

**ANÁLISIS, MODELADO Y CONTROL DE UN COMPENSADOR ESTÁTICO PARA
SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN**

JOSE ALIDES ROMERO CÁRDENAS

MIGUEL ANGEL GÓMEZ GARCÍA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS

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

BUCARAMANGA

COLOMBIA

2010

**ANÁLISIS, MODELADO Y CONTROL DE UN COMPENSADOR ESTÁTICO PARA
SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN**

JOSE ALIDES ROMERO CÁRDENAS

MIGUEL ANGEL GÓMEZ GARCÍA

Trabajo de Grado

Presentado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director: JOHANN FARITH PETIT SUÁREZ

Ingeniero Electricista, Magister en Potencia Eléctrica, PhD

Codirector: MARÍA ALEJANDRA MANTILLA VILLALOBOS

Ingeniera Electrónica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS

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

BUCARAMANGA

COLOMBIA

2010

“Detrás de cada línea de llegada, hay una partida.

Detrás de cada logro, hay otro desafío.

Si extrañas lo que hacías, vuelve a hacerlo.

Sigue aunque todos esperen que abandones.

No dejes que se oxide el hierro que hay en ti”.

AGRADECIMIENTOS

Hoy, tras el camino recorrido para conseguir materializar la idea de ser ingeniero electricista, se ha invertido mucho tiempo y trabajo, junto con una buena cuota de sacrificio que ahora se ve compensado y por esto, con toda seguridad me permito decir que valió la pena.

No puedo decir que fue fácil, pero el apoyo de todas esas personas que creyeron que era posible y hasta los que pensaron que no lo era, fueron el motivo para avanzar y encontrar la fuerza necesaria para llegar hasta el final. Por eso agradezco mucho a todos ellos.

Agradezco a Dios, por llenarme de su energía vital, por darme la capacidad de entendimiento para ver en cada situación difícil una oportunidad de superación y por poner en mi camino a las personas que me han acompañado en esta etapa tan importante de mi vida.

Agradezco especialmente a mis padres Angel de Jesús Gómez y Luz Marina García, mis hermanos Luz Adriana y Mario y demás familiares y amigos que estuvieron ahí en todo momento brindándome su apoyo y comprensión para seguir adelante.

A la Escuela de Ingeniería Eléctrica de nuestra Universidad Industrial de Santander, por el aporte hecho a mi formación personal y por hacer de mi un profesional con las mejores capacidades técnicas y humanas.

A Johann Farith Petit Suárez y María Alejandra Mantilla Villalobos, director y codirectora de este proyecto, quienes siempre tuvieron la mejor disposición para brindar su orientación y sus conocimientos para llevar a buen término este trabajo.

A todos Gracias.

Miguel Angel Gómez García

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por brindarme la oportunidad de lograr esta meta tan anhelada, llegar a ser un ingeniero electricista y que hoy a pesar de los obstáculos e inconvenientes que se han presentado durante este proceso, se convierte en una realidad.

A mis padres Jose Romero Quintero y Argenida Cárdenas por el apoyo y la confianza incondicional que hicieron posible la culminación de mis estudios, gracias por estar ahí a mi lado los quiero mucho.

A mis hermanos Yurladis Romero y Samir Romero por creer que se podía lograr el triunfo.

A mis sobrinas Gisselle, Darcy y Karen. Son unas niñas muy hermosas.

A mi tía Blanca Nuris Quintero por darme el primer impulso para continuar adelante con mi meta.

A todos mis familiares y amigos que de una u otra forma hicieron parte de este logro tan importante para mi vida.

A la Escuela de Ingeniería Eléctrica de nuestra Universidad Industrial de Santander, por el aporte hecho a mi formación personal y por hacer de mi un profesional con las mejores capacidades técnicas y humanas.

A Johann Farith Petit Suárez y María Alejandra Mantilla Villalobos, director y codirectora de este proyecto, quienes siempre tuvieron la mejor disposición para brindar su orientación y sus conocimientos para llevar a buen término este trabajo.

Jose Alides Romero Cárdenas

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	25
1. GENERALIDADES.....	26
1.1 HISTORIA DE LOS DISPOSITIVOS <i>CUSTOM POWER DEVICES</i>	26
1.2 CONCEPTO DE CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	27
1.3 FENÓMENOS ELECTROMAGNÉTICOS	27
1.3.1 <i>Transitorios</i>	30
1.3.1.1 Transitorio tipo impulso	30
1.3.1.2 Transitorios oscilatorios	30
1.3.2 <i>Variaciones de tensión de corta duración</i>	30
1.3.2.1 Interrupción.....	30
1.3.2.2 Huecos de tensión (<i>Sags o Dips</i>).....	30
1.3.2.3 Elevaciones de tensión (<i>Swells</i>).....	31
1.3.3 <i>Variaciones de larga duración</i>	32
1.3.3.1 Interrupción sostenida.....	32
1.3.3.2 Subtensión.....	32
1.3.3.3 Sobretensión.....	32
1.3.4 <i>Desbalance</i>	32
1.3.5 <i>Distorsión de la forma de onda</i>	33
1.3.5.1 Componente de DC	33
1.3.5.2 Distorsión armónica	33
1.3.5.3 Interarmónica.....	34
1.3.5.4 Muesca de tensión (<i>Notch</i>)	34
1.3.5.5 Ruido (<i>Noise</i>).....	34
1.3.5.6 Fluctuación de tensión (<i>Flicker</i>).....	35
1.3.5.7 Variaciones de frecuencia.....	35
1.4 OBJETIVOS DEL PROYECTO	35
1.4.1 <i>Objetivo General</i>	35
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i>	35
2. EL D-STATCOM	36
2.1 OPERACIÓN Y ESTRUCTURA DEL D-STATCOM.....	36
2.1.1 <i>Modos de operación del D-STATCOM</i>	37
2.1.1.1 Modo control de corriente	37
2.1.1.2 Modo control de tensión.....	40
3. ESTRUCTURA Y CONTROL DEL CONVERTIDOR DE POTENCIA DEL D-STATCOM.....	41
3.1 TOPOLOGÍAS DEL CONVERTIDOR DE POTENCIA.....	41
3.2 TÉCNICAS DE CONTROL DEL CONVERTIDOR DE POTENCIA	45
3.2.1 <i>Control proporcional integral (PI)</i>	46
3.2.2 <i>Control predictivo de corriente (Dead-beat)</i>	47
3.2.3 <i>Control por histéresis de corriente</i>	47
3.2.4 <i>Control por modulación delta (MD)</i>	49
3.3 CONTROL DEL BUS DE CONTINUA DEL CONVERTIDOR DE POTENCIA.....	49

4. D-STATCOM EN MODO CORRIENTE	51
4.1 ALGORITMOS PARA CALCULAR LA CORRIENTE DE COMPENSACIÓN DEL D-STATCOM..	51
4.1.1 <i>Teoría de la potencia reactiva instantánea p-q.....</i>	<i>54</i>
4.1.1.1 Teoría p-q trifásica en sistemas de tres hilos	58
4.1.1.2 Teoría p-q con componente homopolar.....	59
4.1.1.3 Teoría p-q modificada	60
4.1.1.4 Teoría d-q	60
4.1.1.5 Teoría p-q-r.....	63
5. D-STATCOM EN MODO TENSIÓN.....	66
5.1 ALGORITMOS DE CONTROL PARA EL CÁLCULO DE LAS CORRIENTES DE COMPENSACIÓN	67
5.1.1 <i>Control de tensión basado en el marco de referencia a-b-c</i>	<i>67</i>
5.1.2 <i>Control de tensión basado en componentes simétricas instantáneas en el</i> <i>marco de referencia d-q-0.....</i>	<i>70</i>
6. SIMULACIONES DE LOS MODELOS DEL D-STATCOM	79
6.1 D-STATCOM EN MODO CONTROL DE CORRIENTE	79
6.1.1 <i>Parámetros del D-STATCOM, estrategias de control y escenarios de</i> <i>compensación</i>	<i>80</i>
6.1.2 <i>Simulaciones del D-STATCOM como compensador de armónicos de corriente</i> <i>.....</i>	<i>80</i>
6.1.2.1 <i>Análisis de las simulaciones.....</i>	<i>82</i>
6.1.3 <i>Simulaciones del D-STATCOM como compensador de reactivos.....</i>	<i>88</i>
6.1.3.1 <i>Análisis de las simulaciones.....</i>	<i>88</i>
6.1.4 <i>Simulaciones del D-STATCOM como compensador de desbalance de carga</i>	<i>93</i>
6.1.4.1 <i>Análisis de las simulaciones.....</i>	<i>94</i>
6.2 D-STATCOM EN EL MODO CONTROL DE TENSIÓN	100
6.2.1 <i>Parámetros del D-STATCOM, estrategias de control y escenarios de</i> <i>compensación</i>	<i>101</i>
6.2.2 <i>Simulación del D-STATCOM como compensador de la regulación de tensión</i> <i>en el PCC.....</i>	<i>102</i>
6.2.3 <i>Simulación del D-STATCOM para la compensación de un hueco de tensión</i> <i>trifásico desequilibrado producido por la conexión de cargas monofásicas</i>	<i>108</i>
6.2.4 <i>Simulación del D-STATCOM para compensar una perturbación de tensión</i> <i>producida por la conexión de una carga monofásica</i>	<i>117</i>
6.2.5 <i>Simulación del D-STATCOM para compensar una perturbación de tensión</i> <i>producida por la conexión de una carga bifásica a tierra</i>	<i>125</i>
6.2.6 <i>Simulación del D-STATCOM para compensar un hueco de tensión producido</i> <i>por la conexión de una carga trifásica balanceada</i>	<i>131</i>
6.3 CAPACIDAD DE COMPENSACIÓN DEL D-STATCOM EN MODO TENSIÓN.	138
7. CONCLUSIONES.....	145
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	150
BIBLIOGRAFÍA.....	154
ANEXOS	155

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación y características típicas de los fenómenos electromagnéticos.....	28
Tabla 2. Distorsión armónica total antes y después de la compensación de armónicos...	87
Tabla 3. Distorsión armónica total antes y después de la compensación de reactivos.....	92
Tabla 4. Factores de desbalance de corriente antes y después de la compensación de carga desbalanceada	96
Tabla 5. Distorsión armónica total antes y después de la compensación de carga desbalanceada	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Hueco de tensión.....	31
Figura 1.2. Elevación de tensión.....	31
Figura 1.3. Desbalance de tensión	33
Figura 1.4. Corriente con componente armónica	34
Figura 2.1. Esquema de la estructura general del D-STATCOM.....	36
Figura 2.2. Esquema monofásico para la compensación de corriente usando el D-STATCOM	38
Figura 2.3. Representación de compensación de armónicos de corriente usando el D-STATCOM	39
Figura 3.1. Topologías de circuitos de potencia de un filtro activo	42
Figura 3.2. Esquema de un inversor de tres ramas en puente completo TLFB (<i>Three-Leg Full-Bridge</i>).....	43
Figura 3.3. Esquema de un inversor de tres ramas con condensador partido TLSC (<i>Three-Leg Split-Capacitor</i>)	44
Figura 3.4. Esquema de un inversor de cuatro ramas en puente completo FLFB (<i>Four-Leg Full-Bridge</i>)	44
Figura 3.5. Esquema de un inversor de tres puentes completos de cuatro hilos TBFW (<i>Three-Bridge Four-Wire</i>).....	45
Figura 3.6. Esquema del control de lazo cerrado del convertidor de potencia.....	46
Figura 3.7. Estructura del control PI.....	47
Figura 3.8. Esquema del control con banda de histéresis.....	48
Figura 3.9. Ejemplo de control con banda de histéresis.....	48
Figura 4.1. Significado físico entre el marco de referencia a-b-c y el marco de referencia $\alpha\text{-}\beta\text{-}0$	55
Figura 4.2. Proyección de un vector espacial de tensiones balanceadas sobre el plano $\alpha\text{-}\beta$	56
Figura 4.3. Recorrido del vector espacial de una señal con armónicos de secuencia negativa vista en el sistema de coordenadas $\alpha\text{-}\beta\text{-}0$	57
Figura 4.4. Recorrido del vector espacial de una señal con armónicos de secuencia cero vista en el sistema de coordenadas $\alpha\text{-}\beta\text{-}0$	57
Figura 4.5. Sistema de coordenadas d-q-0 hallado a partir del sistema de coordenadas $\alpha\text{-}\beta\text{-}0$	61
Figura 5.1. Esquema de un compensador ideal de conexión paralela	66
Figura 5.2. Esquema de control del D-STATCOM en modo tensión en el marco de referencia a-b-c.....	68
Figura 5.3. Representación fasorial de las señales unitarias en fase y en cuadratura con la tensión en el PCC.....	69
Figura 5.4. Esquema de control del D-STATCOM en modo tensión en el marco de referencia d-q-0	70
Figura 6.1. Esquema del D-STATCOM como compensador en modo corriente	79
Figura 6.2. Tensiones y corrientes por fase en el punto de conexión de una carga no lineal	81
Figura 6.3. Espectro en frecuencia de la corriente con armónicos para una carga no lineal.....	81

Figura 6.4. Corrientes para la compensación de armónicos	83
Figura 6.5. Corriente por el neutro durante la compensación de armónicos.....	84
Figura 6.6. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM en la compensación de armónicos	84
Figura 6.7. Potencia instantánea consumida por la carga y entregada por el compensador durante la compensación de armónicos.....	85
Figura 6.8. Espectro en frecuencia de la corriente de la red antes y después de la compensación de armónicos	86
Figura 6.9. Tensiones y corrientes por fase en el punto de conexión de una carga altamente inductiva.....	88
Figura 6.10. Corrientes en la compensación de reactivos.....	89
Figura 6.11. Tensión y corriente en el PCC para la fase A durante la compensación de reactivos	90
Figura 6.12. Corriente por el neutro durante la compensación de reactivos.....	91
Figura 6.13. Potencia consumida por la carga y entregada por el D-STATCOM durante la compensación de reactivos	92
Figura 6.14. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM en la compensación de reactivos	92
Figura 6.15. Tensiones y corrientes por fase en el punto de conexión de una carga desbalanceada	94
Figura 6.16. Corrientes en la compensación de desbalance de carga	95
Figura 6.17. Corrientes de línea antes y después de la compensación del desbalance de carga	96
Figura 6.18. Corriente por el neutro antes y después de la compensación de desbalances de carga	97
Figura 6.19. Potencia instantánea consumida por la carga y entregada por el compensador durante la compensación de desbalance de carga.....	98
Figura 6.20. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM en la compensación de reactivos	99
Figura 6.21. Esquema del D-STATCOM como compensador en modo tensión.....	100
Figura 6.22. Tensiones de fase desbalanceadas sin compensar en el PCC.....	102
Figura 6.23. Tensiones compensadas en el PCC usando m.r. (a-b-c) para mejorar la regulación.....	103
Figura 6.24. Valor RMS de las tensiones compensadas en el PCC usando m.r. (a-b-c) para mejorar la regulación	104
Figura 6.25. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM usando m.r.(a-b-c) para mejorar la regulación	104
Figura 6.26. Corrientes inyectadas por el D-STATCOM usando m.r. (a-b-c) para mejorar la regulación.....	105
Figura 6.27. Potencia trifásica entregada por el D-STATCOM para regular la tensión en el PCC usando m.r. (a-b-c).....	105
Figura 6.28. Tensiones compensadas en el PCC usando m.r.(d-q-0) para mejorar la regulación.....	106
Figura 6.29. Tensiones reguladas por el D-STATCOM vistas en m.r.(d-q-0)	106
Figura 6.30. Valor eficaz de las tensiones en el PCC usando m.r.(d-q-0) para mejorar la regulación.....	107
Figura 6.31. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM usando m.r.(d-q-0) para mejorar la regulación	107

Figura 6.32. Corrientes inyectadas por el D-STATCOM usando m.r. (d-q-0) para mejorar la regulación.....	108
Figura 6.33. Potencia trifásica entregada por el D-STATCOM para regular la tensión en el PCC usando m.r. (d-q-0).....	108
Figura 6.34. Tensiones de fase en el PCC durante un hueco trifásico desequilibrado ...	109
Figura 6.35. Valor eficaz de las tensiones de fase en el PCC durante un hueco trifásico desequilibrado	109
Figura 6.36. Tensiones de fase compensadas por el D-STATCOM durante un hueco trifásico desequilibrado usando m.r.(a-b-c)	110
Figura 6.37. Valor RMS de las tensiones de fase compensadas por el D-STATCOM durante un hueco trifásico desequilibrado usando m.r.(a-b-c).....	110
Figura 6.38. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM usando m.r.(a-b-c) para compensar un hueco trifásico desequilibrado de tensión	111
Figura 6.39. Corrientes de compensación del D-STATCOM durante un hueco trifásico desequilibrado usando m.r.(a-b-c)	111
Figura 6.40. Potencia trifásica entregada por el D-STATCOM para compensar un hueco trifásico desequilibrado de tensión.....	112
Figura 6.41. Componentes de secuencia positiva, negativa y homopolar de las tensiones del PCC durante un hueco trifásico desequilibrado en el m.r.(d-q-0)	112
Figura 6.42. Compensación de tensión en el PCC durante un hueco trifásico desequilibrado, usando m.r.(d-q-0) sin compensar la componente homopolar	113
Figura 6.43. Valor eficaz de las tensiones de fase durante la compensación en el PCC de un hueco trifásico desequilibrado usando m.r.(d-q-0),sin compensar la componente homopolar.....	113
Figura 6.44. Tensiones de secuencia en el PCC durante la compensación de un hueco trifásico desequilibrado vistas en m.r.(d-q-0), sin compensar la componente homopolar	114
Figura 6.45. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM durante la compensación de un hueco trifásico desequilibrado sin compensación de la componente homopolar usando m.r.(d-q-0).....	114
Figura 6.46. Tensiones de fase en el PCC durante la compensación de un hueco trifásico desequilibrado usando m.r.(d-q-0), compensando la componente homopolar	115
Figura 6.47. Valor eficaz de las tensiones de fase compensadas en el PCC durante un hueco trifásico desequilibrado usando m.r.(d-q-0), compensando la componente homopolar.....	115
Figura 6.48. Tensiones de secuencia en el PCC durante la compensación de un hueco trifásico desequilibrado, vistas en m.r.(d-q-0), compensando la componente homopolar.....	116
Figura 6.49. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM durante la compensación de un hueco trifásico desequilibrado usando m.r.(d-q-0), compensando la componente homopolar.....	116
Figura 6.50. Corrientes de compensación del D-STATCOM durante un hueco trifásico desequilibrado usando m.r.(d-q-0), compensando la componente homopolar	117
Figura 6.51. Potencia trifásica entregada por el D-STATCOM, para compensar un hueco trifásico desequilibrado de tensión usando m.r.(d-q-0), compensando la componente homopolar.....	117
Figura 6.52. Perturbación de tensión en el PCC producida por la conexión de una carga monofásica	118

Figura 6.53. Valor RMS de las tensiones en el PCC, durante la perturbación producida por la conexión de una carga monofásica.....	118
Figura 6.54. Tensiones de fase compensadas por el D-STATCOM durante la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(a-b-c)	119
Figura 6.55. Valor RMS de las tensiones de fase durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(a-b-c).....	119
Figura 6.56. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM durante la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(a-b-c).....	120
Figura 6.57. Corriente inyectadas por el D-STATCOM para compensar la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(a-b-c).....	121
Figura 6.58. Potencia entregada por el D-STATCOM durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(a-b-c).....	121
Figura 6.59. Tensiones de secuencia en el PCC durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, vistas en m.r.(d-q-0).....	122
Figura 6.60. Tensiones de fase en el PCC durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(d-q-0).....	122
Figura 6.61. Valor RMS de las tensiones de fase en el PCC durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(d-q-0).....	123
Figura 6.62. Tensiones de secuencia compensadas por el D-STATCOM durante la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, vistas en m.r.(d-q-0).....	123
Figura 6.63. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(d-q-0).....	124
Figura 6.64. Corriente inyectadas por el D-STATCOM para compensar la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(d-q-0).....	124
Figura 6.65. Potencia entregada por el D-STATCOM durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(d-q-0).....	124
Figura 6.66. Perturbación de tensión en el PCC producida por la conexión de una carga bifásica	125
Figura 6.67. Valor RMS de las tensiones en el PCC, durante la perturbación producida por la conexión de una carga bifásica.....	125
Figura 6.68. Tensiones de fase compensadas por el D-STATCOM durante la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga bifásica, usando m.r.(a-b-c)	126
Figura 6.69. Valor RMS de las tensiones de fase durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(a-b-c).....	127
Figura 6.70. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(a-b-c).....	127
Figura 6.71. Corriente inyectadas por el D-STATCOM para compensar la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(a-b-c)	127

Figura 6.72. Potencia entregada por el D-STATCOM durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(a-b-c).....	128
Figura 6.73. Tensiones de secuencia en el PCC durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga bifásica, vistas en m.r.(d-q-0).....	128
Figura 6.74. Tensiones de fase en el PCC durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga bifásica, usando m.r.(d-q-0).....	129
Figura 6.75. Tensiones de secuencia compensadas por el D-STATCOM durante la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga bifásica, vistas en m.r.(d-q-0).....	130
Figura 6.76. Valor eficaz de las tensiones de fase en el PCC durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga bifásica, usando m.r.(d-q-0).....	130
Figura 6.77. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga bifásica, usando m.r.(d-q-0).....	130
Figura 6.78. Corriente inyectadas por el D-STATCOM para compensar la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga bifásica, usando m.r.(d-q-0).....	131
Figura 6.79. Potencia entregada por el D-STATCOM durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga bifásica, usando m.r.(d-q-0).....	131
Figura 6.80. Hueco de tensión en el PCC producido por la conexión de una carga trifásica balanceada.....	132
Figura 6.81. Valor RMS de las tensiones en el PCC, durante el hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada.....	132
Figura 6.82. Tensiones de fase compensadas por el D-STATCOM durante el hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada, usando m.r.(a-b-c).....	133
Figura 6.83. Valor RMS de las tensiones de fase durante la compensación del hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada, usando m.r.(a-b-c).....	133
Figura 6.84. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM durante la compensación del hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada, usando m.r.(a-b-c).....	134
Figura 6.85. Corrientes inyectadas por el D-STATCOM para compensar el hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada, usando m.r.(a-b-c).....	134
Figura 6.86. Potencia entregada por el D-STATCOM durante la compensación del hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada, usando m.r.(a-b-c).....	135
Figura 6.87. Tensiones de secuencia en el PCC durante la compensación del hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada, vistas en m.r.(d-q-0).....	135
Figura 6.88. Tensiones de fase en el PCC durante la compensación del hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada, usando m.r.(d-q-0).....	136
Figura 6.89. Tensiones de secuencia compensadas por el D-STATCOM durante el hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada, vistas en m.r.(d-q-0).....	136

Figura 6.90. Valor eficaz de las tensiones de fase en el PCC durante la compensación del hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada, usando m.r.(d-q-0).....	137
Figura 6.91. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM durante la compensación del hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada, usando m.r.(d-q-0).....	137
Figura 6.92. Corriente inyectadas por el D-STATCOM para compensar el hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada, usando m.r.(d-q-0)	138
Figura 6.93. Potencia entregada por el D-STATCOM durante la compensación del hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada, usando m.r.(d-q-0).....	138
Figura 6.94. Curva de capacidad de compensación del D-STATCOM en modo control de tensión.....	139
Figura 6.95. Equivalente monofásico de Thevenin de una red de distribución	140
Figura 6.96. Equivalente monofásico de la red de distribución con la conexión de una carga adicional	140
Figura 6.97. Tensión en el punto de conexión de la carga antes y después de la conexión de $RC 2$	141
Figura 6.98. Compensador ideal conectado a la red para compensar la tensión en el PCC	141
Figura 6.99. Corriente de compensación y tensión en el PCC antes y después de la compensación.	142
Figura 6.100. Diagrama fasorial de un sistema no compensado por el D-STATCOM	143

ABREVIATURAS

AC	Corriente alterna (<i>Alternating Current</i>)
ATP	Programa de simulación (<i>Alternative Transient Power</i>)
BJT	Transistor de unión bipolar (<i>Bipolar Junction Transistor</i>)
CC ó DC	Corriente directa (<i>Direct Current</i>)
CSI	Inversor tipo fuente de corriente (<i>Current Source Inverter</i>)
DSP	Procesador digital de señales (<i>Digital Signal Processor</i>)
D-STATCOM	Compensador estático de potencia para sistemas de distribución (<i>Distribution Static Compensator</i>)
DVR	Restaurador dinámico de tensión (<i>Dynamic Voltage Restorer</i>)
FLFB	Inversor de cuatro ramas en puente completo (<i>Four-Leg Full-Bridge</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>)
MOSFET	Transistor de efecto de campo basado en la estructura MOS (<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>)
NTC	Norma Técnica Colombiana
PCC	Punto de Conexión Común
PI	Controlador proporcional integral
PWM	Modulación por ancho de pulsos (<i>Pulse Width Modulation</i>)
RMS	Valor eficaz (<i>Root Mean Square</i>)

SCR	Rectificadores de silicio controlado (<i>Silicon Controlled Rectifier</i>)
TBFW	Inversor de tres puentes completos de cuatro hilos (<i>Three-Bridge Four-Wire</i>)
THD	Distorsión armónica total (<i>Total Harmonic Distortion</i>)
TLFB	Inversor de tres ramas en puente completo (<i>Three-Leg Full- Bridge</i>)
TLSC	Inversor de tres ramas con condensador repartido (<i>Three-Leg Split-Capacitor</i>)
UPQC	Acondicionador Unificado de la Calidad de la Energía (<i>Unified Power Flow Controller</i>)
VA	Voltio-Amperio (<i>Volt-Ampere</i>)
VSI	Inversor tipo fuente de Tensión (<i>Voltage Source Inverter</i>)

SIMBOLOGÍA

f	Frecuencia
T	Periodo
C	Capacitor del bus DC
L	Inductancia de acople
K	Kilo
Δ	Delta o cambio de una señal
δ	Angulo de desfase
XL	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\ $	Norma euclidiana de la tensión
i_{perd}	Corriente de pérdidas
V_{dc}	Tensión promedio del bus de DC
V_{dcr}	Tensión de referencia del bus de DC
$v_{a,b,c}$	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

i_{sdr}	Corriente de referencia directa
i_{sqr}	Corriente de referencia en cuadratura
$A_{\alpha\beta 0}$	Matriz de transformación de Clarke
B	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 $d - q - 0$
$i_{p,q,r}$	Corrientes de línea en $p - q - r$
$p_{3\phi}$	Potencia activa trifásica
p	Potencia activa instantánea
q	Potencia reactiva instantánea
p_0	Potencia de secuencia cero
\bar{x}	Cantidad correspondiente a la parte DC
\tilde{x}	Cantidad correspondiente a la parte oscilatoria

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS, MODELADO Y CONTROL DE UN COMPENSADOR ESTÁTICO PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN*

AUTORES: Jose Alides Romero Cárdenas**

Miguel Angel Gómez García**

PALABRAS CLAVES: calidad de la energía eléctrica, compensación, control por histéresis, control proporcional-integral (PI), desbalance, distorsión armónica, factor de potencia, perturbaciones, teoría de la potencia reactiva instantánea p-q.

DESCRIPCIÓN:

El presente trabajo, está centrado en el análisis y control del Compensador Estático para Sistemas de Distribución (D-STATCOM, *Distribution Static Compensator*), el cual es un compensador de conexión paralela con la red, que hace parte de la familia *Custom Power Devices*. El D-STATCOM es un dispositivo constituido principalmente por una fuente VSI, un elemento inductivo de acople con la red y los algoritmos de control.

El D-STATCOM puede operar en modo control de corriente y en modo control de tensión. En sus dos modos de operación, las secuencias de conmutación de los transistores en el inversor, son generadas por medio de un control de histéresis por corriente, mientras que la tensión en el bus de DC es regulada por medio de un control PI. Las señales de referencia para generar las corrientes de compensación en el modo control de corriente, son calculadas aplicando las teorías p-q, p-q modificada, d-q y p-q-r; mientras que en el modo control de tensión, se usan dos algoritmos basados en controladores PI, los cuales trabajan con el error en el valor de la amplitud de las tensiones de fase; y en la extracción de componentes simétricas de secuencia en tensión, transformadas al marco de referencia síncrono d-q-0.

Los resultados presentados, se obtienen implementado los modelos del D-STATCOM en la herramienta de simulación ATP (*Alternative Transient Program*). Entonces, se evalúa el funcionamiento del compensador frente a diferentes perturbaciones que se presentan en los sistemas de distribución eléctrica en relación con las señales de corriente y tensión para algún punto de interés de la red. Las perturbaciones que se tuvieron en cuenta fueron armónicos, desbalance y factor de potencia en el modo control de corriente, y en el modo control de tensión, regulación, desbalance, huecos y elevaciones 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: ANALYSIS, MODELLING AND CONTROL OF A DISTRIBUTION STATIC COMPENSATOR (D-STATCOM) *

AUTHORS: Jose Alides Romero Cárdenas**

Miguel Angel Gómez García**

KEY WORDS: electric energy quality, compensation, harmonic components, compensation, sequence components, control by hysteresis, proportional and integral control (PI), power factor, perturbations, non active power, theory of instantaneous reactive power p-q.

DESCRIPTION:

The work presented focuses on the analysis and control of D-STATCOM (*Distribution Static Compensator*). This is a compensator of a parallel connection with the network and is part of the Custom Power Devices. The D-STATCOM is a device that consist chiefly of a VSI source, a coupling inductive element with the network and the control algorithms.

The D-STATCOM can works in current control mode and in voltage control mode. In both operation modes, the switching sequence on the inverter transistors is generated by a current-hysteresis control, while the bus voltage of DC is regulated by a PI control. The reference signals for generating compensation currents in the current control mode are calculated using the theories p-q, p-q amended, d-q and p-q-r. While in the voltage control mode, are used two algorithms; one of them is based on the maximun value of the phase voltage and the other one is based in the symmetrical sequence voltage components which are transformed to d-q-0 synchronous reference frame.

Results presented, are achieved using the D-STATCOM model which have been made on ATP (Alternative Transient Program) simulation platform. The performance of the compensator is tried to correct different perturbations that occur in the electric distribution systems that are related with the current and voltage signals for some interest point on the distribution network. The perturbations which have been used are harmonics, unbalance and power factor in current control mode, while in voltage control mode was used regulation, unbalance, sags and swells in voltage.

* Degree Project.

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

INTRODUCCIÓN

Las redes de distribución de energía eléctrica pueden ser afectadas por diversas perturbaciones tanto en las señales de corriente como en las señales de tensión. Estas perturbaciones afectan directamente la calidad de la energía eléctrica y ocasionan pérdidas técnicas y económicas tanto para el sector eléctrico como para los usuarios del sistema. Los problemas que afectan la calidad de la energía eléctrica se originan por diferentes causas, como la masiva utilización de cargas no lineales, cargas inductivas considerables, cargas desbalanceadas, cargas con consumo discontinuo de energía, conexión y desconexión de cargas de alto impacto sobre la red, fallas que pueden presentarse a lo largo del sistema de distribución, entre otros [1, 6, 17].

Por otro lado, durante los últimos años, la idea de usar sistemas de generación distribuida, se muestra como una opción viable ante los requerimientos de energía cada vez mayores para usuarios comerciales y domésticos. Estos sistemas podrían presentar inconvenientes de estabilidad y no garantizar por si mismos calidad en la regulación del servicio [26].

Con el propósito de mitigar en gran medida estas perturbaciones que se presentan en las redes de distribución, se buscan alternativas de solución, que aporten al mejoramiento de la calidad de la energía que se transporta. Como resultado de esta búsqueda, se han desarrollado dispositivos de compensación, entre los que se destacan los llamados *Custom Power Devices* [1].

Uno de los dispositivos *Custom Power*, es el D-STATCOM, el cual es un dispositivo de conexión paralela, que utiliza tecnología basada en electrónica de potencia y es el compensador de interés en este trabajo.

Dentro de las opciones de compensación que el D-STATCOM puede ofrecer, se encuentran distorsión armónica, desequilibrio de cargas, y corrección del factor de potencia; y perturbaciones en la tensión como huecos y elevaciones de tensión, e inconvenientes de regulación de tensión en el PCC [1, 8, 10, 12, 22].

Con base en lo anterior, se ha planteado el presente trabajo de grado, en donde se pretende afianzar el conocimiento sobre las opciones de compensación y el funcionamiento del D-STATCOM; el cual, actualmente se presenta como una tecnología vanguardista, pero que a futuro, muy seguramente hará parte de los sistemas de distribución.

Para la realización de este proyecto se usa la interfaz gráfica ATPDraw del programa ATP; el cual es un recurso informático de uso libre y cuya aplicación como simulador de sistemas de distribución de potencia, permite hacer un análisis apropiado del D-STATCOM.

Capítulo 1

En éste capítulo, se hace una breve reseña de los Custom Power Devices, se introduce el concepto de calidad de la energía y se definen algunas de las perturbaciones más comunes que afectan la calidad de la energía eléctrica en las redes de distribución. De igual manera, se presentan los objetivos a cumplir en el desarrollo del presente trabajo.

1. Generalidades

1.1 Historia de los dispositivos *Custom Power Devices*

El concepto de *Custom Power* fue conocido primero por un grupo especializado de ingenieros en 1988. Tres años después, fue introducido por los expertos de la industria del *Electric Power Research Institute Custom Power Workshop* en San Diego, California. Sin embargo solo hasta 1995, el desarrollo de la tecnología permitió su implementación [29].

El concepto de *Custom Power* se aplica a los dispositivos basados en tecnologías de estado sólido que tienen como finalidad mantener un buen nivel en la calidad de la energía eléctrica que se transporta y la confiabilidad en los sistemas de distribución. Las tecnologías que han hecho posible este tipo de dispositivos, principalmente son: el desarrollo de nuevos semiconductores controlables (GTO, IGBT, MCT), y la aparición de medios de almacenamiento de energía más eficientes (condensadores de alta capacidad, nuevas baterías, bobinas superconductoras, almacenamiento inercial). A esto habría que añadir los avances en el campo de micro-controladores y procesadores de señales [29].

Los *Custom Power* pueden clasificarse en dispositivos de tipo reconfiguración y de tipo compensación. Dentro de los de tipo reconfiguración se incluyen: el Limitador de Corriente de Estado Sólido (SSCL, *Solid State Current Limiter*), el Interruptor de Estado Sólido (SSB, *Solid State Breaking*), y el Interruptor de Transferencia de Estado Sólido (SSTS, *Solid State Transfer Switch*). En los de tipo compensación están: el Acondicionador Dinámico de Tensión (DVR, *Dynamic Voltage Restorer*), el Compensador Estático de Potencia para Sistema de Distribución (D-STATCOM, *Distribution Static Compensator*), y el Acondicionador Unificado de la Calidad de la Energía (UPQC, *Unified Power Quality Conditioner*) [1].

Con respecto a los dispositivos de tipo compensación, estos son una alternativa viable para mejorar el flujo de potencia en el punto de conexión que se desee. Estos pueden ser colocados para regular las corrientes y tensiones del sistema de distribución o de una carga específica o en un parque comercial o industrial. Con ellos se pueden mejorar la calidad de la energía, lo cual incluye:

- Mitigación de huecos y/o elevaciones de tensión.
- Reducción del nivel de armónicos en las tensiones y corrientes del sistema.
- Corrección del factor de potencia

- Disminución de los desbalances, tanto de corriente como de tensión, entre otros.

1.2 Concepto de calidad de la energía eléctrica

“La calidad de la energía eléctrica es el conjunto de características físicas de las señales de tensión y corriente, para un tiempo y lugar determinados, que tienen el propósito de satisfacer la necesidades del cliente” [32].

La calidad de la energía se ve afectada por las perturbaciones que ocurren en el sistema eléctrico; las cuales son causadas por fallas, elementos no lineales, descargas atmosféricas y/o por las cargas dinámicas de maniobra y operaciones en el sistema, entre otros. Por tal motivo, se requiere un tratamiento integral del problema, en donde se involucre investigación, diseño, operación, mantenimiento de equipos, compensación, normalización, medición, capacitación de personal [13].

La calidad del servicio de energía eléctrica se divide en tres aspectos:

- 🍏 Continuidad del suministro: se mide por el número y la duración de las interrupciones del servicio.
- 🍏 Calidad de atención comercial al cliente: se refleja en la capacidad de atención al cliente y en el suministro de información oportuna.
- 🍏 Calidad de la energía eléctrica: se evalúan principalmente los parámetros o características de las señales eléctricas.

El trabajo que se presenta, tiene en cuenta este último ítem, para lo cual se busca que mediante el uso del D-STATCOM, las señales de corriente y tensión tengan las características que se presentan a continuación [16]:

- 🍏 Forma de onda: es la forma característica de una señal en el dominio de tiempo. La forma de onda ideal en los sistemas de distribución AC es la señal sinusoidal.
- 🍏 Fase: es la parte constante del argumento de una señal sinusoidal.
- 🍏 Amplitud de la onda: la amplitud de una onda sinusoidal es el valor máximo, tanto positivo como negativo, que puede llegar a adquirir la onda senoide.
- 🍏 Frecuencia de la onda: la frecuencia (f) del movimiento ondulatorio se define como el número de oscilaciones completas o ciclos por segundo ($f=1/T$).

1.3 Fenómenos electromagnéticos

Según la Norma IEEE Estándar 1159 de 1995 los fenómenos electromagnéticos pueden ser de tres tipos:

- 🍏 Variaciones en el valor RMS de la tensión o la corriente.
- 🍏 Perturbaciones de carácter transitorio.

🍏 Deformaciones en la forma de onda.

La Tabla 1 muestra un resumen de las características típicas de los fenómenos electromagnéticos.

Tabla 1. Clasificación y características típicas de los fenómenos electromagnéticos

CATEGORÍAS	CONTENIDO ESPECTRAL	DURACIÓN	MAGNITUD DE TENSIÓN
TRANSITORIOS			
IMPULSIVOS			
Nanosegundos	5 ns de pendiente	< 50 ns	
Microsegundos	1 μ s de pendiente	50 ns – 1 ms	
Milisegundos	0.1 ms de pendiente	> 1 ms	
OSCILATORIOS			
Baja Frecuencia	< 5 kHz	0.3 – 50 ms	0 – 4 pu
Media Frecuencia	5 – 500 kHz	20 μ s	0 – 8 pu
Alta Frecuencia	0.5 – 5 MHz	5 μ s	0 – 4 pu
VARIACIONES DE CORTA DURACIÓN			
INSTANTÁNEAS			
Huecos		0.5 – 30 ciclos	0.1 – 0.9 pu
Elevaciones		0.5 – 30 ciclos	1.1 – 1.8 pu
MOMENTÁNEAS			
Interrupciones		0.5 ciclos – 3 s	< 0.1 pu
Huecos		30 ciclos – 3 s	0.1 a 0.9 pu
Elevaciones		30 ciclos – 3 s	1.1 – 1.4 pu
TEMPORALES			
Interrupciones		3 s – 1 min	< 0.1 pu
Huecos		3 s – 1 min	0.1 - 0.9 pu
Elevaciones		3 s – 1 min	1.1 – 1.2 pu
VARIACIONES DE LARGA DURACIÓN			
Interrupciones sostenidas		>1 min	0.0 pu
Baja tensión		>1 min	0.8 – 0.9 pu
Sobretensión		>1 min	1.1 – 1.2 pu

DESBALANCE DE TENSIÓN		Estado Estable	0.5- 2%
DISTORSIÓN DE FORMA DE ONDA			
Componente de DC		Estado Estable	0 – 0.1%
Armónicos	0 – 100 H	Estado Estable	0 – 20%
Interarmónicos	0 – 6 kHz	Estado Estable	0 – 2%
Muesca		Estado Estable	
Ruido	Banda – ancha	Estado Estable	0 – 1 %
FLUCTUACIONES	<25 Hz	Intermitente	0.1 – 7%
VARIACIONES DE FRECUENCIA		<10 s	

Tomado de la Norma IEEE Estándar 1159 de 1995

Las perturbaciones que afectan la calidad de la energía eléctrica se pueden clasificar en dos categorías: perturbaciones o variaciones en estado estacionario y perturbaciones no repetitivas o transitorias.

Las perturbaciones en estado estacionario son “fenómenos de carácter permanente, o que se extiende a lapsos bien definidos que desde el punto de vista de los fenómenos que se estudian, pueden considerarse como permanentes. Estas perturbaciones tienen, en su mayoría, origen en el funcionamiento de ciertos equipos localizados normalmente en la instalación del usuario” (Arriola, 1989). Como eventos en estado estacionario se cuentan: la variación de frecuencia, el desbalance entre fases, los armónicos, las muescas de tensión (*notching*) y las fluctuaciones de tensión (*flicker*). Algunas de estas perturbaciones de estado estacionario pueden ser causadas por ejemplo por la conexión de cargas monofásicas, cargas no lineales, motores de inducción, hornos de arco, entre otros.

Las perturbaciones no repetitivas o transitorias son “fenómenos aleatorios pasajeros que tienen su origen tanto en los elementos de la red eléctrica, como en la propia instalación del usuario. La consecuencia típica de estas perturbaciones es una caída de tensión transitoria, y en ocasiones un corte más o menos prolongado en algunas zonas de la red. Las causas típicas de estas perturbaciones son los rayos, las maniobras en alta tensión, las variaciones bruscas de cargas y los cortocircuitos” (Arriola, 1989). Como eventos no repetitivos o transitorios se tienen: las interrupciones, los huecos de tensión (*sags*), las sobretensiones de corta duración (*swells*) y los transitorios [5, 14]. Algunas de estas perturbaciones pueden tener origen en la conexión y desconexión de bancos de capacitores, arranques de motores de inducción, fenómenos atmosféricos, operaciones de maniobra, entre otros.

A continuación, se realiza una breve descripción de algunas de las perturbaciones que afectan la calidad de la tensión en los sistemas de distribución.

1.3.1 Transitorios

Son eventos de naturaleza momentánea en las señales de tensión o de corriente. Estos tienen variaciones de muy corta duración, para un intervalo de tiempo inferior a 1 ciclo.

1.3.1.1 Transitorio tipo impulso

Son perturbaciones que cambian bruscamente la amplitud de las señales de tensión y/o corriente. Se caracterizan por mostrar una amplitud elevada, polaridad unidireccional y frecuencia diferente a la del sistema. Ocurren de forma esporádica y tienen tiempos de subida y caída extremadamente pequeños, del orden de los microsegundos y milisegundos (inferior a 2 ms) [13, 14].

1.3.1.2 Transitorios oscilatorios

Son perturbaciones que producen rápidas variaciones en el valor instantáneo de las señales de tensión y/o corriente. Se presentan a una frecuencia diferente a la del sistema y tienen polaridad tanto positiva como negativa. Se describen por su contenido espectral, tiempo de duración y magnitud. Además, dependiendo de su frecuencia se clasifican como: transitorios de alta frecuencia (superior a 500 kHz y una duración típica medida en microsegundos), media frecuencia (entre 5 kHz y 500 kHz) y baja frecuencia (inferior a 5 kHz) y una duración de 0.3 ms a 50 ms [13, 14].

1.3.2 Variaciones de tensión de corta duración

La variación de corta duración está definida como la desviación del valor eficaz de la onda de tensión con respecto a su valor nominal, para un lapso de tiempo superior a 0,5 ciclos e inferior o igual a 1 minuto [13, 14]. Según el tiempo de duración y la caída de tensión, se pueden clasificar en:

1.3.2.1 Interrupción

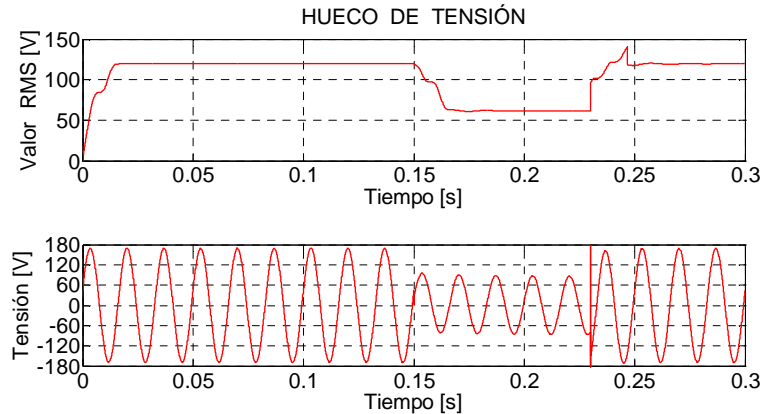
Una interrupción se define como la pérdida total de tensión o corriente. Según el tiempo de duración se clasifican como momentánea (0.5 ciclos a 3 segundos), temporal (3 segundos a 1 minuto) [13, 14].

1.3.2.2 Huecos de tensión (*Sags o Dips*)

El hueco de tensión se define como la disminución brusca del valor eficaz de la tensión de alimentación, a un valor entre un 90% y un 10% de la tensión nominal en las fases de la red eléctrica, seguida de una recuperación después de un corto periodo de tiempo. El tiempo de duración de un hueco puede estar entre 0.5 ciclos y 1 minuto. Los huecos de

tensión son causados generalmente por cortocircuitos o por arranque de grandes motores [13, 14]. La figura 1.1, muestra la ocurrencia de un hueco de tensión.

Figura 1.1. Hueco de tensión

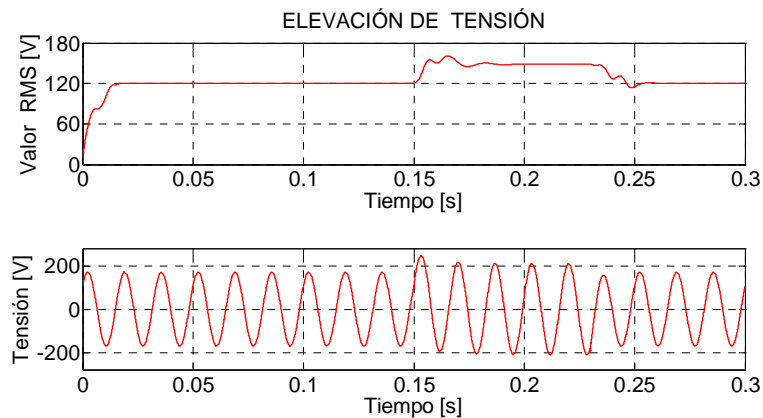


Fuente: Norma IEEE Estándar 1159 de 1995

1.3.2.3 Elevaciones de tensión (Swells)

Una elevación de tensión se define como un aumento del valor eficaz de la tensión o la corriente entre 110% y 180% de la tensión nominal con una duración comprendida entre 0.5 ciclos y 1 minuto. En el caso de las elevaciones de tensión, estas son producidas por las conexiones neutras de alta impedancia, las desconexiones de grandes cargas, la energización de grandes bancos de capacitores y por fallas monofásicas sobre un sistema trifásico [13, 14]. Una elevación de tensión es mostrada en la figura 1.2

Figura 1.2. Elevación de tensión



Fuente: Norma IEEE Estándar 1159 de 1995

1.3.3 Variaciones de larga duración

Son desviaciones del valor eficaz de la tensión, a partir de la tensión nominal, que ocurren con una duración superior a un minuto. Generalmente, estas desviaciones se originan por variaciones de carga y por operaciones de reconexión en el sistema.

1.3.3.1 Interrupción sostenida

Se define como la pérdida total de la tensión o corriente de alimentación por un período superior a un minuto. Este tipo de interrupciones son normalmente permanentes y requieren de intervención manual para restablecer el sistema [13, 14].

1.3.3.2 Subtensión

Son bajadas de la tensión entre el 80% y el 90% de su valor nominal durante más de un minuto. La expresión “baja de tensión” ha sido utilizada comúnmente para describir este problema, y ha sido reemplazada por el término subtensión. Las subtensiones pueden crear el sobrecalentamiento de motores, y pueden conducir a la falla de cargas no lineales como fuente de alimentación de computadoras [13, 14].

1.3.3.3 Sobretensión

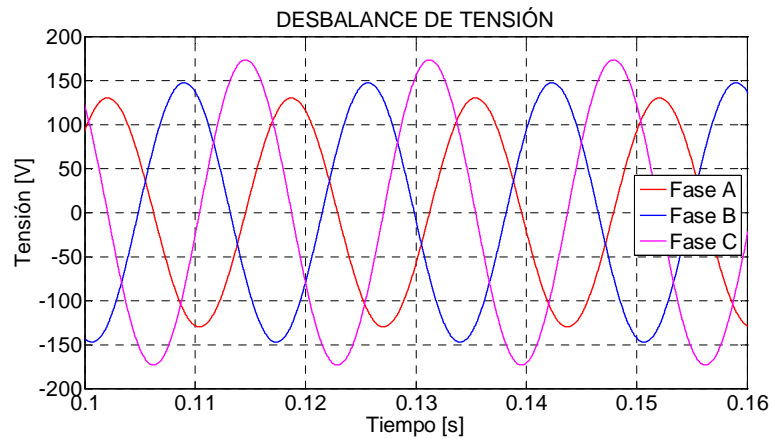
La sobretensión puede considerarse un aumento de tensión prolongado (mayor a un minuto), suele estar entre el 110% y el 120% de su valor nominal. Las sobretensiones suelen ser debidas a la desconexión de grandes cargas, o fallos en la regulación de la tensión [13, 14].

1.3.4 Desbalance

En un sistema trifásico, es una condición en la cual los valores eficaces de las tensiones y/o corrientes de fase o los ángulos entre fases consecutivas no son iguales. Está ligado a la aparición de componentes de secuencia negativa y/o homopolar en las tensiones y/o corrientes de red. Una condición de desbalance de tensión se muestra en la figura 1.3.

El desbalance de tensión y corriente, a la frecuencia fundamental, es definido como la relación entre la componente de secuencia cero ó de secuencia negativa con respecto a la componente de secuencia positiva. Este tipo de perturbación suele presentarse por la conexión de cargas monofásicas en sistemas trifásicos, a la desconexión de una fase en un banco de condensadores, a transformadores conectados en delta abierto y fallas de aislamiento en conductores no detectadas [13, 14].

Figura 1.3. Desbalance de tensión



Fuente: Norma IEEE Estándar 1159 de 1995

1.3.5 Distorsión de la forma de onda

La distorsión armónica es la desviación en el comportamiento estable de la forma de onda idealmente sinusoidal de tensión o corriente, a causa de componentes armónicas de la frecuencia fundamental del sistema de potencia.

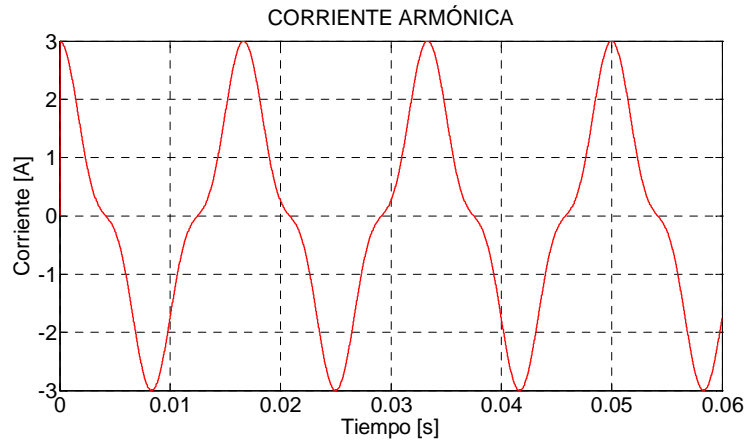
1.3.5.1 Componente de DC

Cuando se presenta una tensión o corriente directa (DC) en un sistema de corriente alterna (AC) de potencia se conoce como componente de DC (DC offset). Esto puede ocurrir debido al efecto de la rectificación de media onda, extensores de vida o controladores de luces incandescentes [16].

1.3.5.2 Distorsión armónica

Es la distorsión (periódica) de la forma de onda sinusoidal de tensión o corriente. 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. Los armónicos que distorsionan la onda tienen frecuencias que son múltiplo integral de la frecuencia fundamental del sistema. Esta es causada por la operación de equipos no lineales, hornos de arco eléctrico y fuentes conmutadas [16]. La figura 1.4, ilustra el efecto de la presencia de armónicos en una señal de corriente.

Figura 1.4. Corriente con componente armónica



Fuente: [16]

1.3.5.3 Interarmónicos

Los interarmónicos son tensiones o corrientes cuyas frecuencias son múltiplos no enteros de la frecuencia fundamental de suministro. La distorsión que aparece en la forma de onda, se manifiesta como un parpadeo que se percibe visualmente en monitores y luces incandescentes y además puede causar calentamiento e interferencia en las comunicaciones [16].

1.3.5.4 Muesca de tensión (*Notch*)

Es una perturbación periódica que afecta el valor instantáneo de las señales de tensión. Tiene una duración menor a medio ciclo, y se presenta como sobrepicos de polaridad opuesta a la forma de onda normal, siendo por lo tanto una perturbación substractiva en términos de la amplitud. Generalmente, se presenta por la conmutación de la corriente entre fases de alimentación de equipos electrónicos de potencia [16].

1.3.5.5 Ruido (*Noise*)

Se considera como ruido a las señales eléctricas no deseadas con un contenido espectral inferior a 200 kHz superpuesto a la tensión o a la corriente del sistema en los conductores de las fases o en los conductores neutros. Por lo tanto estos producen efectos indeseables en los circuitos de control de los equipos electrónico sensibles. Estas señales pueden ser causadas por dispositivos de electrónica de potencia, circuitos de control, equipo de arco, cargas con rectificadores de estado sólido y fuentes conmutadas [16].

1.3.5.6 Fluctuación de tensión (*Flicker*)

La fluctuación de tensión es una variación sistemática de la envolvente de la tensión, o una serie de cambios aleatorios de tensión de pequeñas dimensiones, concretamente entre 0.1% y 7% del valor nominal a una frecuencia baja, en general por debajo de 25 Hz.

El término flicker se deriva del impacto de las fluctuaciones de tensión en las lámparas al ser percibidas por el ojo humano como titilaciones.

1.3.5.7 Variaciones de frecuencia

Son variaciones por encima o por debajo del valor nominal de la frecuencia en las señales de tensión o corriente. No es un evento muy común, sin embargo puede presentarse por la interconexión de centros de generación de energía eléctrica, o en centros con generación aislada de tensión.

1.4 Objetivos del proyecto

1.4.1 Objetivo General

Analizar y evaluar el funcionamiento de un Compensador Estático para Sistemas de Distribución (D-STATCOM, Distribution Static Compensator) como compensador de perturbaciones que afectan a la calidad de la energía eléctrica.

1.4.2 Objetivos Específicos

Para el cumplimiento del objetivo general del proyecto se requiere lo siguiente:

- Describir técnicas de control utilizadas por el D-STATCOM para la obtención de la señal de referencia, el control del nivel de continua y del inversor de potencia.
- Analizar mediante simulaciones el funcionamiento del D-STATCOM, considerando la etapa de potencia y el sistema de control de este dispositivo.
- Determinar mediante simulaciones las opciones de compensación que ofrece el D-STATCOM.

Capítulo 2

En este capítulo se presenta el D-STATCOM, abordando de manera descriptiva su estructura general y los principios que rigen sus modos de operación como compensador de perturbaciones en las redes de distribución.

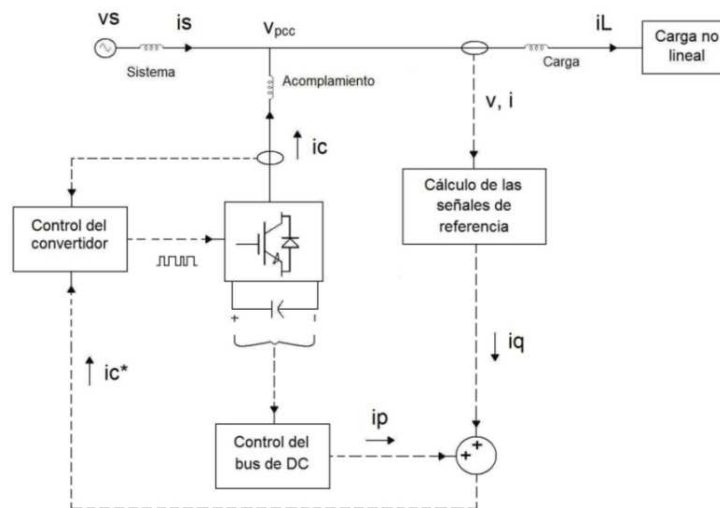
2. EL D-STATCOM

El D-STATCOM, acrónimo de *Distribution Static Compensator*, es un dispositivo de conexión paralela al sistema distribución o a una carga de interés, el cual tiene la capacidad de compensar perturbaciones que pueden presentarse en las señales de tensión y/o corriente de la red eléctrica. La compensación se realiza con la inyección controlada de corrientes a la red, calculadas mediante el uso de algoritmos de control y sintetizadas por un convertidor de potencia.

2.1 Operación y estructura del D-STATCOM

El D-STATCOM puede ser usado como compensador en modo corriente o compensador en modo tensión, dependiendo de la clase de perturbaciones que se desee corregir [1]. En sus dos modos de operación se usa un convertidor de potencia, que actúa como una fuente de corriente que inyecta energía no activa de forma controlada a la red de distribución. La estructura general del D-STATCOM, incluyendo los lazos de control, se presenta en la figura 2.1

Figura 2.1. Esquema de la estructura general del D-STATCOM



El intercambio de energía entre el D-STATCOM y la red, se determina por tres lazos de control, los cuales se encargan de calcular las señales de referencia para las corrientes de compensación, generar las secuencias de conmutación para el convertidor y mantener la tensión necesaria en el bus de DC [1, 13, 22], según se muestra en la figura. Por su parte, el convertidor está constituido por una configuración de interruptores electrónicos gobernados por un control que genera la secuencia de conmutación de los mismos. La topología del convertidor corresponde a un inversor de potencia, el cual es un dispositivo que convierte una señal eléctrica en DC a otra señal en AC [19].

De acuerdo a la figura 2.1, la señal de referencia i_q , calculada a partir de la tensión y/o corriente de la red, junto con la señal de control de la tensión del bus de DC i_p , conforman la señal de compensación de referencia i_c^* ; esta señal se alimenta al control del convertidor para generar la secuencia de conmutación en el inversor que produce la corriente de compensación inyectada a la red i_c [12].

La energía requerida para generar las corrientes de compensación, es almacenada en un condensador, que se carga hasta un valor de tensión de referencia definido por un control en lazo cerrado que determina la tensión del bus de DC del convertidor.

El inversor es conectado a la red generalmente por medio de un filtro de primer orden, el cual atenúa las componentes de alta frecuencia debidas a la conmutación de los transistores.

2.1.1 Modos de operación del D-STATCOM

El D-STATCOM conectado a un sistema de distribución, puede inyectar por cada una de sus ramas de compensación, corrientes que mejoran la calidad de la energía frente a problemas relacionados con desbalances, distorsiones y/o factor de potencia en la corriente de carga; o perturbaciones en la tensión, tales como problemas de regulación, desbalances, huecos y elevaciones de tensión en el punto de conexión [1, 13].

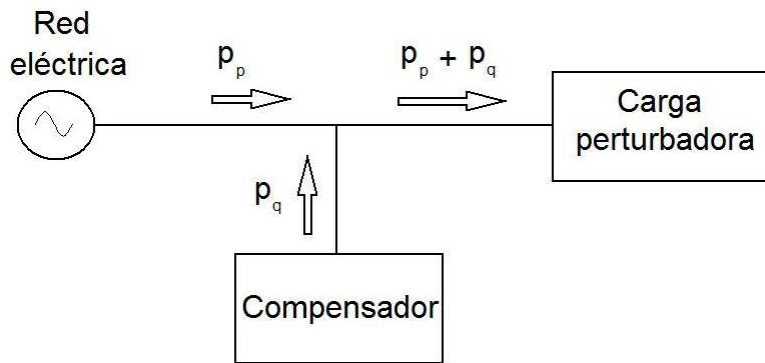
El funcionamiento del D-STATCOM en cada uno de sus modos de operación se basa en algoritmos que permiten estimar las corrientes de compensación que deben inyectarse a la red con el fin de mitigar las perturbaciones de interés. En el presente trabajo, para la realización del D-STATCOM en modo corriente, se usan la teoría p-q, p-q modificada, d-q y p-q-r mientras que en el modo tensión se utilizan dos algoritmos; uno basado en el error del valor máximo de las tensiones de fase en el punto de conexión del compensador, y el otro basado en la extracción de las componentes simétricas de las tensiones de fase, llevadas al marco de referencia síncrono d-q-0.

2.1.1.1 Modo control de corriente

En este modo de control, el D-STATCOM inyecta un conjunto de corrientes de compensación, las cuales sumadas en el PCC con la corriente de la carga, buscan que idealmente el flujo de corriente por las redes de distribución sea puramente sinusoidal, a la frecuencia fundamental, balanceado de secuencia positiva y esté en fase con la tensión en el punto de conexión [1, 6, 12].

La figura 2.2 ilustra como el D-STATCOM puede hacer la compensación de la potencia no activa, p_q que consume la carga y de esta manera hacer que se reduzca el desbalance de carga, la distorsión armónica y se mejore el factor de potencia en el punto de conexión.

Figura 2.2. Esquema monofásico para la compensación de corriente usando el D-STATCOM



Fuente: [12]

La potencia de la carga p_l , se puede descomponer en dos componentes; la componente de potencia activa p_p , que es suministrada directamente por la fuente de alimentación de la red, mientras que la potencia no activa de promedio nulo p_q es la potencia de compensación p_c aportada por el D-STATCOM [12].

$$p_l = p_p + p_q \quad (2.1)$$

$$p_c = p_q \quad (2.2)$$

La compensación que puede realizar el D-STATCOM, en modo corriente, incluye:

🍎 **Factor de potencia:**

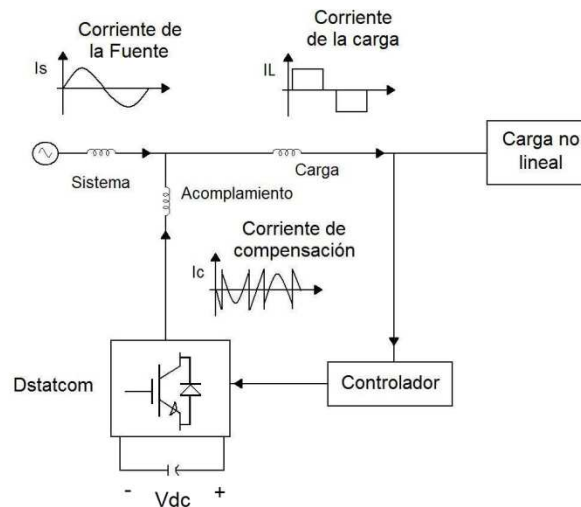
El factor de potencia es un indicador del porcentaje de energía transportada que se convierte en trabajo. En este sentido, cuando se controla el factor de potencia y se lleva a algún valor cercano a la unidad, se logra mejorar sustancialmente la eficiencia en el transporte de energía por las redes de distribución [13].

El D-STATCOM usando un algoritmo que opera sobre las corrientes y tensiones medidas en el punto de conexión, calcula la potencia reactiva que consume la carga. Esta potencia es suministrada a la red por medio de las corrientes de compensación, consiguiendo que el factor de potencia sea unitario o este muy cercano a la unidad.

🍏 Armónicos de corriente:

La reducción de los armónicos de la corriente de la red, puede conseguirse usando un algoritmo que extraiga las componentes armónicas de dicha corriente. Estas componentes causantes de la distorsión, constituyen una potencia no activa que debe suministrar el D-STATCOM para hacer que por la red circule únicamente la componente fundamental de la corriente de la carga. Esto se cumple siempre que la tensión en el PCC (Punto de Conexión Común) sea balanceada y sinusoidal a la frecuencia fundamental. En la figura 2.3, se presenta un esquema de compensación de armónicos de corriente.

Figura 2.3. Representación de compensación de armónicos de corriente usando el D-STATCOM



Fuente: [13]

🍏 Desbalance de carga:

En este caso, por medio del algoritmo de estimación de las corrientes de compensación, se halla un conjunto de corrientes desbalanceadas que debe inyectar el D-STATCOM a la red de manera que al ser sumadas con la corriente de la carga en el punto de conexión, se produce un flujo de corriente balanceado por la red. Las corrientes que circulan por la red como resultado de la compensación, representan la potencia activa total de la carga, por lo tanto, las corrientes entregadas por el D-STATCOM, cubren el desbalance de la carga con energía no activa, siempre y cuando las tensiones en el PCC sean balanceadas y sin distorsión armónica.

2.1.1.2 Modo control de tensión

El objetivo de compensación del D-STATCOM en modo control de tensión, busca 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.

Para este modo de operación, se establece una tensión de referencia, la cual se compara con el valor que tiene la tensión en el punto de conexión. La diferencia entre estos dos valores, permite que mediante un algoritmo se calculen las corrientes que debe inyectar el D-STATCOM a la red.

En este modo de compensación, se busca que el intercambio de potencia entre el D-STATCOM y la red, involucre únicamente energía reactiva. Para ello, el algoritmo de compensación hace que las corrientes generadas en el convertidor, estén en cuadratura con respecto a la tensión del PCC; ya sea en adelanto o en atraso, según las características de la perturbación que origina la acción de control. Por lo tanto, en presencia de huecos de tensión o subtensiones sostenidas, el D-STATCOM inyecta corrientes con característica capacitiva, que busca que la tensión se eleve hasta el nivel preestablecido. Por otro lado, si hay elevaciones de tensión transitorias o de larga duración, el compensador inyecta corrientes con característica inductiva, que buscan que la tensión disminuya hasta el valor de referencia.

En el trabajo desarrollado, para los modelos de D-STATCOM realizados, se incluye el uso de controladores PI dentro de los algoritmos usados para el cálculo de las corrientes de compensación. Estos modelos son conectados a una red de distribución simulada, y probados ante problemas de regulación, desbalance, huecos y elevaciones de tensión.

Capítulo 3

Todos los dispositivos de tipo compensación pertenecientes a la familia Custom Power Devices que se utilizan en sistemas de distribución (DSTATCOM, DVR y UPQC) emplean el inversor de potencia como elemento actuador, para el control de perturbaciones en corriente o en tensión. En el caso del D-STATCOM, por ser un dispositivo de conexión paralela, se requiere de un convertidor que pueda comportarse como una fuente controlada de corriente. En este capítulo se hace una revisión de distintas topologías del convertidor de potencia comúnmente utilizadas y algunos de los algoritmos que se utilizan para el control de las mismas.

3. ESTRUCTURA Y CONTROL DEL CONVERTIDOR DE POTENCIA DEL D-STATCOM

Los inversores de potencia, son equipos que utilizan configuraciones de interruptores electrónicos controlables para transformar una señal eléctrica en DC a otra en AC. Esto es posible, gracias al uso de en una técnica de control que gobierna la conmutación de los interruptores en el inversor y a un algoritmo que permite controlar la tensión en el lado de DC del inversor.

Los inversores pueden tener limitaciones en la generación de señales de tensión o corriente, impuestas por la técnica de control usada; la velocidad de conmutación de los interruptores, de los transductores de señal; el procesador digital de señales (DSP) y la capacidad de corriente y tensión que soporte los semiconductores del puente inversor, entre otras [6].

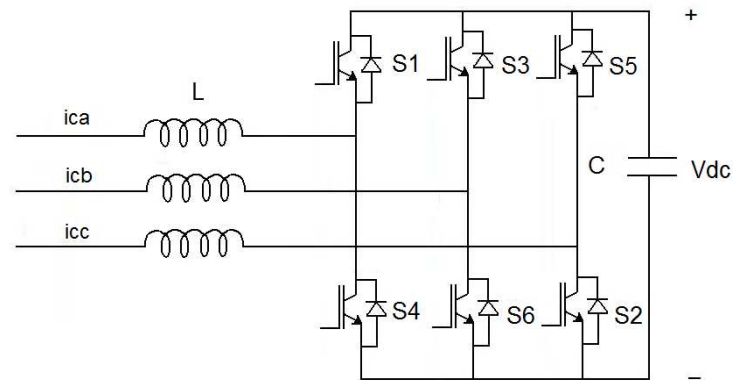
En un dispositivo como el D-STATCOM, el convertidor de potencia es el elemento responsable de entregar las corrientes de compensación a la red. La inyección de corriente, se hace generalmente a través de bobinas de acople, que permiten la controlabilidad del compensador y reducen los armónicos de alta frecuencia presentes en las corrientes de compensación [19]. Independientemente del tipo de inversor seleccionado, todos usan interruptores electrónicos controlados, que pueden ser BJT, MOSFET, IGBT, GTO; siendo los IGBT's los más usados [1, 3].

3.1 Topologías del convertidor de potencia

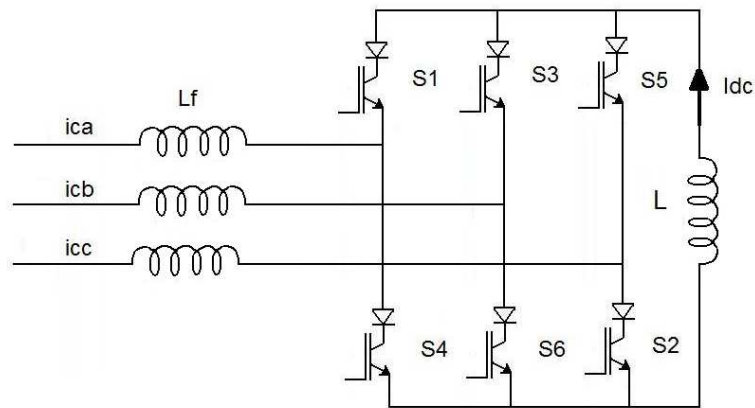
Los convertidores de potencia, suelen clasificarse de acuerdo al elemento almacenador de energía. Si se utiliza un condensador como elemento almacenador de energía, el convertidor es llamado inversor tipo fuente de tensión VSI (*Voltage Source Inverter*), o si se utiliza una bobina, entonces es llamado inversor tipo fuente de corriente CSI (*Current Source Inverter*). En la figura 3.1 se muestra la estructura de ambos tipos de inversores para sistemas trifásicos de tres hilos. El convertidor, está compuesto por una etapa de DC, un circuito de interruptores de potencia controlados y una etapa de corriente alterna.

La mayoría de los dispositivos de compensación que usan inversores de potencia han optado por el inversor tipo fuente de tensión, dado que tiene mayor eficiencia y es más económico que el inversor con fuente de corriente [6].

Figura 3.1. Topologías de circuitos de potencia de un filtro activo



a. Tipo fuente de tensión



b. Tipo Fuente de corriente

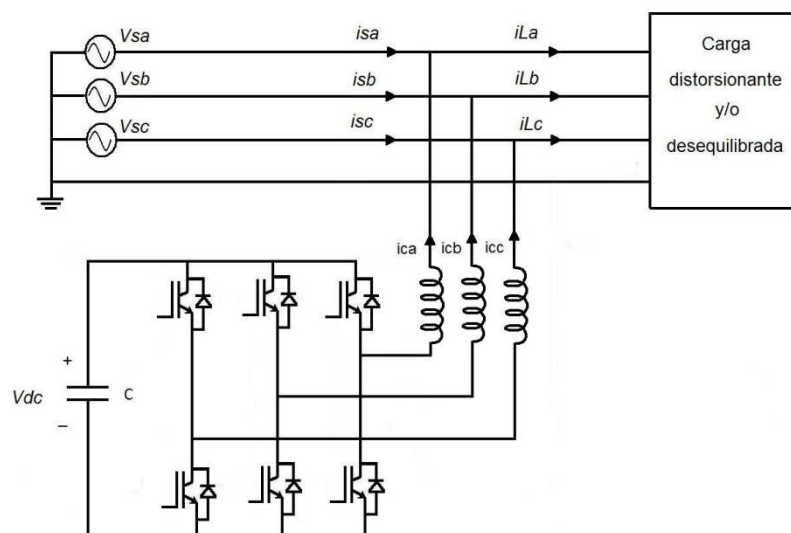
Fuente: [21]

Los inversores de potencia pueden ser monofásicos, trifásicos de tres hilos y trifásico de cuatro hilos. La elección de la topología más adecuada para el convertidor depende del número de fases y de hilos que tiene el sistema al que se va a conectar; además de la capacidad y las opciones de compensación que puede ofrecer. A continuación, se presentan algunas de las topologías más utilizadas en convertidores de potencia trifásicos:

- TLFB (*Three-Leg Full-Bridge*), el inversor de tres ramas en puente completo se muestra en la figura 3.2. Es una de las topologías clásicas utilizadas en el filtrado de corriente en redes trifásicas de tres hilos [20].

Un inversor TLFB ofrece el máximo aprovechamiento de la tensión en el bus de continua, sin embargo, debido a su estructura de tres ramas, resulta imposible inyectar corrientes homopolares a la red [20, 21].

Figura 3.2. Esquema de un inversor de tres ramas en puente completo TLFB (*Three-Leg Full-Bridge*)

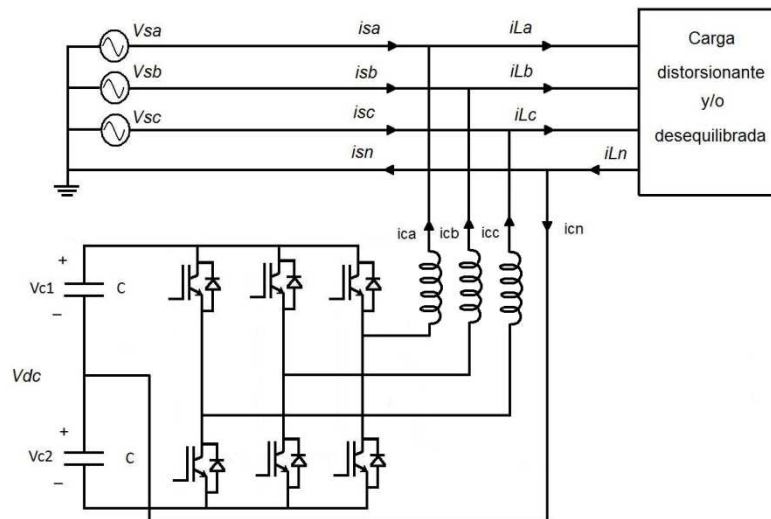


Fuente: [21]

- TLSC (*Three-Leg Split-Capacitor*). El esquema del inversor de tres ramas con condensador partido se presenta en la figura 3.3. Es utilizado en sistemas trifásicos de cuatro hilos, de media y baja potencia. Con esta topología se permite la inyección de corrientes de secuencia homopolar a la red. Un aspecto importante de esta topología es que permite que sus tres ramas trabajen de manera independiente; es decir, la salida de cada rama depende únicamente del estado de conmutación de sus dos transistores.

Esta topología presenta ciertas limitaciones e inconvenientes, tales como no aprovechar completamente la tensión en el bus de continua y el retorno de la corriente homopolar al punto intermedio del bus de continua, que da lugar a la aparición de desequilibrios en el reparto de la tensión total del bus entre cada uno de los condensadores [20, 21].

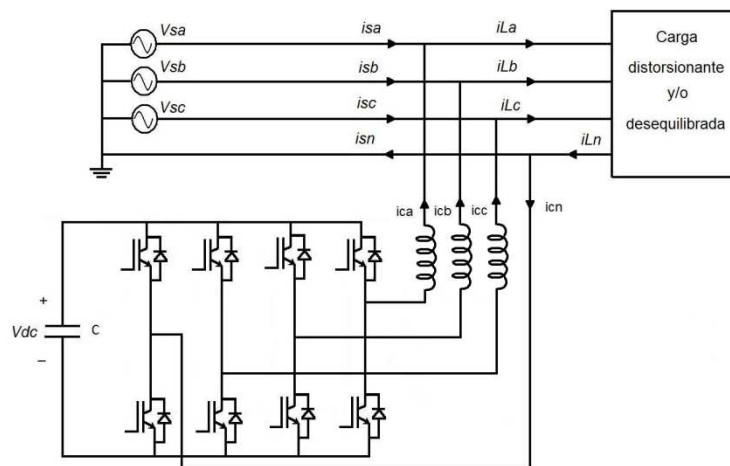
Figura 3.3. Esquema de un inversor de tres ramas con condensador partido TLSC (*Three-Leg Split-Capacitor*)



Fuente: [21]

- FLFB (*Four-Leg Full-Bridge*), el inversor de cuatro ramas en puente completo que se muestra en la figura 3.4, es un convertidor que presenta excelentes prestaciones para aplicaciones de filtrado activo en redes trifásicas de cuatro hilos, ya que permite aprovechar al máximo la tensión del bus de continua, y a su vez, permite generar altos niveles de tensión de secuencia homopolar [20, 21].

Figura 3.4. Esquema de un inversor de cuatro ramas en puente completo FLFB (*Four-Leg Full-Bridge*)

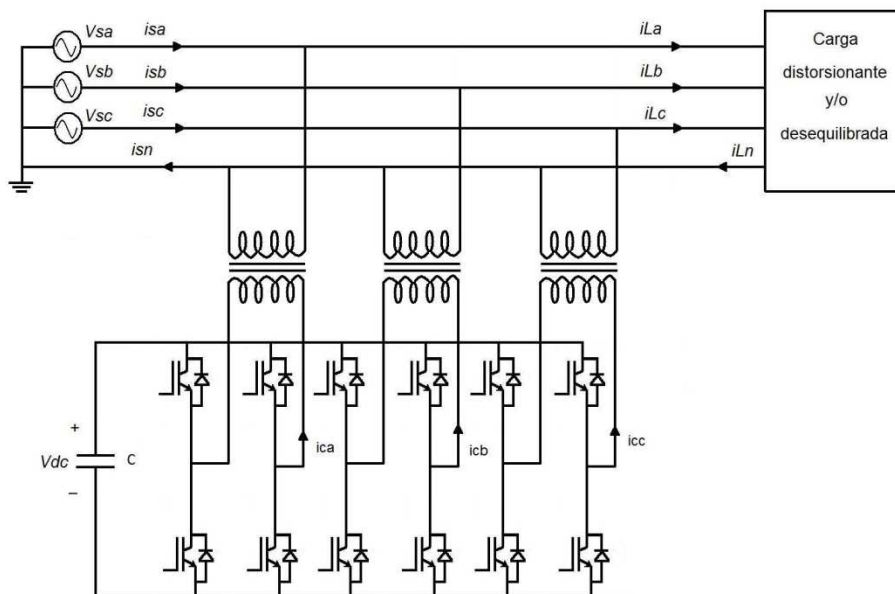


Fuente: [21]

- TBFW (*Three-Bridge Four-Wire*), el inversor de tres puentes completos y cuatro hilos, es una topología que se utiliza comúnmente en sistemas de alta potencia, en los que se presenta un considerable desequilibrio entre fases. Además, con la utilización de transformadores de acoplamiento a la red, la cuarta rama se divide en tres, dando lugar a tres inversores monofásicos independientes, con lo que se consigue una mayor capacidad de inyección de corriente. La topología de este convertidor se muestra en la figura 3.5.

Un aspecto importante del TBFW es poder tener tres niveles de tensión a la salida del mismo, lo que permite reducir la frecuencia de conmutación de los transistores y disminuir el rizado de la corriente inyectada. Esto se logra haciendo uso de una estrategia de modulación unipolar en los inversores [20, 21].

Figura 3.5. Esquema de un inversor de tres puentes completos de cuatro hilos TBFW (*Three-Bridge Four-Wire*)



Fuente: [21]

En el trabajo que se está presentando, se utiliza la estructura VSI con una topología de inversor FLFB, conectada a la red mediante una bobina de acople.

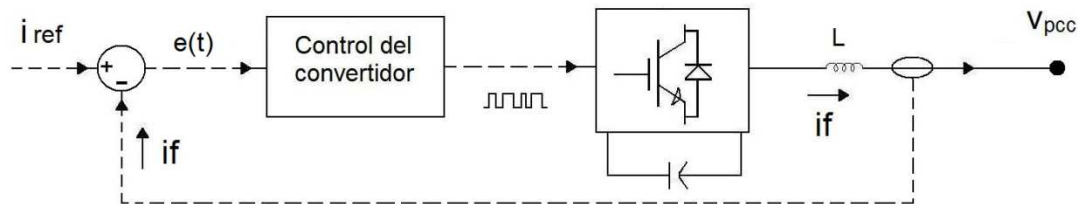
3.2 Técnicas de control del convertidor de potencia

Los dispositivos semiconductores que conforman cada una de las ramas del convertidor de potencia, deben ser conmutados en un orden específico para generar una señal de

corriente o tensión en AC. La secuencia de conmutación debe garantizar que la corriente inyectada por el D-STATCOM siga la señal de referencia. Los algoritmos de control utilizados para este propósito pueden ser de lazo abierto o de lazo cerrado [1, 6, 12]. En este caso se utiliza una técnica de lazo cerrado, con el fin de seguir la referencia a pesar de la dinámica en el sistema.

El esquema de un convertidor de potencia de conexión paralela con control de lazo cerrado, se muestra en la figura 3.6.

Figura 3.6. Esquema del control de lazo cerrado del convertidor de potencia



Fuente: [12]

A continuación se detallan algunas técnicas de control de corriente, en donde se describirá cada una de ellas y sus principales características.

3.2.1 Control proporcional integral (PI)

Es un regulador por realimentación que se utiliza para calcular la tensión que debe sintetizar el inversor y que permite producir un error nulo en el seguimiento de la señal de referencia [12]. Con las señales de tensión calculadas por el PI y por medio de una técnica de lazo abierto, la cual se basa en los tiempos de encendido y apagado de cada interruptor, se producen las señales de control del inversor. Este modo de control puede realizarse utilizando por ejemplo, modulación por ancho de pulso (PWM) o modulación vectorial.

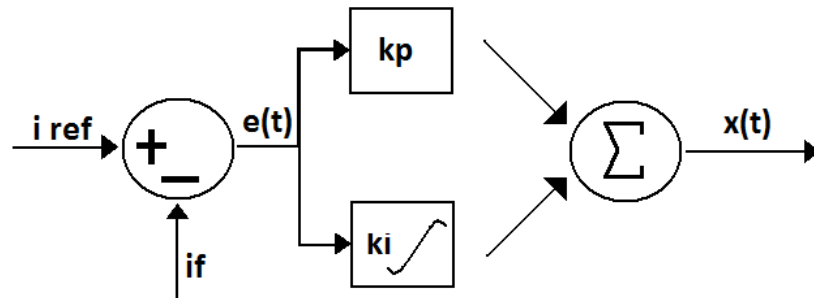
El algoritmo de cálculo del control PI comprende dos acciones de control distintas: la proporcional y la integral. La acción proporcional determina la reacción del error actual y la acción integral genera una corrección proporcional a la integral del error.

La ecuación que rige el funcionamiento del control PI está definida por (3.1), en donde $e(t)$ es el error que se produce al comparar la señal de corriente de referencia i_{ref} y la corriente sintetizada por el inversor i_f , $x(t)$ es la tensión a sintetizar mediante la técnica de lazo abierto, K_p es la ganancia proporcional, T_i es el tiempo integral [12]. A la relación de la ganancia proporcional y el tiempo integral se le conoce como ganancia integral K_i . La figura 3.7 muestra la estructura de un control PI.

$$x(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3.1)$$

El controlador PI tiene un ancho de banda limitado, que está determinado por el valor de sus constantes K_p y K_i ; esto implica que presenta deficiencias para compensar armónicos de orden elevado y corrientes con alta variabilidad y además, que se introduzcan retardos debidos a la respuesta natural del mismo [6, 20].

Figura 3.7. Estructura del control PI



Fuente: [12]

3.2.2 Control predictivo de corriente (*Dead-beat*)

Es un control diseñado para el seguimiento de señales discretas en el tiempo, el cual se basa en el error actual y en el modelo del sistema a controlar, para anticipar su respuesta dinámica. Así, se genera la tensión de salida que busca que la señal de corriente inyectada alcance la señal de referencia en el menor número de periodos de muestreo [12].

Cuando se elige la señal de tensión que hace que el error en corriente para el siguiente periodo de conmutación sea cero, se conoce como control *dead-beat*. En este caso, se busca alcanzar la señal de referencia al final del periodo de muestreo sobre la señal de corriente [6].

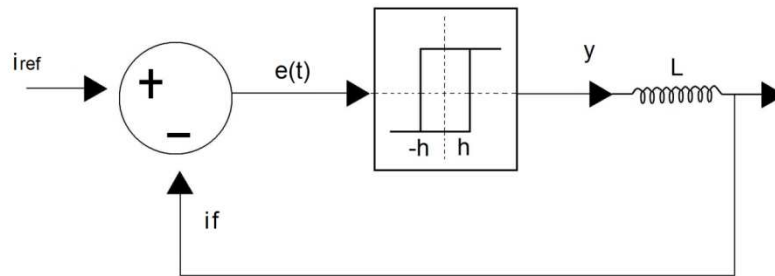
Las señales de actuación que se inyectan al inversor también se generan usando una técnica de lazo abierto, como la modulación por ancho de pulso o la modulación vectorial [20].

3.2.3 Control por histéresis de corriente

El controlador por histéresis de corriente ha sido empleado desde los primeros desarrollos hechos en el campo del filtrado activo de corriente. En esta estrategia de control (ver figura 3.8), la corriente inyectada i_f se compara con la corriente de referencia i_{ref} , para obtener un error que es la señal de entrada a un comparador de histéresis de banda fija de valor h . Este mantiene el error en la corriente generada dentro de los límites establecidos por la banda de histéresis.

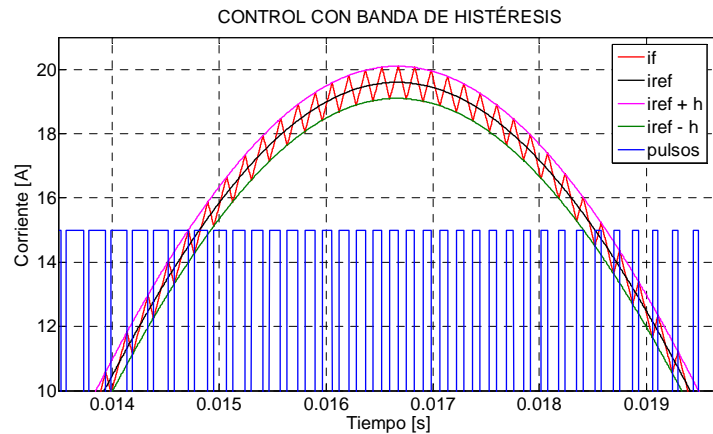
En la figura 3.9 se muestra un ejemplo de funcionamiento del control de histéresis. Se observa que cuando el error alcanza el límite superior de la banda $i_{ref} + h$, los transistores son conmutados para que la corriente disminuya; por otro lado, cuando el error alcanza un límite inferior de la banda $i_{ref} - h$, de nuevo los transistores se conmutan para hacer que la corriente aumente. La frecuencia de conmutación depende del ancho de la banda de histéresis, del tamaño de la inductancia de acople L (figura 3.8) y de la tensión del bus de DC del inversor. Además, la pendiente a la cual aumenta y disminuye la corriente, tiene una proporción inversa con el valor de la inductancia de acople [6].

Figura 3.8. Esquema del control con banda de histéresis



Fuente: [12]

Figura 3.9. Ejemplo de control con banda de histéresis



Fuente: [12]

Este control es estable y robusto para condiciones de carga dinámica y perturbaciones. Además, se caracteriza por una alta rapidez de respuesta y exactitud, gracias a su no linealidad, y a la ausencia de retardos. La desventaja de este controlador, es que la banda de histéresis fija genera frecuencias de conmutación variable en el inversor, pero este

inconveniente se ha venido mejorando probando con bandas de histéresis de ancho variable [6, 20].

3.2.4 Control por modulación delta (MD)

En este control se trabaja con una banda de histéresis de valor nulo, y con una frecuencia de conmutación constante. En este caso, en cada periodo de muestreo se compara la señal de referencia y la señal generada por el inversor con el fin de conmutar los transistores tal que se genere, una corriente de característica lineal creciente o decreciente dependiendo de si se quiere aumentar o disminuir la corriente generada por el inversor. La variación de corriente inyectada por el inversor, depende del valor de la tensión y del valor de la inductancia que se usa para conectar el inversor a la red en el PCC. De esta manera, si se quiere un incremento positivo, la tensión en la bobina debe ser positiva o negativa en el caso contrario [6].

En este trabajo, la técnica utilizada para el control del inversor, es el control por histéresis de corriente.

3.3 Control del bus de continua del convertidor de potencia

Las pérdidas de potencia internas del convertidor tienden a modificar la tensión del bus de continua del D-STATCOM. Estas pérdidas se deben a la conducción y conmutación de los transistores, errores en el seguimiento de las corrientes de referencia y a la falta de exactitud que puede tener el sistema de control en el cálculo de las referencias para las corrientes de compensación, entre otras [21].

El control del bus de continua se encarga de mantener la tensión en el capacitor en torno a un valor establecido como referencia. Mediante este control, se modifican las señales de referencia de las corrientes de compensación, para incluir la corriente correspondiente a la potencia necesaria para regular la tensión del bus de DC [21].

Se requiere un algoritmo de control que calcule las corrientes de compensación, las cuales involucran energía puramente activa; estas corrientes hacen que el convertidor absorba o entregue la potencia activa necesaria para compensar el error en la tensión del bus de DC [21]. Una buena estimación para el cálculo de estas corrientes, se obtiene al calcular la potencia de pérdidas que demanda el convertidor del sistema eléctrico al que está conectado. Un método para el cálculo de las corrientes de compensación i_{perd} a partir de la potencia de pérdidas, se muestra en la expresión (3.2) [21]. En esta expresión, ΔP_{dc} es la potencia de pérdidas, v es la tensión en el PCC, $\|v\|$ representa el valor eficaz de la tensión de línea en condiciones balanceadas y se calcula según (3.3).

$$i_{perd} = \frac{\Delta P_{dc}}{\|v\|^2} v \quad (3.2)$$

$$\|v\| = \sqrt{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \quad (3.3)$$

La potencia de pérdidas del convertidor es ΔP_{dc} y se calcula con un controlador PI, de acuerdo a la expresión (3.4). En esta expresión, e_{dc} es el error calculado entre la tensión de referencia V_{dcr} y la tensión en el bus de continua v_{dc} , y las constantes K_{pd} y K_{id} son los valores proporcional e integral respectivamente del controlador PI.

$$\Delta P_{dc} = K_{pd}e_{dc}(t) + K_{id} \int_0^t e_{dc}(\tau)d\tau \quad (3.4)$$

Las corrientes de referencia por fase, para la regulación de la tensión del bus de DC se calculan siguiendo (3.5).

$$\begin{aligned} i_{perd_a} &= \frac{\Delta P_{dc}}{\|v\|^2} v_a \\ i_{perd_b} &= \frac{\Delta P_{dc}}{\|v\|^2} v_b \\ i_{perd_c} &= \frac{\Delta P_{dc}}{\|v\|^2} v_c \end{aligned} \quad (3.5)$$

Capítulo 4

El D-STATCOM en el modo corriente puede ser utilizado para compensar la distorsión armónica, corregir el factor de potencia y mitigar el desbalance en las corrientes por la red. En este capítulo, se presentan los algoritmos utilizados en este trabajo, para hallar las corrientes de compensación o corrientes de referencia.

4. D-STATCOM EN MODO CORRIENTE

En este modo de operación, el D-STATCOM debe comportarse como una fuente controlada de corriente, que genera un flujo de energía no activa hacia la red, el cual permita mitigar las perturbaciones generadas en el lado de la carga. Con este modo de compensación se busca que la corriente que circula por la red de distribución contenga únicamente la componente fundamental de secuencia positiva y que además se mantenga en fase con la tensión en el PCC.

4.1 Algoritmos para calcular la corriente de compensación del D-STATCOM

Para la estimación de las corrientes de compensación, en este modo de operación del D-STATCOM, pueden usarse algoritmos que operan en el dominio del tiempo o en el de la frecuencia. Sin embargo, para la realización de este trabajo, se han seleccionado algunos algoritmos en el dominio del tiempo que se basan en la descomposición de la potencia instantánea que consume la carga.

La caracterización de la potencia en sistemas eléctricos, inició con la propuesta de Budeanu en el año de 1927, quien propuso descomponerla en tres componentes ortogonales entre sí. La suma vectorial de estas potencias, es lo que conforma la potencia aparente que se entrega y se consume en algún punto de la red de distribución. Budeanu en su propuesta contempla una componente de potencia activa P , una componente de energía reactiva Q_B y una potencia de distorsión D [12].

Esta tendencia basada en la descomposición de la potencia para identificar la parte correspondiente a energía útil consumida por la carga y la potencia de promedio nulo, ha sido trabajada por diferentes autores, destacándose las propuestas realizadas por Fryze, Buchholz y Depenbrock [12].

Teoría de Fryze:

La teoría de Fryze fue formulada para sistemas monofásicos y propone el cálculo de la componente de corriente que demanda la carga que corresponde al consumo de potencia activa (4.1). Para esto se basa en la determinación de la parte resistiva de la carga R , a partir de la ley de Ohm y en la medición de la potencia real promedio P , como se muestra en la expresión (4.2).

$$i_p(t) = \frac{v(t)}{R} = \frac{\overline{p(t)}}{V^2} v(t) = \frac{P}{V^2} v(t) = G v(t) \quad (4.1)$$

$$G = \frac{1}{R} = \frac{P}{V^2} \quad (4.2)$$

En estas expresiones, $v(t)$ es la tensión instantánea medida en el punto de conexión de la carga, la cual tiene un valor eficaz V ; G es la conductancia de la carga [12].

La corriente de compensación $i_c(t)$, dada en (4.3) corresponde entonces al consumo de energía que no involucra potencia activa, por lo cual se obtiene al eliminar la componente de corriente $i_p(t)$, de la corriente total de la carga, dada por $i_L(t)$ [12].

$$i_c(t) = i_L(t) - i_p(t) \quad (4.3)$$

Teoría de Buchholz:

Es una extensión de la teoría de Fryze a sistemas trifásicos, para ello, Buchholz definió valores colectivos para las señales instantáneas de tensión y corriente (4.4), lo mismo que para sus valores eficaces (4.5), (4.6). En estas expresiones, N representa el número de fases del sistema, 0 es un nodo de referencia, T es el periodo de las señales de tensión y corriente y V_k e I_k , son los valores eficaces correspondientes a la k -ésima fase [12].

$$i_\Sigma(t) = \|i(t)\| = \sqrt{\sum_{k=1}^N i_k^2(t)} \quad ; \quad v_{\Sigma 0}(t) = \|v(t)\| = \sqrt{\sum_{k=1}^N v_{k0}^2(t)} \quad (4.4)$$

$$I_\Sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i_\Sigma^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{k=1}^N I_k^2} \quad (4.5)$$

$$V_{\Sigma 0} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v_{\Sigma 0}^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{k=1}^N V_k^2} \quad (4.6)$$

La potencia instantánea colectiva (4.7) y la potencia activa colectiva (4.8) se definen como:

$$p_\Sigma(t) = \sum_{k=1}^N v_{k0}(t) i_k(t) \quad (4.7)$$

$$P_\Sigma = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p_\Sigma(t) dt \quad (4.8)$$

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

$$i_{p_k}(t) = \frac{P_\Sigma}{V_{\Sigma 0}^2} v_{k0}(t) = G_e v_{k0}(t) \quad (4.9)$$

La corriente de compensación queda definida según (4.10), en donde i_{Lk} , i_{pk} , i_{ck} , son la corriente total de la carga, la componente de corriente que transporta la potencia activa de la carga y la corriente de compensación, respectivamente para la k -ésima fase.

$$i_{C_k}(t) = i_{L_k}(t) - i_{p_k}(t) \quad (4.10)$$

De esta manera, la compensación se realiza con las componentes de corriente que no contribuyen a la potencia colectiva promedio, mientras que por la red circulará la corriente de menor valor eficaz colectivo que lleva la misma potencia activa [12], dada por:

$$I_{\Sigma p} = G_e V_{\Sigma 0} \quad (4.11)$$

Compensación basada en la teoría de Fryze-Buchholz-Depenbrock:

Depenbrock, a partir de los trabajos realizados por Fryze y Buchholz, propuso el concepto de una corriente instantánea de potencia i_{pp} . Esta corriente se calcula de la misma manera que en (4.9), pero esta vez teniendo en cuenta una conductancia variante en el tiempo g_e que se calcula en (4.13) [12]. Entonces i_{pp} está dada por:

$$i_{pp_k}(t) = g_e(t) v_{k0}(t) \quad (4.12)$$

$$g_e(t) = \frac{p_{\Sigma}(t)}{v_{\Sigma 0}^2(t)} \quad (4.13)$$

Esto permite definir las corrientes de la red según la siguiente expresión:

$$i_k = \underbrace{i_{p_k}}_{\text{activa}} + \underbrace{i_{v_k}}_{\text{variacion}} + \underbrace{i_{p\phi_k}}_{\text{potencia nula}} = \underbrace{i_{p_k}}_{\text{activa}} + \underbrace{i_{q_k}}_{\text{no activa}} \quad (4.14)$$

Según esta definición de la corriente, la componente activa i_{p_k} , transporta la potencia activa por la red, tiene valor eficaz mínimo y está en fase con la carga; la corriente de variación i_{v_k} , se debe a un intercambio de potencia de promedio nulo entre la red y la carga; y la componente de corriente $i_{p\phi_k}$, no tiene ninguna implicación de intercambio de potencia. Las componentes de corriente i_{pp_k} , transportan la misma potencia instantánea colectiva p_{Σ} que la transportada por la corriente total [12], lo cual en términos de potencia se expresa como:

$$p_{\Sigma}(t) = \sum_{k=1}^N v_{k0}(t) i_k(t) = \sum_{k=1}^N v_{k0}(t) i_{pp_k}(t) \quad (4.15)$$

$$\sum_{k=1}^N v_{k0}(t) i_{p\phi_k}(t) = 0 \quad (4.16)$$

Las corrientes de compensación deben hacer que la red haga únicamente el aporte de la potencia activa, dada por i_{p_k} ; entonces, las corrientes de compensación deben suministrar la potencia no activa y se definen en (4.17) [12].

$$i_{C_k}(t) = i_{L_k}(t) - i_{p_k}(t) = i_{v_k} + i_{p\phi_k} \quad (4.17)$$

4.1.1 Teoría de la potencia reactiva instantánea p-q

La teoría de la potencia reactiva instantánea o teoría p-q, es un algoritmo aplicado directamente en el dominio del tiempo, puede usarse en sistemas trifásicos con o sin neutro y requiere información de los valores instantáneos de las señales de tensión y corriente [6, 12, 22].

El concepto de esta teoría parte del enfoque vectorial de un sistema trifásico y está basada en la transformación de Clarke propuesta en 1943, para llevar las señales en el dominio a-b-c al dominio α - β -0 y viceversa. El significado físico de esta transformación se ilustra en la figura 4.1.

La matriz de transformación de Clarke se define en (4.18), y su inversa en (4.19):

$$A_{\alpha\beta 0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$A_{\alpha\beta 0}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

La transformación α - β -0 ó transformación de Clark consiste en una matriz real que transforma tensiones y corrientes a un marco de referencia estacionario α - β -0. Las tensiones instantáneas en las fases a, b y c son v_a , v_b y v_c ; las tensiones instantáneas en coordenadas α , β y 0 son v_α , v_β y v_0 . La matriz de transformación de Clarke y su inversa se muestran en las ecuaciones (4.20) y (4.21) respectivamente [6, 12, 22].

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = A_{\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = A_{\alpha\beta 0}^{-1} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

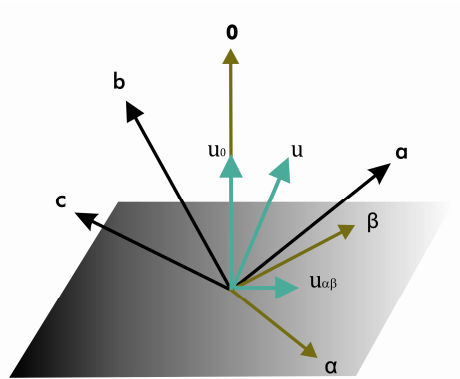
De la misma manera, las corrientes de línea i_a , i_b e i_c , pueden transformarse al sistema de coordenadas α - β -0 mediante las ecuaciones (4.22) y (4.23).

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = A_{\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Y su transformación inversa es:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = A_{\alpha\beta 0}^{-1} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Figura 4.1. Significado físico entre el marco de referencia a-b-c y el marco de referencia α - β -0

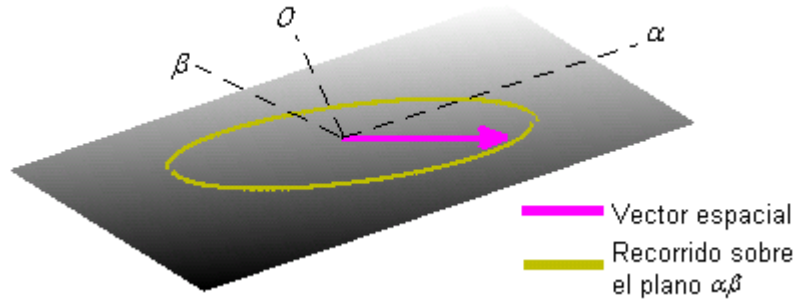


Tanto el sistema de referencia a-b-c, como α - β -0, son sistemas ortogonales en coordenadas cartesianas y ambos cumplen la regla de la mano derecha; el origen es el mismo para los dos sistemas coordenados; el ángulo vertical medido desde el plano α - β a cualquiera de los ejes a, b, c, es el mismo y el eje α está en la dirección de la proyección del eje a sobre el plano α - β , que corresponde al plano $x + y + z = 0$.

A manera de ejemplo, si se tiene un sistema con tensiones o corrientes sinusoidales y balanceadas en el sistema de coordenadas a-b-c, al ser convertidas al sistema de referencia α - β -0, constituyen respectivamente un vector espacial de tensión o corriente que describe con el paso del tiempo una circunferencia en la superficie del plano α - β en un sentido determinado por la secuencia de fase del sistema y a la frecuencia ω de las señal sinusoidal. El resultado de la transformación del sistema a-b-c a coordenadas α - β -0, se ilustra en la figura 4.2, en donde se representa el siguiente conjunto de tensiones de fase:

$$\begin{aligned} v_a(t) &= 120\sqrt{2}\cos(120\pi t) \\ v_b(t) &= 120\sqrt{2}\cos\left(120\pi t - \frac{2}{3}\pi\right) \\ v_c(t) &= 120\sqrt{2}\cos\left(120\pi t + \frac{2}{3}\pi\right) \end{aligned}$$

Figura 4.2. Proyección de un vector espacial de tensiones balanceadas sobre el plano α - β



Cuando se tiene un conjunto de señales de tensión o corriente con contenido de armónicos de secuencia positiva y/o negativa, el vector espacial en el sistema de coordenadas α - β -0 ya no produce un círculo perfecto, sino un trazo como el que se muestra en la figura 4.3. Las tensiones transformadas en este caso, contienen un armónico de décimo primer orden y están dadas por:

$$v_a(t) = 120\sqrt{2} \cos(120\pi t) + \frac{120\sqrt{2}}{11} \cos(1320\pi t)$$

$$v_b(t) = 120\sqrt{2} \cos\left(120\pi t - \frac{2}{3}\pi\right) + \frac{120\sqrt{2}}{11} \cos\left(1320\pi t - \frac{22}{3}\pi\right)$$

$$v_c(t) = 120\sqrt{2} \cos\left(120\pi t + \frac{2}{3}\pi\right) + \frac{120\sqrt{2}}{11} \cos\left(1320\pi t + \frac{22}{3}\pi\right)$$

Por otra parte, las componentes homopolares hacen que el trazo del vector espacial aparezca por encima o por debajo del plano α - β según el signo de la componente de secuencia cero [25]. Este caso se ilustra en la figura 4.4, en donde se ha transformado al sistema de coordenadas α - β -0, el siguiente conjunto de tensiones que contienen un armónico de tercer orden:

$$v_a(t) = 120\sqrt{2} \cos(120\pi t) + \frac{120\sqrt{2}}{3} \cos(360\pi t)$$

$$v_b(t) = 120\sqrt{2} \cos\left(120\pi t - \frac{2}{3}\pi\right) + \frac{120\sqrt{2}}{3} \cos(360\pi t)$$

$$v_c(t) = 120\sqrt{2} \cos\left(120\pi t + \frac{2}{3}\pi\right) + \frac{120\sqrt{2}}{3} \cos(360\pi t)$$

Figura 4.3. Recorrido del vector espacial de una señal con armónicos de secuencia negativa vista en el sistema de coordenadas α - β -0

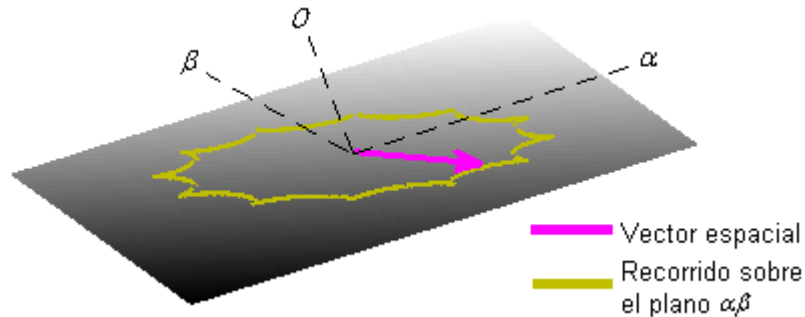
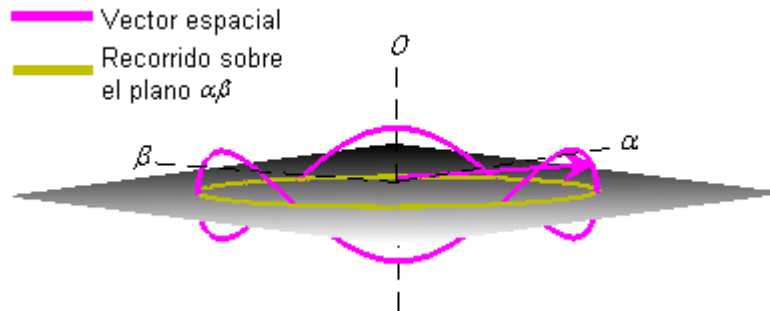


Figura 4.4. Recorrido del vector espacial de una señal con armónicos de secuencia cero vista en el sistema de coordenadas α - β -0



La matriz $A_{\alpha\beta 0}$ es una matriz ortonormal e invertible, y tiene un determinante de valor unitario, lo que implica que la transformación de Clarke es invariante en potencia. Entonces, las normas de los vectores en ambos sistemas de coordenadas son iguales y para las tensiones corresponde a la expresión (4.24); esta misma expresión puede usarse con las corrientes del sistema trifásico.

$$\sqrt{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} = \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_0^2} \quad (4.24)$$

A partir de un enfoque vectorial para el cálculo de la potencia en un sistema trifásico, teniendo las tensiones y corrientes de fase (4.25), se define la potencia activa instantánea del sistema, como el producto punto entre los vectores de tensión y corriente (4.26), que se expande en la expresión (4.27), tanto para el sistema a-b-c como para el sistema α - β -0. Este mismo enfoque define la potencia reactiva instantánea por fase como el producto cruz entre los vectores de tensión y corriente que corresponde a la expresión (4.28). La potencia reactiva instantánea total, se calcula en (4.29) [6, 12, 22, 24].

$$v = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad i = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$p = [v] \cdot [i]^T \quad (4.26)$$

$$p_{3\phi} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 \quad (4.27)$$

$$q_a = v_b i_c - v_c i_b$$

$$q_b = v_c i_a - v_a i_c \quad (4.28)$$

$$q_c = v_a i_b - v_b i_a$$

$$q = \|q\| = \sqrt{q_a^2 + q_b^2 + q_c^2} \quad (4.29)$$

4.1.1.1 Teoría p-q trifásica en sistemas de tres hilos

La teoría de la potencia reactiva instantánea p-q formulada por Akagi, Kanazawa y Nabae en el año de 1983, puede aplicarse para el control de compensadores como el D-STATCOM. Su desarrollo inicial fue hecho para sistemas trifásicos con secuencia homopolar nula y en el marco de referencia ortogonal α - β [6, 12, 22].

La potencia activa instantánea p y la potencia reactiva instantánea q se definen según la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Invertiendo la matriz de la ecuación (4.30) se obtienen las corrientes en el marco de referencia α - β en función de las potencia p y q .

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Partiendo de la ecuación (4.31) y sumando el producto de i_α por v_α e i_β por v_β , se obtiene la potencia trifásica instantánea como se muestra en la ecuación (4.32). En esta expresión, no se incluye el aporte a la potencia trifásica p debido a componentes homopolares de tensión y/o corriente, y q representa una componente de potencia no activa. Se puede observar que la potencia activa y la potencia reactiva instantánea están desacopladas, esto significa que p no se afecta si hay una modificación en q , así como tampoco se presenta modificación en la potencia instantánea total [6, 12, 22].

$$p_{3\phi} = p_\alpha + p_\beta = \underbrace{\frac{v_\alpha^2}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p + \frac{v_\beta^2}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p}_p + \underbrace{\frac{-v_\alpha v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q + \frac{v_\alpha v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q}_0 \quad (4.32)$$

Por lo tanto, las corrientes que debería inyectará el compensador estático para compensar q corresponden a:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} - \frac{p}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Las corrientes de compensación que se obtienen mediante este algoritmo, no incluyen el efecto que pueden causar las componentes homopolares de tensión y corriente.

4.1.1.2 Teoría p-q con componente homopolar

En los sistemas de distribución de baja tensión es muy común la presencia de un cuarto conductor llamado conductor neutro. Estos sistemas de cuatro hilos trifásicos pueden incluir componente de secuencia cero tanto en tensión como en corriente. Para representar correctamente el sistema, Akagi modifico la formulación realizada para sistemas trifásicos de tres hilos para introducir una tercera potencia llamada potencia de secuencia cero instantánea, dada en (4.34). La expresión (4.30) se expande al adicionar la potencia p_0 , para obtener la expresión (4.35) [6, 12, 22].

$$p_0 = v_0 i_0 \quad (4.34)$$

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_{\alpha} & v_{\beta} \\ 0 & -v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

La relación inversa está dada por:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} \frac{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2}{v_0} & 0 & 0 \\ 0 & v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ 0 & v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

La potencia trifásica activa instantánea es igual a la suma de la potencia p y p_0 como se observa en la ecuación (4.37).

$$p_{3\phi} = p + p_0 \quad (4.37)$$

La corriente que debería inyectar el compensador estático para compensar q y la componente de corriente homopolar por la red, se muestran en (4.38).

$$\begin{bmatrix} i_{c0} \\ i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_0 \\ i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} - \frac{p_{3\phi}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} 0 \\ v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

4.1.1.3 Teoría p-q modificada

La teoría p-q modificada fue introducida en los años 1994 y 1995. Ésta es una expansión del concepto de la potencia reactiva q formulada en la teoría p-q original para ser aplicada a sistemas trifásicos de cuatro hilos. La diferencia radica en que la teoría p-q modificada considera las componentes de secuencia cero para v e i al momento de calcular la potencia reactiva instantánea q . En esta modificación de la teoría p-q, se define q en términos de tres componentes de potencia no activa q_0 , q_α y q_β , que se obtienen del producto vectorial entre v e i . A partir de esta teoría, las potencias del sistema trifásico corresponden a las calculadas según la ecuación (4.39) [6, 12, 22].

$$\begin{bmatrix} p_{3\phi} \\ q_0 \\ q_\alpha \\ q_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & -v_\beta & v_\alpha \\ v_\beta & 0 & -v_0 \\ -v_\alpha & v_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

Y la transformación inversa es:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_0^2 + v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_0 & 0 & v_\beta & -v_\alpha \\ v_\alpha & -v_\beta & 0 & v_0 \\ v_\beta & v_\alpha & -v_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{3\phi} \\ q_0 \\ q_\alpha \\ q_\beta \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

Las corrientes que debería inyectar el compensador estático para compensar q se muestran en (4.41).

$$\begin{bmatrix} i_{c0} \\ i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} - \frac{p_{3\phi}}{v_0^2 + v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

Se puede comprobar que la teoría p-q modificada sólo se diferencia de la tradicional cuando el valor $v_0 \neq 0$. Además esta teoría puede ser ajustada para compensar el factor de potencia, según la ecuación (4.42)

$$\begin{bmatrix} i_{c0} \\ i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} - \frac{P_{L3\phi}}{V_{rms0}^2 + V_{rms\alpha}^2 + V_{rms\beta}^2} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

Donde $P_{L3\phi}$ es la potencia activa trifásica y V_{rms0} , $V_{rms\alpha}$ y $V_{rms\beta}$ son valores eficaces de las componentes v_0 , v_α y v_β [6, 12, 22].

4.1.1.4 Teoría d-q

Esta teoría está basada en la transformación de Park, la cual es muy utilizada en máquinas eléctricas y en el análisis de sistemas de potencia. La transformada de Park permite llevar las corrientes y tensiones instantáneas de fase del sistema trifásico a-b-c a un marco de referencia de coordenadas d-q-0, también llamado marco de referencia síncrono, por medio de la transformación matemática que se da en la expresión (4.43) [6, 12, 22].

$$[B] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

En (4.43), θ es una posición angular que varía con el tiempo y depende de la frecuencia del sistema eléctrico. Usualmente, este ángulo de sincronización se halla usando un PLL (*Phase-Locked-Loop*) [12]. Sin embargo, a partir de las tensiones v_α y v_β halladas a partir de las tensiones de la red a la frecuencia fundamental, también es posible hacer la sincronización usando la expresión (4.44) [7, 22].

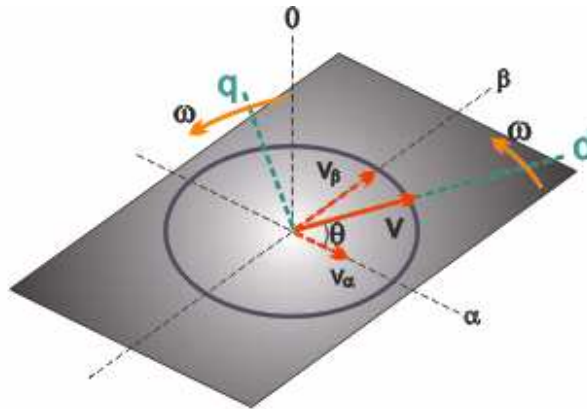
$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{v_\beta}{v_\alpha} \right) \quad (4.44)$$

Así:

$$\cos \theta = \frac{v_\alpha}{\sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2}} \quad (4.45)$$

$$\sin \theta = \frac{v_\beta}{\sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2}} \quad (4.46)$$

Figura 4.5. Sistema de coordenadas d-q-0 hallado a partir del sistema de coordenadas α - β -0



Con esta aproximación para calcular el ángulo de sincronismo, pueden hallarse las componentes de corriente i_0 , i_d e i_q , a partir de de las corrientes obtenidas en el sistema de coordenadas α - β -0, como se muestran en las ecuaciones (4.47) y (4.48).

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2}} \begin{bmatrix} \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2} & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

Sincronizando el marco de referencia d-q-0 mediante (4.44), un conjunto de corrientes balanceadas de frecuencia fundamental y en fase con las tensiones del sistema a-b-c, se transforman en una cantidad de DC de magnitud constante que aparece en el eje directo del sistema de coordenadas d-q-0, en tanto que la componente de corrientes en cuadratura y homopolar tienen valor nulo. Si el conjunto de corrientes del sistema a-b-c es balanceado y a la frecuencia fundamental, pero está desfasado con respecto a las tensiones del sistema, en el marco de referencia d-q-0, producen componentes de DC tanto en el eje directo como en el eje en cuadratura [7].

Los armónicos de corriente de secuencia positiva y negativa, así como también la componente fundamental de secuencia negativa, aparecen en el marco de referencia síncrono, como cantidades variables en el tiempo que se superponen a los niveles de DC [7]. Por otra parte los desbalances y las componentes armónicas de secuencia homopolar, aparecen como señales variantes en el tiempo en el eje cero del sistema d-q-0.

Por lo anterior, las componentes de corriente i_d , i_q e i_0 del marco de referencia d-q-0, se dividen en una componente DC y una componente oscilatoria como se muestra en las ecuaciones (4.49) -(4.51). La componente fundamental de corriente de secuencia positiva en fase con la tensión, corresponde a \bar{i}_d ; la componente fundamental de corriente de secuencia positiva en cuadratura con la tensión, está representada por \bar{i}_q ; y todas las componentes de corriente de secuencia positiva diferente a la fundamental y de secuencia negativa, componen la parte oscilatoria \tilde{i}_d e \tilde{i}_q . La corriente i_0 , está constituida por todas las componentes de secuencia homopolar que comprenden a DC \bar{i}_0 y los armónicos de secuencia cero \tilde{i}_0 .

$$i_d = \bar{i}_d + \tilde{i}_d \quad (4.49)$$

$$i_q = \bar{i}_q + \tilde{i}_q \quad (4.50)$$

$$i_0 = \bar{i}_0 + \tilde{i}_0 \quad (4.51)$$

Las corrientes que se deberían inyectar para compensar la potencia no activa y la componente de corriente homopolar, se muestran en (4.52).

$$\begin{bmatrix} i_{c0} \\ i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{i}_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

4.1.1.5 Teoría p-q-r

La teoría p-q-r, parte de la transformación del sistema de coordenadas a-b-c al sistema α - β -0, que está dada por (4.18).

Las señales de tensión o corriente del sistema trifásico, transformadas al sistema de coordenadas α - β -0, se pueden llevar al sistema de coordenadas p-q-r haciendo uso de las relaciones dadas en (4.53) y (4.54) respectivamente. La teoría p-q-r, plantea el análisis de las cantidades eléctricas en un marco de referencia que rota de acuerdo al vector espacial de tensiones de un sistema trifásico de cuatro hilos [25].

$$\begin{bmatrix} v_p \\ v_q \\ v_r \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{0\alpha\beta}} \begin{bmatrix} v_0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & -\frac{v_{0\alpha\beta}v_\beta}{v_{\alpha\beta}} & \frac{v_{0\alpha\beta}v_\alpha}{v_{\alpha\beta}} \\ v_{\alpha\beta} & -\frac{v_0v_\alpha}{v_{\alpha\beta}} & -\frac{v_\beta v_0}{v_{\alpha\beta}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{0\alpha\beta}} \begin{bmatrix} v_0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & -\frac{v_{0\alpha\beta}v_\beta}{v_{\alpha\beta}} & \frac{v_{0\alpha\beta}v_\alpha}{v_{\alpha\beta}} \\ v_{\alpha\beta} & -\frac{v_0v_\alpha}{v_{\alpha\beta}} & -\frac{v_\beta v_0}{v_{\alpha\beta}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

Donde:

$$v_{0\alpha\beta} = \sqrt{v_0^2 + v_\alpha^2 + v_\beta^2} \quad (4.55)$$

$$v_{\alpha\beta} = \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \quad (4.56)$$

La teoría p-q-r toma las ventajas de dos teorías de compensación; la teoría p-q y la teoría del producto vectorial (producto cruz entre los vectores de tensión y corriente del sistema trifásico), expresada en (4.25) - (4.29) [23]. Para la teoría p-q-r, la potencia tiene una componente activa instantánea p y dos componentes instantáneas no activas, q_q y q_r , sobre las que se hace el control de corriente.

En el sistema de coordenadas p-q-r, el eje p queda orientado en la dirección del vector espacial de voltaje; el eje q siempre queda ubicado en la superficie del plano α - β del sistema de referencia α - β -0, y el eje r se ubica ortogonal a los dos ejes anteriores. La secuencia de los ejes p-q-r siempre sigue la regla de la mano derecha.

El voltaje en el marco de referencia p-q-r, tiene solamente componente en el eje p , por lo cual queda definido por:

$$v_p = \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_0^2} = \sqrt{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \quad (4.57)$$

Ahora, las potencias activa y reactiva instantáneas, pueden definirse con el producto escalar y el producto vectorial de los vectores espaciales de voltaje y corriente, de la misma forma como se definió en (4.25) - (4.29), pero ahora en coordenadas p-q-r.

$$p = v_{pqr} \cdot i_{pqr} = v_p i_p \quad (4.58)$$

$$q_{pqr} = v_{pqr} \times i_{pqr} = \begin{bmatrix} q_q \\ q_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -v_p i_r \\ v_p i_q \end{bmatrix} \quad (4.59)$$

La potencia activa instantánea p y las potencias instantáneas no activas q_q y q_r quedan definidas por las componentes i_p , i_q e i_r del vector espacial de corriente, las cuales son linealmente independientes. Se observa la relación que existe entre cada componente de potencia y la corriente que la causa. Es así como i_p hace el aporte activo p a la potencia; i_q produce la componente q_r de potencia e i_r transporta la energía que produce q_q , y se relacionan de la siguiente manera [24, 25].

$$\begin{bmatrix} p \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} = v_p \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} \quad (4.60)$$

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{v_p} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} \quad (4.61)$$

Las componentes de corriente i_q e i_r , pueden ser controladas de manera separada para compensar las componentes q_r y q_q respectivamente. Esto muestra dos grados de libertad para la compensación de la potencia no activa [23, 25].

La potencia real instantánea es igual para la teoría del producto cruz y para la teoría p-q-r, corresponde a la suma de las componentes de potencia instantánea real p_o y $p_{\alpha\beta}$ de la teoría p-q. La suma geométrica de la potencia imaginaria instantánea para la teoría del producto cruz y la teoría p-q-r, son iguales:

$$q_{abc} = \sqrt{q_a^2 + q_b^2 + q_c^2} = \sqrt{q_q^2 + q_r^2} \quad (4.62)$$

En sistemas trifásicos, la tensión v_p , y las corrientes i_p e i_q en el marco de referencia p-q-r se pueden representar en sus componentes de DC y AC.

$$v_p = \bar{v}_p + \tilde{v}_p \quad (4.63)$$

$$i_p = \bar{i}_p + \tilde{i}_p \quad (4.64)$$

$$i_q = \bar{i}_q + \tilde{i}_q \quad (4.65)$$

Las componentes de DC para i_p e i_q , hacen el aporte a la potencia activa y reactiva del sistema trifásico, las componentes AC de estas dos corrientes, representan los armónicos y condiciones de desbalance dentro del sistema. La corriente i_r , está asociada al flujo de

corriente por el neutro, que ocurre típicamente por la presencia de componentes de secuencia cero en tensión y corriente para sistemas trifásicos de cuatro hilos [23, 25, 28].

El conjunto de corrientes de compensación esta dado por la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} i_{cp} \\ i_{cq} \\ i_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \widetilde{iL}_p \\ iL_q \\ iL_r - \frac{v_0}{v_{\alpha\beta}} \text{val}(\widetilde{iL}_p) \end{bmatrix} \quad (4.66)$$

Aquí, $i_{cq} = iL_q$, para compensar tanto su parte constante como su parte variable y hacer que la corriente de la red esté en fase con la tensión en el punto de conexión. $\text{val}(\widetilde{iL}_p)$, representa el valor numérico de la parte variable de la componente del eje p de la corriente de carga.

En algoritmo mostrado en la expresión (4.66), incluye la compensación de la parte variable de la componente de potencia real instantánea, la componente del eje q de la potencia instantánea reactiva y la parte necesaria de la componente en el eje r de potencia instantánea reactiva que elimina las corrientes por el neutro [26].

Capítulo 5

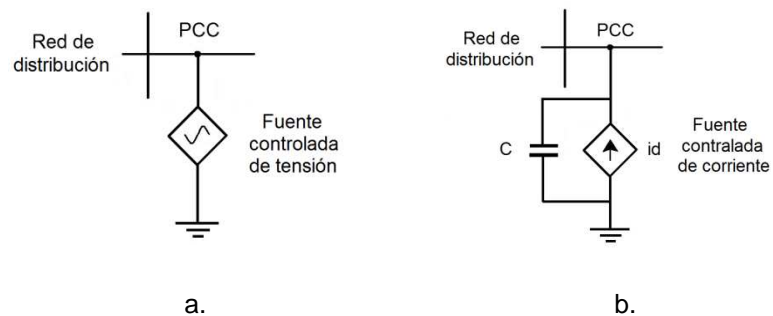
En este capítulo se presentan los fundamentos en los que se basan los algoritmos usados en este trabajo para el control del D-STATCOM como compensador en modo tensión.

5. D-STATCOM EN MODO TENSIÓN

El D-STATCOM puede mitigar algunas perturbaciones de tensión de larga y corta duración que se presentan en los sistemas de distribución, mediante el suministro de las corrientes de compensación adecuadas, que al interactuar con las impedancias de la red y con las cargas a lo largo de la misma, producen un conjunto de tensiones balanceadas en el PCC. En este modo de operación el D-STATCOM se comporta como una fuente controlada de corriente, que en operación de estado estable debe intercambiar con la red únicamente energía no activa; por lo tanto, las corrientes de compensación deben estar en cuadratura a la tensión de la red en el punto de conexión.

El diagrama esquemático de un compensador ideal conectado en paralelo actuando como regulador de tensión se muestra en la figura 5.1a. Este compensador está representado por una fuente controlada de tensión conectada al punto común de acoplamiento. En la estructura alternativa de la figura 5.1b, se muestra un esquema de compensación mediante el uso de una fuente controlada de corriente y un capacitor (C), que actúa como filtro para los armónicos de tensión de alta frecuencia. Este segundo esquema, se aproxima al comportamiento del D-STATCOM en modo control de tensión.

Figura 5.1. Esquema de un compensador ideal de conexión paralela



Fuente: [1]

5.1 Algoritmos de control para el cálculo de las corrientes de compensación

El D-STATCOM funcionando como compensador de tensión consta principalmente de tres etapas de control. Las primera dos etapas, controlan el puente inversor y la tensión de bus de DC, las cuales fueron tratadas en el capítulo 3 y para efectos del presente trabajo, están dadas por un control mediante histéresis por corriente y un control de tensión basado en un controlador PI, respectivamente. La tercera etapa de control, se basa en el uso de un algoritmo que permite realizar el cálculo de las corrientes que debería suministrar el D-STATCOM a la red para mitigar las perturbaciones de la tensión en el PCC.

A continuación se presentan los algoritmos utilizados en este trabajo para el cálculo de las corrientes de compensación para el D-STATCOM en modo tensión, los cuales se basan en el uso de controladores PI.

Estos algoritmos, operan controlando el flujo de potencia no activa a través del inversor, buscando que las corrientes de referencia se sinteticen utilizando solo la energía almacenada en el condensador.

5.1.1 Control de tensión basado en el marco de referencia a-b-c

Este algoritmo se basa en la medición continua del valor de las tensiones de fase y la comparación de estas cantidades frente a un valor de referencia. Así se detectan variaciones en el valor de la tensión, debidas a una baja regulación en el punto común de acoplamiento o a huecos o elevaciones de tensión. El error hallado en cada instante de tiempo, permite la aplicación de una acción de control en lazo cerrado [24]. Ver diagrama de bloques en la Figura 5.2.

Este esquema de control requiere de un controlador PI para cada fase, el cual a partir del error hallado en el valor máximo de la tensión medida en el PCC, debe calcular la amplitud de las corrientes de compensación que permiten regular la tensión en el punto de conexión a la red [22].

El error en la tensión medida v_e , se lleva a un control proporcional integral para cada fase, y posteriormente la salida de dicho control arroja la magnitud de la corriente de compensación ic_q que debe ser inyectada en cuadratura con la tensión de fase correspondiente. La magnitud de la corriente de compensación es calculada como se muestra a continuación:

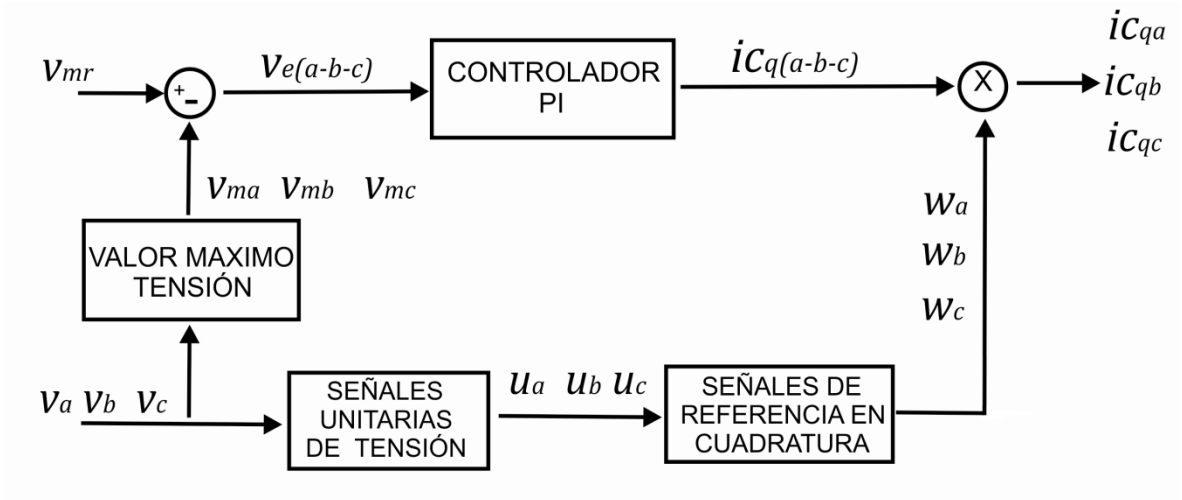
$$ic_q(t) = K_{pq}v_e(t) + K_{iq} \int_0^t v_e(\tau) d\tau \quad (5.1)$$

Donde v_e se calcula según (5.2), y denota el error entre el valor de referencia V_{mr} y el valor máximo de cada una de las tensiones de la red $v_{m(a,b,c)}$, que puede calcularse mediante la expresión (5.3), considerando que las tensiones en el PCC están a la frecuencia fundamental del sistema. Las constantes K_{pq} y K_{iq} son los valores proporcional e integral respectivamente del controlador PI.

$$v_e(t) = V_{mr} - v_{m(a,b,c)} \quad (5.2)$$

$$v_{m(a,b,c)} = \sqrt{2}V_{rms(a,b,c)} \quad (5.3)$$

Figura 5.2. Esquema de control del D-STATCOM en modo tensión en el marco de referencia a-b-c



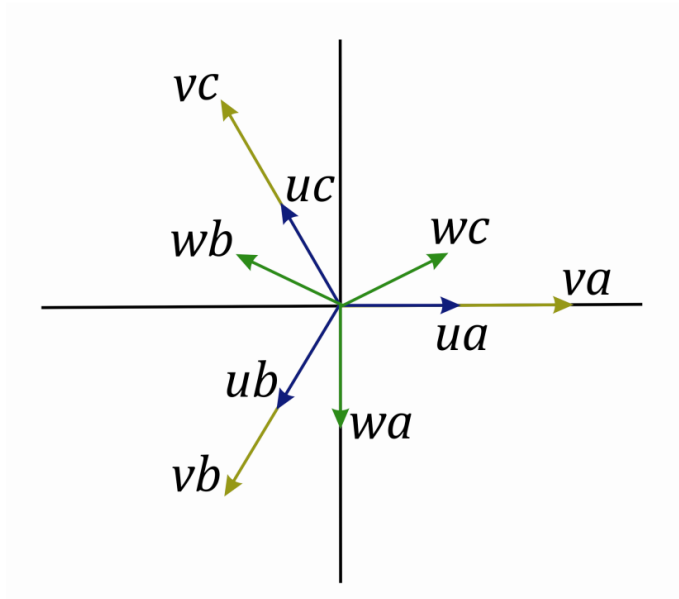
Fuente [22]

Posteriormente se generan a partir de las señales de tensión v_a , v_b , v_c medidas en el PCC tres señales sinusoidales de valor máximo unitario u_a , u_b , u_c , calculadas según la expresión (5.4). Estas señales permiten obtener w_a , w_b , w_c , como se muestra en (5.5), las cuales son las señales en cuadratura con la tensión medida en el PCC que permiten ondular la corriente de compensación i_{c_q} calculada en cada controlador PI para cada fase. Una representación fasorial del cálculo de las señales unitarias de referencia, se presenta en la figura 5.3.

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_a &= \frac{v_a}{V_{ma}} \\ \mathbf{u}_b &= \frac{v_b}{V_{mb}} \\ \mathbf{u}_c &= \frac{v_c}{V_{mc}} \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned}
 w_a &= \frac{u_b - u_c}{\sqrt{3}} \\
 w_b &= \frac{u_c - u_a}{\sqrt{3}} \\
 w_c &= \frac{u_a - u_b}{\sqrt{3}}
 \end{aligned}
 \tag{5.5}$$

Figura 5.3. Representación fasorial de las señales unitarias en fase y en cuadratura con la tensión en el PCC



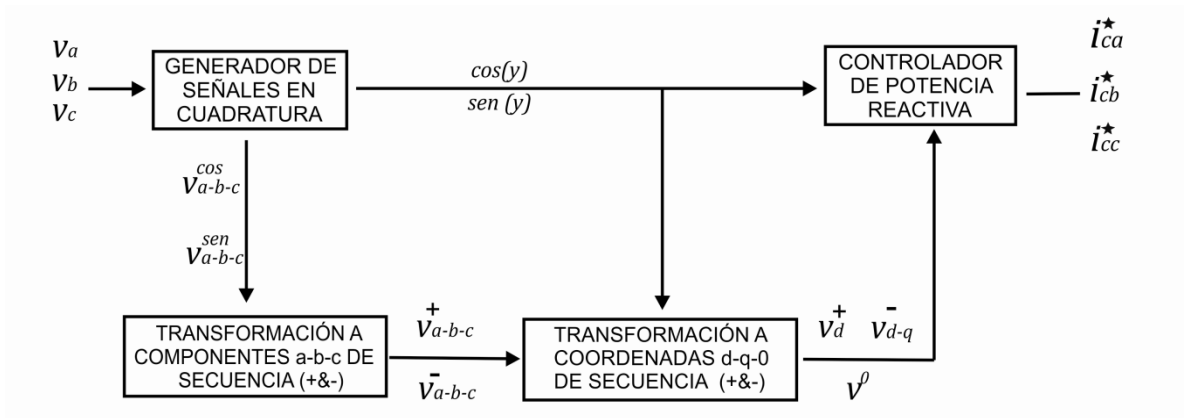
Finalmente, las señales de referencia para las corrientes de compensación $i_{c_{qa}}^*$, $i_{c_{qb}}^*$, $i_{c_{qc}}^*$ que debería suministrar el D-STATCOM a la red, se hallan mediante la expresión (5.6).

$$\begin{aligned}
 i_{c_{qa}}^* &= i_{c_{qa}} w_a \\
 i_{c_{qb}}^* &= i_{c_{qb}} w_b \\
 i_{c_{qc}}^* &= i_{c_{qc}} w_c
 \end{aligned}
 \tag{5.6}$$

5.1.2 Control de tensión basado en componentes simétricas instantáneas en el marco de referencia d-q-0

Se plantea un algoritmo para control de tensión, en el que se hacen dos transformaciones en el dominio del tiempo. Como primera medida, se hace una descomposición de las señales de tensión en componentes simétricas y posteriormente, se transforman a un conjunto de señales en el marco de referencia síncrono d-q-0 [27]. El esquema de control se muestra en la figura 5.4.

Figura 5.4. Esquema de control del D-STATCOM en modo tensión en el marco de referencia d-q-0



Fuente [27]

Inicialmente, se requiere la medición de la componente fundamental de las tensiones de fase en el PCC, las cuales corresponden a v_a, v_b, v_c . Las componentes de secuencia positiva, negativa y cero de estas señales de tensión deben extraerse, lo cual se consigue mediante las expresiones dadas en (5.7), (5.9) y (5.9), respectivamente [12, 27].

$$\begin{bmatrix} v_{a^+} \\ v_{b^+} \\ v_{c^+} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 & 0 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a^{cos} \\ v_a^{sen} \\ v_b^{cos} \\ v_b^{sen} \\ v_c^{cos} \\ v_c^{sen} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

$$\begin{bmatrix} v_{a^-} \\ v_{b^-} \\ v_{c^-} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 & 0 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a^{cos} \\ v_a^{sen} \\ v_b^{cos} \\ v_b^{sen} \\ v_c^{cos} \\ v_c^{sen} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

$$v^0 = v_a^0 = v_b^0 = v_c^0 = \frac{1}{3}(v_a + v_b + v_c) \quad (5.9)$$

Como se observa en las expresiones (5.7) y (5.8), el cálculo de las componentes simétricas de secuencia positiva y negativa propuesto en este algoritmo, es una analogía de la transformada de Fortescue, pero esta vez en el dominio del tiempo. Sin embargo este método tiene un costo adicional, que implica tener, además de las señales de tensión medidas de la red, dadas por $v_{a,b,c}^{cos}$; las respectivas señales en cuadratura, las cuales corresponden con $v_{a,b,c}^{sen}$. Para la obtención de las señales de tensión en cuadratura, en esta tesis se propone el uso de un filtro Kalman para la frecuencia fundamental.

El filtro Kalman es un algoritmo recursivo, que permite obtener el ángulo instantáneo de fase y la magnitud de una señal eléctrica contando únicamente con el valor actual de la señal y su valor en un instante de tiempo inmediatamente anterior. A partir de estos valores, se puede predecir el valor que tendrá la señal medida y su cuadratura en el instante de tiempo inmediatamente posterior [12].

Para una señal descrita en el tiempo dada por (5.10), una medición en un instante de tiempo t_k puede definirse por (5.11), y la misma señal para el instante $t_k + T_s$, responde a la expresión (5.12).

$$x(t) = A_f \cos(\omega_f t + \phi_f) \quad (5.10)$$

$$x(t_k) = A_f \cos(\omega_f t_k + \phi_f) \quad (5.11)$$

$$x(t_k + T_s) = A_f \cos(\omega_f (t_k + T_s) + \phi_f) \quad (5.12)$$

La expresión (5.12), puede reescribirse como:

$$x(t_k + T_s) = A_f \cos(\omega_f t_k + \phi_f) \cos(\omega_f T_s) - A_f \sin(\omega_f t_k + \phi_f) \sin(\omega_f T_s) \quad (5.13)$$

De la expresión (5.13) 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 [5, 12]. Estas dos señales se definen como las variables de estado que permiten hallar el valor de la señal medida en el instante $t_k + T_s$.

Para el instante t_k , las variables de estado están dadas por:

$$x_1(t_k) = A_f \cos(\omega_f t_k + \phi_f) \quad (5.14a)$$

$$x_2(t_k) = A_f \sin(\omega_f t_k + \phi_f) \quad (5.14b)$$

Puede ahora establecerse una ecuación de estados (5.15), en 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 θ_k presentada en (5.16).

$$\begin{bmatrix} x_1(t_k + T_s) \\ x_2(t_k + T_s) \end{bmatrix} = \theta_k \begin{bmatrix} x_1(t_k) \\ x_2(t_k) \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

$$\theta_k = \begin{bmatrix} \cos(\omega_f T_s) & -\text{sen}(\omega_f T_s) \\ \text{sen}(\omega_f T_s) & \cos(\omega_f T_s) \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Para este algoritmo de compensación de tensión, el filtro Kalman se utiliza principalmente para obtener las señales en cuadratura de las tensiones medidas; sin embargo, también puede obtenerse información sobre el ángulo instantáneo y la amplitud de las señales medidas, a partir de $x_1(t_k)$ y $x_2(t_k)$, como se muestra:

$$A_f = \sqrt{x_1(t_k)^2 + x_2(t_k)^2} \quad (5.17)$$

$$(\omega_f t_k + \phi_f) = \tan^{-1} \left(\frac{x_2(t_k)}{x_1(t_k)} \right) \quad (5.18)$$

Para profundizar en la comprensión del algoritmo y el funcionamiento del filtro Kalman, referirse a [5, 12].

Las componentes de secuencia halladas en (5.7) y (5.8), son transformadas al marco de referencia sincrónico, haciendo uso de las siguientes matrices de transformación, en donde $\gamma = (\omega_f t_k + \phi_f)$.

$$\begin{bmatrix} V_d^+ \\ V_q^+ \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\frac{1}{2}\cos(\gamma) + \frac{\sqrt{3}}{2}\text{sen}(\gamma) & -\frac{1}{2}\cos(\gamma) - \frac{\sqrt{3}}{2}\text{sen}(\gamma) \\ -\text{sen}(\gamma) & \frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\gamma) + \frac{1}{2}\text{sen}(\gamma) & -\frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\gamma) + \frac{1}{2}\text{sen}(\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{a^+} \\ v_{b^+} \\ v_{c^+} \end{bmatrix} \quad (5.19a)$$

$$\begin{bmatrix} V_d^- \\ V_q^- \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\frac{1}{2}\cos(\gamma) - \frac{\sqrt{3}}{2}\text{sen}(\gamma) & -\frac{1}{2}\cos(\gamma) + \frac{\sqrt{3}}{2}\text{sen}(\gamma) \\ -\text{sen}(\gamma) & -\frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\gamma) + \frac{1}{2}\text{sen}(\gamma) & \frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\gamma) + \frac{1}{2}\text{sen}(\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{a^-} \\ v_{b^-} \\ v_{c^-} \end{bmatrix} \quad (5.19b)$$

Cada transformación corresponde a un marco de referencia rotatorio. Para la secuencia positiva, el marco de referencia se sincroniza con la tensión de la fase A, y rota en sentido contrario a las manecillas del reloj; mientras que la secuencia negativa, rota en la dirección opuesta con la misma rapidez angular. Esto hace que las componentes de secuencia, dentro del marco de referencia correspondiente, se vean como cantidades constantes.

Los factores trigonométricos que aparecen en (5.19a) y (5.19b), permiten sincronizar los ejes d y q de los nuevos sistemas de coordenadas con la rapidez angular del sistema eléctrico. Estos factores se calculan usando la señal de la tensión presente en la fase A $v_{1a}(t)$ y su respectiva señal en cuadratura $v_{2a}(t)$, obtenidas del filtro Kalman para cada instante de tiempo t_k , y que corresponden a las expresiones dadas en (5.20a) y (5.20b), en donde A_a es el valor pico de la señal de tensión de la fase A, y se calcula según la expresión (5.22).

$$v_{1a}(t_k) = A_a \cos(\omega_a t_k + \phi_a) \quad (5.20a)$$

$$v_{2a}(t_k) = A_a \text{sen}(\omega_a t_k + \phi_a) \quad (5.20b)$$

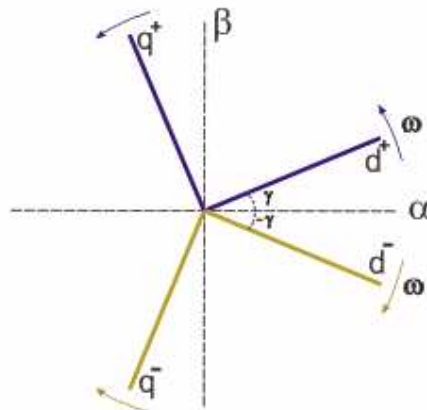
$$\cos(\gamma) = \frac{v_{1a}(t_k)}{A_a} \quad (5.21a)$$

$$\text{sen}(\gamma) = \frac{v_{2a}(t_k)}{A_a} \quad (5.21b)$$

$$A_a = \sqrt{(v_{1a}(t_k))^2 + (v_{2a}(t_k))^2} \quad (5.22)$$

Los nuevos sistemas de coordenadas para secuencia positiva y negativa en el marco de referencia síncrono se muestran en la Figura 5.4.

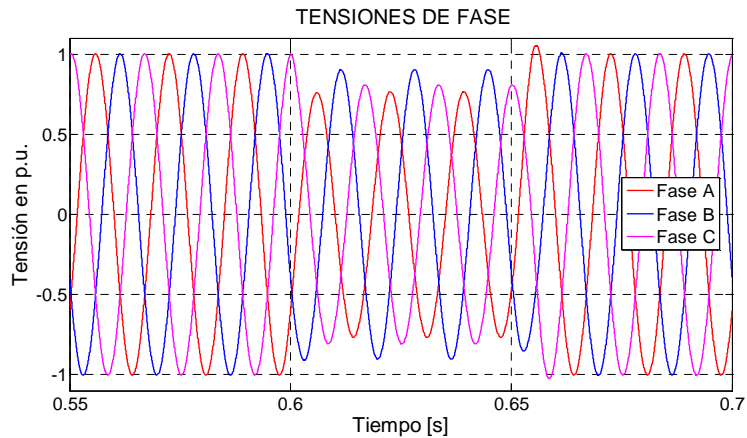
Figura 5.4. Sistema rotativo de coordenadas de secuencia positiva y negativa en el marco de referencia síncrono



Para ilustrar la lógica del algoritmo de control de tensión, se muestra el siguiente ejemplo:

Las tensiones en por unidad de un sistema trifásico, se muestran en la figura 5.5. El sistema permanece balanceado hasta los 0.60 [s] y en ese momento ocurre un desbalance en las tensiones a causa de una falla bifásica, que se prolonga hasta los 0.65 [s].

Figura 5.5. Señales de tensión de un sistema trifásico en el marco de referencia a-b-c



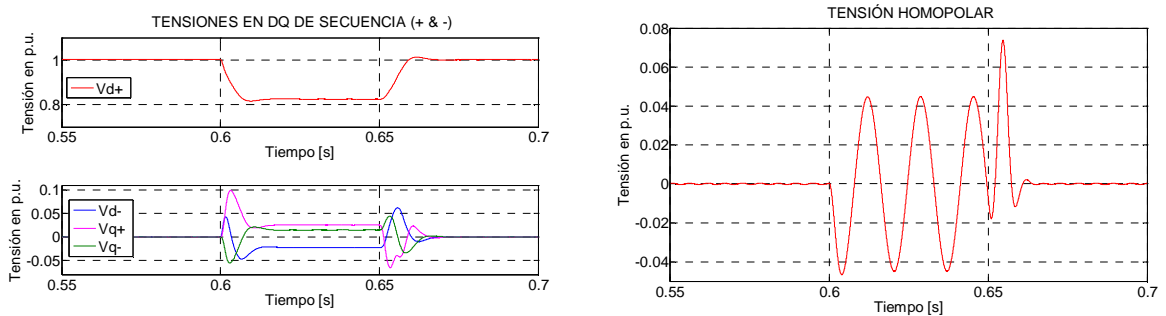
En la figura 5.6, se presentan las componentes de tensión de secuencia positiva, negativa y cero, en el marco de referencia síncrono d-q-0 para el mismo sistema trifásico. Se observa que las componentes de secuencia positiva y negativa para las tensiones bajo esta transformación, son cantidades de DC que se modifican en magnitud en situaciones de desbalance. Es evidente que la aparición de componentes de secuencia negativa, en el eje en cuadratura de secuencia positiva y en el eje homopolar, se deben al desbalance de tensión, así como también es claro que mientras las condiciones de operación del sistema permanezcan balanceadas, solo habrá componente en el eje directo de secuencia positiva.

Cuando el desbalance de tensión hace que además de las componentes de secuencia positiva y negativa, se presente una componente de secuencia homopolar, ésta se verá como una señal que oscila a la frecuencia del sistema eléctrico y cuya magnitud está dada por el valor instantáneo de v^0 .

Las referencias que se establecen para ser comparadas con las componentes de secuencia de tensión transformadas al sistema d-q-0, son valores constantes, que corresponden a un sistema balanceado, y están dadas por:

$$\begin{aligned}
 V_{ref_d}^+ &= 1 \text{ pu} & V_{ref_q}^+ &= 0 \text{ pu} \\
 V_{ref_d}^- &= 0 \text{ pu} & V_{ref_q}^- &= 0 \text{ pu} \\
 V_{ref}^0 &= 0 \text{ pu}
 \end{aligned}
 \tag{5.23}$$

Figura 5.6. Componentes de secuencia positiva y negativa para la tensión de un sistema trifásico transformadas al marco de referencia d-q



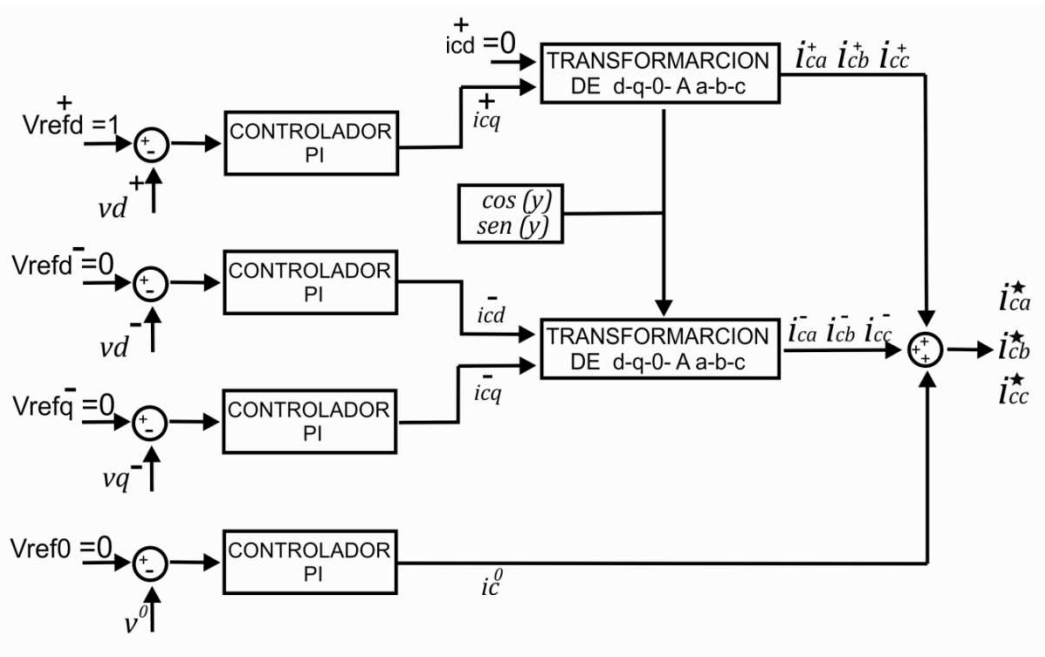
Cualquier desbalance en la tensión, siempre que el sistema esté libre de armónicos, produce señales de error constantes en las componentes de secuencia positiva y negativa, mientras que el error que se presenta en la componente homopolar, está dado por el valor de v^0 . En consecuencia, las tensiones de un sistema trifásico afectado por

perturbaciones de desbalance, pueden compensarse regulando las componentes de secuencia positiva, negativa y cero, en el marco de referencia síncrono a los valores establecidos como referencia [27].

El esquema de control de potencia reactiva para éste algoritmo de control, se muestra en la figura 5.7. Se usan cuatro controladores PI, que calculan las corrientes de compensación que deben generarse en el convertidor para mantener un conjunto de tensiones reguladas en el PCC.

Además se controla que el flujo de potencia desde el inversor hacia la red sea de promedio cero, haciendo que las corrientes de compensación se generen en cuadratura a la tensión de cada fase en el PCC. Esto se logra si el error para la tensión en 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.

Figura 5.7. Esquema de control de potencia reactiva para el D-STATCOM en el marco de referencia d-q-0



Fuente [27]

Las acciones de control aplicadas con base en los errores de tensión medidos, permiten estimar las corrientes de compensación i_{cd}^+ , i_{cq}^+ , i_{cd}^- , i_{cq}^- , i_c^0 dadas en el marco de referencia d-q-0. Sin embargo, la compensación debe realizarse en el sistema a-b-c, lo cual implica que estas cantidades deben convertirse de un sistema de coordenadas a

otro. Esto se consigue mediante las expresiones dadas en (5.24a) y (5.24b), siendo i_{ca}^+ , i_{cb}^+ , i_{cc}^+ , e i_{ca}^- , i_{cb}^- , i_{cc}^- , las componentes de secuencia positiva y negativa respectivamente de las señales de referencia para las corrientes de compensación dadas en el sistema a-b-c. Los factores $\cos(\gamma)$ y $\sen(\gamma)$ para estas matrices de transformación, corresponden a las expresiones halladas en (5.21a) y (5.21b).

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^+ \\ i_{cb}^+ \\ i_{cc}^+ \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sen(\gamma) \\ -\frac{1}{2}\cos(\gamma) + \frac{\sqrt{3}}{2}\sen(\gamma) & \frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\gamma) + \frac{1}{2}\sen(\gamma) \\ -\frac{1}{2}\cos(\gamma) - \frac{\sqrt{3}}{2}\sen(\gamma) & -\frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\gamma) + \frac{1}{2}\sen(\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} icd^+ \\ icq^+ \end{bmatrix} \quad (5.24a)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^- \\ i_{cb}^- \\ i_{cc}^- \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sen(\gamma) \\ -\frac{1}{2}\cos(\gamma) - \frac{\sqrt{3}}{2}\sen(\gamma) & -\frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\gamma) + \frac{1}{2}\sen(\gamma) \\ -\frac{1}{2}\cos(\gamma) + \frac{\sqrt{3}}{2}\sen(\gamma) & \frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\gamma) + \frac{1}{2}\sen(\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} icd^- \\ icq^- \end{bmatrix} \quad (5.24b)$$

La componente de la corriente de compensación correspondiente al error hallado en la tensión homopolar está dada por i_c^0 , y es la misma para cada una de las fases del sistema.

$$i_{ca}^0 = i_{cb}^0 = i_{cc}^0 = i_c^0 \quad (5.24c)$$

Finalmente, las componentes de secuencia de las señales de referencia, incluyendo la componente de secuencia homopolar, pueden sumarse en el sistema a-b-c, para obtener la señales de referencia para corrientes de compensación total ic_a^* , ic_b^* , ic_c^* .

$$\begin{aligned} ic_a^* &= i_{ca}^+ + i_{ca}^- + i_c^0 \\ ic_b^* &= i_{cb}^+ + i_{cb}^- + i_c^0 \\ ic_c^* &= i_{cc}^+ + i_{cc}^- + i_c^0 \end{aligned} \quad (5.25)$$

A continuación, se presenta un análisis sobre el intercambio de potencia entre el inversor y la red debido a las acciones de control dadas en los ejes d-q. Para ello se consideran las tensiones medidas en el PCC, descritas en (5.26), para las cuales V es el valor eficaz de las tensiones de fase, mientras que I representa el valor eficaz de cada una de las corrientes de compensación.

$$\begin{aligned} v_a(t) &= \sqrt{2}V\cos(\omega t + \phi) \\ v_b(t) &= \sqrt{2}V\cos(\omega t + \phi - 120^\circ) \\ v_c(t) &= \sqrt{2}V\cos(\omega t + \phi + 120^\circ) \end{aligned} \quad (5.26)$$

Las corrientes descritas en (5.27), corresponden a una acción de control dada en el eje directo de secuencia positiva y transformada al sistema a-b-c.

$$\begin{aligned}
i_a(t) &= \sqrt{2}I\cos(\omega t + \emptyset) \\
i_b(t) &= \sqrt{2}I\cos(\omega t + \emptyset - 120^\circ) \\
i_c(t) &= \sqrt{2}I\cos(\omega t + \emptyset + 120^\circ)
\end{aligned} \tag{5.27}$$

La potencia que entrega el inversor al hacer control de tensión por el eje directo se calcula en (5.28).

$$\begin{aligned}
P_{3\emptyset} &= P_a + P_b + P_c = VI + VI + VI = 3VI [W] \\
Q_{3\emptyset} &= Q_a + Q_b + Q_c = 0 [VAR]
\end{aligned} \tag{5.28}$$

Una acción de control ejecutada por el eje en cuadratura de secuencia positiva del marco de referencia d-q y transformada al sistema a-b-c, produce el conjunto de corrientes mostrado en (5.29). Se encuentra en (5.30) que cuando las tensiones del PCC alcanzan los valores de referencia, las corrientes generadas demandan del inversor únicamente potencia reactiva.

$$\begin{aligned}
i_a(t) &= \sqrt{2}I\cos(\omega t + \emptyset - 90^\circ) \\
i_b(t) &= \sqrt{2}I\cos(\omega t + \emptyset - 210^\circ) \\
i_c(t) &= \sqrt{2}I\cos(\omega t + \emptyset + 30^\circ)
\end{aligned} \tag{5.29}$$

$$\begin{aligned}
P_{3\emptyset} &= P_a + P_b + P_c = 0 [W] \\
Q_{3\emptyset} &= Q_a + Q_b + Q_c = VI + VI + VI = 3VI [VAR]
\end{aligned} \tag{5.30}$$

Las corrientes en (5.31) y (5.33) corresponden a acciones de control dadas en los ejes de secuencia negativa, directo y cuadratura respectivamente. Cuando se alcanza el objetivo de compensación para las tensiones en el PCC, hay un flujo de potencia nulo, como se observa en (5.32) y (5.34). 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.

$$\begin{aligned}
i_a(t) &= \sqrt{2}I\cos(\omega t + \emptyset) \\
i_b(t) &= \sqrt{2}I\cos(\omega t + \emptyset + 120^\circ) \\
i_c(t) &= \sqrt{2}I\cos(\omega t + \emptyset - 120^\circ)
\end{aligned} \tag{5.31}$$

$$\begin{aligned}
P_{3\emptyset} &= P_a + P_b + P_c = VI - \frac{1}{2}VI - \frac{1}{2}VI = 0 [VA] \\
Q_{3\emptyset} &= Q_a + Q_b + Q_c = \frac{\sqrt{3}}{2}VI - \frac{\sqrt{3}}{2}VI = 0 [VA]
\end{aligned} \tag{5.32}$$

$$i_a(t) = \sqrt{2}I\cos(\omega t + \phi + 90)$$

$$i_b(t) = \sqrt{2}I\cos(\omega t + \phi + 210^\circ) \quad (5.33)$$

$$i_c(t) = \sqrt{2}I\cos(\omega t + \phi - 30^\circ)$$

$$P_{3\phi} = P_a + P_b + P_c = \frac{\sqrt{3}}{2}VI - \frac{\sqrt{3}}{2}VI = 0 \text{ [VA]}$$

$$Q_{3\phi} = Q_a + Q_b + Q_c = -VI + \frac{1}{2}VI + \frac{1}{2}VI = 0 \text{ [VA]} \quad (5.34)$$

El análisis de flujo de potencia hecho de (5.26) a (5.34), permite ver las implicaciones en potencia que tiene cada una de las acciones de control dadas en los ejes d-q. Es claro que la componente directa de secuencia positiva en corriente, debe ser fijada a cero para evitar la entrega de potencia activa del inversor a la red; mientras que el control ejecutado por cualquiera de los otros ejes d-q, sólo demanda energía reactiva y no activa, que puede ser suministrada por el capacitor del bus de DC. El esquema de control de tensión basado en el flujo de potencia es el propuesto en la figura 5.7.

Se debe tener en cuenta que el análisis hecho es válido para condiciones de tensión balanceada, por lo que durante el periodo de transición del desbalance al estado impuesto por las referencias, se requiere alguna cantidad de potencia activa que debe ser asumida por el inversor. Esta potencia de pérdidas se recupera de la red por medio del control de tensión del bus de DC.

Capítulo 6

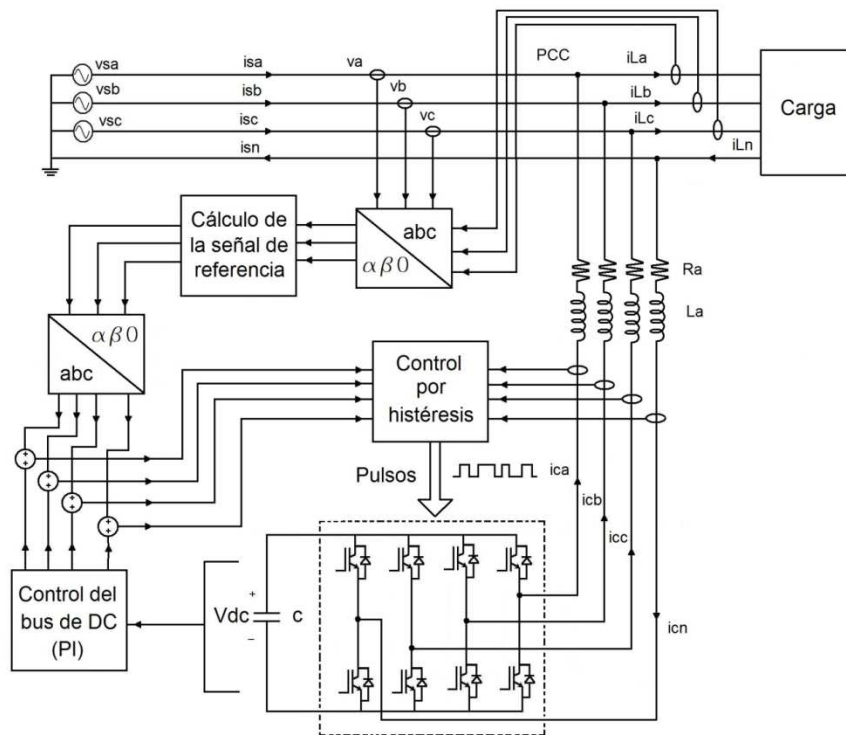
El funcionamiento del D-STATCOM se ha puesto a prueba ante diferentes tipos de perturbaciones en las corrientes y tensiones de la red. En este capítulo se presentan los resultados y el análisis de las simulaciones para sus dos modos de control.

6. SIMULACIONES DE LOS MODELOS DEL D-STATCOM

Para verificar el funcionamiento del D-STATCOM y el desempeño de sus algoritmos de control, se realizaron en ATPDraw, modelos del compensador conectados a una red de distribución afectada por perturbaciones en corriente o tensión.

6.1 D-STATCOM en modo control de corriente

Figura 6.1. Esquema del D-STATCOM como compensador en modo corriente



El esquema general para el D-STATCOM como compensador en el modo control de corriente se muestra en la figura 6.1. Para las simulaciones del compensador en este

modo de operación, se considera un sistema de distribución trifásico de cuatro hilos con tensiones balanceadas a la frecuencia fundamental, razón por la cual no se tienen en cuenta las impedancias en las líneas. Además, se muestran los lazos de control para la estimación de las corrientes de compensación, el control del convertidor y el control del bus de DC.

6.1.1 Parámetros del D-STATCOM, estrategias de control y escenarios de compensación

Para los modelos de D-STATCOM simulados, se usaron los siguientes parámetros y se tuvieron en cuenta las siguientes estrategias de control:

Parámetros del convertidor: la energía requerida para la compensación y la tensión de operación del bus de DC del convertidor, se obtiene de un condensador de $C = 400$ [μF]. El acople entre el D-STATCOM y la red se hace por medio de una impedancia RL serie, cuyos valores son $R = 5$ [Ω] y $L = 2$ [mH].

Control de la tensión del bus de DC: Se estableció una tensión para el bus de DC de 500 [V], controlados mediante un regulador PI como se describió en el capítulo 3, sección 3.3.1; con valores de $K_p = 10$ y $K_i = 20$, seleccionados mediante pruebas iterativas, buscando una respuesta transitoria de bajo sobrepaso, rápido tiempo de establecimiento y seguimiento del valor de referencia.

Control del convertidor de potencia: El control de las secuencias de conmutación de los transistores en el convertidor, se realizó mediante el control de histéresis de corriente descrito en el capítulo 3, sección 3.3.4. Se seleccionó una banda de histéresis de 0.01 [A]

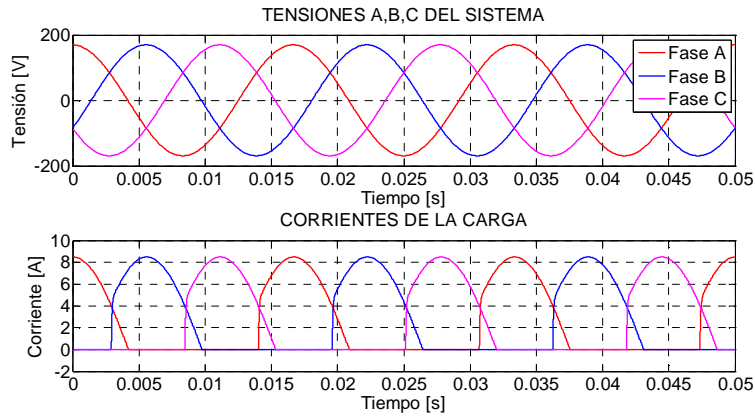
Cálculo de las corrientes de compensación: Las corrientes de compensación, se calculan mediante los algoritmos basados en las teorías p-q sin componente homopolar, p-q, p-q modificada, d-q y p-q-r, descritos en el capítulo 4, sección 4.1.

Los escenarios de compensación presentados comprenden armónicos de corriente por la red, bajo factor de potencia y desbalances de carga. Se considera un conjunto de tensiones balanceadas, a la frecuencia de 60 [Hz], sin distorsión armónica, con un valor eficaz de 208 [V] línea-línea medidos en el en el PCC.

6.1.2 Simulaciones del D-STATCOM como compensador de armónicos de corriente

En este caso se considera una carga no lineal conectada al PCC, constituida por tres rectificadores monofásicos controlados de media onda, de $0,346$ [kW] cada uno, los cuales se aprecian en el esquema de la figura 1 del Anexo A. Las formas de onda de las corrientes que consume la carga por cada una de las fases y la tensión a la cual es alimentada, se muestran en la figura 6.2.

Figura 6.2. Tensiones y corrientes por fase en el punto de conexión de una carga no lineal



En la figura 6.3, se puede ver la magnitud y la fase de la transformada de Fourier de la corriente de la carga antes de la compensación. Se observa que la distorsión generada en la corriente por la no linealidad de la carga se debe a la aparición de armónicos ubicados en todas las frecuencias múltiplo de la fundamental y a un aporte importante de una componente de DC.

En la mayoría de las simulaciones que se presentan a continuación, se muestran cuatro señales diferenciadas como se indica:

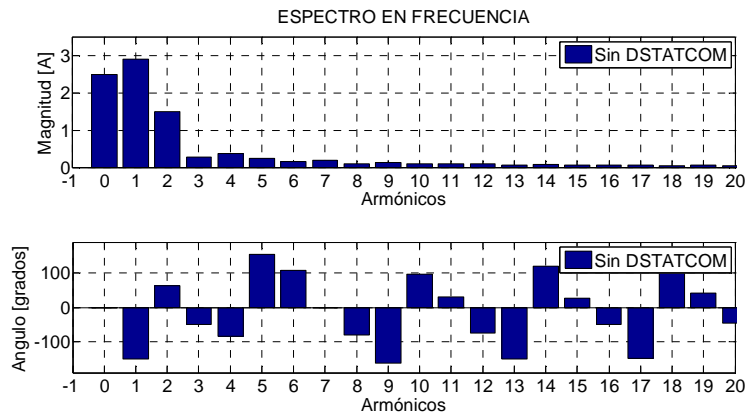
Señal de color rojo: corriente de la carga para la fase A [I_1]

Señal de color verde: corriente de la red para la fase A [I_2]

Señal de color azul: corriente de compensación, generada por el inversor para la fase A [I_3]

Señal de color rosado: señal de referencia calculada para la fase A [I_4]

Figura 6.3. Espectro en frecuencia de la corriente con armónicos para una carga no lineal



6.1.2.1 Análisis de las simulaciones

El conjunto de corrientes relacionadas con la fase A del sistema, antes y después de la conexión del compensador estático, se muestran en la figura 6.4, en donde puede observarse la no linealidad de las corrientes inyectadas por el D-STATCOM y el resultado de la compensación de corriente realizada mediante cada una de las teorías usadas.

La compensación se inicia a los 0,35 [s], y hace que se reduzca la cantidad de armónicos en las corrientes de la red. Sin embargo, los resultados de la compensación dependen del algoritmo usado en el cálculo de las señales de referencia. Se observa, que la teoría p-q sin componente homopolar muestra deficiencias en el cálculo de la corriente de compensación cuando se presentan cargas que consumen corrientes homopolares, pues estas corrientes de secuencia cero continúan en el sistema. En la figura 6.5a se muestra el retorno de las componentes de secuencia cero por el neutro cuando se utiliza ésta teoría.

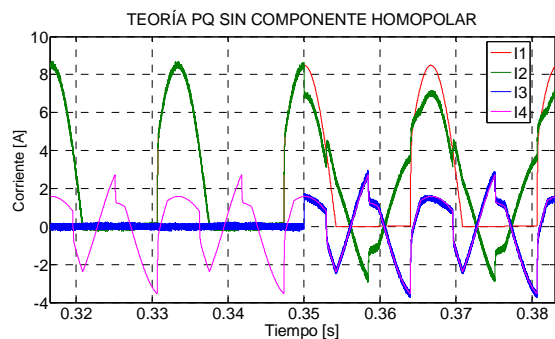
En los casos en los que se usa la teoría p-q con componente homopolar, p-q modificada, d-q y p-q-r, la forma de onda de la corriente de la red es corregida, haciendo que se mitigue el contenido de armónicos de la señal inicial. La compensación hecha por el D-STATCOM con las teorías mencionadas, hace que las corrientes por el neutro desaparezcan. Este efecto de la compensación se observa en la Figura 6.5b, donde se muestra la corrientes por el neutro usando éstas teorías.

El rizado que se aprecia en las corrientes de compensación y en las corrientes de la red se debe al algoritmo de control del convertidor, que hace que las conmutaciones de los transistores de potencia produzcan un error en las corrientes sintetizadas con respecto a las señales de referencia, determinado por la banda de histéresis. El resultado de usar un control basado en histéresis para generar las corrientes de compensación [I_3], se observa en la figura 6.4; igualmente se evidencia que las corrientes sintetizadas haciendo uso de este controlador, siguen la señal de referencia [I_4].

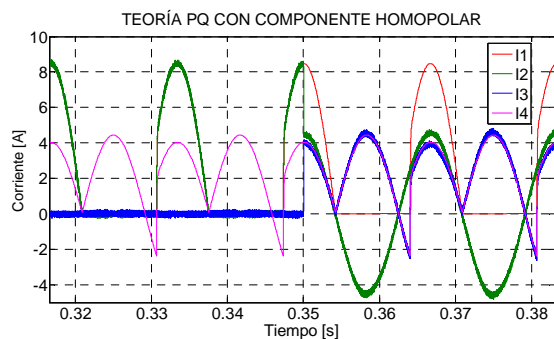
En la figura 6.6, se muestra la dinámica de la tensión en el capacitor. Inicialmente se carga hasta el valor pico de la tensión de línea (300 [V] aproximadamente). Posteriormente, a los 0,15 [s] se conecta el control del nivel de DC, para hacer que la tensión en el capacitor llegue hasta 500 [V], establecidos como referencia. A los 0,35 [s], la tensión del bus de DC ya se ha estabilizado y el D-STATCOM se conecta a la red. A partir de este momento, la compensación realizada hace que se presenten fluctuaciones en la tensión del capacitor alrededor del valor de referencia, causadas por las pérdidas de potencia inherentes a las conmutaciones en el inversor. Sin embargo, estas pérdidas son compensadas por el control del bus de DC.

En la figura 6.7, se muestra las potencias instantánea y promedio, tanto para la carga como para el compensador; las cuales se identifican como P_L , P_{Lprom} , P_C y P_{Cprom} , respectivamente. Estas potencias instantáneas pueden descomponerse en una potencia promedio y una potencia oscilante. Los valores promedio indican el consumo de potencia activa de la carga y las pérdidas de potencia en el inversor; mientras que la parte oscilatoria de la potencia, se debe a la energía involucrada en los armónicos y tiene un promedio nulo, lo cual hace posible que pueda ser entregada a la red por el D-STATCOM.

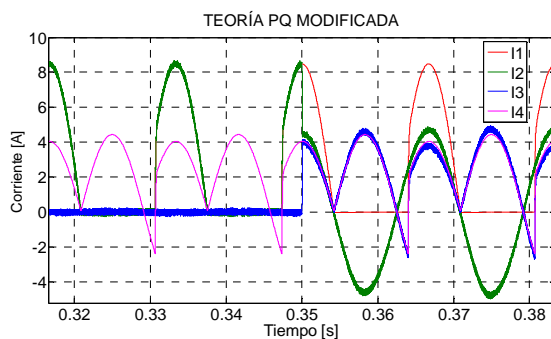
Figura 6.4. Corrientes para la compensación de armónicos



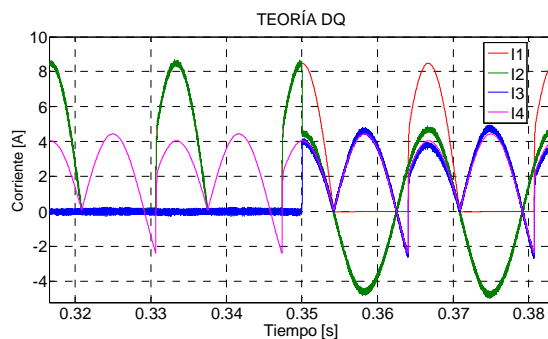
a. Usando la teoría p-q sin componente homopolar



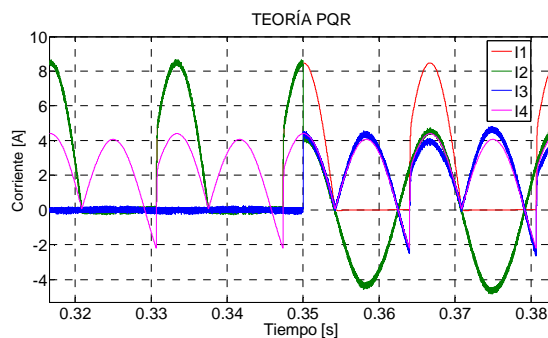
b. Usando la teoría p-q con componente homopolar



c. Usando la teoría p-q modificada

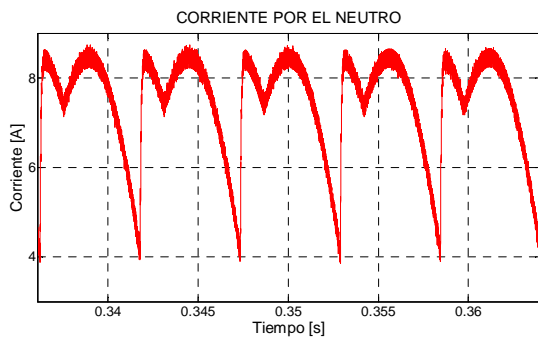


d. Usando la teoría d-q

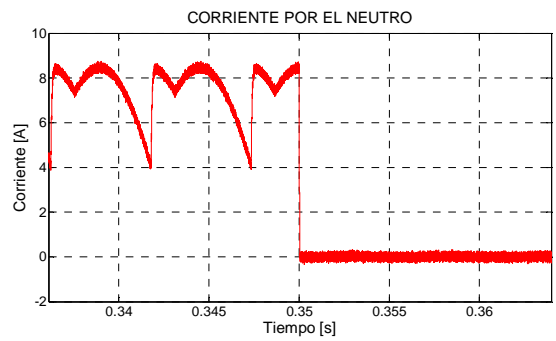


e. Usando la teoría p-q-r

Figura 6.5. Corriente por el neutro durante la compensación de armónicos

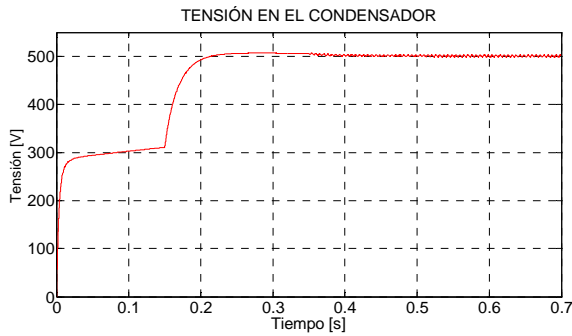


a. Usando la teoría p-q sin componente homopolar

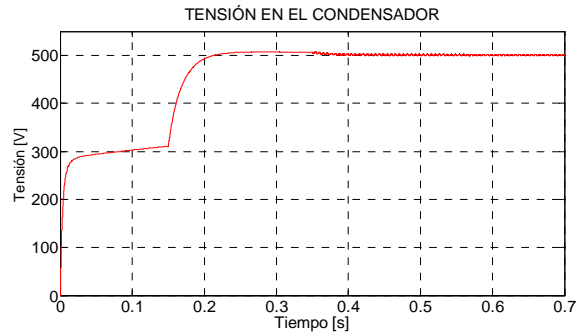


b. Usando las teorías p-q con componente homopolar, p-q modificada, d-q, p-q-r.

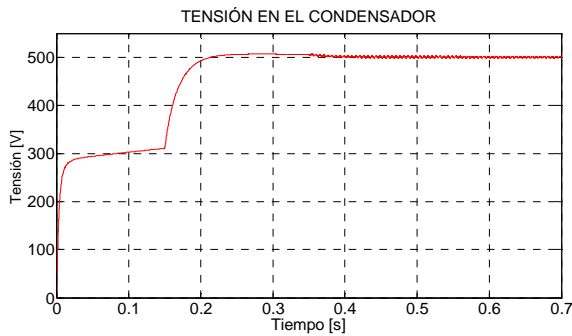
Figura 6.6. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM en la compensación de armónicos



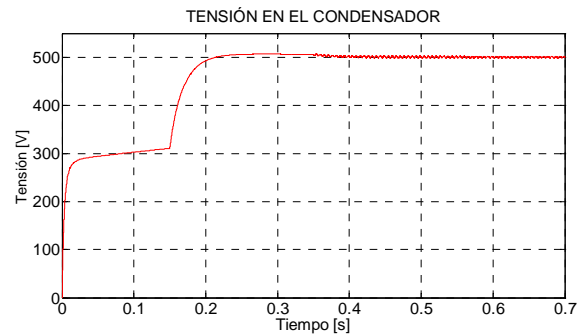
a. Usando la teoría p-q sin componente homopolar



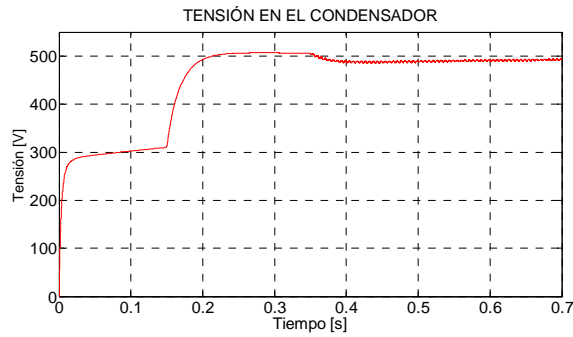
b. Usando la teoría p-q con componente homopolar



c. Usando la teoría p-q modificada

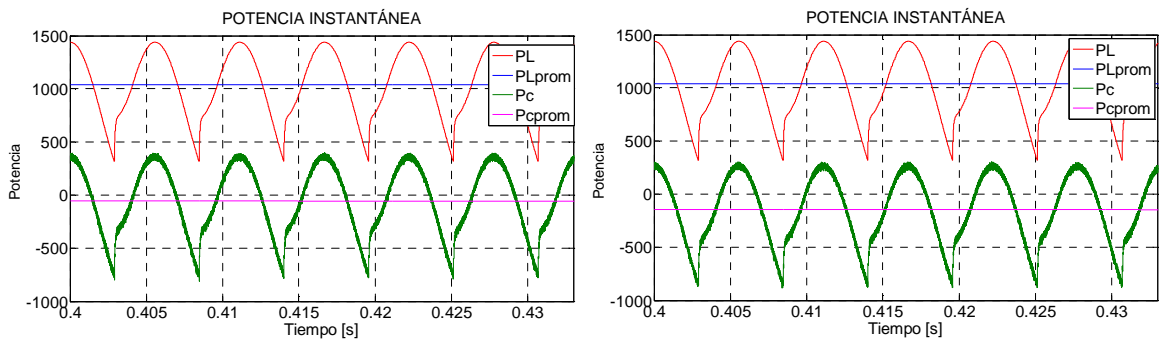


d. Usando la teoría d-q



e. Usando la teoría p-q-r

Figura 6.7. Potencia instantánea consumida por la carga y entregada por el compensador durante la compensación de armónicos



a. Usando la teoría p-q sin componente homopolar

b. Usando las teorías p-q con componente homopolar, p-q modificada, d-q, p-q-r.

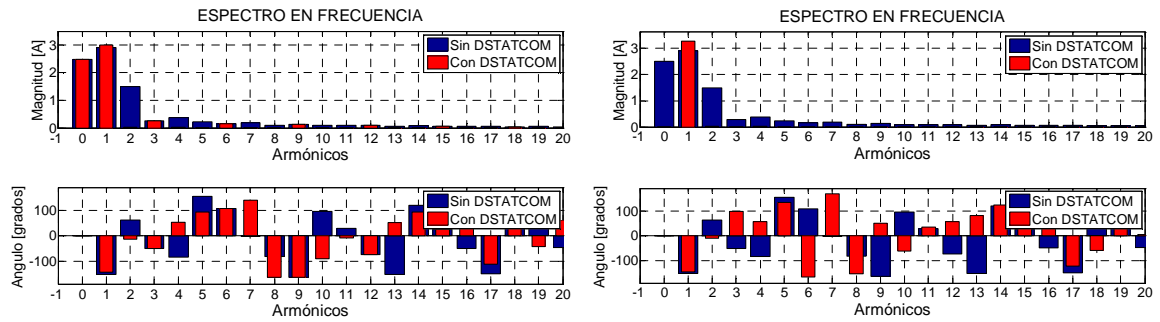
La potencia activa es suministrada por la red, y en referencia con las pérdidas del compensador, este flujo de potencia hacia el capacitor, es el que permite mantener la tensión en el valor preestablecido. La potencia no activa que consume la carga es entregada a la red por medio de las corrientes de compensación. Puede observarse que la teoría p-q sin componente homopolar cubre solo parcialmente la demanda de potencia no activa, mientras que las demás teorías simuladas pueden ajustar mejor la potencia no activa suministrada a lo requerido por la carga.

En la figura 6.8, se muestra el espectro de frecuencia para las corrientes de la red medidas en el PCC antes y después de la compensación. Esta comparación, permite ver como la inyección de las corrientes de compensación disminuye el contenido de armónicos en las corrientes de la red.

Según el espectro de frecuencia, se observa que la teoría p-q sin componente homopolar no puede compensar todos los armónicos de las corrientes de la red. El uso de esta teoría permite que se reduzca la distorsión, pues los armónicos de secuencia positiva y negativa

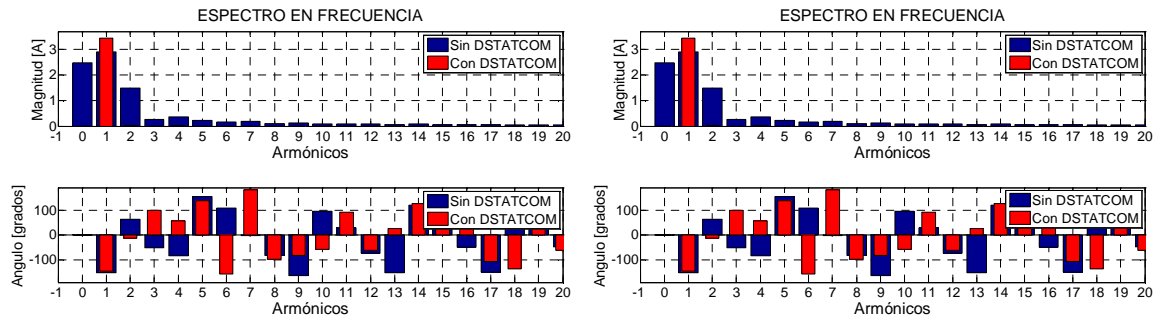
son compensados en un alto porcentaje; sin embargo la componente de DC y los demás armónicos de secuencia homopolar continúan circulando por la red.

Figura 6.8. Espectro en frecuencia de la corriente de la red antes y después de la compensación de armónicos



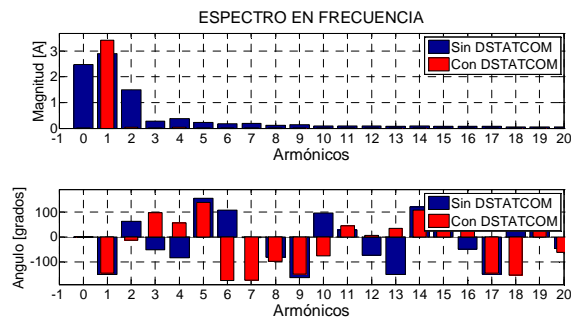
a. Usando la teoría p-q sin componente homopolar

b. Usando la teoría p-q con componente homopolar



c. Usando la teoría p-q modificada

d. Usando la teoría d-q



e. Usando la teoría p-q-r

Las corrientes de compensación generadas mediante las teorías p-q con componente homopolar, p-q modificada, d-q y p-q-r, incluyen la distorsión causada por las corrientes de secuencia homopolar que consume la carga; por lo tanto, además de mitigar los armónicos de secuencia positiva y negativa, pueden compensar los niveles de DC y los armónicos de secuencia homopolar. Por esto, el espectro de frecuencia muestra que hay compensación de todas las corrientes armónicas de la red.

La distorsión armónica total de la forma de onda de las señales de corriente (THD- *Total Harmonic Distortion*), se calcula por medio de la expresión (6.1), en donde I_n e I_1 son los valores eficaces de corriente para la componente armónica de orden n y la componente fundamental, respectivamente [1].

$$THD = \sqrt{\sum_{\substack{n=0 \\ n \neq 1}}^N \left(\frac{I_n^2}{I_1^2}\right)} \quad (6.1)$$

En la Tabla 2 se muestra el THD calculado para las corrientes de la red, antes y después de la compensación para cada una de las teorías usadas. Se observa que la calidad de la forma de onda mejora como resultado de la compensación, y que las teorías que incluyen la componente homopolar para el cálculo de las corrientes de compensación producen los mejores resultados; sin embargo, un pequeño porcentaje de distorsión en corriente permanece en la red durante la compensación, el cual es debido al rizado de alta frecuencia de las corrientes de compensación.

Tabla 2. Distorsión armónica total antes y después de la compensación de armónicos

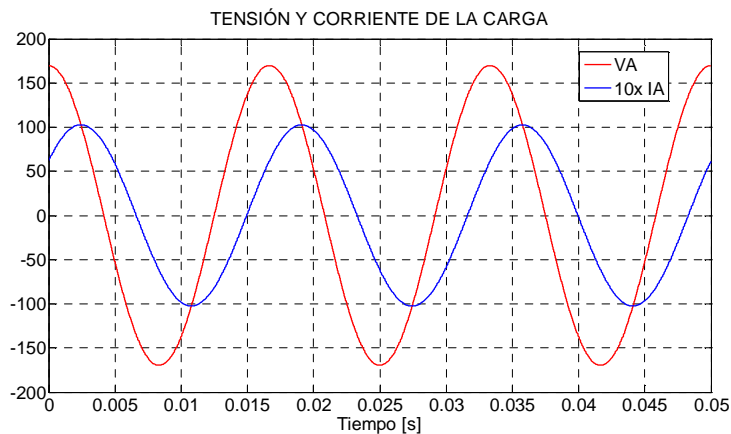
TDH antes de la compensación	102,6020%
TDH usando la teoría p-q sin componente homopolar	84,1501%
TDH usando la teoría p-q con componente homopolar	2,5848%
TDH usando la teoría p-q modificada	2,4595%
TDH usando la teoría d-q	2,4595%
TDH usando la teoría p-q-r	2,4602%

Igualmente, se calculó el factor de potencia de la fuente de alimentación del sistema, antes y después de la compensación con cada una de las teorías. Inicialmente, se presenta un factor de potencia de 0,99; debido a la impedancia conectada entre el PCC y el rectificador. Después de la compensación, el factor de potencia se hace igual a 1 en todos los casos, entonces el compensador además de la potencia de distorsión, también entrega la potencia reactiva de la carga, haciendo que las corrientes de la red estén en fase con la tensión.

6.1.3 Simulaciones del D-STATCOM como compensador de reactivos

Para este caso, se usó una carga RL equilibrada conectada en Y al PCC, la cual puede apreciarse en el esquema de la figura 2 del anexo A. La carga tiene una resistencia de $10\ \Omega$ y una inductancia de $35\ \text{mH}$ conectadas en serie en cada una de las fases, y produce una corriente por la red con un factor de potencia de 0,6 en atraso. La tensión a la cual es alimentada la carga y las corrientes que produce por la red se muestran para la fase A, en la figura 6.9. En esta figura, la corriente se ha escalado en un factor de 10 para compararla con la señal de tensión del PCC.

Figura 6.9. Tensiones y corrientes por fase en el punto de conexión de una carga altamente inductiva

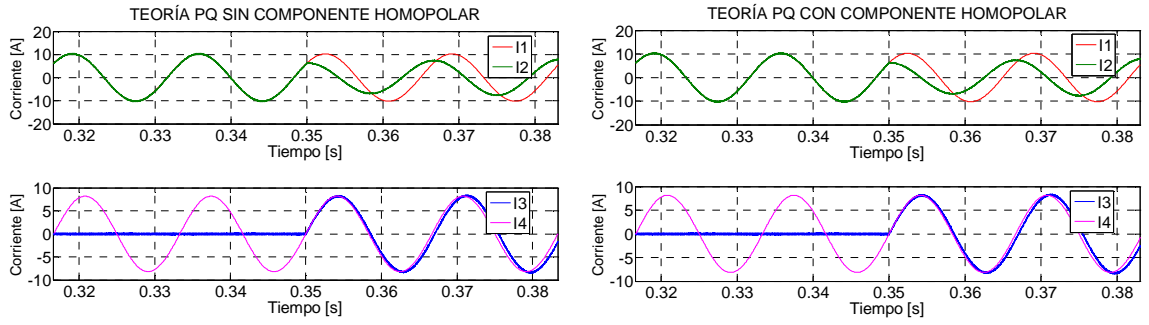


6.1.3.1 Análisis de las simulaciones

En la figura 6.10, se presentan las señales de corriente que se suman en PCC antes y después de la conexión del compensador a la red. Se observa el desempeño del D-STATCOM funcionando como compensador del factor de potencia, y calculando las señales de referencia I_4 que permiten generar las corrientes de compensación I_3 , haciendo uso de las teorías p-q sin componente homopolar, p-q con componente homopolar, p-q modificada, d-q y p-q-r.

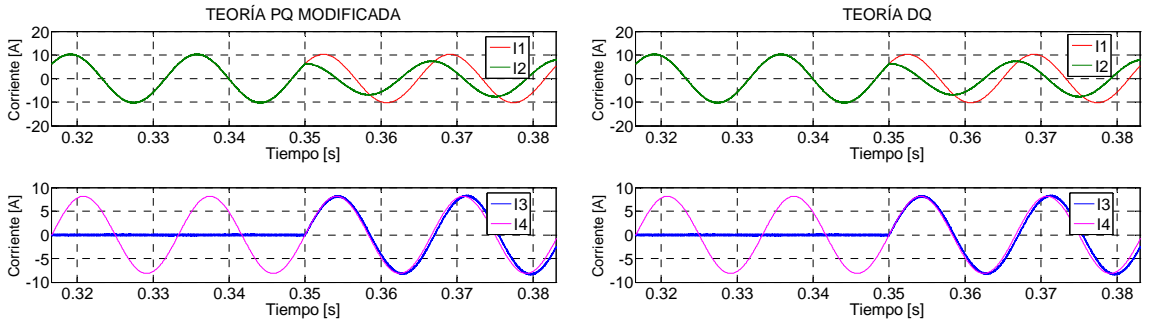
En las simulaciones presentadas, se muestra que la fuente suministra la corriente total requerida por la carga I_1 hasta los $0,35\ \text{s}$; en ese momento, el D-STATCOM se conecta y hace que se produzca un cambio en las características de la corriente de la red I_2 . Durante la compensación se reduce la amplitud de las corrientes por la red hasta el mínimo valor, que permite transportar la misma potencia activa que la corriente total antes de la compensación. La corriente de la carga no se modifica, por lo tanto, la diferencia entre el consumo total y lo que aporta la red, es suministrado por el D-STATCOM en las corrientes de compensación I_3 .

Figura 6.10. Corrientes en la compensación de reactivos



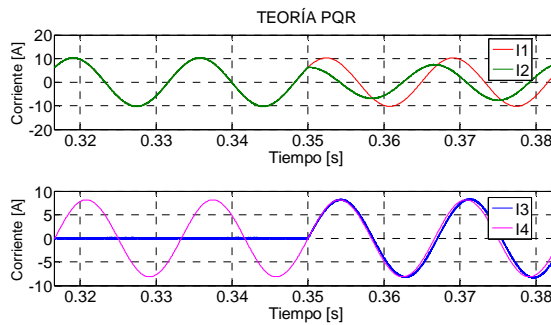
a. Usando la teoría p-q sin componente homopolar

b. Usando la teoría p-q con componente homopolar



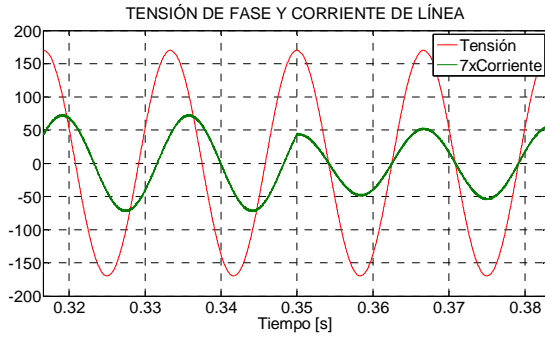
c. Usando la teoría p-q modificada

d. Usando la teoría d-q

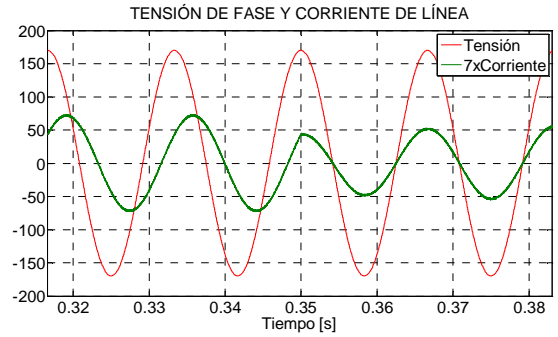


e. Usando la teoría p-q-r

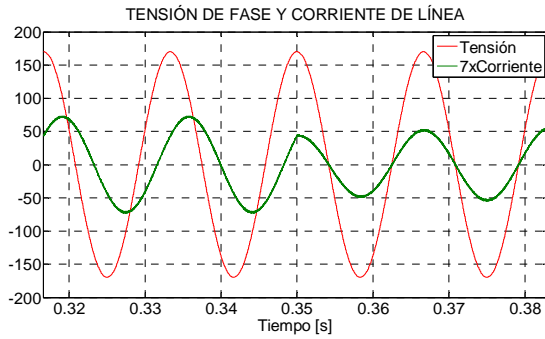
Figura 6.11. Tensión y corriente en el PCC para la fase A durante la compensación de reactivos



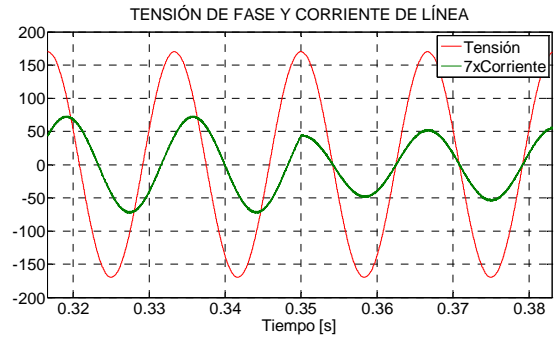
a. Usando la teoría p-q sin componente homopolar



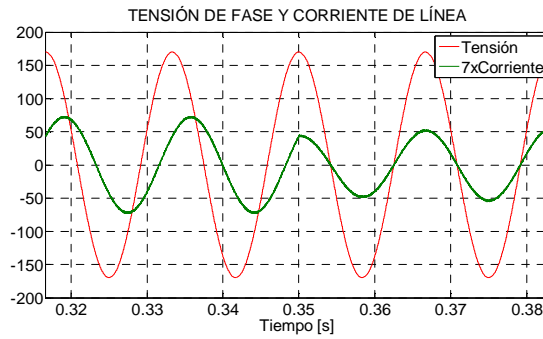
b. Usando la teoría p-q con componente homopolar



c. Usando la teoría p-q modificada



d. Usando la teoría d-q



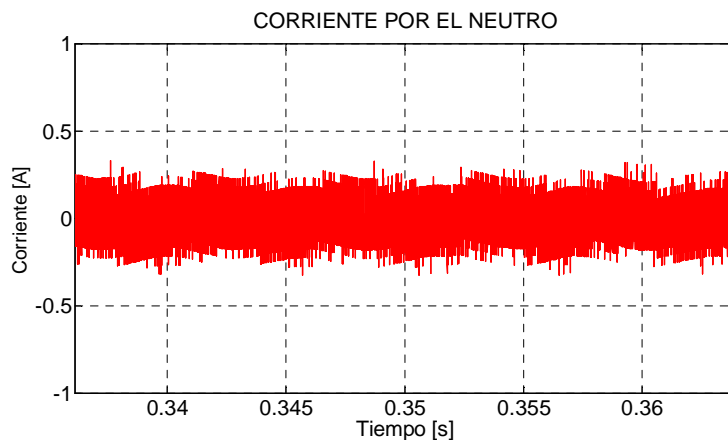
e. Usando la teoría p-q-r

Durante la compensación, la corriente de la red es la componente asociada al consumo de potencia activa de la carga y por esta razón queda en fase con la tensión en el PCC, como se muestra en la figura 6.11. Por lo tanto, el D-STATCOM permite compensar el

factor de potencia y tiene el mismo desempeño para todos los casos de la teoría p-q y sus modificaciones, tal como se muestra en las simulaciones. El cálculo del factor de potencia antes y después de la compensación muestra un cambio de 0,6 a 1.

En este caso, las teorías usadas hacen que tanto las corrientes de la red, como las entregadas por el compensador en el PCC se mantengan balanceadas, de esta manera, no se produce retorno alguno de corriente por el neutro, tal como se presenta en la figura 6.12.

Figura 6.12. Corriente por el neutro durante la compensación de reactivos



La potencia de la carga y del compensador se muestra en la figura 6.13. P_L y Q_L , representan el consumo de potencia activa y reactiva de la carga y P_C y Q_C , son la potencia de pérdidas del convertidor y la potencia reactiva entregada a la red por el D-STATCOM. Se puede ver que las componentes de potencia activa y reactiva de la carga no cambian en ningún instante de tiempo, y que a partir de los 0,35 [s] el suministro de potencia reactiva es asumido por el compensador, en tanto que la potencia activa sigue siendo entregada por la fuente.

En las simulaciones presentadas se observa un rizado, tanto en las corrientes de la red como en las corrientes de compensación entregadas por el D-STATCOM, el cual se deben a las conmutaciones en el inversor. Haciendo el cálculo del factor THD, se encuentra que hay algún contenido de armónicos en la red debido a las corrientes de compensación. Estos armónicos se presentan a frecuencias muy altas, pues son consecuencia de la conmutación de los transistores del inversor, lo que señala que el precio de la compensación del factor de potencia, es el ingreso de armónicos de alta frecuencia a la red. En la Tabla 3, se muestra el THD de las corrientes de la red al hacer compensación a partir de cada una de las teorías usadas para el cálculo de las señales de referencia de las corrientes de compensación.

Tabla 3. Distorsión armónica total antes y después de la compensación de reactivos

TDH antes de la compensación	0%
TDH teoría p-q sin componente homopolar	1,2115%
TDH teoría p-q con componente homopolar	1,2068%
TDH teoría p-q modificada	1,2068%
TDH teoría d-q	1,2068%
TDH teoría p-q-r	1,2071%

Figura 6.13. Potencia consumida por la carga y entregada por el D-STATCOM durante la compensación de reactivos

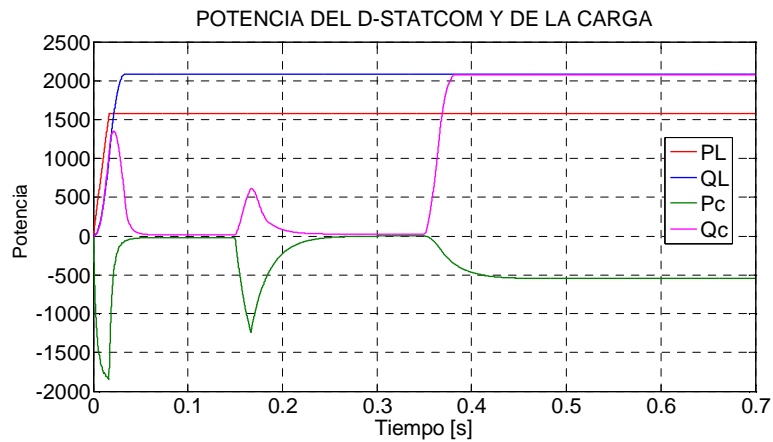
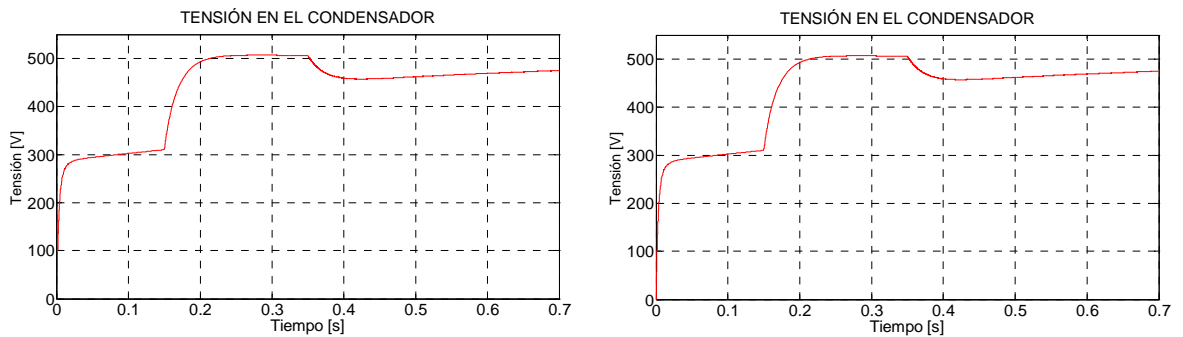
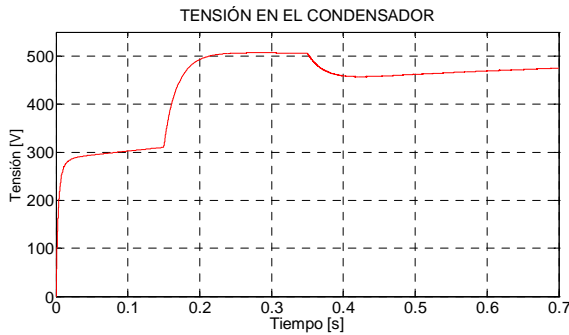


Figura 6.14. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM en la compensación de reactivos

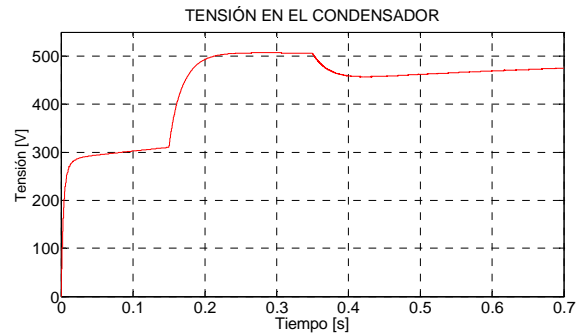


a. Usando la teoría p-q sin componente homopolar

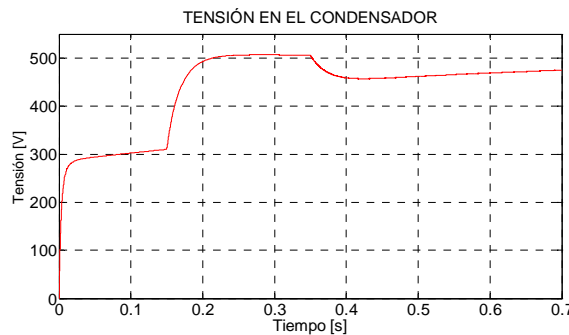
b. Usando la teoría p-q con componente homopolar



c. Usando la teoría p-q modificada



d. Usando la teoría d-q



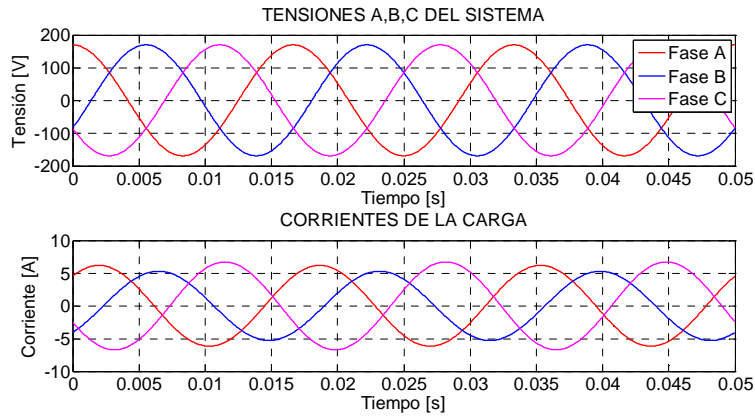
e. Usando la teoría p-q-r

La tensión en el capacitor del bus de continua antes y después del funcionamiento del compensador estático para cada una de las teorías se muestra en la figura 6.14. La tensión es llevada hasta el valor de referencia para el bus de DC, y en el momento en que se inicia la compensación a los 0,35 [s], ya se ha estabilizado. Se observa que la tensión después del ingreso del compensador cae por debajo del valor de 500 [V], establecido como referencia. Sin embargo, la acción del control del bus de DC, recupera el valor de la tensión y la lleva nuevamente al valor de referencia. Esta caída de tensión, se debe al estado transitorio que se produce al momento de conectar el D-STATCOM a la red y a las pérdidas de potencia activa en las conmutaciones de los transistores del inversor.

6.1.4 Simulaciones del D-STATCOM como compensador de desbalance de carga

Las tensiones y corrientes que alimentan una carga RL desbalanceada, se presentan en la figura 6.15. La carga está conectada en una configuración Y con neutro tal como aparece en el esquema de la figura 3 del anexo A; y consta de: $R_a = 20 \text{ } [\Omega]$, $L_a = 50 \text{ [mH]}$; $R_b = 30 \text{ } [\Omega]$, $L_b = 30 \text{ [mH]}$ y $R_c = 25 \text{ } [\Omega]$, $L_c = 10 \text{ [mH]}$; para las fases A,B y C, respectivamente.

Figura 6.15. Tensiones y corrientes por fase en el punto de conexión de una carga desbalanceada



En estas condiciones de carga, las corrientes de la red están conformadas por componentes de secuencia positiva, negativa y cero. La componente positiva, es propia de sistemas balanceados, mientras que las componentes de secuencia negativa y cero, aparecen debido al desbalance. La relación entre éstas y la componente de secuencia positiva, permite obtener una medida del desbalance de corriente, lo cual se hace por medio de las siguientes expresiones:

$$u_2 = \frac{I_2}{I_1} \quad (6.2)$$

$$u_0 = \frac{I_0}{I_1} \quad (6.3)$$

En donde u_2 representa el desbalance debido a la componente de corriente de secuencia negativa, u_0 representa el desbalance producido por la componente de secuencia cero e I_1 , I_2 , I_0 , son las componentes de corriente de secuencia positiva, negativa y cero respectivamente, para la frecuencia fundamental [30, 31].

Las magnitudes de los factores de desbalance u_2 y u_0 , dadas en porcentaje, son usadas usualmente para indicar el grado de desbalance en corriente [30].

Los factores de desbalance medidos mediante (6.2) y (6.3) para este caso se muestran en la tabla 4.

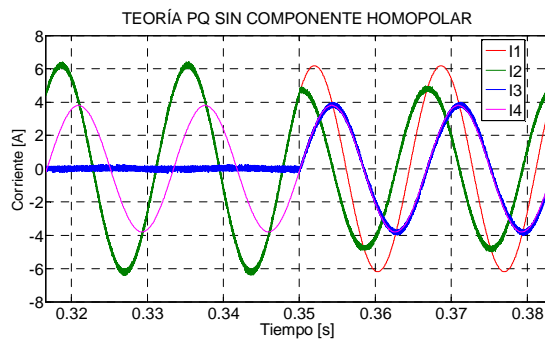
6.1.4.1 Análisis de las simulaciones

La conexión del D-STATCOM a la red para compensar desbalances de carga, busca que el conjunto de corrientes suministradas por la fuente de alimentación del sistema, sean balanceadas y en fase con la tensión del PCC.

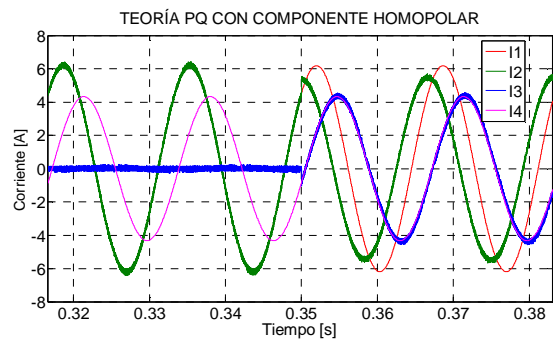
Las señales de corriente que se suman en el PCC antes y después de la compensación, se muestran en la figura 6.16 para la fase A. Puede observarse la corriente que consume la carga I_1 , la corriente a través de la red I_2 , las corrientes de compensación I_3 y su señal de referencia I_4 , calculadas usando la teoría p-q y las modificaciones que se presentaron.

El D-STATCOM se conecta a la red a los 0,35 [s] y realiza la compensación a partir de ese momento, lo cual se manifiesta en el cambio de la amplitud y fase de las corrientes por la red.

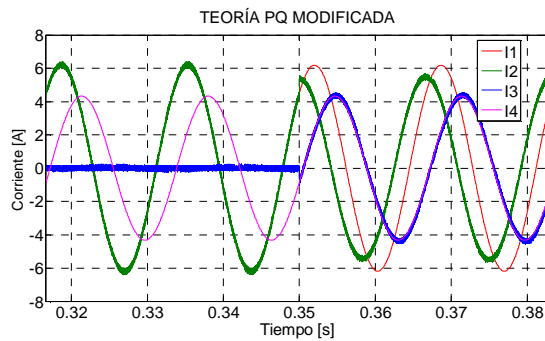
Figura 6.16. Corrientes en la compensación de desbalance de carga



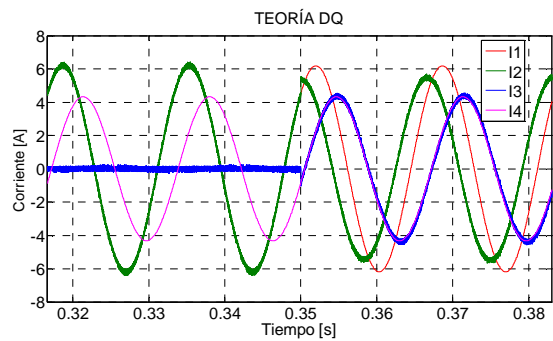
a. Usando la teoría p-q sin componente homopolar



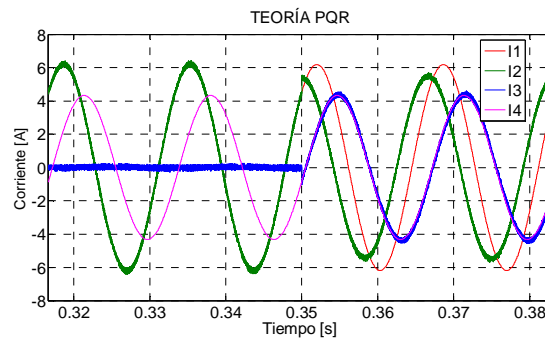
b. Usando la teoría p-q con componente homopolar



c. Usando la teoría p-q modificada

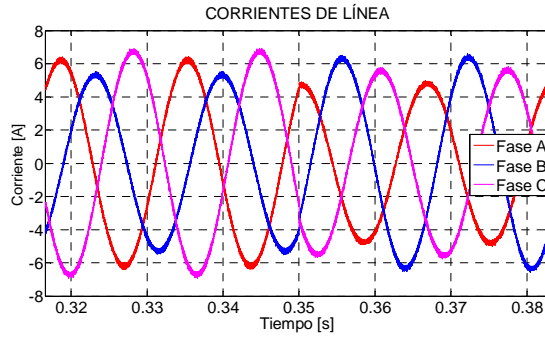


d. Usando la teoría d-q

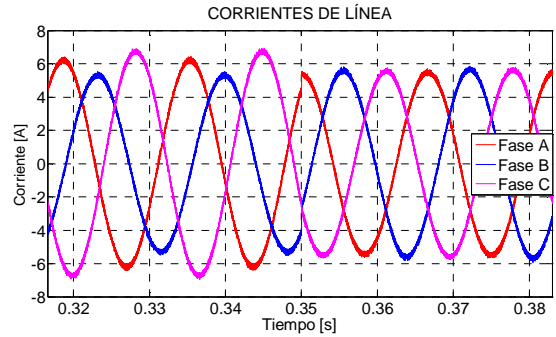


e. Usando la teoría p-q-r

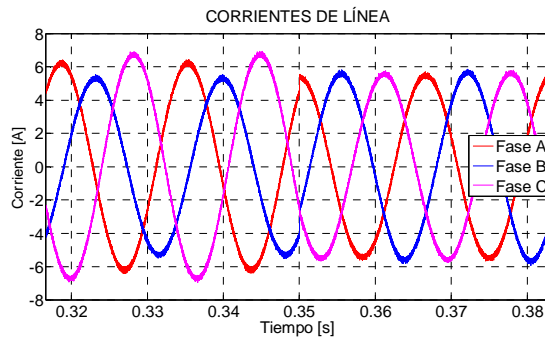
Figura 6.17. Corrientes de línea antes y después de la compensación del desbalance de carga



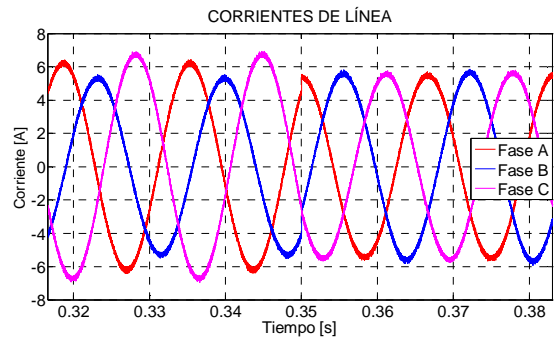
a. Usando la teoría p-q sin componente homopolar



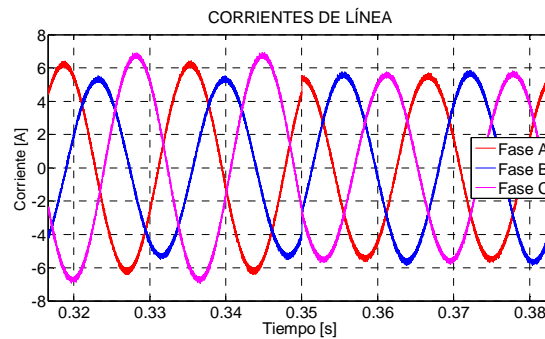
b. Usando la teoría p-q con componente homopolar



c. Usando la teoría p-q modificada



d. Usando la teoría d-q



e. Usando la teoría p-q-r

El resultado de la compensación de las corrientes de la red, se muestra en la figura 6.17. La simulación en la que el cálculo de las corrientes de compensación, se realiza usando la teoría p-q sin componente homopolar, muestra que esta no es la mejor opción para

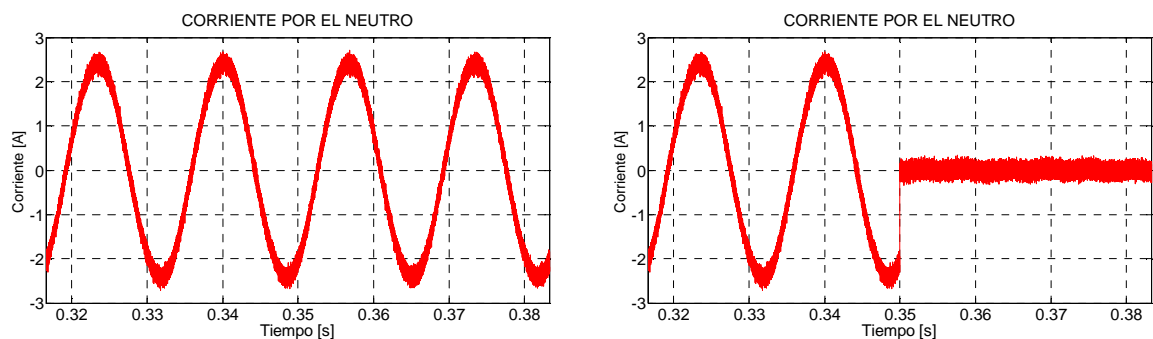
mitigar el desbalance de carga, debido a que una parte importante del desbalance de corriente está representado por la componente homopolar; la cual no es tenida en cuenta dentro del algoritmo de compensación. Por otra parte, los resultados que se obtienen al aplicar las teorías p-q con componente homopolar, p-q modificada, d-q y p-q-r, muestran un desempeño satisfactorio y similar en todos los casos, para balancear las corrientes de la carga.

Tabla 4. Factores de desbalance de corriente antes y después de la compensación de carga desbalanceada

Factores de Desbalance	$ u_2 $ [%]	$ u_0 $ [%]
Sin compensación	24,16	13,65
Usando la teoría p-q sin componente homopolar	0,08	14,48
Usando la teoría p-q con componente homopolar, p-q modificada, d-q, p-q-r	0,08	0

La presencia de corriente por el neutro antes y durante la compensación puede verse en la figura 6.18. Se observa que la teoría p-q sin componente homopolar, no puede eliminar la corriente de secuencia cero, la cual retorna a la red a través del neutro. Por el contrario, las teorías que incluyen la componente homopolar en el cálculo de las corrientes de compensación, pueden hacer que no haya retorno de corriente por el neutro de la red.

Figura 6.18. Corriente por el neutro antes y después de la compensación de desbalances de carga



a. Usando la teoría p-q sin componente homopolar

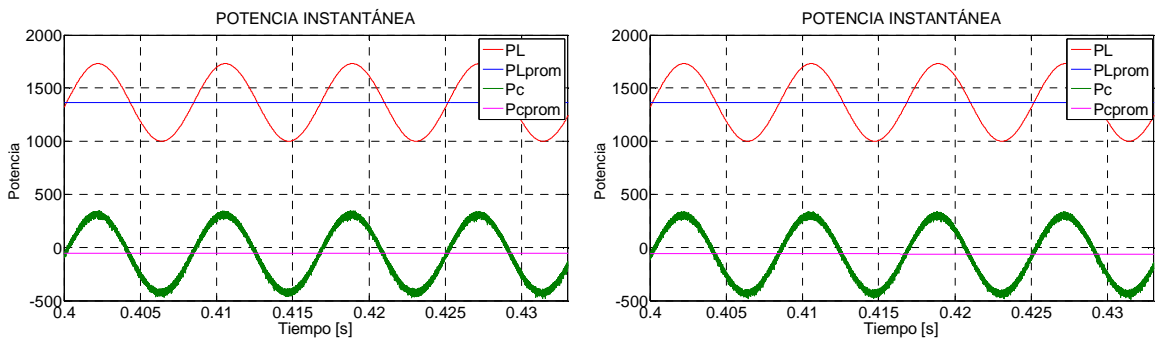
b. Usando las teorías p-q con componente homopolar, p-q modificada, d-q, p-q-r

La corriente consumida por la carga $[I_1]$, no tiene contenido de armónicos, por tratarse de una carga lineal. Sin embargo la conexión del D-STATCOM introduce un rizado en las corrientes de la red $[I_3]$, que se debe a las conmutaciones en los transistores de potencia del convertidor, para sintetizar las corrientes de compensación $[I_3]$. El THD calculado para las corrientes de línea, se muestra en la tabla 6 para los modelos de D-STATCOM

probados. Se observa que debido al rizado de las corrientes de compensación se introduce un pequeño nivel de distorsión armónica a la red.

Durante la compensación se busca que las corrientes de la red en conjunto transporten la misma potencia activa que la consumida por la carga trifásica, y que el D-STATCOM entregue la potencia no activa que se requiere en cada fase. La potencia transportada por la red se distribuye en igual proporción entre las tres fases del sistema, lo que produce que las corrientes sean balanceadas y que tengan el mínimo valor eficaz posible. En el punto de conexión, el D-STATCOM inyecta la potencia no activa requerida por la carga y redistribuye la potencia activa transportada por las tres fases para que la demanda propia de cada fase, pueda ser cubierta. Finalmente, el intercambio neto de potencia entre el D-STATCOM y la red es cero, excepto por las pérdidas en el convertidor de potencia. La figura 6.19 muestra la potencia instantánea de la carga y la del D-STATCOM.

Figura 6.19. Potencia instantánea consumida por la carga y entregada por el compensador durante la compensación de desbalance de carga

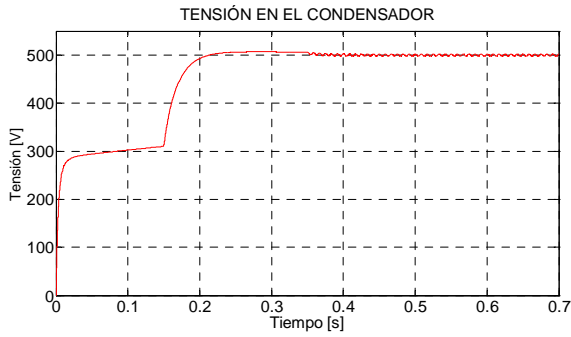


a. Usando la teoría p-q sin componente homopolar

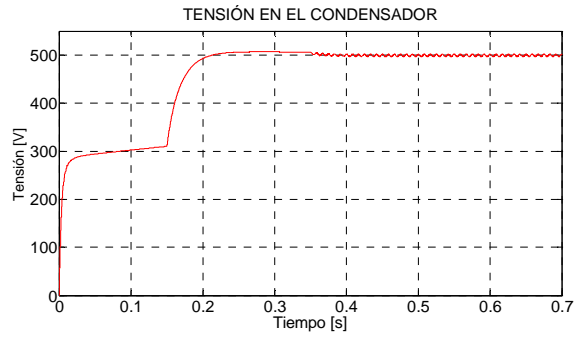
b. Usando las teorías p-q con componente homopolar, p-q modificada, d-q, p-q-r

La tensión en el capacitor del bus de continua antes y después de la conexión del D-STATCOM a la red, para cada una de las teorías se muestra en las figuras 6.20. Se observa la carga del capacitor hasta el valor de la tensión de línea y posteriormente la acción del control del bus de DC para alcanzar el valor de referencia de 500 [V]. La tensión del capacitor en el momento de la conexión del compensador a la red a los 0,35 [s], ya se ha estabilizado y es controlada durante el tiempo de compensación, para evitar que el capacitor se descargue por las pérdidas de potencia activa en el convertidor; por esta razón se presentan pequeñas oscilaciones en la tensión de DC alrededor del valor de referencia.

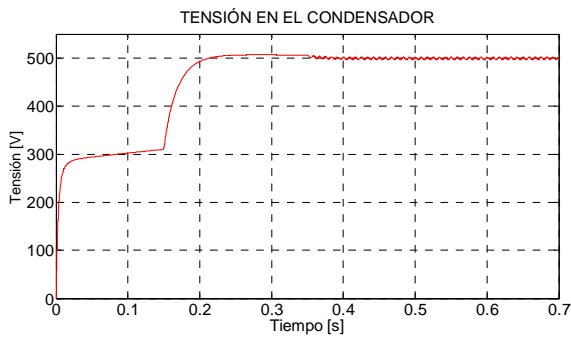
Figura 6.20. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM en la compensación de desbalance de carga



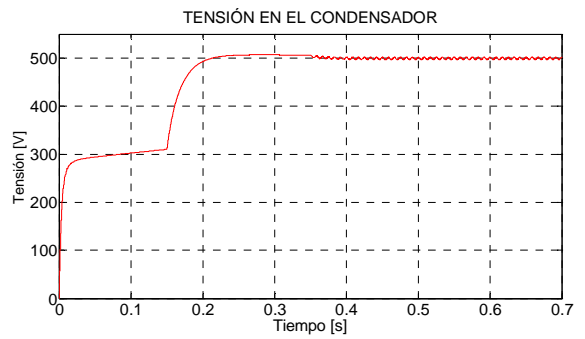
a. Usando la teoría p-q sin componente homopolar



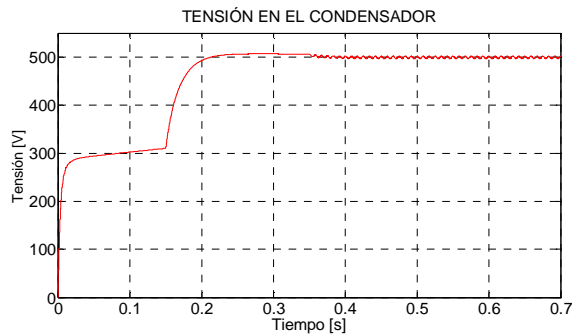
b. Usando la teoría p-q con componente homopolar



c. Usando la teoría p-q modificada



d. Usando la teoría d-q



e. Usando la teoría p-q-r

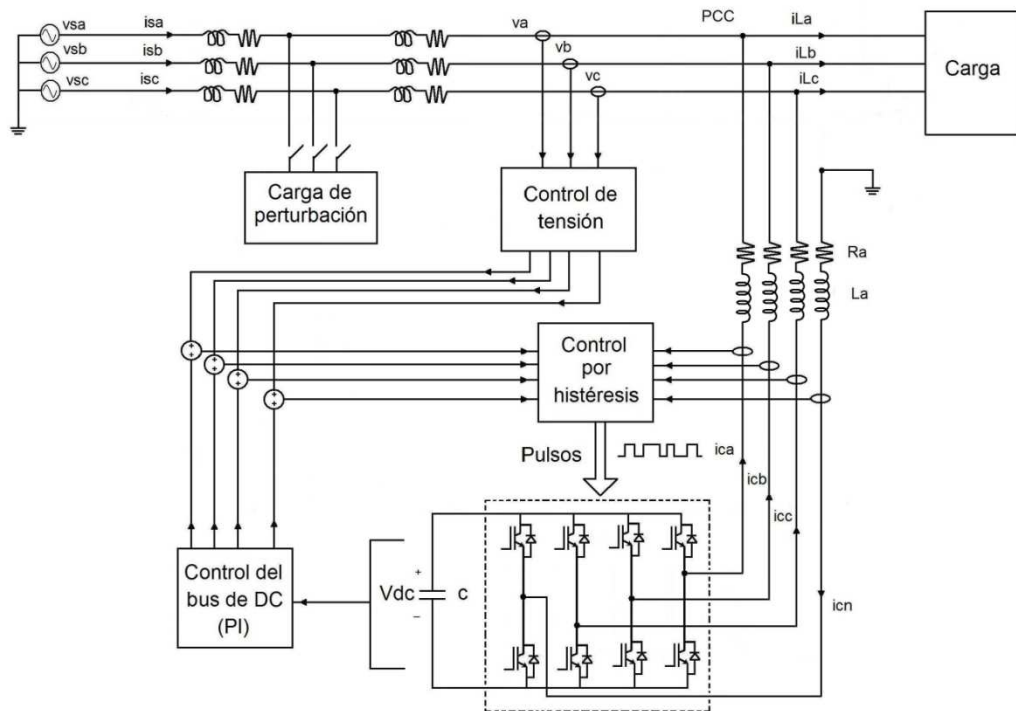
Tabla 5. Distorsión armónica total antes y después de la compensación de carga desbalanceada

	FASE A	FASE B	FASE C
TDH antes de la compensación	0%	0%	0%
TDH usando la teoría p-q sin componente homopolar	2,4625%	1,8350%	2,0567%
TDH usando la teoría p-q con componente homopolar	2,1430%	2,0576%	2,0432%
TDH usando la teoría p-q modificada	2,1430%	2,0576%	2,0432%
TDH usando la teoría d-q	2,1430%	2,0576%	2,0432%
TDH usando la teoría p-q-r	2,1486%	2,0604%	2,0432%

Se calculó el factor de potencia de las corrientes de la red medidas en el PCC. Antes de la compensación y se obtuvo 0.736, 0.939 y 0,980 en atraso para las fases A, B y C respectivamente. Después de la compensación mediante las teorías usadas, se obtuvieron factores de potencia unitarios para todas las fases del sistema, lo que muestra que el D-STATCOM puede hacer la compensación del desbalance de las corrientes de la red, y a la vez compensar el factor de potencia.

6.2 D-STATCOM en el modo control de tensión

Figura 6.21. Esquema del D-STATCOM como compensador en modo tensión



En el modo control de tensión, se utilizaron los algoritmos de compensación, que se presentaron en el capítulo 5, los cuales incluyen controladores PI (proporcional-integral), en el cálculo de las señales de referencia para las corrientes de compensación.

El esquema general para el D-STATCOM como compensador en el modo control de tensión se muestra en la figura 6.21. Para las simulaciones del compensador en este modo de operación, se considera una red de distribución trifásica de tres hilos en media tensión a la frecuencia fundamental. En el esquema se muestran los lazos de control para la estimación de las corrientes de compensación, el control del convertidor y el control del bus de DC y además se muestra un bloque de carga que permite generar las distintas perturbaciones en tensión, cuyos resultados de simulación se presentan a continuación.

6.2.1 Parámetros del D-STATCOM, estrategias de control y escenarios de compensación

Los modelos de D-STATCOM presentados en este modo de control, contemplan las siguientes parámetros y estrategias de control:

Parámetros del convertidor: la energía requerida para la compensación y la tensión de operación del bus de DC del convertidor, se obtiene de un capacitor de $C = 100$ [μ F]. El acople entre el D-STATCOM y la red se hace por medio de una impedancia RL serie, cuyos valores son $R = 0.1$ [Ω] y $L = 25$ [mH]. Adicionalmente, se incluye un filtro capacitivo de conexión Y en paralelo con el compensador que para cada fase tiene un valor de $C = 10$ [μ F].

Control de la tensión del bus de DC: se estableció una tensión para el bus de DC de 28,05[kV], controlados mediante un regulador PI como se describió en el capítulo 3, sección 3.3.1; con valores de $K_p = 100$ y $K_i = 80$, seleccionados mediante pruebas iterativas, buscando una respuesta transitoria de bajo sobrepaso, rápido tiempo de establecimiento y seguimiento del valor de referencia.

Control del convertidor de potencia: el control de las secuencias de conmutación de los transistores en el convertidor, se realizó mediante el control de histéresis de corriente descrito en el capítulo 3, sección 3.3.4. Se seleccionó una banda de histéresis de 0.01 [A]

Cálculo de las corrientes de compensación: se presentan dos algoritmos basados en el uso de controladores PI para la estimación de las corrientes de compensación en distintos marcos de referencia. Uno de ellos basado en la medición de los valores máximos de tensión para las fases en el marco de referencia a-b-c. El otro, mediante el cálculo de componentes simétricas de tensión y la transformación de las mismas al marco de referencia síncrono d-q-0. Estos algoritmos fueron descritos en el capítulo 5.

Las simulaciones presentadas se realizan en una red de trece nodos, la cual se muestra en la figura 4 del anexo A. Se considera un sistema con tensiones balanceadas en el PCC con un valor eficaz nominal de 13,2 [kV] línea-línea a 60 [Hz] y sin distorsión armónica, para el que se establecen los siguientes escenarios de compensación:

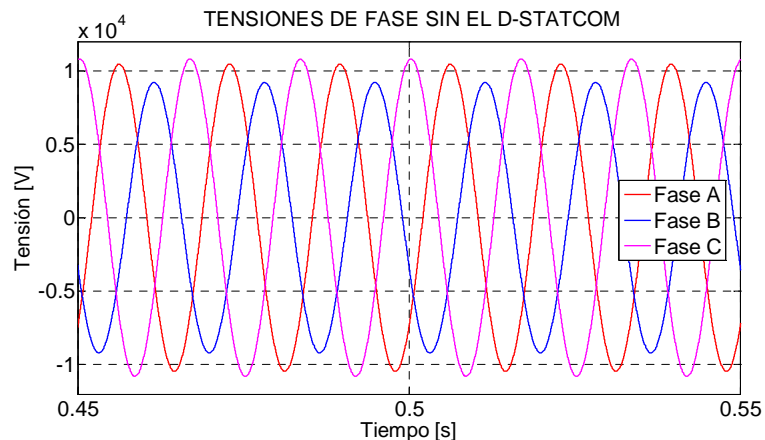
- Regulación de tensión.
- Perturbaciones de tensión de corta duración debidas a la conexión de carga monofásica, carga bifásica entre líneas a tierra, carga trifásica balanceada y carga trifásica desbalanceada.

Las perturbaciones de las tensiones en el PCC, se generan conectando impedancias resistivas de distintos valores a tierra o entre líneas, en un punto de prueba de la red.

Los modelos de D-STATCOM realizados en ATP, usando los algoritmos de control de tensión dados en el marco de referencia a-b-c y en el marco de referencia síncrono d-q-0, se muestran conectados al PCC de la red de distribución en los esquemas de las figuras 5 y 6 del anexo A.

6.2.2 Simulación del D-STATCOM como compensador de la regulación de tensión en el PCC

Figura 6.22. Tensiones de fase desbalanceadas sin compensar en el PCC



Se tiene un sistema trifásico con tensiones desbalanceadas en el PCC, como se muestra en la figura 6.22. Esta perturbación es generada por la conexión de una carga bifásica entre las fases A y B en el punto de prueba de la red. Se produce entonces una disminución en el valor de la amplitud para las tensiones de fase A y B, en 3,4% y 16% respectivamente, por debajo del valor nominal, mientras que la fase C se mantiene en el valor nominal correspondiente. Las tensiones del sistema dadas como fasores son las siguientes:

$$V_a = (7360,73 \angle 7,51^\circ) \quad V_b = (6400,76 \angle -105,50^\circ) \quad V_c = (7636,78 \angle 137,10^\circ)$$

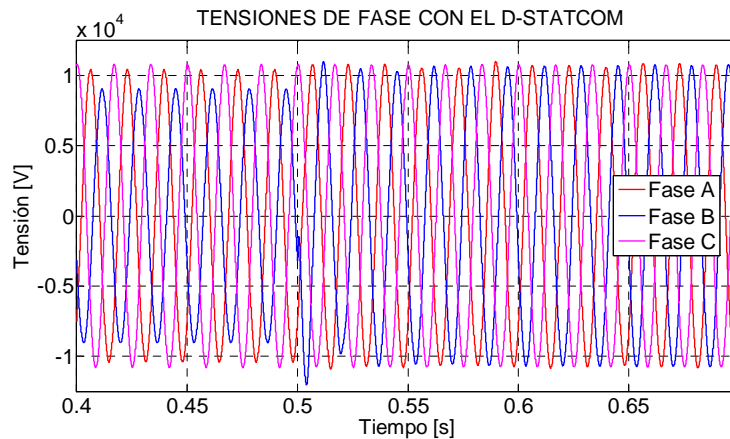
⚡ Compensación de la regulación usando el algoritmo en el marco de referencia a-b-c

En la figura 6.23, se observa la compensación realizada por el D-STATCOM para mejorar la regulación de la tensión en el PCC. La conexión del compensador se da a los 0,5 [s] y hace que la amplitud de las tensiones de las fases que presentaron caída de tensión, se incrementen progresivamente. Con este algoritmo, se requieren aproximadamente dos ciclos de la señal de tensión para mejorar la regulación, obteniéndose en el PCC el siguiente conjunto de tensiones:

$$V_a = (7632,55 \angle 4,59^\circ) \quad V_b = (7614,14 \angle -113,38^\circ) \quad V_c = (7625,55 \angle 137,10^\circ)$$

De acuerdo con estos fasores de tensión, la compensación puede regular solo la magnitud, ya que persiste el desbalance de ángulo, entre las fases del sistema en el PCC.

Figura 6.23. Tensiones compensadas en el PCC usando m.r. (a-b-c)¹ para mejorar la regulación



La acción correctiva lograda sobre el valor eficaz de las tensiones, mediante este algoritmo de control, se muestra en la figura 6.24.

En la figura 6.25 se muestra el valor de la tensión en el bus de DC. El condensador se carga inicialmente hasta el valor pico de la tensión de línea (18700 [V]), aproximadamente; el control de la tensión del bus de DC, se conecta a los 0,2 [s] y hace que el capacitor continúe cargándose hasta alcanzar el valor de tensión fijado como referencia de 28050 [V]. Durante la compensación que se inicia a los 0,5 [s], se presentan algunas pérdidas de potencia en el convertidor, que son compensadas por el control de la tensión del bus de DC; por esta razón, se aprecian algunas oscilaciones en la tensión del condensador.

¹ m.r. (a-b-c) corresponde al algoritmo de compensación de tensión en el marco de referencia a-b-c

Figura 6.24. Valor RMS de las tensiones compensadas en el PCC usando m.r. (a-b-c) para mejorar la regulación

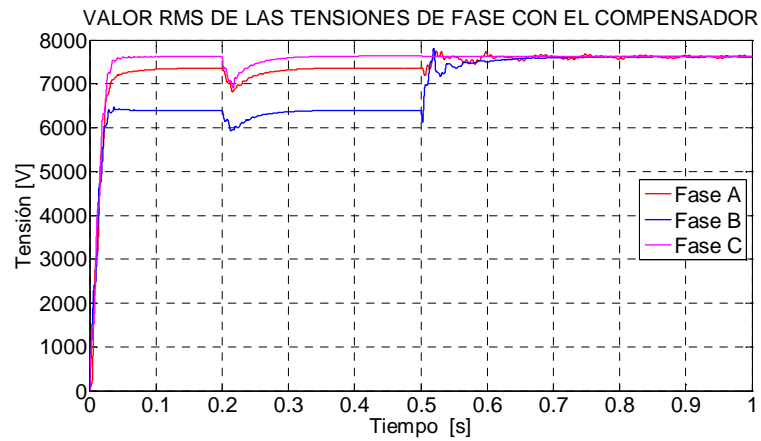
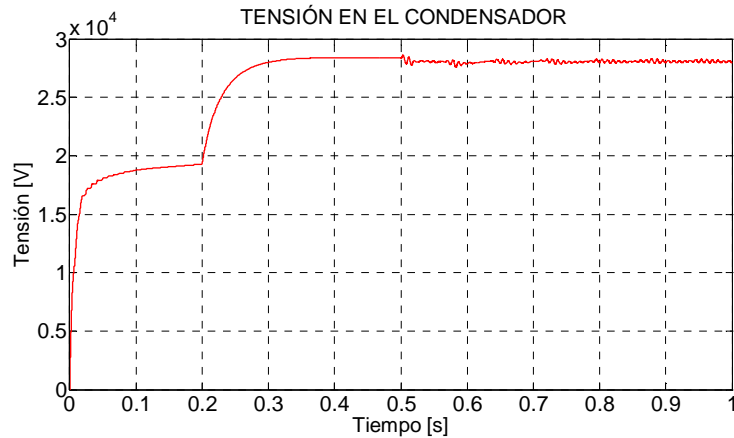


Figura 6.25. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM usando m.r.(a-b-c) para mejorar la regulación



Las corrientes de compensación inyectadas por el D-STATCOM escaladas en amplitud, se muestran en la figura 6.26. Como se aprecia, estas corrientes están en cuadratura con la tensión, por lo que la compensación realizada mediante este algoritmo, involucra solamente el intercambio de potencia reactiva con la red.

En la figura 6.27, se muestra la potencia suministrada por el D-STATCOM para regular la tensión en el PCC. Se muestra que la potencia activa entregada por el compensador a la red en estado estable tiene un valor cercano a cero y está asociado a la potencia de pérdidas del inversor; mientras que el flujo total de potencia reactiva, lo constituyen las corrientes de compensación. La potencia que se aprecia antes de iniciarse la compensación, corresponde a la energía requerida por el capacitor para cargarse hasta el valor de referencia.

Figura 6.26. Corrientes inyectadas por el D-STATCOM usando m.r. (a-b-c) para mejorar la regulación

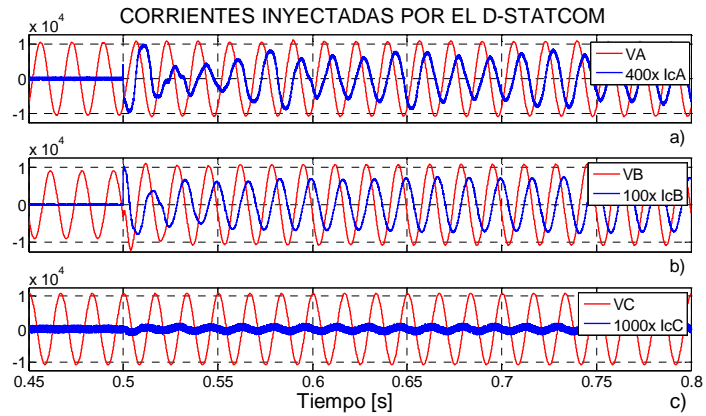
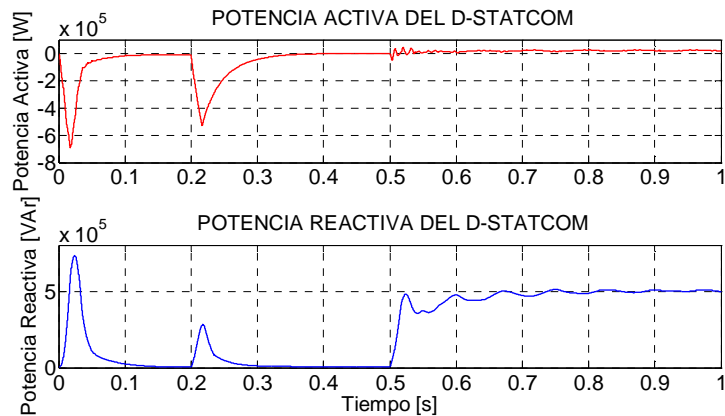


Figura 6.27. Potencia trifásica entregada por el D-STATCOM para regular la tensión en el PCC usando m.r. (a-b-c)



• Compensación de la regulación usando el algoritmo en el marco de referencia d-q-0

El resultado de la compensación usando este algoritmo, puede verse en las figuras 6.28 y 6.29, para los marcos de referencia a-b-c y d-q-0 respectivamente. Antes de la compensación, la transformación de las tensiones de fase al marco de referencia d-q-0, muestra que hay una desviación en el valor de la señal del eje directo de secuencia positiva, con respecto al valor establecido como referencia para este nivel de tensión, y además se observa la aparición de otras componentes de tensión, lo que indica que existe desbalance en las tensiones medidas. La conexión del D-STATCOM al PCC ocurre a los 0,5 [s], y a partir de este momento se inicia la compensación de las tensiones de

fase para alcanzar los valores establecidos como referencia. Como resultado de la compensación, la señal que se muestra en el eje directo de secuencia positiva, alcanza el valor de referencia y las demás componentes son llevadas a cero. Las tensiones de fase después de la compensación, son las siguientes:

$$V_a = (7626,37 \angle 9,43^\circ) \quad V_b = (7614,39 \angle -110,64^\circ) \quad V_c = (7617,38 \angle 129,67^\circ)$$

Como se observa, las tensiones que se obtienen como resultado de la compensación, están reguladas al nivel de tensión establecido y se encuentran balanceadas en magnitud y ángulo. El valor eficaz de las tensiones medidas en el PCC, antes y después de la compensación, se muestran en la figura 6.30

Figura 6.28. Tensiones compensadas en el PCC usando m.r.(d-q-0)² para mejorar la regulación

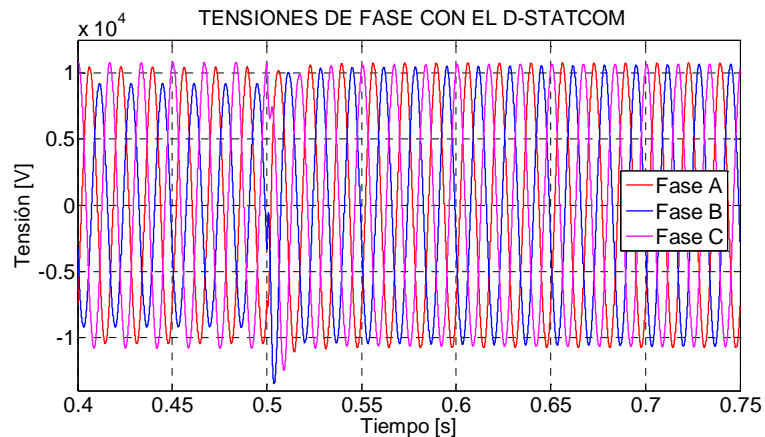
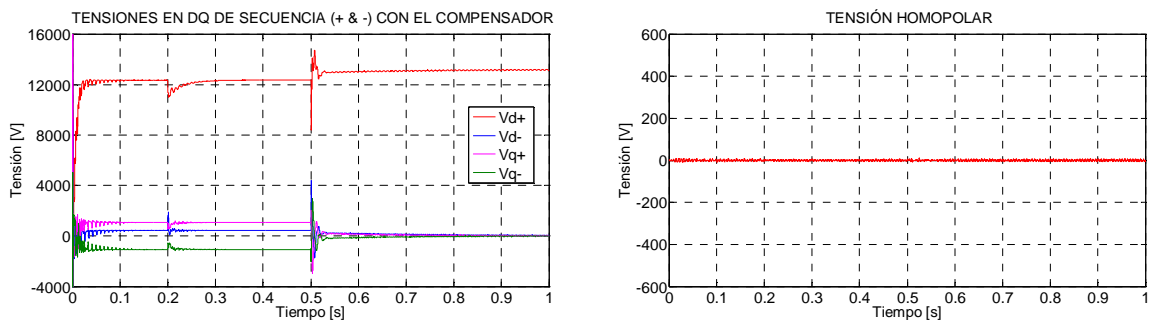
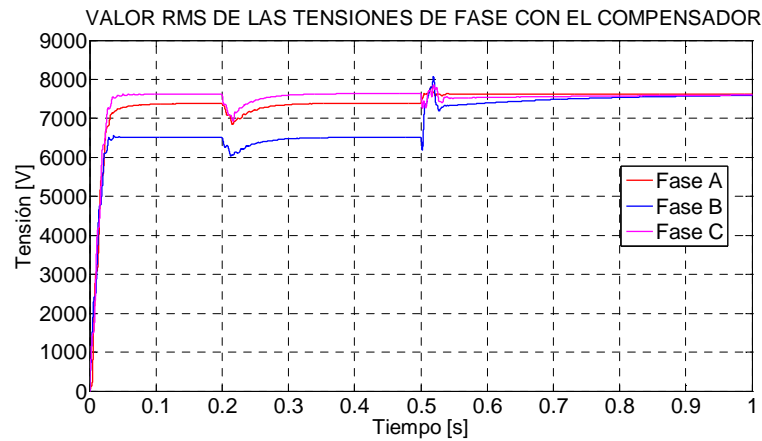


Figura 6.29. Tensiones reguladas por el D-STATCOM vistas en m.r.(d-q-0)



² m.r.(d-q-0) corresponde al algoritmo de compensación de tensión en el marco de referencia sincrónico d-q-0

Figura 6.30. Valor eficaz de las tensiones en el PCC usando m.r.(d-q-0) para mejorar la regulación



La figura 6.31, muestra el proceso de carga del capacitor del bus de DC hasta el nivel de tensión de la referencia. Desde el momento en que se inicia la compensación de las tensiones de la red, se producen oscilaciones en la tensión del capacitor alrededor del valor de referencia debidas a las pérdidas de potencia en el convertidor.

Las corrientes de compensación escaladas, se muestran en la figura 6.32. Este conjunto de corrientes, a pesar de no estar en cuadratura con la tensión del PCC, no producen un flujo de potencia activa desde el compensador hacia la red, lo cual se corrobora en la figura 6.33, en donde se muestra la potencia activa y reactiva entregada por el D-STATCOM a la red.

Figura 6.31. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM usando m.r.(d-q-0) para mejorar la regulación

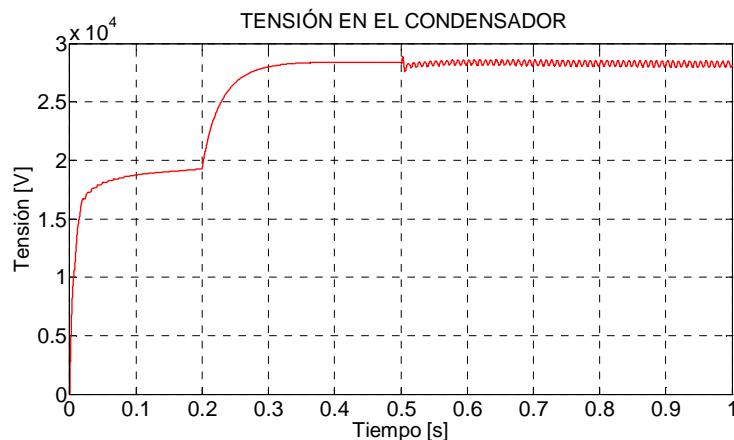


Figura 6.32. Corrientes inyectadas por el D-STATCOM usando m.r. (d-q-0) para mejorar la regulación

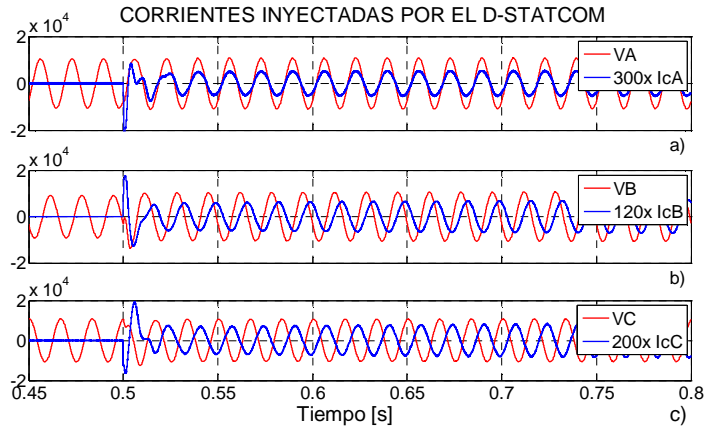
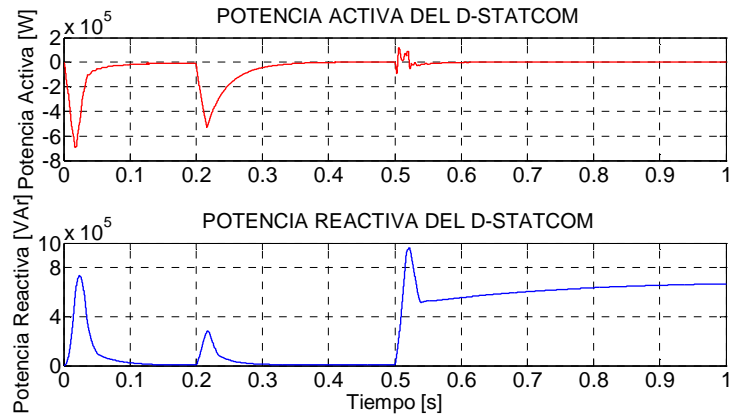


Figura 6.33. Potencia trifásica entregada por el D-STATCOM para regular la tensión en el PCC usando m.r. (d-q-0)



6.2.3 Simulación del D-STATCOM para la compensación de un hueco de tensión trifásico desequilibrado producido por la conexión de cargas monofásicas

La figura 6.34, muestra las tensiones de fase de una red eléctrica que presenta desbalance entre los 0,6 [s] y 0,8 [s] a causa de la conexión de cargas monofásicas de baja impedancia en el punto de prueba de la red. Estas cargas, producen una reducción en la amplitud de las tensiones de las fases A, B y C en 23,38%, 19,18% y 9,68% respectivamente, son respecto a su valor nominal. La reducción en el valor eficaz de las tensiones de fase durante la duración del hueco, se observa en la figura 6.35.

Figura 6.34. Tensiones de fase en el PCC durante un hueco trifásico desequilibrado

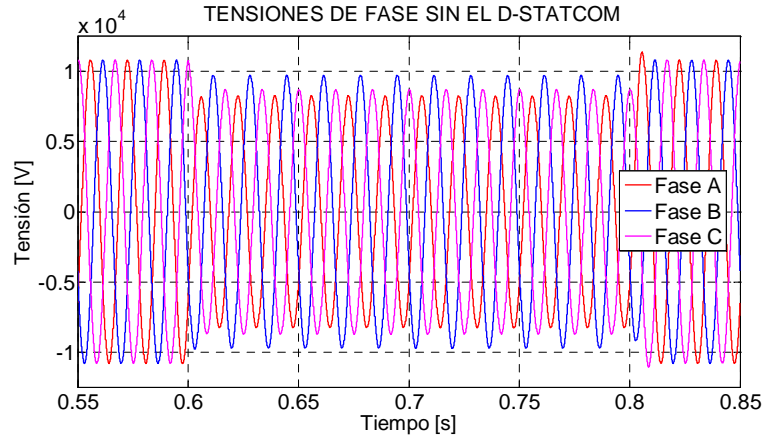
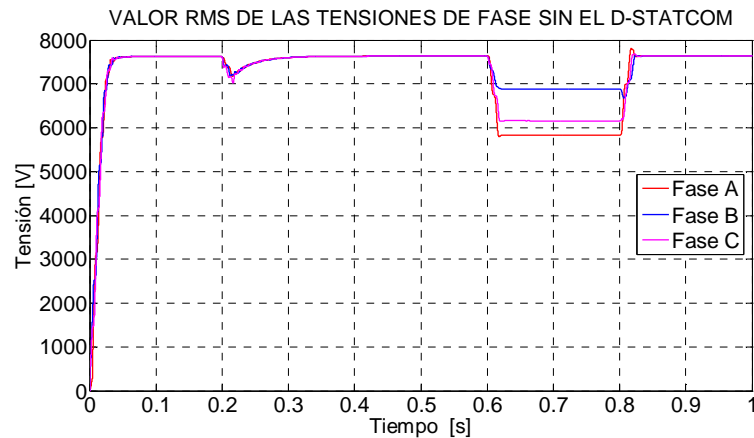


Figura 6.35. Valor eficaz de las tensiones de fase en el PCC durante un hueco trifásico desequilibrado



Las tensiones de fase en el PCC durante el hueco de tensión, dadas como fasor son las siguientes:

$$V_a = (5837,87 \angle 15,22^\circ) \quad V_b = (6883,63 \angle -103,121^\circ) \quad V_c = (6159,23 \angle 138,81^\circ)$$

⚡ Compensación de un hueco trifásico desbalanceado usando el algoritmo en el marco de referencia a-b-c

La conexión del D-STATCOM a la red, permite que se tomen acciones correctivas en el momento mismo en que se presenta la anomalía en tensión. Las figuras 6.36 y 6.37, muestra la recuperación de la amplitud de las fases para conseguir que se ajuste a los valores de referencia, esto ocurre prácticamente un ciclo después que se presenta el hueco. De igual manera, la normalización de las tensiones a los valores nominales

cuando desaparece la perturbación, produce un estado transitorio que nuevamente dura alrededor de un de un ciclo, mientras las corrientes de compensación pueden ser llevadas a cero.

Figura 6.36. Tensiones de fase compensadas por el D-STATCOM durante un hueco trifásico desequilibrado usando m.r.(a-b-c)

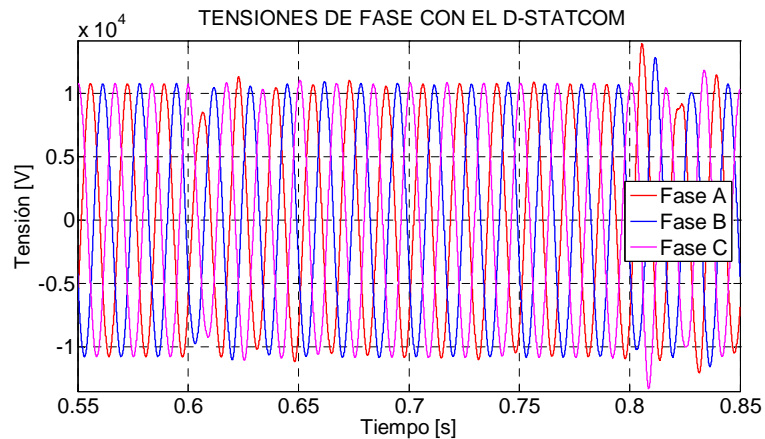
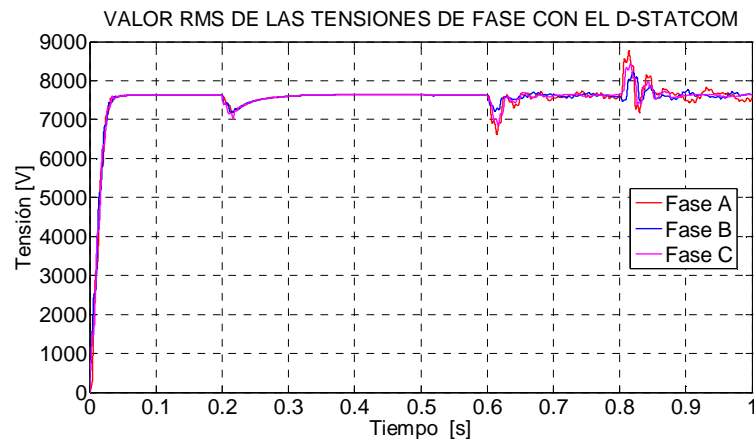


Figura 6.37. Valor RMS de las tensiones de fase compensadas por el D-STATCOM durante un hueco trifásico desequilibrado usando m.r.(a-b-c)



El comportamiento de la tensión en el capacitor del bus de DC se presenta en la figura 6.38. El valor de referencia para esta tensión, se alcanza antes de que ocurra el hueco de tensión. Durante la compensación de la tensión en el PCC, se generan pérdidas por la conmutación de los transistores del inversor, sin embargo, el control PI hace que se tome energía de la red para mantener la tensión en el valor de referencia.

Las corrientes de compensación sintetizadas en el inversor, se muestran escaladas en la figura 6.39. La amplitud de estas corrientes es proporcional al error de tensión en cada

fase y se encuentran en cuadratura con la tensión en el PCC. Esta característica reactiva hace que el D-STATCOM sea visto por la red como una carga capacitiva desequilibrada.

En la figura 6.40, se muestra la potencia suministrada por el D-STATCOM para regular la tensión en el PCC. La potencia activa está asociada a las pérdidas en el inversor; mientras que el flujo total de potencia reactiva, lo constituyen las corrientes de compensación. La potencia que se aprecia antes de iniciarse la compensación, corresponde a la energía requerida por el capacitor para cargarse hasta el valor de referencia.

Figura 6.38. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM usando m.r.(a-b-c) para compensar un hueco trifásico desequilibrado de tensión

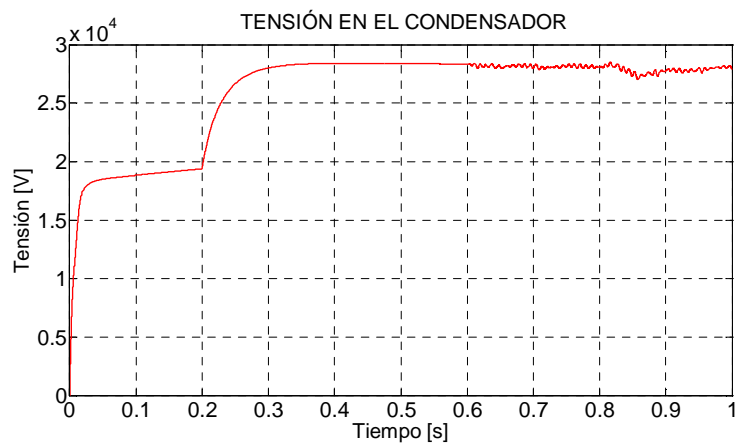


Figura 6.39. Corrientes de compensación del D-STATCOM durante un hueco trifásico desequilibrado usando m.r.(a-b-c)

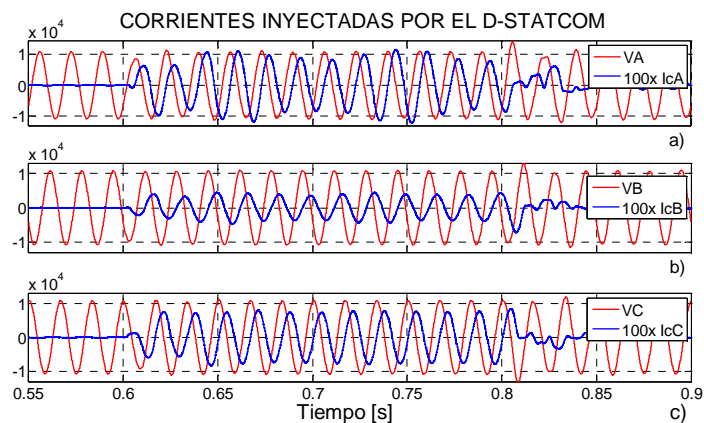
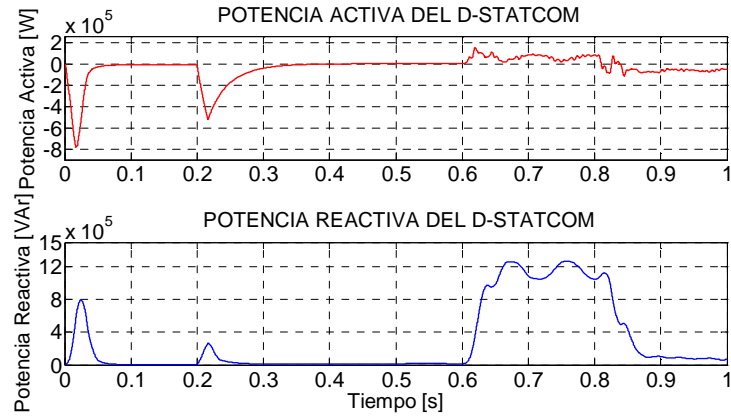


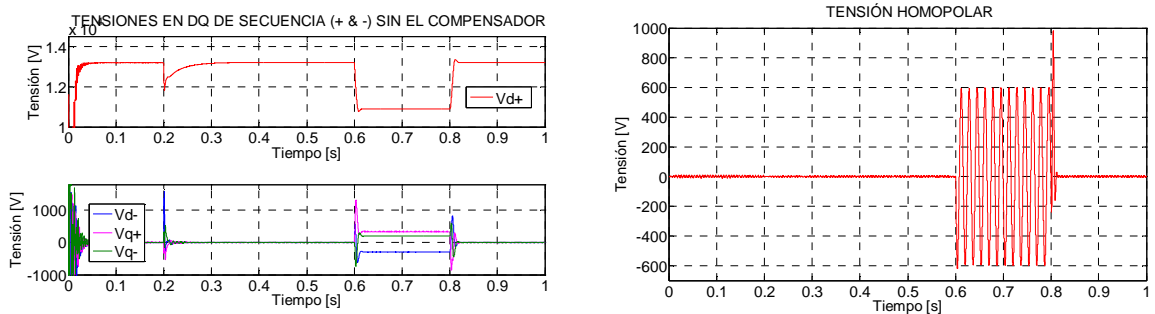
Figura 6.40. Potencia trifásica entregada por el D-STATCOM para compensar un hueco trifásico desequilibrado de tensión



⚡ Compensación de hueco trifásico desbalanceado usando el algoritmo en el marco de referencia d-q-0

Las componentes de secuencia que aparecen antes de la compensación por el desbalance de tensión, son transformadas del marco de referencia a-b-c al d-q-0, como se muestra en la figura 6.41. Se observa una disminución en el valor de la tensión en el eje directo de secuencia positiva y la aparición de otras componentes de tensión durante la duración de la perturbación que incluyen una componente de tensión homopolar.

Figura 6.41. Componentes de secuencia positiva, negativa y homopolar de las tensiones del PCC durante un hueco trifásico desequilibrado en el m.r.(d-q-0)



A continuación se presentan dos esquemas de compensación de tensión para este tipo de perturbación, que involucra la presencia de tensión homopolar en el PCC. Como primera medida se hace una compensación que incluye exclusivamente las componentes de tensión que se encuentran en el plano $\alpha - \beta$, es decir únicamente componentes de

secuencia positiva y negativa; para esto, dentro del esquema de control, se deshabilita el lazo que corresponde a la tensión homopolar. En el segundo caso se habilita el lazo de control de la componente de tensión homopolar.

Compensación sin incluir la componente de tensión homopolar:

El resultado de la compensación sin incluir el efecto de la componente homopolar se presenta en la figura 6.42. Se encuentra que las acciones de control ejecutadas son insuficientes para lograr el objetivo de compensación esperado; por tal motivo, no se logra que el sistema sea balanceado. Se observa que la tensión de las fases A y C están por debajo del valor de referencia para el PCC, mientras que la fase B sobrepasa este valor. En la figura 6.43 se aprecia el efecto de la compensación sobre el valor eficaz de las tensiones de fase.

Figura 6.42. Compensación de tensión en el PCC durante un hueco trifásico desequilibrado, usando m.r.(d-q-0) sin compensar la componente homopolar

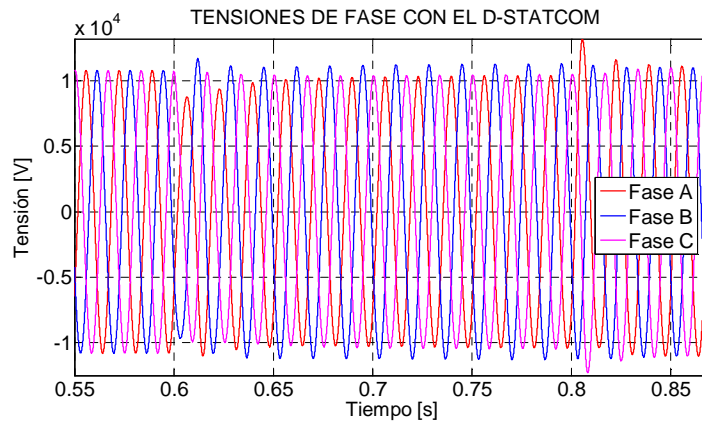
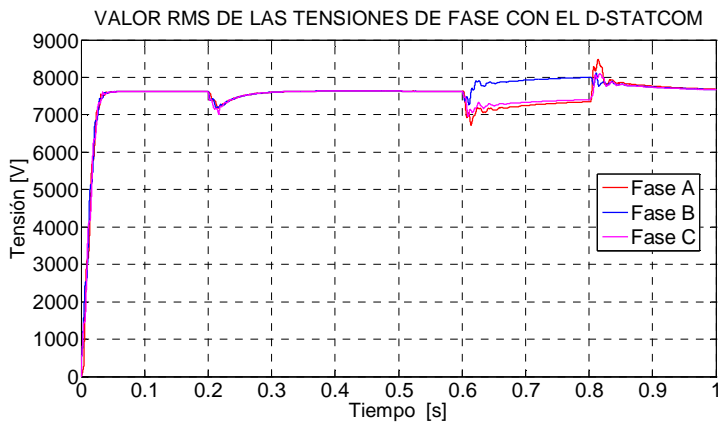
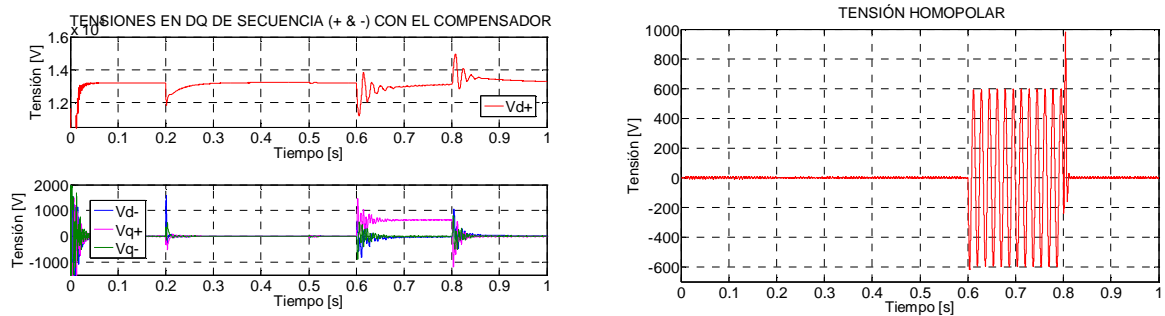


Figura 6.43. Valor eficaz de las tensiones de fase durante la compensación en el PCC de un hueco trifásico desequilibrado usando m.r.(d-q-0), sin compensar la componente homopolar



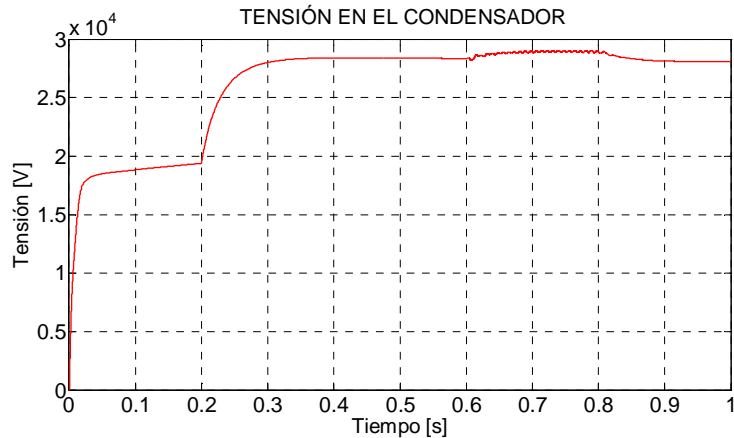
Durante la compensación, las componentes de secuencia en tensión que aparecen en el PCC transformadas al marco de referencia síncrono, se muestran en la figura 6.44. Se puede ver que la componente de eje directo de secuencia positiva (V_d^+), eje directo de secuencia negativa (V_d^-) y en el eje en cuadratura de secuencia negativa (V_q^-), son llevadas a los valores fijados como referencia. Sin embargo, la tensión del eje en cuadratura de secuencia positiva (V_q^+) y la componente de tensión homopolar (V^0), se mantienen en un valor distinto de cero y por esta razón persiste el desbalance de las tensiones del sistema.

Figura 6.44. Tensiones de secuencia en el PCC durante la compensación de un hueco trifásico desequilibrado vistas en m.r.(d-q-0), sin compensar la componente homopolar



El comportamiento de la tensión en el bus de DC durante la carga del capacitor y el periodo de compensación se ilustra en la figura 6.45. Las corrientes inyectadas por el D-STATCOM durante el hueco de tensión, producen oscilaciones de alta frecuencia en la tensión del capacitor debidas a las pérdidas de potencia en la conmutación de los transistores del inversor. Para el momento en que se presenta el desbalance la tensión ya se ha estabilizado y se mantiene a pesar de la energía que demandan las corrientes de compensación.

Figura 6.45. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM durante la compensación de un hueco trifásico desequilibrado sin compensación de la componente homopolar usando m.r.(d-q-0)



Compensación incluyendo la componente de tensión homopolar:

En este caso, se habilita el lazo de control de la componente de tensión homopolar y se produce el resultado de compensación que se muestran en la figura 6.46. Se encuentra que la generación de una corriente de compensación que elimina el error en la componente homopolar de tensión permite corregir el desbalance de tensión. El efecto de la compensación sobre la regulación de las tensiones en el PCC, puede verse en la figura 6.47 en donde se muestra el valor eficaz de las tensiones de fase.

Figura 6.46. Tensiones de fase en el PCC durante la compensación de un hueco trifásico desequilibrado usando m.r.(d-q-0), compensando la componente homopolar

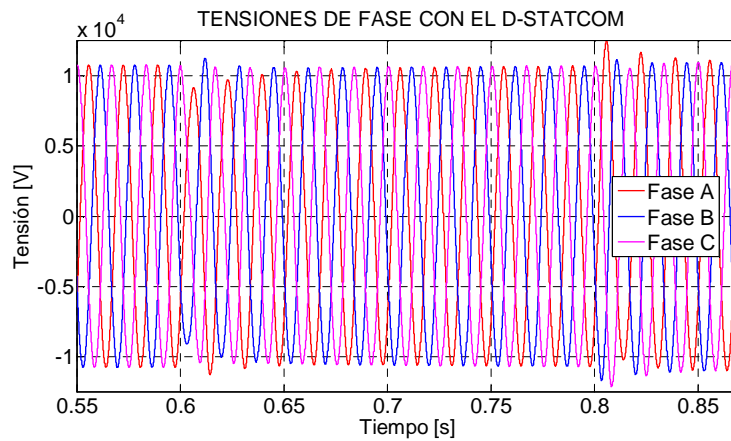
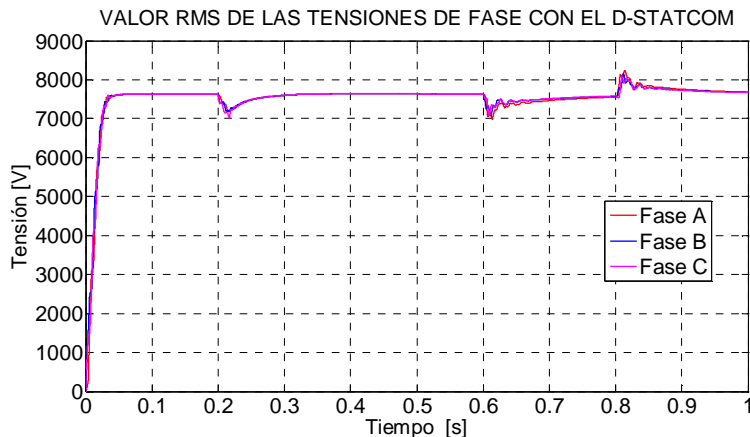


Figura 6.47. Valor eficaz de las tensiones de fase compensadas en el PCC durante un hueco trifásico desequilibrado usando m.r.(d-q-0), compensando la componente homopolar



Este esquema de compensación, hace que las tensiones de secuencia que aparecen durante la compensación al ser transformadas al marco de referencia síncrono, tengan el

comportamiento que se ve en la figura 6.48. La compensación de la componente de tensión homopolar (V^0) influye de manera positiva para que las componentes de secuencia de tensión del eje directo positivo (V_d^+), eje en cuadratura positivo (V_q^+), eje directo negativo (V_d^-) y eje en cuadratura negativo (V_q^-), sean llevadas a los valores fijados como referencia y se consiga para el PCC, un sistema de tensiones balanceadas en el marco de referencia a-b-c.

El comportamiento de la tensión del bus de DC, durante el periodo de carga del capacitor y el tiempo de duración de la perturbación, se muestra en la figura 6.49. Se observa que la generación de las corrientes de compensación, producen un rizado de baja amplitud y alta frecuencia sobre la tensión de DC, que se deben a las pérdidas por la conmutación de los transistores del inversor y por la potencia que puede demandar la compensación de la componente homopolar de tensión mientras se alcanza el valor de referencia. No obstante, el control del bus de DC hace que esta potencia de pérdidas sea recuperada de la red y la tensión del capacitor no tenga una variación apreciable.

Figura 6.48. Tensiones de secuencia en el PCC durante la compensación de un hueco trifásico desequilibrado, vistas en m.r.(d-q-0), compensando la componente homopolar

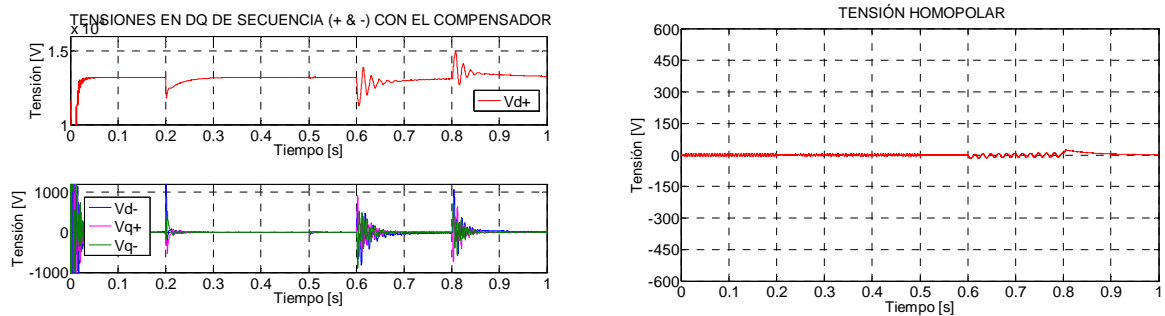
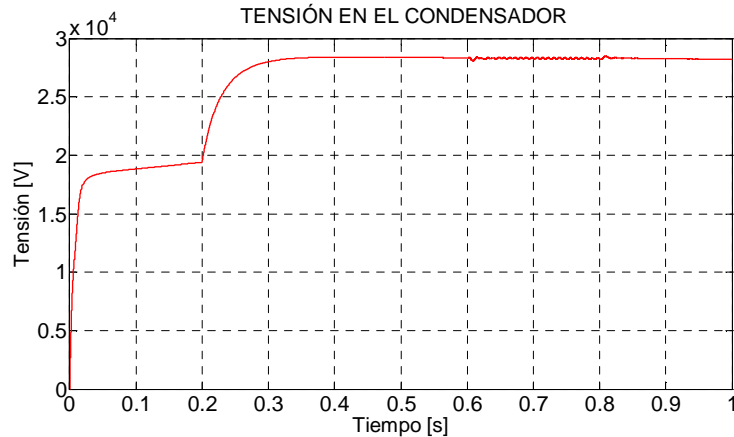


Figura 6.49. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM durante la compensación de un hueco trifásico desequilibrado usando m.r.(d-q-0), compensando la componente homopolar



Las corrientes de compensación entregadas a la red por el D-STATCOM bajo este esquema de control, se muestran escaladas en la figura 6.50. Se observa que estas corrientes están en cuadratura y en adelanto con la tensión del PCC, lo que garantiza que solo existe flujo de potencia reactiva desde el D-STATCOM hacia la red. Esto se verifica con las graficas de potencia de la figura 6.51, en donde se muestra el intercambio de potencia activa y reactiva entre el compensador y la red.

Figura 6.50. Corrientes de compensación del D-STATCOM durante un hueco trifásico desequilibrado usando m.r.(d-q-0), compensando la componente homopolar

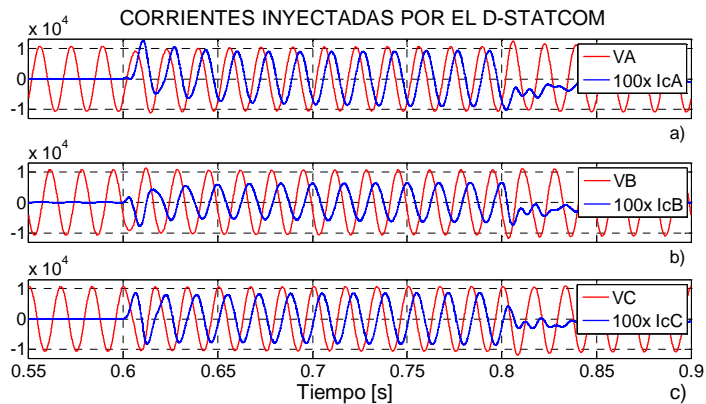
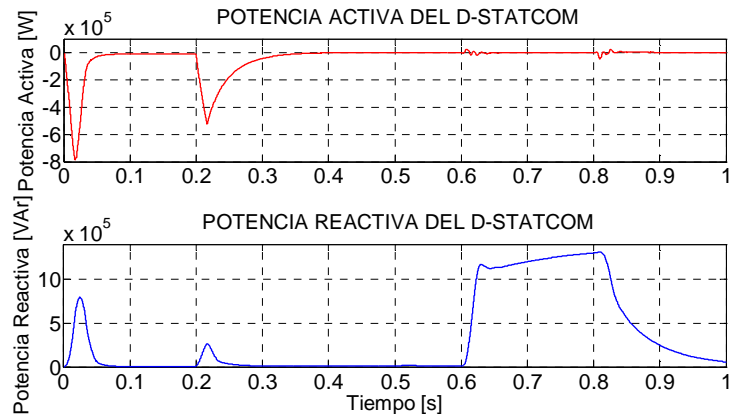


Figura 6.51. Potencia trifásica entregada por el D-STATCOM, para compensar un hueco trifásico desequilibrado de tensión usando m.r.(d-q-0), compensando la componente homopolar



6.2.4 Simulación del D-STATCOM para compensar una perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica

En la figura 6.52, se muestra el conjunto de tensiones que corresponden a un sistema trifásico balanceado, las cuales son perturbadas por la conexión de una carga resistiva monofásica de baja impedancia en el punto de prueba de la red, durante un intervalo de

tiempo comprendido entre 0,6 [s] y 0,8 [s]. Debido a la conexión de esta carga a la red, ocurre un desbalance en magnitud y ángulo para las tensiones del PCC. El desbalance de tensión está dado por una disminución en la amplitud de la tensión para la fase A de un 25,5 %, mientras que en las fase B y C, se presenta un aumento de amplitud de 9,77 % y 3,36 %, respectivamente; estos porcentajes están dados con base en la tensión de referencia para el PCC. El efecto del desbalance en el valor eficaz de las tensiones de fase medidas en el PCC, puede verse en la figura 6.53.

Figura 6.52. Perturbación de tensión en el PCC producida por la conexión de una carga monofásica

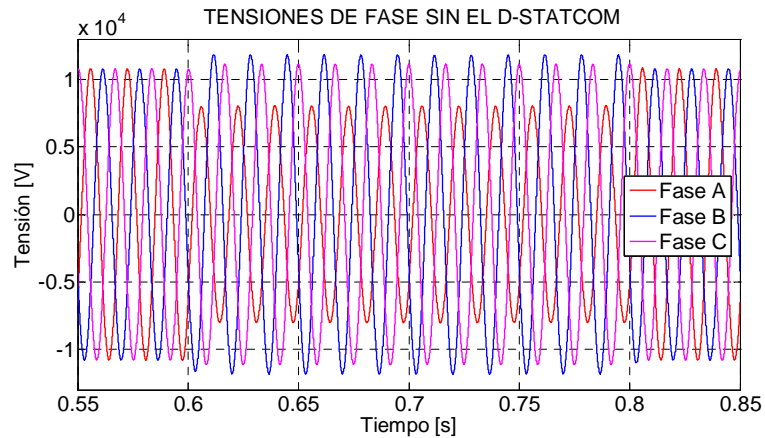
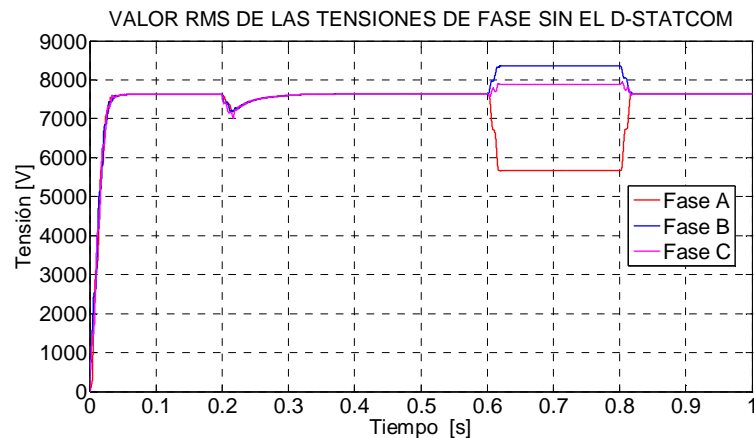


Figura 6.53. Valor RMS de las tensiones en el PCC, durante la perturbación producida por la conexión de una carga monofásica



Las tensiones resultantes para cada una de las fases en el PCC durante el hueco de tensión, dadas como fasor son las siguientes:

$$V_a = (5674,90 \angle 13,99^\circ) \quad V_b = (8362,06 \angle -107,23^\circ) \quad V_c = (7876,33 \angle 143,73^\circ)$$

☛ **Compensación de la perturbación de tensión usando el algoritmo en el marco de referencia a-b-c**

El DSTATCOM conectado en el PCC para compensar la perturbación en la tensión, produce los resultados que se muestran en la figura 6.54, en donde se muestran las tensiones en el tiempo. La compensación realizada, produce el siguiente conjunto de tensiones, dadas en su representación fasorial:

$$V_a = (7619,52 \angle 5^\circ) \quad V_b = (7620,93 \angle -104,18^\circ) \quad V_c = (7646,69 \angle 142,23^\circ)$$

La compensación puede hacer que el valor eficaz de las tensiones del PCC sea regulado durante la perturbación, tal como se muestra en la figura 6.55, pues este algoritmo mejora el desbalance de amplitud de las tensiones. Sin embargo persiste el desbalance entre los ángulos de fase.

Figura 6.54. Tensiones de fase compensadas por el D-STATCOM durante la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(a-b-c)

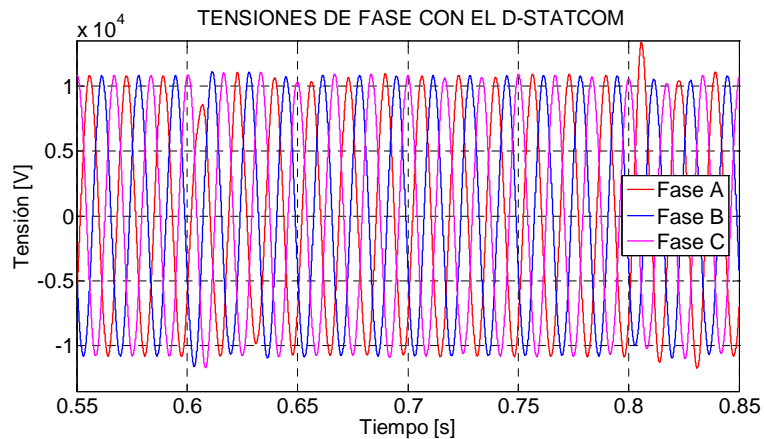
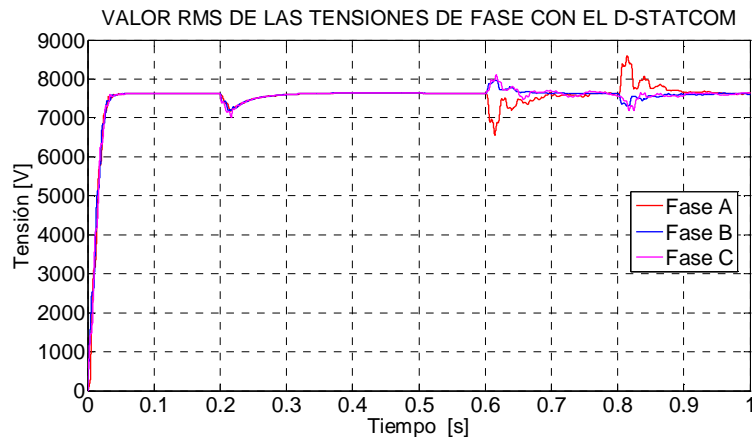


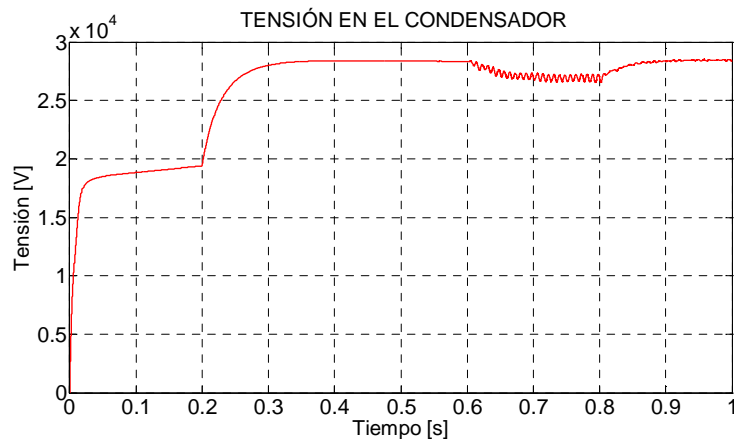
Figura 6.55. Valor RMS de las tensiones de fase durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(a-b-c)



El control sobre las tensiones en el PCC, hace que estas sean compensadas en aproximadamente dos ciclos de la señal de tensión y que se mantengan alrededor del valor de referencia durante la perturbación. Cuando perturbación desaparece, las corrientes de compensación deben ser llevadas nuevamente a cero, sin embargo, esto no puede hacerse de forma instantánea, pues hay elementos inductivos involucrados que impiden el cambio súbito de la corriente. Por esto aparece un periodo transitorio de estabilización de las tensiones de fase, con un incremento inicial de su amplitud.

La dinámica del control de la tensión en el bus de continua se puede apreciar en la figura 6.56. La tensión en el capacitor alcanza el valor de referencia antes de que se inicia la perturbación a los 0,6 [s]. Durante el tiempo de compensación, la tensión del capacitor disminuye con respecto a su valor de referencia, debido a las pérdidas de potencia activa generadas por el inversor para sintetizar las corrientes de compensación inyectadas en el PCC.

Figura 6.56. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM durante la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(a-b-c)



Las corrientes de compensación escaladas para comparar su ángulo de fase con respecto a las tensiones en el PCC, se muestran en la figura 6.57. Se observa que estas tienen distintas características dependiendo del error medido entre el valor máximo de las tensiones por fase con respecto al valor de referencia. Por esto, el hueco de tensión que se presenta en la fase A es compensado por una corriente de característica capacitiva; mientras que las fases B y C, que presentan elevaciones de tensión, son compensadas por corrientes de característica inductiva. Estas corrientes producen un intercambio de energía reactiva entre el compensador y la red, el cual está representado por la potencia reactiva que se muestra en la figura 6.58; mientras que la potencia activa está relacionada con la carga del capacitor y las pérdidas del convertidor.

Figura 6.57. Corriente inyectadas por el D-STATCOM para compensar la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(a-b-c)

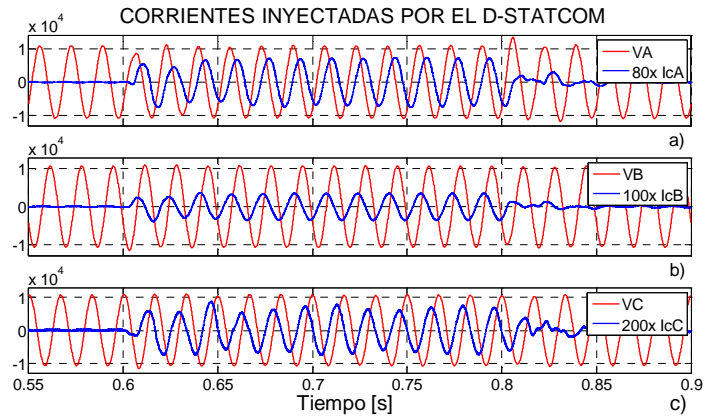
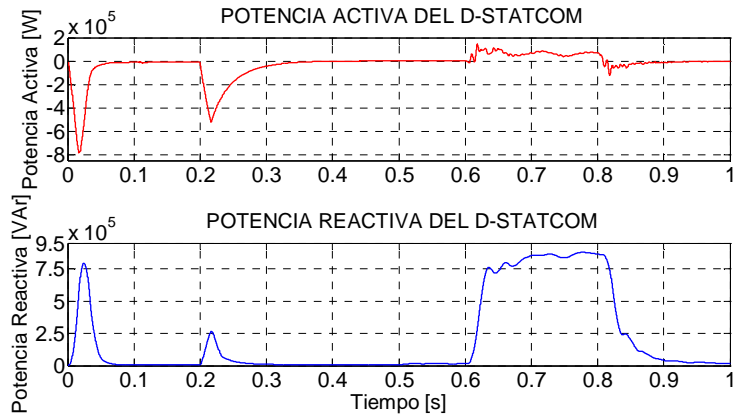


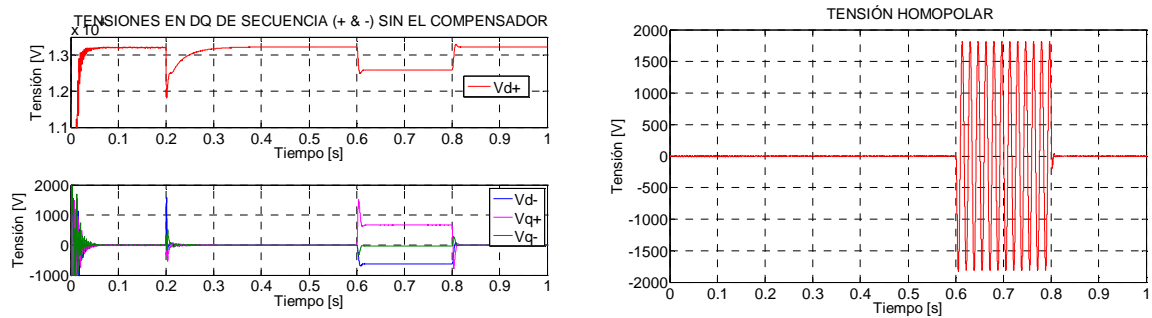
Figura 6.58. Potencia entregada por el D-STATCOM durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(a-b-c)



⚡ Compensación de la perturbación de tensión usando el algoritmo en el marco de referencia d-q-0

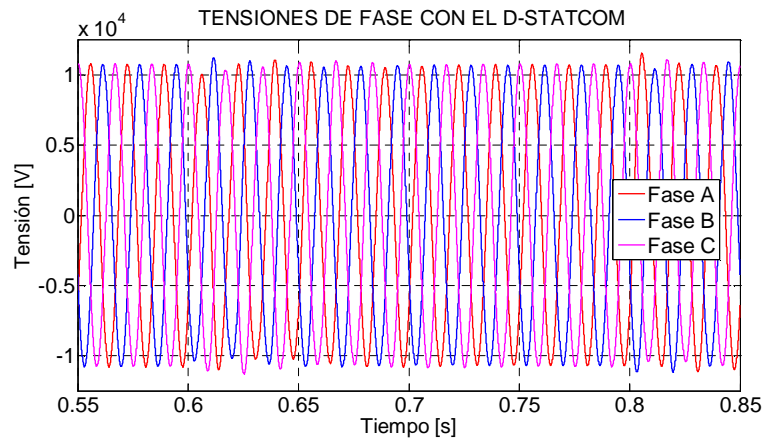
Las tensiones en el PCC antes de la compensación vistas en el marco de referencia síncrono d-q-0 se muestra en la figura 6.59. La reducción en el valor de la tensión de eje directo de secuencia positiva y la aparición de componentes de tensión en los demás ejes, durante la perturbacion, indican que las tensiones de la red se encuentran desbalanceados. Así mismo, el error producido al comparar las cantidades de referencia y los valores instantáneos de la tensión en el marco d-q-0, permite que el control de lazo cerrado genere la corriente de compensación que corrige el error en cada componente de la tensión.

Figura 6.59. Tensiones de secuencia en el PCC durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, vistas en m.r.(d-q-0)



Para el caso simulado, la compensación inicia a los 0,6 [s], y logra que las tensiones en el sistema trifásico sean balanceadas, tomando para ello un tiempo de un ciclo. Cuando la red vuelve a su condición de operación normal, se produce nuevamente un estado transitorio en las tensiones del PCC, esto ocurre mientras las corrientes de compensación son llevadas a cero. En la figura 6.60 se muestran las tensiones compensadas en el PCC.

Figura 6.60. Tensiones de fase en el PCC durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(d-q-0)



Como resultado de la compensación las tensiones de fase son las siguientes:

$$V_a = (7595,37 \angle 15,26^\circ) \quad V_b = (7582,97 \angle -105,27^\circ) \quad V_c = (7621,36 \angle 135,12^\circ)$$

Como se observa, estas tensiones están reguladas al nivel de tensión de referencia y se encuentran balanceadas en magnitud y ángulo. El valor eficaz de las tensiones medidas en el PCC y las tensiones de secuencia de los ejes directos, ejes en cuadratura y la tensión homopolar, antes y después de la compensación, se muestran en las figura 6.61 y 6.62.

Figura 6.61. Valor RMS de las tensiones de fase en el PCC durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(d-q-0)

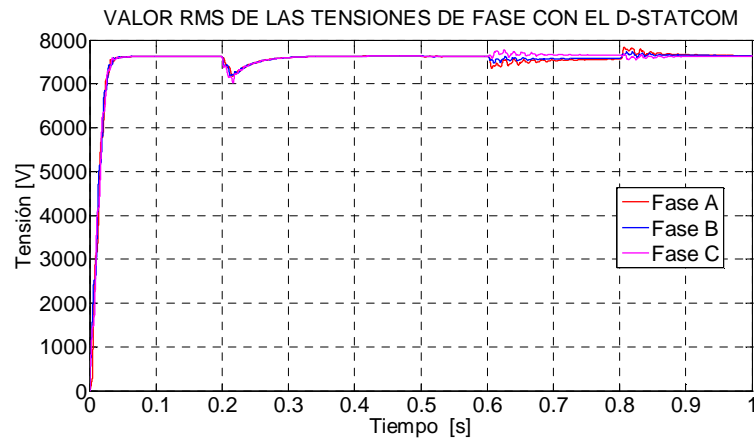
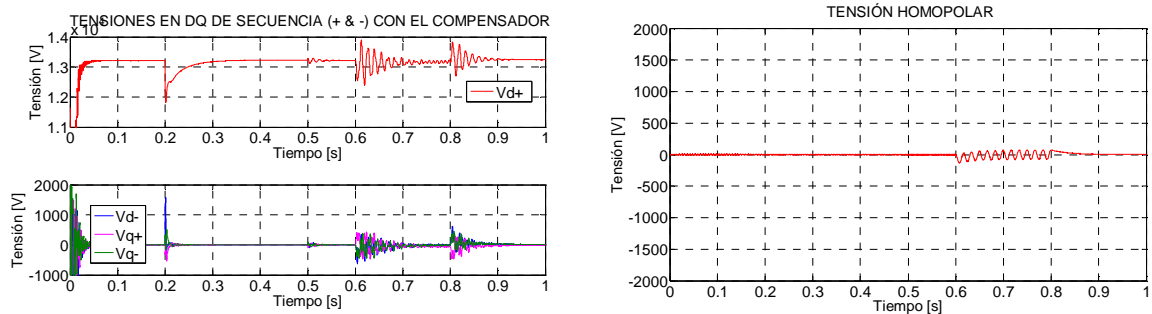


Figura 6.62. Tensiones de secuencia compensadas por el D-STATCOM durante la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, vistas en m.r.(d-q-0)



La figura 6.63, muestra el comportamiento de la tensión del capacitor del bus de DC. Durante la compensación, se aprecian pequeñas oscilaciones sobre la tensión de referencia del capacitor; lo cual se debe a las pérdidas de potencia del inversor, y a la potencia de compensación que se demanda de la fuente VSI. Se encuentra que la tensión del capacitor se mantiene en el valor de referencia gracias al control de la tensión del bus de DC.

El D-STATCOM inyecta corrientes de compensación desde el mismo instante en que se produce la perturbación en la red. En la figura 6.64 se muestra las corrientes de compensación escaladas para observar el desfase con respecto a las tensiones del PCC, en esta figura se visualiza que las corrientes de la fase A y la fase C tiene característica capacitiva y la corriente de la fase B tiene característica inductiva, el flujo de potencia que estas corrientes suministran a la red, se puede ver en la figura 6.65, en esta figura se aprecia la potencia activa y reactiva que consume el capacitor en el momento de la carga, y la potencia reactiva suministrada por el D-STATCOM para compensar la perturbación.

Figura 6.63. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(d-q-0)

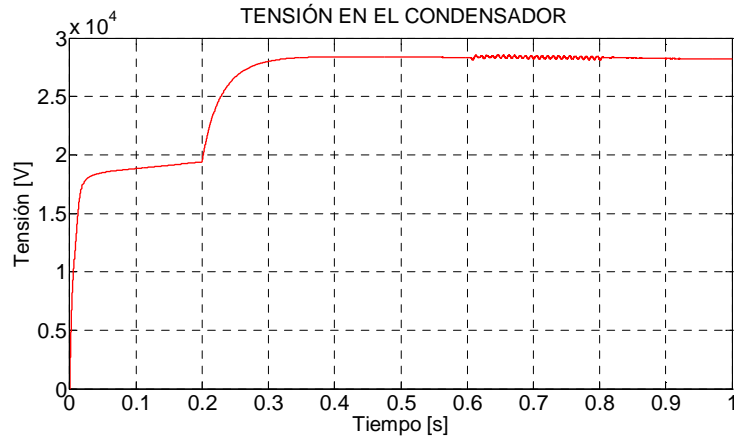


Figura 6.64. Corrientes inyectadas por el D-STATCOM para compensar la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(d-q-0)

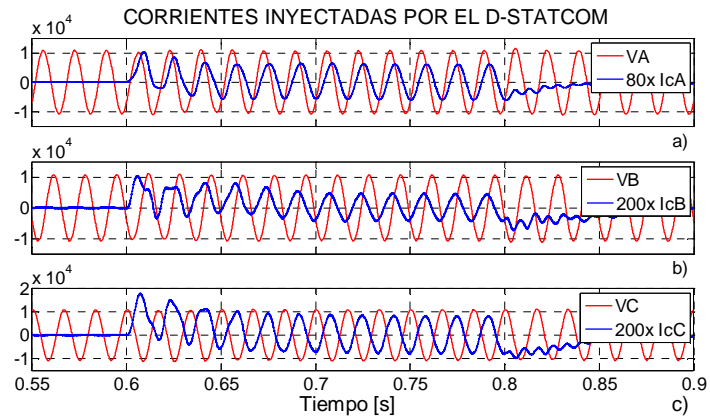
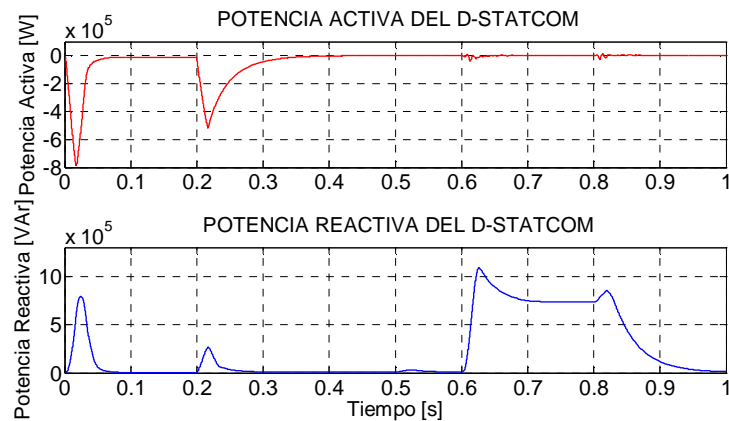


Figura 6.65. Potencia entregada por el D-STATCOM durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(d-q-0)



6.2.5 Simulación del D-STATCOM para compensar una perturbación de tensión producida por la conexión de una carga bifásica a tierra

El en el punto de prueba del sistema trifásico que se muestra en la figura 4 del anexo A, se conecta una carga bifásica resistiva de baja impedancia a tierra, que produce en las tensiones del PCC una perturbación en el intervalo de tiempo comprendido entre los 0,6 [s] y 0,8 [s]. La conexión de esta carga a la red, hace que se produzca un desbalance en las tensiones, las cuales son mostradas para el PCC en la figura 6.66. Estas tensiones presentan una disminución de la amplitud para las fases A y B en 23,75% y 18% respectivamente; y en la fase C un incremento de amplitud del 9,86% en referencia con el valor que se presenta en condiciones normales de operación. En la figura 6.67 se aprecia el comportamiento del valor eficaz de las tensiones de fase en condiciones de operación normal y durante el evento del hueco de tensión.

Figura 6.66. Perturbación de tensión en el PCC producida por la conexión de una carga bifásica

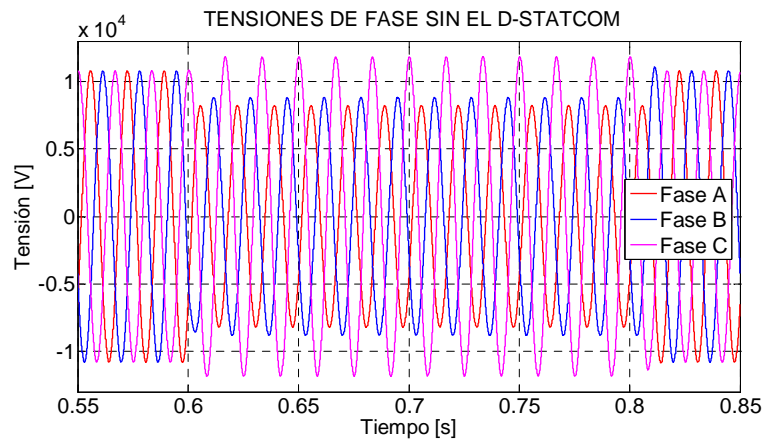
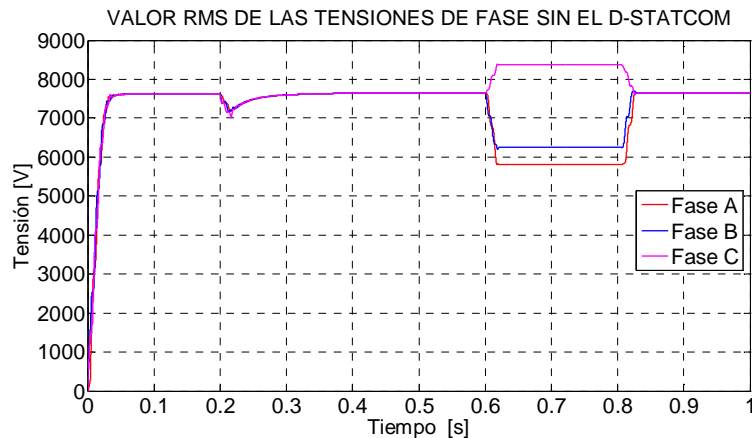


Figura 6.67. Valor RMS de las tensiones en el PCC, durante la perturbación producida por la conexión de una carga bifásica



Las tensiones resultantes para cada una de las fases en el PCC durante el hueco de tensión, dadas como fasor son las siguientes:

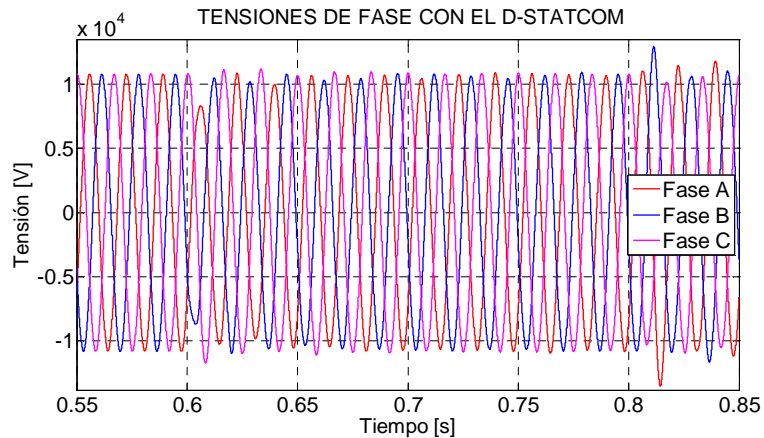
$$V_a = (5810,28 \angle 19,93^\circ) \quad V_b = (6246,63 \angle -107,97^\circ) \quad V_c = (8370,85 \angle 138,69^\circ)$$

• Compensación de la perturbación de tensión usando el algoritmo en el marco de referencia a-b-c

El DSTATCOM es conectado para compensar el efecto que produce la conexión de esta carga bifásica sobre las tensiones en el PCC. El trabajo de compensación realizado se observa en la figura 6.68, y el valor eficaz correspondiente para las tensiones en el PCC se muestra en la figura 6.69, en donde se puede ver que el objetivo de control es conseguido por el compensador para mantener las tres fases en el valor eficaz fijado como referencia. Las tensiones compensadas dadas como fasor son:

$$V_a = (7578,94 \angle 8,08^\circ) \quad V_b = (7585,59 \angle -115,44^\circ) \quad V_c = (7666,67 \angle 140,3^\circ)$$

Figura 6.68. Tensiones de fase compensadas por el D-STATCOM durante la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga bifásica, usando m.r.(a-b-c)



La dinámica del control de la tensión en el bus de continua se puede apreciar en la figura 6.70. La tensión en el capacitor oscila alrededor del valor establecido como referencia durante el tiempo de duración de la perturbación, esto se debe a las pérdidas de potencia activas generadas por el inversor al inyectar las corrientes de compensación al PCC.

Las corrientes que debe entregar el compensador para cada una de las fases se muestran con un factor de escalamiento en la figura 6.71. Las corrientes de mayor amplitud son entregadas a las líneas afectadas por la perturbación (fases A y B). Además, las corrientes inyectadas por el compensador se mantienen en cuadratura con la tensión del PCC. En este tipo de perturbación, el D-STATCOM debe actuar de forma distinta para cada rama de compensación, pues debe mostrar un comportamiento capacitivo para las fases con disminución en el valor de la tensión, y al mismo tiempo debe comportarse como una carga inductiva para las fases que incrementan su tensión.

Figura 6.69. Valor RMS de las tensiones de fase durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(a-b-c)

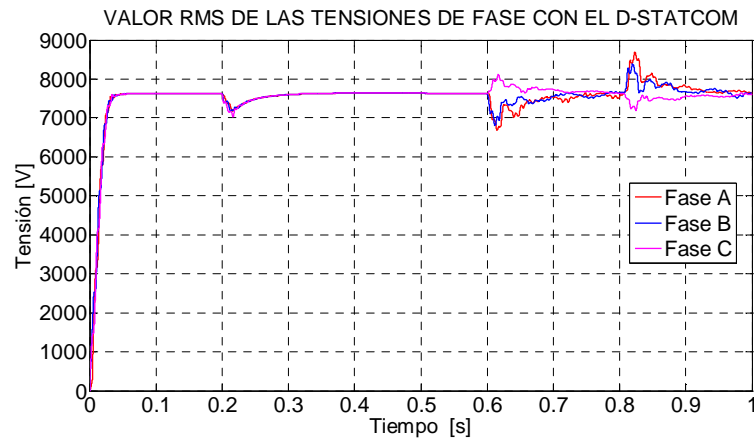


Figura 6.70. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(a-b-c)

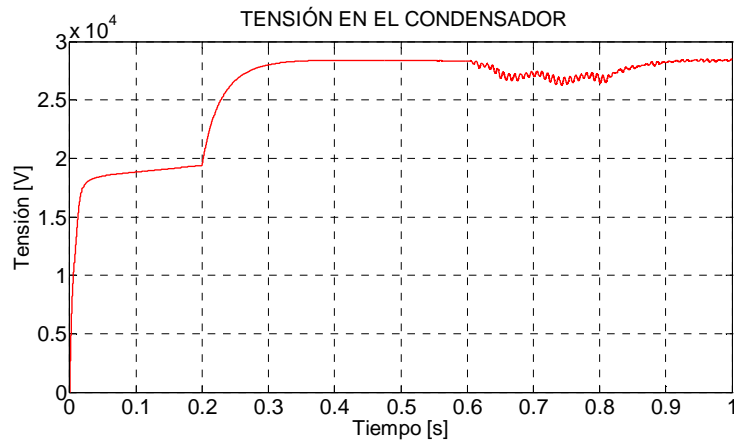
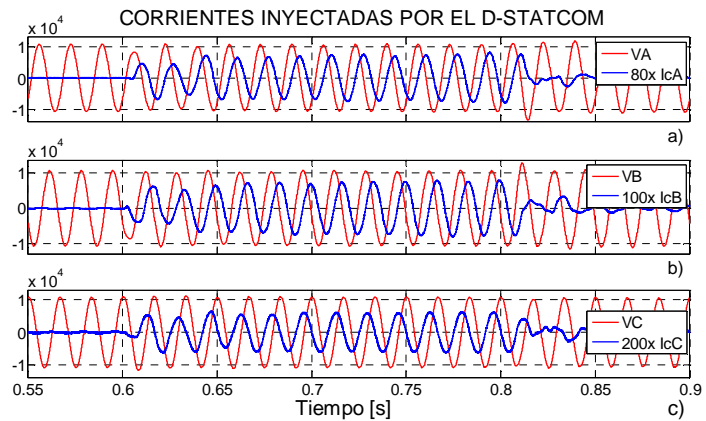
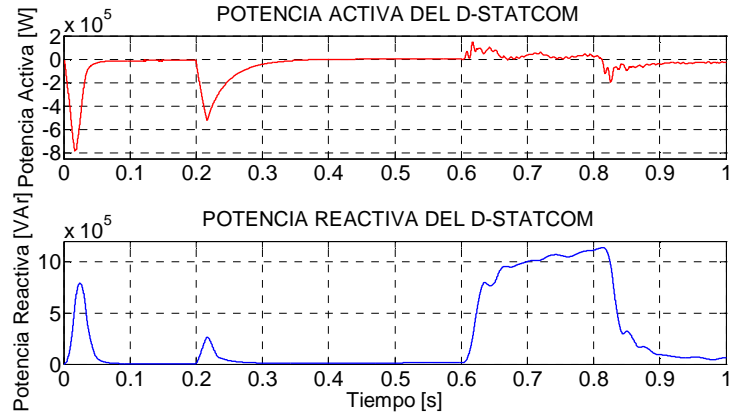


Figura 6.71. Corrientes inyectadas por el D-STATCOM para compensar la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(a-b-c)



Las corrientes de compensación producen un intercambio de energía reactiva entre el compensador y la red, el cual está representado por la potencia reactiva que se muestra en la figura 6.72; mientras que la potencia activa está relacionada con la carga del capacitor y las pérdidas del convertidor.

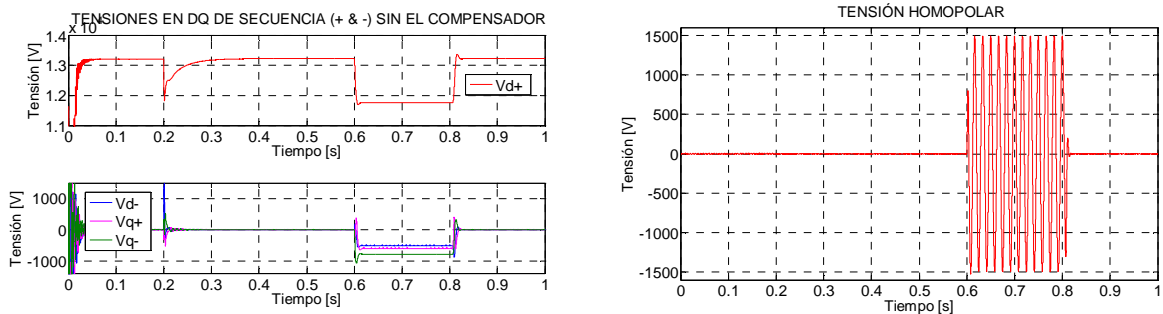
Figura 6.72. Potencia entregada por el D-STATCOM durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga monofásica, usando m.r.(a-b-c)



Compensación de la perturbación de tensión usando el algoritmo en el marco de referencia d-q-0

En la figura 6.73 se muestran las tensiones después de la transformación del marco de referencia a-b-c al d-q-0. Se observa la disminución en el valor de la tensión esperada en el eje directo de secuencia positiva con respecto a la referencia y la aparición de otras componentes de tensión durante la perturbación, lo cual es debido al desbalance en las tensiones de la red.

Figura 6.73. Tensiones de secuencia en el PCC durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga bifásica, vistas en m.r.(d-q-0)

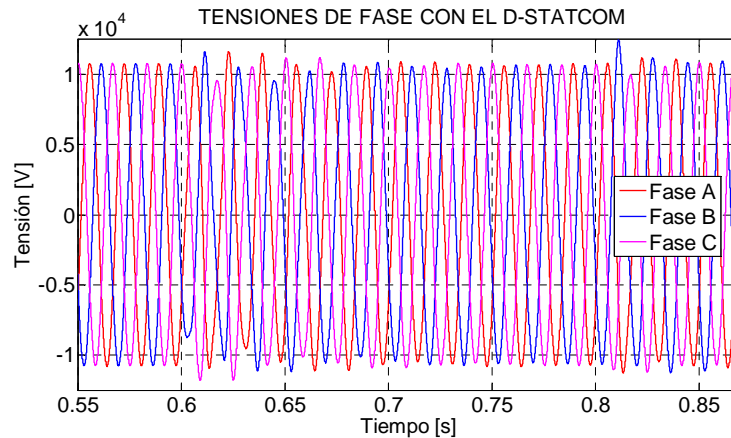


La compensación que se logra con la conexión del D-STATCOM al PCC cuando se presenta la perturbación, se muestra en las figuras 6.74 y 6.75 para las tensiones de fase y su transformación al marco de referencia d-q-0, respectivamente. La perturbación comienza a los 0,6 [s]; en ese mismo instante, el compensador inicia la corrección de las tensiones, y en aproximadamente tres ciclos de la señal de tensión, son llevadas alrededor del valor establecido como referencia, logrando que se disminuya el desbalance de tensión. Sin embargo, cuando la red recupera su condición de operación normal, se produce un estado transitorio en las tensiones del PCC, mientras las corrientes de compensación son llevadas a cero. En la figura 6.76, se muestra el valor eficaz de las tensiones de fase para el PCC antes, durante y después de la perturbación.

En este caso, las tensiones compensadas en el PCC usando este algoritmo de compensación son:

$$V_a = (7575,79 \angle 12,12^\circ) \quad V_b = (7583,06 \angle -108,43^\circ) \quad V_c = (7611,57 \angle 131,49^\circ)$$

Figura 6.74. Tensiones de fase en el PCC durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga bifásica, usando m.r.(d-q-0)



La figura 6.77, muestra el comportamiento de la tensión en el bus de DC del inversor, mostrando las mismas pérdidas relacionadas con la conmutación y la entrega transitoria de potencia activa que se describió en los casos anteriores.

Las corrientes de compensación escaladas se presentan en la figura 6.78. Estas corrientes mantienen sus ángulos de desfase con respecto a las tensiones del PCC, que hacen que no haya intercambio de potencia activa entre el D-STATCOM y la red; excepto la relacionada con la carga del capacitor y las pérdidas en el convertidor. En la figura 6.79, se muestra la potencia activa y reactiva involucrada en la compensación.

Figura 6.75. Tensiones de secuencia compensadas por el D-STATCOM durante la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga bifásica, vistas en m.r.(d-q-0)

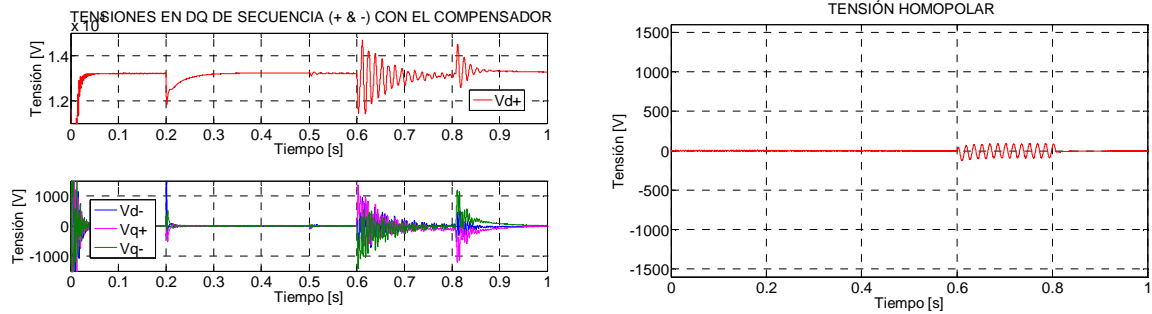


Figura 6.76. Valor eficaz de las tensiones de fase en el PCC durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga bifásica, usando m.r.(d-q-0)

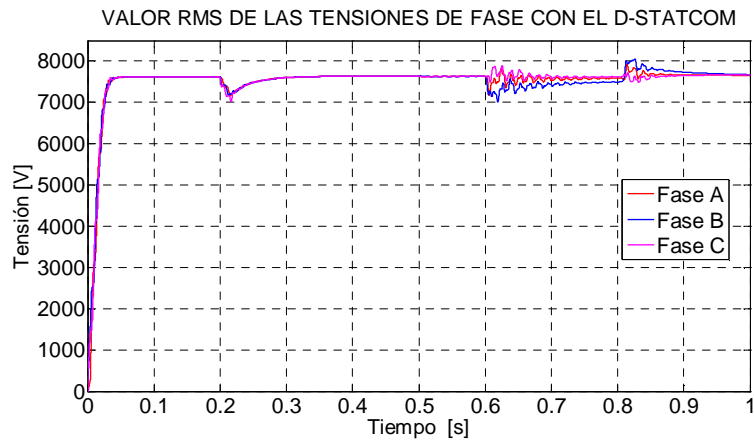


Figura 6.77. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga bifásica, usando m.r.(d-q-0)

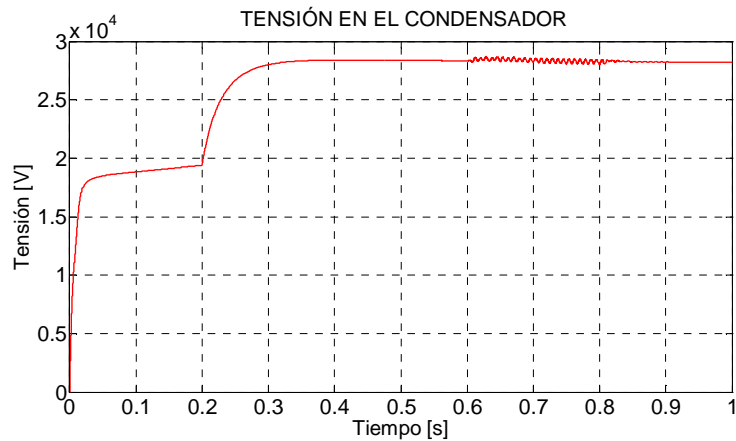


Figura 6.78. Corriente inyectadas por el D-STATCOM para compensar la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga bifásica, usando m.r.(d-q-0)

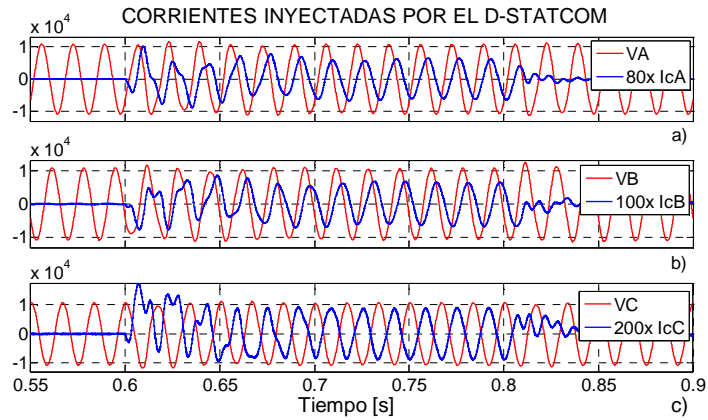
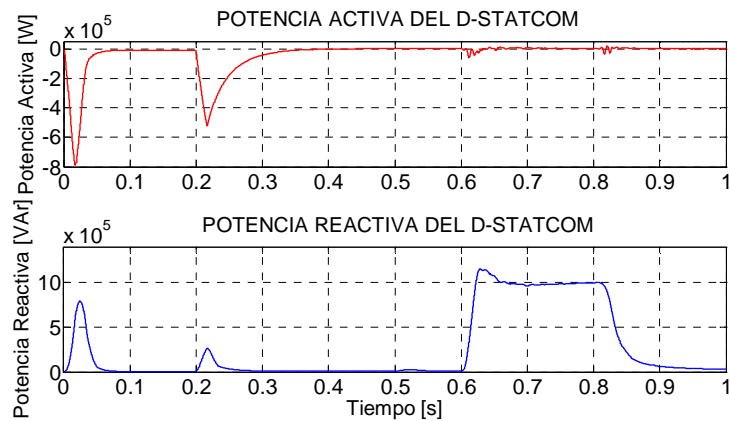


Figura 6.79. Potencia entregada por el D-STATCOM durante la compensación de la perturbación de tensión producida por la conexión de una carga bifásica, usando m.r.(d-q-0)



6.2.6 Simulación del D-STATCOM para compensar un hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada

Como se observa en la figura 6.80, las tensiones en el PCC son afectadas por un hueco trifásico balanceado producido por la conexión de una carga trifásica equilibrada en el punto de prueba de la red, en el intervalo de tiempo comprendido entre los 0,6 [s] y 0,8 [s]. La conexión de estas cargas, hace que las señales de tensión en el PCC disminuyan su amplitud en un 17,85% con respecto al valor en condiciones normales de operación de la red. De la misma manera, se aprecia la disminución correspondiente en el valor eficaz de las tensiones de fase, tal como se muestra en la figura 6.81.

Figura 6.80. Hueco de tensión en el PCC producido por la conexión de una carga trifásica balanceada

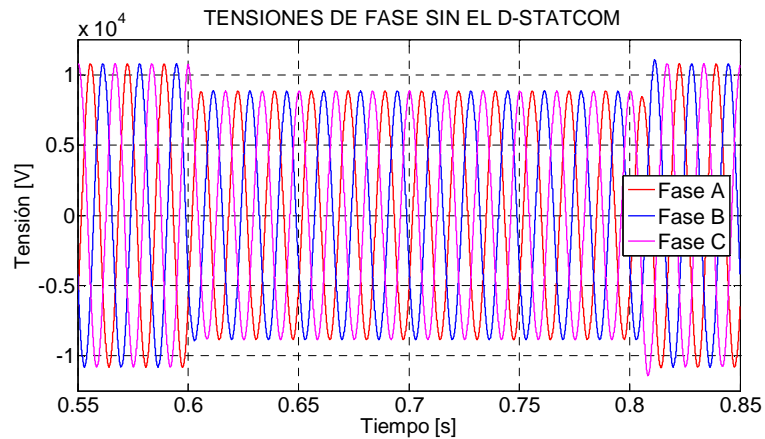
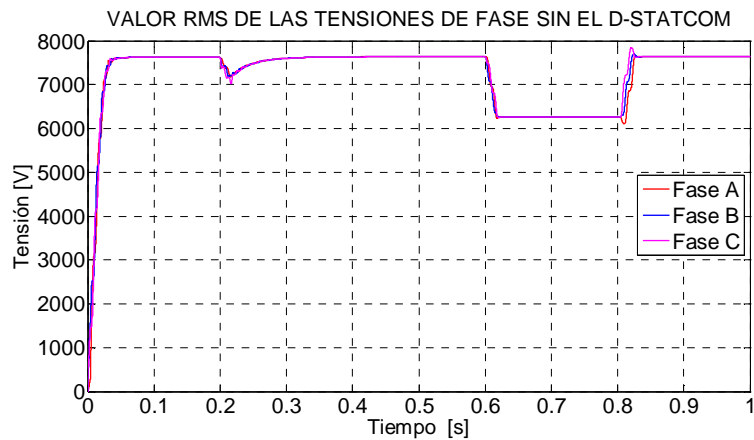


Figura 6.81. Valor RMS de las tensiones en el PCC, durante el hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada



Las tensiones que se presentan durante el hueco de tensión para el PCC son:

$$V_a = (6260,50 \angle 16,90^\circ) \quad V_b = (6260,81 \angle -102,99^\circ) \quad V_c = (6258,72 \angle 137,08^\circ)$$

🍏 **Compensación del hueco de tensión usando el algoritmo en el marco de referencia a-b-c**

La figura 6.82, muestra la compensación realizada sobre las tensiones de fase para el PCC. La compensación que genera el DSTATCOM, permanece durante la perturbación, y permite que la amplitud de las tensiones sea llevada a valores cercanos a la referencia durante el primer ciclo de la onda de tensión, a partir de que se inicia el hueco. De la misma manera, se observa en la figura 6.83, que el valor eficaz de estas tensiones en el

PCC, se mantiene en valores cercanos a los que se presentan para este punto en condiciones de operación normales de la red.

Las tensiones de fase compensadas mediante este algoritmo son las siguientes:

$$V_a = (7612,01 \angle 8,39^\circ) \quad V_b = (7613,38 \angle -111,44^\circ) \quad V_c = (7594,92 \angle 128,36^\circ)$$

Figura 6.82. Tensiones de fase compensadas por el D-STATCOM durante el hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada, usando m.r.(a-b-c)

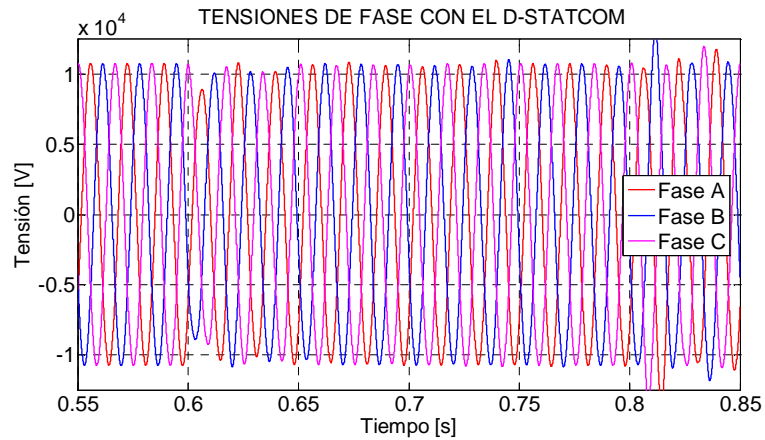
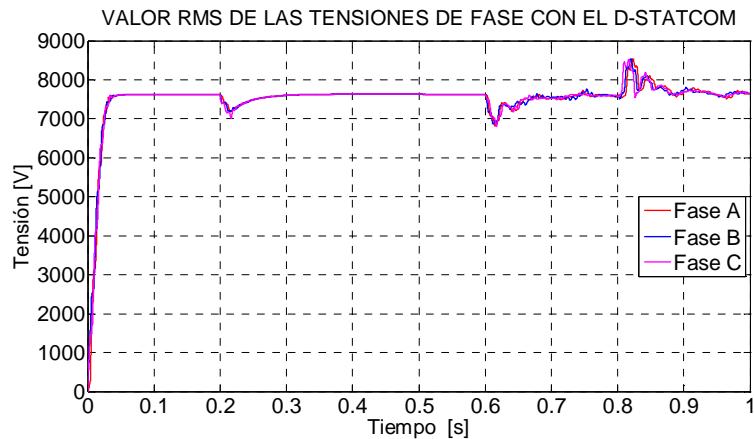


Figura 6.83. Valor RMS de las tensiones de fase durante la compensación del hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada, usando m.r.(a-b-c)



La dinámica del control de la tensión en el bus de continua se aprecia en la figura 6.84. Inicialmente se muestra la carga del capacitor hasta el valor de referencia y posteriormente, durante la compensación de las tensiones de la red en el PCC, se observa que la acción de control permite mantener este nivel de tensión a pesar de las

pérdidas de potencia en el convertidor, por tal razón se presentan pequeñas oscilaciones sobre la tensión del bus de DC.

Las corrientes que entrega el compensador para cada fase con un factor de escalamiento, se muestran en la figura 6.85. Se observan tres corrientes de igual amplitud, ortogonales y en adelante a la tensión en el PCC; estas características de las corrientes de compensación permiten que el intercambio de energía entre el D-STATCOM y la red, constituyan un flujo de potencia reactiva y el compensador se comporte como un capacitor trifásico conectado en paralelo junto a la carga. La figura 6.86, muestra la potencia involucrada en la compensación. La potencia activa corresponde al consumo necesario para cargar el capacitor y la potencia de pérdidas del convertidor.

Figura 6.84. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM durante la compensación del hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada, usando m.r.(a-b-c)

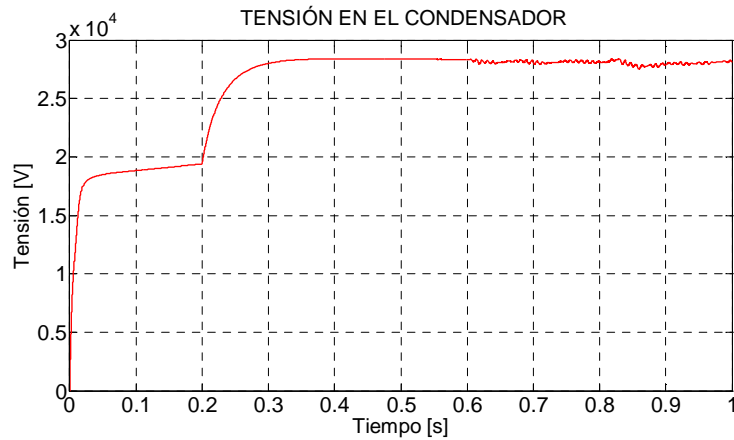


Figura 6.85. Corrientes inyectadas por el D-STATCOM para compensar el hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada, usando m.r.(a-b-c)

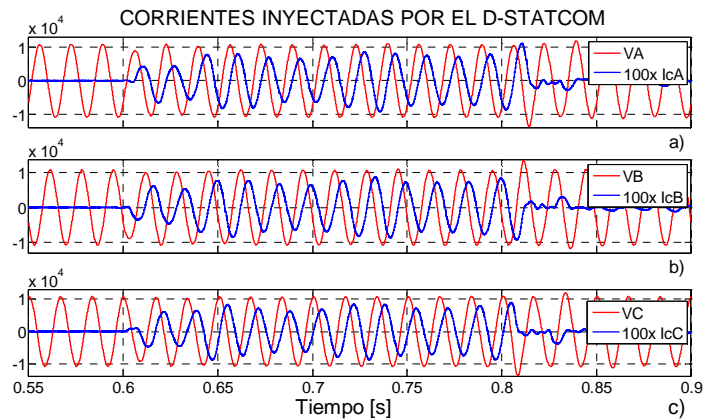
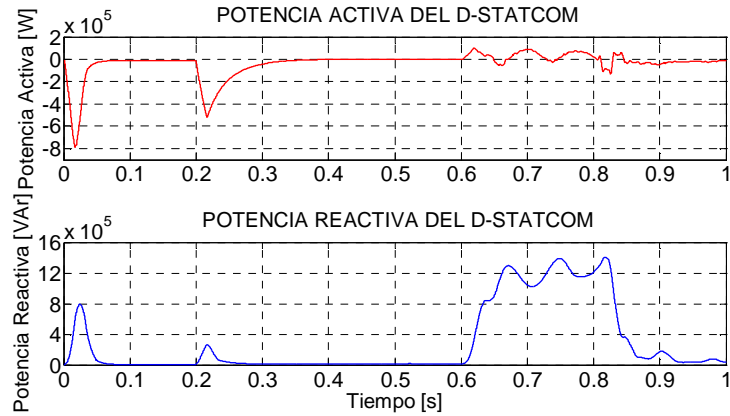


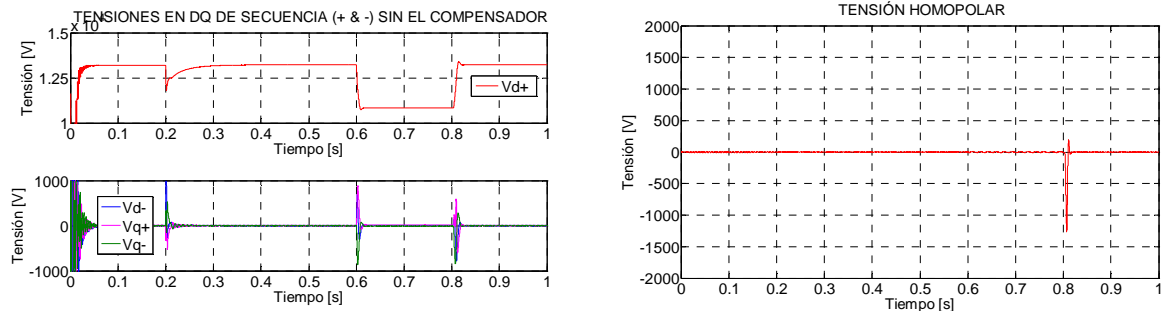
Figura 6.86. Potencia entregada por el D-STATCOM durante la compensación del hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada, usando m.r.(a-b-c)



• Compensación del hueco de tensión usando el algoritmo en el marco de referencia d-q-0

En la figura 6.87, se muestran las tensiones de secuencia que aparecen durante la perturbación, transformadas al marco de referencia síncrono d-q-0. La conexión de la carga en el punto de prueba de la red, produce una caída del mismo valor de tensión para las tres fases, la cual en el marco d-q-0 se manifiesta como una disminución en el valor de tensión de la componente de eje directo de secuencia positiva, mientras que los demás ejes se mantienen en los niveles de referencia; esto indica que la perturbación es balanceada; por lo cual la acción de control se dará únicamente en el eje en cuadratura de secuencia positiva.

Figura 6.87. Tensiones de secuencia en el PCC durante la compensación del hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada, vistas en m.r.(d-q-0)



Los resultados de la compensación para las tensiones de fase en el PCC, se muestran en la figura 6.88, y en la figura 6.89 para el marco de referencia d-q-0. La compensación

permite que las tensiones alcancen el valor de referencia en aproximadamente un ciclo de la señal de tensión a partir del momento en que ocurre el hueco de tensión. Cuando la red vuelve a su estado de operación normal, se produce nuevamente un estado transitorio en las tensiones del PCC, mientras las corrientes de compensación son llevadas a cero.

Las tensiones compensadas en el PCC mediante este algoritmo de control son:

$$V_a = (7572,98 \angle 6,55^\circ) \quad V_b = (7577,90 \angle -113,43^\circ) \quad V_c = (7567,50 \angle 126,58^\circ)$$

Figura 6.88. Tensiones de fase en el PCC durante la compensación del hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada, usando m.r.(d-q-0)

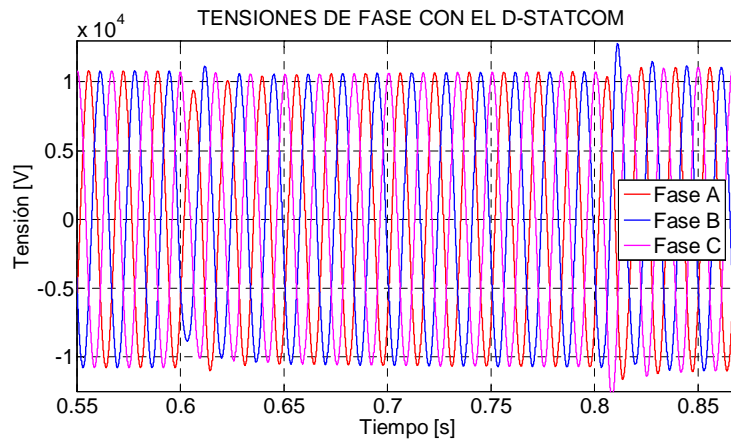
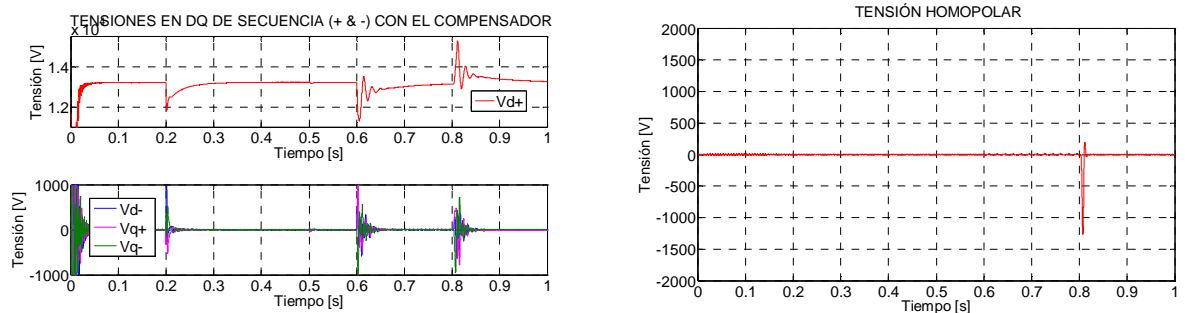


Figura 6.89. Tensiones de secuencia compensadas por el D-STATCOM durante el hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada, vistas en m.r.(d-q-0)



El valor eficaz de las tensiones de fase compensadas, se muestra en la figura 6.90. Desde el momento en que se presenta el hueco, la compensación suministrada por el D-STATCOM, controla el valor eficaz de las tensiones de fase y lo lleva progresivamente hacia el valor de referencia dado para el PCC.

La forma en que se carga el capacitor hasta el valor de referencia de tensión del bus de DC, se ilustra en la figura 6.91. La acción de control sobre la tensión del capacitor

compensa las pérdidas de potencia relacionadas con la conmutación de los transistores del convertidor y mantiene la tensión del lado de DC en el valor establecido.

Figura 6.90. Valor eficaz de las tensiones de fase en el PCC durante la compensación del hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada, usando m.r.(d-q-0)

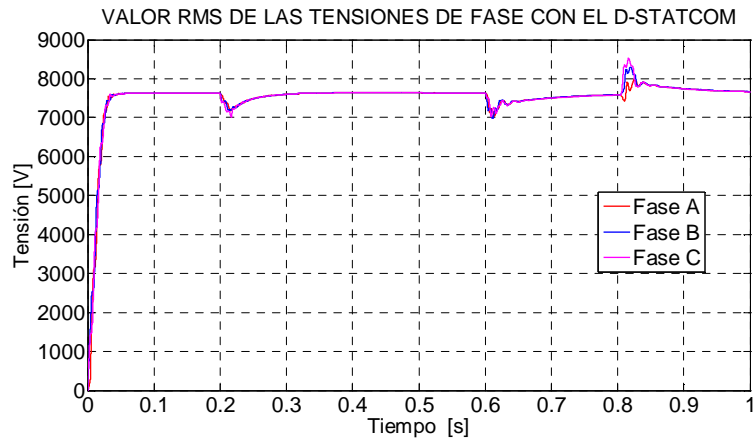
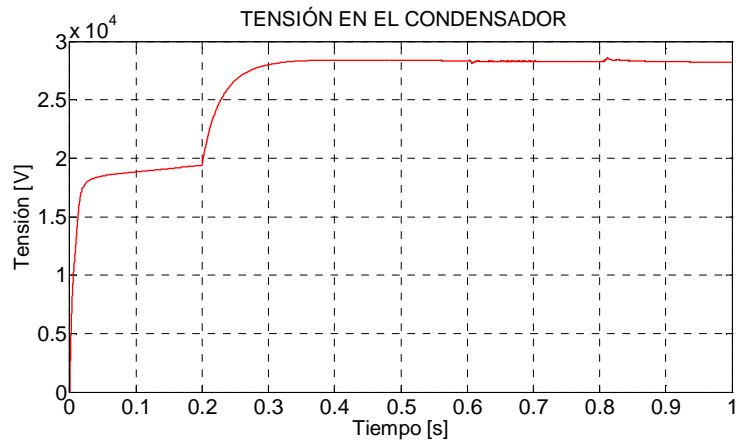


Figura 6.91. Tensión en el bus de DC del D-STATCOM durante la compensación del hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada, usando m.r.(d-q-0)



Las corrientes de compensación escaladas, se muestran en la figura 6.92. Estas corrientes están en cuadratura y en adelante con las tensiones del PCC. Se observa que son inyectadas a la red durante el intervalo de tiempo de duración de la perturbación y constituyen el consumo de potencia reactiva, que aparece en la figura 6.93.

Figura 6.92. Corriente inyectadas por el D-STATCOM para compensar el hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada, usando m.r.(d-q-0)

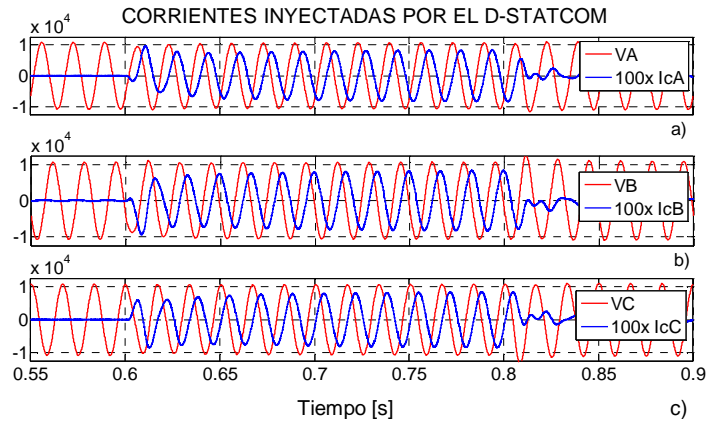
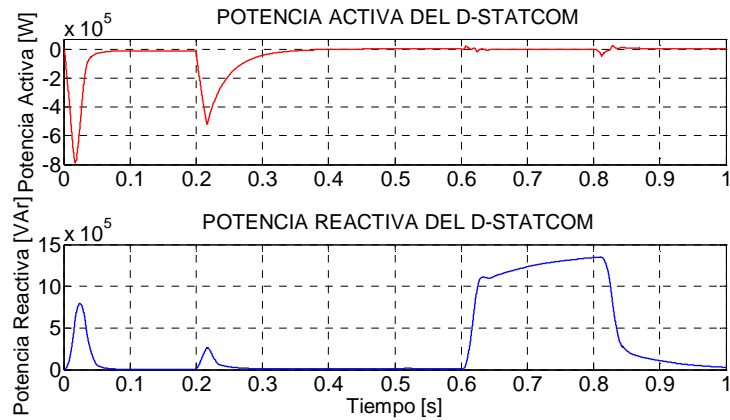


Figura 6.93. Potencia entregada por el D-STATCOM durante la compensación del hueco de tensión producido por la conexión de una carga trifásica balanceada, usando m.r.(d-q-0)



6.3 Capacidad de compensación del D-STATCOM en modo tensión.

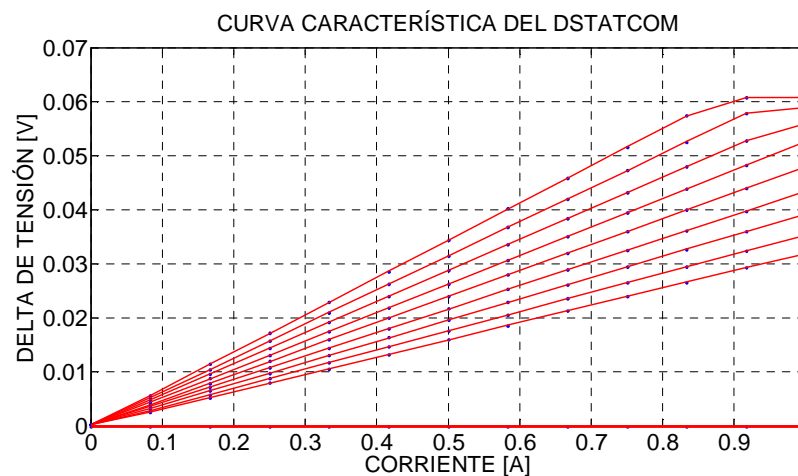
La capacidad de compensación que puede lograr el D-STATCOM cuando se conecta para controlar la tensión en algún punto de interés de la red, depende de la cantidad de energía que puede extraerse de la fuente inversora y de los parámetros del circuito equivalente en el punto en el cual se conecta el compensador.

La compensación del nivel de tensión que el D-STATCOM puede lograr para distintos valores de la corriente inyectada, a manera de ejemplo, se muestra en la figura 6.94. Estas curvas se obtuvieron con el sistema que se presenta en la figura 7 del anexo A, el cual consta de una fuente de alimentación trifásica balanceada, una impedancia variable que representa la red de distribución, y una carga fija de $R = 15 [\Omega]$ y $L = 25,2 [\text{mH}]$. Cada curva trazada corresponde a un valor diferente de impedancia equivalente del sistema, vista desde el PCC. Inicialmente se utilizó una impedancia de la red con $R = 2 [\Omega]$ y

$L = 53,051$ [mH], con la que se generó la segunda curva en orden ascendente y posteriormente, para las siguientes curvas, se hizo cada vez, un incremento del 10% de los parámetros de la red.

Una mayor impedancia de la red, corresponde a una mayor pendiente de la curva, lo que tiene relación directa con la cantidad de tensión que se puede compensar. Esto quiere decir que el dispositivo puede elevar la tensión con menor corriente si existe una mayor reactancia total en el sistema que pueda aprovechar la energía reactiva inyectada por el D-STATCOM.

Figura 6.94. Curva de capacidad de compensación del D-STATCOM en modo control de tensión



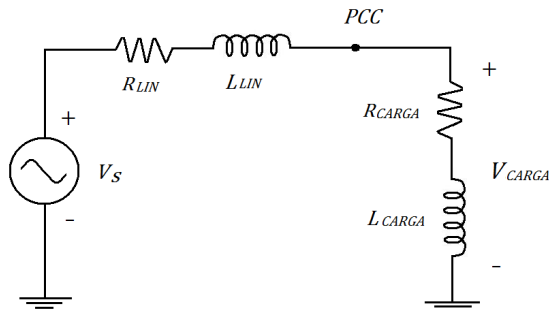
Se encuentran entonces puntos de frontera en la compensación que puede lograr el D-STATCOM, y están dados en primer lugar por el máximo flujo de reactivos que se puede inyectar desde el compensador hacia la red y por otro lado por la ubicación relativa entre el compensador y la carga o la falla que generan la variación en la tensión. Siendo así, un punto crítico para la compensación, ocurre cuando se presenta una condición de corto circuito en la misma barra de conexión del compensador, caso en que la potencia entregada es consumida por la falla, sin importar la cantidad de reactivos que se inyecten; esto corresponde en la figura 6.94, a la curva trazada sobre el eje de corriente. En esta condición, la impedancia equivalente que se ve desde el PCC es cero. El otro punto de frontera está determinado por la capacidad del convertidor, y en la grafica correspondería a una línea paralela al eje de la tensión, ubicada sobre el valor máximo de corriente que se puede extraer de la fuente VSI.

En los siguientes ejemplos se ilustran dos situaciones en que los parámetros del circuito visto por el D-STATCOM, determinan la capacidad de compensación de la tensión en el PCC, mediante la inyección de potencia reactiva.

Ejemplo 1.

En la figura 6.95, se muestra el circuito equivalente de una red de distribución monofásica, cuya impedancia de la línea, vista desde el punto de conexión de la carga está dada por los parámetros R_{LIN} y L_{LIN} , mientras que la impedancia de la carga está representada por R_{CARGA} y L_{CARGA} . Para $R_{LIN} = 1 [\Omega]$, $L_{LIN} = 100 [\text{mH}]$, $R_{CARGA} = 100 [\Omega]$, $L_{CARGA} = 70 [\text{mH}]$, y $V_S = (7621 \angle 0^\circ) [\text{V}]$, a una frecuencia de $60 [\text{Hz}]$.

Figura 6.95. Equivalente monofásico de Thevenin de una red de distribución

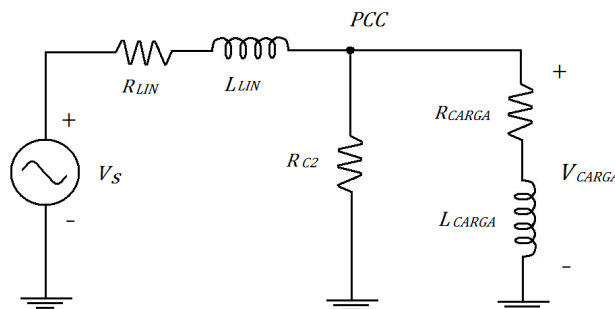


La tensión en el punto de conexión de la carga en condiciones normales de funcionamiento está dada por:

$$V_{CARGA} = \frac{7621 * (103.42 \angle 14.78^\circ)}{(37.71 \angle 88.48^\circ) + (103.42 \angle 14.78^\circ)} = (6589.25 \angle -17.61^\circ) [\text{V}]$$

Tomando la tensión hallada como el valor eficaz de tensión que debe mantenerse en la carga para cumplir con la regulación del sistema, al conectar una carga resistiva adicional $R_{C2} = 60 [\Omega]$, hará que la tensión en el punto de conexión para la carga esté por debajo del valor ideal. El esquema que incluye la carga adicional R_{C2} , se muestra en la figura 6.96 y el efecto de la conexión de esta carga, puede verse en la figura 6.97.

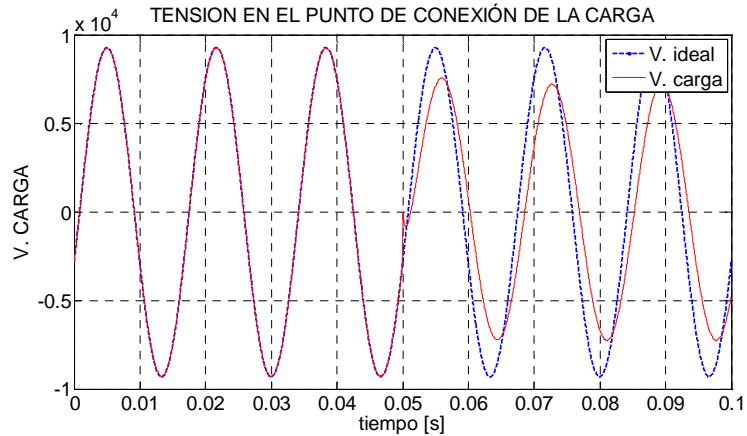
Figura 6.96. Equivalente monofásico de la red de distribución con la conexión de una carga adicional



El cálculo de la tensión en el punto de conexión de la carga para la nueva condición de operación es el siguiente:

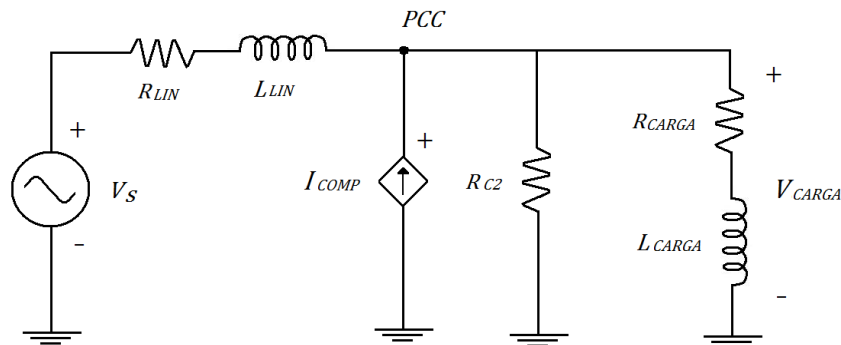
$$V_{CARGA} = \frac{7621 * (38.27 \angle 5.42^{\circ})}{(37.71 \angle 88.48^{\circ}) + (38.27 \angle 5.42^{\circ})} = (5127.52 \angle -41.16^{\circ}) [V]$$

Figura 6.97. Tensión en el punto de conexión de la carga antes y después de la conexión de R_{C2}



Ahora, el objetivo de control sobre el valor eficaz de la tensión en el punto de conexión, busca que el D-STATCOM inyecte una corriente en cuadratura con la tensión, que aporta solo potencia reactiva al sistema, y de esta manera la tensión alcance el valor de referencia. Entonces se plantea la siguiente ley de corrientes de Kirchhoff, con base en la figura 6.98, en donde se modela el compensador como una fuente de corriente controlada, conectada en paralelo en el PCC.

Figura 6.98. Compensador ideal conectado a la red para compensar la tensión en el PCC



Fijando la tensión en el valor establecido como referencia de 6589.25 [V], se tiene:

$$\frac{V_s - V_{CARGA}}{R_{LIN} + j120\pi * L_{LIN}} - I_{COMP}\angle(\alpha + 90^0) - \frac{V_{CARGA}}{R_{C2} \parallel (R_{CARGA} + j120\pi * L_{CARGA})} = 0$$

$$\frac{7621 - (6589.25\angle\alpha)}{(37.71\angle 88.48)} - (I_{COMP}\angle(\alpha + 90^0)) - \frac{(6589.25\angle\alpha)}{(38.27\angle 5.4163)} = 0$$

$$(202.09\angle - 88.48) = (174.72\angle(\alpha - 88.48)) + (I_{COMP}\angle(\alpha + 90^0)) + (172.17\angle(\alpha - 5.42))$$

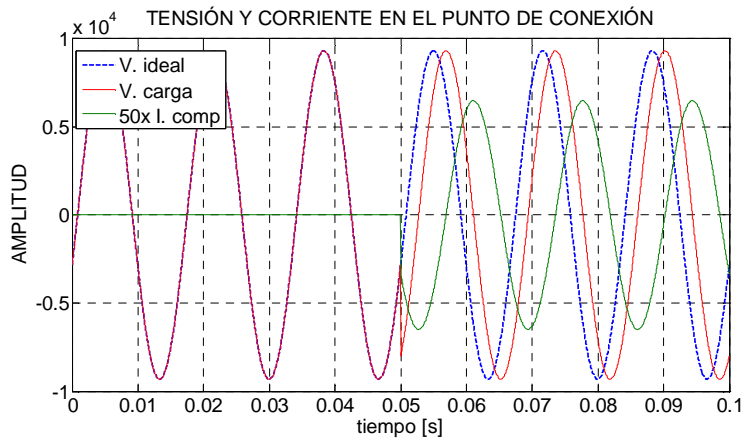
Se planteó una ecuación de corrientes en el punto común de conexión, en donde las incógnitas son la corriente que debe inyectarse y el nuevo ángulo de la tensión del nodo, manteniendo su valor de magnitud de acuerdo a las condiciones normales de operación. Para cumplir la condición de desfase de 90^0 entre la tensión y corriente, no puede mantenerse el mismo ángulo de operación inicial. Entonces la compensación en magnitud trae consigo un desfase de la tensión con respecto a la condición inicial.

La solución a la ecuación planteada, es la corriente que debe inyectar el D-STATCOM a la red para que la tensión en el punto de conexión alcance el valor de tensión preestablecido. Para este caso particular, la corriente requerida es:

$$I_{COMP} = 91.72\angle(- 30.92^0) [A]$$

Los resultados de simulación que se muestran en la figura 6.99. V_{ideal} , representa la tensión de la carga en condiciones ideales de operación; V_{carga} , es la tensión en la carga, antes y después de la compensación, e I_{comp} , es la corriente de compensación escalada. Se observa que el ángulo de desfase entre la tensión compensada y la corriente de compensación, hace que la fuente controlada tenga un comportamiento equivalente al de un capacitor que entrega potencia reactiva.

Figura 6.99. Corriente de compensación y tensión en el PCC antes y después de la compensación.



Ejemplo 2:

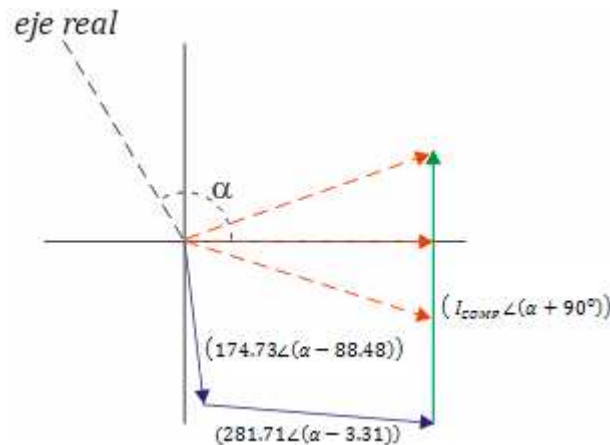
Para el circuito de la figura 6.98 los parámetros del circuito mostrado se mantienen para R_{LIN} , L_{LIN} , R_{CARGA} , L_{CARGA} , y V_S ; y ahora, se conecta una carga resistiva de menor magnitud, $R_{C2} = 30 [\Omega]$. entonces estableciendo la ecuación de corrientes que se suman en el punto de conexión de la carga, se tiene:

$$\frac{7621 - (6589,25\angle\alpha)}{(37.71\angle 88.48)} - (I_{COMP}\angle(\alpha + 90^\circ)) - \frac{(6589,25\angle\alpha)}{(23.39\angle 3.31)} = 0$$

$$(202.09\angle -88.48) = (174.73\angle(\alpha - 88.48)) + (I_{COMP}\angle(\alpha + 90^\circ)) + (281.71\angle(\alpha - 3.31))$$

Se ha puesto como referencia un eje ubicado en la dirección de la tensión compensada en el punto de conexión; este eje está desfasado α^0 medidos a partir del eje real del plano complejo, tal como se muestra en la figura 6.100. A partir de este eje, pueden situarse los vectores que conforman la ecuación, cuyo ángulo es medido a partir del eje α y tienen magnitudes conocidas (vectores en color azul). Para que la ecuación pueda ser solucionada, la corriente reactiva (color verde), debe formar un contorno cerrado, en el que el vector de color rojo puentado, debe tener una magnitud de 202.09 [A], y un ángulo de fase de -88.48^0 , medidos a partir del eje real del plano complejo.

Figura 6.100. Diagrama fasorial de un sistema no compensado por el D-STATCOM



Puede observarse que para cumplir esta ecuación, la menor longitud que puede tener la componente de corriente en rojo, es la que se obtiene cuando este vector está en fase con la tensión en el punto de conexión.

Al hacer la proyección de las componentes de corriente en color azul sobre el eje en dirección de la tensión en el PCC, se obtiene el valor mínimo que debe tener el vector en color rojo, para que la compensación con potencia reactiva sea posible.

$$174.72 \cos (-88.48^\circ) + 281.71 \cos (-3.31^\circ) = 285.87 [A]$$

Como puede observarse, no es posible encontrar una solución real para esta ecuación, lo que implica que no se puede compensar la tensión hasta el valor de la referencia usando solo potencia reactiva. La compensación de la tensión para este caso necesita que se inyecte potencia activa a la red, y para esto se requiere que el D-STATCOM tenga un elemento almacenador de energía del lado de DC distinto de un condensador.

En este ejemplo, se puede ver que la capacidad de compensación del D-STATCOM, está limitada por los parámetros de la red a la que se conecta y específicamente por la impedancia equivalente que se ve desde el punto de conexión del compensador.

7. CONCLUSIONES

Se han integrado conocimientos del área de ingeniería eléctrica junto con algunos algoritmos propuestos por estudiosos de la calidad de la energía, y se han obtenido modelos del D-STATCOM que han permitido analizar su desempeño como compensador de perturbaciones en las corrientes de la red y algunos problemas relacionados con la tensión en el PCC. Los resultados encontrados permiten presentar las conclusiones y aportes que se desarrollan a continuación. De igual manera, se proponen algunos trabajos que deberían desarrollarse a futuro para complementar el trabajo realizado.

El D-STATCOM, se presenta como una solución viable y versátil para contrarrestar diversos problemas relacionados con la calidad de la energía eléctrica en los sistemas de distribución; el cual busca asegurar el buen funcionamiento de la red en presencia de eventos fortuitos o de maniobra y compensar las perturbaciones hacia la red de suministro. La naturaleza de su modo de conexión, hace que el D-STATCOM presente excelentes prestaciones en el acondicionamiento de corrientes para sistemas trifásicos de cuatro hilos; pero con las técnicas de control adecuadas, puede ampliarse su espectro de acción hacia la corrección de perturbaciones que afectan la calidad de las ondas de tensión.

La técnica de control por histéresis de corriente, seleccionada para la generación de los pulsos de disparo del puente inversor, presenta un buen desempeño al sintetizar las corrientes de salida del D-STATCOM, haciendo que estas sigan las señales de referencia, para los casos en que no se demanda una energía mayor a la que el convertidor puede entregar. Esta forma de control para la fuente VSI simulada con modelos de IGBT's ideales, cuenta con una rápida respuesta debido a su no linealidad y a la ausencia de retardos significativos. Además, es de fácil aplicación a inversores en los que las ramas de transistores trabajan de manera independiente.

Con este modo de control no se tiene un periodo fijo de conmutación para los transistores del convertidor. Las secuencias de conmutación están determinadas por el ancho de la banda de histéresis, el valor de la tensión del bus de DC del convertidor, el valor de la impedancia de acople con la red, y la forma de la señal de referencia a seguir.

Para regular la frecuencia de conmutación en los transistores del convertidor, una vez se ha establecido el nivel de tensión en el bus de DC, se requiere hacer una adecuada selección del valor de la inductancia de acople con la red y del ancho de la banda de histéresis; puesto que, para un valor de banda de histéresis determinado, un menor valor en la inductancia de acople hace que la corriente deba cambiar de sentido un mayor número de veces por unidad de tiempo para mantenerse dentro de los valores de la banda de histéresis; esto exige una mayor frecuencia de conmutación en el inversor; lo mismo ocurre al disminuir el ancho de la banda de histéresis, para un valor de inductancia determinado. Una adecuada selección de estos dos parámetros, permite que la velocidad de conmutación de los transistores del convertidor, no sean superiores a la máxima frecuencia a la que pueden operar, y con esto se reduce el error en el seguimiento de la señal de referencia.

El hecho de no tener un periodo fijo de conmutación, dificulta la estimación de los parámetros para el convertidor controlado mediante histéresis. En la literatura se

mencionan valores típicos para la inductancia de acople, el capacitor del bus de DC y el ancho de la banda de histéresis; sin embargo, el ajuste de estos valores está determinado por las características de las señales que se deben sintetizar, la magnitud de las corrientes de compensación e incluso la distorsión armónica que se inyecta a la red. Por esta razón, es importante hacer pruebas con distintas combinaciones de estos parámetros para buscar el mejor desempeño posible del inversor.

El control PI sintonizado apropiadamente, para controlar la tensión en el bus de continua, hace que el condensador se cargue hasta el valor de tensión de referencia, y posteriormente durante la compensación de las corrientes de la red o las tensiones en el PCC, calcula la potencia que debe ser tomada de la red para evitar que el condensador se descargue por las pérdidas relacionadas con el estado transitorio al inicio de la compensación y las pérdidas inherentes al funcionamiento del inversor en estado permanente. Esto hace que la tensión del capacitor presente oscilaciones de poca amplitud alrededor del valor de referencia.

D-STATCOM EN MODO CONTROL DE CORRIENTE.

La teoría p-q y las modificaciones estudiadas, las cuales permiten adaptarla a sistemas trifásicos de cuatro hilos, fueron utilizadas en los modelos de D-STATCOM simulados para evaluar su funcionamiento como compensador de las corrientes de una red de distribución. Estos algoritmos, utilizados en condiciones de tensiones balanceadas y sin armónicos para el PCC, presentan un buen desempeño para el cálculo de las corrientes de compensación cuando en la red de distribución se presentan corrientes armónicas, corrientes desbalanceadas y problemas de factor de potencia.

Los D-STATCOM destinados a corregir problemas de corriente, en sistemas de distribución con neutro, requieren que las teorías usadas en el cálculo de las corrientes de compensación incluyan el efecto de la componente de corriente homopolar que se presenta cuando se alimentan cargas no lineales o desbalanceadas. De lo contrario, no pueden generarse las señales de referencia adecuadas y la compensación no alcanza resultados satisfactorios, tal como ocurre en la teoría p-q sin componente homopolar.

La compensación mediante sistemas D-STATCOM, mejora la 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. La potencia no activa que se consume en la carga es aportada en forma controlada por el D-STATCOM para compensar cargas desbalanceadas, bajos factores de potencia y corrientes armónicas. Además, el seguimiento continuo de las señales de interés, hace que las acciones de control sigan la dinámica de la carga para ejecutar la orden de compensación adecuada en el momento en que se requiere.

Bajo condiciones ideales para la tensión en el PCC, se obtuvieron resultados de compensación favorables; sin embargo, la presencia de cargas no lineales o desbalanceadas, pueden causar que se presenten tensiones con distorsión armónica o desbalance, que inducen error en el cálculo de las corrientes de compensación calculadas mediante estos algoritmos.

Se encontró que el uso del D-STATCOM en la compensación de corrientes demandadas por cargas no lineales, mejora notablemente el valor TDH medido en la red. Las simulaciones del compensador usando las teorías p-q con componente homopolar, p-q modificada, d-q y p-q-r, muestran valores del THD menores a 2,6%. Este valor está dentro de los límites establecidos por la norma IEEE 519-1992, que especifica un THD máximo de corriente de 30%. Es importante notar que la distorsión armónica total, se hace más crítica en la medida en que las corrientes que circulan por la red después de la compensación son de menor amplitud, por lo que los valores de THD pueden variar dependiendo de la componente activa de la carga que se alimenta.

Las corrientes desbalanceadas y los problemas de factor de potencia en la red, son compensados por el D-STATCOM, haciendo que las corrientes de la red tengan el mínimo valor eficaz que permite transportar la potencia total de la carga. De esta manera, la energía aportada por la fuente del sistema, constituye un conjunto de corrientes balanceadas y en fase con la tensión del PCC, mientras que la energía asociada con la potencia reactiva y el desbalance de la carga, es suministrada por el D-STATCOM.

La compensación realizada con el D-STATCOM, debe incluir un filtro para minimizar la introducción de armónicos de alta frecuencia a la red, que son producidos por las conmutaciones de alta velocidad de los transistores del convertidor en el seguimiento de las señales de referencia. La distorsión armónica en corriente (THD_I), puede controlarse en alguna medida para el sistema con una selección adecuada de los parámetros de la fuente VSI, como lo son el nivel de DC, el valor de la inductancia de acople y el ancho de la banda de histéresis.

D-STATCOM EN MODO CONTROL DE TENSION.

Los modelos de D-STATCOM usados en modo control de tensión, fueron simulados para observar su capacidad de compensación ante condiciones de operación de la red que causan variaciones de larga duración en la amplitud de la tensión en relación con el valor de referencia dado para el PCC y perturbaciones equilibradas y desequilibradas, de corta duración que se manifiestan como huecos o elevaciones de tensión.

El objetivo de control busca mantener la tensión en el valor de referencia para el PCC, mediante la inyección de potencia reactiva a través de las corrientes de compensación generadas en el inversor. Los métodos de control propuestos para el cálculo de las corrientes de compensación operan en diferentes marcos de referencia, los cuales se basan en el uso de controladores PI que utilizan el error en tensión para generar las acciones de control adecuadas.

El algoritmo de control implementado en el marco de referencia a-b-c, busca que la amplitud de las tensiones en el PCC, tenga el valor dado como referencia y que el conjunto de tensiones sea balanceado. Los resultados de simulación muestran que el objetivo de la compensación puede conseguirse siempre que se presentan perturbaciones balanceadas. Por otro lado, si las perturbaciones inducen desbalances de tensión en el PCC, el D-STATCOM puede hacer que las tensiones del sistema trifásico sean compensadas en cuanto a su amplitud alcancen el valor de amplitud por fase; sin embargo, las tensiones de línea continúan desequilibradas, pues este método de

compensación, no tiene control sobre el ángulo de fase de las tensiones resultantes. Esto constituye una condición de operación indeseable para las cargas trifásicas y limita el uso de este algoritmo para algunos casos específicos de control de tensión que no incluyen los problemas causados por desbalances de tensión.

El algoritmo de control que opera en el marco de referencia d-q-0, tiene un desempeño satisfactorio en el control de la tensión en el PCC. Tiene la ventaja de descomponer las tensiones medidas en componentes de secuencia, mediante las que se puede tomar acciones correctivas que permiten tener control sobre la magnitud y el ángulo de las tensiones resultantes de la compensación; además muestra que las corrientes de compensación calculadas requieren una energía menor en comparación con el algoritmo anterior, lo cual se puede ver en las simulaciones que muestran las tensiones del bus de DC y las pérdidas de potencia activa en el convertidor.

En la capacidad de compensación del D-STATCOM en modo tensión, influyen de manera directa la ubicación sobre la red del punto de conexión y la distancia a la que ocurren las eventualidades que generan fallas. Esto tiene sentido, pues un mayor valor de inductancia en la impedancia equivalente que ve el compensador, produce un mayor aprovechamiento de la potencia reactiva inyectada por el D-STATCOM a la red. De ahí se encuentra que un problema de regulación debido a fallas o cargas altamente resistivas conectadas muy cerca al D-STATCOM, podría hacer que no se logre el objetivo de compensación deseado y que la corrección sobre los valores de tensión en el PCC se haga sólo hasta el punto en que los parámetros del circuito equivalente lo permitan.

🍏 APORTES

Se ha realizado un trabajo en el que se hace un acercamiento al funcionamiento real del D-STATCOM, mediante la simulación de algunas estrategias de control que gobiernan sus modos de operación; se han identificado las limitaciones y prestaciones que ofrece cada uno de ellas, y se han hecho conclusiones acerca de la capacidad de compensación que puede tener el D-STATCOM bajo diferentes escenarios de funcionamiento.

Se identifican las fortalezas que posee el D-STATCOM en modo control de corriente, y se ha mostrado mediante simulaciones que es un dispositivo con muy buen desempeño como compensador, incluso frente a condiciones de operación variables debido a cambios en la carga. También se hace una contribución inicial para evaluar la versatilidad que puede llegar a tener como regulador de tensión, y verificar su funcionamiento en escenarios propios de compensadores de conexión en serie a la carga, lo que haría del D-STATCOM, un dispositivo de propósito general.

La posibilidad de mejorar la eficiencia de las redes de distribución, y brindar mejores características en las señales de tensión, son beneficios que se pueden asegurar con el uso de un D-STATCOM. Este trabajo constituye un aporte adicional que sirve como base para la implementación física de este compensador, que por las opciones que ofrece en el mejoramiento en la calidad de la energía, se convierte en un dispositivo de interés para los operadores de red y para los usuarios interesados en mantener buenas características de la energía que consumen sus equipos.

Se hace la documentación de información relevante relacionada con el funcionamiento interno del D-STATCOM. Esto incluye la fuente inversora de tensión, los algoritmos para el cálculo de las señales de referencia y los diferentes sistemas de control que fueron utilizados. Adicionalmente, se generó un soporte para la validación de las formas de compensación que el dispositivo puede hacer para mejorar la calidad de la energía eléctrica y que sirve como apoyo para futuros desarrollos en el área de los compensadores para sistemas de distribución.

🍏 TRABAJOS FUTUROS

El trabajo realizado, da cabida a la propuesta de otros trabajos que pueden realizarse con el objetivo de mejorar el desempeño del D-STATCOM en sus dos modos de operación.

1. Uso de otros algoritmos para el cálculo de las corrientes de compensación para los dos modos de operación del D-STATCOM, que permitan incluir condiciones de distorsión armónica en las tensiones del PCC.
2. Utilización de técnicas de control diferentes al control de histéresis por corriente y el control PI, para el control del convertidor de potencia y del nivel de tensión en el bus de DC, respectivamente.
3. Implementación de los algoritmos de control utilizados en el D-STATCOM, en un DSP.
4. Realización física del D-STATCOM en sus dos modos de operación.
5. Estudio de la selección óptima del punto de conexión del D-STATCOM a la red de distribución.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Arindam Ghosh, Gerard Ledwich, *Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices*, 1ra ed., Kluwer Academic Publishers, London, 2002.
- [2] B. Singh, K. Al-Haddad, and A. Chandra, "A review of active filters for power quality improvement," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 46, no. 5, pp. 960–971, Oct 1999.
- [3] Muhammad H. Rashid, *Electrónica de Potencia, Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*. Pearson Educación, 3ra ed., 2004.
- [4] Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky. *Señales y Sistemas*, Prentice Hall. 2da ed., 1998.
- [5] 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.
- [6] Nelfor Samael Castelblanco Rodriguez, "Filtros activos: control por DSP de un filtro activo para la compensación de corrientes armónicas," Trabajo de investigación de maestría, Universidad Industrial de Santander, 2006
- [7] Reyes S. Herrera, Patricio Salmerón, Hyosung Kim, "Instantaneous Reactive Power Theory Applied to Active Power Filter Compensation: Different Approaches, Assessment, and Experimental Results," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Volume 55, pp.184 – 196, Jan. 2008.
- [8] Gabrio Superti-Fuga, Grazia Todeschini, "Discussion on Instantaneous p-q Strategies for Control of Active Filters," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, Volume. 23, n^o4, pp. 1945-1955, 2008. .
- [9] María Isabel Milanés Montero, Enrique Romero Cadaval, Fermín Barrero González, "Comparison of Control Strategies for Shunt Active Power Filters in Three-Phase Four-Wire Systems," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, Volume: 22, pp.229-236, Jan. 2007.
- [10] U. Koteswara Rao, Mahesh K. Mishra, Arindam Ghosh, "Control Strategies for Load Compensation Using Instantaneous Symmetrical Component Theory Under Different Supply Voltages," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, Volume 23, pp.2310 – 2317, Oct. 2008

- [11] Bihm Singh, Kamal Al-Haddad, Ambrish Chandra, "A review of active filters for power quality improvement," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, Volume 46, pp.960 – 971, Oct. 1999
- [12] Johann Farith Petit Suárez, "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.
- [13] José Andrés Córdova León, Marco Stalin Rojas Balcázar y Waldo Freddy Sánchez Barrios, "Análisis, diseño e implementación de un compensador estático de potencia reactiva (d-statcom) para corrección de factor de potencia, basado en un convertidor trifásico con modulación por ancho de pulso con el método de vector espacial (SVPWM) controlado por DSP," Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2008.
- [14] Víctor Sánchez Huerta. "Perturbaciones en la red eléctrica" Departamento de Ingeniería, Universidad de Quintana Roo, Volume I, pp.33 – 38, 2008, disponible en: http://dci.uqroo.mx/RevistaCaos/2006_Vol_1/Num_1/VS_vol_I_33-38_2006.pdf, consultado Octubre de 2009.
- [15] Valdomiro Vega García, "Detección y clasificación automática de perturbaciones que afectan la calidad de la energía eléctrica," Trabajo de investigación de maestría, Universidad Industrial de Santander, 2007.
- [16] COLCIENCIAS, "Un proyecto de la unidad de planeación minero energética de Colombia (UPME) y el instituto colombiano para el desarrollo de la ciencia y la tecnología. "Francisco José de Caldas", Universidad del Atlántico, Universidad Autónoma de Occidente, disponible en: <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Docs/herramientas.pdf>, consultado Febrero de 2010.
- [17] David Rolando Arias Obando, "Aplicación de la norma AR-NTCVS para el estudio de calidad de energía en una empresa del sector agroindustrial," Trabajo de grado, Universidad de Costa Rica, 2005.
- [18] Eugenio Téllez Ramírez, "Calidad de la energía," AP&C, disponible en: <http://www.waterymex.org/contenidos/rtecnicos/Optimizando%20la%20Operacion%20y%20el%20Mantenimiento/Calidad%20de%20la%20Energia.pdf>, consultado Octubre de 2009.
- [19] Fabiola Angulo García, "Análisis de la dinámica de convertidores electrónicos de potencia usando PWM basado en promediado cero de la dinámica del error (ZAD)," Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, 2004.

- [20] Christian Mauricio Navas Muñoz, Claudia Liliana Pacheco Luengas, "Filtro activo. Control en modo corriente del puente inversor trifásico," Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander, 2006.
- [21] Rodríguez Cortés, Pedro, "Aportaciones a los acondicionadores activos de corriente en derivación para redes trifásicas de cuatro hilos," Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, 2005.
- [22] B. Singh, A. 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 India Conference IEEE*, 6 pp, Jun 2006.
- [23] Hyosung Kim, Frede Blaabjerg, Birgitte Bak-Jensen, Jaeho Choi, "Instantaneous Power Compensation in Three-Phase Systems by Using p-q-r Theory," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 17, No. 5, pp. 701-710, September 2002.
- [24] Alfonso Alzate, Alvaro Orozco, Carlos Galán, "Compensación de Armónicos Utilizando la Teoría p-q-r," *Scientia et Technica Año IX*, No 22, UTP. ISSN 0122-1701, pp. 13-17, Octubre 2003.
- [25] H.S. Kim and H. Akagi, "The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames", in *Proc. International Conference of the 1999 IEEE Power Electronics and Drive Systems*, Vol. 1, pp.422-427, July 1999.
- [26] Reyes S. Herrera, Patricio Salmerón, Hyosung Kim, "Instantaneous Reactive Power Theory Applied to Active Power Filter Compensation: Different Approaches, Assessment, and Experimental Results," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 1, January 2008.
- [27] 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.
- [28] R. R. Sawant, M. C. Chandorkar, "A Multi-Functional Four-Leg Grid Connected Compensator," in *Proc. Power Conversion Conference – Nagoya of the 2007 IEEE*, pp. 1085-1092, Jun. 2007.
- [29] Narain G. Hingorani, "Introducing Custom Power," *Spectrum IEEE*, Vol. 32, pp. 41-48, August 2002.

- [30] 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.
- [31] 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, Comité Europeo de Normalización Electrotécnica CENELEC , 2003.
- [32] Norma Técnica Colombiana 5000 (NTC 5000, 02), Calidad de la potencia eléctrica (CPE). Definiciones y términos fundamental, Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC), 2002.

BIBLIOGRAFÍA

CASTELBLANCO RODRIGUEZ, Nelfor Samael. Filtros activos: control por DSP de un filtro activo para la compensación de corrientes armónicas. Trabajo de investigación de maestría. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2006. 113p.

CÓRDOVA LEÓN, José Andrés, ROJAS BALCÁZAR, Marco Stalin y SÁNCHEZ BARRIOS, Waldo Freddy. Análisis, diseño e implementación de un compensador estático de potencia reactiva (d-statcom) para corrección de factor de potencia, basado en un convertidor trifásico con modulación por ancho de pulso con el método de vector espacial (SVPWM) controlado por DSP. Tesis de pregrado. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, 2008. 151p.

GHOSH, Arindam and LEDWICH, Gerard. *Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices*, 1ra ed. London: Kluwer Academic Publishers, 2002. 460p.

KIM, Hyosung, BLAABJERG, Frede, BAK-JENSEN, Birgitte and CHOI, Jaeho. Instantaneous Power Compensation in Three-Phase Systems by Using p–q–r Theory. *In: IEEE Transactions on Power Electronics*. September, 2002, Vol. 17 No. 5, p. 701-710

MILANÉS MONTERO, María Isabel, ROMERO CADAVAL, Enrique and BARRERO GONZÁLEZ Fermín. Comparison of Control Strategies for Shunt Active Power Filters in Three-Phase Four-Wire Systems. *In: Power Electronics, IEEE Transactions on*. January, 2007, Vol. 22, p.229-236

PETIT SUÁREZ, Johann Farith. Control de filtros activos de potencia para la mitigación de armónicos y mejora del factor de potencia en sistemas desequilibrados. Tesis Doctoral. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2007. 185p.

REYES S., HERRERA, SALMERÓN, Patricio and KIM, Hyosung. Instantaneous Reactive Power Theory Applied to Active Power Filter Compensation: Different Approaches, Assessment, and Experimental Results. *In: Industrial Electronics, IEEE Transactions on*. January, 2008, Vol. 55, p.184 – 196

SINGH, B., ADYA, A., MITTAL, A.P. and GUPTA J.R.P. Analysis, Simulation and Control of DSTATCOM in Three-phase, Four-wire Isolated Distribution Systems. *In: Proc. Power India Conference IEEE*. June, 2006, 6 p.

THIP, Manmek and CHATHURA P., Mudannayake. 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*. November, 2007, pp. 568-575

ANEXOS

ANEXO A.

FIGURA 1. ESQUEMA EN ATP DEL D-STATCOM EN MODO CONTROL DE CORRIENTE PARA LA COMPENSACIÓN DE ARMÓNICOS

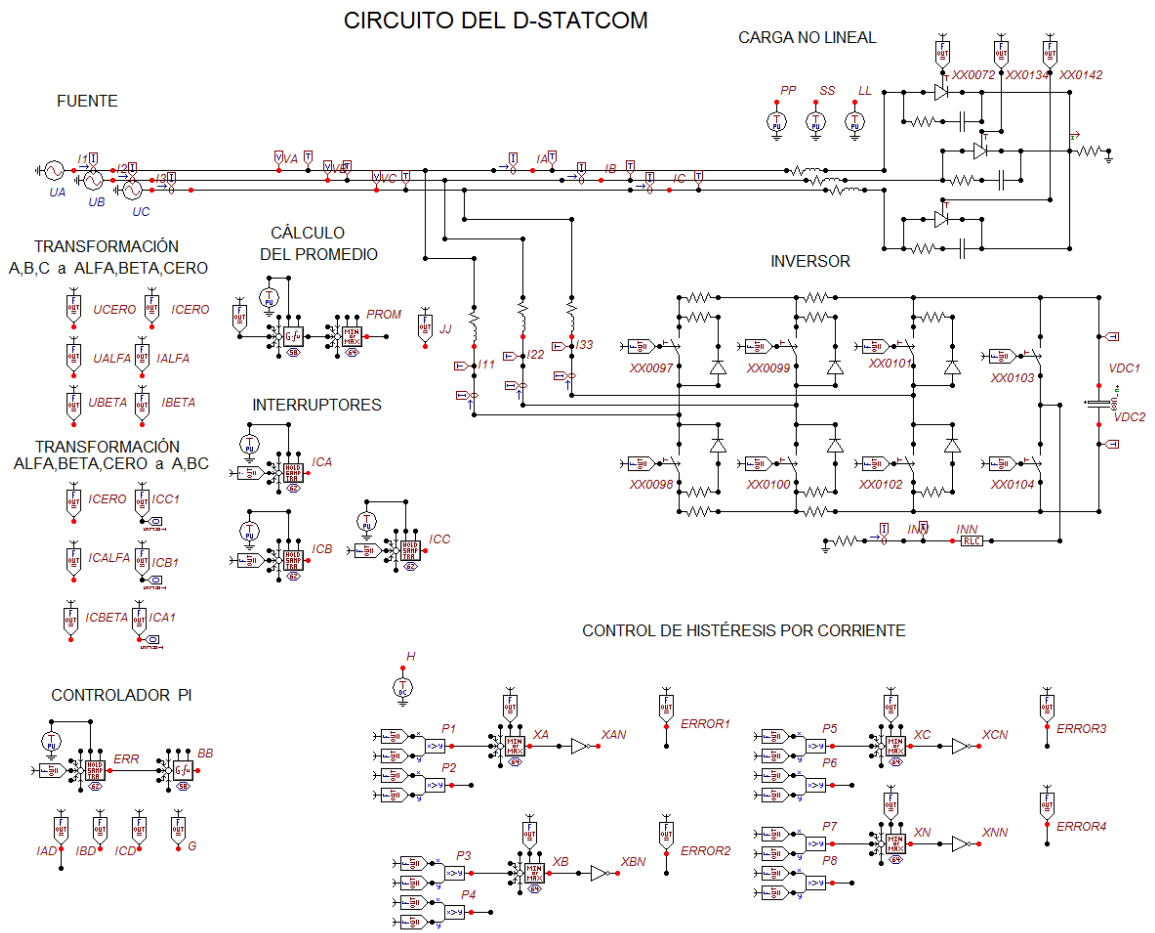


FIGURA 2. ESQUEMA EN ATP DEL D-STATCOM EN MODO CONTROL DE CORRIENTE PARA LA COMPENSACIÓN DEL FACTOR DE POTENCIA

CIRCUITO DEL D-STATCOM

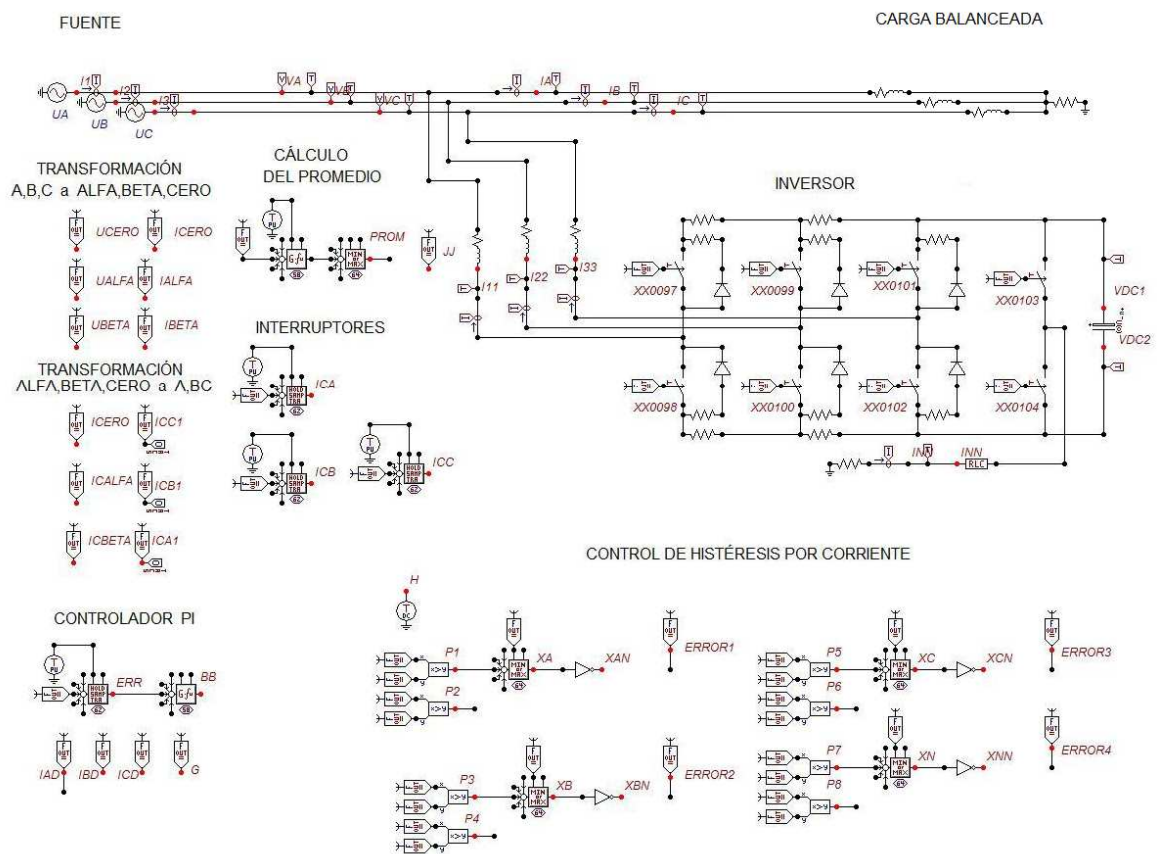


FIGURA 3. ESQUEMA EN ATP DEL D-STATCOM EN MODO CONTROL DE CORRIENTE PARA LA COMPENSACIÓN DE DESBALANCE DE CARGA

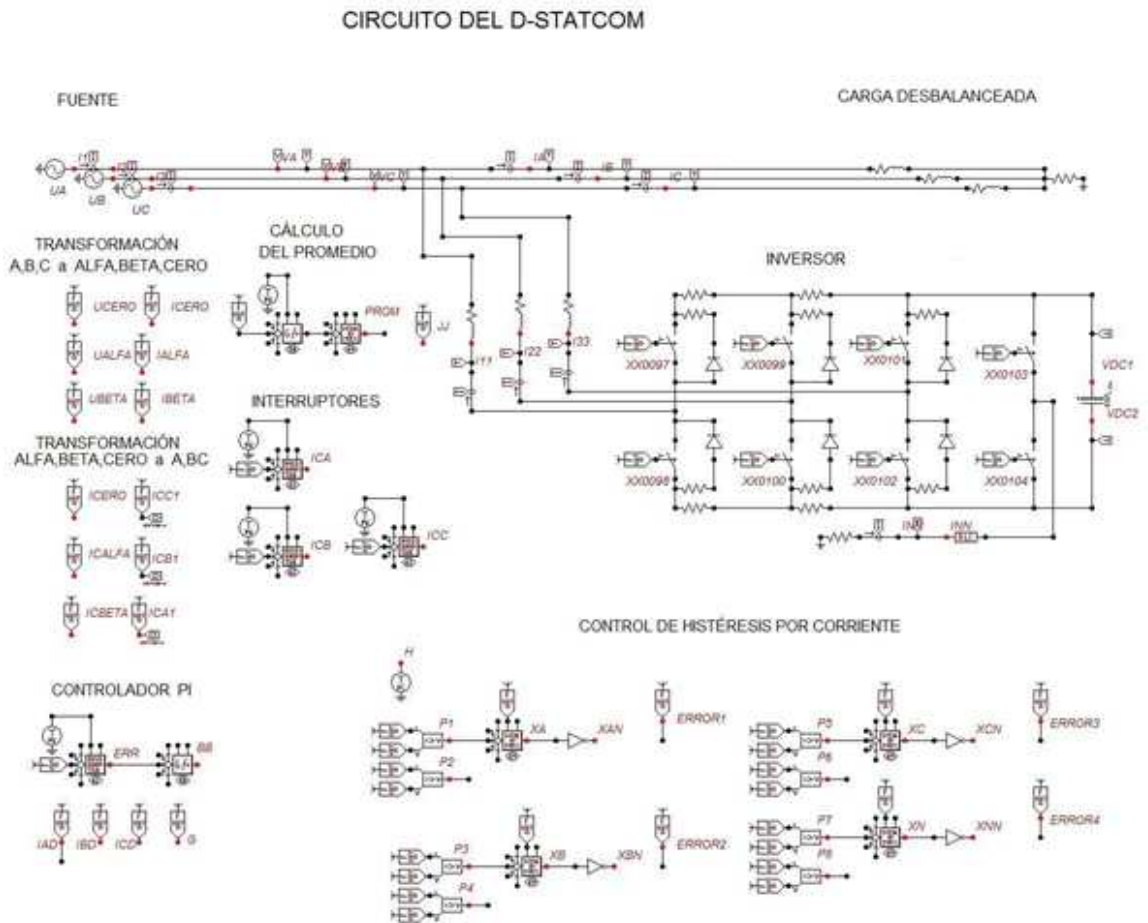


FIGURA 4. ESQUEMA EN ATP DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE 13 NODOS UTILIZADA PARA LAS PRUEBAS DEL D-STATCOM EN MODO CONTROL DE TENSIÓN

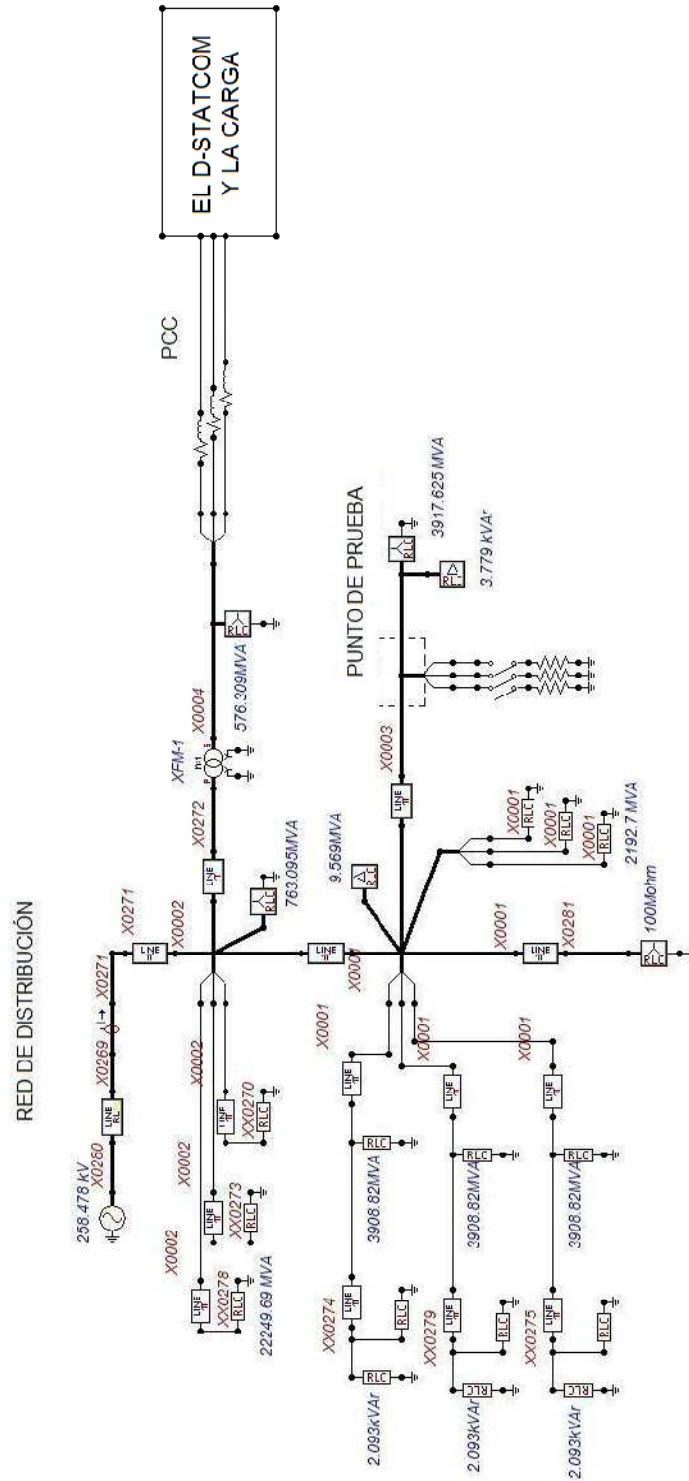


FIGURA 5. ESQUEMA EN ATP DEL D-STATCOM EN MODO CONTROL DE TENSION EN EL MARCO DE REFERENCIA a-b-c

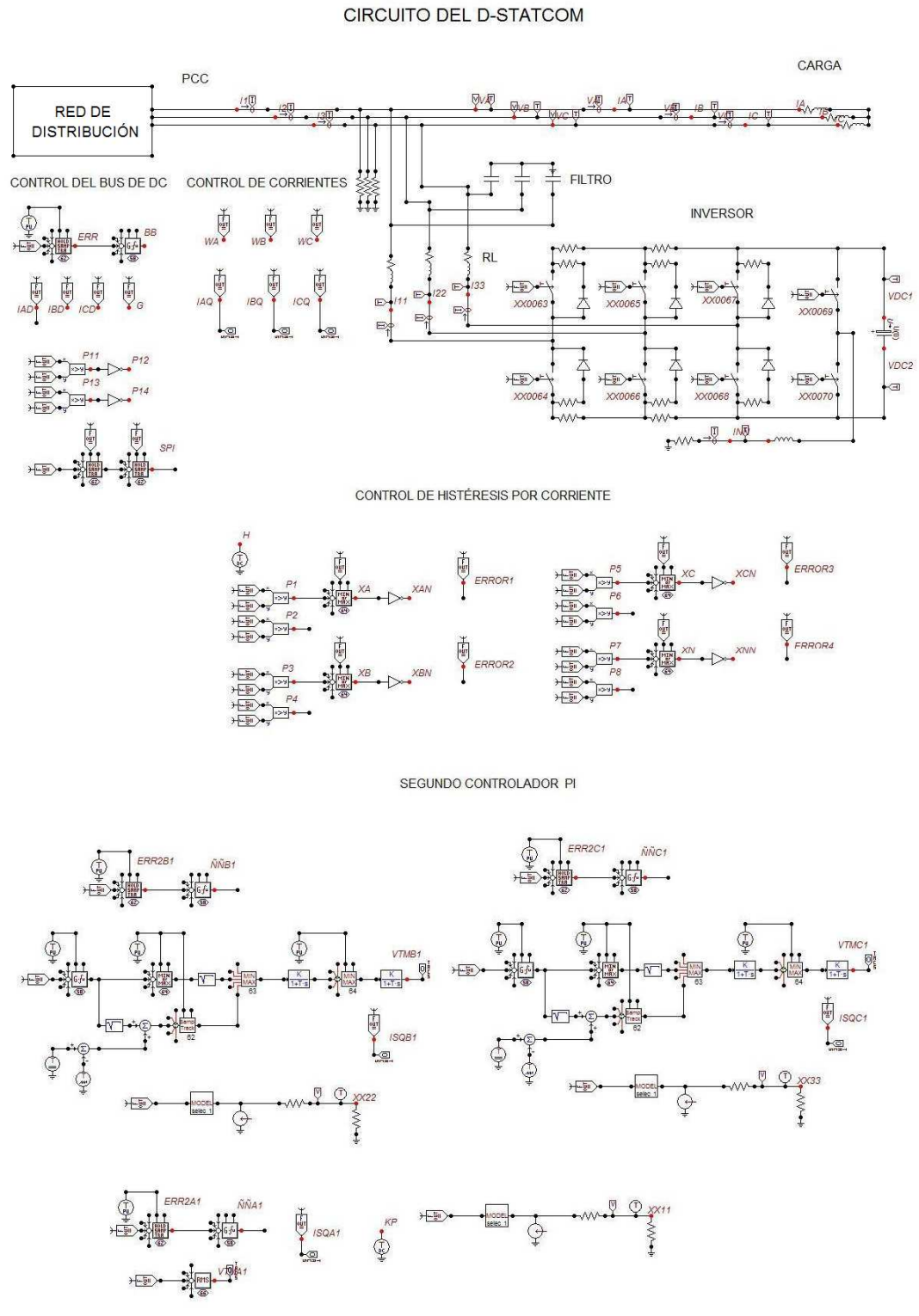


FIGURA 7. ESQUEMA EN ATP PARA HALLAR LAS CURVAS DE LA CAPACIDAD DE COMPENSACIÓN DEL D-STATCOM

