

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, SISTEMAS Y
TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**COMPENSADOR ESTÁTICO DE VAR CONTROLADO PARA SISTEMAS DE
DISTRIBUCIÓN**

AUTOR: YEISON YAIRO OJEDA REBOLLEDO

DIRECTOR: M. Sc LUIS DAVID PABÓN FERNÁNDEZ

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA N. DE S. – COLOMBIA
AGOSTO 8 DEL 2019**

**COMPENSADOR ESTÁTICO DE VAR CONTROLADO PARA SISTEMAS DE
DISTRIBUCIÓN**

AUTOR: YEISON YAIR OJEDA REBOLLEDO

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
ELÉCTRICO**

DIRECTOR: M. Sc LUIS DAVID PABÓN FERNÁNDEZ

CODIRECTOR: M. Sc EDISON ANDRÉS CAICEDO PEÑARANDA

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PAMPLONA N. DE S. – COLOMBIA
AGOSTO 8 DEL 2019**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA SISTEMAS Y
TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTAR
TRABAJO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

TÍTULO

FECHA DE INICIO DEL TRABAJO:

FECHA DE TERMINACIÓN DEL TRABAJO:

NOMBRES Y FIRMAS DE AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTAR

AUTOR: _____

DIRECTOR: _____

DIRECTOR DE PROGRAMA: _____

JURADO CALIFICADOR:

PRESIDENTE: ING. _____

OPONENTE: ING _____

SECRETARIO: ING. _____

PAMPLONA, COLOMBIA

AGOSTO 8 DEL 2019

(Acta de sustentación diligenciada y Escaneada)

DEDICATORIA

Esta investigación es dedicada a mis padres que gracias a su apoyo y sacrificio he podido culminar esta etapa tan importante de mi vida, a mis hermanas que siempre me alentaron a seguir adelante, y por último a mi compañera sentimental que me impulso cada día a dar lo mejor de mí para cumplir esta meta.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a Dios por bendecirme mi camino cada día y permitirme culminar satisfactoriamente esta meta tan importante en mi vida. También agradezco encarecidamente a mis padres por el esfuerzo y sacrificio realizado durante estos años de estudio, por su apoyo incondicional y sus consejos en los momentos indicados, a mis hermanas que siempre me apoyaron e impulsaron en los momentos difíciles, a mi pareja que siempre estuvo presente apoyándome durante las adversidades encontradas en el camino hasta llegar al momento presente.

Así mismo agradezco de manera especial el director del presente proyecto de grado, el Ingeniero Luis David Pabón por la guía y apoyo brindado que permitieron que esta investigación haya podido ser culminada de forma esencial. Por otra parte, presento mi más sincero agradecimiento a todos aquellos compañeros y amigos que se mostraron interesados en algún momento por mi proceso formativo tanto profesional como personal brindando un consejo o una voz de aliento en momentos importantes durante estos años, así como a todos aquellos docentes que hicieron parte de mi proceso formativo como profesional.

CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| OBJETIVOS | 3 |
| OBJETIVO GENERAL | 3 |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 3 |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 4 |
| 1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA | 4 |
| 1.2 JUSTIFICACIÓN | 5 |
| 3. MARCO TEÓRICO | 9 |
| 3.1 TIPOS DE CARGAS Y POTENCIAS ELÉCTRICAS | 9 |
| 3.1.2 Potencia Reactiva..... | 10 |
| 3.1.3 Potencia Aparente | 11 |
| 3.1.4 Triángulo de Potencia..... | 11 |
| 3.2 TIPOS DE CARGAS | 13 |
| 3.2.1 Relación del factor de potencia y tipos de cargas en los circuitos eléctricos | 14 |
| 3.2.2 Cargas resistivas | 14 |
| 3.2.3 Cargas inductivas | 16 |
| 3.2.4 Cargas capacitivas | 17 |
| 3.2.5 Cargas combinadas..... | 18 |
| 3.3 COMPENSACIÓN DE REACTIVOS | 18 |
| 3.3.1 Dispositivos compensadores de potencia reactiva..... | 19 |
| 3.3.2 Dispositivos dinámicos de compensación de reactivos..... | 19 |
| 3.3.3 Dispositivos estáticos de compensación fija | 20 |
| 3.3.4 Dispositivos estáticos de compensación escalonada..... | 20 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.3.5 | Dispositivos estáticos de compensación continua | 21 |
| 3.3.6 | Dispositivos convertidores de compensación..... | 22 |
| 3.4 | TIPOS DE COMPENSADORES | 23 |
| 3.4.1 | Capacitor serie controlado por tiristores (TCSC)..... | 23 |
| 3.4.2 | Compensador en serie estático síncrono (SSSC)..... | 24 |
| 3.4.3 | Compensador Estático (STATCOM)..... | 25 |
| 3.4.4 | Controlador unificado de flujo de potencia (UPFC) | 26 |
| 3.5 | COMPENSADOR ESTÁTICO DE REACTIVOS (SVC) | 27 |
| 3.5.1 | Condensador conmutado por tiristores | 29 |
| 3.5.2 | Bobina controlada por tiristores | 34 |
| 3.5.3 | Modelo simplificado del SVC | 38 |
| 3.5.4 | Configuración del SVC | 39 |
| 3.5.5 | Corrección de factor de potencia mediante SVC | 41 |
| 4. | COMPENSADOR ESTÁTICO DE REACTIVOS..... | 43 |
| 4.1 | Topología del compensador estático de reactivos..... | 43 |
| 5. | MODELADO DEL COMPENSADOR ESTÁTICO | 46 |
| 5.1 | Reactor controlado por tiristores y condensador fijo (FC-TCR) | 46 |
| 5.2 | Filtro para armónicos | 49 |
| 6. | CONTROL DE DISPARO DE LOS SCR | 54 |
| 6.1 | Detector de cruce por cero de la onda de corriente | 55 |
| 6.2 | Tiempos de retardo y duración | 57 |
| 6.3 | Control de cruce por cero de la onda de corriente | 61 |
| 6.4 | Generador de disparos de los tiristores..... | 63 |
| 7. | SIMULACIÓN DEL COMPENSADOR DE REACTIVOS | 66 |
| 7.1 | Funcionamiento del SVC controlado | 66 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 7.2 | Sintonización del controlador | 68 |
| 7.3 | Sistema eléctrico del bloque SB de la Universidad de Pamplona..... | 78 |
| 7.4 | Simulación de la red del SB sin compensador de reactivos | 79 |
| 7.5 | Configuración trifásica del compensador..... | 80 |
| 7.6 | Control de disparo trifásico..... | 82 |
| 7.7 | Conexión del compensador en un sistema trifásico..... | 84 |
| 7.8 | Instalación del SVC en el sistema eléctrico del bloque SB | 87 |
| 7.9 | Instalación del compensador en una red con variación de carga | 91 |
| 8. | CONCLUSIONES..... | 108 |
| 9. | BIBLIOGRAFÍA..... | 110 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1. REPRESENTACIÓN DE LA POTENCIA P EN FASE CON LA TENSIÓN [1]. | 9 |
| FIGURA 2. POTENCIA REACTIVA EN ADELANTO Q_L , O EN ATRASO Q_C CON RESPECTO A LA TENSIÓN [1]. | 10 |
| FIGURA 3. VECTOR RESULTANTE (S) DE LA SUMA DE LAS POTENCIAS P Y Q [1]. | 11 |
| FIGURA 4. TRIÁNGULO DE POTENCIAS [1]. | 12 |
| FIGURA 5. ELEMENTOS LINEAL Y NO LINEAL [1]. | 13 |
| FIGURA 6. FORMA DE ONDA DE LA CORRIENTE [1]. | 14 |
| FIGURA 7. DIAGRAMA FASORIAL DE UNA CARGA RESISTIVA [1]. | 15 |
| FIGURA 8. ONDA DE TENSIÓN Y CORRIENTE EN FASE [1]. | 16 |
| FIGURA 9. DIAGRAMA FASORIAL DE UN CIRCUITO INDUCTIVO [1]. | 16 |
| FIGURA 10. ONDA DE CORRIENTE ATRASADO 90° GRADOS CON RESPECTO A LA TENSIÓN [1]. | 17 |
| FIGURA 11. DIAGRAMA FASORIAL DE UN CIRCUITO CAPACITIVO [1]. | 17 |
| FIGURA 12. ONDA DE CORRIENTE ADELANTADA 90° CON RESPECTO A LA TENSIÓN [1]. | 18 |
| FIGURA 13. CURVA CARACTERÍSTICA DE UN TCSC. [7] | 23 |
| FIGURA 14. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN TCSC. [7] | 24 |
| FIGURA 15. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN SSSC. [7] | 25 |
| FIGURA 16. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN STATCOM [7]. | 26 |
| FIGURA 17. CURVA CARACTERÍSTICA DE UN STATCOM [7]. | 26 |
| FIGURA 18. ESQUEMA DE UN UFPC [7]. | 27 |
| FIGURA 19. ESQUEMA DE CONEXIÓN DE UN SVC [7]. | 28 |
| FIGURA 20. CURVA CARACTERÍSTICA DE UN SVC [7]. | 28 |
| FIGURA 21. CONFIGURACIÓN DE UN TSC [7]. | 29 |
| FIGURA 22. ESQUEMA EQUIVALENTE DE UN TSC [7]. | 30 |
| FIGURA 23. EVOLUCIÓN DEL VALOR DE PICO DE LA CORRIENTE DE CONEXIÓN ($I_p/\sqrt{2}$) EN FUNCIÓN DE LA.33 | 33 |
| FIGURA 24. INTENSIDAD EN DE CONEXIÓN EN UN TSC CUANDO $E(T') = U_0 = 0$ [4]. | 33 |
| FIGURA 25. CONFIGURACIÓN DE UN TCR [5]. | 34 |
| FIGURA 26. FORMAS DE ONDA DE INTENSIDAD EN UN TCR [4]. | 35 |
| FIGURA 27. FORMAS DE ONDA DE INTENSIDAD EN UN TCR PARA $A = 45^\circ$ [4]. | 37 |
| FIGURA 28. FORMAS DE ONDA DE INTENSIDAD EN UN TCR PARA $A = 120^\circ$ [4]. | 38 |
| FIGURA 29. EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA REACTIVA GENERADA POR EL TCR EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO....39 | 39 |
| FIGURA 30. COMPOSICIÓN POR FASE DE UN SVC [4]. | 40 |
| FIGURA 31. EVOLUCIÓN DE LA REACTIVA GENERADA POR UN SVC FORMADO POR TSC+TCR [4]. | 40 |
| FIGURA 32. EVOLUCIÓN DE LA INTENSIDAD EFICAZ CONSUMIDA POR EL CONJUNTO DEL COMPENSADOR ...42 | 42 |
| FIGURA 33. TOPOLOGÍA FC-TCR DEL SVC MÁS FILTRO PASA BAJA. | 45 |
| FIGURA 34. CONTROL DE DISPARO DE LOS TIRISTORES.....54 | 54 |
| FIGURA 35.CONDICIONES LÓGICAS PARA DETERMINAR EL CRUCE POR CERO.....55 | 55 |
| FIGURA 36. PULSOS DE CRUCE POR CERO.....56 | 56 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 37. AMPLIACIÓN DE LA ONDA DE CRUCE POR CERO..... | 56 |
| FIGURA 38. CONDICIONES LÓGICAS PARA DETERMINAR EL CRUCE POR CERO Y CONDICIONAL PARA OBTENER T ₀ | 57 |
| FIGURA 39. CÁLCULO DE TIEMPOS DE RETARDO Y DURACIÓN DE LOS DISPAROS..... | 59 |
| FIGURA 40. VARIACIÓN DE ÁNGULOS DE DISPAROS PARA LA ETAPA DE TIEMPOS..... | 60 |
| FIGURA 41. CONTROL DE CRUCE POR CERO..... | 63 |
| FIGURA 42. IMPLEMENTACIÓN DE BLOQUES DE RETARDO A LAS MEMORIAS..... | 63 |
| FIGURA 43. GENERADOR DE DISPARO DE LOS TIRISTORES..... | 64 |
| FIGURA 44. DISPAROS DE TIRISTORES Y ONDA DE CORRIENTE..... | 65 |
| FIGURA 45. AMPLITUD DE LA ONDA DE DISPAROS DE TIRISTORES..... | 65 |
| FIGURA 46. CONEXIÓN DEL SVC CONTROLADO A RED MONOFÁSICA..... | 66 |
| FIGURA 47. CORRIENTE DEL INDUCTOR DEL TCR..... | 67 |
| FIGURA 48. VARIACIÓN DE LA CORRIENTE DEL INDUCTOR AL MODIFICAR EL ÁNGULO DE DISPARO..... | 68 |
| FIGURA 49. CONTROLADOR DISEÑADO PARA SVC..... | 69 |
| FIGURA 50. ECUACIÓN EN BLOQUE PARA CALCULAR ÁNGULOS..... | 71 |
| FIGURA 51. CONEXIÓN DE LOS STEP AL CALCULADOR DE ÁNGULOS..... | 71 |
| FIGURA 52. UBICACIÓN DEL T ₀ WORKSPACE IN..... | 73 |
| FIGURA 53. DATOS GUARDADOS DE LA SIMULACIÓN Y FUNCIÓN PARA CARGAR LOS DATOS..... | 73 |
| FIGURA 54. VENTANA SYSTEM IDENTIFICATION..... | 74 |
| FIGURA 55. RESPUESTA DEL SISTEMA A LA PETICIÓN DE REACTIVOS..... | 74 |
| FIGURA 56. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA..... | 75 |
| FIGURA 57. PROCESO DE SINTONIZACIÓN DEL PID..... | 75 |
| FIGURA 58. PARÁMETROS DEL CONTROLADOR PID..... | 76 |
| FIGURA 59. CONTROL DE POTENCIA REACTIVA DEL SVC..... | 77 |
| FIGURA 60. SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DEL SB..... | 79 |
| FIGURA 61. VALORES DE POTENCIAS, TENSIÓN Y FACTOR DE POTENCIA DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL SB. | 79 |
| FIGURA 62. POTENCIAS DEL SISTEMA..... | 80 |
| FIGURA 63. CONEXIÓN TRIFÁSICA DEL COMPENSADOR FC-TCR..... | 81 |
| FIGURA 64. SVC TRIFÁSICO CON FILTRO PARA ARMÓNICOS CONECTADO A LA RED..... | 81 |
| FIGURA 65. CONTROL DE DISPARO PARA UN COMPENSADOR TRIFÁSICO..... | 82 |
| FIGURA 66. CONEXIÓN DE LAS VARIABLES FIJAS A CADA CONTROL..... | 83 |
| FIGURA 67. CONEXIÓN DEL CONTROLADOR Y CALCULADOR DE ÁNGULOS AL BLOQUE DE TIEMPO DE CADA SISTEMA..... | 84 |
| FIGURA 68. CONEXIÓN DEL COMPENSADOR A UNA RED TRIFÁSICA..... | 85 |
| FIGURA 69. UBICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE MEDIDA..... | 86 |
| FIGURA 70. BLOQUE DE MEDIDA..... | 86 |
| FIGURA 71. POTENCIAS DE LA CARGA SB CON LA INSTALACIÓN DEL SVC..... | 87 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 72. POTENCIAS DEL COMPENSADOR..... | 88 |
| FIGURA 73. POTENCIAS DE LA RED CON EL SVC CONECTADO. | 89 |
| FIGURA 74. FACTOR DE POTENCIA DEL SISTEMA..... | 90 |
| FIGURA 75. TENSIONES DE LÍNEA DEL SISTEMA. | 90 |
| FIGURA 76. RESULTADOS NUMÉRICOS DE LA SIMULACIÓN. | 91 |
| FIGURA 77. CARGAS CONECTADAS A LA RED..... | 92 |
| FIGURA 78. RESULTADOS NUMÉRICOS DEL SISTEMA SIN SVC CON 4 CARGAS. | 93 |
| FIGURA 79. POTENCIAS DE LA CARGA VARIABLE..... | 94 |
| FIGURA 80. POTENCIAS DEL SISTEMA CON LA VARIACIÓN DE CARGAS. | 95 |
| FIGURA 81. FACTOR DE POTENCIA DEL SISTEMA CON LA VARIACIÓN DE CARGAS. | 96 |
| FIGURA 82. TENSIONES DEL SISTEMA CON VARIACIÓN DE CARGAS..... | 97 |
| FIGURA 83. VARIACIÓN DE LAS TENSIONES DEL SISTEMA AL ENTRAR LA SEGUNDA CARGA. | 97 |
| FIGURA 84. POTENCIAS DE LA CARGA CON EL SVC INSTALADO. | 98 |
| FIGURA 85. POTENCIAS DE LA RED AL CONECTAR EL SVC. | 99 |
| FIGURA 86. POTENCIAS DEL COMPENSADOR EN RED DE 4 CARGAS VARIANTES..... | 100 |
| FIGURA 87. FACTOR DE POTENCIA AL CONECTAR EL SVC..... | 101 |
| FIGURA 88. TENSIONES DE LA RED AL INSTALAR EL SVC. | 101 |
| FIGURA 89. RESULTADOS NUMÉRICOS DE LA PRUEBA CON VARIACIÓN DE CARGAS..... | 102 |
| FIGURA 90. COMPORTAMIENTO DE LA RED AL CONECTAR Y DESCONECTAR LAS CARGAS. | 103 |
| FIGURA 91. COMPORTAMIENTO DEL FACTOR DE POTENCIA AL CONECTAR O DESCONECTAR LA CARGA. .. | 104 |
| FIGURA 92. COMPORTAMIENTO DE LA RED AL CONECTAR Y DESCONECTAR LAS CARGAS CON EL SVC CONECTADO..... | 105 |
| FIGURA 93. COMPORTAMIENTO DEL SVC A LA CONEXIÓN Y DESCONEXIÓN DE CARGAS..... | 105 |
| FIGURA 94. COMPORTAMIENTO DE LAS POTENCIAS DE LA CARGA AL CONECTAR O DESCONECTAR LAS CARGAS CON EL SVC INSTALADO..... | 106 |
| FIGURA 95. COMPORTAMIENTO DEL FP AL CONECTAR O DESCONECTAR LAS CARGAS CON EL SVC CONECTADO..... | 107 |
| FIGURA 96. RESULTADOS NUMÉRICOS DEL SISTEMA AL CONECTAR Y DESCONECTAR LAS CARGAS CON EL SVC INSTALADO. | 107 |

RESUMEN

En la presente investigación se efectúa el diseño de un compensador estático de potencia reactiva (SVC) para la corrección del factor de potencia (FP), el cual será controlado con el fin de obtener un mejor funcionamiento evitando problemas de sobre compensación, manteniendo un control y monitoreo del mismo, frente a los diferentes escenarios que se presenten en la red, para lograr esto se desarrollará una investigación bibliográfica con el fin de determinar la topología adecuada para el compensador, así mismo se estudiarán los métodos de control para seleccionar aquel que presente mayor factibilidad al sistema, luego se modelará el compensador en el software Matlab con el propósito de realizar una simulación, la cual permita representar y visualizar el funcionamiento del compensador y su control, durante esta simulación se someterá el SVC a diferentes escenarios de cargar, para determinar cómo actúa este frente a dichos sucesos o estados, esto con el fin de obtener un compensador con control eficiente, el cual pueda llegar a ser implementado en sistemas de baja tensión, sin ocasionar deficiencias en la red, como baja corrección del FP frente algunos escenario o sobrecompensación en la red, queriendo así mismo desarrollar un sistema de compensación de reactivos de bajo costo y alta eficiencia.

INTRODUCCIÓN

La importancia de la calidad de la energía ha aumentado en gran medida durante las últimas décadas, implementando diferentes propuestas y leyes para mantener un estándar de calidad del servicio eléctrico estrictamente elevado, esto ha impulsado a las empresas e ingenieros a estudiar los diferentes fenómenos que afectan la calidad de la energía en las diferentes etapas de los sistemas de potencia (SEP), uno de los fenómenos que afectan en gran medida la eficiencia y estabilidad de los SEP es la potencia reactiva que se presenta en los sistemas eléctricos debido a las cargas no lineales, los reactivos son los principales causantes de la deficiencia del factor de potencia en los sistemas eléctricos principalmente en la etapa de distribución debido a la alta presencia de cargas no lineales existentes en los sistemas de baja tensión.

La presencia de reactivos disminuye considerablemente el factor de potencia, esto ocasiona el incremento de la corriente del sistema y la disminución del valor rms de la tensión, ocasionando el incremento de las pérdidas en el sistema debido al calentamiento por la circulación de corriente elevadas lo que, a su vez, causa el deterioro de los conductores de las redes y los devanados en los transformadores y motores conectados al sistema aumentando así, el consumo de potencia activa por las cargas elevando la demanda de los transformadores llegando a saturarse, por ende, la corrección del factor de potencia por medio del control de reactivos ha logrado posicionarse como uno de los temas de mayor interés en el campo de la calidad de la energía.

La principal solución al bajo factor de potencia es la implementación de equipos que controlen la potencia reactiva presente en los sistemas eléctricos, estos elementos son llamados compensadores de potencia reactiva o compensadores de reactivos, estos elementos son implementados desde la década de los 90 para eliminar los efectos causados por la circulación de reactivos en las redes eléctricas, existen diferentes compensadores de potencia reactiva entre ellos se encuentran los SVC, STATCOM, TCSC, UPFC y SSSC entre otros, todos ellos funcionando de diferente forma y corrigiendo todo tipo de efectos presentes en los

SEP, pero siempre utilizados con el propósito principal de compensar los reactivos presentes en la red, estos dispositivos están formados principalmente por inductores y condensadores elementos generados y consumidores de reactivos, que al ser implementados en un sistema controlado pueden disminuir los reactivos al sistema o aportar cuando sea necesario, controlando este proceso se corrige el factor de potencia y todos los efectos producidos por los reactivos presentes en la red.

El objetivo de la presente investigación es diseñar un compensador de reactivos, para la corrección del factor de potencia en sistemas de baja tensión, donde mayormente se presentan efectos nocivos por presencia de reactivos, el dispositivo de investigación es el compensador estático de reactivos (SVC) que pertenece a la familia de los sistemas de transmisión flexibles de AC (FACTS), este posee muchas aplicaciones como corregir el factor de potencia, regular el nivel de tensión, estabilizar los sistemas de energía entre otros, y posee la ventaja de permitir que el factor de potencia en el sistema mantenga un valor cercano a la unidad, lo que refleja un ahorro de energía eléctrica en el sistema, así mismo el SVC, tiene la capacidad de suavizar la tensión de parpadeo (flickers) en instalaciones que posean cargas de alta fluctuación. Para lograr esto, el control automático y la electrónica de potencia que debe poseer el compensador juega un papel importante en su funcionamiento, durante el desarrollo de la investigación presente se implementaran diferentes procesos para desarrollar un compensador que garantice la perfecta corrección del factor de potencia de la red.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Diseñar y simular un compensador estático de VAR para sistemas de baja tensión.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la topología del compensador estático de VAR.
- Diseñar la estrategia para controlar la potencia reactiva del sistema.
- Modelar el sistema en el entorno de programación visual Simulink de Matlab.
- Simular y analizar el sistema frente a diferentes escenarios de cargas.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En las redes de distribución se espera tener un factor de potencia (FP) unitario (1), lo que significa el aprovechamiento perfecto de la potencia distribuida por la red, pero este valor no suele ser obtenido en los sistemas debido a la presencia de cargas inductivas y capacitivas en la red, así como la implementación de equipos que hacen uso de la creación de un campo magnético, tales como generadores, transformadores y motores. Esto genera una potencia reactiva la cual no es consumible por el sistema, afectando el FP de las redes de distribución, disminuyendo el mismo y causando problemas al sistema y los elementos que lo conforman. El bajo FP en la red suele causar el incremento de la corriente del sistemas, elevando las pérdidas por efecto joule (calentamiento de los conductores de la red y bobinados de los equipos), las cuales afectan en gran medida a los elementos de protección del sistema, este incremento de la corriente también afecta económicamente a las empresas distribuidoras del servicio eléctrico, ya que estas deben implementar sistemas más robustos para conducir las elevadas corrientes que circulan en la presencia de un bajo FP, a su vez los equipos electromagnéticos sufrirán sobrecargas.

Por otra parte, se presenta una insuficiencia en el suministro de potencia hacia las cargas, debido al incremento de las caídas de tensión en la red. La disminución del factor de potencia también afecta a los usuarios ya que las empresas suelen penalizar aquellos usuarios que posean un factor de potencia bajo o registren una potencia reactiva elevada, incrementando el valor de las tarifas hasta un 20% más, elevando así las facturas y en algunos casos generando penalizaciones legales y multas.

No obstante, los elementos que generan un campo eléctrico para realizar su funcionamiento, también suelen acarrear problemas a la red, ya que estos generan un factor de potencia capacitivo, el cual suele crear un FP bajo, pero en función de adelanto este suele estar presente siempre que se encuentren

condensadores en los sistemas de distribución, ya sean que hagan parte de las cargas o se implementen como método de compensación, ya que los bancos de condensadores son algunos de los elementos más implementados para la corrección del factor de potencia, pero en algunos casos estos suelen realizar el proceso contrario al corregir el factor de potencia, este caso se puede observar en el bloque Simón Bolívar de la Universidad de Pamplona, el cual posee un banco de condensador conectado al transformador de tensión que alimenta el bloque SB, el cual no se encuentra trabajando a valores cercanos a la sobrecarga, por tanto, no presenta problemas por funcionamiento forzado, sin embargo, el banco de condensadores se encuentra realizando una compensación elevada de reactivos, generando esto que el sistema se encuentre sobre compensado, este funcionamiento inadecuado del compensador está generando elevaciones de tensión en la red, lo cual implica que el FP no esté siendo corregido y por ende se estén presentando problemas en la red. Al no poseer los compensador un sistema de control, se dificulta la corrección del mal funcionamiento de estos, frente a eventos o situaciones como la presente en el bloque SB.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La implementación de compensadores de reactivos en los sistemas de distribución para corregir el factor de potencia, permite reducir las pérdidas técnicas y económica de los sistemas, presentadas por un bajo factor de potencia en las redes, debido que al corregir dicho problema presente en las redes de distribución se reducen las elevadas corrientes que circulan por el sistema, ocasionando esto que las pérdidas por efecto joule se vean reducidas, incrementando a su vez, la eficiencia de los elementos de protección de los sistemas, esto también reduce los costos generados por mantenimiento de las redes y gastos en la creación de sistemas más robustos para la circulación de las corrientes elevadas presente en un sistema con bajo FP. Por otra parte, se estabiliza la tensión del sistema disminuyendo así las caídas de la misma y manejando perfiles de tensión más estables, incrementando así la potencia activa de la red, esto ocasiona que disminuya la sobrecarga que presentan los transformadores cuando existe una

insuficiencia de potencia activa hacia las cargas. No obstante, la compensación de potencia reactiva, beneficia económicamente tanto a las entidades prestadoras del servicio eléctrico como a los usuarios consumidores, ya que este proceso reduce los costos de penalización por bajo factor de potencia y las multas por sobrepasar los límites de reactivos inducidos a la red.

Por otra parte, realizar previamente el diseño de los compensadores de reactivos, garantiza resultados más satisfactorios en el sistema a implementar, ya que este proceso implica una investigación más detallada del porque y el dónde, implementar los métodos para corregir el factor de potencia de la red, así mismo permite la selección del dispositivo y método de compensación adecuado para la corrección del problema presente y evitar una sobrecompensación en el sistema. Esto también garantiza que el método de compensación designado presente una mayor eficiencia, y disminuyan los costos de implementación del mismo.

Esta investigación es importante porque al simular previamente los compensadores de reactivos se puede analizar el funcionamiento que este tendrá frente a los problemas a corregir dentro del sistema, aplicando diferentes escenarios de cargas en el sistema, permite obtener los resultados de las acciones del compensador y la forma en como este actúa para realizar satisfactoriamente su funcionamiento, permitiendo así conocer previamente si el dispositivo mantendrá una función adecuada, y otorgando la posibilidad de realizar correcciones o cambios pertinentes en los elementos a implementar para la compensación, si estos llegan a presentar falencias en su funcionamiento frente algún escenario posible.

2. ESTADO DEL ARTE

Research status analysis of reactive power compensation technology for power grid. Designado de la IEEE, Introduce al principio de compensación de potencia reactiva para las redes eléctricas, analizando los métodos y características de varios tipos de compensadores de potencia reactiva [1].

Modelación de un compensador estático para el control de generación distribuida con energías renovables. Universidad de Chile, presenta el modelado y simulación de un compensador estático para el control de generación distribuida con energías renovables, mediante el uso del entorno de simulación gráfico Simulink del software Matlab [2].

Simulación del compensador estático de VAR de la subestación Culiacán Tres para el análisis de transitorios. Designado de Ingeniería investigación y tecnología, presenta el modelado de un compensador estático de var, instalado en una subestación en el estado de Sinaloa – México aplicando Simulink, realizando una comparación entre los resultados simulados y los reales [3].

Design and implementation of laboratory scale static var compensator to demonstrate dynamic load balancing and power factor correction. Designado de la IEEE, En esta investigación fue desarrollado e implementado un dispositivo FACTS de la escala SVC para el equilibrio dinámico de cargas, implementando un algoritmo basado en el método de Steinmetz para equilibrar cargas. La operación y el equilibrio dinámico de las cargas será demostrado por el compensador estático de var [4].

Ubicación de FACTS para mejorar la estabilidad de tensión. Universidad del Norte, presenta una comparación de la respuesta de compensadores FACTS ante diferentes condiciones de operación, ubicados por medio de métodos de análisis

estáticos para el mejoramiento de la estabilidad de tensión en estado estacionario [5].

Efectos de algunos compensadores de voltaje en un sistema eléctrico de potencia. Universidad nacional de Colombia, presenta un análisis de la estabilidad de un sistema de potencia cuando se introducen compensadores mediante curvas PV, presentando el concepto básico de estabilidad, de colapsos de voltaje y las curvas PV. Analizando un sistema mínimo de potencia para determinar las curvas PV en forma estática [6].

Compensación paralela de reactivos durante la prueba de aptitud al cortocircuito en transformadores de distribución. Universidad del Valle, plantea una estrategia de compensación de reactivos paralelo con capacitores, para aumentar la capacidad del campo de prueba de cortocircuito de la Universidad del Valle. Los transformadores son elementos esenciales para mantener el suministro de energía eléctrica [7].

3. MARCO TEÓRICO

3.1 TIPOS DE CARGAS Y POTENCIAS ELÉCTRICAS

3.1.1 Potencia Activa

Es la potencia que representa la capacidad de un circuito para realizar el proceso de transformación de energía eléctrica en trabajo, esta es originada por la componente de la corriente que se encuentra en fase con la tensión [8][9]. En realidad esta representa la potencia útil medida en wattios (W), es decir, la energía que realmente se aprovecha cuando se pone a funcionar un equipo eléctrico y realiza un trabajo.[9] Los diferentes dispositivos eléctricos existentes convierten la energía eléctrica en otras formas de energía tales como: mecánica, lumínica, térmica, química, etc. Por lo tanto, está potencia es la que realmente se consume en los circuitos [8].

Cuando se habla de demanda eléctrica, es esta potencia la que se utiliza para determinar dicha demanda, esta se designa mayormente con la letra P. De acuerdo con su expresión, la ley de Ohm y el triángulo de impedancias:

$$P = (V * I) \cos(\varphi) = (I^2 * Z) \cos(\varphi) = (I^2 * R) \quad (1)$$

Donde: Z es la impedancia del circuito, cuya unidad de medida es el Ohmio (Ω). Mientras que la unidad de medida de P es el Watt que suele utilizarse en el orden de los kW o MW [8].

Al analizar la expresión anterior se observa que la potencia activa es debida a los elementos resistivos, debido a esto la potencia activa es un vector a cero grados, como se puede apreciar en la Figura 1 [8][9].

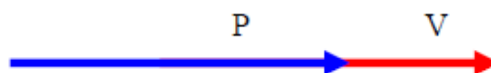


Figura 1. Representación de la potencia P en fase con la tensión [1].

3.1.2 Potencia Reactiva

La potencia reactiva surge por la introducción de elementos que en su operación crean desfases o retardos entre su función de excitación y su función de respuesta. En el caso de las inductancias se crea un retardo en la corriente frente a una excitación de voltaje, al crear el campo electromagnético. Para las capacitancias el fenómeno es dual, surgiendo un retardo en el voltaje frente a una excitación de corriente, al crearse un campo eléctrico [10].

Esta potencia no es consumida en el circuito por lo que no produce trabajo útil, sin embargo, es necesaria para crear los campos magnéticos de los receptores que disponen de devanados o bobinas. Por lo tanto, esta sólo aparecerá cuando existan bobinas o condensadores en los circuitos que generan campos magnéticos y campos eléctricos. Esta es originada por la componente de la corriente que está a 90° con respecto a la tensión, en adelante o en atraso [8].

La potencia reactiva tiene un valor medio nulo, motivo por el cual no produce trabajo útil y se designa con la letra Q [8]. A partir de su expresión,

$$Q = (I * V) \sin(\varphi) = (I^2 * Z) \sin(\varphi) = (S) \sin(\varphi) \quad (2)$$

Dónde: S es la potencia aparente o total cuya unidad de medida es kVA o MVA, mientras que la unidad de medida de la potencia reactiva es kVAr o MVAr.

Analizando la ecuación anterior y la unidad en la cual se mide la potencia Q, es necesario afirmar que esta solo es debida a los elementos reactivos, los cuales pueden ser inductivos Q_L o capacitivos Q_C , esto se puede observar en la Figura 2 [8].

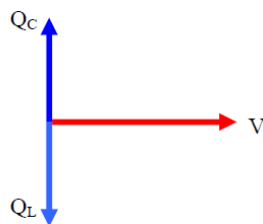


Figura 2. Potencia Reactiva en adelante Q_L , o en atraso Q_C con respecto a la tensión [1].

3.1.3 Potencia Aparente

La potencia aparente o potencia compleja de un circuito eléctrico de corriente alterna es la suma de dos potencias.

Por ser la potencia total es el vector resultante de sumar la potencia activa y la potencia reactiva, esta suele ser representada mediante un diagrama fasorial como se observa en la Figura 3 [8].

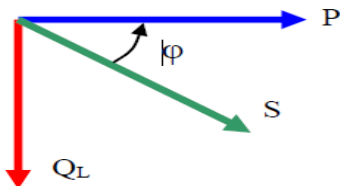


Figura 3. Vector resultante (S) de la suma de las potencias P y Q [1].

Esta potencia no es realmente consumida o útil, salvo cuando el factor de potencia es la unidad ($\cos(\varphi) = 1$), ya que entonces la potencia activa es igual a la potencia aparente, esta potencia también es indicativa cuando en la red de alimentación un circuito no sólo ha de satisfacer la energía consumida por los elementos resistivos, sino que también ha de contarse con los elementos que van a "almacenar energía" como bobinas y condensadores. Se la designa con la letra S [8][9].

La ecuación para calcular la potencia aparente es:

$$S = V * I \quad (3)$$

La unidad en la cual se mide esta potencia fue expresada durante la explicación de la potencia reactiva.

3.1.4 Triángulo de Potencia

El llamado triángulo de potencias es la mejor forma de observar y comprender de forma gráfica qué es el factor de potencia o $\cos(\varphi)$ y su estrecha relación con los restantes tipos de potencia presentes en un circuito eléctrico de corriente alterna, además de observar la interacción de una potencia con respecto a las otras dos ya que al modificar una potencia repercutiría en la modificación de las otras dos potencias [8].

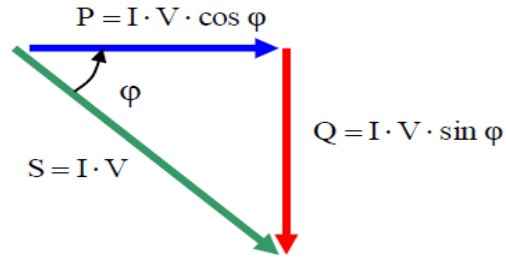


Figura 4. Triángulo de Potencias [1].

Como se puede observar en el triángulo de la Figura 4, el factor de potencia o $\cos(\varphi)$ representa el valor del ángulo que se forma al representar gráficamente la potencia activa (P) y la potencia aparente (S), es decir, la relación existente entre la potencia real de trabajo y la potencia total consumida por la carga o el consumidor conectado a un circuito eléctrico de corriente alterna [8].

Esta relación se puede representar también, de forma matemática, por medio de la siguiente ecuación:

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} \quad (4)$$

De aquí se define también que:

$$S = P + jQ \quad (5)$$

El resultado de esta operación será 1 o un número fraccionario menor que 1 en dependencia del factor de potencia que le corresponde a cada equipo o dispositivo en específico. Ese número responde al valor de la función trigonométrica “coseno”, equivalente a los grados del ángulo que se forma entre las potencias P y S.

Si el número que se obtiene como resultado de la operación matemática es un decimal menor que 1 (como por ejemplo 0,95), dicho número representará el factor de potencia correspondiente al desfase en grados existente entre la intensidad de la corriente eléctrica y la tensión en el circuito de corriente alterna [8].

Lo ideal sería que el resultado fuera siempre igual a 1, pues así habría una mejor optimización y aprovechamiento del consumo de energía eléctrica, o sea, habría

menos pérdida de energía no aprovechada y una mayor eficiencia de trabajo en los generadores que producen esa energía [8][9].

En los circuitos de resistencia activa, el factor de potencia siempre es 1, porque como ya vimos anteriormente en ese caso no existe desfase entre la intensidad de la corriente y la tensión.

Pero en los circuitos inductivos, como ocurre con los motores, transformadores de tensión y la mayoría de los dispositivos o aparatos que trabajan con algún tipo de enrollado o bobina, el valor del factor de potencia se muestra con una fracción decimal menor que 1 (como por ejemplo 0,8), lo que indica el retraso o desfase que produce la carga inductiva en la senoide correspondiente a la intensidad de la corriente con respecto a la senoide de la tensión [8].

3.2 TIPOS DE CARGAS

Una carga es un elemento que consume energía eléctrica, en general existen dos tipos de cargas dentro de los sistemas eléctricos: *Cargas lineales* y las *Cargas no lineales*. Una carga es lineal cuando la tensión aplicada a sus extremos y la corriente que pasan por ella están estrechamente relacionadas como se puede observar en la figura 5 a). Por el contrario, se dice que una carga es no lineal cuando la relación tensión/corriente no es constante lo cual se representa en la Figura 5 b) [8].

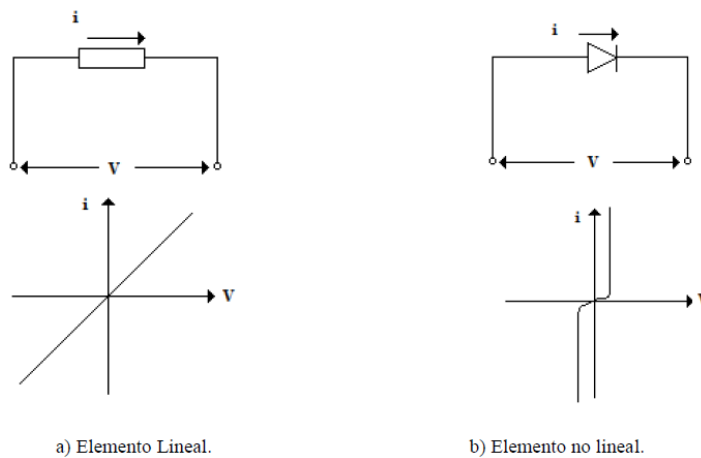


Figura 5. Elementos lineal y no lineal [1].

Las cargas no lineales conectadas a la red de corriente alternan absorben corrientes que no son senoidales. Esto se observa en la Figura 6.

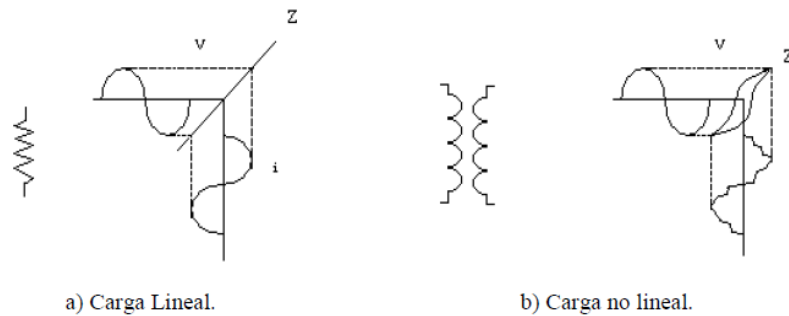


Figura 6. Forma de onda de la corriente [1].

Algunas de las cargas no lineales típicas son equipos electrónicos en general monofásicos, que internamente trabajan con corriente continua (ordenadores, impresoras, autómatas programables, etc.), instalaciones de iluminación con lámparas de descarga, transformadores, reactancias con núcleos de hierro, etc., cuya curva de magnetización es no lineal [8].

3.2.1 Relación del factor de potencia y tipos de cargas en los circuitos eléctricos

En términos generales pueden distinguirse tres tipos de cargas eléctricas al conectar un equipo a una red, por la cual, circula corriente eléctrica expresada en amperes (A) y tensión expresado en volts (V) [8].

3.2.2 Cargas resistivas

Estas cargas poseen una resistencia eléctrica, la cual es designada con la letra R y expresada en Ohm (Ω). Las cargas resistivas pueden encontrarse en equipos como lámparas incandescentes, planchas y estufas eléctricas, en donde la energía que requieren para funcionar es transformada en energía lumínica o energía calorífica, en cuyo caso el factor de potencia toma el valor de 1.0. En un circuito puramente resistivo, la corriente está en fase con la tensión y es función inmediata de la tensión [8].

Por lo tanto, si la tensión y la corriente están en fase, se tiene que:

$$I = \frac{V}{R} \quad (6)$$

En donde:

I = Corriente eléctrica (A).

V = Tensión eléctrica (V).

R = Resistencia eléctrica (Ω).

En la Figura 7, se presenta el diagrama fasorial correspondiente a las cargas resistivas.

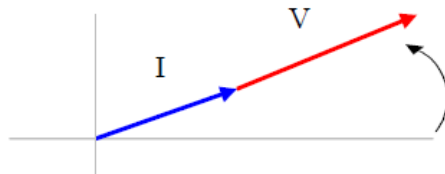


Figura 7. Diagrama fasorial de una carga resistiva [1].

La resistencia eléctrica absorbe potencia en Watts igual a:

$$P = (V * I) = (R * I^2) = \frac{V^2}{R} \quad (7)$$

En donde: P = Potencia activa (W).

Las cargas de tipo resistivo que se encuentran más comúnmente en los sistemas eléctricos ya sea residencial, industrial o comercial son hornos eléctricos, calefactores, planchas, Alumbrado incandescente, entre otros [8].

En la Figura 8, se muestran las ondas senoidales de tensión y corriente eléctrica en función del tiempo y el desfase que existe entre ellas, la cual es igual a cero, es decir, se encuentran en fase.

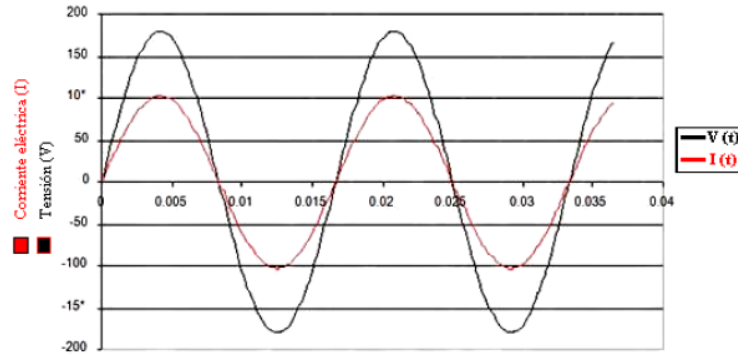


Figura 8. Onda de tensión y corriente en fase [1].

3.2.3 Cargas inductivas

Las cargas inductivas son encontradas en cualquier lugar donde existan bobinados involucrados, por ejemplo, en los equipos del tipo electromecánicos como los motores, balastos, transformadores, entre otros; además de consumir potencia activa, requieren potencia reactiva para su propio funcionamiento, por lo cual trabajan con un factor de potencia menor a 1.0.

Considerándose por lo tanto que las cargas inductivas, sean el origen del bajo factor de potencia (menores a 0.9). En un circuito puramente inductivo la corriente no está en fase con la tensión ya que va atrasada 90° con respecto a la tensión. En la Figura 9, se presenta el diagrama fasorial correspondiente a las cargas inductivas [8].

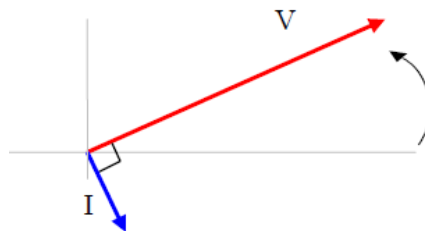


Figura 9. Diagrama fasorial de un circuito inductivo [1].

Algunos equipos de cargas del tipo inductivo son los transformadores, motores de inducción, alumbrado fluorescente, maquinas soldadoras, entre otros. En la figura 10, se muestran las ondas senoidales de tensión y corriente eléctrica en función del tiempo y el desfase de 90° de la corriente con respecto a la tensión [8].

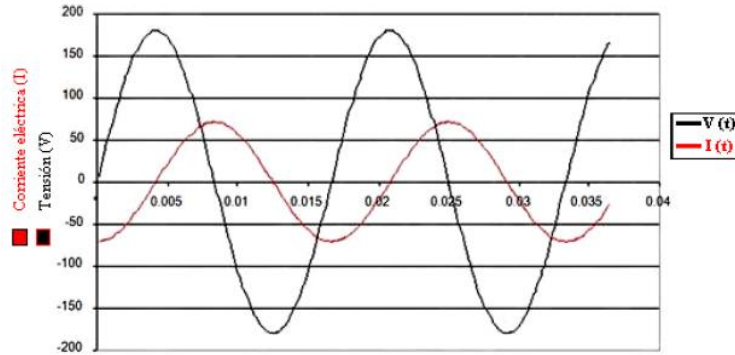


Figura 10. Onda de corriente atrasado 90° grados con respecto a la tensión [1].

3.2.4 Cargas capacitivas

Las cargas capacitivas se presentan en los condensadores y se caracterizan porque la corriente se haya adelantada respecto de la tensión 90°. En la Figura 11, se presenta el diagrama fasorial correspondiente a las cargas capacitivas.

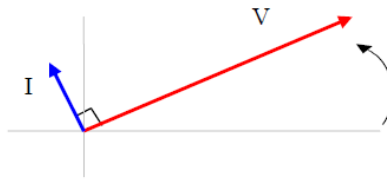


Figura 11. Diagrama fasorial de un circuito capacitivo [1].

Las cargas de tipo capacitivo son los bancos de capacitores y motores síncronos. En un circuito puramente capacitivo, no existe consumo de energía aún si hay corriente circulando. Las cargas capacitivas generan potencia reactiva expresada en volts amperes reactivos (var). En la figura 12, se muestran las ondas senoidales de tensión y corriente eléctrica en función del tiempo, para este caso la corriente se adelanta 90° con respecto a la tensión [8].

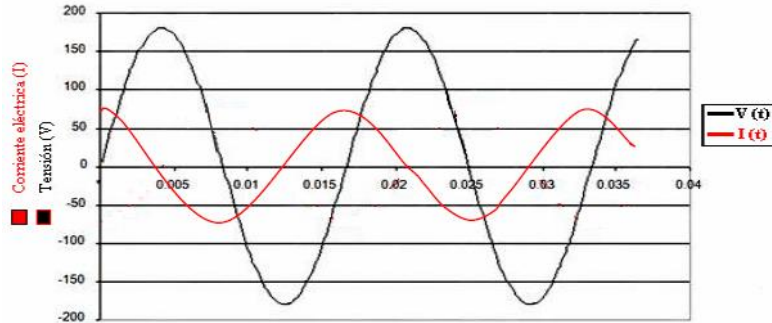


Figura 12. Onda de corriente adelantada 90° con respecto a la tensión [1].

3.2.5 Cargas combinadas

En la práctica una carga no está constituida solamente por cargas resistivas, inductivas o capacitivas, ya que estas tres cargas con frecuencia coexisten en los circuitos eléctricos. Sin embargo, para el caso de una industria la carga más predominante es la carga inductiva.

Las diversas cargas son usualmente abastecidas directamente de la red principal de suministro eléctrico, sin embargo, el suministro de potencia reactiva puede ser suministrado por equipos conectados en un punto de la red eléctrica, normalmente se utiliza para ello los bancos de capacitores que son fuentes suministradoras de potencia reactiva [8].

3.3 COMPENSACIÓN DE REACTIVOS

La compensación de energía reactiva es un proceso mediante el cual se elimina o reduce la cantidad de reactivos presente en los sistemas eléctricos, estos son generados por todos aquellos dispositivos que poseen devanados o bobinados, los cuales requieren la creación de un campo magnéticos para su funcionamiento, los reactivos también suelen ser generados por elementos eléctricos que requiere de la creación de un campo eléctrico para funcionar. Para realizar la compensación de energía reactiva se incrementa el radio de la potencia activa (P) con respecto a la potencia total (S), mediante la instalación de condensadores o filtros armónicos los cuales permiten corregir el factor de potencia del sistema, llevando el valor de esta más cerca a la unidad (1), valor ideal que se desea en los

sistemas eléctricos de corriente alterna, el cual es muy difícil de obtener cuando se encuentran presentes cargas inductivas y capacitivas en los SEP. Por tal motivo es necesario desarrollar e implementar procesos y dispositivos que corrijan el FP, mediante la compensación de reactivos [8][11][12].

En la operación de los sistemas eléctricos de potencia de alta tensión se presentan, de vez en cuando, situaciones tales como una demanda anormal de reactivos, esto es, que dicha demanda sobrepasa la aportación que ellos hacen a algunos elementos de la red, obligando a los generadores a bajar su factor de potencia para suministrar los reactivos complementarios. El objetivo de la compensación reactiva es que la potencia aparente sea lo más parecida posible a la potencia activa [8].

3.3.1 Dispositivos compensadores de potencia reactiva

Los dispositivos compensadores de potencia reactiva suministran a las cargas del sistema una parte de la corriente reactiva necesaria para su funcionamiento, permitiendo la descarga de dicha corriente del sistema eléctrico hasta el punto de compensación.[13] Estos pueden clasificarse atendiendo al principio de operación en:

3.3.2 Dispositivos dinámicos de compensación de reactivos

Los dispositivos dinámicos de compensación están formados por condensadores o motores sincrónicos. Los compensadores sincrónicos, se han utilizado fundamentalmente en la compensación del reactivo en líneas de transporte de energía eléctrica. Son alternadores (máquinas de corriente alterna) cuya excitación se ha regulado de forma que solo generen potencia reactiva (sobreexcitados). En el pasado fueron los principales dispositivos de compensación en las líneas de transmisión, ya que permiten una compensación continua, ajustada a la potencia reactiva necesaria en cada instante, siendo esta su mayor ventaja. En la actualidad, a nivel industrial, su uso es muy restringido.

Algo más usual es el empleo de motores sincrónicos que realizan simultáneamente las funciones de accionamiento a una carga activa continua y la producción de potencia reactiva de compensación para el sistema. No obstante, exige para su selección de un riguroso análisis técnico-económico [13].

3.3.3 Dispositivos estáticos de compensación fija

Los dispositivos de compensación estáticos son aquellos formados por capacitores y/o bobinas estacionarias. El empleo de la compensación fija a través de capacitores en la industria y en los sistemas de potencia data de principios del siglo xx. Como en los sistemas eléctricos predomina la carga inductiva por la propia composición de las instalaciones (Líneas, máquinas eléctricas, etc.), la compensación de reactivo se realiza por la asociación de un banco de capacitores de compensación, generalmente en paralelo con el receptor, de forma tal, que el conjunto se aproxime lo más posible al comportamiento resistivo puro [13].

El fundamento de los dispositivos de compensación se encuentra en los efectos opuestos de las bobinas y capacitores. Actualmente, en la industria está muy difundido el empleo de los dispositivos estáticos de compensación fija. Sin embargo, como lo indica su nombre, solo pueden entregar una potencia reactiva de compensación única, por lo que su empleo en cargas variables no es totalmente eficiente. Su aplicación actual está más relacionada con la compensación de receptores individuales de carga constante [13].

3.3.4 Dispositivos estáticos de compensación escalonada

Los dispositivos estáticos de compensación variable escalonada son los más difundidos en aplicaciones industriales, debido a que posibilitan el mejoramiento del factor de potencia al valor deseado con poca variación en el comportamiento de este, a pesar de la variabilidad del comportamiento de la carga.

En este caso, la compensación del factor de potencia se realiza por medio de baterías individuales de capacitores, no necesariamente todas ellas de la misma potencia, que son conectadas y desconectadas automáticamente mediante

dispositivos de conmutación (contactores, tiristores, IGBT, entre otros), gobernados por un transductor llamado regulador varmétrico. Diferentes estrategias se utilizan para el control del dispositivo en el regulador.

Estos dispositivos reciben el nombre de equipos de compensación escalonada, aunque en la industria es más utilizada la denominación de baterías de compensación automática. El regulador varmétrico detecta en cada instante el factor de potencia de la red eléctrica y lo compara con el valor deseado. Si este varía, actúa adecuadamente sobre los dispositivos de conmutación, quienes a su vez conectan (o desconectan) las unidades (capacitores independientes) de forma tal que el factor de potencia vuelva a alcanzar el valor más cercano al prefijado [13].

Conforme se incrementa a la demanda de la potencia reactiva del receptor, el factor de potencia va disminuyendo, pero el regulador no actúa hasta que se vuelve a alcanzar el valor prefijado. Por esta razón, este tipo de compensación es discreta, ya que el factor de potencia no se mantiene absolutamente constante, sino que varía en determinados límites. Esta es la mayor desventaja de este tipo de dispositivos, ya que, para gran variabilidad de la carga, con pequeños saltos de potencia, el diseño del dispositivo se encarece, debido a la necesidad de incremento de unidades de compensación. Por otra parte, la selección de este tipo de dispositivos responde a una aplicación concreta, por lo que deben ser fabricados con carácter exclusivo [13].

3.3.5 Dispositivos estáticos de compensación continua

Los dispositivos estáticos con regulación continua de la potencia reactiva (SVC) son de más reciente incorporación al mercado. En ellos la regulación se logra de las más disímiles formas empleando bobinas y/o capacitores estacionarios, combinados con convertidores electrónicos de potencia, que regulan la potencia reactiva en las reamas del circuito de compensación.

En el sistema de control (regulado varmétrico) se utilizan circuitos de disparo para los elementos de potencia. Diversos algoritmos de control se implementan para

garantizar la variación de la potencia reactiva del dispositivo, incluso la variación de las susceptancias por fase. Novedosas aplicaciones han sido las computadoras personales. En este último caso se emplean algoritmos computacionales para la medición de la potencia reactiva, tales como la transformada de Walsh [13].

Este tipo de compensaciones tiene como objetivo suministrar la potencia reactiva que necesita en cada instante el receptor, de tal forma que el factor de potencia del conjunto tenga siempre el mismo valor prefijado. Estos dispositivos son idóneos para una gran variabilidad de la carga. Son equipos robustos y de bajo nivel de mantenimiento. Adicionalmente a su aplicación en los sistemas eléctricos industriales, se ha difundido su empleo a sistemas de distribución, y transmisión de potencias. Han encontrado aplicaciones en sistemas de generación no convencionales, tales como parques eólicos, donde la compensación del reactivo por métodos tradicionales resulta lenta. Sin embargo, su utilización aún es restringida debido a su elevado costo en el empleo de la electrónica que introduce no linealidades al sistema y, por ende, incrementa los efectos nocivos de la presencia de armónicos en este, a la vez que afecta el propio funcionamiento del equipo. Actualmente se diseñan teniendo en cuenta este inconveniente, incorporándoles filtros de armónicos, lo que encarece aún más su valor comercial [13].

3.3.6 Dispositivos convertidores de compensación

En las últimas décadas, el vertiginoso desarrollo alcanzando por la electrónica de potencia, ha posibilitado el diseño de convertidores de potencia que, sin la presencia de bobinas y/o capacitores estacionarios, logran a través de una estrategia de control censar la demanda de potencia reactiva en la carga y proporcionarle a la misma una corriente reactiva equivalente.

En calidad de convertidores de potencia se han empleado inversores de fuente de tensión VSI's, restauradores de tensión dinámica DVR, convertidores AC-DC o AC-AC, filtros de corriente, inversores PWM, convertidores PWM como fuentes de potencia reactiva, convertidores AC-fed PWM, entre otros. Tales dispositivos

posibilitan una compensación continua de la potencia reactiva, pero también ocasionan gran distorsión al sistema que es aún elevado, en versiones comerciales [13].

3.4 TIPOS DE COMPENSADORES

Los compensadores tienen diferentes configuraciones y combinaciones de los elementos que los conforman como inductores, capacitores, resistores, switches mecánicos, tiristores y otros elementos que permiten realizar la compensación de potencia al sistema. Para conocer estas configuraciones y combinaciones se realiza una breve descripción de cada uno de ellos y algunos de sus modelos.

3.4.1 Capacitor serie controlado por tiristores (TCSC)

Los dispositivos serie se implementan en la mayoría de los casos para mitigar oscilaciones entre áreas en el sistema eléctrico de potencia. El capacitor serie controlado por tiristores (TCSC por sus siglas en inglés) incrementa el amortiguamiento de la red cuando varios sistemas de potencia de gran magnitud son interconectados. Además, puede evitar la resonancia subsincrónica entre unidades de generación de plantas térmicas y líneas de transmisión con compensación serie. La curva característica de este dispositivo se muestra en la Figura 13 [6].

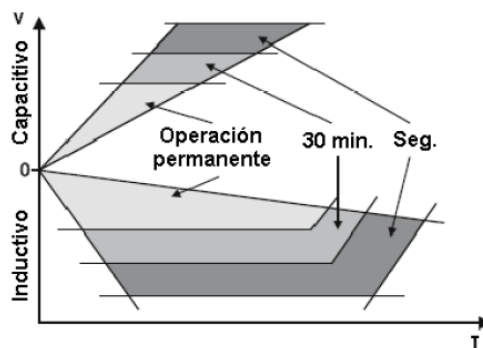


Figura 13. Curva característica de un TCSC. [7]

Principalmente el TCSC suministra amortiguamiento electromecánico entre sistemas de potencia de gran magnitud, cambiando la reactancia de una línea de

transmisión específica. Además, el TCSC cambia su impedancia (vista por la corriente de línea) para las frecuencias subsíncronas, tal que se evite una probable resonancia subsíncrona. Un esquema de conexión para este compensador se muestra en la Figura 14.

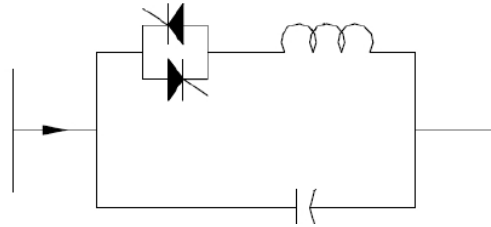


Figura 14. Diagrama esquemático de un TCSC. [7]

3.4.2 Compensador en serie estático síncrono (SSSC)

El compensador en serie estático síncrono (SSSC) es un dispositivo compensador serie basado en una fuente convertidora de voltaje (VSC), como se muestra en la Figura 15, capaz de suministrar compensación inductiva o capacitiva independientemente de la corriente de la línea. El SSSC por lo general tiene la misma disposición electrónica que el STATCOM a diferencia de que el SSSC es acoplado a la red a través de un transformador en serie a la línea de transmisión. El transformador serie tiene como función inyectar un voltaje en la línea en cuadratura con la corriente de la misma para incrementar o reducir la caída de voltaje por reactivos y de esta manera controlar la transferencia de potencia [6].

El capacitor de CD que posee el equipo sirve para mantener el voltaje de CD, permitiendo que aumente o disminuya la potencia transmitida a la línea a través de una pequeña fracción de la potencia máxima independientemente del ángulo de fase. Debido a la capacidad de este dispositivo para generar o absorber reactivos, los sistemas de potencia cercanos son insensibles a resonancias subsíncronas. La configuración de este dispositivo es muy similar a la del STATCOM, aunque en su implementación es más complicado debido al montaje requerido y a las protecciones necesarias, además su compensación está limitada a la capacidad de almacenamiento de energía del capacitor [6].

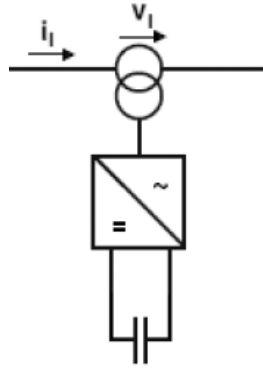


Figura 15. Diagrama esquemático de un SSSC. [7]

3.4.3 Compensador Estático (STATCOM)

El compensador estático (STATCOM) es un SVC implementado mediante una fuente convertidora de voltaje (VSC) como se muestra en la Figura 16. Presenta un mejor desempeño hacia la red, en comparación con un SVC, ya que está en capacidad de mejorar la calidad de la potencia ante comportamientos anómalos en la red como caídas de voltaje y flickers. Un STATCOM es implementado mediante dispositivos de conmutación como tiristores de apagado por compuerta (GTO), transistores bipolares de compuerta aislada (IGBT) o tiristores controlados mediante una compuerta integrada (IGCT) [6].

La característica de operación del STATCOM se muestra en la Figura 17, la cual presenta limitaciones a bajo voltaje. Además, la línea punteada representa una región de operación transitoria. Una de las ventajas de este dispositivo es la de poder suministrar potencia reactiva independientemente del voltaje en su punto de conexión, esto implica que el compensador, entrega su máxima capacidad durante las peores contingencias de la red.

Un STATCOM tiene la capacidad de regular el voltaje en un barraje, lo que implica que los transformadores con cambiadores de tomas no son usados con la misma frecuencia, esto reduce los costos de mantenimiento en este tipo de transformadores. Este compensador es capaz de inyectar potencia reactiva a la red por medio de la inyección de corriente (magnitud variable). El STATCOM requiere de un capacitor para mantener el voltaje en el inversor [6].

El control del compensador se logra variando el ángulo de conmutación del dispositivo semiconductor para que la componente fundamental del voltaje generada por el inversor sea forzada a estar en atraso o adelanto respecto al voltaje del barraje al cual se encuentra conectado. Esta variación del ángulo de conmutación es de unos pocos grados, permitiendo que el flujo de potencia salga o entre al inversor [6].

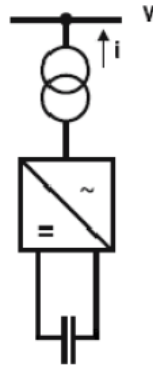


Figura 16. Diagrama esquemático de un STATCOM [7].

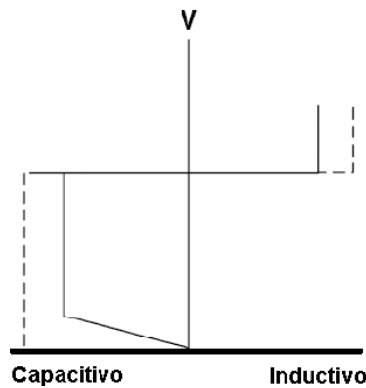


Figura 17. Curva característica de un STATCOM [7].

3.4.4 Controlador unificado de flujo de potencia (UPFC)

El controlador unificado de flujo de potencia (UPFC) permite controlar el flujo de potencia además de un control independiente de voltaje. La principal desventaja de este dispositivo es el alto costo de implementación. El UPFC está compuesto de un compensador estático (STATCOM) y un compensador estático en serie (SSSC). Este dispositivo se comporta como un compensador en derivación y como un cambiador de fase. Está compuesto de un transformador en serie y uno

en derivación ambos conectados a fuentes convertidoras de voltaje con un enlace de CD en común, como se muestra en la Figura 18 [6].

El convertidor conectado en derivación se utiliza para suministrar la potencia real demandada por el convertidor en serie a través del enlace de CD. La potencia real intercambiada está determinada por la diferencia angular del voltaje del convertidor y el voltaje del sistema de CA. El convertidor en derivación también puede generar o absorber potencia reactiva en sus terminales de CA, por lo tanto, también puede ejecutar las funciones de un compensador estático de reactivos [6].

El convertidor en serie inyecta un voltaje de magnitud y ángulo controlable en serie con la línea a través de un transformador de acoplamiento. Este voltaje de CA se produce por la conmutación de tiristores alimentados con CD desde el capacitor de enlace. Debido a que el UPFC es una combinación del STATCOM y del SSSC, el modelo es obtenido también como una combinación de estos dos compensadores. La estructura de control para estos dispositivos es más compleja ya que debe coordinar el tipo de compensación requerido por la red, ya que el compensador está en capacidad de impactar el voltaje, la corriente y la fase del sistema de potencia [6].

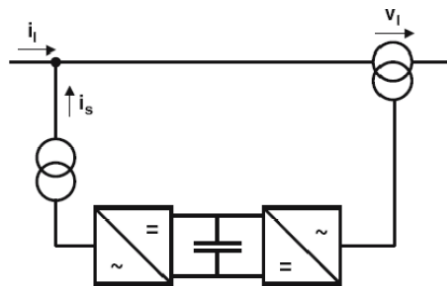


Figura 18. Esquema de un UPFC [7].

3.5 COMPENSADOR ESTÁTICO DE REACTIVOS (SVC)

El compensador estático de reactivos (SVC) en comparación con la compensación conmutada mecánicamente suministra un control más suave y preciso. Además, puede mejorar la estabilidad de la red y puede ser adaptado instantáneamente a nuevas situaciones. Un SVC tiene la capacidad de suministrar rápida y

continuamente la potencia reactiva requerida para el control dinámico de oscilaciones de voltaje para diferentes condiciones del sistema y por tanto mejora la estabilidad del sistema de transmisión y distribución.

Un SVC consiste principalmente de un conjunto de tiristores conectados en anti paralelo, reactores de núcleo de aire y capacitores de alta tensión en CA y de un transformador de potencia para alcanzar los niveles de tensión requeridos. La configuración del SVC puede ser básicamente basada en capacitores conmutados por tiristores (TSC) y/o en reactores conmutados o controlados por tiristores (TSR/TCR) como se muestra en la Figura 19 [6].

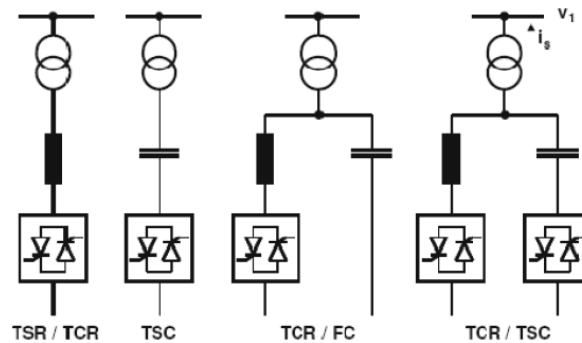


Figura 19. Esquema de conexión de un SVC [7].

En la Figura 20, se presenta el comportamiento del SVC, en donde la parte izquierda de la curva representa la inyección de reactivos hacia la red. Esto ocurre cuando el voltaje está por debajo de los límites establecidos, y la parte derecha de la curva representa la absorción de reactivos del sistema, se da cuando el voltaje está por encima de los límites establecidos [6].

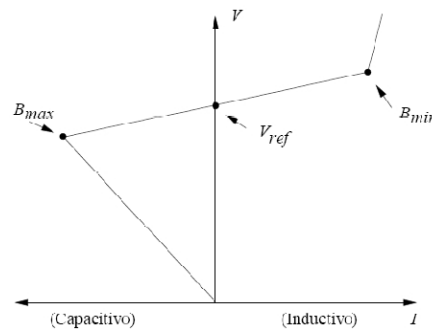


Figura 20. Curva característica de un SVC [7].

3.5.1 Condensador conmutado por tiristores

El esquema del condensador conmutado por tiristor o *Thyristor Switched capacitor* (TSC) representa la configuración más sencilla de la utilización de dispositivos electrónicos de potencia en el control de reactiva. Este elemento está formado por un interruptor de estado sólido en serie con un condensador o batería de condensadores como se observa en la Figura 21.

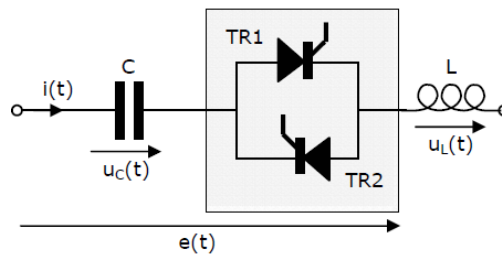


Figura 21. Configuración de un TSC [7].

En la Figura 21, se muestra un interruptor de estado sólido formado por dos tiristores (TR1 y TR2) en anti paralelo. De forma que, para conectar el condensador (C) se disparan los dos tiristores al mismo tiempo empezando a conducir tan pronto estén polarizados positivamente. Para la desconexión se anula la señal de disparo y los tiristores se apagarán en el instante en que la corriente que los atraviesa cruce por cero. En serie con el condensador es habitual encontrar una bobina (L), ya sea para limitar la derivada de la intensidad $di(t)/dt$ y así proteger a los tiristores, o bien, para crear un filtro sintonizado a una determinada frecuencia [11].

La actuación del interruptor estático es prácticamente instantánea, por consiguiente, se puede elegir como instante de conexión aquel en que el valor de la tensión de alimentación provoque la menor corriente transitoria.

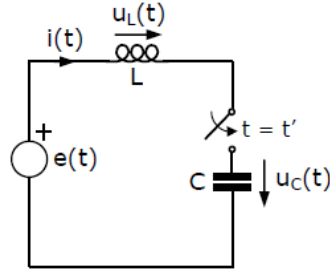


Figura 22. Esquema equivalente de un TSC [7].

Para estudiar en detalle el transitorio de conexión del condensador C cuando éste está en serie con una bobina ideal L, se emplea el circuito presente en la Figura 22, donde se considera un comportamiento ideal para el interruptor estático [11]. La tensión de alimentación $e(t)$ se puede poner como:

$$e(t) = \sqrt{2}E \cos(\omega t) \quad (8)$$

Dónde: E es el valor eficaz de la tensión y ω su pulsación.

Por consiguiente, la expresión para la tensión del condensador $u_C(t)$ si el interruptor se cierra en el instante t' es:

$$u_C(t) = u_a(t) + u_p(t) \quad (9)$$

siendo $u_a(t)$ su componente natural y $u_p(t)$ su respuesta en régimen estacionario sinusoidal:

$$u_a(t) = K_1 \cos \omega_0 (t - t') + K_2 \sin \omega_0 (t - t') \quad (10)$$

$$u_p(t) = \sqrt{2}U_c \cos(\omega t) \quad (11)$$

Donde:

- ω_0 es la frecuencia natural, que se puede poner como:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (12)$$

- U_c es el valor de eficaz de la tensión en régimen permanente, tal que:

$$U_c = E \frac{1}{1 - \frac{w^2}{w_0^2}} \quad (13)$$

- K_1 y K_2 son constantes que se pueden deducir de las condiciones iniciales.

El cálculo de la intensidad se puede realizar utilizando la relación $i(t) = Cduc(t)/dt$, con lo que se obtiene la expresión:

$$i(t) = i_a(t) + i_p(t) \quad (14)$$

Donde $i_a(t)$ e $i_p(t)$ son, respectivamente, la componente natural y estacionaria de la intensidad:

$$i_a(t) = -w_0CK_1 \sin w_0(t - t') + w_0CK_2 \cos w_0(t - t') \quad (15)$$

$$i_p(t) = -w_0\sqrt{2}U_c \cos(wt) \quad (16)$$

Para el cálculo de K_1 y K_2 las condiciones iniciales que se consideran son la intensidad inicial del circuito y la tensión inicial del condensador:

$$U_c(t') = U_0 \quad (17)$$

$$i(t') = 0 \quad (18)$$

Donde u_0 es la tensión inicial del condensador o tensión residual. Los valores obtenidos son:

$$K_1 = U_0 - \sqrt{2}U_c \cos(\theta) \quad (19)$$

$$K_2 = \frac{w}{w_0} \sqrt{2}U_c \sin(\theta) \quad (20)$$

Siendo θ el ángulo de disparo del interruptor estático: $\theta = \omega t'$

Por otra parte, para que el transitorio de conexión sea mínimo es necesario que la componente natural de la corriente sea nula, es decir, que tanto K_1 como K_2 sean cero, o sea:

$$K_2 = \frac{w}{w_0} \sqrt{2} U_c \sin(\theta) = 0 \rightarrow \theta = 0 \text{ ó } \pi \quad (21)$$

$$K_1 = U_0 \mp \sqrt{2} U_c = 0 \rightarrow U_c = \pm \sqrt{2} E \frac{1}{1 - w^2/w_0^2} \quad (22)$$

Resumiendo, es necesario que se cumplan las siguientes condiciones:

- El ángulo de conexión θ a ser 0 o π , esto se puede interpretar como que en el instante de conexión la tensión de alimentación ha de ser la máxima ($\theta = 0$) o la mínima ($\theta = \pi$).
- La tensión del condensador en el instante de realizar la conexión debería ser igual al valor de pico de su tensión en régimen permanente.

Por consiguiente, para la eliminación del transitorio de conexión del TSC, es necesario realizar la conexión cuando la tensión de alimentación alcance su valor de pico ($\pm\sqrt{2}E$) y mantener el condensador antes del disparo con una tensión residual determinada ($U_0 = \pm\sqrt{2}U_c$).

El cumplimiento simultáneo de ambas condiciones no se puede garantizar, ya que la tensión de un condensador depende de su instante de desconexión y del tiempo que lleve desconectado. No obstante, para una tensión residual dada, se asume como aceptable que el instante más favorable para la conexión es aquel en que la tensión de alimentación es igual a la tensión residual, o lo que es lo mismo, cuando la tensión en los tiristores se anula, ya que:

$$K_1 = 0 \rightarrow U_0 = \sqrt{2} U_c \cos(\theta) \approx \sqrt{2} E \cos(\theta) \rightarrow e(t') = U_0 \quad (23)$$

Donde se tiene en cuenta que $w_0 \gg w$, y por lo tanto, $U_c \approx E$.

En la Figura 23 se puede ver evolución del valor de pico de la corriente de conexión I_p (relativa al valor de pico de la corriente estacionaria $\sqrt{2}I$) y en función de la tensión en el instante de conexión $e(t')$, (relativa al valor de pico de la tensión $\sqrt{2}E$) para varios valores de la tensión residual U_0 ; para un TSC alimentado a 230 [V], constituido por una batería de condensadores de 2.7 [kVAR] y una bobina de 0.67 [mH].

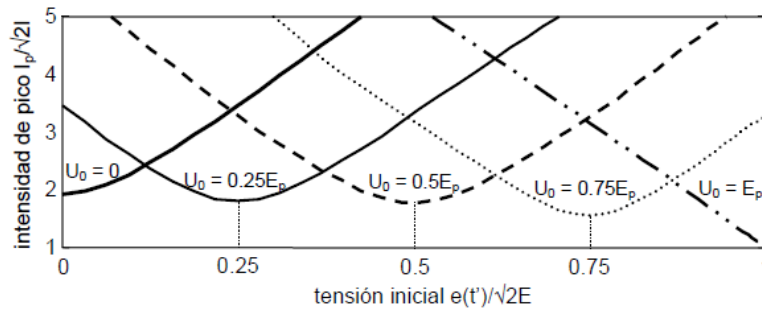


Figura 23. Evolución del valor de pico de la corriente de conexión ($I_p/\sqrt{2}I$) en función de la tensión en el instante de conexión ($e(t')/\sqrt{2}E$) para distintos valores de la tensión residual U_0 [4].

Empleando la estrategia de conexión en $e(t') = U_0$, la situación más desfavorable se produce cuando $U_0 = 0$, donde, en el ejemplo anterior, la corriente de pico I_p es cerca de dos veces el valor de pico de la corriente estacionaria $\sqrt{2}I$, como se puede observar en la figura 24.

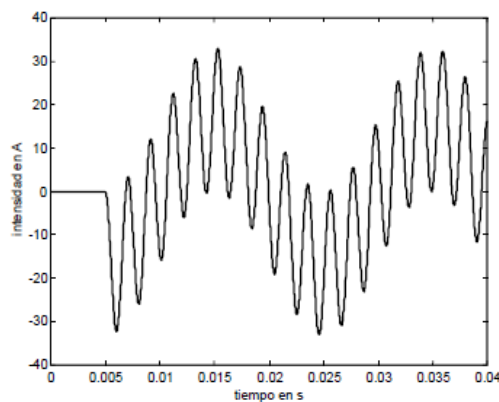


Figura 24. Intensidad en de conexión en un TSC cuando $e(t') = U_0 = 0$ [4].

Con el TSC se eliminan los interruptores empleados, de esta forma la conexión y desconexión de la batería es prácticamente instantánea y se suprimen las

corrientes de conexión. No obstante, con este elemento la capacidad de regulación de la reactiva dependerá nuevamente del número de escalones empleado [11].

3.5.2 Bobina controlada por tiristores

Otro elemento característico en los SVC es la bobina controlada por tiristores o *Thyristor Controlled reactor* (TCR). La principal misión de este elemento es la de conseguir una regulación continua y rápida de la potencia reactiva consumida por una bobina.

El esquema de un TCR de la figura 25, está formado por una bobina ($R+L$) y un convertidor CA/CA compuesto por dos tiristores en antiparalelo. En este caso, a la electrónica de potencia se le aplica un control de fase, de forma que se regula el valor eficaz de la corriente que circula a través de la reactancia [11].

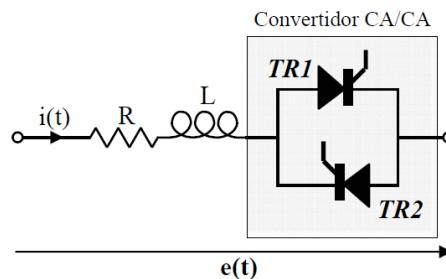


Figura 25. Configuración de un TCR [5].

Si en vez de realizar un control de fase, los tiristores se emplean como si fuesen un interruptor estático, la configuración descrita recibe el nombre de bobina conmutada por tiristores o *Thyristor Switched reactor* (TSR). Para minimizar los transitorios de desconexión el instante más favorable sería cuando la tensión de alimentación alcanzase su nivel máximo o mínimo.

Otra alternativa podría ser la de utilizar los tiristores para controlar la intensidad de una batería de condensadores, no obstante, el aplicar el control de fase sobre capacidades ocasionaría fuertes corrientes de conexión que tendrían que soportar los propios tiristores, además de la dificultad que esto originaría en el control.

Principio de funcionamiento: Al aplicar el control de fase sobre los tiristores, se consigue que vayan conduciendo alternativamente de forma que la intensidad resultante es una sucesión de transitorios sobre un conjunto RL. Esto es lo que se puede ver en la Figura 26, donde a partir de un instante definido por el ángulo de disparo α se inicia la conducción de cada uno de los tiristores TR1 y TR2.

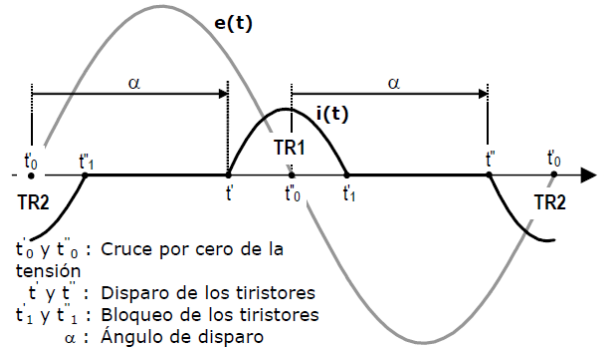


Figura 26. Formas de onda de intensidad en un TCR [4].

Para el estudio del comportamiento del TCR se supone un comportamiento ideal de los tiristores y que la tensión de alimentación es sinusoidal pura, esto es:

$$e(t) = \sqrt{2}E \sin(\omega t) \quad (24)$$

En primer lugar, se van a estudiar los instantes de conexión de los tiristores. El tiristor de ciclos positivos, TR1, se activará en el instante t' , el cual teniendo en cuenta (24) se calcula como:

$$t' = t'_0 + \frac{\alpha}{\omega} = \frac{\alpha}{\omega} \quad (25)$$

donde α es el ángulo de disparo y t'_0 es el instante de cruce por cero de la tensión con pendiente positiva. Análogamente, el tiristor para ciclos negativos, TR2, se activará en el instante t'' cuya expresión es:

$$t'' = t''_0 + \frac{\alpha}{\omega} = \frac{(\pi + \alpha)}{\omega} \quad (26)$$

Donde t''_0 es el instante de cruce por cero de la tensión con pendiente negativa.

Los instantes de final de conducción de los tiristores (apagado, bloqueo), se producen en el cruce por cero de la intensidad, después de iniciada la conducción (ver t'_1 y t''_1 en la Figura 26).

Una vez definidos los instantes de conducción y apagado, la intensidad se puede definir según los siguientes intervalos:

- Para los ciclos positivos, $t' \leq t \leq t'_1$, la intensidad se ajusta a la ecuación:

$$i(t) = K_1 e^{-a(t-t')} + \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi) \quad (27)$$

- Para los ciclos negativos, $t'' \leq t \leq t''_1$, la intensidad se ajusta a la ecuación:

$$i(t) = K_2 e^{-a(t-t'')} + \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi) \quad (28)$$

- Para los instantes no incluidos en los intervalos anteriores se tiene:

$$i(t) = 0 \quad (29)$$

Donde:

- I es el valor eficaz de la intensidad en régimen estacionario, es decir: $I = E / \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$
- φ es el ángulo de desfase entre la tensión y la intensidad en régimen estacionario: $\varphi = \arctan(\omega L / R)$. Generalmente $\omega L \gg R$, con lo que se puede afirmar que $\varphi \approx \pi/2$ (90°)
- a es la atenuación y se define como: $a = R/L$
- K_1 y K_2 son constantes definidas a partir de las condiciones iniciales. Las constantes K_1 y K_2 , si se consideran las condiciones iniciales nulas de forma que, $i(t') = 0$ e $i(t'') = 0$, resultan:

$$K_1 = -\sqrt{2}I \sin(\omega t' - \varphi) = -\sqrt{2}I \sin(\alpha - \varphi) \quad (30)$$

$$K_2 = -\sqrt{2}I \sin(\omega t'' - \varphi) = -\sqrt{2}I \sin(\pi + \alpha - \varphi) \quad (31)$$

De donde se puede deducir, debido a la igualdad supuesta para los ángulos de disparo de TR1 y TR2, que:

$$K = K_1 = -K_2 \quad (32)$$

El ángulo de disparo α tiene unos valores máximo y mínimo, tal y como se puede observar si se analiza el comportamiento del tiristor TR1:

- Si $\alpha > \pi$, entonces la orden de disparo se produce en el instante que la tensión es negativa, por lo tanto, no hay conducción e $i(t) = 0$
- Si $0 < \alpha < \varphi$, el apagado ($i(t) < 0$) no se produce hasta que la tensión rebasa su valor mínimo $-\sqrt{2}E$, de forma que ya estaría disparado el tiristor de la otra rama TR2. En unos cuantos ciclos la intensidad sería la de régimen permanente, $i(t)=i_e(t)$ ver en la figura 27.

Según lo expuesto, los límites para el ángulo de disparo son:

$$\varphi \leq \alpha \leq \pi \quad (33)$$

de forma que para $\alpha \leq \varphi$ la intensidad es la de régimen permanente, $i(t)=i_e(t)$, y para $\alpha \geq \pi$ la intensidad es nula $i(t)=0$. En la Figura 27 y Figura 28, se muestra la intensidad para un TCR con $R=1$ [Ω], $L = 0,1$ [H], $f_r = 50$ [Hz], $E = 230$ [V] para $\alpha = 45^\circ$ y para $\alpha = 120^\circ$, respectivamente.

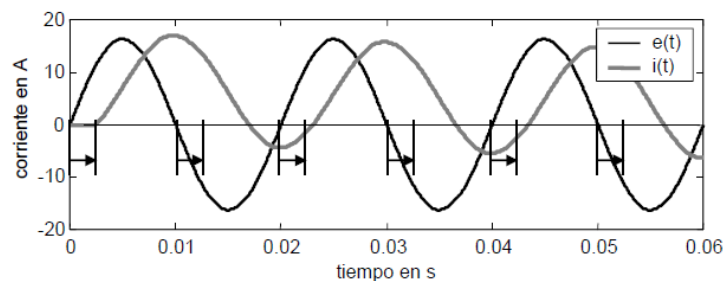


Figura 27. Formas de onda de intensidad en un TCR para $\alpha = 45^\circ$ [4]

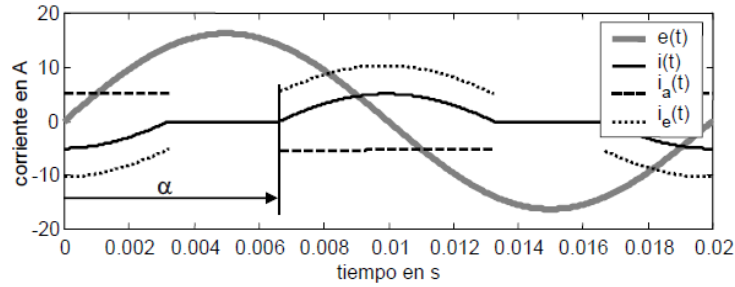


Figura 28. Formas de onda de intensidad en un TCR para $\alpha = 120^\circ$ [4].

3.5.3 Modelo simplificado del SVC

Si sólo se considera la componente fundamental de la intensidad en el TCR, se puede interpretar la variación de la intensidad con el ángulo de disparo como si se dispusiese de una inductancia L_α variable, por la que circula una corriente igual a la componente fundamental de la corriente $i(t)$, ver ecuación (22), que, en el caso monofásico, en estrella o en triángulo con neutro sería:

$$L_\alpha = \frac{\pi L}{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)} \quad (34)$$

donde para $\alpha = \pi/2$ la inductancia es mínima e igual a L , mientras que para $\alpha = \pi$ es máxima e igual a infinito. Con la aproximación descrita la expresión de la potencia reactiva Q_L consumida por la bobina se puede poner como:

$$Q_{L_\alpha} = \frac{E^2}{\omega L_\alpha} \quad \text{ó} \quad Q_{L_\alpha} = B_\alpha E^2 \quad (35)$$

donde la expresión para la susceptancias B_α del TCR es:

$$B_\alpha = \frac{1}{\omega L_\alpha} = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{\pi \omega L} \quad (36)$$

En paralelo con el TCR es habitual que se dispongan de baterías de condensadores (fijas, TSC...) o incluso unidades adicionales de reactancias (TSR...). Por lo tanto, la potencia reactiva Q_{SVC} generada por el SVC (ver Figura 29) se puede obtener del balance:

$$Q_{SVC} = Q_C - Q_{L\alpha} \quad (37)$$

donde, Q_C es la potencia reactiva generada por los condensadores conectados y $Q_{L\alpha}$ la potencia reactiva consumida por el TCR en función del ángulo de disparo (en este término se incluiría la potencia de las reactancias adicionales en uso).

El comportamiento de un SVC como el mostrado en la Figura 28 y teniendo en cuenta (26) se puede aproximar al de una susceptancias variable con un valor que depende del estado de funcionamiento del SVC, o sea, de condensadores conectados y del ángulo del TCR, es decir:

$$B_{SVC} = \omega C - 1/\omega L_\alpha \quad (38)$$

donde C es la capacidad de las baterías en funcionamiento.

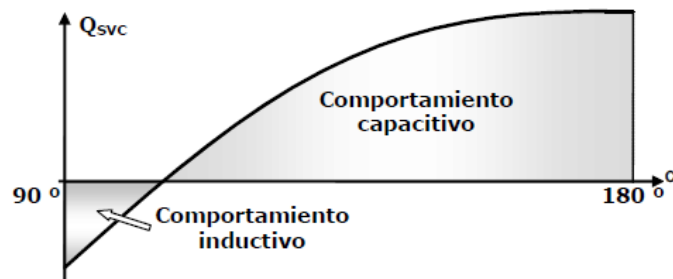


Figura 29. Evolución de la potencia reactiva generada por el TCR en función del ángulo de disparo (α) [4].

3.5.4 Configuración del SVC

En general un SVC puede estar compuesto por todos o algunos de los elementos mostrados en la Figura 30. De esta forma, el SVC tiene un comportamiento capacitivo o inductivo en función del estado de operación de las distintas unidades de capacidad (TSC o controladas mecánicamente), del TCR y de la dimensión de los condensadores fijos, ya sea en baterías o filtros LC (ver Figura 29).

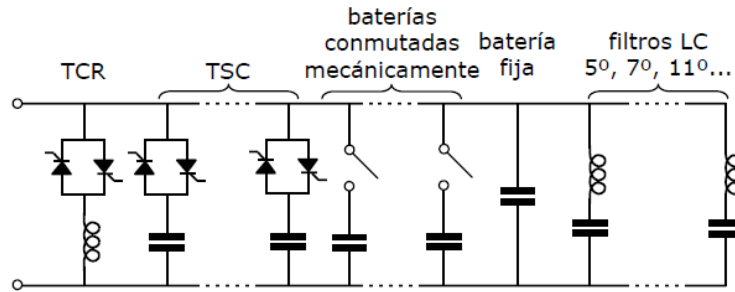


Figura 30. Composición por fase de un SVC [4].

La utilización de unidades TSC en paralelo con el TCR permite disminuir la inductancia para el funcionamiento en el lado capacitivo, ya que el TCR sólo tendría que cubrir el salto de reactiva entre dos escalones del TSC. Al reducir el tamaño del TCR también disminuirían los armónicos inyectados por éste a la red. En la Figura 31, se puede ver el comportamiento de un SVC formado por TCR más TSC's en función de una potencia reactiva demandada (Q_{ref}).

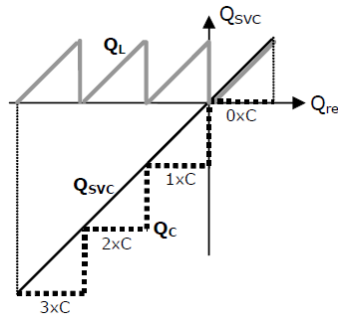


Figura 31. Evolución de la reactiva generada por un SVC formado por TSC+TCR [4].

La inclusión de filtros LC, ya sea sintonizados a un determinado armónico o bien paso-bajo, sirven para evitar que parte de los armónicos generados en el TCR se transmitan a la red. Con objeto de reducir los armónicos emitidos por el SVC también se pueden emplear estrategias como las del rectificador de 12 pulsos, dividiendo el SVC en dos y conectando cada parte a un transformador YY e YD.

Las baterías de condensadores, o inductancias, accionadas mecánicamente pueden trabajar como unidades de reactiva de reserva que entrarían en funcionamiento en aquellas condiciones más severas para el control realizado por el SVC.

3.5.5 Corrección de factor de potencia mediante SVC

La utilización del TSC para el control del factor de potencia en aquellas aplicaciones donde se desee minimizar los transitorios de conexión es bastante habitual, teniendo los principales fabricantes (Circuitor, Schneider Electric...) equipos de estas características. No obstante, el comportamiento de estos equipos se puede mejorar incluyendo un TCR en el diseño, de forma que la regulación del factor de potencia sea continua.

El control de estos equipos puede realizarse en bucle abierto midiendo la potencia reactiva consumida por la carga y actuando sobre el SVC o bien en bucle cerrado midiendo la potencia reactiva consumida por el conjunto formado por la carga a compensar y el SVC. No obstante, el emplear la potencia reactiva como variable entrada no está exenta de problemas, ya que es necesaria la medida simultánea de la tensión y la intensidad, además de la problemática que acarrea su definición cuando hay armónicos en la red.

Si se atiende al comportamiento de la intensidad (ver Figura 32), su valor para el conjunto de la carga más el compensador se puede poner de forma aproximada como:

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + (Q - Q_{SVC})^2}}{E} \quad (39)$$

donde P y Q son, respectivamente, las potencias activa y reactiva demandadas por la carga, Q_{SVC} es la reactiva generada por el SVC y E es el valor eficaz de la tensión de red. Según este comportamiento, el control del SVC se puede realizar de forma que se busque el valor mínimo de la intensidad.

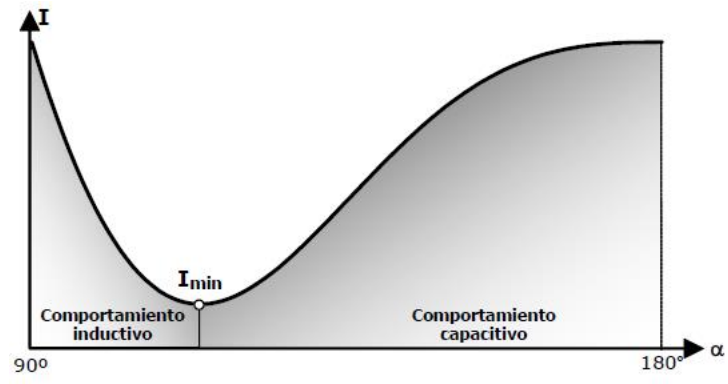


Figura 32. Evolución de la intensidad eficaz consumida por el conjunto del compensador más la carga en función del ángulo de disparo [4].

4. COMPENSADOR ESTÁTICO DE REACTIVOS

4.1 Topología del compensador estático de reactivos

El compensador estático de reactivos en general es un conjunto de reactores y condensadores que se encuentran conectados en paralelo, siendo controlados por tiristores y permitiendo el control de potencia reactiva en la red, manteniendo un nivel de tensión estable y corrigiendo el factor de potencia del sistema. Existen diferentes diseños o topologías del compensador estático de reactivos como se estudió en el capítulo anterior, el componente principal de un SVC es el TCR (Thyristor Controlled Reactor o Bobina controlada por tiristores), este se encarga de regular la potencia reactiva consumida por la red, este elemento se combina con otros dispositivos como TSC, FC, MSC entre otros con el fin de desarrollar un control más eficiente de la potencia reactiva y mitigar los efectos que pueda generar el TCR hacia la red, desarrollando de este modo diferentes topologías de diseño para el SVC.

Para seleccionar la topología se tuvo en cuenta la economía, eficiencia para el control de reactivos, complejidad de construcción, efectos nocivos en la red y su conexión. Todos los diseños de SVC estudiados se basan en conectar elementos en paralelo al TCR, al implementar bancos de TSC en conjunto con el TCR se obtiene una mayor flexibilidad de operación del compensador frente a grandes perturbaciones, evitando entrar en resonancia con la impedancia del sistema, operando rápidamente desconectando los condensadores eliminando la posibilidad de resonancia. Por otra parte, se reducen las pérdidas de régimen permanente y dado que la capacidad del TCR suele ser pequeña, la generación de corrientes armónicas se reduce considerablemente, sin embargo, se debe incluir un filtro para mitigar los armónicos en caso de que las ramas de TSC estén apagadas y solo esté actuando el TCR lo que ocasiona que se generen componentes armónicas de bajo orden como el 3, 5 y 7 armónico, a su vez, cabe destacar que desarrollo de este modelo de SVC es más complejo, esto debido a que se debe realizar el control de disparo de los SCR del TCR y de las ramas de TSC implementadas ocasionando que sea más compleja la implementación de

este diseño, el uso de un filtro que elimine los armónicos en el caso que los TSC se encuentren en off aumenta la complejidad de este SVC y su valor económico se eleva considerablemente en comparación con los otros diseños analizados. Sin embargo, esta topología suele ser muy implementada en la industria y considerada la más eficiente con la adición de algunos elementos extras que garanticen la calidad de su funcionamiento.

Conectar condensadores con interruptores mecánicos (MSC) al TCR genera ventajas en el SVC debido a que se reducen las pérdidas que se presentan al implementar inductores y condensadores en la red, influyendo esto directamente en los costos operativos y a su vez disminuye en capital por Var instalado en el sistema. Sin embargo, los compensadores con esta topología se implementan en sistemas de alta tensión y requieren de un filtro para mitigar los armónicos que se generan en los transformadores cuando se conectan TCR's cerca de este, por otra parte, los switches mecánicos ocasionan que el dispositivo posea una relativa lentitud de actuación, debido a que estos requieren dos ciclos para el cierre y ocho para la apertura ocasionando que las acción de los condensadores se vea limitada y la compensación de reactivos en el sistema se baja, esto y el hecho de que se implementa en sistema de alta tensión disminuye la implementación de los compensadores con la topología MSC-TCR.

Por otra parte, las implementaciones de bancos de condensadores fijos conectados en paralelo con los reactores controlados por tiristores proveen un rango dinámico de compensación hacia el lado capacitivo de los reactivos en la red, de este modo se tiene compensación en el rango capacitivo e inductivo, sin embargo, es necesario insertar un filtro a este diseño para mitigar la inyección de armónicos de bajo orden a la red, provenientes de la operación del TCR. La desventaja del que posee este tipo de SVC son las pérdidas de la capacidad del equipo en MVA, debidas a la circulación de corrientes elevadas dentro del esquema FC-TCR, necesarias para la cancelación de los MVAr's capacitivos. Sin embargo, estas pérdidas se encuentran en un bajo orden de entre 5% a 7% de la capacidad del equipo en MVA. Debido a la simplicidad de su diseño el costo de

fabricación y complejidad de control es bajo, ya que solo es necesario el control de los SCR's del TCR, mientras que la eficiencia de compensación es alta debido a su funcionamiento en los rangos inductivos y capacitivos sin el tiempo de retardo de acción de switches en los condensadores.

Analizando los diferentes diseños de SVC estudiados bajo el criterio de selección planteado se determinó que la topología adecuada para un sistema de baja tensión es el FC-TCR con la implementación de un filtro pasa baja que mitigue los armónicos generados por el TCR y presentes en la red. El esquema del SVC con esta topología se observa en la Figura 33.

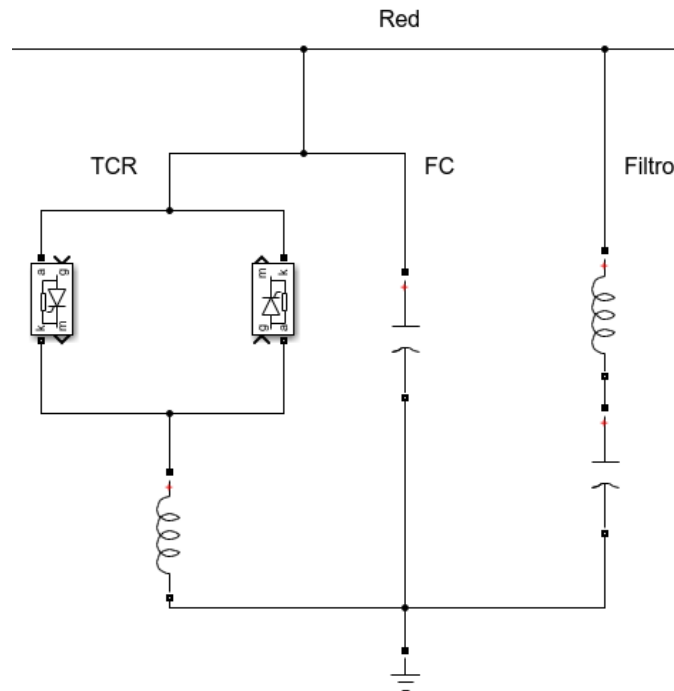


Figura 33. Topología FC-TCR del SVC más filtro pasa baja.

En la Figura 33, se observa la configuración seleccionada para el SVC que se diseñará, en esta se observa que el condensador fijo se conecta paralelo al TCR, permitiendo este aportar reactivos al sistema cuando sea necesario, mientras el inductor consumirá una vez que sea elevada la presencia de potencia reactiva en la red, el trabajo en conjunto de estos dos elementos garantiza un control óptimo de la potencia reactiva en el sistema. Por otra parte, el filtro pasa baja elimina las corrientes de altas frecuencias generadas por los armónicos presentes en la red e

inyectados por el TCR, garantizando esto la mitigación de efectos nocivos en la red donde esté presente el compensador.

Por otra parte, es necesario decir que la cantidad de FC varía dependiendo de la red o el punto de conexión del SVC, estos pueden variar desde bancos de varios condensadores hasta un solo condensador, esta variación depende del aporte de reactivos que se requiera.

5. MODELADO DEL COMPENSADOR ESTÁTICO

5.1 Reactor controlado por tiristores y condensador fijo (FC-TCR)

La selección de la configuración del SVC diseñado se realizó bajo el criterio de qué tan eficiente, barato, flexible y controlable podrá ser el compensador, para ellos se analizan diferentes topologías y se determinó que la configuración adecuada para el tipo de compensador que se quiere diseñar es la combinación en paralelo de un reactor controlado por tiristores y un condensador fijo, estos elementos requieren valores establecidos en sus elementos de función, como el inductor del TCR y el condensador o condensadores del FC, estos parámetros son determinados con base a un rango de potencia específica en VAr como por ejemplo $\pm 100\text{MVAr}$, la cantidad de vares para los cuales se diseñe el compensador se especifican de acuerdo a la etapa del SEP en donde se dese instalar, en sistemas de alta y media tensión se diseñan compensadores en los rangos de MVAr, mientras que en baja tensión se desarrollan en el orden de KVAr y VAr.

El compensador diseñado en este caso, funcionará en sistemas de distribución de baja tensión lo que permite dos rangos de potencia reactiva para su diseño en KVAr o VAr. Sin embargo, se optó por diseñar un compensador que trabaje en el orden de los KVAr con el fin de abarcar un rango más amplio de compensación de reactivos, frente a cargas que generen cantidades altas de reactivos o consumidoras en exceso de la misma, el valor de potencia reactiva bajo el cual se diseñará el SVC es de 48 [KVAr] esto permitirá al compensador trabajar en el

orden de 0 a 48 [KVAR], considerando que este se desarrolla para un sistema de baja tensión abarcara un amplio rango de compensación dentro de la red de ubicación, teniendo en cuenta que la compensación se plantea de manera monofásica el SVC contará con una baja posibilidad de saturarse o generar problemas nocivos en la red o generar el efecto contrario en el sistema debido al control con el que contará el SVC.

Luego de establecer el valor de potencia reactiva para el cual se diseña el compensador se determina el valor de los inductores o condensadores con los que contará el dispositivo, en este caso el TCR estará compuesto por los tiristores y un inductor encargado de consumir la potencia reactiva de la red o el condensador mientras que el FC estará compuesto por un condensador que suministrará la potencia reactiva al sistema, para obtener los parámetros de estos dispositivos se realizan los siguientes cálculos.

Al establecer el valor de la potencia reactiva para diseñar el compensador se obtiene el valor de la potencia máxima en VAR, esta se presenta en el sistema cuando la Q es capacitiva lo que implica que el sistema se encuentra trabajando con exceso de reactivos lo que afecta al factor de potencia y el voltaje de la red, por otra parte, cuando la potencia Q del sistema es inductiva se obtiene la potencia mínima en VAR e implica que la red requiere aporte de reactivos. Dicho esto, se establecen las ecuaciones que permitirán hallar los valores de L y C del compensador.

$$Q_{m\acute{a}x} = \frac{V^2}{X_C} \quad (40)$$

$$Q_{m\acute{a}x} = \frac{V^2}{X_L} \quad (41)$$

donde V es la tensión de línea o fase para la cual funcionará el compensador, X_L y X_C son las reactancia inductiva e capacitiva respectivamente y cuyas ecuaciones son:

$$X_L = j\omega L \quad (42)$$

$$X_c = \frac{1}{j\omega C} \quad (43)$$

El valor de la inductancia se determina reemplazando 42 en la ecuación 41 y despejando L de la ecuación resultante se obtiene el inductor del TCR.

$$Q_{m\acute{a}x} = \frac{V^2}{j\omega L} \quad (44)$$

$$L = \frac{V^2}{j\omega Q_{m\acute{a}x}} \quad (45)$$

La tensi3n nominal de funcionamiento del compensador es de 233 [v] de l3nea lo que equivale a 134.5 [v] por fase, la frecuencia del sistemas es de 60 [Hz] dado que la potencia $Q_{m\acute{a}x}$ fue establecida en un valor exacto de 48[KVAr] la inductancia es:

$$L = \frac{(127[v])^2}{(2\pi * 60[Hz])(48[KVAr])}$$

$$L = 2.67 \times 10^{-3} \approx 2.7[mH]$$

De esta manera se obtiene el valor del inductor que har3 parte del TCR. De este manera el inductor consumir3 los reactivos de la red o del condensador cuando sea necesario, sin embargo, esto significa que el SVC solo aportara reactivos y no consumir3 ya que el inductor esta dimensionado para consumir los reactivos provenientes de la red o del condensador de manera individual, para lograr que este pueda consumir los reactivos de ambas partes a la vez, se realiza el c3lculo anterior duplicando la capacidad reactiva del compensador, dando esto como resultado el siguiente valor de inductancia:

$$L = \frac{(127[v])^2}{(2\pi * 60[Hz])(32[KVAr])}$$

$$L = 1.33 \times 10^{-3} \approx 1.3[mH]$$

Este es el valor del inductor encargado de consumir los reactivos del sistema cuando sea necesario, permitiendo que el compensador aporte y consuma reactivos de forma autónoma.

El cálculo realizado para determinar el valor de condensador es similar al desarrollado para obtener el parámetro del inductor, se reemplaza la ecuación 43 en 40, luego de esto se despeja C y se obtiene el valor del condensador, como se expresa a continuación:

$$Q_{m\acute{a}x} = \frac{V^2}{\frac{1}{j\omega C}} = j\omega CV^2 \quad (44)$$

$$C = \frac{Q_{m\acute{a}x}}{j\omega V^2} = \frac{(16[KVAr])}{(2\pi * 60[Hz])(127[v])^2}$$

$$C = 2.63 \times 10^{-3} \approx 2.63[mF]$$

El condensador fijo obtenido se encargará de suministrar los reactivos que el sistema requiera cuando el aporte en la red sea bajo. Luego de obtener los valores del condensador y el inductor que conforman al SVC, se realiza el filtro para mitigar los armónicos generados por el TCR y que se presenten en la red.

5.2 Filtro para armónicos

Los TCR del compensador aportan corrientes armónicas de bajo orden a la red, cuando se implementa la compensación en un sistema trifásico, se conectan los FC-TCR en estrella permitiendo esto que existan solo armónicas homopolares, sin embargo, las componentes que más afectan a la red proveniente del TCR son la

3, 5 y 7 armónica, por lo tanto, se implementa un banco de filtros sintonizados para mitigar estos armónicos e impedir que lleguen a la red y a su vez filtrar las mismas componentes presentes en la red.

El filtro pasivo sintonizado que se implementa está compuesto por un inductor en serie con un condensador, y se diseña en base a la potencia reactiva que este debe entregar a la frecuencia de 60 [Hz], potencia que se verá suplida principalmente por el condensador, estableciendo el valor nominal bajo el cual funcionará el filtro, se realizan los cálculos para determinar los parámetros de los elementos pasivos del filtro con las siguientes ecuaciones.

La reactancia del filtro viene dada por:

$$X_{Filtro} = \frac{(V_n)^2}{VA_r} \quad (45)$$

La reactancia del filtro a frecuencia fundamental es:

$$X_{Filtro} = X_{Cap} - X_L \quad (46)$$

En muy pocas ocasiones se sintonizan los filtros a un valor exacto de frecuencia, debido a que pueden entrar en resonancia con impedancias propias de la red o la carga, con un determinado factor de sintonía se tiene:

$$\frac{X_{Cap}}{h} = h * X_L \quad (47)$$

Donde h es el orden del armónico que se quiere eliminar, despejando se tiene que:

$$X_{Cap} = h^2 * X_L \rightarrow X_{Filtro} = X_{Cap} - X_L \quad (48)$$

Remplazando la ecuación 50 en 52 y despejando X_{Cap} se obtiene:

$$X_{Cap} * (h^2 - 1) = h^2 * X_{Filtro} \quad (49)$$

El principio de funcionamiento de un filtro es proporcionar un camino de baja impedancia para las corrientes de determinada frecuencia, por ende, se debe calcular la reactancia del condensador en función del orden del armónico (h).

$$X_{Cap} = \left(\frac{h^2}{h^2 - 1} \right) X_{Filtro} \quad (50)$$

Con este valor de reactancia capacitiva, se puede dimensionar el condensador del filtro:

$$C = \frac{1}{w * X_{Cap}} \quad (51)$$

Luego de esto se determina el valor de la reactancia inductiva, que a una determinada frecuencia entre resonancia con la del condensador y proporcione un camino de baja impedancia en el filtro. Para esto se despeja de la ecuación 56.

$$X_L = \frac{X_{Cap}}{h^2} \quad (52)$$

Al obtener el valor de la reactancia inductiva, se puede dimensionar la bobina implementando la ecuación 57:

$$L = \frac{X_L}{w} \quad (53)$$

Después de obtener los parámetros de los elementos pasivos, es necesario establecer el factor de calidad Q que se establece de la siguiente forma:

$$Q = \frac{X_L}{R} \quad (54)$$

El valor de Q es importante que sea lo más grande posible, pues entre mayor valor de Q, más pequeña será la impedancia a la frecuencia de sintonía. Esto se debe a

que a frecuencia de sintonía solo la resistencia se ve reflejada en la impedancia del filtro.

Por otra parte, el valor de R depende en gran parte del proceso constructivo de las bobinas. Este valor está dado por la resistencia propia del conductor, las pérdidas en el núcleo y en el entrehierro. Sin embargo, para el estudio en curso no se realiza el cálculo de Q mediante la ecuación 58, este se omite debido a que el filtro no contará con resistencia en su configuración y por limitación de simulación no se pueden obtener los parámetros del conductor de la bobina para obtener el valor de R.

La potencia reactiva por fase para la que se diseñara el filtro es de 480 [VAr] que representa el 3% de la potencia total que consumirá el filtro por cada fase, y la tensión nominal de trabajo es de 220 [v] de línea, esto equivale a una tensión por fase de 127 [v]. El objetivo de este filtro es mitigar los armónicos 3, 5 y 7 cuyas frecuencias de resonancias son 180, 300, 420 [Hz] respectivamente. Los valores del inductor y el condensador para la 3 armónica son:

$$X_{Filtro} = \frac{(127 [v])^2}{480 [VAr]} = 33.6 [\Omega]$$

Para evitar inconvenientes de resonancia por algunas impedancias propias de la red o de la misma carga se estableció un factor de sintonía de 0.95 al utilizar este valor en la ecuación 50 se obtiene la reactancia capacitiva:

$$X_{Cap} = \left(\frac{(2.85)^2}{(2.85)^2 - 1} \right) (33.6 [\Omega]) = 38.3 [\Omega]$$

Con el valor de esta reactancia, se puede calcular el valor del condensador utilizando la ecuación 51.

$$C = \frac{1}{(2\pi * 60[Hz]) * (38.3 [\Omega])} = 0.069 [mF]$$

Tomando en cuenta la ecuación 52, se obtiene el valor de la reactancia inductiva:

$$X_L = \frac{38.3 [\Omega]}{(2.85)^2} = 4.71[\Omega]$$

Al obtener este valor se puede calcular la inductancia del filtro por medio de la ecuación 53.

$$L = \frac{4.71[\Omega]}{2\pi * 60[Hz]} = 12.5[mH]$$

De este modo se obtiene el filtro para mitigar el tercer armónico generado por el TCR, para calcular el filtro del 5 y 7 armónico se realizó el mismo procedimiento, dando como resultados los siguientes parámetros del filtro:

Para el armónico 5 de frecuencia 300 [Hz], los datos del filtro son:

$$C = 0.013[mF]; L = 23.76[mH]$$

Para el armónico 7 de frecuencia 420 [Hz], los valores del filtro son:

$$C = 0.077[mF]; L = 2.06[mH]$$

Luego de obtener los parámetros del filtro se realiza la configuración y se implementa a la topología del compensador.

6. CONTROL DE DISPARO DE LOS SCR

El sistema de control desarrollado se divide en cuatro etapas que trabajan en conjunto con el propósito de accionar los tiristores que controlan los reactores del TCR cuando el sistema requiera la acción del SVC para corregir el factor de potencia. Este permite el disparo de cada tiristor en ambos semiciclos de la onda de referencia sea esta la tensión o la corriente de la red donde se instale compensador, en este caso se optó por controlar los tiristores mediante la detección de la onda de corriente de la red, para lograr que estos se accionen en cada semiciclo se implementa un sistema de medición para obtener la forma de onda de la corriente y la frecuencia del sistema, a estos datos se incorpora un ángulo de disparo (α) asignado de forma manual, este representa el grado en el que se desea el disparo de los tiristores con respecto a la onda sinusoidal de la corriente medida. Estos datos se implementan como variables de entrada en el control realizado.

Las etapas que conforman el sistema de control implementan funciones lógicas, comparando datos y condiciones de falso y verdadero, con base en las variables de entrada al sistemas de disparo, para ello se desarrolla un detector de cruce por cero para la onda de corriente medida, por otra parte, se determinan los tiempos de retardo y duración de los disparos, a su vez, se realiza un control condicional del cruce por cero de la onda medida para luego generar los pulsos de disparos a los tiristores del TCR. Este proceso se muestra en la Figura 34.

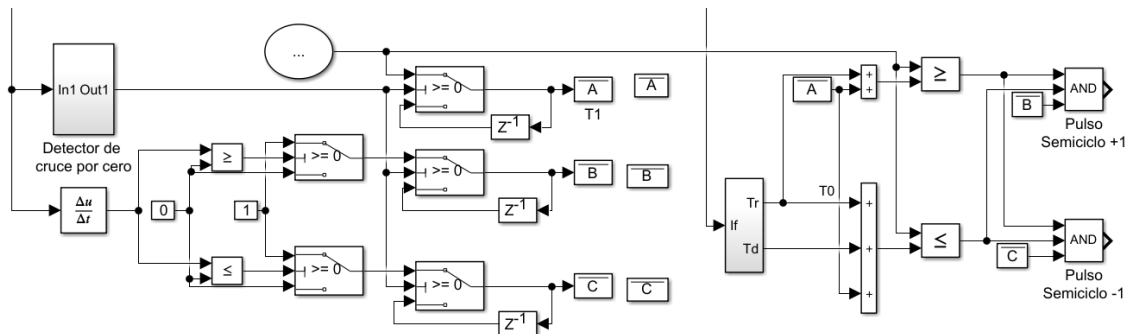


Figura 34. Control de disparo de los tiristores.

6.1 Detector de cruce por cero de la onda de corriente

El control de disparo de los tiristores del SVC diseñado, se desarrolló en base a la corriente de la carga, esta es medida y comparada mediante condición lógica para determinar el momento en que cruza por cero, debido a que esto indicará que la onda de corriente está pasando del semiciclo positivo al negativo y viceversa. En la Figura 35, se observan las condiciones lógicas aplicadas para determinar el cruce por cero de la onda.

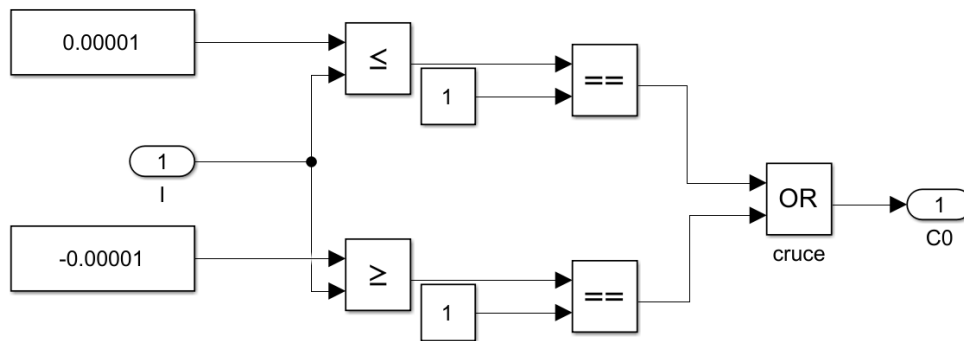


Figura 35. Condiciones lógicas para determinar el cruce por cero.

En este proceso se compara la señal de corriente con un valor aproximado a cero por la parte positiva y negativa sucesivamente, la rama superior del sistema visto en la Figura 35, determina el cruce por cero se encuentra en el semiciclo positivo, por ende, la línea inferior establece el cruce en el semiciclo negativo.

Cuando el parámetro de la variable establecida cuyo valor es aproximado a cero por la línea positiva es menor o igual al valor de la corriente medida, el bloque de comparación de la rama superior envía un 1 lógico, el cual llega a un bloque donde se compara si es igual a 1 , si esta condición se cumple este bloque envía un 1 lógico hacia la compuerta OR en donde se realiza la suma de las ramas superior e inferior, dado que la línea superior envía un 1 hacia la entrada de la compuerta, la fase inferior enviará un 0 indicando esto que el cruce por cero se dio en el semiciclo positivo, por esta razón, cuando la rama inferior envía un 1 lógico hacia la compuerta OR el cruce por cero se establece en el semiciclo negativo, como se muestra en las Figuras 36 y 37.

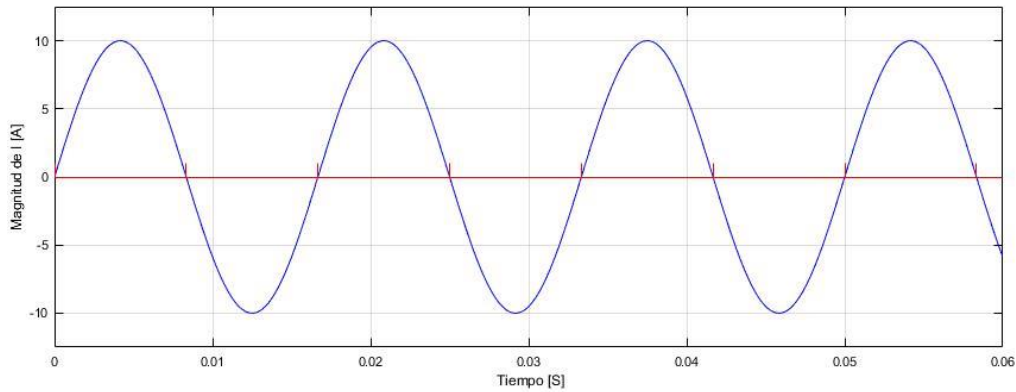


Figura 36. Pulsos de cruce por cero.

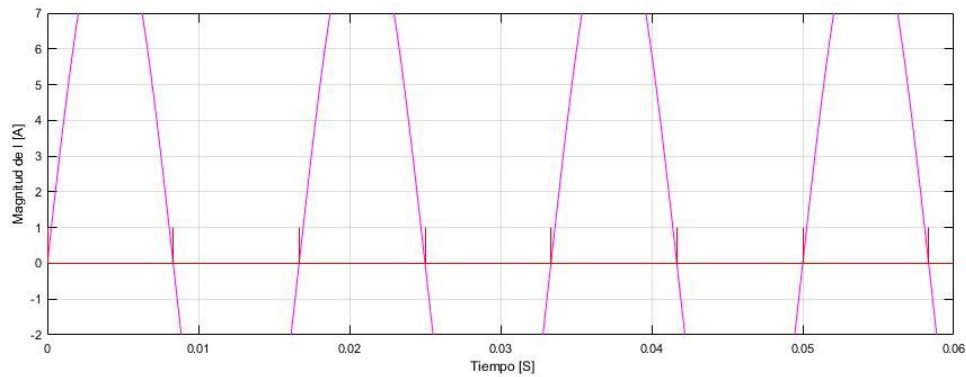


Figura 37. Ampliación de la onda de cruce por cero.

En las Figuras anteriores se observa el pulso que genera el detector de cruce por cero en cada semiciclo de la onda de corriente. Este pulso es enviado a un bloque switch que posee 3 entradas, la primera y tercera entrada se denominan ingreso de datos, la segunda es la entrada de control del bloque, en esta se establece el tipo de condición que permitirá al switch accionarse hacia la primera entrada o la segunda de acuerdo con el resultado de la condición establecida en la entrada de control con respecto al dato que recibe. En este caso la condición establecida en la entrada de control del switch es mayor o igual a cero, por otra parte, la primera entrada de dato se estableció como acción verdadera del condicional de la segunda entrada, mientras que la tercera entrada recibe la acción falsa de la condición de entrada.

La entrada de control del switch recibe el pulso generado por el detector de cruce por cero, este dato es enviado en valores lógicos 0 o 1, la primera entrada recibe

el tiempo de simulación proveniente de un bloque reloj que se encarga de medir el tiempo transcurrido en cada instante de la simulación, por último, la tercera entrada se conecta a la salida del switch la que a su vez está vinculada a un bloque memoria que se encarga de guardar los datos que recibe para ser utilizados cuando se requieran. Por lo tanto, cuando se genere un pulso en el detector de cruce por cero se enviará un 1 a la entrada de control de switch, este accionará la entrada verdadera guardando en la memoria el tiempo en el cual se generó el pulso, por ende, luego de que el pulso se extinga el dato que recibe la segunda entrada de switch será un 0 accionando así la tercera entrada del mismo ya que no se cumple la condición establecida, debido a que esta entrada se encuentra conectada a la salida el tiempo guardado en la memoria anteriormente se mantiene en ella hasta que exista un nuevo cruce por cero y el tiempo se actualice en la memoria, el tiempo guardado en esta memoria se llamará T_0 , este tiempo expresa el cambio de estado positivo a negativo en la onda de corriente, dato necesario para las siguientes etapas del control desarrollado. En la Figura 38, se observa el bloque condicional para obtener el tiempo T_0 .

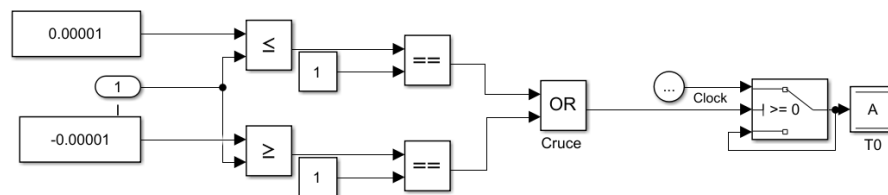


Figura 38. Condiciones lógicas para determinar el cruce por cero y condicional para obtener T_0 .

El tiempo T_0 es necesario para aplicar las condiciones de las siguientes etapas del control de disparo, por ende, debe ser guardado en una memoria de este modo se puede implementar en la siguiente etapa del sistema de control.

6.2 Tiempos de retardo y duración

Esta etapa es fundamental para el control de disparo de los tiristores debido a que el tiempo de retardo determina el instante en que debe generarse el disparo, mientras que el tiempo de duración expresa el lapso de duración que debe mantenerse dicho disparo, para obtener los valores exactos de estas variables se

desarrolla un bloque de cálculo utilizando la frecuencia del sistema y el ángulo de disparos, dos de las tres variables de entrada del sistema de control.

El bloque de cálculo implementa las siguientes ecuaciones para determinar el valor de los tiempos de retardo y duración respectivamente:

$$t_{retardo} = \frac{\alpha}{2\pi f} \quad (55)$$

Donde α es el ángulo de disparo cuyo valor es establecido por el diseñador teniendo en cuenta el funcionamiento del TCR y que puede ser variado sin afectar el funcionamiento del bloque, debido que este ajusta los cálculos cada vez que el ángulo es variado, f es la frecuencia real del sistema, este valor se obtiene al implementar un bloque PLL que mediante la comparación de fases determina la frecuencia real del sistemas, este se conecta a la etapa de tiempos para realizar los cálculos con la frecuencia real que se encuentra en la red.

Debido a que el tiempo en radianes de medio ciclo es igual a π y el ángulo de retardo se da en ambas secciones laterales de cada semiciclo, se obtiene la siguiente ecuación.

$$\beta = \pi - 2\alpha \quad (56)$$

Donde β es el ángulo de duración, por lo tanto, al remplazar el ángulo α de la ecuación 60 con β se obtiene el tiempo de duración del pulso.

$$t_{duración} = \frac{\beta}{2\pi f} = \frac{\pi - 2\alpha}{2\pi f} \quad (57)$$

Aplicando estas ecuaciones en un bloque de cálculo con las variables de entrada se obtienen los tiempos de retardo y de duración de los disparos. En la Figura 39, se observa el bloque de tiempos desarrollado.

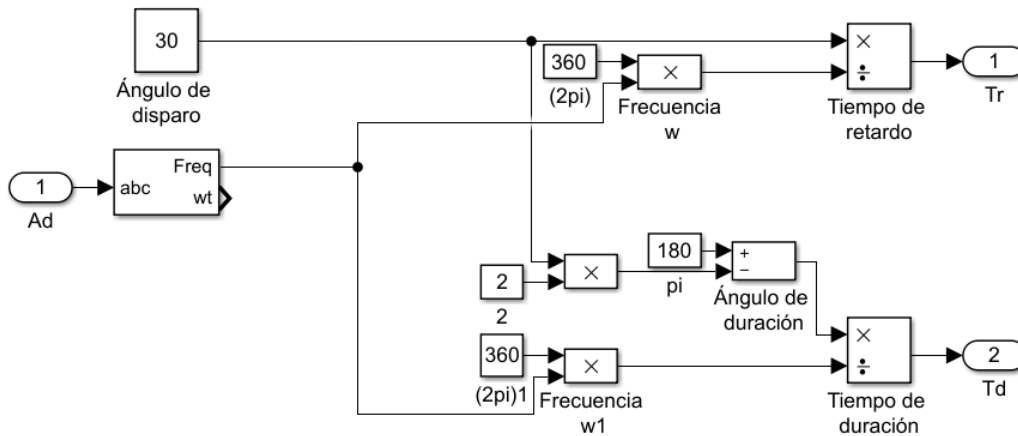


Figura 39. Cálculo de tiempos de retardo y duración de los disparos.

Para desarrollar los cálculos adecuadamente los valores de π y 2π , se utilizaron en grados en vez de radianes debido a que el valor del ángulo de disparo se encuentra en grados centígrados. Por otro parte, los tiempos se implementan en las condiciones de la última etapa del control la cual depende de estos para generar los disparos de los tiristores.

Por otra parte, el ángulo de disparo se puede variar en función del aporte de reactivos por parte del compensador hacia la red, cuando el ángulo de disparo es 0° el compensador no aporta reactivos a la red, esto implica que el inductor del TCR consume los reactivos aportados por el condensador fijo, por otra parte, el aporte máximo de reactivos se establece cuando el ángulo de disparo es 90° , en este punto el inductor se consume todos los reactivos de la red y permite que el condensador realice el aporte de estos reactivos a la red, por lo tanto, el ángulo se variará entre 0° - 90° en intervalos de 30° cada cierto tiempo con el fin de controlar el aporte de reactivos a la red, el tiempo establecido para la simulación es de 1 [s] esto permite establecer el tiempo para el cambio del ángulo de disparo en intervalos de 0.2 [s], esto permite pasar de 0° a 30° luego de 0.2 [s].

Para variar el ángulo de disparo se implementaron tres bloques step que permiten proporcionar un paso entre dos niveles definibles en un tiempo específico, cuando el tiempo de simulación es menor que el tiempo de paso establecido en este caso 0.2 [s], la salida del bloque es el valor inicial del mismo en este caso es de 0° por lo tanto, cuando el tiempo de simulación es mayor o igual al tiempo de paso, la

salida del bloque será el valor final determinado que para este caso es 30° los demás step se parametrizan con el mismo valor inicial y final, mientras que el tiempo de paso varia en intervalos de 0.2 [s], por lo tanto, el tiempo de paso del segundo step es de 0.4 [s] y en el tercer step el tiempo establecido es de 0.6 [s].

De acuerdo, con lo anterior al iniciar la simulación el valor del ángulo de disparo es 0° luego de transcurrido 0.2 segundos de simulación este ángulo pasa a ser 30° esta variación se genera solo en el primer step, el valor que el ángulo debe tener cuando el tiempo sea 0.4 segundos es 60° para lograr esto se emplea un bloque suma de tres entradas con el propósito de sumar los ángulos provenientes de cada step, por este motivo los tres bloque step poseen los mismo parámetros de inicio y final, así cuando el primer step envíe su valor final el segundo step envía valor inicial que es 0° la suma de estos dos parámetros sigue siendo 30° hasta llegar al tiempo 0.4 [s] en este momento el valor del segundo bloque es 30° que al sumar con el valor final del primer step dará la segunda variación del ángulo de disparo, este mismo proceso se realiza para obtener la última variación del ángulo que de acuerdo a los intervalos establecido sería 90° grado en el que se presenta el mayor aporte de reactivos por parte del compensador. Mediante este proceso se controla el aporte de reactivos del compensador. En la siguiente figura se puede observar el bloque para variar el ángulo de disparo.

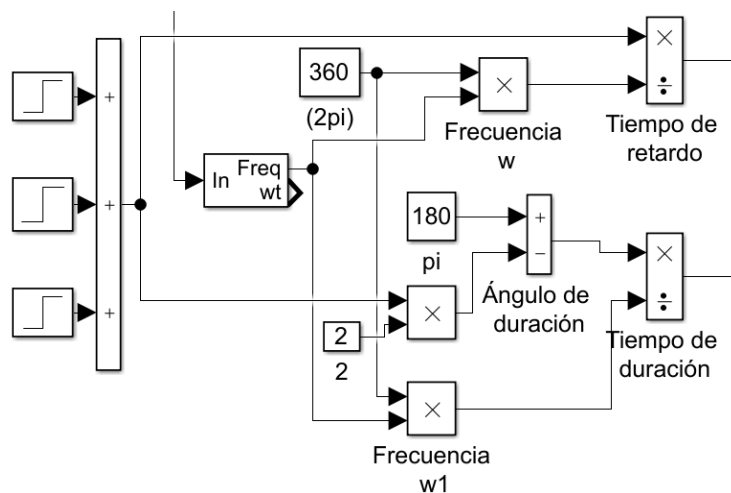


Figura 40. Variación de ángulos de disparos para la etapa de tiempos.

6.3 Control de cruce por cero de la onda de corriente

En la primera etapa vista con anterioridad se desarrolló un control de cruce por cero basado en la onda de corriente con el propósito de enviar pulsos a un bloque switch conectado a una memoria que guarda el tiempo cada vez que la onda cruza por cero, llamando a este tiempo T_0 , luego de esto se calcularon los tiempos de retardo y duración de los disparos, los cuales se implementarán en la etapa de generación de disparos, para disparar los tiristores es necesario que el control identifique cuando debe enviar el disparo al semiciclo positivo y cuando al negativo.

Para ello se debe identificar el cruce exacto en el que se encuentra la onda de corriente al momento que se cumplan las condiciones requeridas para enviar el disparo, ya que lo visto hasta el momento en las etapas anteriores no otorga al sistema dicho dato tan relevante para la actuación de los tiristores. Para obtener dicha condición se aplicó un control al cruce por cero, este se desarrolló derivando la onda de corriente y aplicando dos ramas condicionales para cada semiciclo como en la primera etapa.

El bloque en cargo de derivar la corriente medida está conectado en su salida a dos ramas compuestas por bloques switch que generan las condiciones para el semiciclo positivo y negativo respectivamente, la rama del semiciclo positivo inicia con un bloque mayor o igual a 0, mientras que para la fase del semiciclo negativo la señal derivada se compara con un bloque menor o igual a 0, por lo tanto, cuando el bloque derivativo envíe un valor mayor a 0 el condicional de la rama del semiciclo positivo enviará un 1 a la siguiente etapa del control y la rama contraria tendrá un 0 a la salida del primer comparador, estos valores llegan a la entrada de control de un switch en cada rama, la condición de control de este bloque es mayor o igual a cero, la primera entrada de estos bloques están conectados a una variable numérica de valor 1 y en la tercera entrada la variable es un 0, por lo tanto cuando la señal que llega a la entrada de control es un 1 como se expresaba anteriormente en la rama del semiciclo positivo, el interruptor se acciona en la función verdadera enviando así un 1 a la salida de este bloque, siguiendo con esto

en la fase del semiciclo negativo el interruptor acciona la función falsa y circula un 0 a la salida de este bloque, la salida de estos switch llegan a la primera entrada de otro switch en cada rama cuya entrada de control está conectada a las salida de la compuerta OR del detector de cruce por cero, mientras que la tercera entrada de este bloque está conectado a la salida del mismo, ya que este conecta con una memoria en su salida al igual que switch implementado en la primera etapa, por ende, en esta etapa se implementan dos memorias en las que se guardan los pulsos de cada semiciclo.

Si continuando con los valores generados por los switch anteriormente, en la rama positiva se encuentra un 1 que llega a la entrada de la función verdadera del último bloque condicional implementado en esta etapa, y en la primera entrada del switch de la rama negativa se encuentra un cero, por lo tanto, cuando el generador de cruce por cero envía un pulso a la entrada del bloque de cada rama llega un 1 accionado la función verdadera del mismo y enviando el valor que se encuentra en dicha entrada hacia la memoria ubicada en su salida, en este caso enviaría un uno a la memoria de la rama positiva y un cero al bloque retentivo de la rama negativa, por ende, se obtiene el signo del semiciclo de la onda de corriente que en este caso estaría en medio ciclo positivo, este valor es enviado a la última etapa en la cual se genera el disparo de los tiristores teniendo en cuenta en que semiciclo se realizó el cruce por cero detectado por la primera etapa. En el caso contrario del ejemplo utilizado para explicar el funcionamiento de esta etapa, se encontraría un 0 en la rama positiva y 1 en la fase negativa, esto significa que semiciclo en que se detectó en cruce por cero en el negativo. En la Figura 41, se observa el control desarrollado para el cruce por cero.

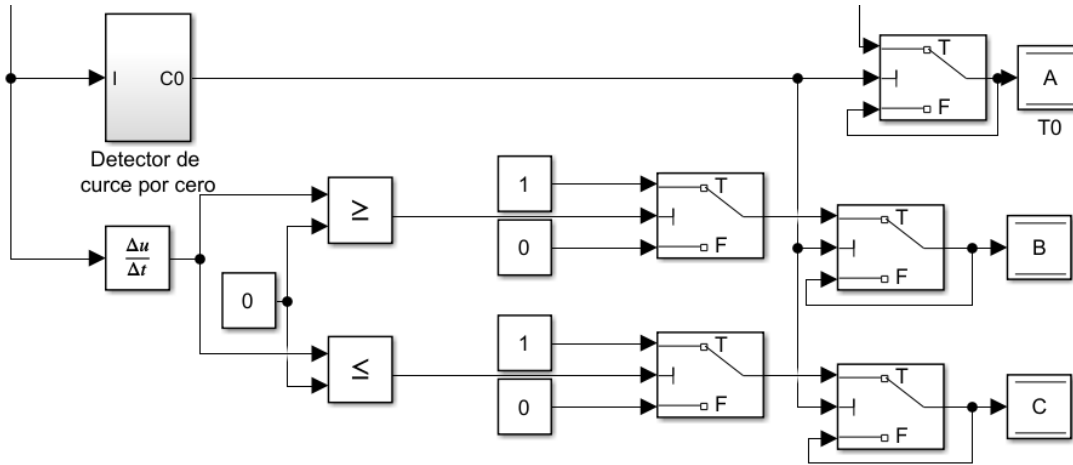


Figura 41. Control de cruce por cero.

Por otra parte, al simular el control las memorias implementas no poseen ningún dato guardado lo que pueden generar errores en su funcionamiento y limitar la simulación, por ende, no es posible que estas envíen un dato que no poseen aún por esto que se emplea un bloque delay que se encarga de generar un retardo en la salida del bloque, permitiendo esto obtener un valor guardado antes de empezar el aporte de las memorias hacia las etapas donde se requieren los datos que estas poseen en su remanencia, la aplicación de estos bloque se observan en la Figura 42, que se encuentra a continuación.

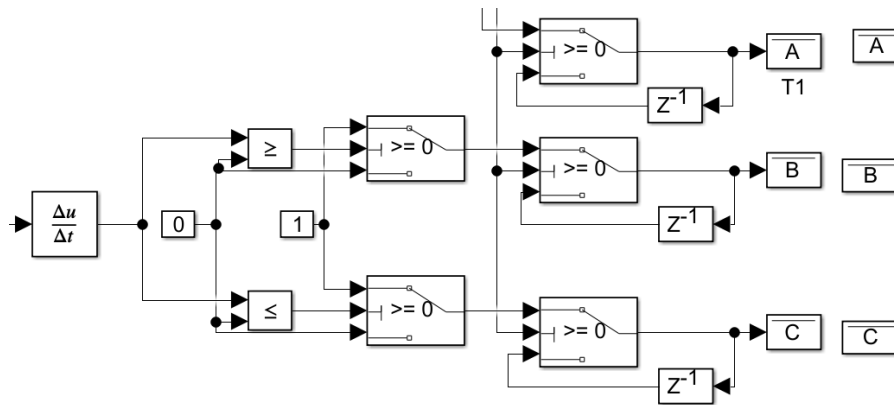


Figura 42. Implementación de bloques de retardo a las memorias.

6.4 Generador de disparos de los tiristores

Para generar los pulsos de disparo a los tiristores se deben cumplir una serie de condiciones lógicas que conforman la cuarta etapa del control de disparo. Esta cuenta con 5 datos de entrada provenientes de las secciones anteriores, estas

variables son el tiempo de duración, tiempo de retardo, pulso del semiciclo positivos del control de cruce por cero, pulso del semiciclo negativo del control de cruce por cero, el tiempo de la onda de simulación que se encuentra en el reloj implementado en la primera etapa y por último el tiempo T_0 .

En la primera fase de esta etapa se suman los tiempos T_0 y T_r , el resultado de esta adición llega a un bloque donde se compara si es mayor o iguala al tiempo del reloj de la primera etapa, si esta condición se cumple el bloque enviará un 1 lógico hacia una compuerta AND donde se multiplicará con el pulso guardado en la memoria del semiciclo positivo del control de cruce por cero y el valor enviado por la fase dos de esta cuarta etapa en la cual se suman los tres tiempos obtenidos (T_d , T_0 y T_r), estos al igual que en la primera fase llegan a un bloque donde se comparan con el tiempo del reloj y si este es menor o igual a dicha adición se enviara un 1 lógico a la compuerta AND, si los tres datos que llegan a la compuerta lógica son 1 se genera un disparo en el tiristor, permitiendo que este se accione y el inductor del TCR funcione durante el semiciclo positivo, debido a que al presentarse un 1 en la memoria del semiciclo positivo del control de cruce por cero en la memoria del semiciclo negativo existe un 0 por lo tanto, no se genera disparo en el semiciclo negativo ya que la corriente aún no ha cruzado hacia el umbral negativo de su eje, por consiguiente, cuando esta cruce hacia el lado negativo el disparo se genera es este lado, de este modo en TCR trabaja en ambos semiciclos de la onda sin interrupciones o cortes. En la Figura 43, se puede observar el generador de disparo para los tiristores.

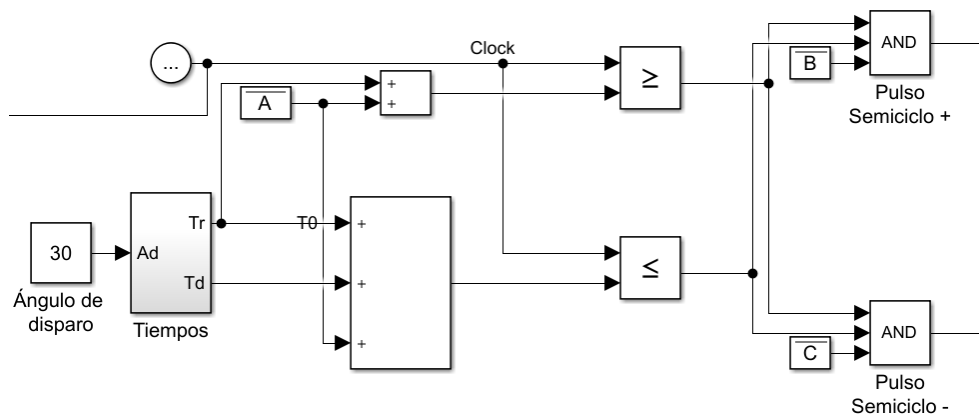


Figura 43. Generador de disparo de los tiristores.

Por otra parte, se requieren dos SCR's conectados en antiparalelo en el TCR para que este funcione en ambos semiciclos de la onda como se observó en la Figura 33, del capítulo anterior, para esto se tienen dos compuertas AND en esta etapa para que se genere el disparo de cada SCR, a amabas compuertas están conectadas las condiciones explicadas anteriormente, el determinante para el disparo en cada semiciclo es el pulso generado por el control de cruce por cero, que permite generar el disparo de un tiristor a la vez, cumpliendo la condición de una rama e impidiendo que la fase contraria genere disparo, sin antes cumplir con dicha condición, de este modo se controla el disparo de los tiristores en cada semiciclo de la onda como se puede observar en la Figura 44 y 45.

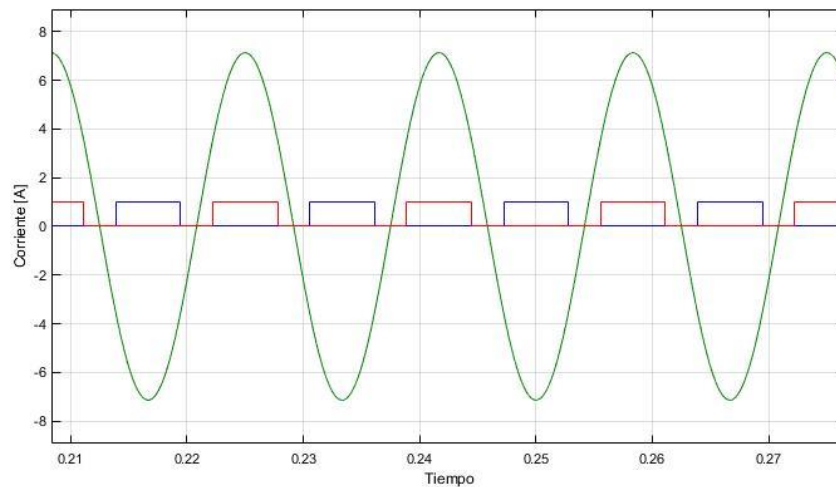


Figura 44. Disparos de tiristores y onda de corriente.

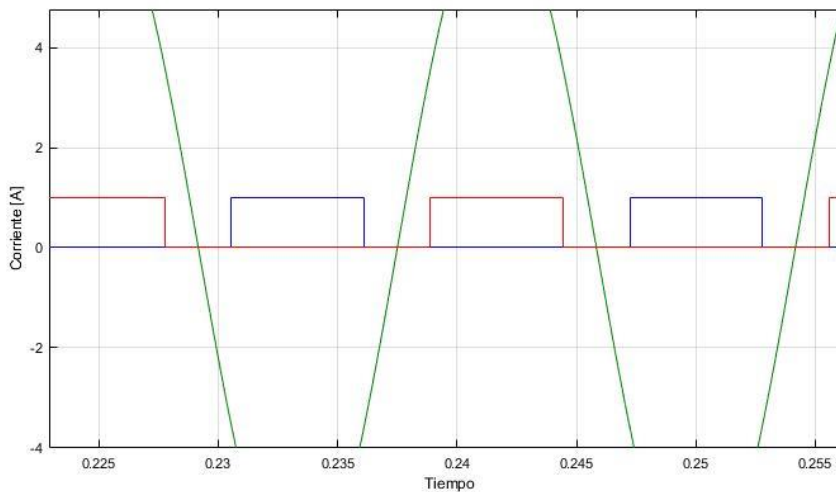


Figura 45. Amplitud de la onda de disparos de tiristores.

7. SIMULACIÓN DEL COMPENSADOR DE REACTIVOS

7.1 Funcionamiento del SVC controlado

Después de determinar la configuración del compensador y obtener los parámetros de los elementos pasivos que lo conforman, se conectó a este el control de disparo de los tiristores, para determinar el funcionamiento del mismo bajo el control del ángulo de disparo de los SCR's, para ello se planteó un sistema monofásico de prueba preliminar para determinar el comportamiento del SVC frente a el control diseñado para el disparo de los tiristores, este sistemas cuenta con una tensión de fase de 134.5 [v] que alimenta una carga RL de 15.6[KVA] cuya potencia reactiva es de 12[KVAr], con este sistema se observa el funcionamiento del compensador siendo controlado, en la Figura 46. Se puede observar el compensador controlado conectado a la red.

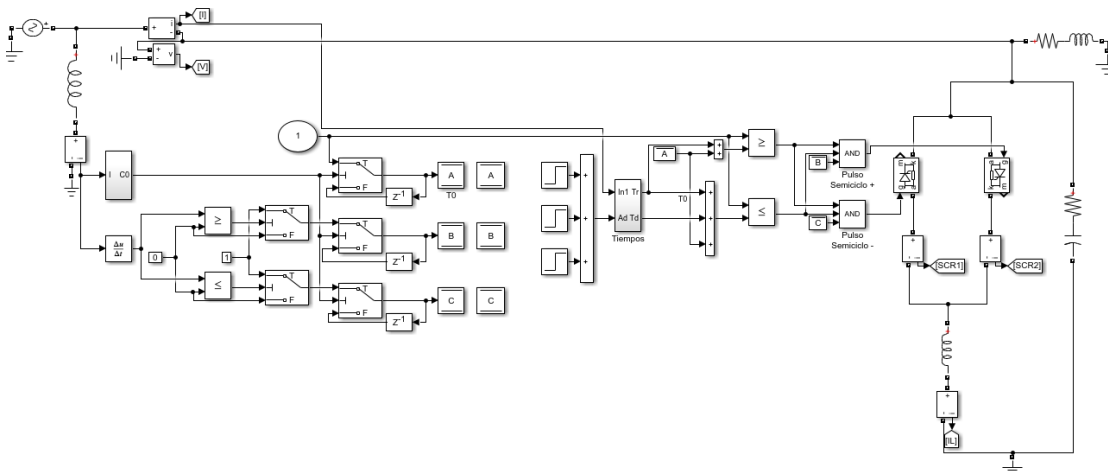


Figura 46. Conexión del SVC controlado a red monofásica.

El esquema de la Figura 46, se implementó solo con el fin de observar el comportamiento del SVC frente al control de disparo de tiristores desarrollado, por ende, no cuenta con el filtro diseñado y no se tomaron medidas de potencia activa o reactiva del sistema antes o después de conectar el compensador, los resultados que se determinaron de esta prueba son la corriente del inductor y los tiristores del TCR, aplicando los disparos generados por el control. La corriente del inductor en esta prueba se visualiza a continuación en la Figura 47.

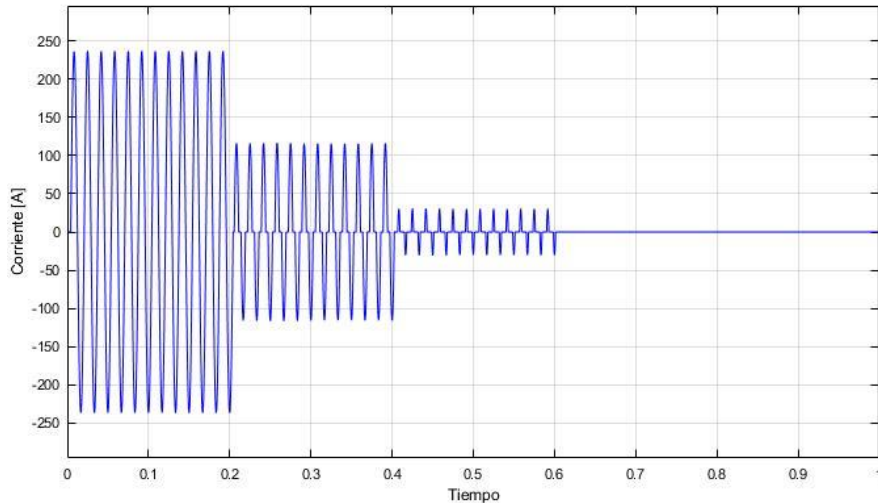


Figura 47. Corriente del inductor del TCR.

En la figura anterior se observa el cambio que presenta la corriente del inductor cuando varía el ángulo de disparo, cuando este es cero no existe aporte de reactivos por parte del compensador, por lo tanto, el reactor consume los reactivos generados por el FC, por ende, la corriente no presenta cambios en su amplitud, el caso contrario ocurre cuando el ángulo es 30° en este punto inicia el aporte de reactivos del compensador por parte del condensador fijo, esto ocasiona que el inductor consuma los reactivos de la red, es por eso que la amplitud de corriente en el inductor disminuye y presenta un intervalo de tiempo en el que está es 0 [A], este intervalo en el que la corriente es cero se debe al tiempo de retardo antes del disparo del tiristor, luego de esto existe la conducción durante el tiempo de duración, de este modo funcionará el TCR frente al control de accionamiento de los SCR.

En el capítulo anterior se establecieron los ángulos de disparos que se aplicaran al control de los SCR mediante step, estos realizan un incremento del ángulo en intervalos de 30° , partiendo desde 0° punto en el que no se realiza aporte de reactivos hasta 90° donde se genera el máximo aporte de reactivos, el cambio de ángulos se desarrolla en intervalos de tiempo de 0.2[s], partiendo de 0 [s] en ángulo de 0° e incrementando a 30° en el tiempo 0.2 [s], hasta llegar a 90° en un tiempo de 0.6 [s] al llegar a este ángulo el sistema se estabiliza en la conducción máxima de aporte de reactivos hasta que el sistema deje de requerir dicho aporte.

La variación de la corriente en función del tiempo, con dependencia del ángulo de disparo se puede visualizar con mayor precisión en la Figura 48.

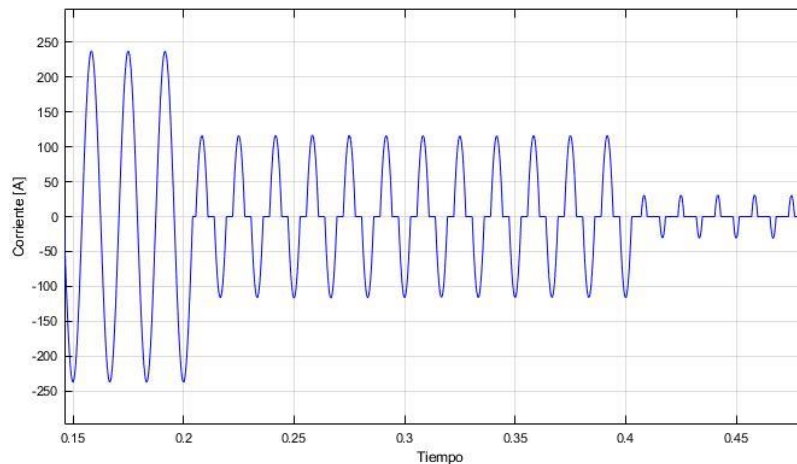


Figura 48. Variación de la corriente del inductor al modificar el ángulo de disparo.

7.2 Sintonización del controlador

Anteriormente, se instaló el compensador estático en un sistema monofásico para determinar su comportamiento frente al accionamiento de los tiristores realizado por el control de disparo, demostrando el TCR-FC que actúa adecuadamente en el aporte de reactivos en base a los disparos de los SCR incrementando o disminuyendo el aporte de reactivos en base al ángulo establecido en el control, sin embargo, este no garantiza la corrección del factor de potencia debió a que el compensador siempre estará aportando reactivos dependiendo la variación de los tres ángulos planteados desde 0° - 90° este aporte a la red sin control no garantiza que el compensador inyecte los reactivos requeridos por el sistemas, para solucionar esta falencia se desarrolla un controlador proporcional integral derivativo que envía la potencia requerida hacia un bloque de cálculo que determina el ángulo de disparo para que el compensador aporte la potencia pedida establecida por el controlador, este determina dicha potencia con base al error proveniente de la comparación de la potencia reactiva de la carga y del compensador, el controlador garantiza que el compensador aporte los reactivos necesarios a la carga para corregir el factor de potencia y la tensión de la red. Este control se observa en la Figura 49.

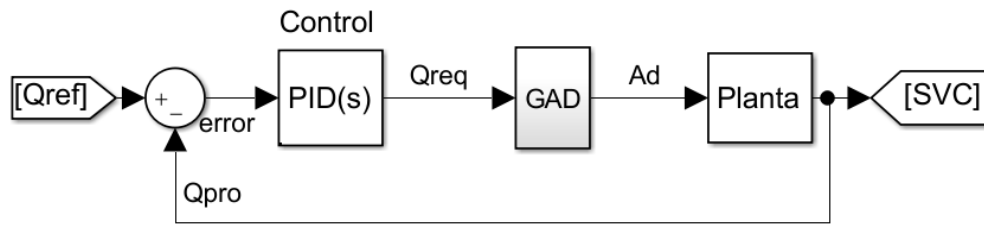


Figura 49. Controlador diseñado para SVC.

En la figura anterior se observa en controlador diseñado para mantener el aporte necesario de reactivos a la red por parte del compensador, la potencia de referencia del control es la Q de la carga esta se compara con la Q del compensador, mediante este proceso se determina el error mediante la siguiente ecuación:

$$error = Qref - Qpro \quad (58)$$

La señal de error es la entrada del controlador, este expresa la potencia necesaria que debe aportar el compensador para igualar los reactivos que requiere la carga, cuando el valor de esta señal cero el SVC se encuentra aportado la potencia reactiva necesaria para suplir la demanda de reactivos de la carga. Esta señal ingresa al controlador el cual se encarga de determinar la potencia necesaria para obtener el ángulo en el cual el compensador a portará los reactivos necesarios para que el error se cero, este proceso se explicará a continuación.

7.2.1 Calculador de ángulos

El control de disparo de los SCR depende del ángulo establecido para variar el aporte de reactivos del compensador, esto es útil para determinar el punto de máximo aporte de reactivos, sin embargo, el control debe poseer la capacidad de determinar el ángulo necesario para aportar los reactivos que requiera el sistema en diferentes escenarios, para lograr esto se utiliza la ecuación de la recta para dos puntos con esta se determina el ángulo de disparo con respecto a una potencia específica mediante el siguiente procedimiento.

$$y - y_1 = m(x - x_1) \quad (59)$$

Donde y es el ángulo deseado, y_1 es el ángulo donde el compensador genera el aporte máximo de reactivos, x es la potencia deseada y x_1 es la potencia máxima que puede aportar el compensador.

Para establecer la función que se utilizara para encontrar el ángulo con base en una potencia especifica se calcula el valor de m por medio de la siguiente ecuación:

$$m = \frac{y - y_1}{x - x_1} \quad (60)$$

Debido a que el compensador se diseñó para un aporte máximo de reactivos de 48000 KVAR y gracias a las pruebas realizadas se sabe que el SVC realiza el aporte máximo en un ángulo de 90° por lo tanto, se puede encontrar el valor de m reemplazando estos datos en la ecuación 64.

$$m = \frac{0 - 90}{0 - 48000} = 0.00188$$

Luego de obtener este valor se despeja (y) de la ecuación 63, y se reemplazan los valores fijos en la nueva ecuación desarrollada.

$$y = 0.00188(x - 48000) + 90$$

Con la ecuación 65, se puede obtener el ángulo con respecto a una potencia especifica como se observa en el siguiente ejemplo.

$$y = 0.00188(20000 - 48000) + 90 = 37,36^\circ$$

En el ejemplo anterior se determinó el ángulo de disparo para que el compensador genere una potencia reactiva de 20 KVAR. Esta ecuación es ubicada en la entrada del bloque de tiempos en el control de disparo de los SCR, para establecer los

ángulos necesarios para suplir los reactivos requeridos por el sistema. Este proceso se observa en la Figura 50.

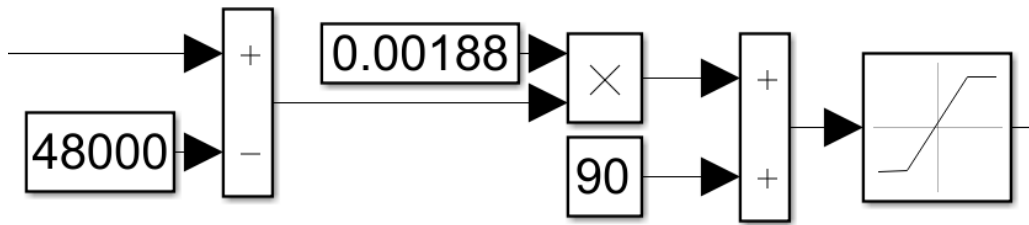


Figura 50. Ecuación en bloque para calcular ángulos.

Para sintonizar el controlador se debe simular el sistema con el proceso deseado y obtener los parámetros que este debe tener, el controlador deseado debe comparar la potencia reactiva de la carga con la del compensador y determinar el ángulo de disparo para que el resultado de dicha comparación sea cero, lo que significa que el compensador aporta los reactivos necesarios para suplir la demanda de la carga. Por lo tanto, el controlador envía una variable modificada al bloque que calcula los ángulos de disparo, en este caso dicha variable sería la potencia necesaria para que el error que se encuentra en su entrada sea cero y este se encargue de encontrar el ángulo con preciso. Para obtener este controlador es necesario determinar la respuesta del sistema al variar los ángulos con base al incremento de potencias, para ello se implementan una serie de step que se encargaran de incrementar la potencia reactiva en tiempos específicos, estos se conectarán a la entrada del bloque calculador de ángulos para controlar el aporte de reactivos por parte del compensador en cada incremento de potencia, el bloque desarrollado se observa en la Figura 51.

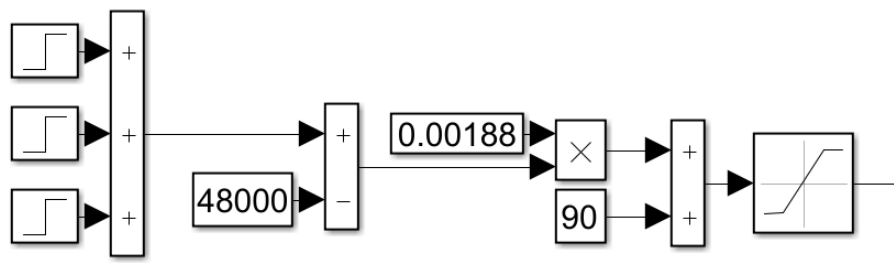


Figura 51. Conexión de los step al calculador de ángulos.

El bloque ubicado a la salida del calculador de ángulos impone límites superiores e inferiores de la señal de entrada, esto impide que el valor del ángulo calculado supere los valores establecidos en este bloque, al realizar esto se impide que el ángulo determinado se encuentre por encima de 90° ya que en este punto el compensador aporta su capacidad máxima de reactivos y enviar un ángulo superior a este al bloque de tiempos generaría un mal funcionamiento en el compensador, este caso también se presenta en el límite inferior debido a que un ángulo inferior a 0° no tendría sentido para el compensador, por lo tanto, se implementa el bloque de saturación y establecer estos límites.

Debido a que el resultado de este proceso solo se necesita para sintonizar el controlador, no se observará el comportamiento del SVC durante esta simulación, sin embargo, el comportamiento del sistema en este proceso se observa en el apartado donde se detalla el proceso desarrollado para la sintonización del controlador.

7.2.2 Determinación del controlador PID

Para determinar los parámetros del controlador se implementan dos bloques llamados To Workspace, este bloque se conecta en la entrada o salida de una señal y guarda los datos de dicha señal en un espacio de trabajo, estos datos pueden ser utilizados una vez finalizada la simulación mediante la introducción de una función en el Command Window de Matlab, a estos bloques se le otorgan los nombres de in el cual se conecta a la salida de la sumatoria de los step ubicados en la entrada del calculador de ángulos, y out que se ubica en la salida del bloque de medición de la potencia reactiva del compensador, realizando este proceso se obtienen los datos de la potencia reactiva aportada por el compensador en base a los ángulos de disparos introducidos dependiendo la potencia que se requiera. En la siguiente figura se muestra la conexión del bloque in.

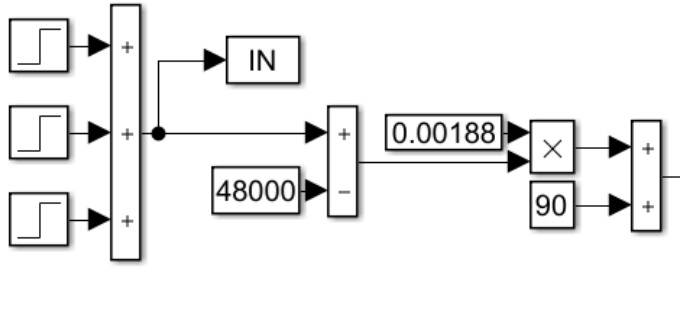


Figura 52. Ubicación del To Workspace IN.

Luego de realizar la simulación del sistema con estos bloques se cargan los datos guardados en los bloques añadidos, esto se realiza con el propósito de obtener la función de transferencia del sistema, el proceso para obtener dicha función de transferencia se realiza en 2 partes diferentes que se explican a continuación.

1. Carga de los datos guardados

Para cargar los datos guardados por los bloques in y out, se establece la función que cargara dichos resultados en la ventana de comandos de Matlab, luego de crear dicha función se inicia la simulación para guardar los datos deseados, para ser llamados, como se muestra en las siguientes figuras.

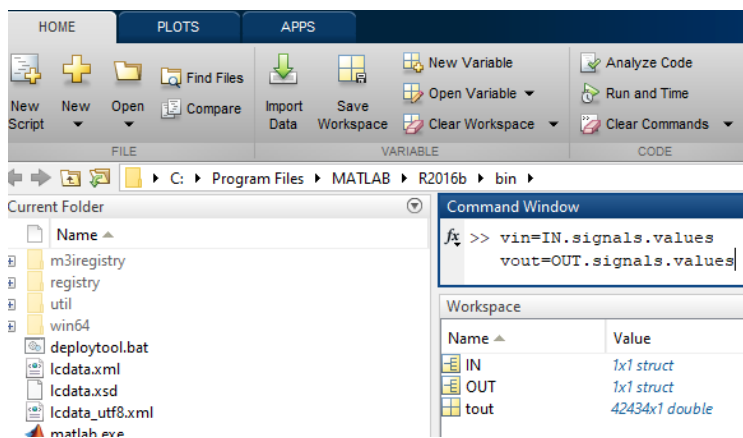


Figura 53. Datos guardados de la simulación y función para cargar los datos.

Después de obtener los datos guardados se cargan mediante la función establecida y se introduce la acción ident que permite abrir la función system Identification en donde se puede obtener la función de transferencia.

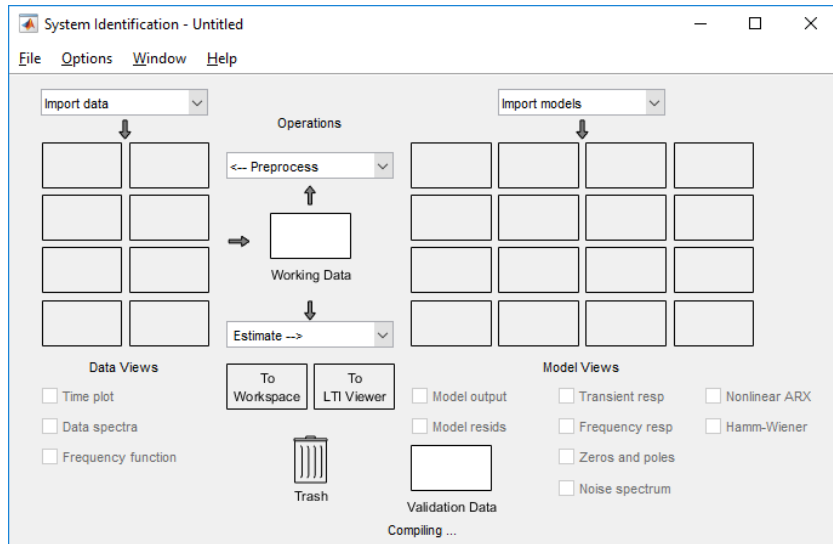


Figura 54. Ventana system Identification.

2. Obtención de la función de transferencia

En esta ventana se cargan los datos en función del tiempo introduciendo las variables establecidas en la función utilizada para cargar los datos guardados en la simulación y se obtiene la respuesta del sistema como se muestra a continuación.

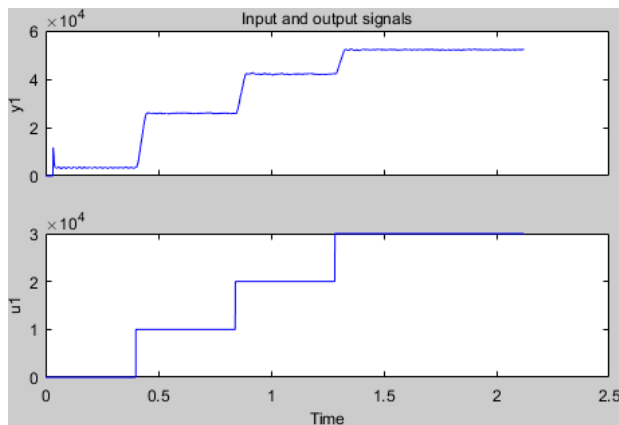


Figura 55. respuesta del sistema a la petición de reactivos.

En la Figura 55, se muestra la respuesta del sistema cuando se varia el ángulo en función de la potencia reactiva deseada, obteniendo esta respuesta se obtiene la función de transferencia del sistema, esta se observa en la Figura 56.

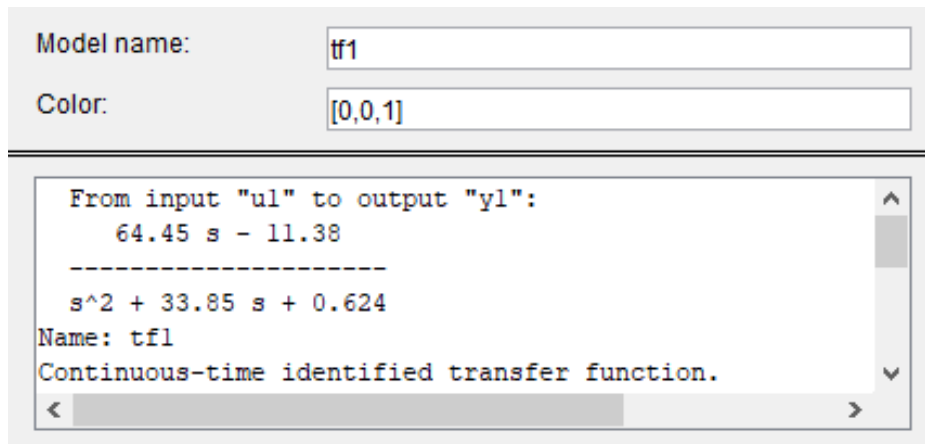


Figura 56. Función de transferencia del sistema.

Con la función de transferencia obtenida se puede sintonizar el controlador PID implementando este en un sistema de lazo cerrado conformado por un bloque con la función de transferencia obtenida, el bloque PID y un step en la entrada del sistema, este se puede observar en la siguiente Figura 57.

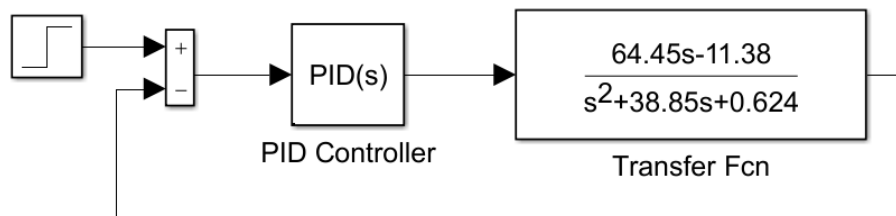


Figura 57. Proceso de sintonización del PID.

Luego de implementar este sistema de lazo cerrado se abre el controlador con el fin de sintonizarlo mediante su función automática este determina los parámetros requeridos para el controlador con base a la función de transferencia y el valor del error en su entrada, los valores de las constantes proporcional, integral y derivativa del controlador se observan en la Figura 58.

Controller: PID Form: Parallel

Time domain:

Continuous-time
 Discrete-time

Main PID Advanced Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: internal

Proportional (P): 0.637355594378335

Integral (I): 48.6828695191766

Derivative (D): 0.00180495519812959

Filter coefficient (N): 1095.31785983224

Tune...

Figura 58. Parámetros del controlador PID.

Después de sintonizar el controlador se instala este en el sistema de control de disparo de los SCR, reemplazando los step conectados anteriormente y retroalimentándolo con la potencia reactiva del compensador y comparándola con la potencia reactiva de la carga, el error proveniente de esta comparación ingresa al controlador y este se encarga de determinar la potencia requerida para que este error se cero, el controlador posee parámetros en las constantes proporcional, integral y derivativo, la primera representa la proporción de la variable controlada con respecto al error, es decir, que el valor del error se multiplica con la constante proporcional (k_p) con el fin de obtener una variable que aproxime el valor del error a cero, sin embargo, esta acción no puede lograr que el error se cero por sí misma, es por esto, que la existe la acción integral cuyo propósito es disminuir y eliminar el error en estado estacionario, este controla actúa cuando existe un desviación entre la variable manipulada y el punto de referencia, integrando este error en el tiempo y multiplicándolo por la variable integral (k_i) y posteriormente sumarlo a la acción proporcional formando así el control PI, eliminando el error en estacionario y obteniendo una respuesta estable en el sistema, sin embargo, este la adición de la función integral a la proporcional ocasiona que el control del sistema sea más lento, por esto se incorpora al control la acción derivativa cuya función es mantener el error en un valor mínimo, esto lo realiza corrigiéndolo

proporcionalmente con la misma velocidad con la que se genera, evitando así que este se incremente, derivando el error con respecto al tiempo y multiplicándolo por la constante derivativa (k_d) para después sumarlo a las señales del PI se completa el controlador, eliminando el error y corrigiendo la velocidad del control. Por otra parte, se obtiene el valor de un filtro que mitiga el ruido producido por la función derivativa impidiendo este que interfiera en la función del controlador y que se propague al sistema.

El controlador PID es un cálculo matemático por lo que la variable modificada que este envía a la planta de proceso en este caso el control de disparo de los tiristores y posteriormente al SVC es un valor número, el parámetro calculado por el controlador diseñado es la potencia necesaria para suplir la demanda de la carga que es el set point del sistema de control implementado, esta potencia llega al calculador de ángulos donde se determina el grado de disparo de los tiristores para que el compensador inyecte los reactivos necesarios para suplir la demanda de la carga, esta configuración se observa en la Figura 59.

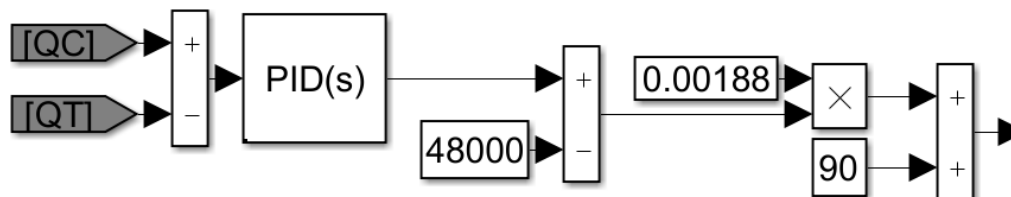


Figura 59. Control de potencia reactiva del SVC.

Esto permite controlar el aporte de reactivos del compensador con respecto a la demanda de la carga conectada al sistema. El proceso desarrollado para sintonizar el controlador se explica a detalle en los anexos a final del documento. Por otra parte, el funcionamiento del SVC con el controlador se observará en los resultados de las pruebas aplicadas al compensador.

7.3 Sistema eléctrico del bloque SB de la Universidad de Pamplona

Luego de comprobar el funcionamiento del compensador controlando la acción de los SCR mediante la variación del ángulo de disparo en una red monofásica, y sintonizar el PID para controlar el aporte de reactivos en función de la carga que ingrese a la red, se implementa un sistema trifásico que emula la instalación del bloque Simón Bolívar (SB) de la Universidad de Pamplona ya que este posee un consumo de reactivos elevado y cuenta con un banco de condensadores fijos para suplir esta demanda de reactivos, sin embargo, el aporte de potencia reactiva por parte de los condensador instalados no posee ningún control, esto ha ocasionado un incremento de la tensión del sistema y una disminución del factor de potencia en modo capacitivo debido al aporte excesivo de reactivos hacía la red del bloque SB.

Por lo anterior, se modela el sistema eléctrico del SB y se instala a este el compensador de reactivos diseñado, con el propósito de analizar el comportamiento del SVC controlado en una red con alta demanda de reactivos y a su vez, presentar una solución al problema presente en la instalación ocasionada por un compensador de reactivos que carece de un control en el aporte de reactivos.

El sistema modelado cuenta con un transformador que posee una potencia nominal de 80 [Kva] y sus tensiones son 13.8[Kv] primaria y 220[v] secundaria, la carga conectada a la red cuenta con una potencia nominal de 60 [Kva] con factor de potencia de 0.6, la tensión de trabajo de esta carga es de 220 [v] de línea y su consumo de potencia reactiva y activa es de 48 [Kvar] y 36 [Kw] respectivamente.

Para corregir el factor de potencia de esta carga el sistema cuenta con un banco de condensadores, sin embargo, la tensión que circula en la instalación del SB es de 233 [v], mientras que el factor de potencia se encuentra en el lado capacitivo y su valor es de 0.6, esto se debe al aporte de reactivos de los condensadores ya que no poseen un control adecuado para evitar la sobrecompensación de reactivos, esto ocasiona que no exista solución al bajo factor de potencia por la

demanda de reactivos de la carga, por esta razón se instala el SVC diseñado y se analiza el comportamiento del sistema con un aporte de reactivos controlado. El sistema eléctrico del SB se puede observar en la Figura 60.

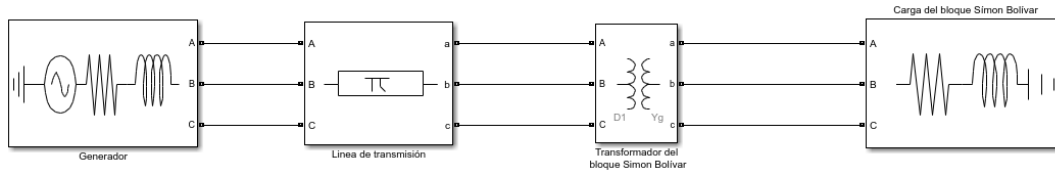


Figura 60. Sistema eléctrico de potencia del SB.

El modelado del sistema cuenta con el generador como alimentación y por efectos de simulación se añadió una línea de transmisión para la energización del transformador del SB.

7.4 Simulación de la red del SB sin compensador de reactivos

Para analizar el comportamiento del SVC conectado a la red del bloque SB se realiza la simulación del sistema eléctrico de la edificación a estudiar, esto con el propósito de conocer el funcionamiento del sistema frente a la demanda de reactivos de la carga, los resultados de esta simulación se presentan la Figura 61.

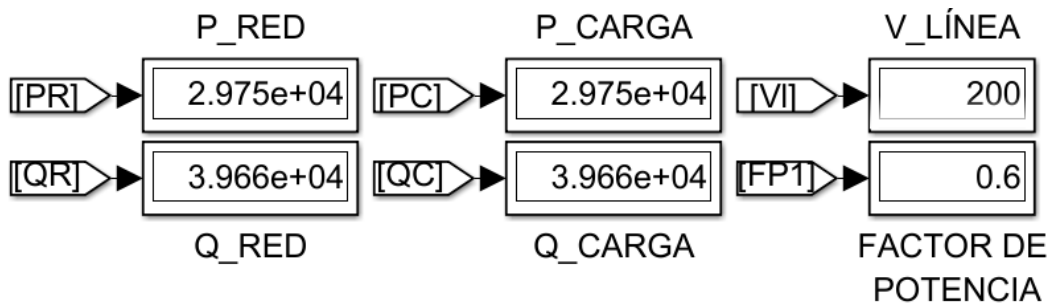


Figura 61. Valores de potencias, tensión y factor de potencia del sistema eléctrico del SB.

En la figura anterior se muestran los resultados de potencia reactiva y factor de potencia, en esta se observa que el valor de reactivos en la red es muy elevado y el factor de potencia se encuentra por debajo de los límites, lo que ocasiona que el nivel tensión disminuya esto significa que la corriente del sistema se encuentra por encima del valor nominal. Los resultados de las potencias del sistema se observan en la Figura 62.

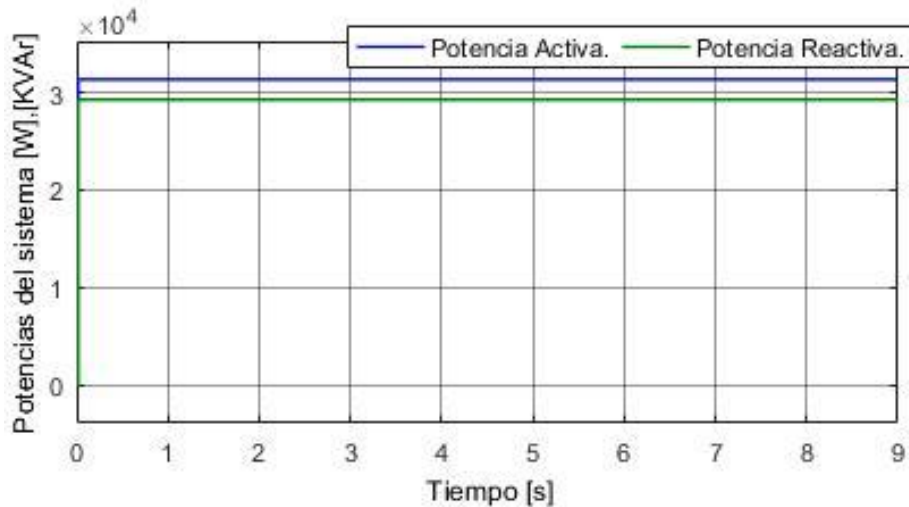


Figura 62. Potencias del sistema.

El aporte de reactivos por parte de la red para suplir la demanda de la carga es muy elevado como se observa en la Figura 62. El factor de potencia se ve afectado debido a que los reactivos que consume la carga son aportados por la red, desestabilizando los niveles nominales de tensiones y corrientes del sistema, por esto se instalan compensadores que aporten los reactivos que requieran las cargas, evitando estos el incremento de las corrientes y la disminución las tensiones en las redes, lo que conlleva a la corrección del factor de potencia. Antes de conectar el compensador diseñado en leste sistemas se deben realizar algunas variaciones en su diseño debido a que la red es trifásica, mientras que el diseño del compensador y el control del mismo sea presentado de manera monofásica, por lo tanto, es necesario realizar algunas variantes para conectar el SVC a un sistema trifásico, estas modificaciones se explican en el siguiente apartado.

7.5 Configuración trifásica del compensador

El compensador se diseñó para sistemas de baja tensión con el fin de poder realizar compensación trifásica o monofásica por igual, ya sea conectando el SVC directamente a la red trifásica para compensar de tal manera o realizar la compensación por fase en una red de tres fases, al conectarlo en un sistema trifásico este posee dos métodos de configuración entre compensadores, la

conexión delta que permite mitigar las corrientes armónicas de tercer orden y la conexión estrella que permite mayor flexibilidad de conexión a la red, en este caso se optó por conectar los FC-TCR en estrella debido a que ya se cuenta con un filtro para eliminar el tercer armónico. El resultado de esta conexión se visualiza en la Figura 63.

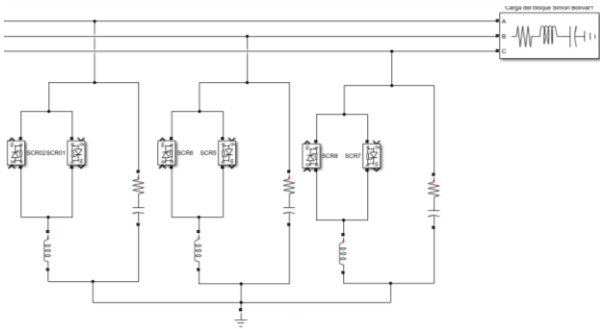


Figura 63. Conexión trifásica del compensador FC-TCR.

La conexión estrella es muy parecida a una compensación monofásica debido a que cada compensador está conectado entre línea y tierra, por ende, se demuestra que el dispositivo funciona de manera monofásica o trifásica por igual, a esta instalación se agrega el banco de filtros que se conecta en cada fase de la red para mitigar los armónicos de 3, 5 y 7 orden generados por los TCR y presentes en la red, con la conexión de los filtros al sistema este queda como se muestra en la Figura 64.

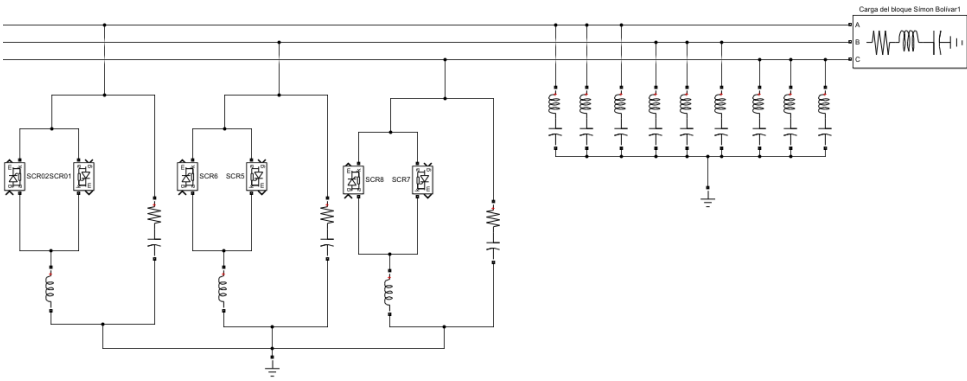


Figura 64. SVC trifásico con filtro para armónicos conectado a la red.

Los filtros se conectan cerca a la carga debido a que estos consumen reactivos y al realizar la medición de las potencias consumidas por la carga los reactivos

consumidos por los reactores del filtro harán parte de la potencia que el compensador aportará.

7.6 Control de disparo trifásico

Anteriormente se explicó el funcionamiento detallado del control de disparo de los tiristores desglosando cada una de las etapas que lo conforman, de acuerdo con su diseño este debe estar conectado a la misma fase que el compensador para así funcionar con la misma corriente que alimenta al FC-TCR, por lo tanto, la instalación del compensador en un sistema trifásico implica que el control debe replicarse para las dos fases siguientes, censando las corrientes de cada fase a la que se conecta el compensador que este controla, para ello no es necesario implementar los tres controles idénticos debido a que algunos parámetros son variables fijas que pueden ser conectadas de forma distribuida en los tres sistemas esto se puede observar en la Figura 65.

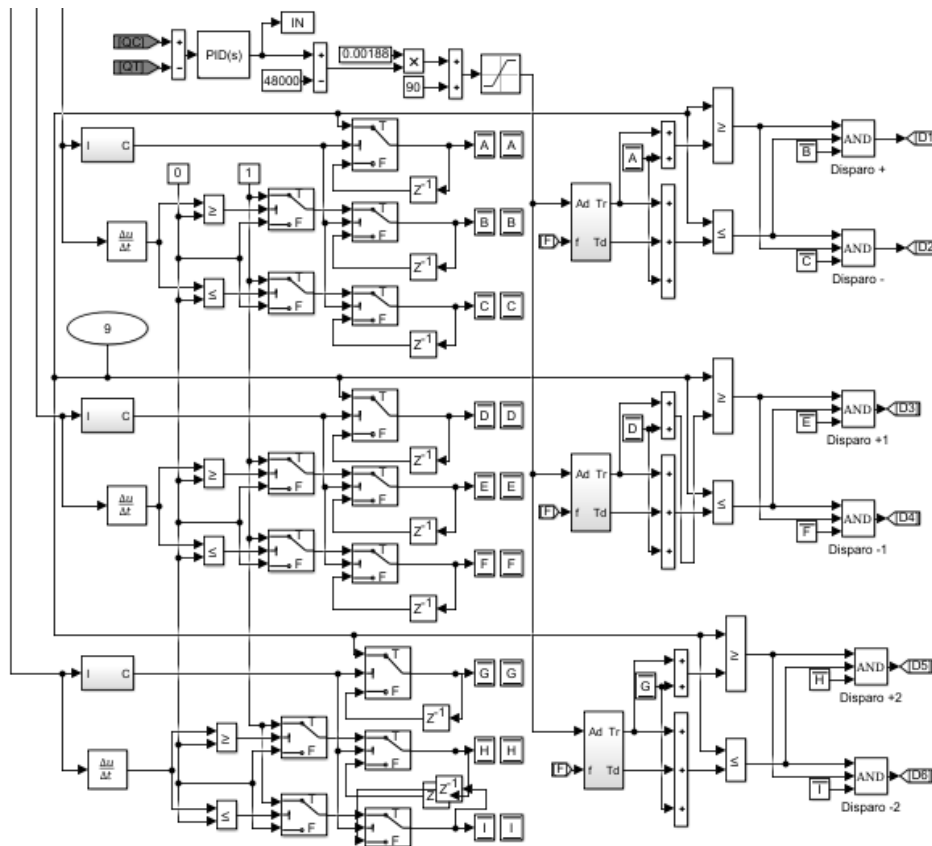


Figura 65. Control de disparo para un compensador trifásico.

En esta figura se observa que el tiempo del reloj de simulación es el mismo para cada sistema al igual que las variables 0 y 1, utilizadas para las condiciones del control de cruce por cero de la onda de corriente, estas se conectan a cada control debido a que dichas variables son fijas y no dependen de la fase a la que se conecta el sistema, por ende, no presenta errores en su funcionamiento. Por otra parte, el controlador diseñado para determinar el ángulo necesario para suplir la demanda de la carga es el mismo en cada sistema de disparo, por lo que se conecta en la entrada del bloque de tiempos de cada generador de disparo, los demás elementos de este control no son independientes o fijos ya que requieren de alguna forma la presencia de la corriente de la red. En la Figura 66, se observa la conexión de los elementos no dependientes de la corriente hacia cada control.

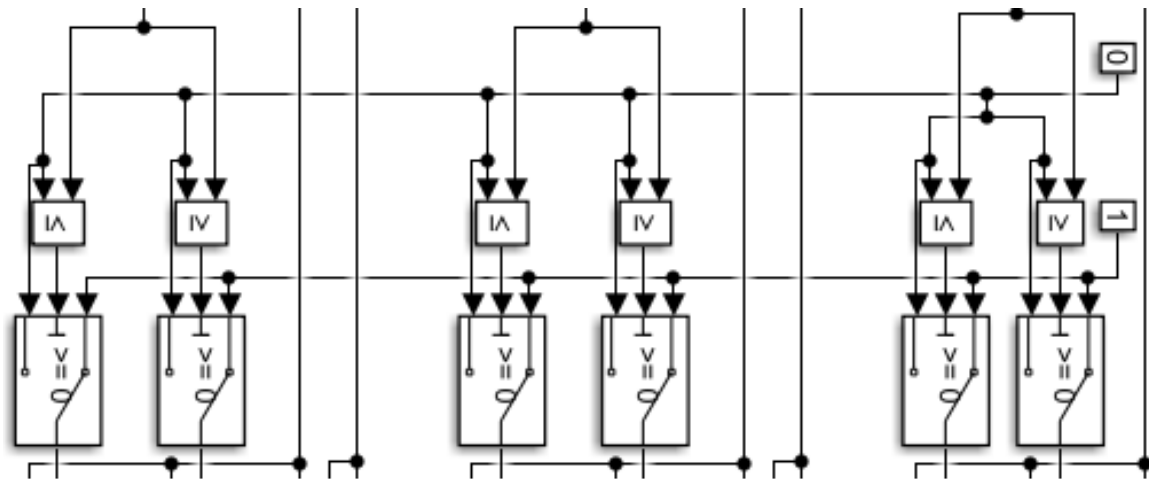


Figura 66. Conexión de las variables fijas a cada control.

En la figura anterior se observa la conexión de las variables fijas al control de cruce por cero de cada control de disparo, la conexión del controlador para obtener los ángulos de disparo a los subsistemas de tiempos de cada generador de disparo se percibe en la Figura 67.

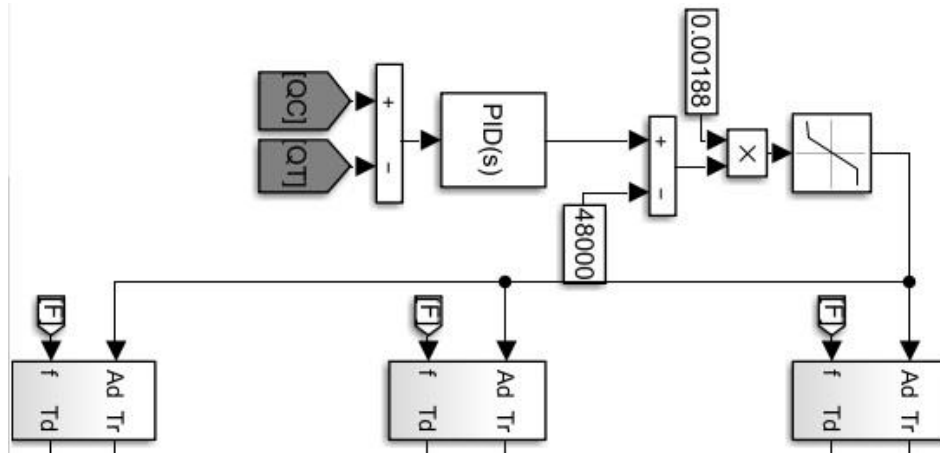


Figura 67. Conexión del controlador y calculador de ángulos al bloque de tiempo de cada sistema.

Los cambios que presenta la instalación del control de disparo de los tiristores en un sistema trifásico son imperceptibles ya que el control se mantiene exactamente igual con la diferencia que las variables fijas no dependientes de la corriente, se conectan a los tres controles sin replicarlas. De este modo se realiza el disparo de los tiristores en un sistema trifásico.

7.7 Conexión del compensador en un sistema trifásico

Al principio se diseñó el compensador y control para un sistema monofásico, este fue probado para determinar su funcionamiento en una prueba preliminar donde se instaló el SVC a una red monofásica, luego se configuró el control de disparo para conectarlo al compensador instalado en un sistema trifásico, este se conectó a una red que emula la instalación de bloque SB de la Universidad de Pamplona, esta instalación posee un bajo factor de potencia que afecta la tensión del sistema. Por este motivo se estableció esta instalación para probar el comportamiento del compensador diseñado. El modelado de este sistema con la conexión del compensador desarrollado se puede observar en la Figura 68.

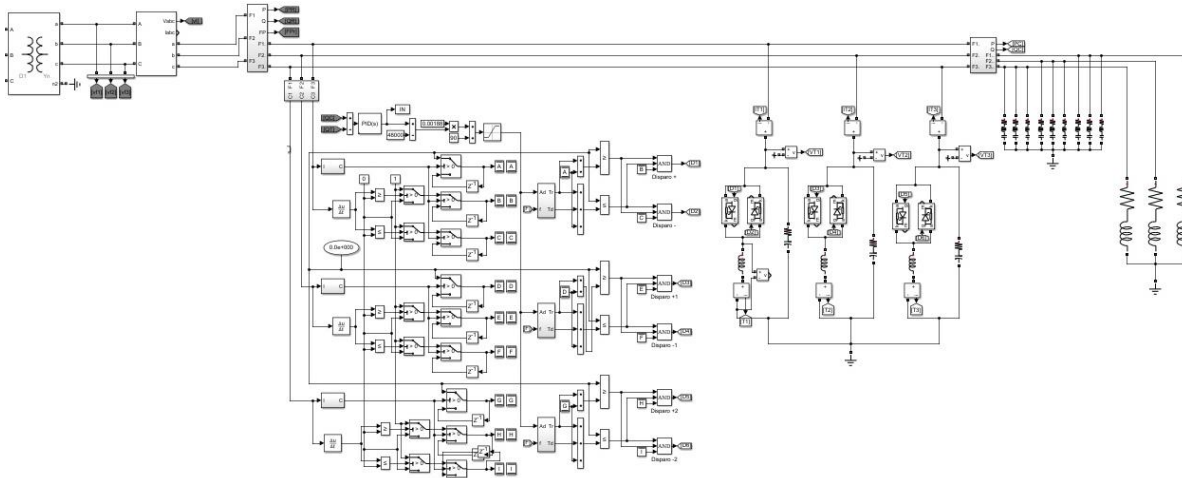


Figura 68. Conexión del compensador a una red trifásica.

En la Figura 68, se observa el punto de instalación del compensador a la red, este se conecta entre el transformador y la carga con el propósito de controlar la potencia reactiva que se presenta en la carga alimentada por el transformador, el banco de filtro se instala después del SVC para eliminar los armónicos generados por los TCR del compensador, el control de los tiristores censa la corriente de cada fase del sistema en la salida del transformador.

Por otra parte, las conexiones del control a los tiristores se realizaron mediante bloques Goto (Pasar a) y From (De), que permiten pasar una señal de un bloque a otro sin realizar la conexión real mediante etiquetas o marcas, al bloque Goto puede enviar una señal de salida que llega hacia la entra de un elemento por medio del bloque From con la misma etiqueta o marca, con el uso de estos bloques se eliminan las líneas de conexión que pueden generar confusión al momento de visualizar los sistemas modelados. Estos bloques se implementaron en el sistema modelado para conectar los disparos del control a los tiristores, así mismo, se utilizaron para conectar los bloques de medida utilizados en el sistema para visualizar los datos medidos durante la simulación del sistema.

El sistema cuenta con medidores de corriente y tensión monofásicos para analizar cada fase de la red, estos se encuentran en la salida del transformador hacia la red, en la conexión del compensador a la red y a la entrada de la carga, con esta

ubicación se puede observar el comportamiento de la corriente y tensión durante la simulación. La ubicación de estos elementos se visualiza en la Figura 69.

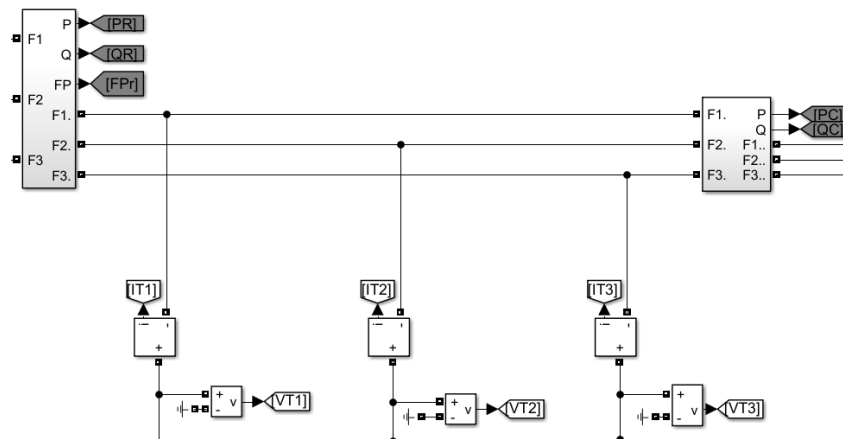


Figura 69. Ubicación de los elementos de medida.

Los elementos de medida conectados en la red son ubicados en subsistemas para efectos prácticos, estos medidores se conectan por medio de bloques Goto a display que permiten visualizar los valores de tensión y corriente, a su vez, se conectan a bloques que calculan las potencias activas y reactivas provenientes del transformador, el compensador y la carga por cada fase, estos bloques se conectan a scope y display implementando bloques Goto y From, para así monitorear el comportamiento de las potencias del sistema por medio de su onda y el valor numérico, este proceso se realiza con las tensiones del sistema y el factor de potencia. El bloque de medición y visualización de los datos del sistema se observan en la Figura 70.

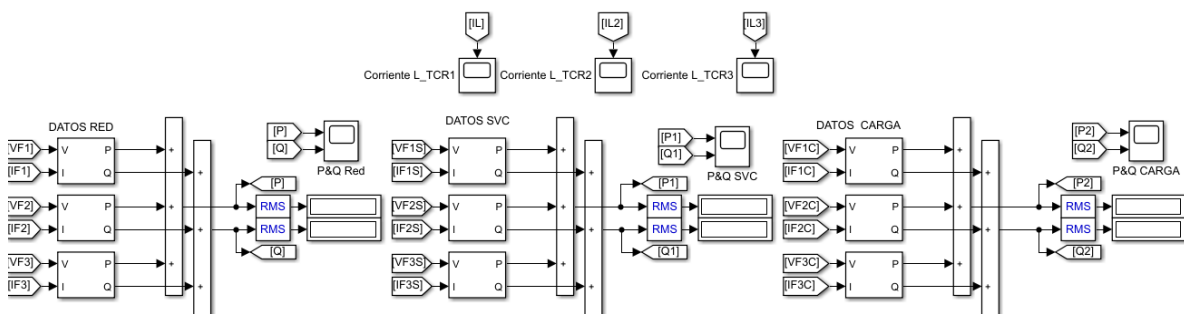


Figura 70. Bloque de medida.

En este bloque se suman las potencias activas y reactivas medidas en cada fase, para obtener el valor medido en toda la red, por otra parte, se monitorea las

tensiones de fase y línea de la red y el factor de potencia del sistema, para observar el comportamiento de estos valores cuando existe aporte de reactivos a la carga.

7.8 Instalación del SVC en el sistema eléctrico del bloque SB

Anteriormente se simuló el sistema eléctrico del edificio Simón Bolívar de la Universidad de Pamplona, obteniendo como resultado un nivel de tensión bajo al igual que el factor de potencia del sistema, por otra parte, se comprobó que el consumo de reactivos de la carga es suplido netamente por la red. Para corregir el factor de potencia y elevar el nivel de tensión a su valor nominal se conecta a esta red el compensador diseñado. El compensador se conecta a la red de la misma forma que el sistema presente en la Figura 68, al modificar los parámetros de la carga presente en dicha figura con los valores del sistema del SB y simular se obtiene los resultados mostrados a continuación.

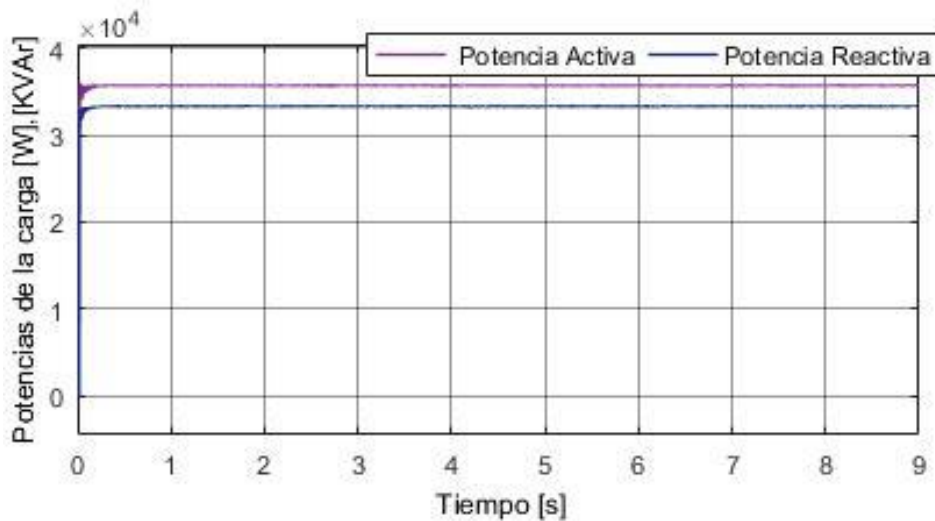


Figura 71. Potencias de la carga SB con la instalación del SVC.

En esta figura se observa las potencias consumidas por la carga, al inicio de esta se nota un leve rizado en ambas gráficas y una curvatura antes de mantenerse estable, la curva presente en las gráficas se debe a la acción del controlador PID que estabiliza el aporte de reactivos del compensador en base a la demanda de la carga, al iniciar la simulación el sistema se encuentra en cero por ende, no existe

consumo de potencia por la carga este intervalo de tiempo es muy pequeño, por lo tanto, al entrar la carga existe un incremento en el consumo de potencia y se presenta un leve transitorio en el sistema hasta que la carga estabiliza consumiendo los reactivos necesarios para ella. Por otra parte, se observa que el consumo de reactivos ha disminuido en comparación los resultados de la red antes de conectar el compensador debido al controlador del compensador que mantiene estable el aporte de reactivos del compensador y evita que la red entre en aporte excesivo de potencia reactiva, para observar los valores exactos de estas potencias puede dirigirse a la Figura 76, donde se presentan los resultados numéricos de la simulación.

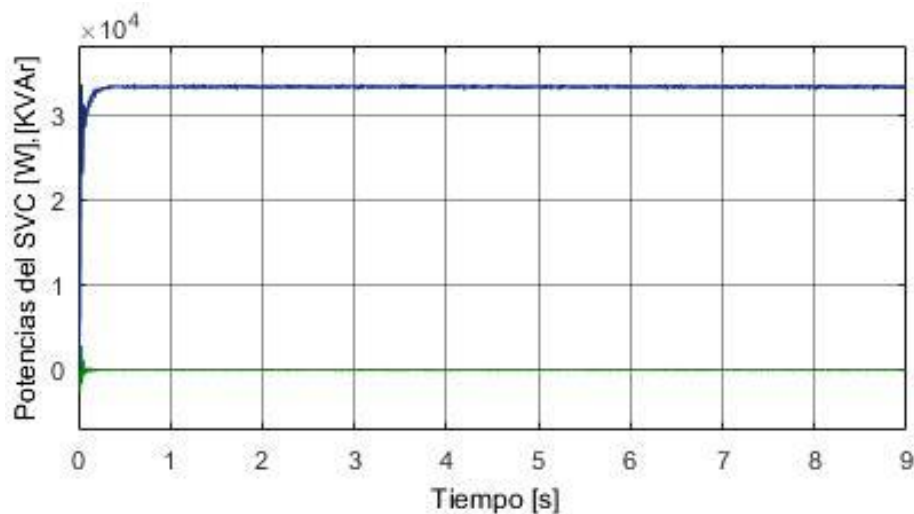


Figura 72. Potencias del compensador.

Los resultados del compensador presentan una leve diferencia en comparación con la carga porque este no consume potencia activa, por lo tanto, esta potencia se mantiene en cero durante toda la simulación. Por otra parte, la potencia reactiva del compensador es la misma mostrada en la Figura 71, ya que este aporta los reactivos exactos que debe consumir la carga gracias a su control que impide sobre compensación por parte del SVC. El rizado presente en la línea de potencia reactiva en esta figura se debe a los medidores conectados en el compensador, ya que las ondas de corriente y tensión que provienen de este no son exactamente senoidales y los medidores están diseñados para formas de

ondas senoidales puras, por ende, al no existir una onda senoidal estos deforman la onda medida, por lo tanto, al observar gráficamente las potencias del compensador se observan estos rizados imperfectos en su forma de onda, cabe decir que esto no afecta la medición exacta de las tensiones, corrientes o potencias del compensador estático.

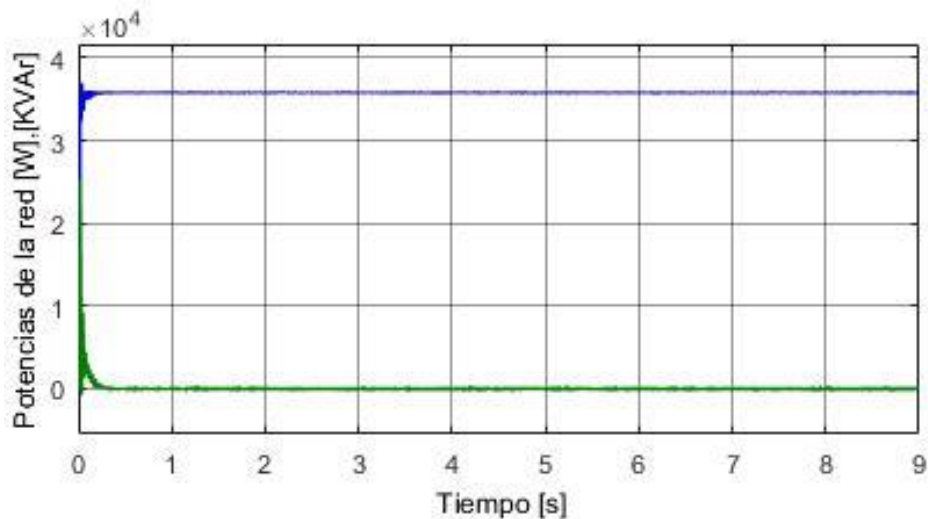


Figura 73. Potencias de la red con el SVC conectado.

Estos resultados presentan una diferencia similar al compensador con la potencia reactiva debido a que esta se mantiene mayormente en cero, esto significa que los reactivos consumidos por la carga son aportados en su totalidad por el compensador, mientras que la red se encarga de aportar la potencia activa hacia la carga como se observa en la Figura 73.

Este resultado en conjunto con los mostrados en las figuras anteriores muestra el funcionamiento adecuado del compensador y la solución de los problemas presentes en la red debido a la presencia elevada de reactivos, para comprobar que los efectos nocivos de la red ocasionados por reactivos fueron solucionados con la inclusión del compensador se grafica el factor de potencia y las tensiones de línea, estos resultados se presentan en las siguientes figuras.

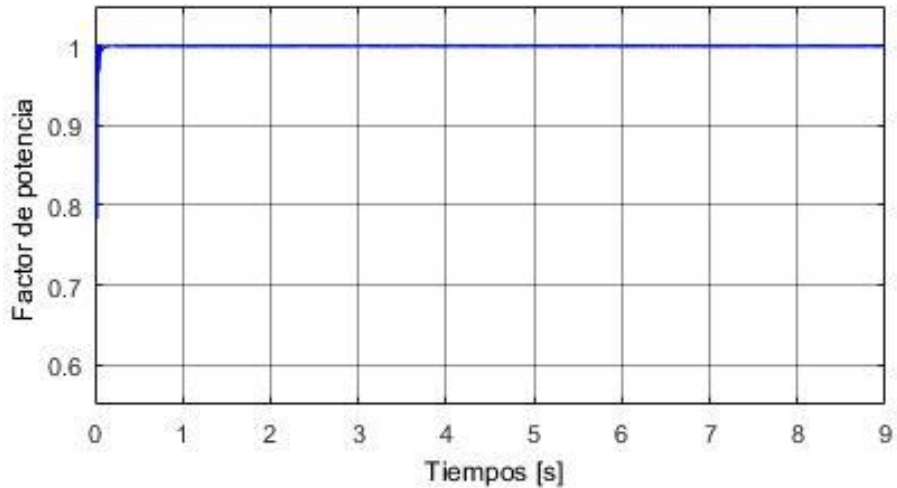


Figura 74. Factor de potencia del sistema.

En este resultado observa el comportamiento inicial del factor de potencia explicado anteriormente en los datos de la carga, después de estabilizarse el sistema el factor de potencia de la red mantiene un valor de 1 demostrando esto el correcto funcionamiento del compensador de reactivos al momento de corregir el factor de potencia. Luego de analizar este resultado es correcto decir que los niveles de tensión en la red poseen valores cercanos al nominal, esto se puede comprobar en la Figura 75.

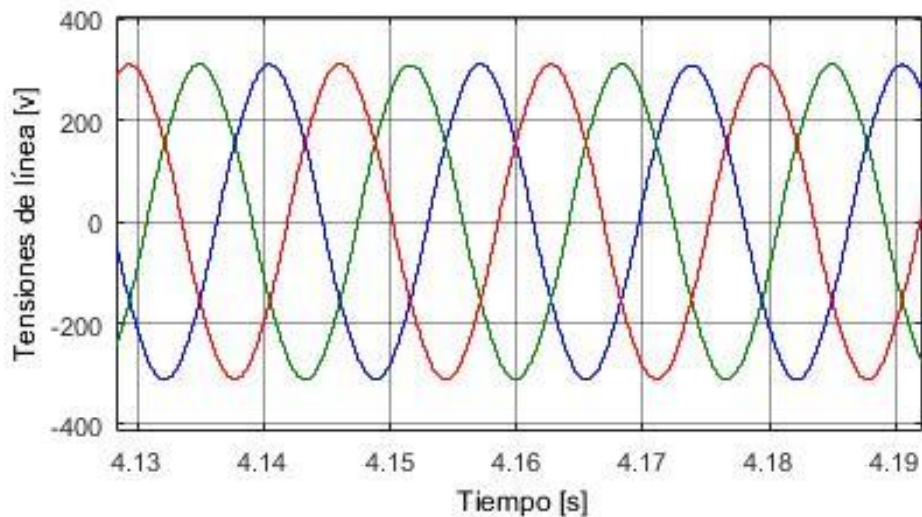


Figura 75. Tensiones de línea del sistema.

En la figura anterior se muestra la forma de onda de las tensiones de línea de la red luego, en esta se observa que las tensiones circulan en un rango mayor a los 200 voltios, esto se debe a que los valores graficados son de las tensiones pico del sistema para conocer el valor eficaz de estas tensiones se implementa un bloque rms que calcula este valor exacto de las tensiones, sin embargo, estos bloque generan deformidad en la onda de tensión al momento de graficarlas, por lo tanto, el valor eficaz de las tensiones del sistema se presentan de manera numérica en la siguiente figura.



Figura 76. Resultados numéricos de la simulación.

En la Figura 76, se presentan los resultados numéricos del sistema luego de instalar el compensador de reactivos, en donde se observa que el factor de potencia del sistema pasa de ser 0.6 a ser 1, esto significa, que la inclusión del compensador de reactivos a la red fue satisfactoria logrando corregir el factor de potencia del sistema y evitando el consumo excesivo de reactivos por parte de la carga, a su vez, los niveles de tensión se presentan cercanos al valor nominal, sin embargo, no son exactamente igual, esto puede deberse a errores en la medición o transitorios leves que impiden que el nivel de tensión sea el nominal, por otra parte, se observa que la red consume una cantidad mínima de reactivos, motivo por el cual la potencia reactiva medida en el compensador no es igual a la presente en la medición de la carga.

7.9 Instalación del compensador en una red con variación de carga

En anterior proceso, se instaló el compensador estático de reactivos en una red que emula el sistema del bloque Simón Bolívar de la Universidad de Pamplona donde se comprobó el funcionamiento del SVC, durante la simulación realizada se

comprobó que el compensador actuó de manera eficiente en el aporte de reactivos, logrando corregir el factor de potencia de la red, por otra parte, las tensiones del sistema lograron establecerse en un valor muy cercano al nominal, con esta prueba se comprobó la nula existencia de errores en el diseño del compensador o el control desarrollado, sin embargo, en la red estudiada la carga no presenta variación en función del tiempo, por ende, el consumo de reactivos se mantiene constante al igual que el aporte del compensador. En otras palabras, el compensador siempre aportará la misma cantidad de reactivos.

Para estudiar el comportamiento del compensador cuando existe variación en la carga, se conecta a una red con diferentes cargas que ingresan al sistema en tiempos específicos, estas cargas no consumen la misma potencia reactiva o activa, por lo tanto, siempre que ingrese una carga al sistema la demanda de reactivos cambia, esto pondrá a prueba el funcionamiento del compensador debía que de variar el aporte de reactivos cada cierto tiempo, la conexión de estas cargas a la red se percibe en la Figura 77.

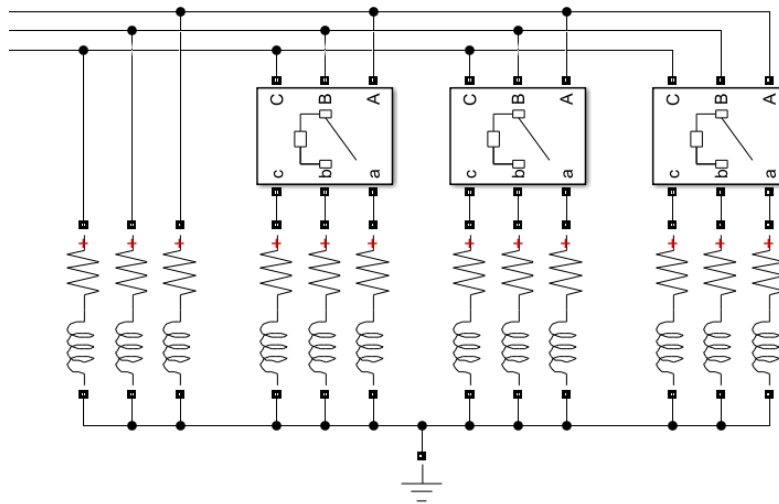


Figura 77. Cargas conectadas a la red.

En la figura anterior se observa que el sistema cuenta con una carga fija y tres cargas conectadas por medio de interruptores trifásicos a la red, estos breaker cuentan con la función switching times o tiempos de cambio, esta función permite programar el accionamiento del interruptor por medio de tiempos de cierre y

apertura, estos se implementan para establecer el tiempo en el que entrara cada carga.

Por otra parte, el consumo de reactivos de las cargas combinadas no puede superar la capacidad máxima que puede aportar el SVC, si esto ocurre la red aportara los reactivos restantes evitando así la corrección del factor de potencia y logrando inutilizar el funcionamiento del compensador. Los valores nominales de las cargas que se conectaran a la red se muestran en la siguiente Tabla.

| Carga | S_n [VA] | T_{nf} [V] | P_n [W] | Q_n [VAr] |
|-------|------------|--------------|-----------|-------------|
| 1 | 30.000 | 127 | 18.000 | 24.000 |
| 2 | 15.866 | 127 | 12.000 | 10.380 |
| 3 | 21.633 | 127 | 18.000 | 12.000 |
| 4 | 2.260 | 127 | 1.587 | 1.609 |

Tabla 1. Parámetros nominales de las cargas a conectar en la red.

Los parámetros de las cargas que se implementarán para esta prueba no superan los 48 [KVAr] que puede aportar el compensador. Por lo tanto, se realiza la simulación del sistema antes de conectar el compensador para conocer los parámetros de este antes de conectar el SVC, los resultados de esta simulación se observan en las siguientes figuras.

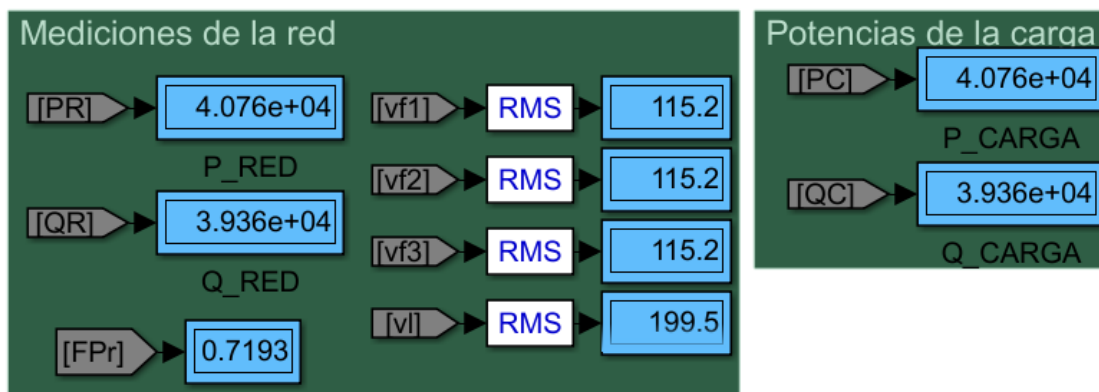


Figura 78. Resultados numéricos del sistema sin SVC con 4 cargas.

En la Figura 78, se perciben los resultados numéricos de las potencias y tensiones de la red y la carga, en estos se observa que los niveles de tensión se encuentran por debajo del valor nominal, por otra parte, la demanda de reactivos por parte de la carga es elevada y a su vez, suplida por la red, esto conlleva a obtener el bajo factor de potencia presente en los resultados. Sin embargo, las cargas de este sistema no son fijas, estas se conectan a la red en tiempos diferentes, por ende, el sistema presenta cambios siempre que se acciona una carga, estas variaciones de presentan las siguientes figuras.

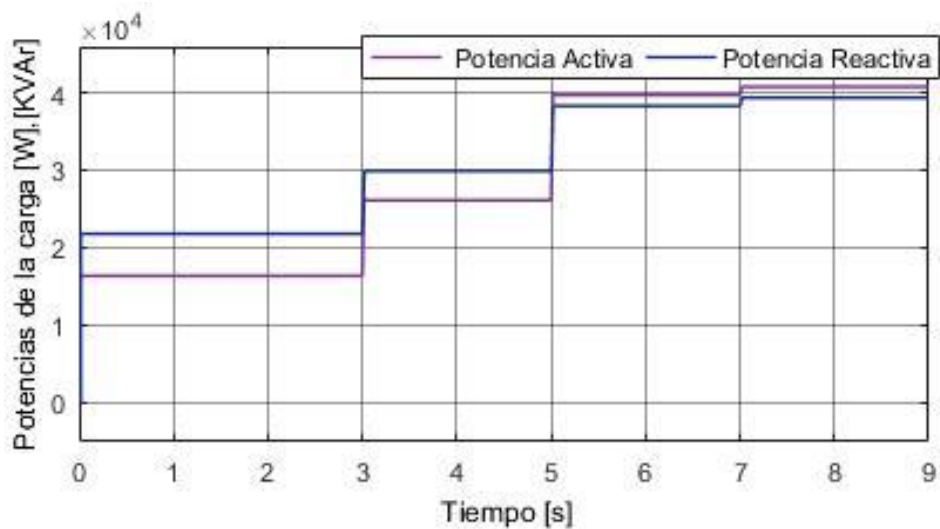


Figura 79. Potencias de la carga variable.

El consumo de potencia incrementa cada vez que ingresa una carga al sistema como se muestra en la Figura 79, durante la primera carga el consumo de reactivos es mayor a la potencia activa consumida, esto significa que el factor de potencia es más bajo con la primera carga, luego de 3 [s] se conecta la segunda carga al sistema, incrementando el consumo de reactivos al igual que la potencia activa evitando esto que el factor de potencia disminuya aún más su valor, el sistema permanece igual hasta entrar la tercera carga después de 5 [s] de simulación, donde el consumo de potencia activa supera a la reactiva, esto implica que el factor de potencia obtuvo una corrección aunque los reactivos hayan incrementado, al ingresar la cuarta carga el sistema presenta un cambio mínimo manteniendo el consumo de reactivos menor a la potencia activa, el

comportamiento de las potencias consumidas por la carga al variar expresa el cambio que presenta el factor de potencia con respecto al tiempo debido al ingreso de cargas a la red. Por otra parte, la red presenta el mismo comportamiento mostrado en la Figura 79, esto se puede observar en la Figura 80.

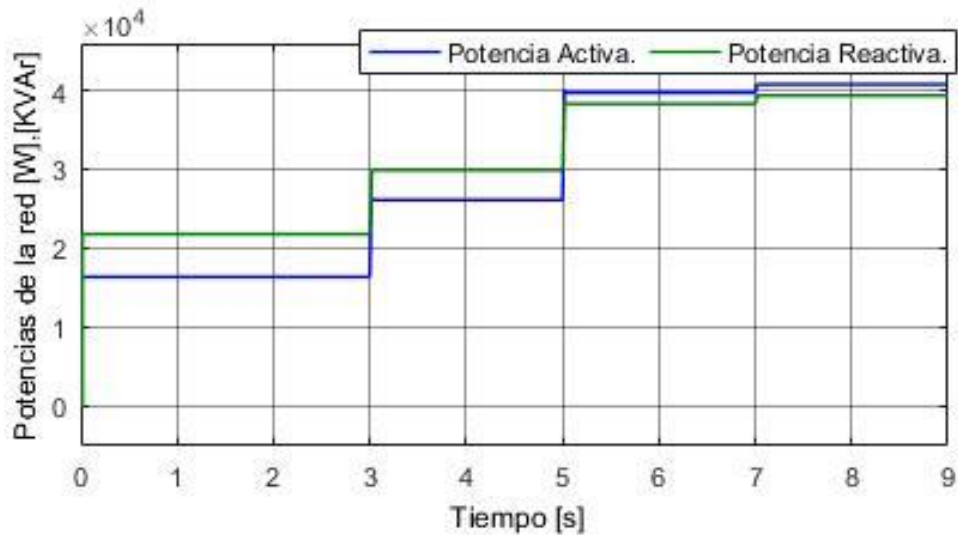


Figura 80. Potencias del sistema con la variación de cargas.

Debido a que no existe elementos externos que afecten el aporte o consumo de potencia activo o reactiva del sistema, los valores de potencia consumidos por la carga son los mismos que aporta el sistema. Por otra parte, el factor de potencia presenta una variación diferente como se explicó al analizar los resultados de la carga, debido al incremento de potencia activa al ingresar la tercera y cuarta carga, este cambio se percibe en la Figura 81.

Por otra parte, las tensiones del sistema también presentan cambios la variar la carga y el factor de potencia, estas presentan disminución en su valor pico que representa a su vez, que el valor eficaz sea bajo siempre que el factor de potencia se vea afectado por el ingreso de una nueva carga, en la Figura 82, se presentan las tensiones de línea en su valor pico a pico donde se podrá observar la variación que presenta la tensión con el ingreso de cargas al sistema.

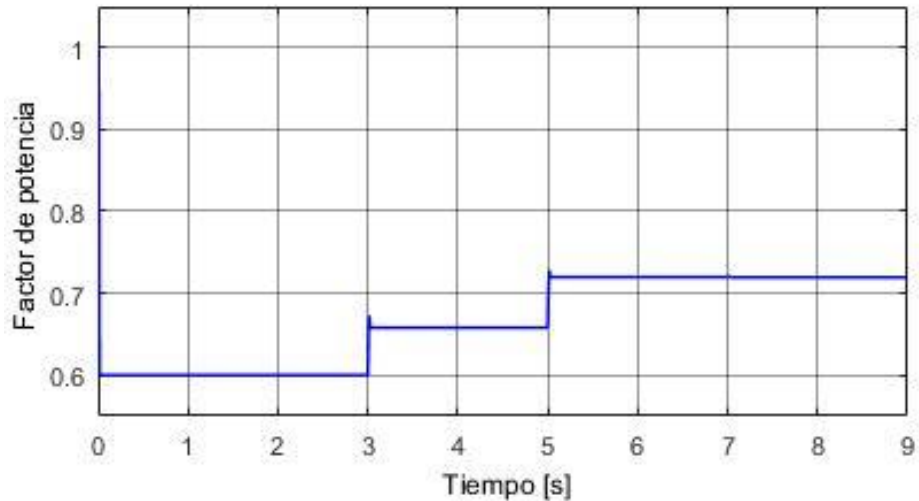


Figura 81. Factor de potencia del sistema con la variación de cargas.

En la Figura 81, se percibe el cambio que presenta el factor de potencia al introducir una carga nueva a la red, este presenta un valor de 0.6 con la carga fija hasta entrar la segunda carga después de 3 [s] de simulación, momento en donde la potencia activa incrementa al igual que el factor de potencia, luego de 5 [s] de simulación se presenta el mayor cambio en el valor del factor de potencia donde pasa de estar en el rango de 0.6 - 0.7 a encontrarse en el rango de 0.7 – 0.8, esto debido al incremento de la potencia activa con la tercera carga, este se mantiene en este rango hasta finalizar la simulación debido a bajo consumo de reactivos que posee la última carga que ingresa al sistema. Sin embargo, el valor que posee el factor de potencia sigue estando muy alejado del deseado o del rango permitido.

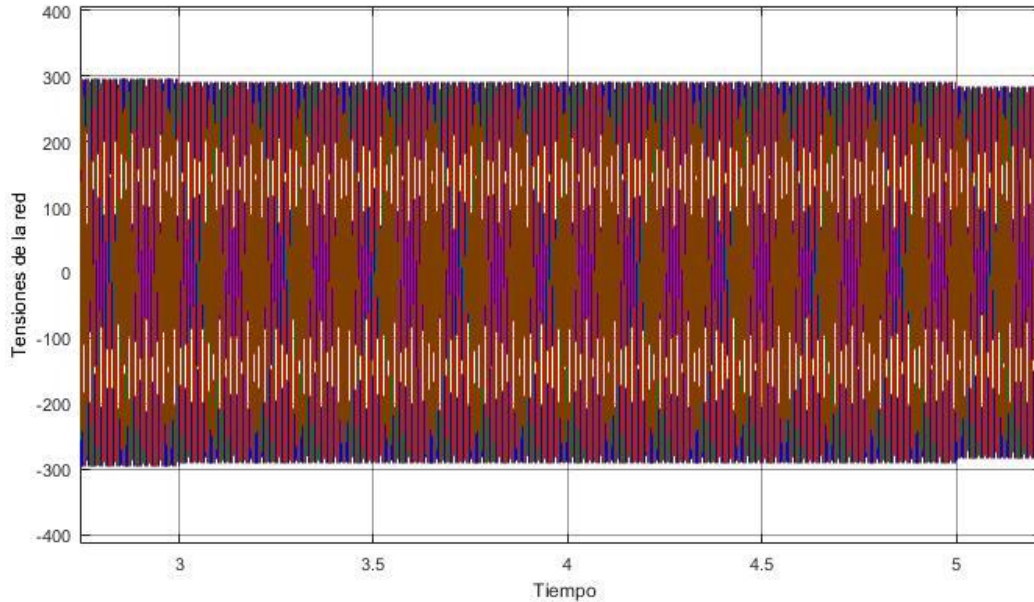


Figura 82. Tensiones del sistema con variación de cargas.

En la figura anterior se muestran las tensiones del sistema presentes al ingresar la segunda y tercera carga a la red, donde se observa la variación que presentan en su valor pico, esto expresa que el valor eficaz de las tensiones de línea disminuye al ingresar estas cargas a la red, para observar mejor esta variación se presenta en la Figura 83, las tensiones presentes entre la primera carga y el ingreso de la segunda al sistema.

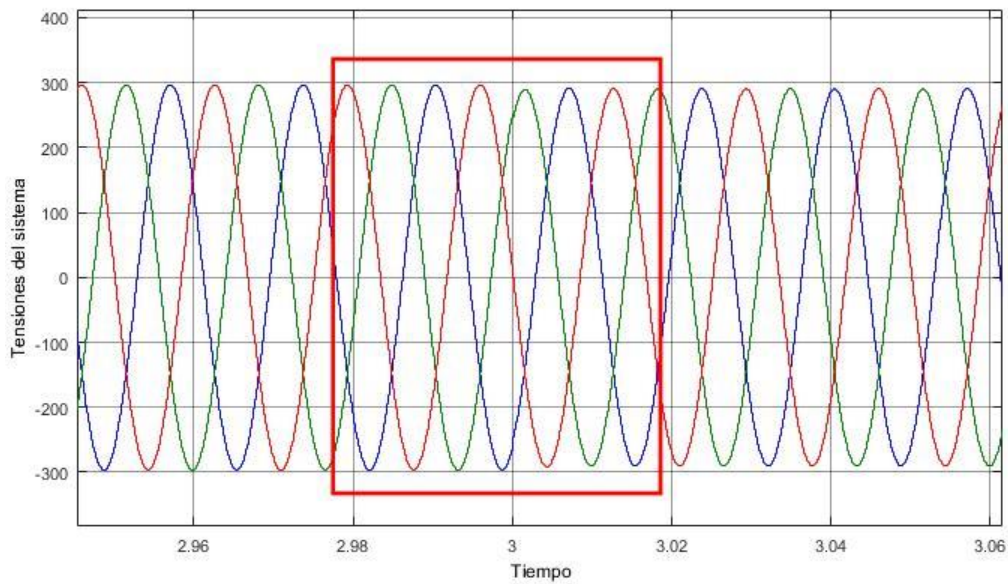


Figura 83. Variación de las tensiones del sistema al entrar la segunda carga.

En la Figura 83, se percibe el cambio que presenta la amplitud de las tensiones del sistema al entrar en funcionamiento la segunda carga y expresa el comportamiento que presenta las tensiones siempre que se conecta una carga que afecte el factor de potencia de la red.

Al conectar el compensado en la red se espera que este se adapte a la variación en la demanda de reactivos por parte de la carga, corrigiendo el factor de potencia y la tensión del sistema, durante la entrada de las diferentes cargas al sistema. Los resultados de esta simulación se presentan a continuación.

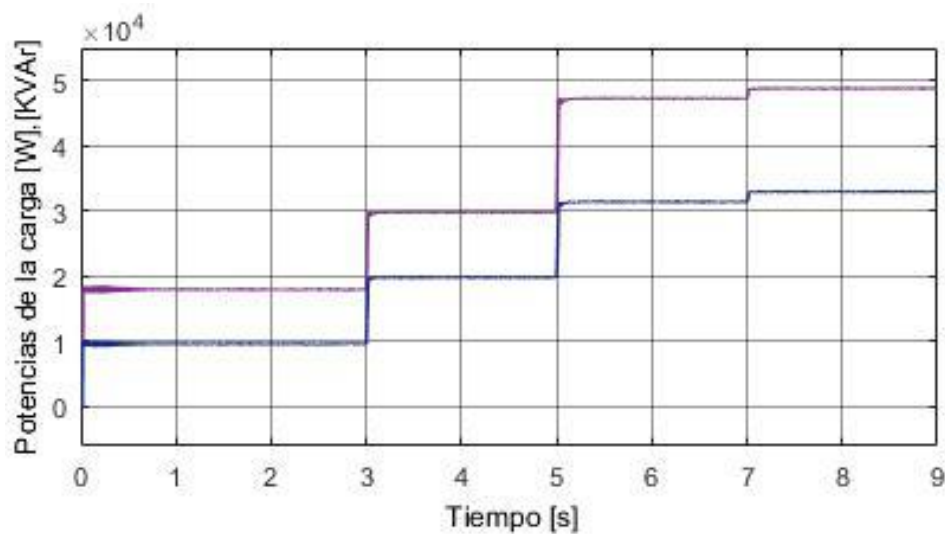


Figura 84. Potencias de la carga con el SVC instalado.

El primer lugar se analizan las potencias de la carga o en este caso las cargas, en la Figura 84, se observa que la potencia reactiva consumida presenta una disminución en su valor, esto se debe al aporte de reactivos del compensado dado que el controlador que este posee impide el aporte excesivo de reactivos no se presenta sobrecompensación en el sistema, por el contrario, cuando los reactivos son aportados por la red esto suele pasar debido a que el sistema se encuentra descompensado y no posee un control que evite la inyección de reactivos en exceso, por lo tanto, la potencia reactiva de la carga es controlada gracias a la instalación del SVC aportando solo la demanda específica que requiera la carga.

Por otra parte, la potencia activa se incrementa debido a la corrección del factor de potencia, esto permite al sistema aportar la potencia adecuada para suplir la demanda de potencia necesaria para el correcto funcionamiento de las cargas.

En las gráficas de las potencias presentadas en la figura anterior existe un leve transitorio de forma rizada al iniciar la simulación, esto sucede porque el sistema requiere un lapso de tiempo para estabilizarse y medir los valores exactos de la red, este transitorio también se presenta al ingresar otra carga al sistema, en los resultados de las potencias de la red se podrá percibir con más detalle este transitorio al conectarse una carga al sistema.

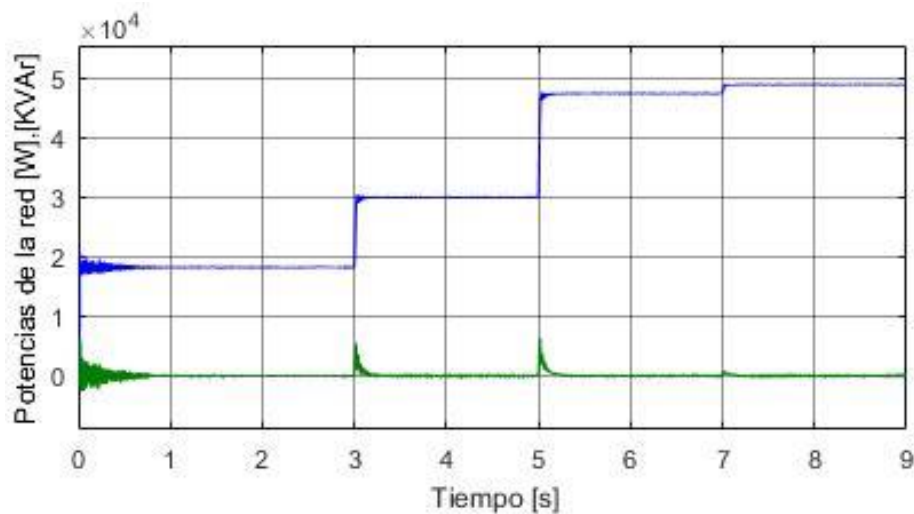


Figura 85. Potencias de la red al conectar el SVC.

En la figura anterior se presentó el comportamiento de las potencias de las cargas al conectar el SVC, comprobando que el compensador presenta un control sobre los reactivos que consume la carga, este control se refleja en las potencias del sistema como se percibe en la Figura 85, en esta se observa que la potencia activa de la red es la misma consumida por la carga, mientras que la potencia reactiva se mantiene en cero durante la simulación con un leve cambio en el transitorio inicial tiempo en el que se estabiliza el sistema, al entrar una carga diferente la potencia reactiva presenta un pico de elevación hasta ser controlada al estabilizarse nuevamente el sistema, en la Figura 85, se observa que el tiempo que transcurre entre el pico de elevación al entrar una carga y estabilizase

nuevamente la potencia es muy pequeño, esto se debe a la velocidad con la que se estabiliza el controlador del compensador, en la Figura 86, se observa el comportamiento del compensador al ingresar una carga, también se puede percibir el tiempo de respuesta del controlador para estabilizar el aporte de reactivos necesario.

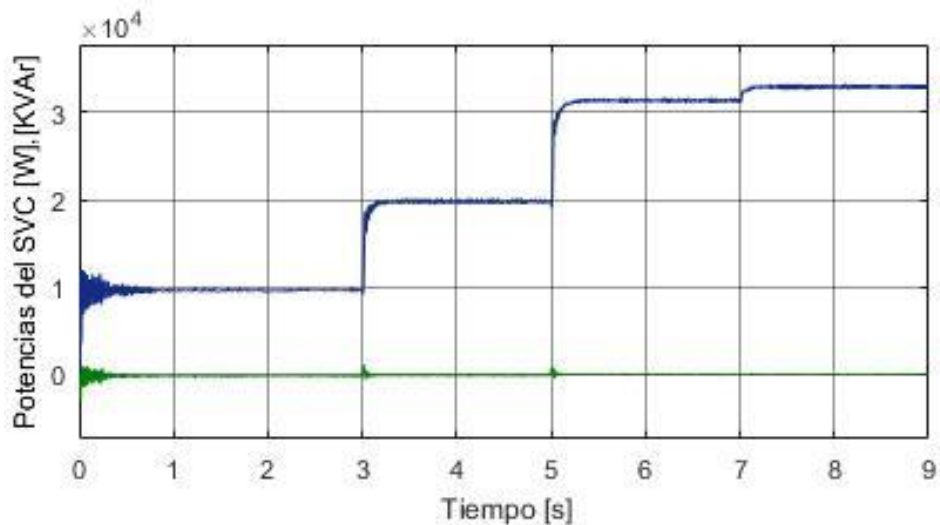


Figura 86. Potencias del compensador en red de 4 cargas variantes.

Como se expresó anteriormente el compensador actúa rápidamente para estabilizar el aporte de reactivos al existir una variación repentina en la demanda de la carga, esto se observa en la Figura 86, donde se muestra el comportamiento de la potencia reactiva aportada por el compensador al entrar una carga a la red, este incrementa suavemente el aporte de reactivos estabilizándolo en el punto necesario para suplir la demanda, demostrando que el control desarrollado para el compensador funciona de forma óptima en distintos escenarios de carga. Para dar por hecho esto se observa el comportamiento del factor de potencia presente en la Figura 87.

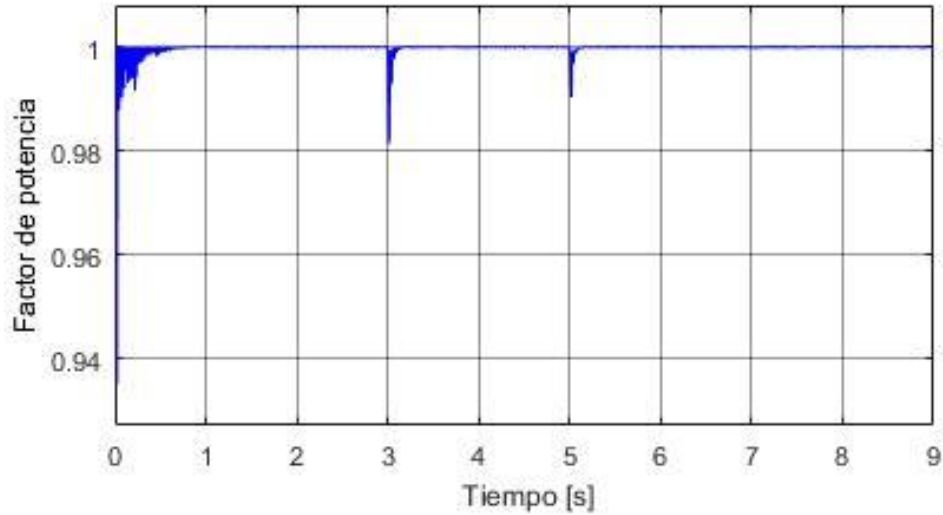


Figura 87. Factor de potencia al conectar el SVC.

En la Figura 87, se observa que el factor de potencia logra mantenerse en 1 durante la simulación presentando un transitorio al conectarse las cargas 2 y 3 al sistema, esto comprueba que el compensador logra corregir en factor de potencia aun existiendo una variación repentina de la carga, de igual manera se puede decir que las tensiones del sistema incrementan su valor eficaz próximo a ser el valor nominal esto se puede observar en la Figura 88.

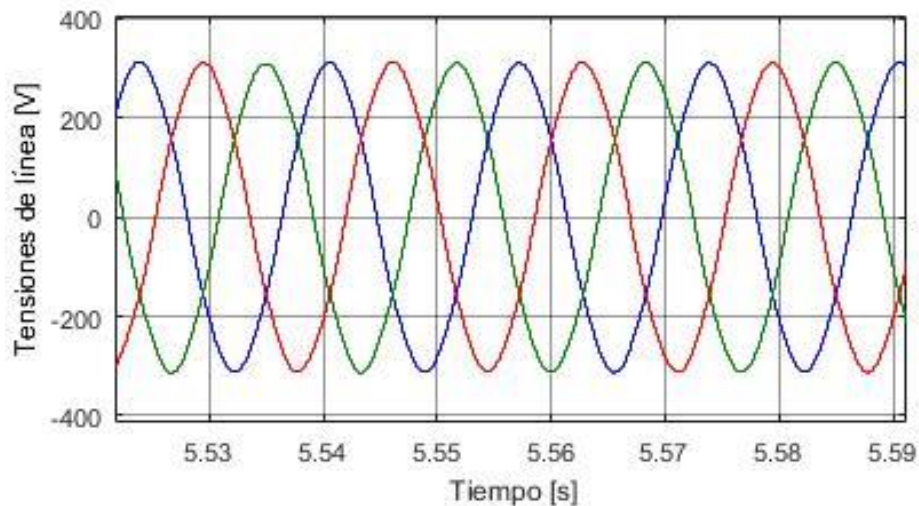


Figura 88. Tensiones de la red al instalar el SVC.

Los resultados de formar numérica se observan en la Figura 89, en esta se presentan con exactitud los resultados analizados anteriormente de manera

gráfica, cabe decir que los equipos de medidas presentan leves deficiencias en su medida que pueden deberse a que algunas formas de ondas no son puramente senoidales, sin embargo, estos errores presentes en la medición son mínimos.

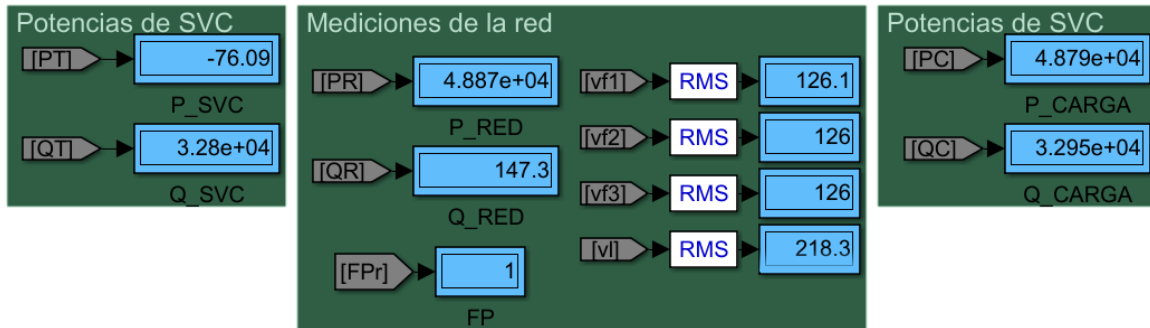


Figura 89. Resultados numéricos de la prueba con variación de cargas.

En los resultados presentes en la Figura 89, se observa que el factor de potencia es 1 como se observó anteriormente de forma gráfica, las tensiones también se acercan al valor nominal, por otra parte, al igual que en la prueba anterior la red consume una cantidad mínima de los reactivos aportados por el compensador, motivo por el cual los valores de potencia reactiva del compensador y la carga no son idénticos. Con esto se comprueba que el compensador funciona adecuadamente corriendo el factor de potencia al incrementar la demanda de reactivos, conectando cargas al sistema en tiempos diferentes. Sin embargo, en los sistemas de distribución las cargas suelen conectarse a la red durante un tiempo específico, luego de este tiempo se desconectan del sistema realizando cambios en el factor de potencia debido a la disminución en el consumo de reactivos.

Las variaciones presentes en la red, al desconectar una carga afectan el factor de potencia de forma diferente durante cada proceso, debido a que las cargas no suelen desconectarse en el mismo intervalo de tiempo o en la misma secuencia de conexión, esto implica que pueden existir diferentes escenarios de carga en un mismo sistema eléctrico. Para analizar el comportamiento del compensador diseñado, este se somete a la prueba de conexión y desconexión de cargas, implementando el sistema de cuatro cargas presente en la prueba anterior, el

comportamiento del factor de potencia y las potencias del sistema sin el compensador se observar en las siguientes figuras.

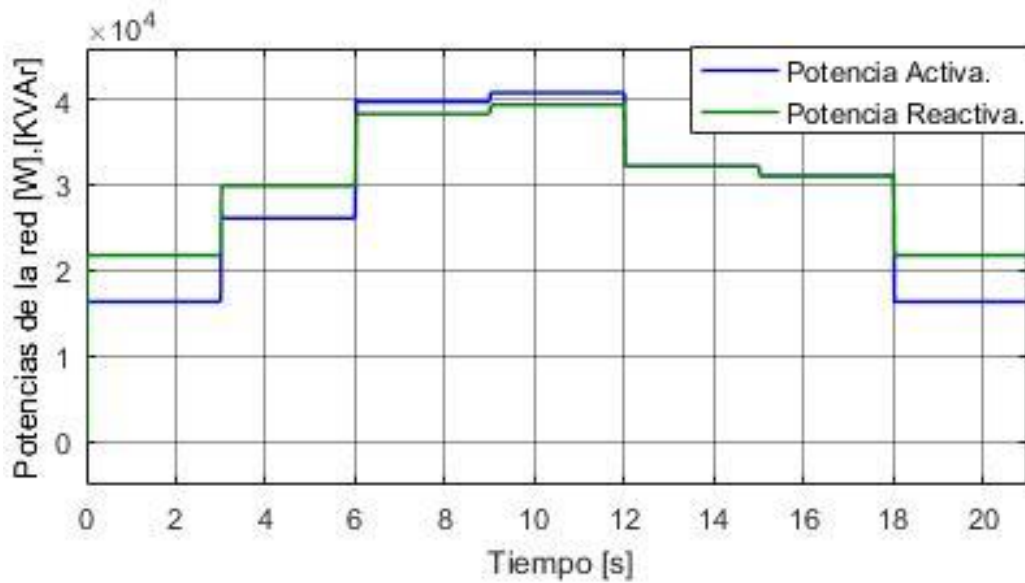


Figura 90. Comportamiento de la red al conectar y desconectar las cargas.

En la figura 90, se observa el comportamiento que poseen las potencias activa y reactiva de red al incrementar y disminuir repentinamente la carga del sistema, este comportamiento es el mismo que posee la carga debido al aporte de reactivos por parte de la red para suplir la demanda de la carga, esto se ve reflejado en el factor de potencia, este debe estar por debajo del valor deseado durante la simulación del sistema, presentando incrementos y disminuciones descontroladas al variar la carga del sistema.

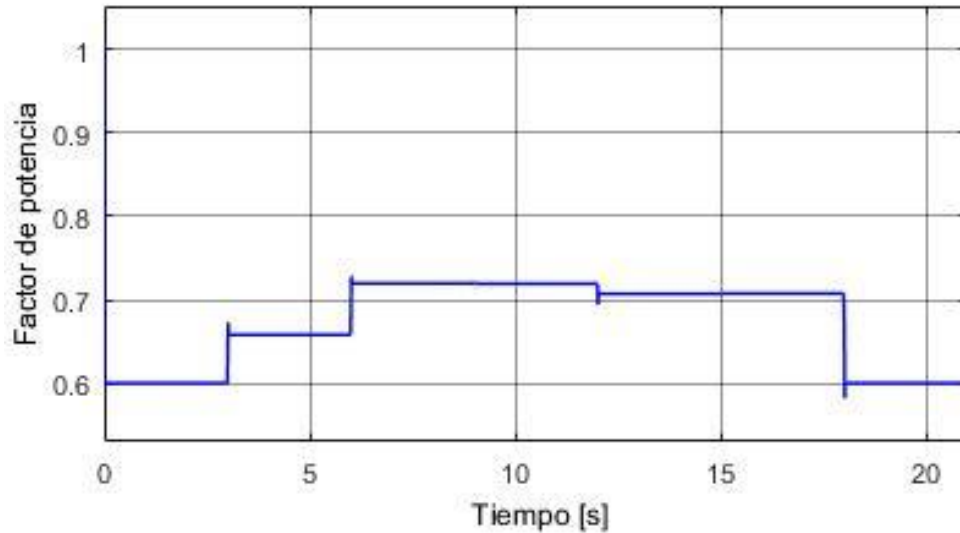


Figura 91. Comportamiento del factor de potencia al conectar o desconectar la carga.

El factor de potencia disminuye considerablemente al iniciar la simulación debido al consumo de reactivos de la carga inicial, este varía al incrementar las cargas temporalmente, sin embargo, al desconectarse las cargas el factor de potencia nuevamente disminuye finalizando con el valor 0.6 establecido en la carga permanente de la red, el comportamiento que este posee con la variación de las cargas es notorio a simple vista, sin embargo, en ningún momento llega a estar cerca de la unidad, para esto se implementa el compensador y se analiza su funcionamiento, para determinar si este logra corregir el factor de potencia estableciendo un valor fijo sin presentar variación con respecto al cambio en la carga. En la figura 92, se observa el primer resultado al implementar el compensador en este sistema.

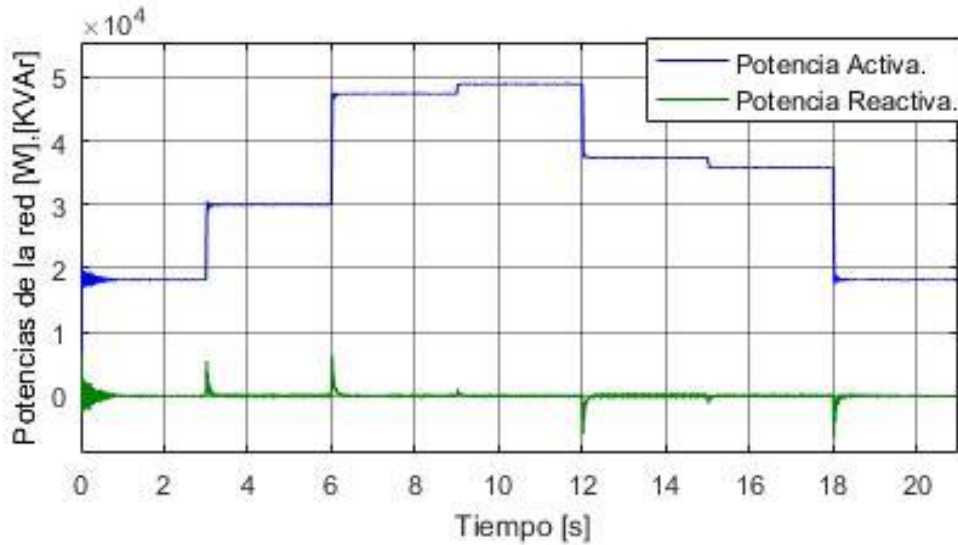


Figura 92. Comportamiento de la red al conectar y desconectar las cargas con el SVC conectado.

En la figura 92, se observa el comportamiento de la potencia activa de la red al instalar el compensador, en esta se percibe el incremento que presenta dicha potencia al ingresar las cargas al sistema, descendiendo el aporte de potencia al desconectar secuencialmente las cargas en determinado tiempo. Sin embargo, la potencia reactiva no presenta variación alguna a la conexión o desconexión de las cargas más allá del transitorio presente en los sistemas eléctricos al ingresar o salir una carga, dando a entender que los reactivos demandados por la carga son aportados en su totalidad por el compensador, esto se puede observar en la figura 94.

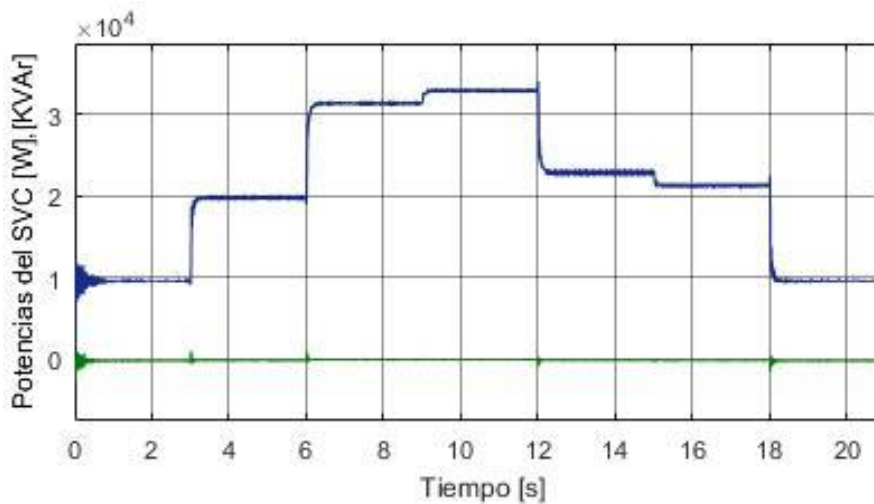


Figura 93. Comportamiento del SVC a la conexión y desconexión de cargas.

Al observar la figura 92, se puede decir que el compensador suplir la demanda de reactivos de la carga, dando a entender que su funcionamiento es óptimo, sin embargo, para decir esto es necesario observar el comportamiento que este posee frente a este escenario de carga presente, reacción que se observa en la figura 93, donde se percibe que el compensador se adapta a la variación de reactivos demandados por la carga, aquí se observa que el controlador determina con exactitud la potencia necesaria para suplir la necesidad de potencia reactiva de la carga, estabilizando el compensador al incrementar o disminuir la demanda. Este resultado se corrobora al analizar el comportamiento de la carga debido a que esta debe contar con el mismo comportamiento que el compensador en la potencia reactiva consumida, al igual que la potencia activa de esta debe ser igual al de la red.

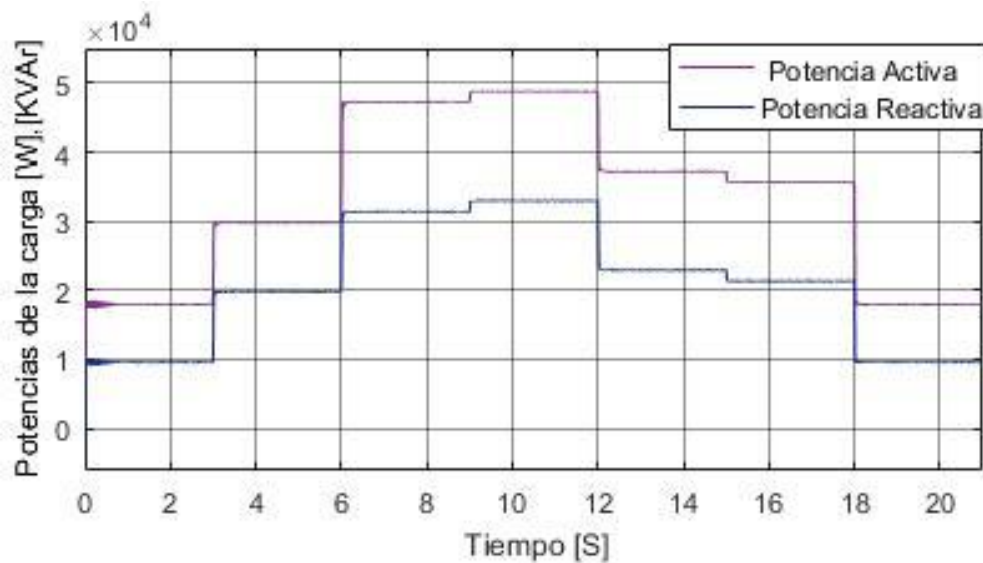


Figura 94. Comportamiento de las potencias de la carga al conectar o desconectar las cargas con el SVC instalado.

Luego de analizar el comportamiento del SVC y la red en el escenario de carga planteado, es evidente que la carga debe tener un comportamiento igual al de estos dos en la potencia activa y reactiva, debido al control eficiente que realiza el compensador sobre la potencia reactiva del sistema, esto se puede comprobar al observar la figura 94, demostrando que el compensador se adapta a los cambios de potencia presentes para corregir adecuadamente el factor de potencia. Esto se confirma la observar la figura 95.

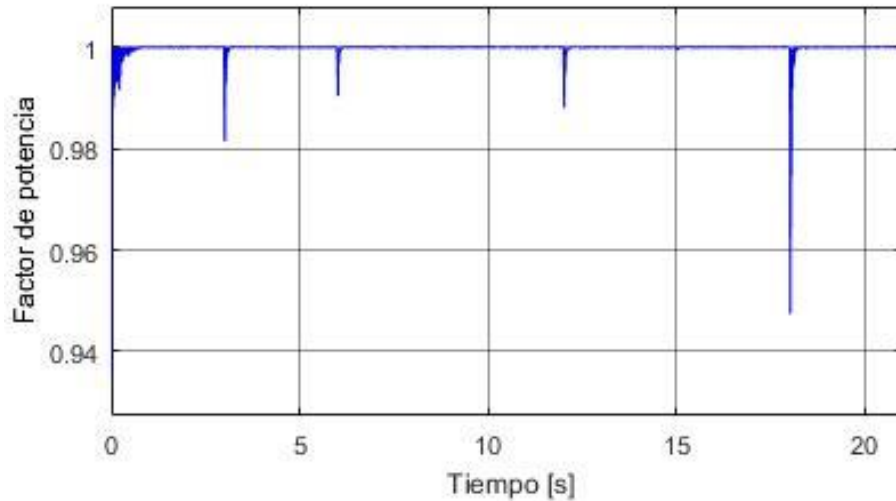


Figura 95. Comportamiento del FP al conectar o desconectar las cargas con el SVC conectado.

En la figura anterior, se observa el comportamiento del factor de potencia al ingresar cargas a la red y ser desconectadas tiempo después, este presenta variación transitoria debidas a cambios bruscos de potencia presentes al incrementar o disminuir la carga de la red, sin embargo, este se mantiene estable en 1 demostrando la eficiencia del compensador controlado, a la variación brusca en la carga de sistema.

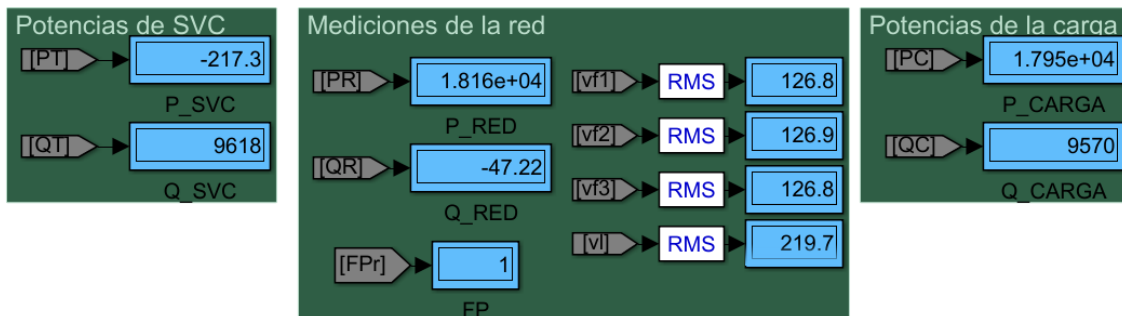


Figura 96. Resultados numéricos del sistema al conectar y desconectar las cargas con el SVC instalado.

Al observar los resultados numéricos de la prueba realiza, se corrobora el valor unitario del factor de potencia y la elevación de las tensiones del sistema hacia el valor nominal. Esto permite decir que el compensador diseñado presenta una alta eficiencia para la corrección del factor de potencia frente a los diferentes escenarios de carga que se puedan presentar en el sistema eléctrico al que se instale.

8. CONCLUSIONES

El uso de filtros para mitigar las corrientes armónicas garantiza la eficiencia del compensador de reactivos en su funcionamiento, eliminando los armónicos más representativos presentes en la red al conectar el compensador debido al componente inductivo del TCR que genera armónicos que circulan a sistema sin no son eliminados, por ende, la implementación de estos filtros junto a la configuración del compensador debe ser indispensable si este no cuenta con algún control especial para la mitigación de armónicos.

La implementación del controlador PID permite al compensador aportar los reactivos al sistema evitando sobrecompensación, estableciendo un control sobre el ángulo de disparo de los tiristores, mediante la comparación entre la demanda de reactivos y el aporte del compensador, permitiendo estabilizar el aporte de potencia reactiva del compensador al presentarse una variación en la carga, logrando que el SVC incremente o disminuya el aporte de reactivos en función de la demanda de la carga en cualquier instante de tiempo.

En resumen, la presencia de reactivos en la red afecta el factor de potencia del sistema incrementando su corriente y disminuyendo su tensión, esto conlleva al mal funcionamiento de los elementos de protección y medida, ocasionando pérdidas técnicas y económicas para las empresas prestadoras del servicio eléctrico. Por otra parte, el aporte excesivo de reactivos a la red está penalizado lo que atrae consigo multas a los usuarios generadores de reactivos en exceso. Por ende, es requerido el estudio de compensación de reactivos para mejorar la calidad del servicio y evitar pérdidas en las redes y multas a los usuarios.

El compensador estático de reactivos diseñado garantiza la corrección del factor de potencia en diferentes condiciones de carga, gracias al control implementado que censa los reactivos de la carga y los compra con los reactivos del compensador, permitiendo que este aporte la diferencia restante para suplir la demanda de la carga, esto garantiza que el factor de potencia en la red se

mantenga en un valor igual o cercano a la unidad, ya sea con una demanda de reactivos fija o variable en el tiempo.

Durante el desarrollo de esta investigación se evidencio la posibilidad de plantear una mejora al programa de ingeniería eléctrica, implementando el estudio de compensación de potencia reactiva, mediante la inclusión del tema en el contenido programático de alguna materia existente o la creación de una electiva que se centre en la corrección de los efectos causados por la presencia de reactivos en los sistemas eléctricos.

Por último, cabe destacar que el compensador estático de reactivos diseñado puede fungir como alternativa para la corrección del factor de potencia de la edificación Simón Bolívar de la Universidad de Pamplona, debido a que no presenta falencias en su funcionamiento al momento de aportar los reactivos que requiera la instalación de la edificación, garantizando un factor de potencia único y tensiones iguales o cercanas al su valor nominal, asegurando la nula existencia de una sobre compensación o efecto contrario al deseado al instalar en compensador en la red de la edificación.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Y. Tian and Z. Li, "Research status analysis of reactive power compensation technology for power grid," in *2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, 2018, pp. 1–7.
- [2] C. Alejandro, D. Duarte, A. M. Ramos, M. D. E. L. A. Comisión, R. P. Behnke, and G. J. Estevez, "Modelación de un compensador estático para el control de generación distribuida con energías renovables," 2009.
- [3] C.-M. Luis Enrique, R.-R. Jaime José, and H.-G. Pedro Francisco, "Simulación del compensador estático de VAR de la subestación Culliacán Tres para el análisis de transitorios," *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 14, no. 3, pp. 421–434, 2015.
- [4] V. Mateo, A. M. Gole, and C. N. M. Ho, "Design and implementation of laboratory scale static var compensator to demonstrate dynamic load balancing and power factor correction," *2017 IEEE Electr. Power Energy Conf. EPEC 2017*, vol. 2017-Octob, pp. 1–6, 2018.
- [5] H. M. Rodríguez, G. C. Delgado, J. Edwin, and C. Becerra, "Ubicación de FACTS para mejorar la estabilidad de tensión," vol. 30, no. 1, pp. 23–44, 2012.
- [6] H. D. E. Álvarez, "EFECTOS DE ALGUNOS COMPENSADORES DE VOLTAJE EN UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA," 2009.
- [7] I. F. Orduña, G. Aponte, and D. F. Echeverry, "Compensación paralelo de reactivos durante la prueba de aptitud al cortocircuito en transformadores de distribución," *Inf. Tecnol.*, vol. 23, no. 5, pp. 47–56, 2012.
- [8] E. Gómez, "Compensación de Potencia Reactiva," p. 90, 2009.
- [9] Rtr Energia, "Compensación de Energía Reactiva," *RTR Energía*, 2010.

- [10] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍAS and JIMENEZ VALDÉS JAVIER, "Comisión De Regulación De Energía Y Gas, Resolución 123 De 2011," p. 30, 2010.
- [11] C. Jos and C. Gonz, "Compensadores Estáticos de Potencia Reactiva (SVC)," *Compensador Estatico Potencia React. Svc*, 2003.
- [12] Mohamed Izzeddine, "Modelado Y Regulacion De Los Compensadores Estaticos De Potencia Reactiva En Los Flujos De Cargas Con Armonicos," 2001.
- [13] D. Borges and V. León, "Evolución y desarrollo de los dispositivos compensadores de potencia reactiva," *Energética*, vol. XXVI, no. 2, 2005.