincronizada por medio de un PLL, con el vector espacial que produce la componente de secuencia positiva de las tensiones medidas [44].

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \phi & -\frac{1}{2} \cos \phi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \phi & -\frac{1}{2} \cos \phi - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \phi \\ -\sin \phi & \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \phi + \frac{1}{2} \sin \phi & -\frac{\sqrt{3}}{2} \cos \phi + \frac{1}{2} \sin \phi \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

A partir de la lectura instantánea de las tensiones de red, el objetivo del PLL utilizado, es obtener con el menor error y la mayor rapidez posibles, el ángulo instantáneo de la componente de frecuencia fundamental de la tensión de secuencia positiva, incluso cuando las tensiones de la red se encuentren distorsionadas o desequilibradas [44].

El PLL se apoya en el marco de referencia síncrono (SRF-PLL – *Synchronouns Reference Frame PLL*) sobre el cual se proyecta el vector de tensión de red. En el sistema utilizado se conoce la frecuencia del sistema y se considera invariante, por lo que la velocidad de rotación del sistema no es una variable a identificar. Únicamente debe ajustarse la posición angular del marco de referencia síncrono para que coincida con el ángulo de fase del vector de tensión de secuencia positiva. Esto se consigue mediante la introducción de un lazo de control que utiliza un controlador PI para modificar la posición angular de los ejes d y q de manera que la proyección del vector de tensión sobre el eje de cuadratura sea nula; de esta manera, la proyección del vector de tensión coincide exactamente con el eje directo [44].

El esquema de control que permite hacer la sincronización del sistema $d-q-0$, se presenta en la figura 4.4. Se desea obtener las señales de sincronización $\sin \phi$ y $\cos \phi$ utilizadas en la matriz de transformación dada en la ecuación 3.2, para lo cual el controlador PI, ajusta el valor de corrimiento de fase α , que hace parte del argumento de las señales sintéticas $\sin(\omega t + \alpha)$ y $\cos(\omega t + \alpha)$, hasta que el valor de \bar{V}_q alcanza el valor de referencia [44].

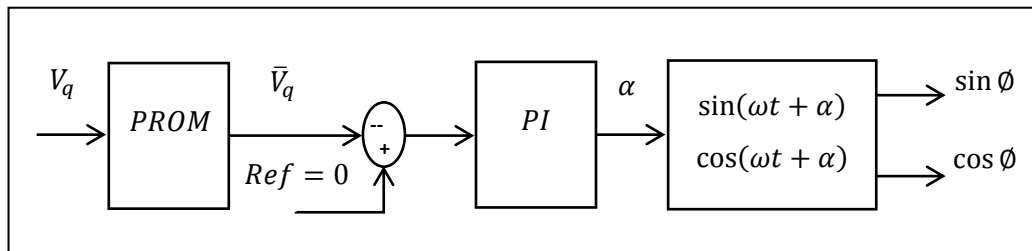


Figura 3.4 PLL para la identificación de componentes de secuencia positiva

De esta manera, al hacer la transformación al sistema $d-q-0$ de las tensiones medidas en el PCC, las componentes de secuencia negativa, así como también las componentes

armónicas presentes, se muestran oscilatorias y superpuestas al valor promedio de las señales observadas en los ejes d y q . Este valor medio constituye la componente de tensión de secuencia positiva a la frecuencia fundamental.

Los resultados de la utilización del PLL, usado para estimar las señales de sincronización que permiten la identificación de la componente de secuencia directa en un conjunto de tensiones trifásicas desbalanceadas y con contenido de armónicos, se muestran mediante el siguiente ejemplo:

En el punto de medición, se presentan las tensiones de la figura 3.5, las cuales contienen armónicos y una perturbación de corta duración causada por una falla monofásica en la fase A.

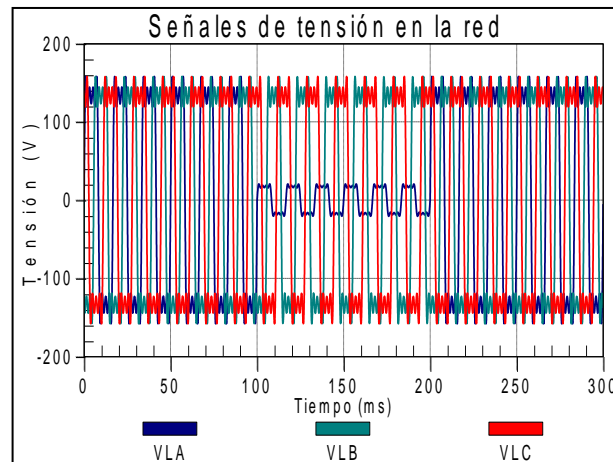


Figura 3.5 Desbalance de tensión con contenido de armónicos

La dinámica del ajuste en el ángulo de fase para las señales de sincronización, se presenta en la figura 3.6

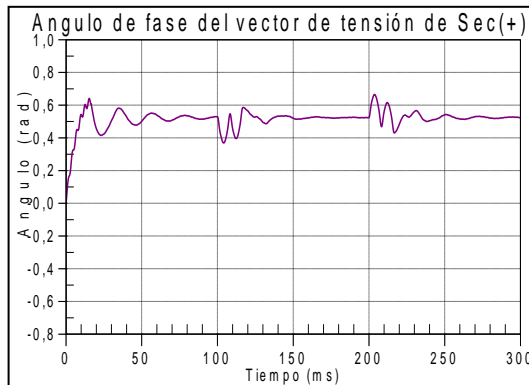
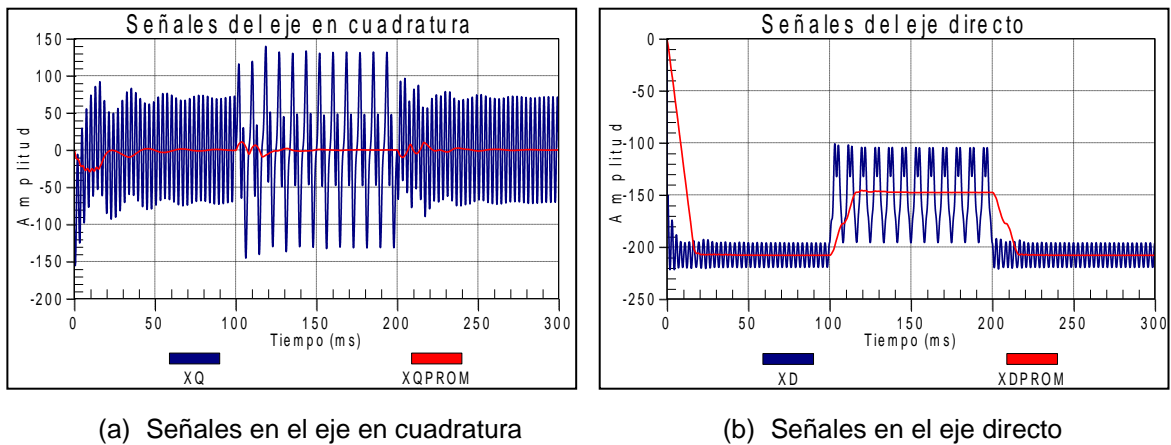


Figura 3.6 Ángulo de fase del vector de tensión de secuencia positiva

La transformación al marco de referencia síncrono de las tensiones de fase medidas en la red, produce señales oscilatorias en los ejes directo y en cuadratura para todas aquellas componentes de tensión que difieren en frecuencia con las señales de sincronización; mientras que el promedio de las señales en los ejes d y q representa la componente de secuencia positiva de las tensiones de fase, tal como se presenta en las figuras 3.7a y 3.7b para los ejes directo y en cuadratura respectivamente.



(a) Señales en el eje en cuadratura

(b) Señales en el eje directo

Figura 3.7 Señales de tensión en los ejes de cuadratura y directo.

En la medida en que el ángulo de fase de las señales de sincronización se ajusta al valor apropiado mediante el controlador PI, la componente de secuencia positiva del eje en

cuadratura se hace nula y toda la tensión de secuencia positiva queda representada por el promedio de la señal en el eje directo, la cual al ser llevada al sistema de tensiones $a-b-c$, corresponde a la componente de secuencia positiva de las tensiones medidas en la red, como aparece en la figura 3.8.

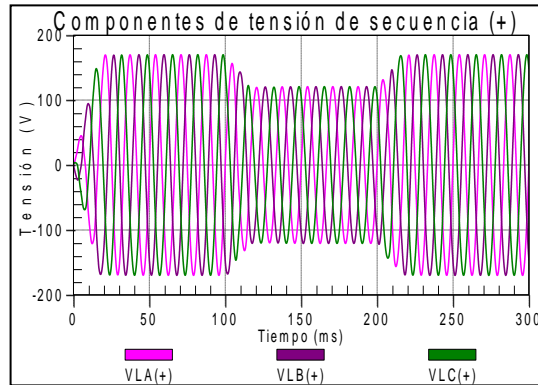
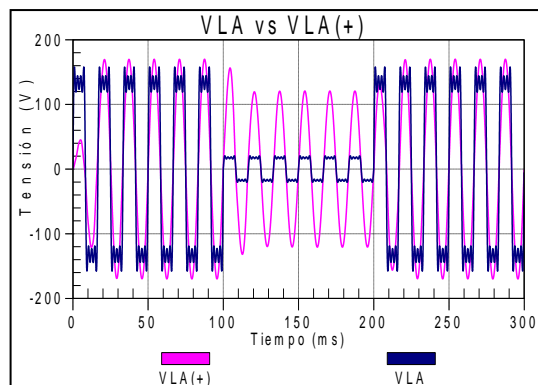
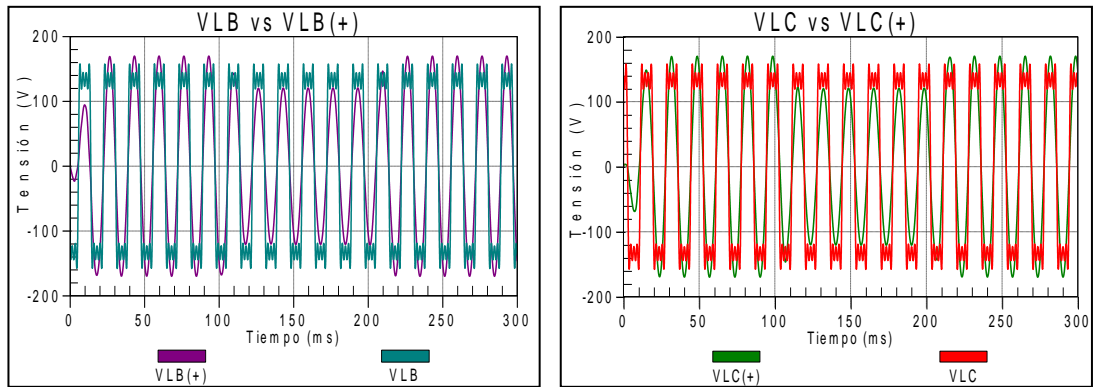


Figura 3.8 Componentes de tensión de secuencia positiva

El contraste entre las tensiones de la red y las correspondientes componentes de secuencia positiva extraídas mediante la sincronización con el PLL, se muestran en las figuras 3.9a, 3.9b y 3.9c, para las fases a , b y c , respectivamente.



(a) Componente de sec(+)
en la fase A.



(b) Componente de sec(+) en la fase B.

(a) Componente de sec(+) en la fase C.

Figura 3.9 Componentes de secuencia positiva de las tensiones de fase.

3.3.2 Esquema de compensación

El valor de las tensiones transformadas al marco de referencia $d-q-0$, se mantiene constante si la magnitud trifásica involucrada es de secuencia positiva y balanceada; en estas condiciones y con las señales de sincronización empleadas según el numeral 3.3.1, toda la tensión aparece en el eje directo como una cantidad constante, mientras que las componentes en cuadratura y homopolar son nulas. En este caso, el cálculo de la tensión de compensación se reduce a la comparación entre la tensión de referencia y la resultante de la transformada $d-q-0$ [43].

De manera más general, el algoritmo de compensación debe considerar la presencia de componentes de tensión de secuencia directa, inversa y homopolar; incluso con presencia de armónicos. En tal caso, el principio de aplicación de la transformada $d-q-0$ es similar, pero debe contemplar el filtrado de la información correspondiente a la componente de tensión de secuencia directa para efectos de sincronización. Gráficamente, el procedimiento seguido para la restauración de las tensiones está ilustrado en la figura 3.10.

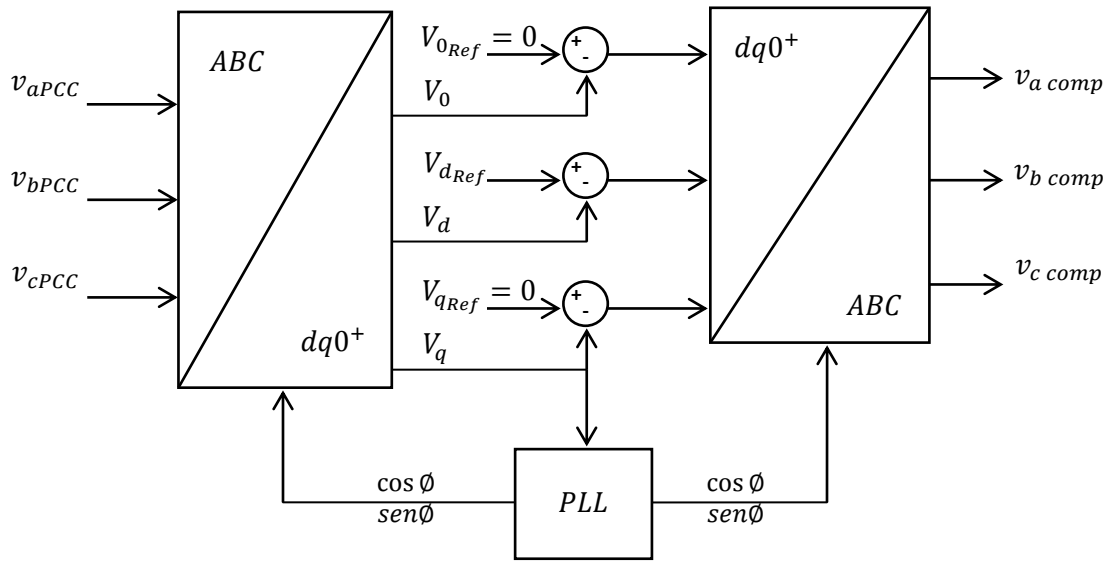


Figura 3.10 Esquema de compensación de tensión mediante DVR.

El modelo propuesto para la restauración de tensión, inicia con la medición de las tensiones de fase v_{aPCC} , v_{bPCC} , v_{cPCC} , en el PCC y la transformación de las mismas al marco de referencia $dq0^+$, así notado para indicar que está sincronizado con la posición del vector de tensión de secuencia positiva de las tensiones medidas. El marco de referencia síncrono, dentro de este esquema de compensación, tiene un doble propósito; por un lado permite la transformación de las tensiones medidas para que se puedan comparar con referencias de valor constante y por otro lado, entrega al PLL información del error dado por la posición relativa entre el vector de tensión de secuencia positiva y los ejes d y q , para que de esta forma se ajusten las señales de sincronización ($\cos \phi$ y $\sin \phi$) dentro de un lazo cerrado de control que minimiza el error.

Las diferencias entre las tensiones V_0 , V_d y V_q y las referencias establecidas para un conjunto de tensiones balanceadas, a la frecuencia fundamental, notadas por V_{0Ref} , V_{dRef} y V_{qRef} ; constituyen las señales de compensación en el sistema $d-q-0$. Estas señales inyectadas a la red después de ser transformadas al sistema $a-b-c$, constituyen las tensiones $v_{a comp}$, $v_{b comp}$ y $v_{c comp}$, suministradas por el DVR a la red y que hacen que en el PCC se den las condiciones de tensión propuestas como objetivo de compensación.

3.4 Simulaciones y Resultados

El sistema de distribución a proteger mediante el esquema de control del DVR, se puede observar en el anexo F, diseñado en el programa de simulación ATP Draw.

Para mostrar la efectividad del DVR, se plantean los siguientes tres casos de compensación, para los cuales el DVR hace corrección de la onda de tensión:

- Caso 1: Presencia de falla monofásica a tierra.
- Caso 2: Presencia de armónicos en la fuente de tensión.
- Caso 3: Presencia de armónicos en la fuente de tensión, falla monofásica a tierra, y no linealidad y desequilibrio en la carga trifásica.

Para los tres casos de compensación, se considera una red trifásica de tres hilos, alimentada por una fuente de 13200 [V] línea – línea. En los casos 1 y 2 la carga es lineal y balanceada cuyos valores corresponden a: $R = 1020 \Omega$ y $L = 3.303 \text{ mH}$. En el caso 3 el valor de la carga para cada fase corresponde a:

- Fase A: Carga no lineal con un diodo, $R = 1020 [\Omega]$ y $L = 3.303 [\text{mH}]$.
- Fase B: $R = 800 [\Omega]$, $L = 3.303 [\text{mH}]$.
- Fase C: $R = 1020 [\Omega]$, $L = 6 [\text{mH}]$.

La presencia de armónicos en los casos 2 y 3 se especifica en las simulaciones de cada uno de ellos. A continuación se muestran los resultados de compensación.

3.4.1 Caso 1: Simulación del DVR para la compensación de falla monofásica a tierra.

Se considera la tensión de alimentación en la carga balanceada, sin distorsión armónica y con frecuencia de 60 [Hz]. En la figura 3.11 se observa el conjunto de tensiones trifásicas medidas en el punto de conexión de la carga, y las ecuaciones que la constituyen se muestran en la expresión 3.3.

$$v_{sa}(t) = \frac{13200\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * \cos(120 * \pi * t) \text{ [V]}$$

$$v_{sb}(t) = \frac{13200\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * \cos(120 * \pi * t - 120^0) \text{ [V]} \tag{3.3}$$

$$v_{sc}(t) = \frac{13200\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * \cos(120 * \pi * t + 120^0) \text{ [V]}$$

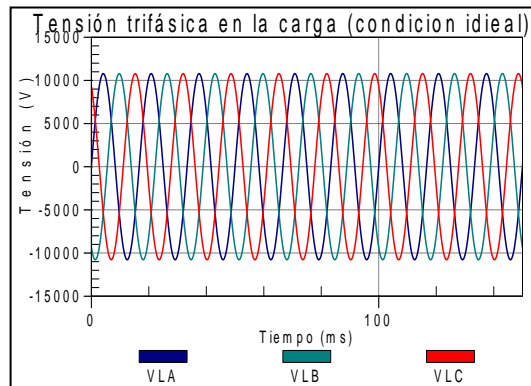


Figura 3.11 Tensión de alimentación en la carga en condiciones ideales.

La perturbación a simular (falla monofásica a tierra) es representada por una resistencia de falla a tierra en la línea de la fase B de valor $0.35 \text{ } [\Omega]$, conectada durante un intervalo de duración desde 0.1 [s] hasta 0.3 [s]

La perturbación genera el desbalance de tensión mostrado en la figura 3.12, haciendo que las tensiones cambien sus amplitudes y ángulos de fase a los siguientes valores, a partir del momento de la falla:

$$V_{la} = 7625 \angle 176.3^{\circ} \text{ [Vrms]} \longrightarrow \text{Sin cambio considerable en la amplitud.}$$

$$V_{lb} = 4779 \angle 77.89^{\circ} \text{ [Vrms]} \longrightarrow \text{Disminución de la amplitud del 37\%.}$$

$$V_{lc} = 7619 \angle -82.07^{\circ} \text{ [Vrms]} \longrightarrow \text{Sin cambio considerable en la amplitud.}$$

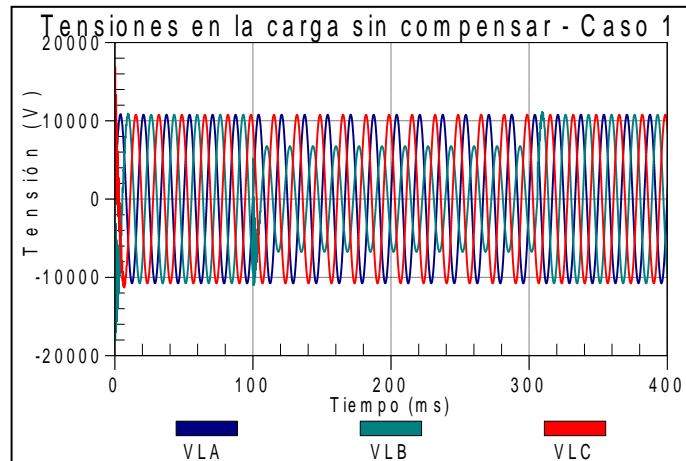


Figura 3.12 Tensiones desbalanceadas en la carga, generadas por la falla monofásica - caso 1.

En la figura 3.13, se muestra el comportamiento de la tensión inyectada por el DVR para mitigar la perturbación, en la cual se puede notar una inyección mayor de tensión en la fase donde se presenta la falla.

El sistema de control del compensador, debe detectar el principio y el final de la falla para evitar el suministro de tensiones innecesarias a la red, además de consumos de potencia adicional. El DVR está programado para iniciar a los 0.05 [s] después de presentarse la falla para mostrar efectos de compensación, pero en un sistema de distribución real se encuentra conectado en todo momento.

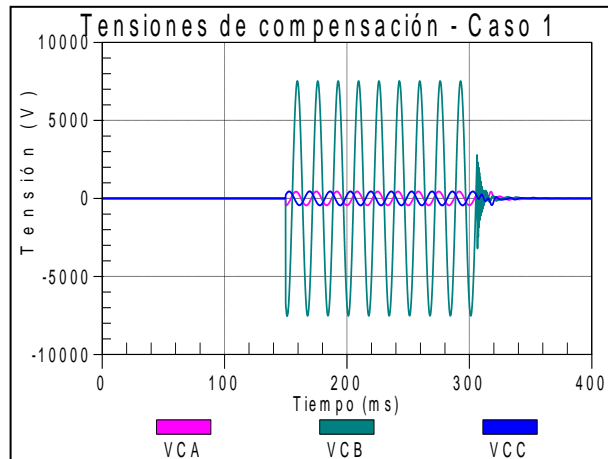
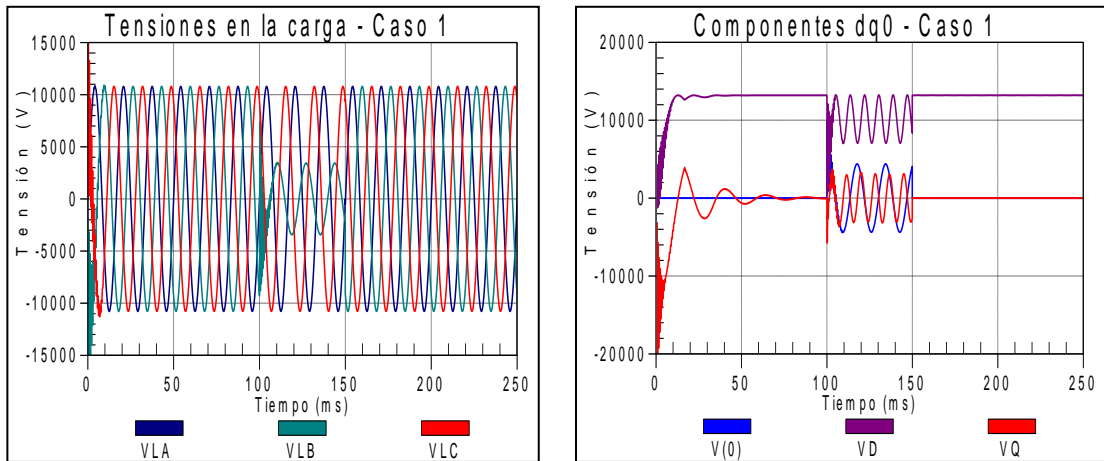


Figura 3.13 Tensiones de compensación del DVR - caso 1.

La respuesta a la compensación del DVR se aprecia en la figura 3.14, donde se puede comparar la tensión trifásica en el marco de referencia $a-b-c$ (3.14a) y $d-q-0$ (3.14b), para tres intervalos de tiempo definidos de la siguiente forma:

- De 0 [s] a 0.1 [s] → Tensión trifásica en condiciones ideales.
- De 0.1 [s] a 0.15 [s] → Tensión trifásica en presencia de la perturbación sin compensación.
- De 0.15 [s] a 0.250 [s] → Tensión trifásica compensada.

Como se observa, las tensiones se balancean en el instante en que el compensador se conecta a la red. Las componentes de tensión en $d-q-0$ alcanzan el valor de referencia a partir de 0.15 [s], lo que indica que desde ese momento las tensiones compensadas tienen la misma magnitud y se encuentran desfasadas 120° entre si.



(a) Tensión trifásica en el marco $a-b-c$.

(b) Tensión trifásica en el marco $d-q-0$.

Figura 3.14 Tensión en la carga, antes y durante la compensación mediante el DVR - caso 1.

La potencia activa del DVR durante la compensación y la potencia que requiere la carga se contrastan en la figura 3.15. Se observa que la compensación involucra un valor de potencia activa de aproximadamente la cuarta parte de la potencia consumida por la carga, la cual debe ser suministrada desde la unidad de almacenamiento de energía del compensador.

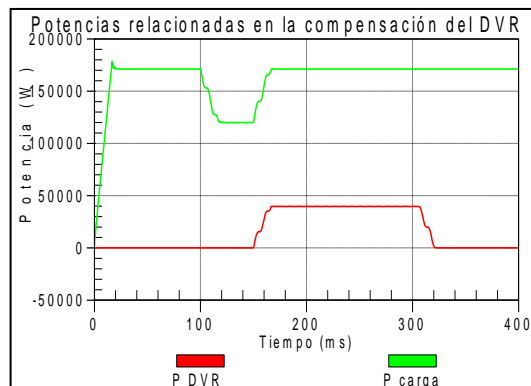
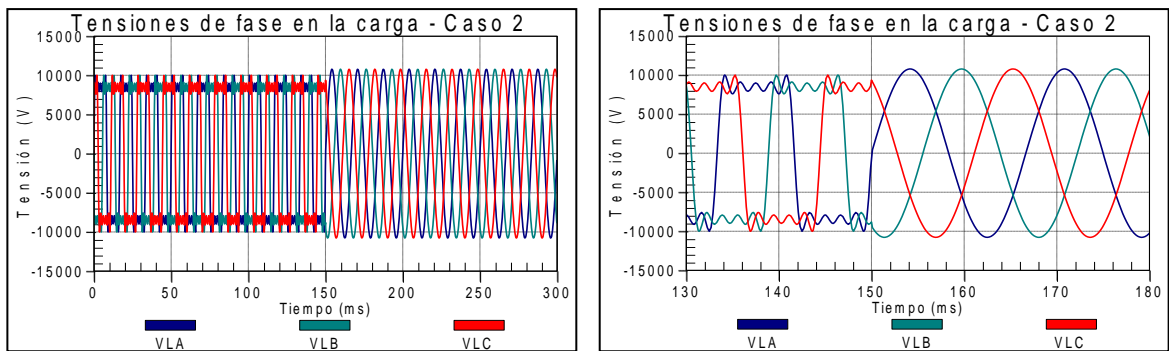


Figura 3.15 Potencias del DVR y la carga para la compensación - caso 1.

3.4.2 Caso 2: Simulación del DVR para la compensación de armónicos presentes en la fuente de tensión.

En el punto de interés de la red de distribución, se presentan las tensiones de fase que se muestran en la figura 3.16a. Estas tensiones presentan distorsión debido al contenido de los armónicos tercero, quinto, séptimo y noveno, como lo muestra el espectro de frecuencia de las figuras 3.17a, 3.17b y 3.17c, para las fases a, b y c, respectivamente.

El detalle mostrado para las tensiones en la figura 3.16b, permite ver el periodo de tiempo transcurrido entre 130 [ms] y 180 [ms]. El modelo del DVR, está programado para iniciar la compensación a los 150 [ms] de simulación, para observar el contraste de las condiciones en las tensiones de fase antes y después del ingreso del restaurador de tensión a la red. La disminución apreciable en el contenido de armónicos en las tensiones de la carga protegida, se consigue a partir del momento en que el DVR proporciona las tensiones de compensación. El espectro de frecuencia para las tensiones restauradas es mostrado en la figuras 3.18a, 3.18b y 3.18c, para las fases a, b y c, respectivamente.



(a) Tensiones en la carga – Caso 2

(b) Detalle de tensiones en la carga – Caso 2

Figura 3.16 Tensiones en la carga antes y durante la compensación mediante el DVR- caso 2.

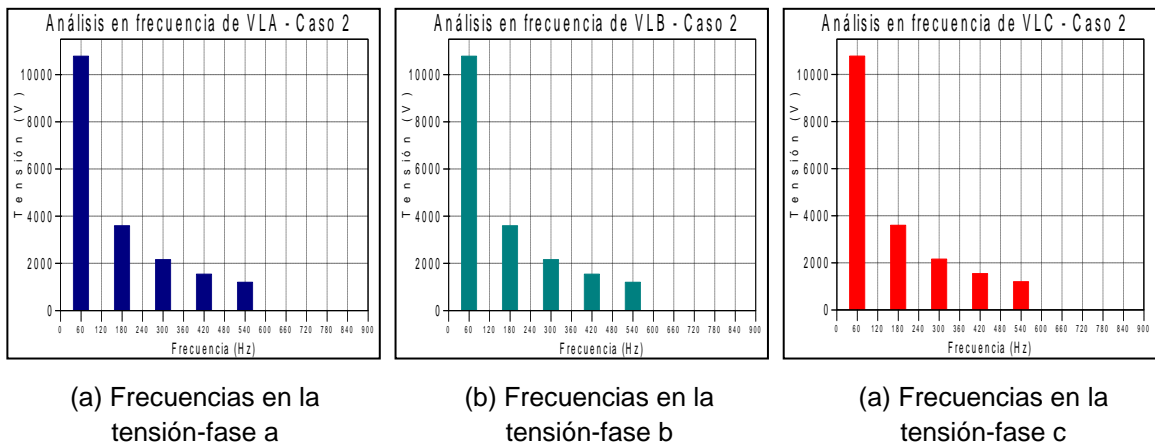


Figura 3.17 Componentes armónicas de las tensiones en la carga antes de la compensación mediante el DVR - caso 2.

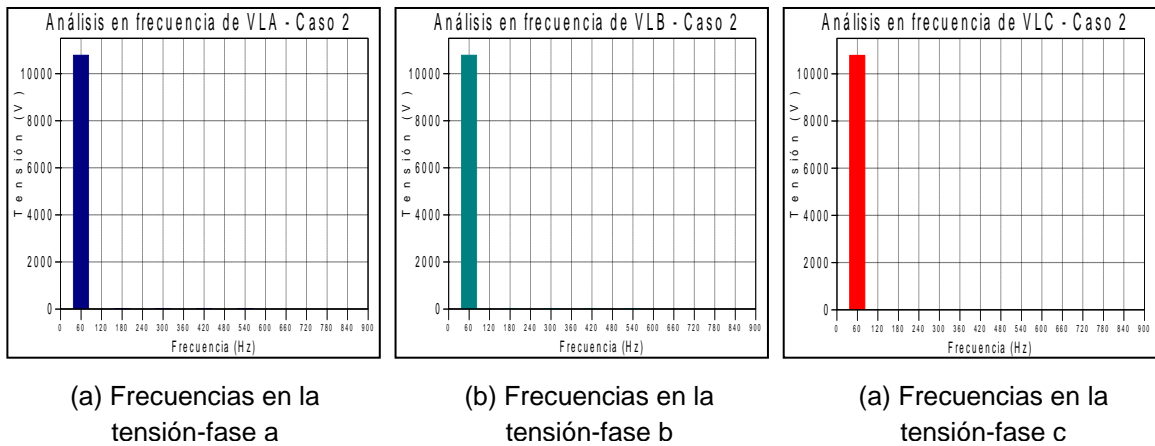


Figura 3.18 Componentes armónicas de las tensiones en la carga después de la compensación mediante el DVR - caso 2.

El detalle de las tensiones de compensación se muestra en la figura 3.19, para el periodo de tiempo comprendido entre 130 [ms] y 180 [ms]. El DVR calcula mediante el algoritmo propuesto, el conjunto de tensiones que serán sumadas a las tensiones medidas en el PCC a partir de los 150 [ms] para eliminar el contenido de armónicos de las tensiones de la carga protegida. En este caso, estas tensiones deben estar conformadas por la suma en contrafase de las componentes armónicas presentes en las tensiones medidas en el PCC.

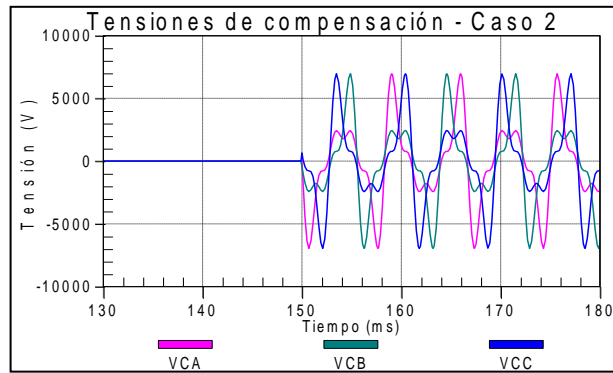


Figura 3.19 Tensiones de compensación suministradas por el DVR a la red - caso 2.

Las tensiones observadas en la carga y transformadas al sistema $d-q-0$ se presenta en la figura 3.20. Desde el momento de inicio de la compensación, se cancelan las componentes oscilatorias presentes en los ejes d , q y 0 debidas a los armónicos de la tensión de alimentación; entonces, toda la tensión aparece en el eje d del marco de referencia síncrono con un valor constante igual al valor de referencia. Esto es un indicador del objetivo alcanzado en la restauración de las tensiones para conseguir un conjunto de señales balanceadas, de frecuencia fundamental y de la amplitud esperada para el punto de interés, tal como se observó en la figura 3.16 para las tensiones de fase a , b y c .

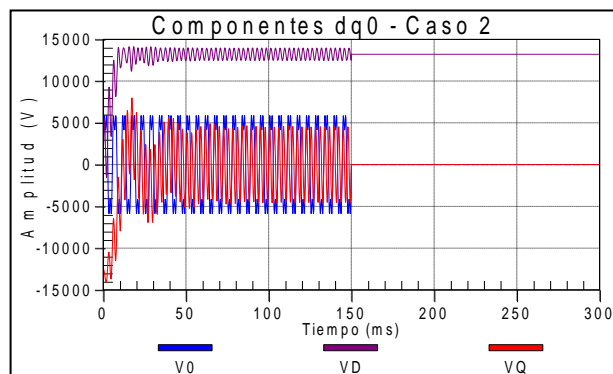


Figura 3.20 Tensiones en la carga antes y durante la compensación mediante el DVR en el sistema $d-q-0$ - caso 2.

El escenario de simulación con carga lineal balanceada, muestra un conjunto de corrientes en la red que están relacionadas linealmente con la tensión de alimentación; por esta razón, frente a un problema de distorsión de tensión que no es causado por las corrientes demandadas por la carga protegida por el DVR; la restauración de la tensión hace que las corrientes de la red sean también de frecuencia fundamental, tal como se muestra en la figura 3.21. Esto en una red contaminada con armónicos de tensión, hace que se disminuyan las pérdidas de transporte de energía.

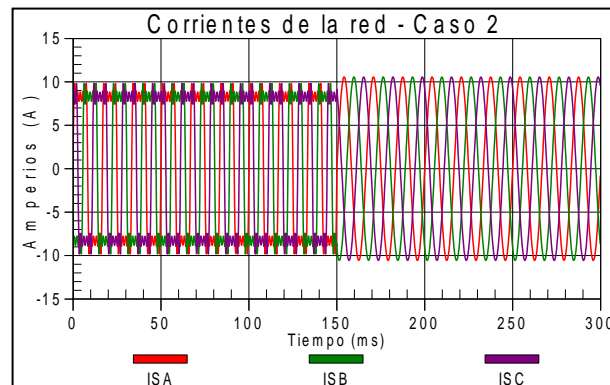


Figura 3.21 Corrientes en la red antes y durante la compensación mediante DVR - caso 2.

Dado que en el escenario de compensación simulado, las tensiones en la carga no requieren un aporte de tensión de frecuencia fundamental para mejorar la regulación de las tensiones de la carga, sino únicamente la mitigación de las componentes armónicas; la compensación no involucra intercambio de potencia activa entre el DVR y la red. En la figura 3.22, se muestra un valor nulo en la potencia de compensación, por lo que se puede inferir que la restauración de las tensiones requiere únicamente potencia no activa. De igual manera, se observa una reducción en la potencia consumida por la carga a partir del inicio de la compensación, esto como resultado de la eliminación del aporte de potencia de los armónicos de tensión y corriente coincidentes.

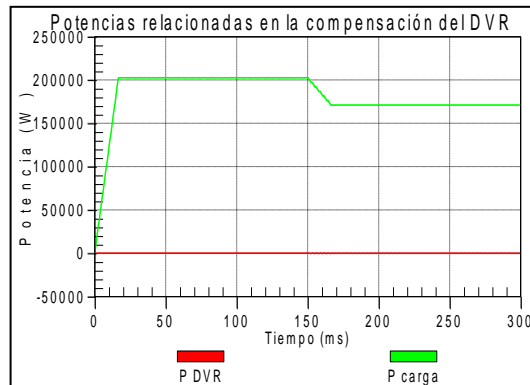


Figura 3.22 Potencias del DVR y la carga para la compensación - caso 2.

3.4.3 Caso 3: Simulación del DVR para la compensación de armónicos presentes en la fuente de tensión, falla monofásica a tierra, no linealidad y desequilibrio en la carga trifásica.

Este escenario de compensación posee varias posibilidades de distorsión en la onda de tensión como se evidencia en la figura 3.23, cuya señal corresponde a la tensión medida en la carga sin compensación.

Por un lado, la fuente de tensión genera la tercera, quinta, séptima y novena componente armónica y por otro lado un rectificador de media onda es conectado a la carga de la fase A. Las cargas no lineales son las que generan la distorsión armónica en corriente, que al fluir por el cableado y el transformador de distribución, producen la distorsión en tensión. El espectro de tensiones armónicas en la carga se muestra en la figura 3.24.

Adicionalmente, una falla monofásica representada por una resistencia de falla a tierra de valor $0.1 [\Omega]$, es conectada dentro del intervalo de tiempo de $0.1 [ms]$ a $0.2[ms]$, provocando un hueco de tensión en la fase B, disminuyendo 65% su amplitud.

Para mitigar los efectos de las perturbaciones, el DVR debe inyectar las tensiones de compensación que se observan en la figura 3.25. El sistema es estabilizado una vez el compensador es conectado a la red en $t = 150 [ms]$.

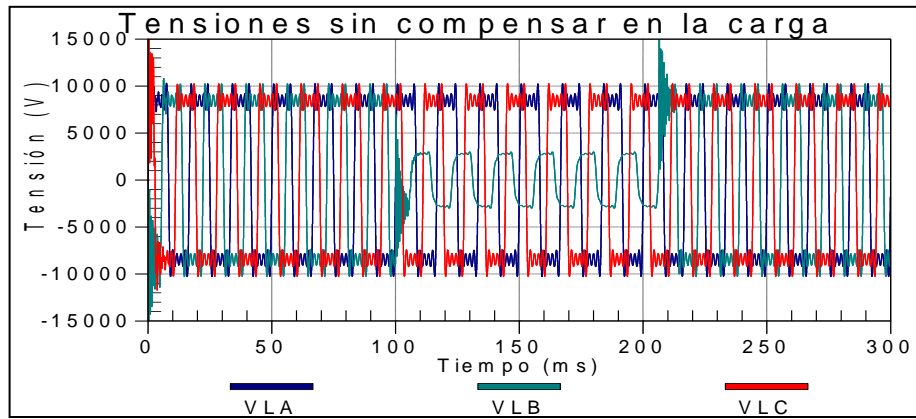


Figura 3.23 Tensiones en la carga sin compensación - caso 3.

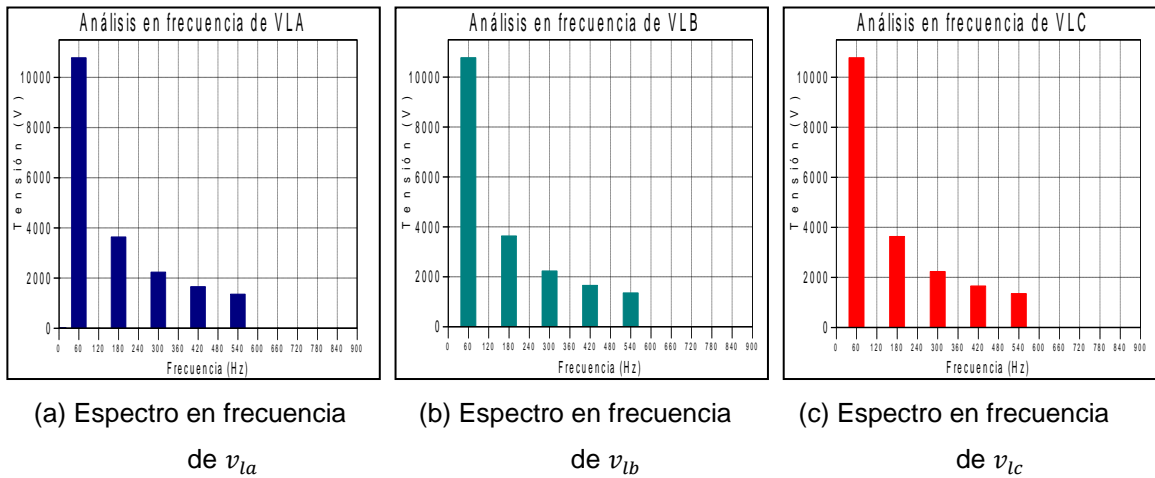


Figura 3.24 Componentes armónicas de las tensiones en la carga antes de la compensación mediante el DVR - caso 3.

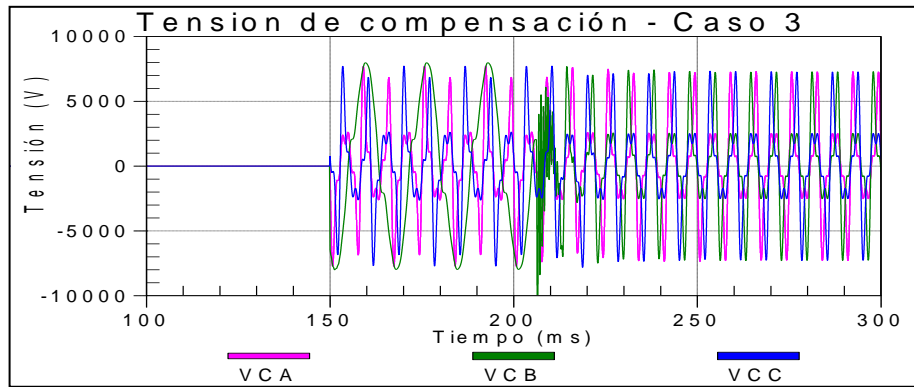


Figura 3.25 Tensiones de compensación suministradas por el DVR a la red - caso 3.

Se obtiene un conjunto trifásico de tensiones balanceadas y sin componentes armónicas una vez entra en funcionamiento el compensador. En las figuras 3.26 y 3.27 se muestra que la aplicación del DVR causa estabilidad de tensión y atenuación en las componentes armónicas en el PCC.

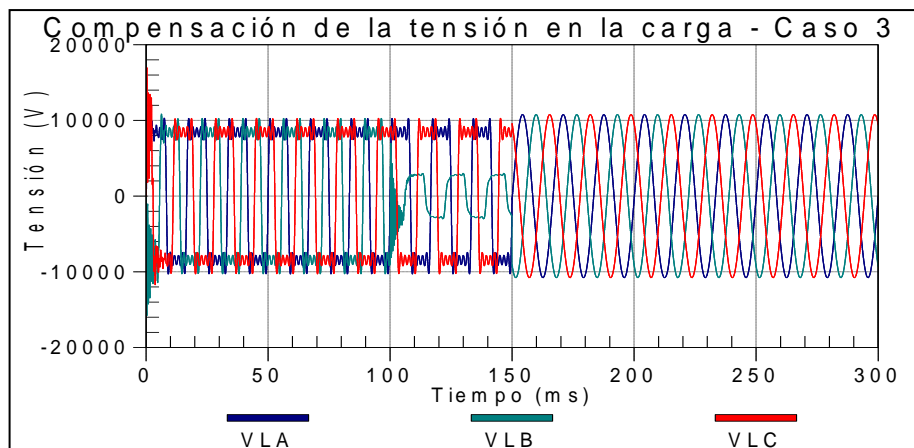
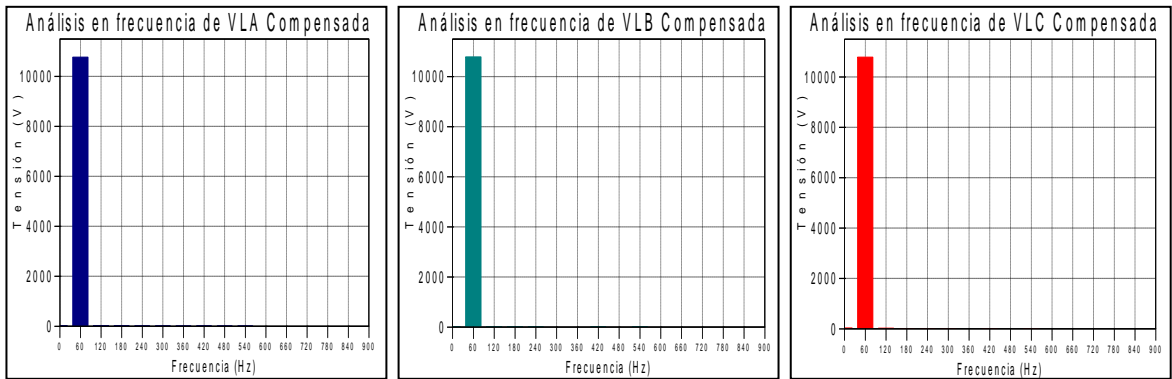


Figura 3.26 Tensiones en la carga antes y durante la compensación mediante el DVR- caso 3.



(a) Espectro en frecuencia de v_{La}

(b) Espectro en frecuencia de v_{Lb}

(c) Espectro en frecuencia de v_{Lc}

Figura 3.27 Componentes armónicas de las tensiones en la carga después de la compensación mediante el DVR - caso 3.

En este caso de compensación, se requiere un intercambio de potencia activa entre la red y el DVR, dado que las tensiones en la carga requieren de un aporte de tensión de frecuencia fundamental para levantar el hueco de tensión. En la figura 3.28 se observa la potencia activa utilizada por el DVR y el consumo de la carga. La reducción en el valor de la potencia consumida por la carga, una vez se inicia la compensación, se debe a la eliminación de los armónicos de tensión y corriente de la red.

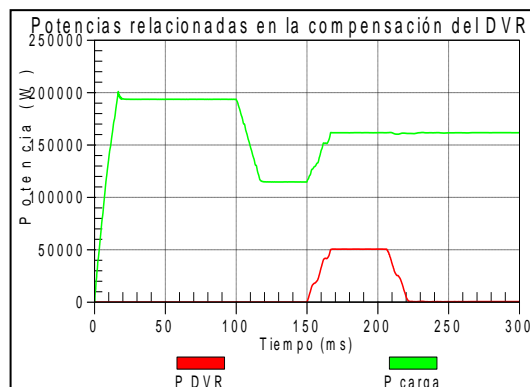


Figura 3.28 Potencias del DVR y la carga para la compensación - caso 3.

4. ANÁLISIS DEL UPQC

Diversas causas de perturbación tanto en la tensión como en la corriente en diferentes puntos de la red, así como también la sensibilidad de muchas cargas, ponen de manifiesto la necesidad de mejorar la calidad de la energía suministrada a los usuarios. Bajo estas circunstancias, la tecnología *Custom Power* avanza en el desarrollo de dispositivos orientados a mejorar la confiabilidad y calidad del suministro de energía en los sistemas de distribución [31].

La familia *Custom Power*, ha incorporado los compensadores de conexión paralela, entre los que se incluye el DSTATCOM, usado principalmente como acondicionador del flujo de corriente desde la carga hacia la red; y los compensadores de conexión serie, tales como el DVR que se usa para mejorar la calidad de las tensiones suministradas por la red a la carga [31, 32]. Estos dispositivos fueron tratados en los capítulos 2 y 3.

La compensación en paralelo, es usada en los casos en que la distorsión o las fluctuaciones del suministro de tensión son pequeñas, pues de otra forma, se dificulta la obtención apropiada de las corrientes de compensación produciendo, en estos casos resultados poco satisfactorios. Por otra parte, la compensación en serie, se usa principalmente para proteger cargas críticas contra problemas de calidad de la potencia causados por perturbaciones de tensión en el sistema de suministro; sin embargo, no puede solucionar los problemas relacionados con las corrientes de cargas no lineales.

La limitación en la operación independiente de los compensadores paralelo y serie es superada al combinar las fortalezas de cada uno de ellos para conseguir un compensador denominado acondicionador unificado de calidad de la energía, UPQC (*Unified Power Quality Compensator*), por sus siglas en inglés, el cual es empleado en los sistemas de distribución de energía, para realizar al mismo tiempo, la compensación serie y paralelo en escenarios de redes eléctricas que pueden incluir, distorsión y desbalance tanto en tensión como en corriente, así como también perturbaciones de la amplitud de la tensión ocasionadas por huecos o elevaciones de tensión [8].

4.1 Estructura y principio de funcionamiento del UPQC

Un UPQC consiste de un compensador activo de conexión serie y otro de conexión en paralelo, los cuales comparten el mismo barraje de dc. El componente de compensación en paralelo cumple la función de una fuente de corriente y está destinado a compensar los problemas relacionados con la calidad de la corriente a través de la red, a la vez que regula la tensión del barraje de dc. Por otra parte, el componente de compensación en serie, se conecta en serie con el punto de derivación de la red de distribución, para mitigar los problemas de tensión en la carga a proteger. De esta forma, el UPQC proporciona una solución completa frente a los problemas de calidad de la energía debidos a las corrientes de la carga y la tensión de suministro [33].

La figura 4.1 muestra un esquema monofásico de la configuración básica de un sistema UPQC. Tanto el compensador en serie como el paralelo, deben tener la capacidad de restaurar la tensión y las corrientes, respectivamente, en cada fase frente a distintas perturbaciones. Para ello, la compensación en serie, toma lugar entre el punto de alimentación y la carga, por medio de tres transformadores de acoplamiento, los cuales deben estar dimensionados para transportar la corriente de la línea [33]. Por su parte, el compensador en paralelo puede conectarse a la red a través de un transformador de acoplamiento o inductor en serie.

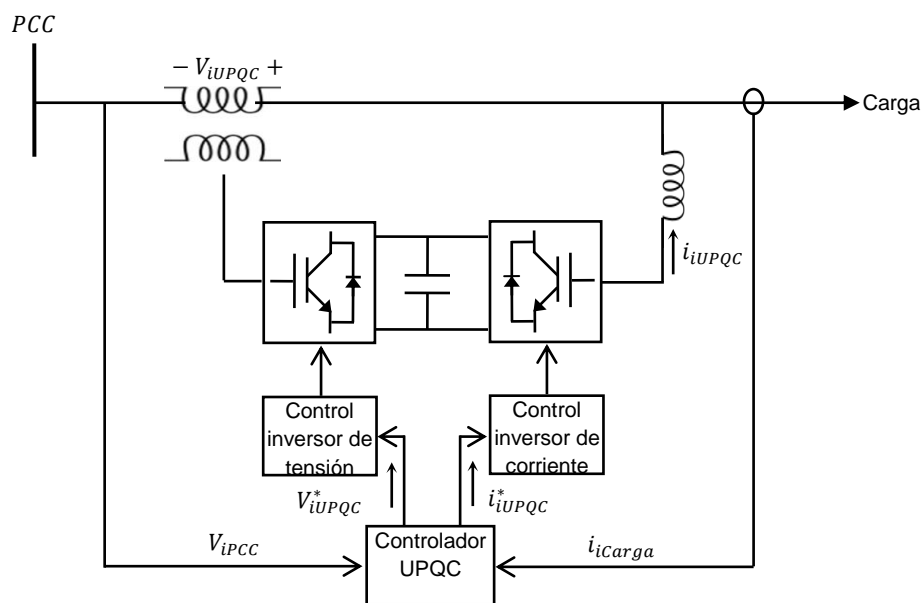


Figura 4.1 Configuración básica de un sistema UPQC conectado a la red de distribución

Fuente [33]

Las tensiones y corrientes de compensación calculadas, deben sintetizarse en fuentes inversoras según corresponda. Esto implica que debe contar con un convertidor por fase y por compensador (serie y paralelo), para lo cual suelen emplearse las topologías de convertidores basados en fuente de tensión (VSC), compartiendo el mismo barraje de dc. Adicionalmente, se emplean filtros LC, que reducen los armónicos de alta frecuencia contenidos en las tensiones sintetizadas por el inversor [33].

Para efectos del trabajo desarrollado, se considera la inyección de las tensiones y corrientes de compensación mediante el uso de fuentes ideales controladas, por lo que no se contempla la selección y control de las fuentes inversoras, de los filtros pasivos ni el control de tensión en el barraje de dc. Información referente a estos tópicos puede consultarse en [8, 31, 35, 36].

4.1.1 Configuraciones del UPQC

El UPQC puede conectarse de dos modos diferentes al PCC, los cuales se presentan en los diagramas unifilares de las figuras 4.2 y 4.3 y se denominan, paralelo izquierdo y paralelo derecho, respectivamente, dependiendo del lugar donde se ubique el compensador paralelo en relación con la ubicación del compensador serie [8]. En ellos, se asume que la combinación de una fuente ideal serie de tensión y una fuente ideal paralelo de corriente constituyen el UPQC.

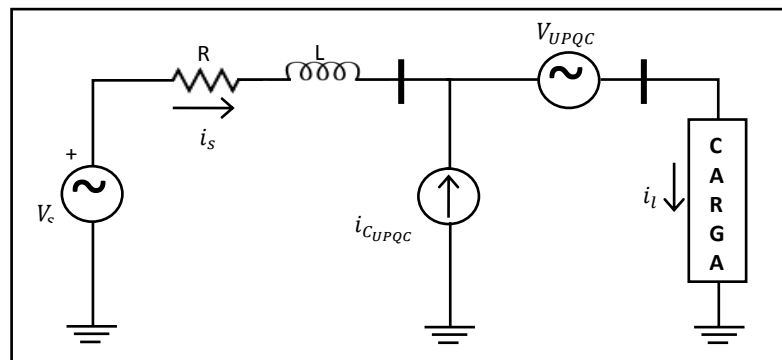


Figura 4.2 Configuración del UPQC paralelo izquierdo.

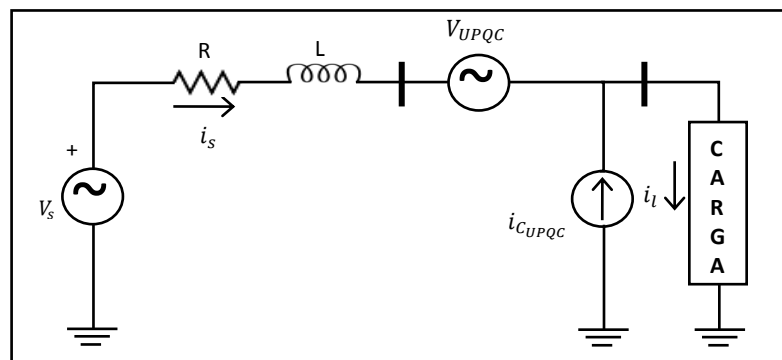


Figura 4.3 Configuración del UPQC paralelo derecho.

Fuente [8]

El funcionamiento de estado estable de la configuración paralelo derecho, supone un conjunto de tensiones balanceadas de secuencia positiva del lado de la carga. En estas condiciones, las corrientes inyectadas por el UPQC no generan consumo de potencia adicional al relacionado con la restauración de la tensión. Por su parte, en la configuración paralelo izquierdo, el UPQC inyecta las corrientes de compensación en el PCC. En este punto, las tensiones contienen todas las perturbaciones de la red, por lo tanto, las componentes de las corrientes de compensación coincidentes en secuencia y frecuencia con las componentes de tensión, producen un consumo de potencia adicional en el UPQC, al relacionado con la restauración de las tensión [8].

El intercambio de potencia entre el UPQC y la red, en relación con la compensación serie para las dos configuraciones, dependerá de la estrategia de control utilizada.

4.2 Cálculo de las referencias de las tensiones y corrientes de compensación

En un escenario en el que tanto las tensiones del alimentador, como las corrientes por la red presentan desbalance y distorsión, se establece que el UPQC debe realizar las siguientes dos funciones:

- Hacer que las corrientes a través de la red, sean balanceadas, de frecuencia fundamental y con factor de potencia unitario respecto a la tensión en el nodo de conexión de la compensación paralelo.
- Hacer que la tensión en la carga de interés, sea balanceada a la frecuencia fundamental y regulada a un valor especificado.

De manera general, las tensiones del sistema trifásico en el punto de conexión de la carga pueden contener componentes de secuencia positiva, negativa, secuencia cero, así como también componentes armónicas. En estas condiciones, las tensiones de fase pueden expresarse como [34, 37]:

$$v_i = v_{i1}^+ + v_{i1}^- + v_{i1}^0 + \sum v_{ik} \quad (4.1)$$

Donde el subíndice i corresponde con las fases a , b y c ; v_{i1}^+ , v_{i1}^- y v_{i1}^0 son la componentes de secuencia positiva, negativa y cero, respectivamente, a la frecuencia fundamental y v_{ik} es el contenido de armónicos de k - ésimo orden presentes en cada tensión de fase.

En este sentido, para que las tensiones en la carga sean balanceadas, de frecuencia fundamental y estén reguladas a un valor específico V , entonces las tensiones de compensación v_{iUPQC} aportadas por el UPQC son [36]:

$$v_{iUPQC} = \left(V \frac{v_{i1}^+}{|v_{i1}^+|} - v_{i1}^+ \right) - v_{i1}^- - v_{i1}^0 - \sum v_{ik} \quad (4.2)$$

Por su parte, la compensación en paralelo actúa como una fuente controlada de corriente que puede entregar a la red corrientes que pueden incluir armónicos, componentes reactivas, corrientes de secuencia negativa y cero. De esta manera, si la corriente de la red es expresada como [34, 36]:

$$i_i = i_{i1}^+ + i_{i1}^- + i_{i1}^0 + \sum i_{ik} \quad (4.3)$$

Donde el subíndice i corresponde con las fases a , b y c ; i_{i1}^+ , i_{i1}^- y i_{i1}^0 son la componentes de corriente de la carga de secuencia positiva, negativa y cero, respectivamente, a la frecuencia fundamental e i_{ik} es el contenido de armónicos de k - ésimo orden presentes en dichas corrientes.

Si la carga alimentada tiene un consumo combinado de potencia activa y energía reactiva, entonces la componente de corriente i_{i1}^+ , tendrá a su vez una componente $i_{i1_A}^+$ en fase y otra componente $i_{i1_R}^+$ en cuadratura con la tensión de alimentación, entonces:

$$i_{i1}^+ = i_{i1_A}^+ + i_{i1_R}^+ \quad (4.4)$$

Entonces, la corriente i_{iUPQC} inyectada por el UPQC, para lograr que el flujo de corrientes por la red, sea balanceado, libre de armónicos y con factor de potencia unitario, esta dado por la expresión [34, 36]:

$$i_{i_{UPQC}} = i_{i_{1_R}}^+ + i_{i_1}^- + i_{i_1}^0 + \sum i_{ik} \quad (4.5)$$

4.3 Control del UPQC

Los algoritmos de control que gobiernan el cálculo de las tensiones y corrientes de compensación del UPQC están basados en las técnicas utilizadas para la compensación de las corrientes de la red y la restauración de las tensiones en el punto de conexión de la carga de interés, mediante el D-STATCOM y el DVR respectivamente.

En ese sentido, la estimación planteada para las tensiones de compensación según la expresión 4.2, se da en el sistema de referencia $d-q-0$, sincronizado de manera tal que el eje directo gira solidario al vector producido por la proyección de las componentes de secuencia positiva de la tensión medida en el PCC, según lo expuesto en el numeral 3.3.1 del capítulo 3. Siendo así, la compensación de las tensiones de la carga protegida se realizará en fase con las componente se secuencia positiva de la tensión residual en el PCC; siguiendo la lógica del algoritmo propuesto para el DVR

La compensación paralelo propuesta en este trabajo para el UPQC, se basa en la ecuación 4.5; pero desde el enfoque presentado en el D-STACOM, el cual hace la compensación de las corrientes de la red basado en la medición de la potencia instantánea de la carga, y con la variante del cálculo de la misma, operando directamente sobre las tensiones y corrientes de la carga en el sistema $a-b-c$.

La potencia instantánea p_l , calculada para la carga se da en 4.6, en donde v_{la} , v_{lb} y v_{lc} , son las tensiones en la carga, las cuales gracias a la acción de la compensación en serie del UPQC, en estado estable serán balanceadas, de secuencia positiva y de frecuencia fundamental. Mientras que i_{la} , i_{lb} e i_{lc} , son las corrientes que demanda la carga:

$$p_l = v_{la} \cdot i_{la} + v_{lb} \cdot i_{lb} + v_{lc} \cdot i_{lc} \quad (4.6)$$

La expresión dada en 4.6, puede descomponerse de acuerdo con 4.7 en un valor de dc notado por P y una componente oscilatoria \tilde{p} . El valor de dc representa la potencia

promedio de la carga trifásica y la parte oscilatoria corresponde a una potencia de valor nulo generada por desbalance de la carga y/o presencia de armónicos de corriente [36].

$$p_l = P + \tilde{p} \quad (4.7)$$

Teniendo en cuenta que las tensiones de la carga son de secuencia positiva, entonces la potencia promedio P , resulta del producto entre ellas y la componente de secuencia positiva de las corrientes de la carga en fase con las tensiones, notada como $i_{i1_A}^+$ en 4.4:

$$P = v_{la} \cdot i_{a1_A}^+ + v_{lb} \cdot i_{b1_A}^+ + v_{lc} \cdot i_{c1_A}^+ \quad (4.8)$$

Las componentes de corriente $i_{i1_A}^+$ corresponden al consumo de una carga resistiva equivalente por fase cuyo valor de conductancia G esta dado por 4.9, en donde i toma los valores de las fases a , b y c para tensión y corriente.

$$i_{i1_A}^+ = G * v_{li} \quad (4.9)$$

Por lo tanto, la expresión 4.8 puede determinarse en términos de G y v_{li} como:

$$P = G \cdot (v_{la}^2 + v_{lb}^2 + v_{lc}^2) \quad (4.10)$$

De donde:

$$G = \frac{P}{v_{la}^2 + v_{lb}^2 + v_{lc}^2} \quad (4.11)$$

Entonces, las corrientes de compensación del UPQC calculadas de forma análoga a lo expuesto en el capítulo 1 en la expresión 2.9, corresponden a:

$$\begin{aligned} i_{aUPQC} &= i_{la} - v_{la} \cdot \frac{P}{v_{la}^2 + v_{lb}^2 + v_{lc}^2} \\ i_{bUPQC} &= i_{lb} - v_{lb} \cdot \frac{P}{v_{la}^2 + v_{lb}^2 + v_{lc}^2} \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$i_{cUPQC} = i_{lc} - v_{lc} \cdot \frac{P}{v_{la}^2 + v_{lb}^2 + v_{lc}^2}$$

De esta manera, la acción conjunta de la compensación en serie y en paralelo mediante los modos de control empleados, permite la restauración de las tensiones y la mitigación de los problemas relacionados con las corrientes de la red, aún en presencia de tensiones desbalanceadas y distorsionadas.

4.4 Simulaciones y Resultados

En el Anexo G y el Anexo H, se observa el sistema de distribución a proteger mediante el esquema de control del UPQC (paralelo izquierdo y paralelo derecho respectivamente), diseñado en el programa de simulación ATP Draw.

Para evaluar el desempeño del UPQC, se simularan dos casos, cada uno con las dos topologías de conexión, en un sistema de distribución con las siguientes características:

- Caso 1: Presencia de armónicos en la fuente de tensión, falla bifásica y carga lineal balanceada.
- Caso 2: Presencia de armónicos en la fuente de tensión, falla bifásica y carga no lineal desbalanceada.

Se considera una red trifásica de cuatro hilos, que alimenta una carga a 120 [Vrms]. En el caso 1, el valor de la carga lineal balanceada es: $R = 0.279 [\Omega]$, $L = 0.7558[mH]$. Para el caso 2, la carga corresponde a las siguientes cantidades por fase:

- Fase A: Rectificador de media onda, $R = 0.5 [\Omega]$ y $L = 3 [mH]$.
- Fase B: $R = 0.279 [\Omega]$, $L = 0.7558 [mH]$.
- Fase C: $R = 0.1 [\Omega]$, $L = 0.5 [mH]$.

La falla bifásica en los dos casos de compensación es representada por una resistencia de falla $R = 0.01 [\Omega]$ conectada durante un intervalo de tiempo desde $t = 0.08 [s]$ hasta $t = 0.2 [s]$, entre las fases B y C. Esta falla trae como consecuencia desbalance de

tensión. La fuente de tensión genera la tercera, quinta, séptima y novena componente armónica para ambos casos de compensación.

4.4.1 Caso 1: Presencia de armónicos en la fuente de tensión, falla bifásica y carga lineal balanceada.

De la figura 4.4 a la 4.7, se observa el comportamiento de la tensión en el PCC, su espectro en frecuencia y la corriente del sistema con sus componentes armónicos respectivamente, para el sistema de distribución sin compensación.

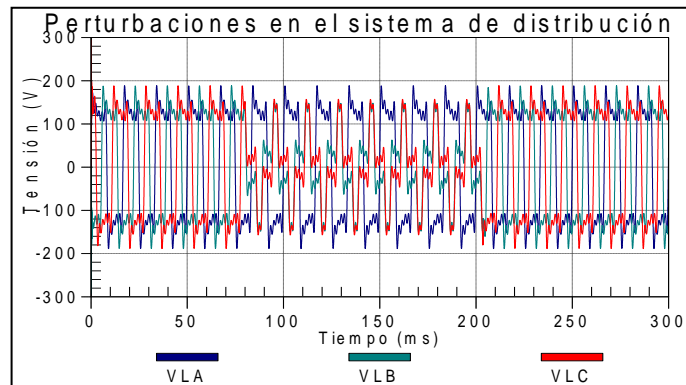


Figura 4.4 Tensiones medidas en el PCC, sin la compensación del UPQC – caso 1.

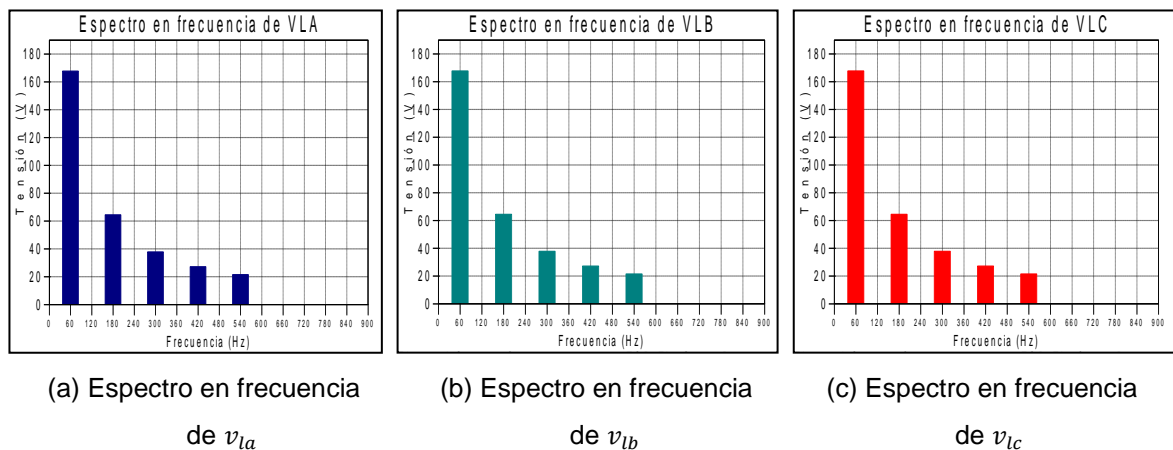


Figura 4.5 Componentes armónicas de las tensiones en la carga antes de la compensación mediante el UPQC - caso 1.

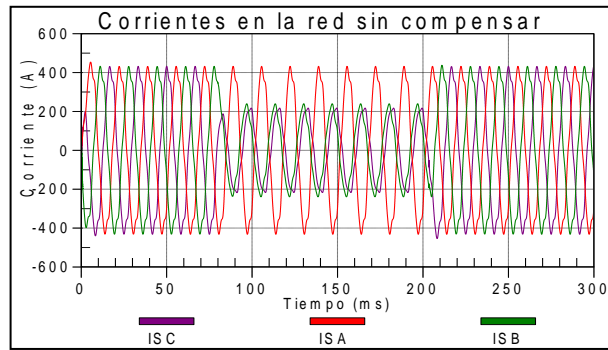


Figura 4.6 Corrientes de la red, sin la compensación del UPQC – caso 1.

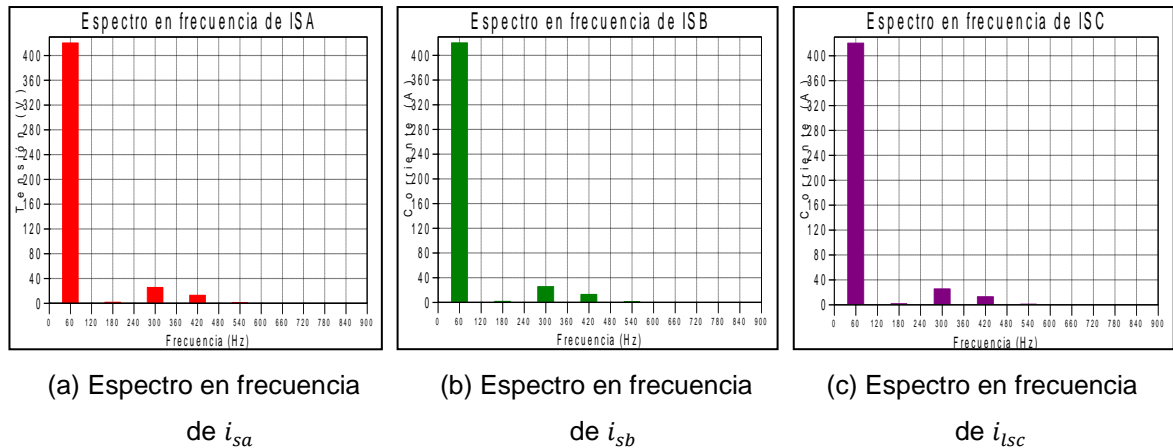


Figura 4.7 Componentes armónicas de las corrientes de la red, antes de la compensación mediante el UPQC - caso 1.

El algoritmo de control del UPQC, en sus dos topologías de conexión, está programado para iniciar en $t = 150 [ms]$ con el fin de mostrar efectos de la compensación. De la figura 4.8 a la figura 4.14, se observa la respuesta del sistema en tensión y corriente con la compensación del UPQC en sus dos modos de conexión (paralela izquierda y paralela derecha).

Las tensiones son corregidas en el momento que comienza la compensación, mientras que las corrientes del sistema tardan $20 [ms]$ en equilibrarse. El factor de potencia en el PCC es igual a 1, haciendo que el transporte de energía por la red sea óptimo y la corriente disminuya más de $100 [A]$ su amplitud.

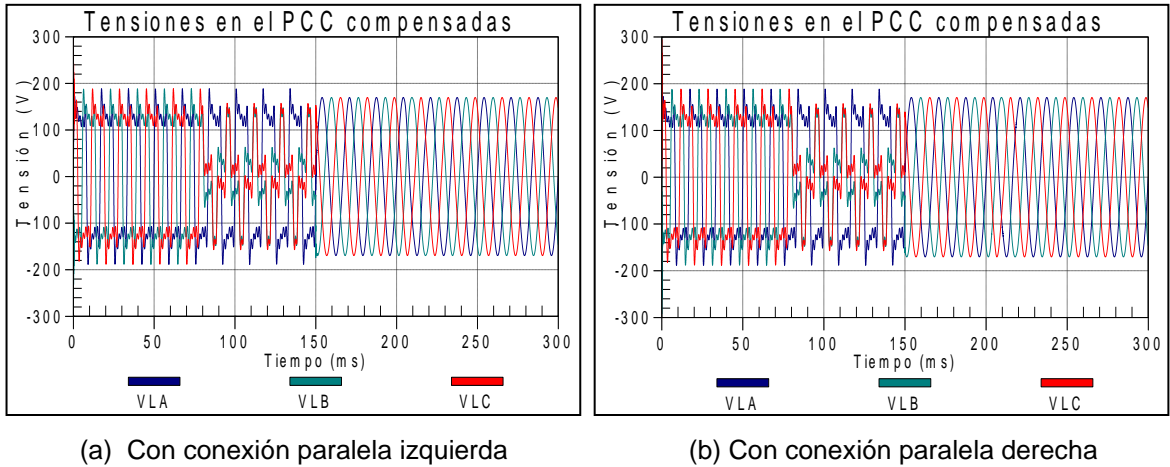


Figura 4.8 Tensiones en el PCC con compensación, mediante las dos topologías de conexión del UPQC - caso 1.

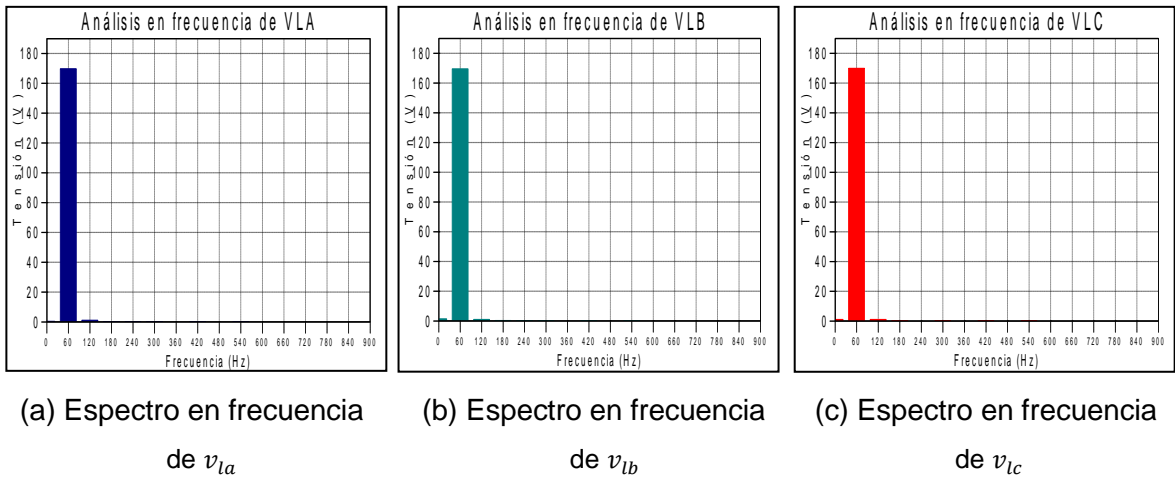
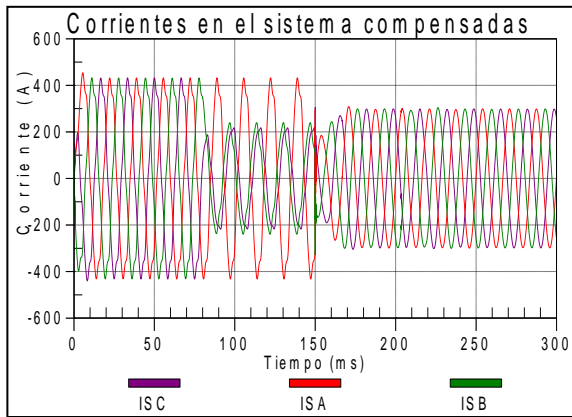
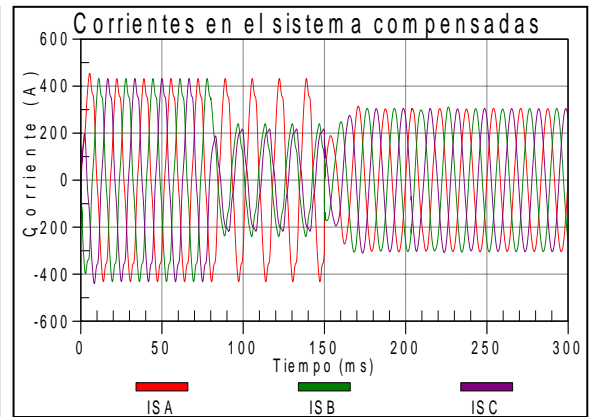


Figura 4.9 Componentes armónicas de las tensiones en la carga después de la compensación mediante el UPQC - caso 1.

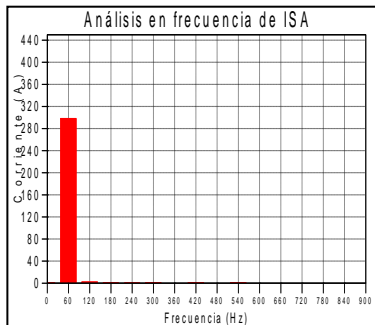


(a) Con conexión paralela izquierda

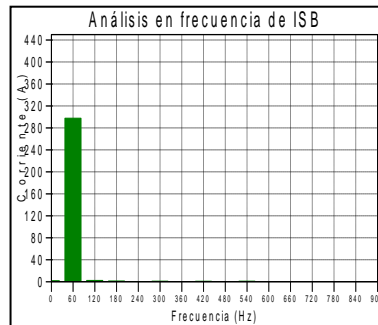


(b) Con conexión paralela derecha

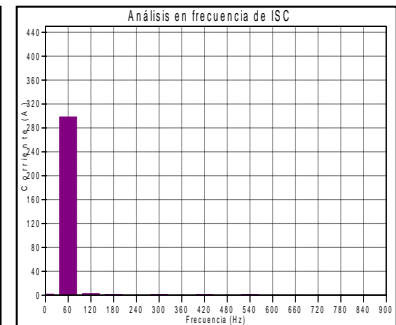
Figura 4.10 Corrientes de la red, antes y durante la compensación con las dos topologías de conexión del UPQC – caso 1.



(a) Espectro en frecuencia de i_{sa}

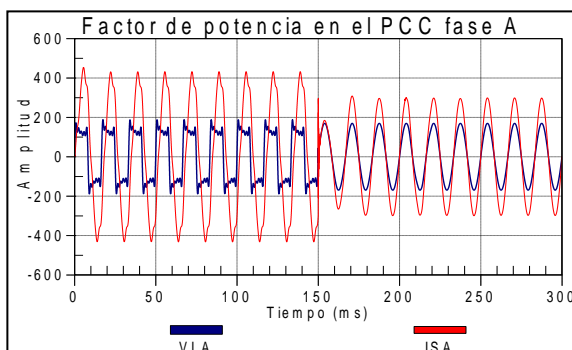


(b) Espectro en frecuencia de i_{sb}

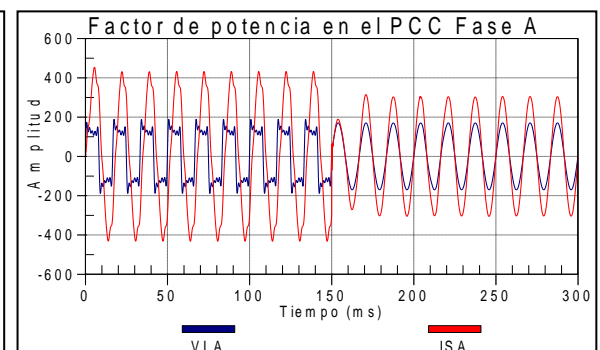


(c) Espectro en frecuencia de i_{isc}

Figura 4.11 Componentes armónicas de las corrientes de la red, durante la compensación mediante el UPQC - caso 1.

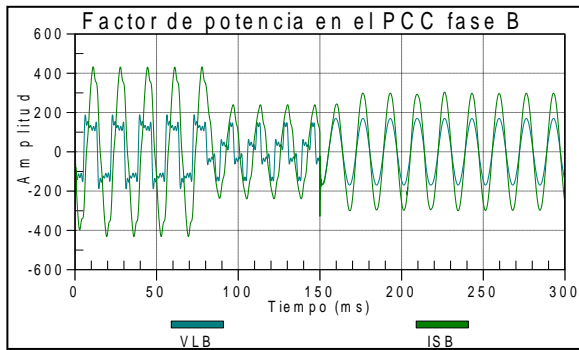


(a) Con conexión paralela izquierda

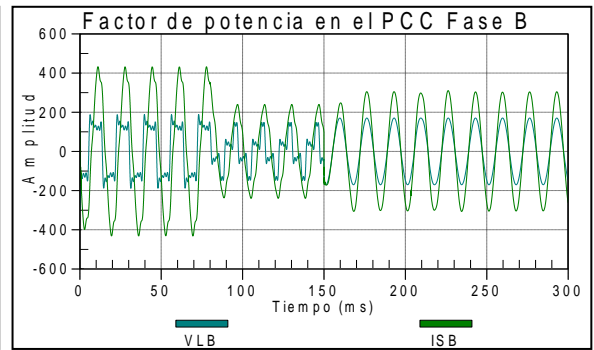


(b) Con conexión paralela derecha

Figura 4.12 Factor de Potencia en el PCC (fase A), antes y durante la compensación mediante las dos topologías de conexión del UPQC - caso 1.

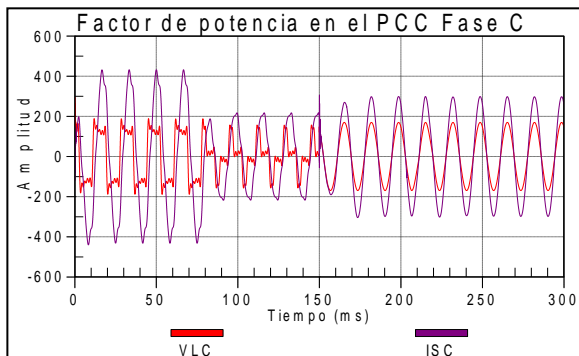


(a) Con conexión paralela izquierda

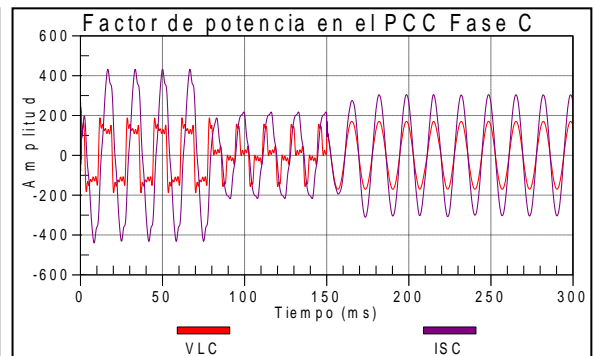


(b) Con conexión paralela derecha

Figura 4.13 Factor de Potencia en el PCC (fase B), antes y durante la compensación mediante las dos topologías de conexión del UPQC - caso 1.



(a) Con conexión paralela izquierda

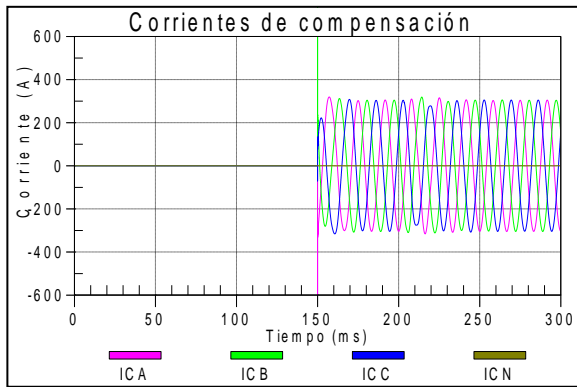


(b) Con conexión paralela derecha

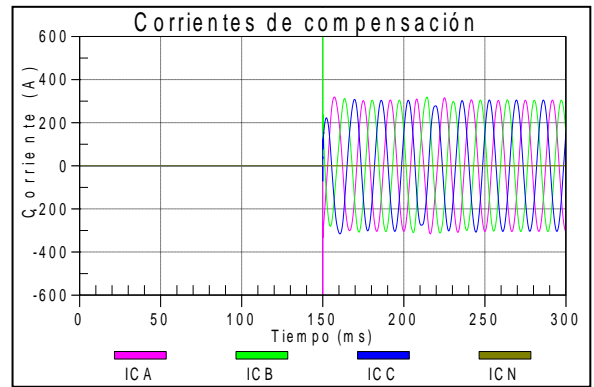
Figura 4.14 Factor de Potencia en el PCC (fase C), antes y durante la compensación mediante las dos topologías de conexión del UPQC - caso 1.

Las corrientes y tensiones de compensación inyectadas por el UPQC se ilustran en las figuras 4.15 y 4.16 respectivamente.

Como se explica en el capítulo 2, la corriente de compensación inyectada a la red (compensador paralelo), debe estar en cuadratura con la tensión en el PCC, para evitar el consumo adicional de potencia activa. De la figura 4.17 a la 4.19 se observa este comportamiento para cada fase del sistema, comprobando así que existe 90° entre estas dos señales.

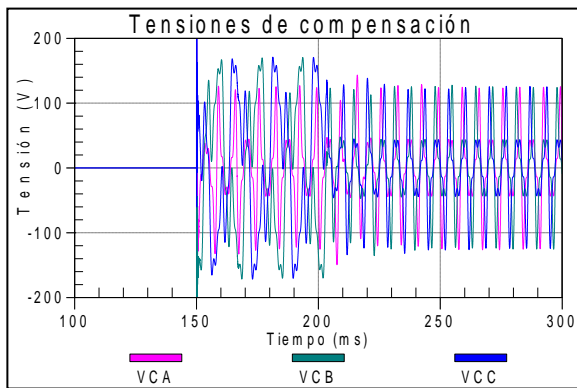


(a) Con conexión paralela izquierda

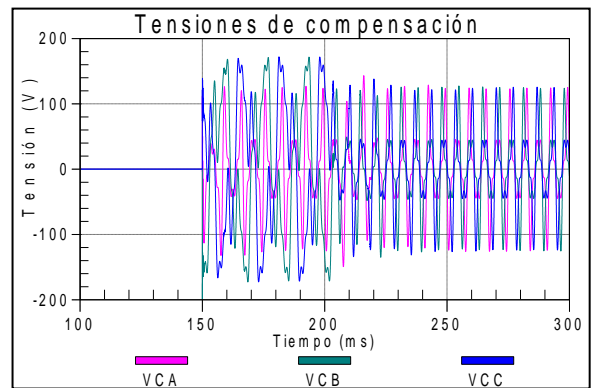


(b) Con conexión paralela derecha

Figura 4.15 Corrientes de compensación del UPQC, para sus dos topologías de conexión- caso 1.

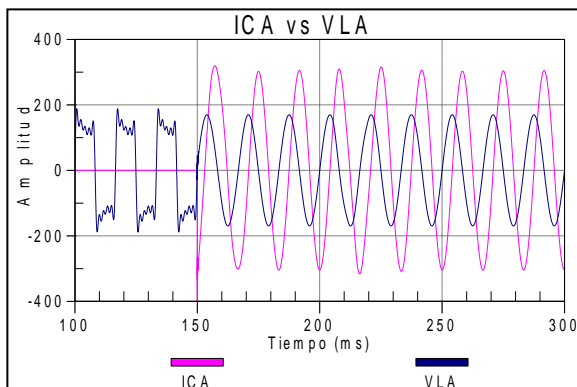


(a) Con conexión paralela izquierda.

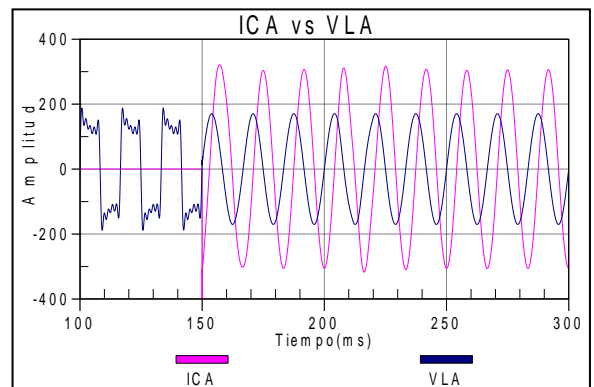


(b) Con conexión paralela derecha.

Figura 4.16 Tensiones de compensación del UPQC, para sus dos topologías de conexión - caso1.

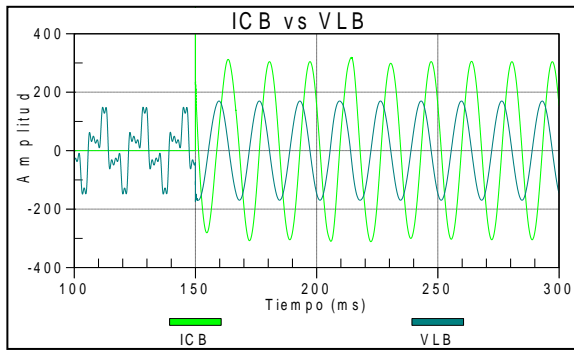


(a) Con conexión paralela izquierda

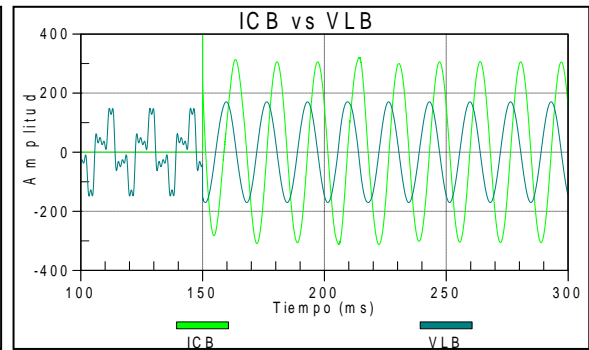


(b) Con conexión paralela derecha

Figura 4.17 Corrientes de compensación y tensiones en la carga (fase A), para las dos topologías de conexión del UPQC – caso 1.

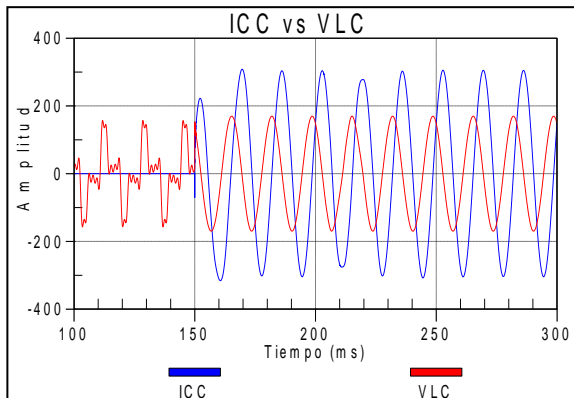


(a) Con conexión paralela izquierda

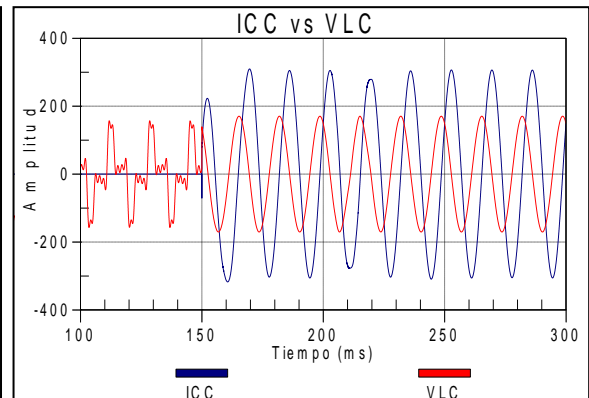


(b) Con conexión paralela derecha

Figura 4.18 Corrientes de compensación y tensiones en la carga (fase B), para las dos topologías de conexión del UPQC – caso 1.



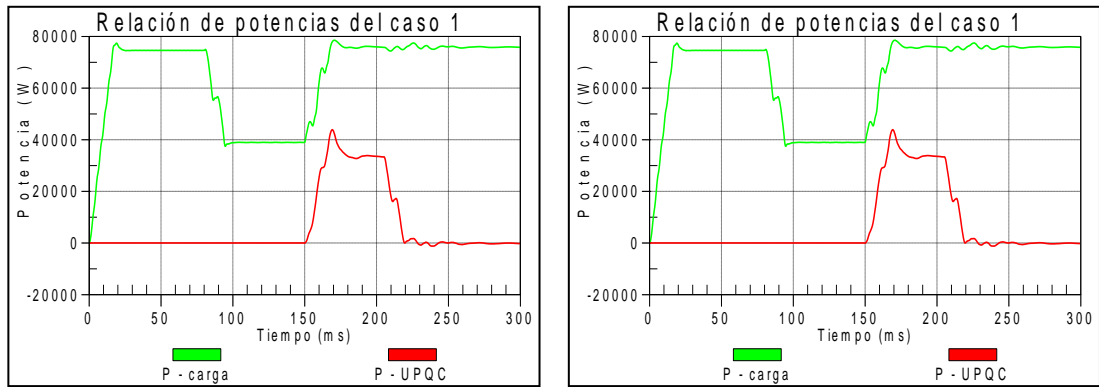
(a) Con conexión paralela izquierda



(b) Con conexión paralela derecha

Figura 4.19 Corrientes de compensación y tensiones en la carga (fase C), para las dos topologías de conexión del UPQC - caso 1.

La acción de control para las dos topologías de compensación, requiere al rededor de 34 [kW] (aproximadamente el 40% del consumo de potencia de la carga), como se muestra en la figura 4.20, pero existe una leve diferencia entre estas dos potencias que se puede verificar en la figura 4.21. En la compensación paralela izquierda (P-UPQC I_V), las componentes armónicas de tensión y corriente de la misma secuencia y frecuencia, producen una potencia adicional que se suma a la potencia de las componentes fundamentales, este comportamiento no ocurre en la compensación paralela derecha (P-UPQC V_I).



(a) Con conexión paralela izquierda

(b) Con conexión paralela derecha

Figura 4.20 Potencia activa trifásica del UPQC en sus dos topologías de conexión – caso 1.

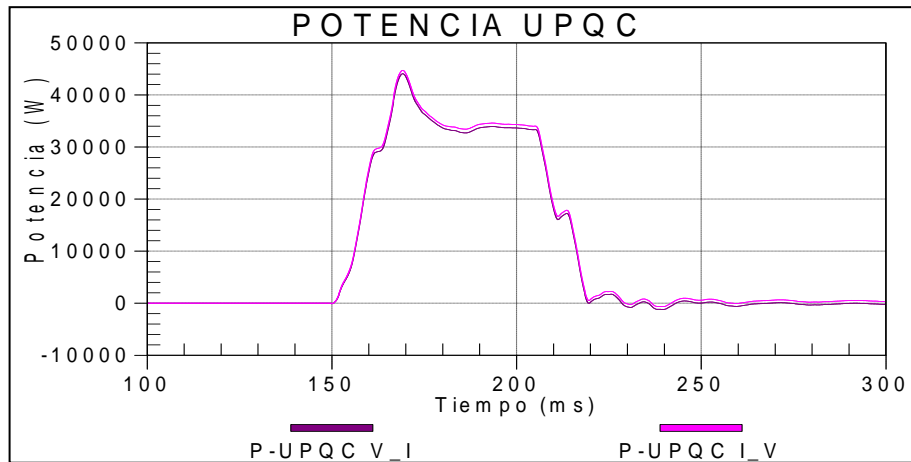


Figura 4.21 Relación entre la potencia del UPQC en sus dos topologías de conexión – caso 1.

En las figuras del caso 1, se observó, que mediante las dos topologías de conexión del UPQC, los resultados obtenidos en la compensación tanto en tensión como en corriente son iguales. La diferencia entre estas dos formas de compensación radica en la potencia utilizada por el UPQC. Por esta razón las figuras de la compensación para el caso 2 solo se mostrarán en una sola forma de conexión.

4.4.2 Caso 2: Presencia de armónicos en la fuente de tensión, falla bifásica y carga no lineal desbalanceada.

El conjunto de tensiones medidas en la carga se observan en la figura 4.22, las cuales presentan un alto contenido de distorsión debido a los armónicos introducidos por la fuente del alimentador, y adicionalmente para la fase A, los armónicos de tensión que pueden inducir las corrientes de la carga no lineal. El espectro de frecuencia para cada una de las fases en la figura 4.23, muestra las componentes armónicas que están produciendo la distorsión. De igual manera, el espectro de frecuencias deja ver el desbalance de tensión que se produce por el desbalance de las cargas alimentadas. Adicionalmente, la introducción de una falla bifásica que afecta las fases B y C, incrementa la perturbación de las tensiones de la red de suministro en el periodo comprendido entre 0.08 [s] y 0.2 [s].

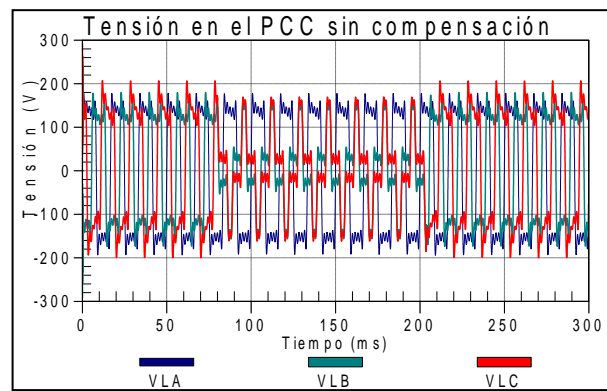
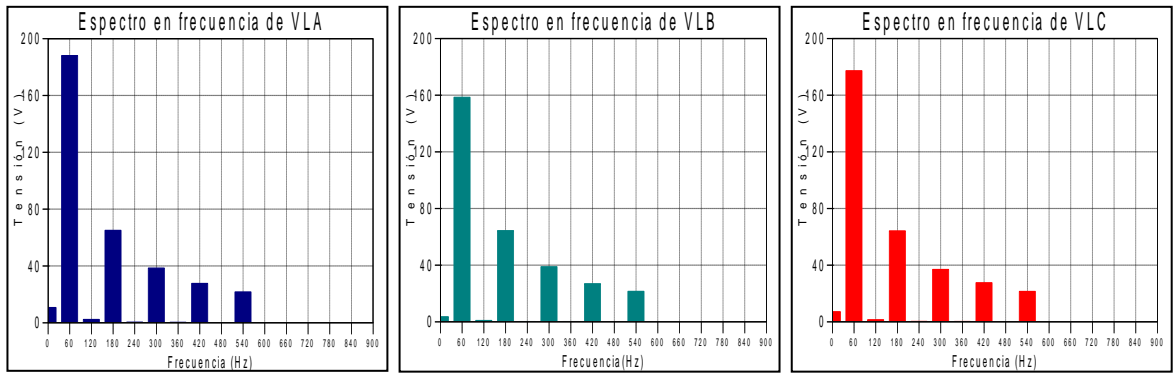


Figura 4.22 Tensiones medidas en el PCC, sin la compensación del UPQC – caso 2.



(a) Espectro en frecuencia de v_{La} (b) Espectro en frecuencia de v_{Lb} (c) Espectro en frecuencia de v_{Lc}
Figura 4.23 Componentes armónicas de las tensiones en la carga antes de la compensación mediante el UPQC - caso 2.

Las corrientes por la red en la figura 4.24, permiten ver el desbalance y la diversidad de las cargas conectadas. Mientras la corriente de la fase A exhibe las características de una carga no lineal, las otras dos corrientes son de naturaleza sinusoidal correspondientes al consumo generado por cargas lineales. El conjunto de corrientes produce un flujo de potencia desequilibrado a través de la red, y se modifica aún más, durante el tiempo de duración de la falla bifásica. El espectro de frecuencia para las corrientes de estado estable en este sistema de suministro, se presenta en la figura 4.25.

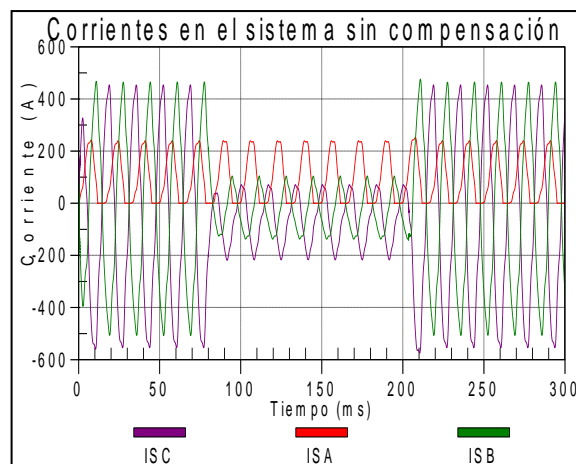
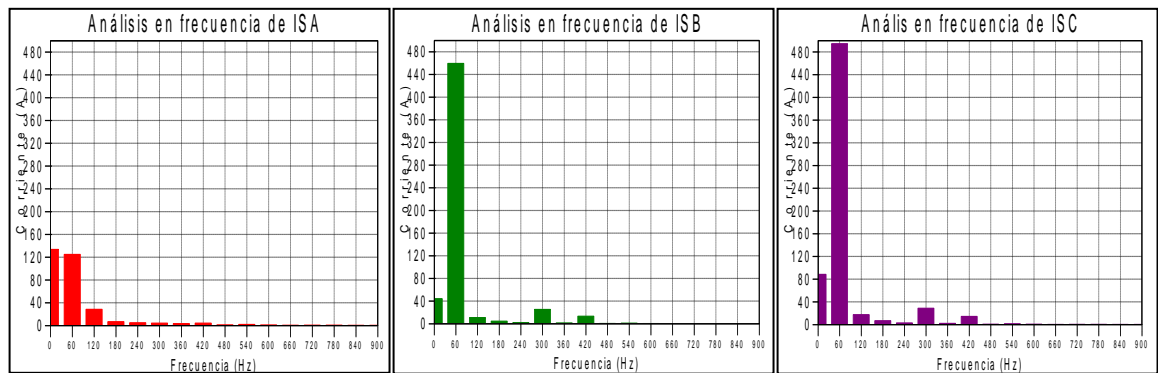


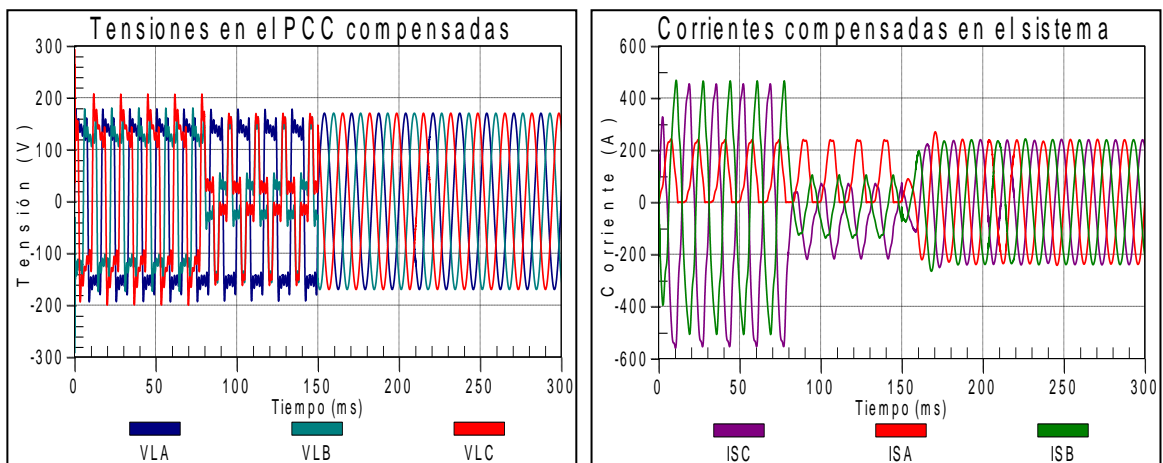
Figura 4.24 Corrientes de la red, sin la compensación del UPQC – caso 2.



(a) Espectro en frecuencia de i_{sa} (b) Espectro en frecuencia de i_{sb} (c) Espectro en frecuencia de i_{sc}

Figura 4.25 Componentes armónicas de las corrientes de la red, antes de la compensación mediante el UPQC - caso 2.

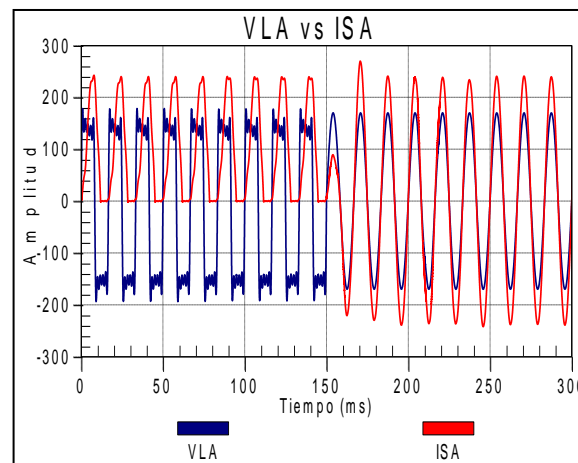
El contraste entre las tensiones de la carga y las corrientes de la red, antes y después de la compensación realizada por el UPQC, se ilustra en la figuras 4.26a y 4.26b respectivamente. El ingreso del compensador a la red a los 150 [ms], modifica las tensiones de alimentación de la carga, de un conjunto desbalanceado y distorsionado, a un sistema balanceado de secuencia positiva, ostensiblemente libre de armónicos y regulado al valor fijado como referencia. A su vez, el aporte paralelo de la compensación, hace que el flujo de corriente por la red sea balanceado y que su contenido de armónicos se disminuya en una proporción importante.



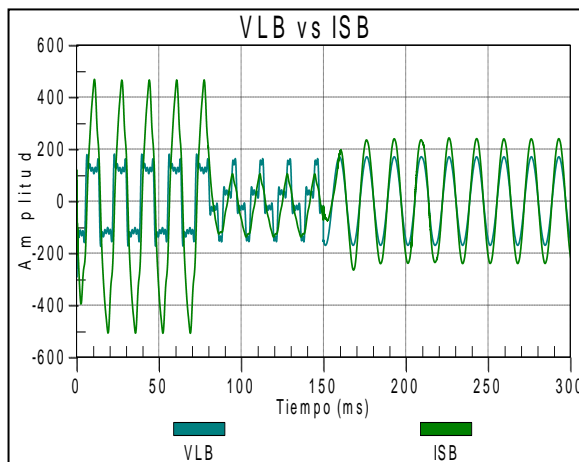
(a) Tensión trifásica compensada en el PCC (b) Corriente trifásica compensada en la red

Figura 4.26 Tensiones en el PCC y corrientes de la red antes y durante la compensación, mediante el UPQC - caso 2.

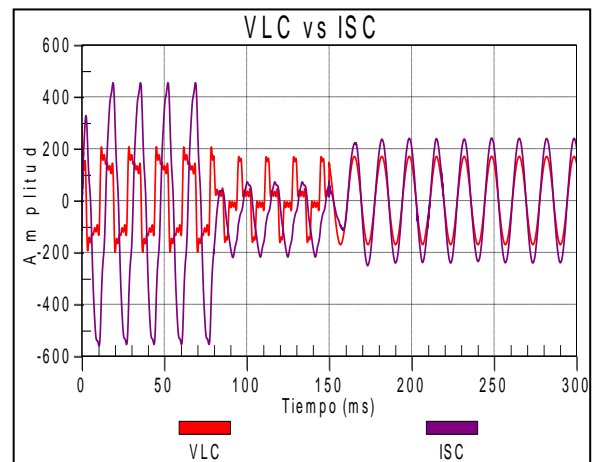
Las figuras 4.27a, 4.27b y 4.27c, permiten comparar las señales de corriente por la red con las tensiones de la carga antes y después de la compensación, para las fases *a*, *b* y *c* respectivamente. Se observa que sus formas de onda y ángulos de fase relativos, se modifican haciendo que las corrientes en conjunto, transporten únicamente la potencia activa de la carga total, esto implica que las corrientes tienen un factor de potencia unitario en el punto de conexión de la carga.



(a) Factor de potencia en el PCC, fase A.



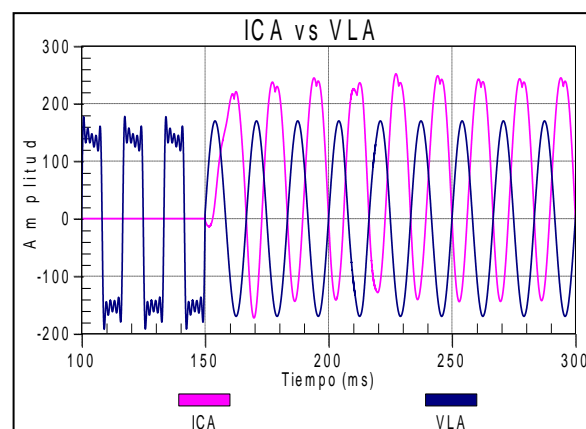
(b) Factor de potencia en el PCC, fase B



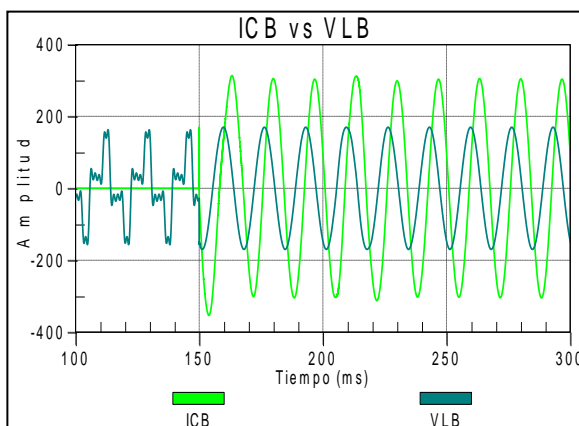
(c) Factor de potencia en el PCC, fase C.

Figura 4.27 Factor de Potencia en el PCC, antes y durante la compensación mediante el UPQC - caso 2.

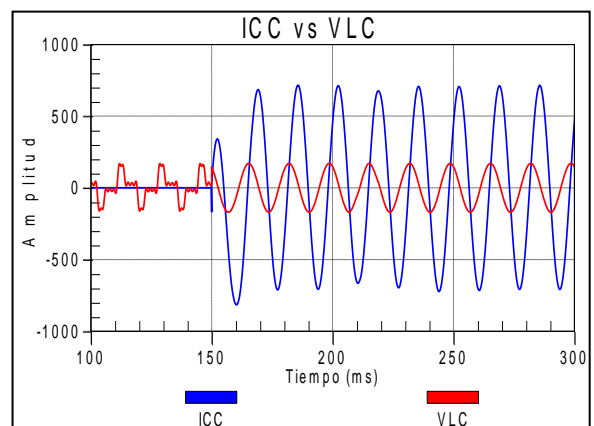
Por su parte, las corrientes de compensación inyectadas desde el momento de ingreso del UPQC a la red, se presentan junto con las tensiones de la carga en las figuras 4.28a, 4.28b y 4.28c, respectivamente. Las corrientes de compensación proporcionan las componentes armónicas, y la potencia no activa de promedio nulo que demanda el desbalance. Por esta razón, desde el punto de vista de la compensación paralelo, aunque las corrientes de compensación no se mantienen en cuadratura con las tensiones de alimentación, no generan un intercambio adicional de potencia entre el UPQC y la red.



(a) ICA vs VLA



(b) ICB vs VLB



(c) ICC vs VLC

Figura 4.28 Corrientes de compensación y tensiones en la carga, antes y durante la operación del UPQC – caso 2.

La compensación en serie del UPQC, ingresa a la red el conjunto de tensiones de la figura 4.29. Estas tensiones deben contrarrestar el contenido de armónicos y desbalance que aparecen en el PCC, debidos a la distorsión de la fuente y el desbalance que se produce por la falla en la red.

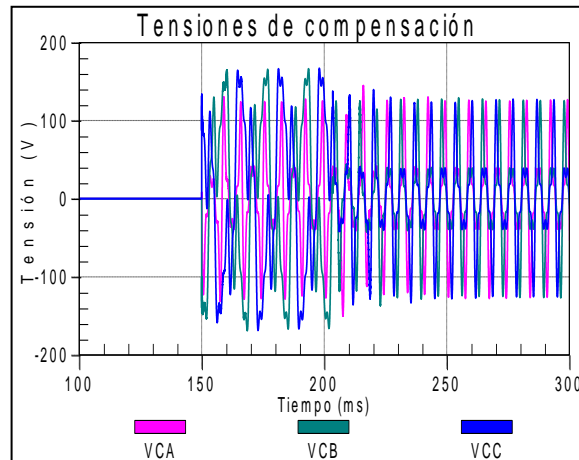
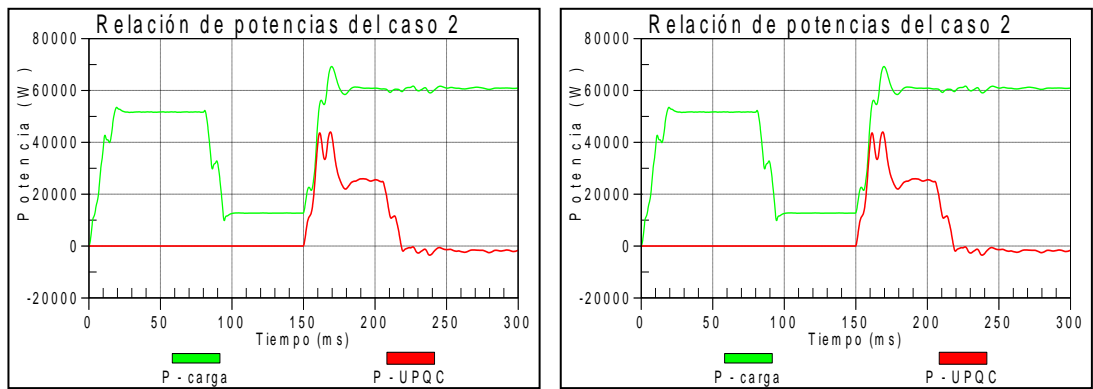


Figura 4.29 Tensiones de compensación del UPQC – caso 2.

El intercambio de potencia entre el UPQC y la red se muestra en las figuras 4.30a y 4.30b, para las topologías paralela izquierda y paralela derecha, respectivamente, en donde se referencia con respecto al consumo de la carga.

Se encuentra un consumo de potencia, relacionado con la compensación muy similar en ambos casos, lo cual se observa en la figura 4.31. Allí se evidencia, que el mayor intercambio de potencia ocurre durante la falla bifásica en donde el consumo de potencia se origina en la restauración de las tensiones al valor de referencia; esto debido al factor de potencia resultante entre las tensiones de compensación y las corrientes de la carga.



(a) Con conexión paralela izquierda

(b) Con conexión paralela derecha

Figura 4.30 Potencia activa trifásica del UPQC – caso 2.

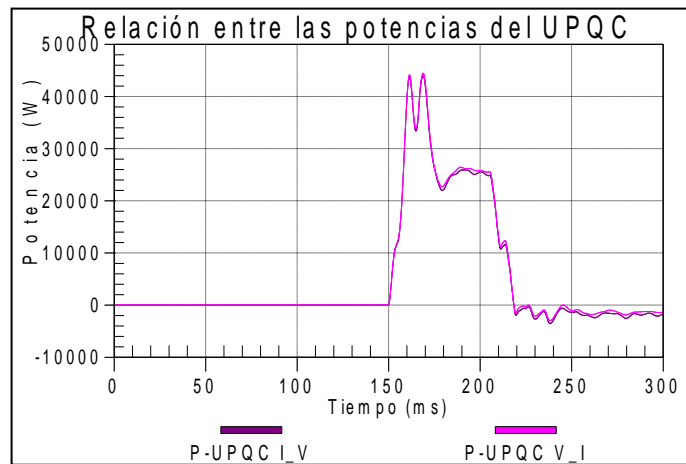


Figura 4.31 Relación entre la potencia del UPQC en sus dos topologías de conexión – caso 2.

CONCLUSIONES

Los trabajos orientados hacia la comprensión de las topologías y los algoritmos que gobiernan el funcionamiento de los compensadores de la familia *Custom Power Devices*, representan un aporte importante para la validación de las soluciones propuestas en pro del mejoramiento de la calidad de la energía eléctrica.

Dentro de este trabajo de investigación, se han abordado los dispositivos D-STATCOM, DVR y UPQC, con el fin de observar a nivel de modelos de simulación, las posibilidades de compensación que ofrecen al ser integrados a una red de distribución con escenarios desfavorables en cuanto a la calidad de la energía de suministro. En este sentido, la realización y simulación de los modelos empleados, permite emitir las siguientes conclusiones y observaciones:

DSTATCOM:

- El DSTATCOM presenta grandes aportes en sistemas de distribución, como se comprobó en el desarrollo de este trabajo de grado, a través de sus dos modos de operación, con los cuales se realiza la compensación de perturbaciones generadas desde la carga hacia la red (modo control corriente) y desde la red hacia la carga de interés (modo control tensión).
- El DSTATCOM en modo control corriente permite la reducción del desbalance, el mejoramiento del factor de potencia y la disminución del contenido armónico de las corrientes de la red. Por su parte, en modo control tensión, puede restaurar las tensiones en el PCC frente a diversos eventos en la red que causan huecos, elevaciones y deficiencias de regulación.
- Aunque en la actualidad se han planteado distintas teorías para el cálculo de las corrientes de referencia, en este trabajo la teoría $p-q$ modificada, es implementada en el desarrollo del modo control de corriente del DSTATCOM, como parte del

algoritmo de compensación, obteniendo resultados positivos en cuanto al mejoramiento del desbalance, factor de potencia y distorsión de las corrientes de la red. Estos resultados se dan siempre que la tensión en el PCC no presenten perturbaciones, ya que el algoritmo depende de estas condiciones de tensión para hallar de forma adecuada las corrientes de compensación.

- Una característica importante de la teoría $p-q$ modificada es el hecho de considerar para sus cálculos la componente homopolar, que en los casos de cargas no lineales o desbalanceadas, es contemplada y compensada adecuadamente.
- El beneficio tangible inmediato que hará parte de las razones para justificar la adquisición de un DSTATCOM por parte de un cliente potencial, y que se corrobora en las simulaciones de este trabajo de grado, es la mejora en las eficiencia de las redes de distribución, pues se reduce el valor eficaz de la corriente que se suministra a la carga desde la fuente del sistema, mientras que el dispositivo realiza el aporte de la potencia no activa que se consume en la carga de forma controlada.
- El hecho de tener un dispositivo activo de compensación como el DSTATCOM, garantiza que las acciones de control sean realizadas de manera adecuada en el momento y proporción requerida. Esto se evidencia en las simulaciones aquí expuestas para cada caso tipo mostrado, donde se observa que la potencia no activa entregada desde el compensador está ajustada a la dinámica de la carga, permitiendo así que la energía aportada por la fuente del sistema este constituida por un conjunto de corrientes balanceadas y en fase con la tensión del PCC.
- En este trabajo, para el DSTATCOM en modo control tensión, se presentan dos algoritmos que se desenvuelven en dos marcos de referencia diferentes. El primero de ellos, en el marco de referencia $a-b-c$ y el otro en el marco de referencia $d-q-0$. Independientemente del algoritmo usado, el objetivo es mantener

la tensión en el valor de referencia en el punto de interés, mediante la inyección de potencia reactiva a través de las corrientes de compensación.

- La compensación realizada por el DSTATCOM en modo tensión, utilizando el sistema de referencia $d-q-0$, requiere de señales de sincronización que fueron obtenidas mediante el uso del algoritmo adaptativo del filtro Kalman. La utilización de esta estrategia de control produce resultados favorables en términos de balance y regulación de las tensiones compensadas.
- En el desarrollo de las simulaciones para el cálculo de las corrientes de referencia que utiliza el algoritmo con marco de referencia $a-b-c$, se concluye de acuerdo a los resultados obtenidos, que se puede lograr la restauración de la amplitud de la tensión, pero el desbalance no es corregido, ya que este algoritmo no contempla la compensación en el corrimiento del ángulo de fase. Debido a esto, sólo tendría lugar en la compensación de sistemas trifásicos con presencia de cargas monofásicas no sensibles al salto de fase.
- Los algoritmos del DSTATCOM en modo control tensión utilizados en este trabajo incluyen lazos de control con controladores PI, los cuales en su dinámica de funcionamiento requieren de un tiempo de cálculo para hallar las señales de compensación. Este hecho, junto con la naturaleza dominante RL de la red de distribución, hace que el compensador requiera algún tiempo para alcanzar el objetivo de compensación.
- Los algoritmos empleados para el cálculo de las corrientes de compensación en los dos modos de operación, están condicionados para mantener un intercambio nulo de potencia entre el DSTATCOM y la red en condiciones de operación de estado estable. Los resultados muestran que esto es posible mientras las tensiones en el PCC sean balanceadas a la frecuencia fundamental para la operación como compensador de corriente, o alcancen esta condición durante la compensación para el modo de operación como compensador de tensión, lo cual implica que si el objetivo de compensación no se alcanza en el modo control de tensión, habrá un intercambio de potencia activa generada por las componentes

de secuencia positiva, negativa y cero coincidentes en las señales de tensión y corriente

DVR:

En este trabajo, se presenta un modelo del DVR que utiliza un algoritmo de compensación basado en la transformación de las tensiones medidas en el PCC al marco de referencia $d-q-0$, el cual se sincroniza mediante un PLL que identifica la componente de secuencia positiva de estas tensiones. Los resultados de simulación permiten resaltar las siguientes conclusiones:

- El algoritmo para el PLL considera que la frecuencia fundamental del sistema es conocida e invariante, por lo que solo debe ajustar la posición del eje directo del marco de referencia síncrono para igualarla con la posición de la proyección del vector instantáneo (constituido por las tensiones de secuencia positiva del PCC) sobre el sistema rotatorio. Este ajuste se realiza mediante un controlador PI, que establece un tiempo de respuesta para eliminar el error en la posición buscada, lo que supone un retraso en la respuesta del DVR para alcanzar la compensación de las tensiones de la carga, que podría ser crítico especialmente frente a perturbaciones de muy corta duración. Sin embargo, esta falencia en la rapidez de la respuesta, es superada con la posibilidad que ofrece de compensar componentes armónicas en tensión sin recurrir a un algoritmo con gran demanda computacional.
- Dependiendo del tipo de perturbación que afecta las tensiones en el punto de interés y de las características de la corriente de la carga, el DVR bajo el algoritmo utilizado en el cálculo de las tensiones de compensación, puede entregar, absorber o no generar ningún intercambio de potencia activa. En este sentido y de acuerdo a los resultados de simulación, el DVR debe entregar potencia a la red cuando se presentan tensiones con o sin armónicos afectadas por huecos o baja

regulación, mientras la carga alimentada consume corrientes con o sin armónicos. Así mismo, en el caso de elevaciones de tensión transitorias o permanentes, y con las mismas condiciones mencionadas para las tensiones y corrientes de la carga, el DVR debe absorber el exceso de potencia presente en el sistema para contrarrestar la sobretensión. Por su parte, la restauración de las tensiones frente a distorsión producida por armónicos, únicamente presenta consumo de potencia por coincidencia en los armónicos de las tensiones de compensación y los armónicos de corriente en los casos en que la carga es no lineal; mientras que en presencia de cargas lineales, la compensación solo tiene implicaciones de potencia no activa.

- El DVR es un compensador orientado a la restauración de tensión, sin tener en cuenta el efecto de su operación sobre las corrientes de la red, sin embargo, para el caso de la compensación de armónicos de tensión se produce un resultado positivo en las corrientes de la red cuando la carga alimentada es de características lineales. Siendo así, la eliminación de los armónicos de tensión, hace que en las corrientes de la carga también sean sinusoidales y de frecuencia fundamental.

UPQC:

El UPQC es un compensador que toma las fortalezas de los dispositivos de compensación en paralelo y serie para ofrecer una solución más completa frente a la mayoría de perturbaciones que afectan la calidad de las señales de tensión en la carga y corrientes en la red. El modelo presentado en este trabajo combina los algoritmos de estimación de las señales de compensación usados en el DVR y el DSTATCOM.

Los resultados de simulación permiten el aporte de las siguientes conclusiones:

- La combinación de las compensaciones serie y paralelo constituye un dispositivo integral, que supera los aportes observados en la utilización del DSTATCOM y el DVR de forma individual. La estrategia de control de la compensación serie hace que la carga tenga un conjunto de tensiones balanceadas de frecuencia fundamental, las cuales a su vez permiten que el algoritmo de compensación paralelo realice una estimación adecuada de las corrientes de compensación para generar un flujo de corrientes sinusoidales balanceadas con el mínimo valor eficaz posible que permite transportar toda la potencia consumida por la carga, mientras se mantienen en fase con la tensión de la carga.
- El intercambio de potencia entre el UPQC y la red depende de la configuración utilizada, bien sea paralelo derecho o paralelo izquierdo, así como también de las características de la carga protegida. Desde el punto de vista de las corrientes de la carga, éstas influyen en mayor grado en la potencia de compensación para la configuración de UPQC paralelo izquierdo, pues la corriente total de la carga circula a través del compensador serie, lo que hace que las componentes de la tensión de compensación y las componentes de la corriente de la carga de la misma secuencia y frecuencia aporten al intercambio total de potencia entre el UPQC y la red. Por parte del UPQC paralelo derecho, el intercambio de potencia puede variar en comparación con la otra configuración, pues a través del compensador serie circula únicamente la componente de corriente de frecuencia fundamental en fase con la tensión de la carga, lo que produce intercambio de potencia únicamente en los casos en que la restauración de la tensión involucra el aumento o disminución en la amplitud de la componente de frecuencia fundamental.

APORTES Y TRABAJOS FUTUROS

APORTES:

- Para la realización de este trabajo se hacen aportes en el desarrollo de modelos programados debido a la necesidad de optimizar los recursos computacionales que ofrece el paquete ATP Draw. Algunos de estos desarrollos son:
 - Módulo de cálculo de valor promedio, debido a que ATP no cuenta con este recurso.
 - Módulo de cálculo de valor eficaz, debido a que ATP no permite poner más de uno por simulación y en periodos de pruebas se hacían necesarios.
 - Fuente programable para simular armónicos generados desde la fuente de suministro.
 - Módulo del Filtro Kalman para disponer de este recurso.
 - Módulo del PLL para disponer de este recurso.
- Este documento servirá como recurso de consulta para los interesados en conocer acerca de los *Custom Power* y es un acercamiento a sus características principales. En el caso puntual del DSTATCOM, DVR y UPQC da al lector unas pautas acerca de algoritmos que son funcionales y a futuro puede ser referenciado como un recurso preliminar de la implementación de prototipos de estos dispositivos.

TRABAJOS FUTUROS

Con el fin de dar continuidad al trabajo expuesto en este proyecto se proponen algunos trabajos que pueden realizarse con el objetivo de ahondar en los dispositivos *Custom Power*.

- Estudio del tipo de inversor, control del mismo, ventajas y desventajas dependiendo de las topologías expuestas.
- Análisis de los elementos o circuitos de acople de cada dispositivo a la red, considerando los distintos efectos que aportará al momento de realizar la compensación.
- Revisión de los elementos almacenadores más eficientes que permitan a los dispositivos *Custom Power* disponer de energía suficiente en el momento requerido para realizar la compensación.
- Estudio de otras estrategias de cálculo no tratadas en este proyecto para determinar las corrientes o tensiones de compensación.
- Implementación física de un prototipo para cada uno de los dispositivos para comprobar la efectividad en montaje real de lo expuesto en este trabajo.
- Optimización de los algoritmos disponibles desde el punto de vista de eficiencia y posible implementación real de cara al montaje como tal de un prototipo.
- Análisis y recomendaciones de la mejor ubicación de los dispositivos en la red de distribución.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Norma Técnica Colombiana 5000 (NTC 5000, 02), Calidad de la potencia eléctrica (CPE). Definiciones y términos fundamentales, Bogotá, D.C.: El instituto, 2002, 16p.
2. IEEE Standards Board. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality (IEEE Std 1159-1995), New York, USA. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1995, 76p.
3. Calidad de servicio en un sistema eléctrico de potencia, Grupo de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+I) en Sistemas Eléctricos y Electrónicos de Potencia de la Universidad de Extremadura. Badajoz. España.
4. Y. Pal, A. Swarup, B. Singh, “*A Review of Compensating Type Custom Power Devices for Power Quality Improvement*”, Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008. Joint International Conference on, pp. 1-8, January 2009.
5. N.G. Hingorani, “*Introducing Custom Power*”, Spectrum IEEE, Vol. 32, pp. 41-48, June 1995.
6. Michel Stump, Gerald Keane, Frederic Leong, “*The role of Custom Power products in enhancing power quality at industrial Facilities*”, Energy Management and Power Delivery, 1998. Proceedings of EMPD '98. 1998 International Conference on, Vol. 2, pp. 507-517, August 2002.
7. M.M. Osborne, R.H. Kitchin, H.M. Ryan, “*Custom Power technology in distribution systems: an overview*”. Reliability, Security and Power Quality of Distribution Systems., 1995., IEE North Eastern Centre Power Section Symposium on the, pp. 10/1-1011, August 2002.

8. A. Ghosh and G. Ledwich, *Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices*, 1st ed., Kluwer's power electronics and power systems series, London. 2002. 456p.
9. J.Gates, R. Billinton and G. Wacker, "Electrical service reliability worth evaluation for government, institutions and office buildings," *IEEE Trnas Power Systems*, Vol. 14, No. 1, pp. 43-50, 1999.
10. María A. Mantilla Villalobos, Johann F. Petit Suarez, "Compensadores estáticos de potencia: Visión general y revisión del estado del arte", Seminario de Investigación II, Artículo sobre el estado del Arte. 2009.
11. Johann F. Petit Suarez, "Control de filtros activos de potencia para la mitigación de armónicos y mejora del factor de potencia en sistemas desequilibrados", Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, 2007.
12. H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching device without energy storage components", *Industry Applications, IEEE Transactions on*, Vol. IA-20, no. 3, pp. 625-630, May 1984.
13. R. Herrera, P. Salmeron, and H. Kim, "Instantaneous reactive power theory applied to active power filter compensation: Different approaches, assessment, and experimental results", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Vol. 55, no. 1, pp 184-196, Jan. 2008.
14. S. Togasawa, T. Murase, H. Nakano, and A. Nabae, "Reactive Power Compensation based on a novel cross-vector theory", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol.114, pp 340-341, March 1994.
15. B. Singh, Adya, A.P. Mittal and J.R.P. Gupta, "Analysis, Simulation and Control of DSTATCOM in three/phase, Four/wire Isolated Distribution Systems", in *Proc.Power Indis Conference IEEE*, 6 pp, Jun 2006.

16. José A. Romero, Miguel A. Gómez, “Análisis, Modelado y Control de un Compensador Estático para Sistemas de Distribución”, Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, 2010.
17. Cheng T.-H. “*Evaluation of line loss under load unbalance using the complex unbalance factor*”, Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, Vol. 142, pp.173-178, August 2002.
18. Comité Europeo de Normalización Electrotécnica CENELEC, CEI, Compatibilidad Electromagnética (CEM), Parte 4-30: Técnicas de ensayo y de medida – Métodos de medida de la calidad de suministro, CEI 61000-4-30, 2003.
19. Y. Pal, A. Swarup, and B. Singh, “*A review of compensating type Custom Power devices for power quality improvement*”, Power System Technology and IEEE Power India Conference, pp. 1–8, Oct. 2008.
20. G. Ledwich and A. Ghosh, “*A flexible DSTATCOM operating in voltage or current control mode*”, Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, Vol. 149, no. 2, pp. 215–224, Mar 2002.
21. A. Elnady and M. Salama, “*Unified approach for mitigating voltage sag and voltage flicker using the DSTATCOM*”, Power Delivery, IEEE Transactions on, Vol. 20, no. 2, pp. 992–1000, April 2005.
22. R. Cai, M. Bongiorno, and A. Sannino, “*Control of D-STATCOM for voltage dip mitigation*”, Future Power Systems, 2005 International Conference on, pp. 6 pp.–6, Nov. 2005.
23. T. Tian-yuan, J. Qi-rong, L. Gang, and L. Yu-xiang, “*Comparison of direct and indirect current control strategy for DSTATCOM*”, Power System Technology, 2006. International Conference on, pp. 1–8, Oct. 2006.

24. S.-Y. Jung, T.-H. Kim, S.-I. Moon, and B.-M. Han, “*Analysis and control of DSTATCOM for a line voltage regulation*”, Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE, Vol. 2, pp. 729–734 vol.2, 2002.
25. M. Haque, “*Compensation of distribution system voltage sag by DVR and D-STATCOM*”, Power Tech Proceedings, 2001 IEEE Porto, vol. 1, pp. 5, 2001.
26. J. Sun, D. Czarkowski, and Z. Zabar, “*Voltage flicker mitigation using pwm-based distribution statcom*”, Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, Vol. 1, pp. 616–621, July 2002.
27. Cesar Antonio Duarte Gualdrón, “*Técnicas de procesamiento de señales para la monitorización de calidad de la energía eléctrica*”, Trabajo de investigación de maestría, Universidad Industrial de Santander, 2004.
28. Idania S. Díaz P, Hugo Ortiz Pico, María A. Mantilla and Johan F. Petit S., “*Electrical Signals Parameter Estimation Using Adaptive Filtering: A Comparative Study*”, Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), 2010 IEEE/PES, pp. 745-750, May 2011.
29. Manmek Thip, Mudannayake Chathura P, “*Real Time implementation of Voltage Dip Mitigation using D-STATCOM with Fast Extraction of Instantaneous Symmetrical Components*”, in Proc. International Conference of the 2007 IEEE Power Electronics and Drive Systems, pp. 568-575, Nov. 2007.
30. G. A. Taylor, “*Power quality hardware solutions for distribution system: Custom Power*”, IEE North Eastern Center Power Section Symposium on Security and Power Quality of Distribution Systems, pp. 11/1-11/9, August 2002.
31. Hu Ming, Chen Heng, “*Modeling and Controlling of Unified Power Quality Compensator*”, APSCOM 2000 (5th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management), pp. 431-435, October 2000.

32. Newman Michael John, Holmes Donald Grahame, “*A Universal Custom Power Conditioner (UCPC) with Selective Harmonic Voltage Compensation*”, IECON 02 (IEEE 2002, 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society), Vol. 2, pp. 1261-1266, March 2003.

33. R. Suddep Kumar, P. Ganesan, “*250 kVA Unified Power Quality Controller*”, TENCON 2006. 2006 IEEE Region 10 Conference, pp. 1-4, April 2007.

34. M. Vilathgamuwa, Y.H. Zhang, S.S Choi, “*Modelling, analysis and control of Unified Power Quality Conditioner*”, Harmonics And Quality of Power, 1998. Proceedings. 8th International Conferenece on, Vol. 2, pp. 1035-1040, August 2002.
35. Changjiang Zhan, Munchung Wong, Zhiyong Wang, Yingduo Han, “*DSP Control of Power Conditioner for Improving Power Quality*”, Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE, Vol. 4, pp. 2556-2561, August 2002.

36. Zhan Changjiang, Wong Manchung, Han Yu, Han Yingduo, Zhao Liangbing, “*Universal Custom Power Conditioner (UCPC) In Distribution Networks*”, Power Electronics and Drive Systems, 1999, PEDS '99. Proceedings of the IEE 1999 International Conference on, Vol. 2, pp. 1067-1072. August 2002.

37. Gu Jianjun, Xu Dianguo, Liu Hankui, Gong Maozhong, “*Unified Power Quality Conditioner (UPQC): the Principle, Control and Application*”, Proceedings of the Power Conversion Conference, 2002. PCC Osaka 2002, Vol. 1, pp. 80 – 85, August 2002.

38. Alder Salamaca, Christian Ardila, “*Restaurador Dinámico de Tension (DVR): Análisis y Estrategias de Control*”, Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, 2010.

39. Paul K.W. Chan, Henry S.H. Chung, “*Boundary Control of Dynamic Voltage Restorer in Voltage Harmonic Compensation*”, Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC '06.37th IEEE, pp. 1–7, October 2006.

40. Chellali Benachaiba, Brahim Ferdi. “*Voltage Quality Improvement Using DVR*”, *Electrical Power Quality and Utilisation*, Journal Vol. 14, No. 1, 2000.
41. Paisan Boonchiaml, Promsak Apiratikul and Nadarajah Mithulananthan, “Detailed Analysis of Load Voltage Compensation for Dynamic Voltage Restorers”, *TENCON 2006*, pp. 1-4, 2006.
42. John Godsk Nielsen, Frede Blaabjerg, “*A Detailed Comparison of System Topologies for Dynamic Voltage Restorers*”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 41 pp. 1272-1280, 2005.
43. Jacinto Martín Arnedo, Juan A. Martínez Velasco, Tommaso Iannucci, “Simulación de un Acondicionador Dinámico de Tensión”, *Revista Iberoamericana del ATP*, Vol. 3, Número 3, Octubre de 2001.
44. P. Rodríguez, “Aportaciones a los acondicionadores activos de corriente en derivación para redes trifásicas de 4 hilos”, Ph. D. dissertation, Universidad Politecnica de Catalunya, Barcelona, 2005.
45. Idania S. Díaz Páez, Hugo Ortiz Pico, “Estimación de parámetros de señales eléctricas: estudio e implementación de algoritmos basados en filtros adaptativos”, Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, 2010.

BIBLIOGRAFÍA

Ghosh A. and Ledwich G. *Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices*, 1st ed., Kluwer's power electronics and power systems series, London. 2002. 456p.

Hu Ming, Chen Heng, "Modeling and Controlling of Unified Power Quality Compensator", APSCOM 2000 (5th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management), pp. 431-435, October 2000.

IEEE Standards Board. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality (IEEE Std 1159-1995), New York, USA. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 1995, 76p.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Norma Técnica Colombiana 5000 (NTC 5000, 02), Calidad de la potencia eléctrica (CPE). Definiciones y términos fundamentales, Bogotá, D.C.: El instituto, 2002, 16p.

Newman Michael John, Holmes Donald Grahame, "A Universal Custom Power Conditioner (UCPC) with Selective Harmonic Voltage Compensation", IECON 02 (IEEE 2002, 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society), Vol. 2, pp. 1261-1266, March 2003.

Petit Suarez, Johann F., "Control de filtros activos de potencia para la mitigación de armónicos y mejora del factor de potencia en sistemas desequilibrados", Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, 2007.

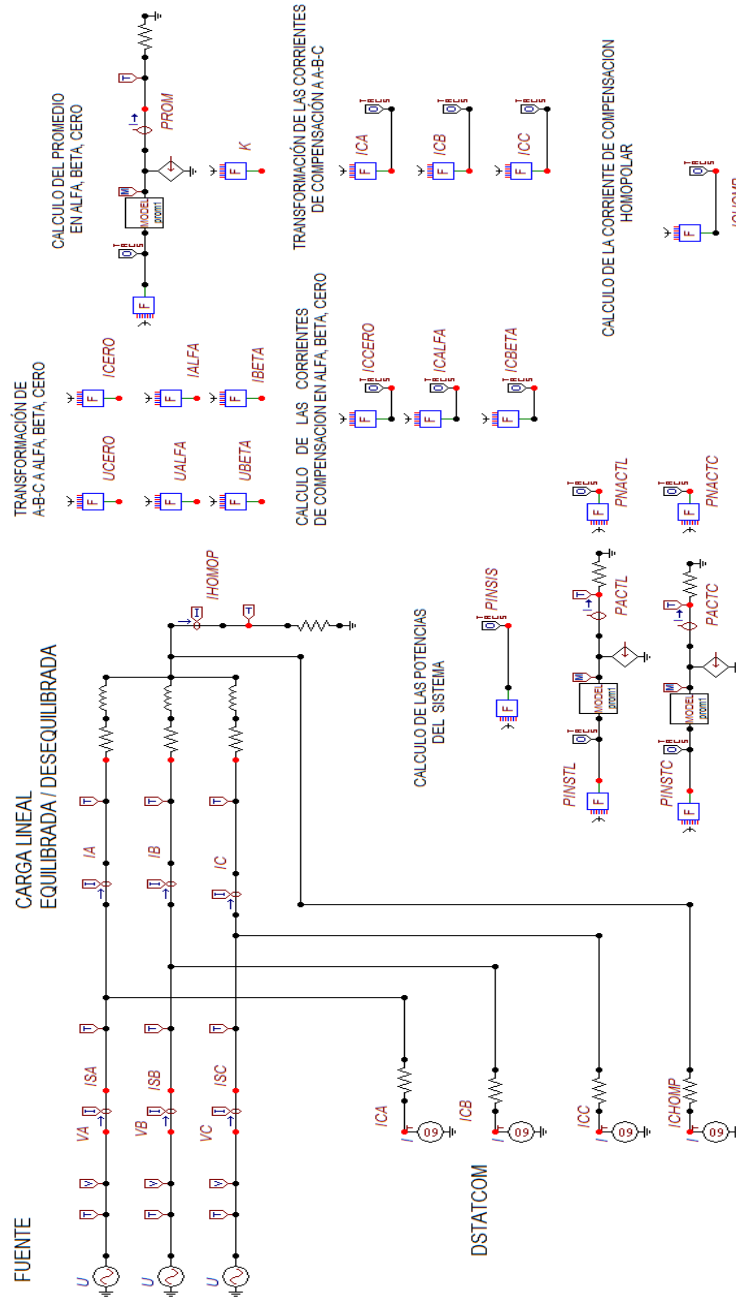
Romero José A. y Gómez G. Miguel A., "Análisis, Modelado y Control de un Compensador Estático para Sistemas de Distribución", Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, 2010.

Salamaca A. y Ardila C. "Restaurador Dinámico de Tension (DVR): Análisis y Estrategias de Control", Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, 2010.

ANEXOS

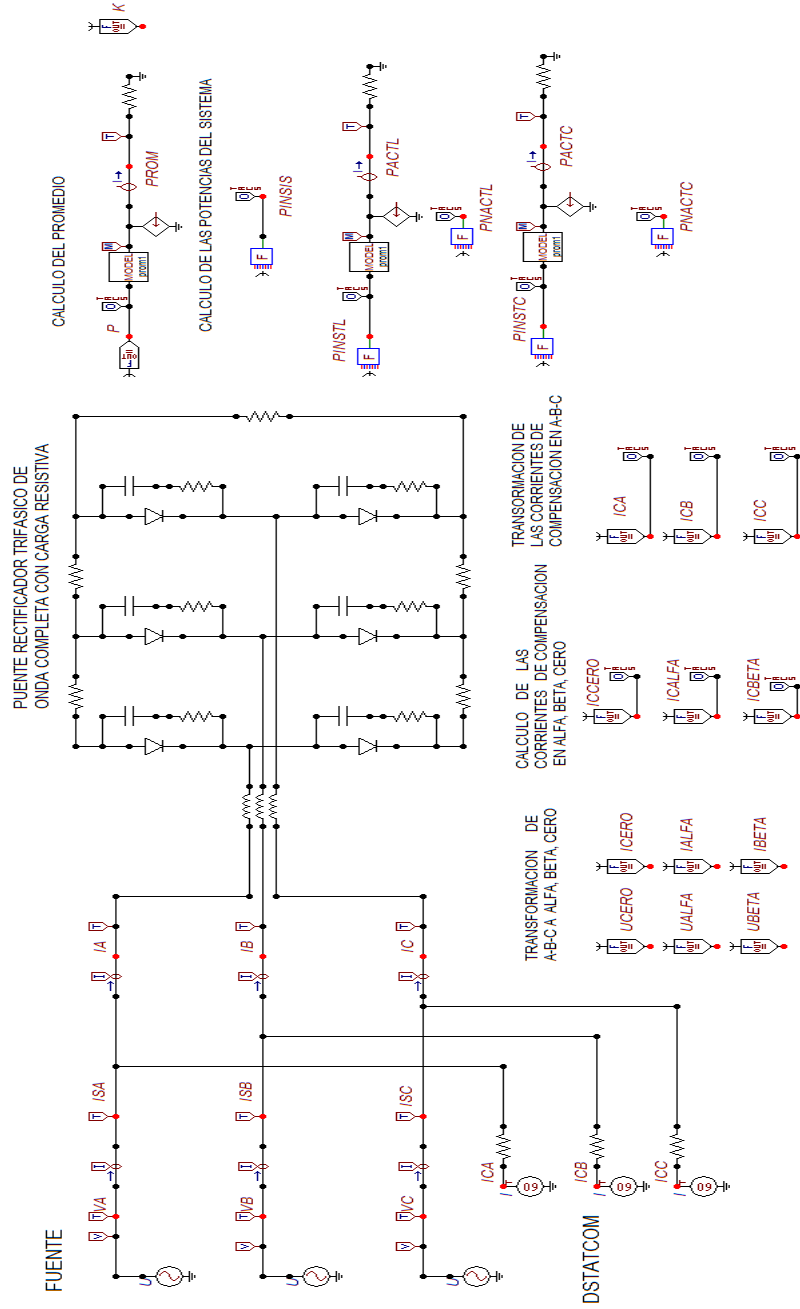
Anexo A

Esquema en ATP del DSTATCOM modo control corriente, caso 1 y caso 2.



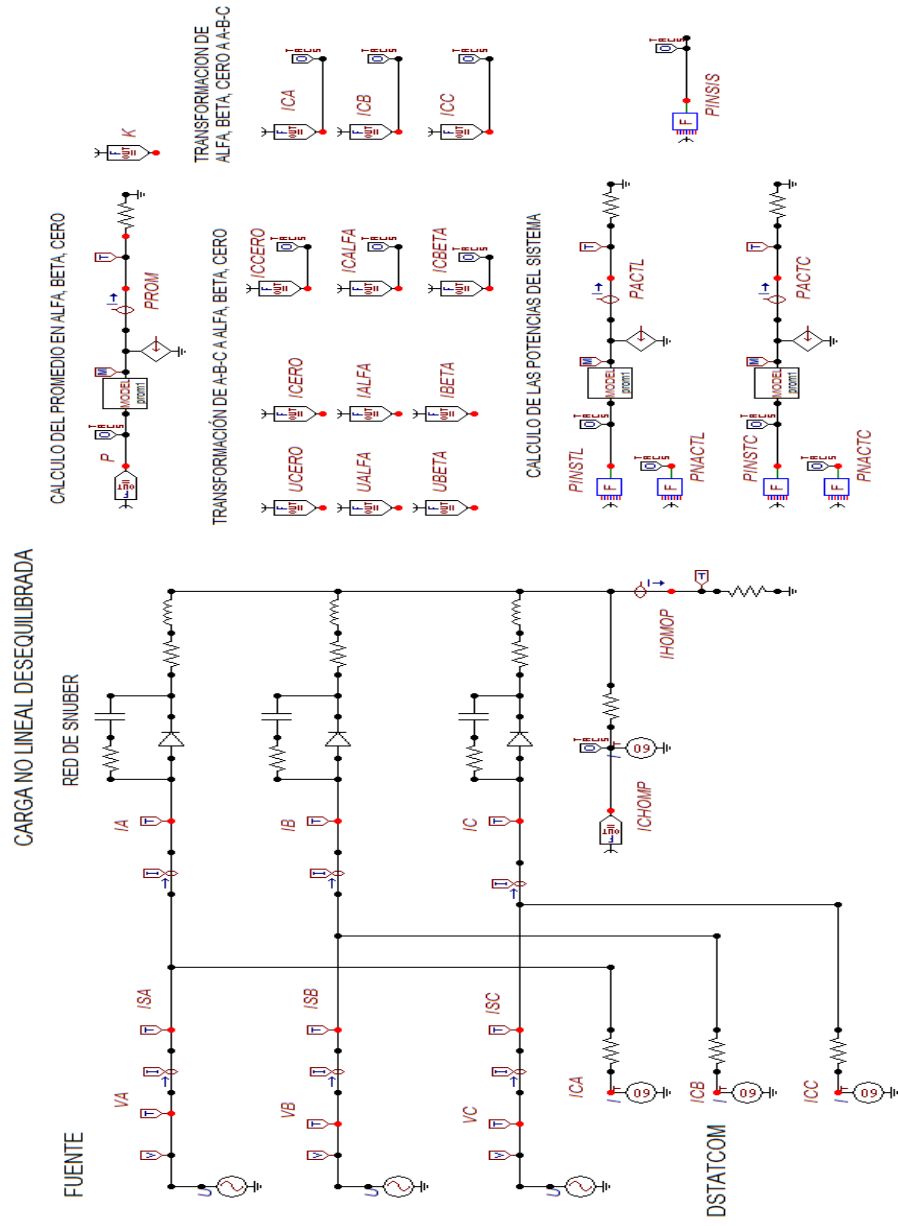
Anexo B

Esquema en ATP del DSTATCOM modo control corriente, caso 3.



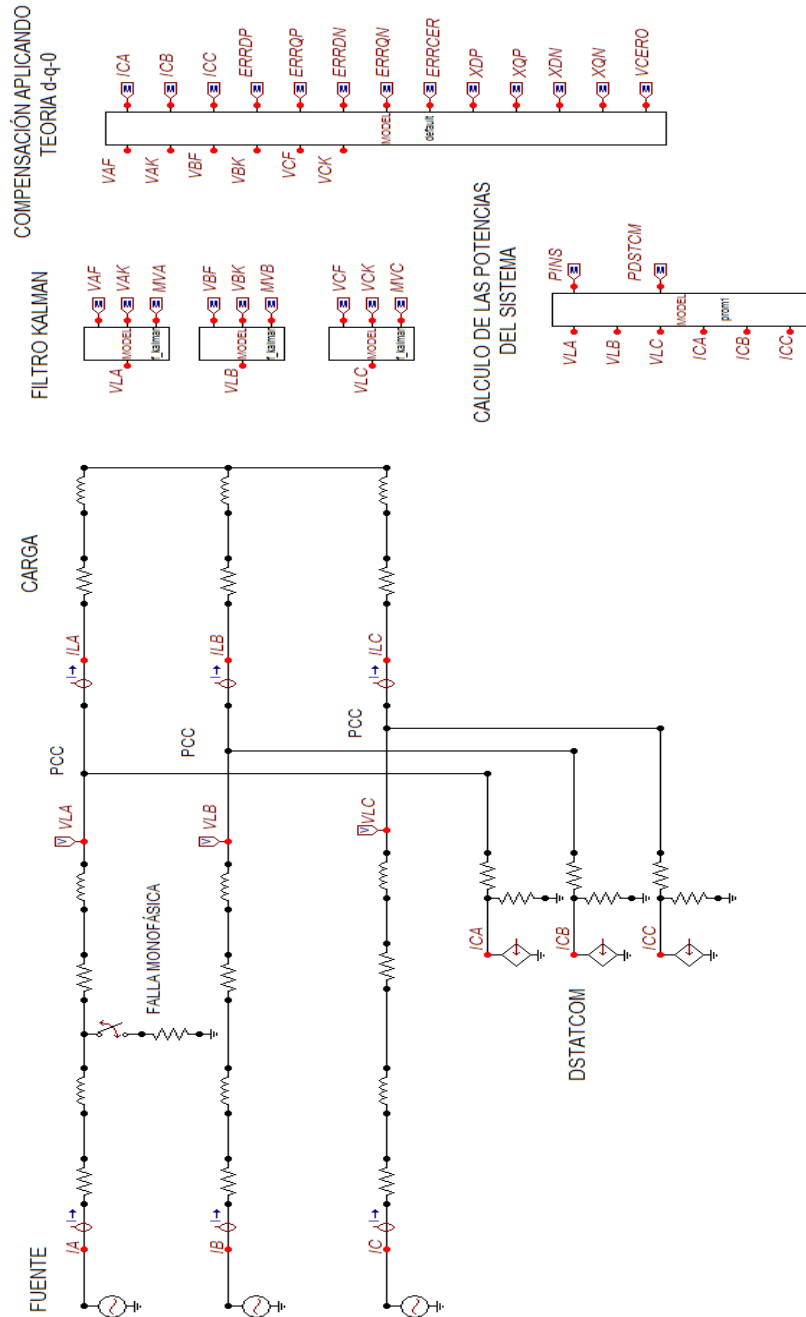
Anexo C

Esquema en ATP del DSTATCOM modo control corriente, caso 4.



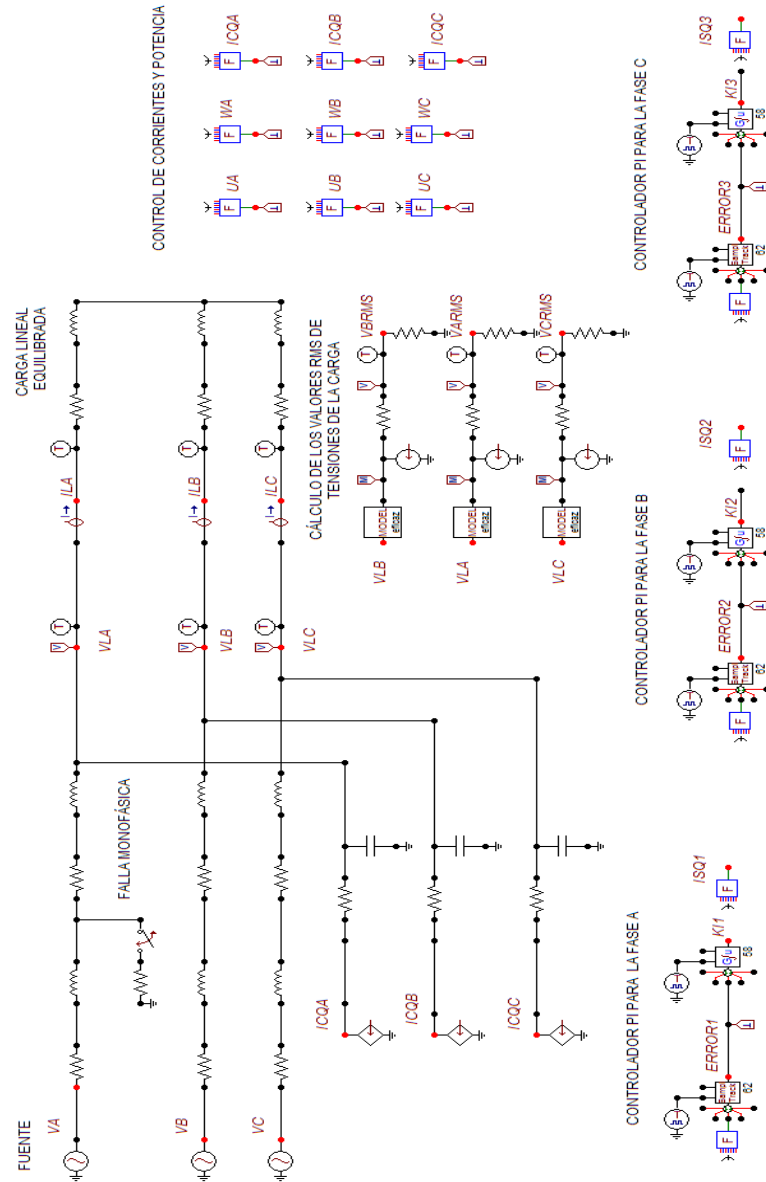
Anexo D

Esquema en ATP del DSTATCOM modo control tensión en el marco $d-q-0$.



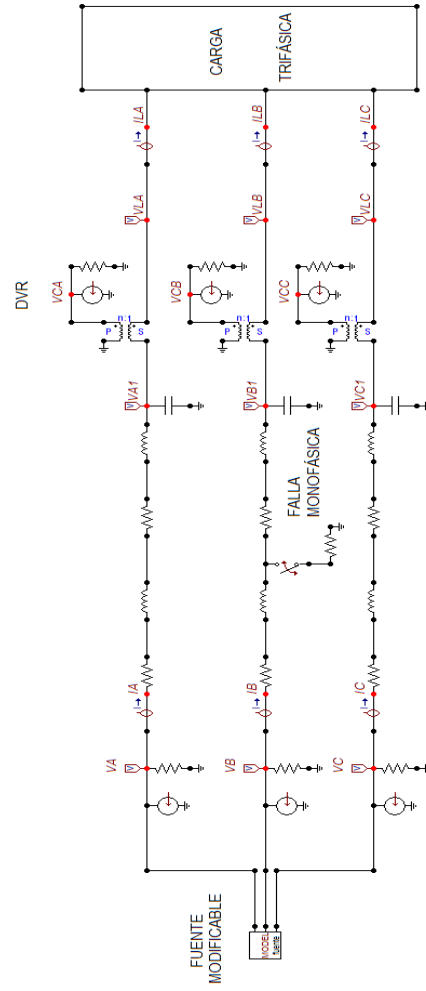
Anexo E

Esquema en ATP del DSTATCOM modo control tensión en el marco *a-b-c*.



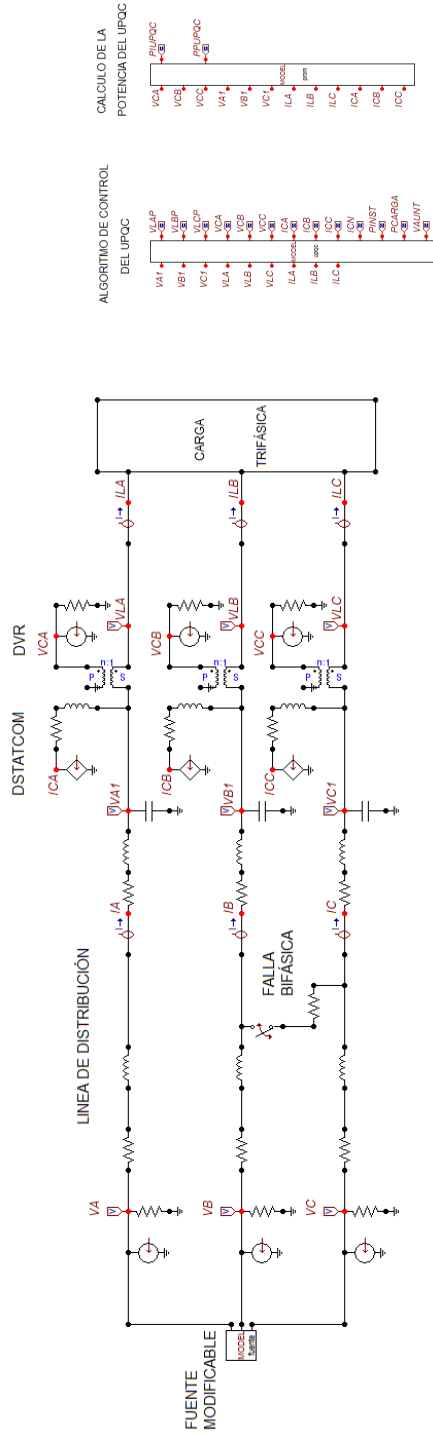
Anexo F

Esquema en ATP del DVR para los casos 1, 2 y 3.



Anexo G

Esquema en ATP del UPQC paralelo izquierdo.



Anexo H

Esquema en ATP del UPQC paralelo derecho.

