UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



NUEVAS TECNOLOGÍAS DE COMPENSADORES DE POTENCIA REACTIVA

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELÉCTRICISTA

PRESENTADO POR:

LUIS DEYBIS APONTE PRIMO

PROMOCIÓN 2005- I

LIMA – PERU 2011

NUEVAS TECNOLOGÍAS DE COMPENSADORES DE POTENCIA REACTIVA

Agradezco primeramente a mis padres que me apoyaron en todo momento; así como también a mis hermanos Enrique y Doris.

SUMARIO

En el presente informe de suficiencia se describe nuevas tecnologías de compensadores de potencia reactiva, y como la electrónica de potencia mejora la capacidad de control de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), además se menciona de forma breve conceptos básicos de compensación serie y en derivación. Se explica en detalle el funcionamiento del inversor trifásico de tensión, formas de control y cómo se puede opera el inversor cuando se conecta a la red eléctrica. Se describe el principio de funcionamiento y las formas de control del STATCOM, mostrándose además resultados de simulación cuando es utilizado para regular la tensión en el sistema eléctrico de potencia y cómo se comporta cuando en esas condiciones se presenta una falla trifásica a tierra.

INDICE

PROL	LOGO	
CAPI	TULO I	
ANTE	CCEDENTES	
1.1	Objetivo	2
1.2	Evaluación del Problema	2
1.3	Alcances	2
1.4	Introducción	2
1.5	Aspectos Generales	5
1.6	Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna (FACTS)	7
CAPI	TULO II	
COM	PENSACION DE POTENCIA REACTIVA.	
2.1	Introducción	9
2.2	Conceptos básicos del flujo de potencia reactiva en SEP	9
2.3	Compensador Serie	14
2.4	Compensación en derivación	15
2.4.1	Reactores y capacitores operados con interruptores mecánicos	16
2.4.2	Condensador Síncrono	16
2.4.3	Compensador Estático de Reactivos (SVC)	17
2.4.4	Compensador Estático Síncrono (STATCOM)	20
CAPI	TULO III	
COM	PENSADOR SINCRONO ESTATICO (STATCOM)	
3.1	Introducción	22
3.2	Inversor Trifásico de 6 pulsos	22
3.3	Modulación del Ancho de pulso PWM (Modulación de ancho de Pulso)	25
3.3.1	Modulación Sinusoidal (SPWM)	26
3.3.2	Modulador Sinusoidal Trifásico	28
3.4	Operación del inversor conectado en la red eléctrica	34

3.4.1	Modulación Senoidal	35
3.5	Sistema de sincronización (PLL)	36
3.5.1	Método de Sincronización (PLL)	37
3.6	Operación del Convertidor inyectando o absorbiendo potencia activa	38
3.7	Operación del Convertidor inyectando o absorbiendo potencia reactiva	40
3.8	STATCOM (Static Synchronous Compensator)	43
3.8.1	Proceso de inyección de potencia reactiva	44
3.8.2	Característica V-I del STATCOM	46
3.8.3	Regulación de la pendiente	47
3.8.4	Esquema de control.	49
3.9	Modelo y simulación del Statcom	51
3.9.1	Modelo del Statcom	51
3.9.2	Simulación del Statcom	56
CON	CLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
RIRI .	IOGRAFÍA	70

PROLOGO

El propósito de este informe es explicar, como las nuevas tecnologías de compensadores de potencia reactiva mejoran la operación del Sistema Eléctrico de potencia (SEP). Por eso se proponen nuevas y mejores herramientas para poder resolverlo. Por otro lado, una vez que se tiene una nueva herramienta, se debe usar para reexaminar el problema y encontrar aún mejores y más económicas soluciones (Es el caso del STACOM que es la solución para un sin fin de Problemas que se tienen actualmente). El control de los sistemas de potencia es un típico ejemplo, que se refiere al comportamiento de las máquinas síncronas, después de que han sido perturbadas. Las máquinas síncronas son los componentes principales de los sistemas eléctricos de potencia y su desempeño se relaciona directamente con su seguridad y estabilidad en la operación. Las máquinas síncronas interconectadas en una red eléctrica operan sobre un amplio rango de condiciones de operación, y por ello el uso del Statcom para tener una mejor respuesta ante cambios de operación del SEP.

CAPITULO I ANTECEDENTES

1.1 Objetivo

Explicar el funcionamiento de los nuevos dispositivos de Regulación de Tensión (en particular el Statcom) topologías, formas de operación y control, Aplicaciones como regulador de tensión, compensador de factor de potencia, comportamiento ante fallas.

1.2 Evaluación del Problema

Los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), tienen problemas de caída de tensión, debido a las líneas de transmisión largas y a las cargas no lineales, para poder solucionar estos problemas, se debe de eliminar o reducir la potencia reactiva, mediantes equipos de compensación como los Bancos de Capacitores y reactores, pero estos tiene problemas con la rapidez del control de voltaje al existir variaciones de carga; pero además también hay equipos como el SVC cuyas características permiten un mejor control de los niveles de tensión del sistema, ofreciendo un control rápido y continuo sobre la inyección y absorción de potencia reactiva. Hoy en día con el avance de la electrónica de potencia ha sido posible tener dispositivos de control de voltaje con mejores características que los empleados anteriormente, este el caso del STATCOM, que es un equipo de compensación síncrono.

1.3 Alcances

El presente informe de suficiencia comprenderá lo siguiente:

- Regulación de tensión.
- Nueva tecnología de compensación (Statcom).
- Métodos de control del Statcom.
- > Aplicaciones del Statcom
- Simulación.

1.4 Introducción

Unos de los primeros en realizar trabajos en el campo de la Compensación es el MSSE Laslo Gyugyi, él se recibió en la Universidad Tecnológica de Budapest, y prosiguió

sus estudios de matemáticas en la Universidad de Londres, Inglaterra e Ingeniería en la Universidad de Pittsburg PA (MSEEE 1967) y en la Universidad de Selford, Inglaterra (Phd 1970).

El Dr. Gyugyi tiene 67 patentes en EE.UU. y es coautor del libro "Energía estática de cambiadores de frecuencia" y autor de la sección de "Potencia de cambiadores de frecuencia" en dos manuales de ingeniería eléctrica y tiene más de 30 publicaciones de la sociedad técnica.

Desde principios de los 90, el concepto de "Calidad de Potencia" ha ido ganando cada vez más notoriedad dentro del ámbito de la Ingeniería Eléctrica, y hoy día, se ha convertido en una cuestión de sumo interés tanto para las compañías productoras y distribuidoras, como para los fabricantes de equipos y los consumidores finales. Aunque el término "calidad de potencia" resulta familiar entre los ingenieros eléctricos, su uso no está exento de críticas, ya que no se puede hablar de la calidad de una magnitud física como es la potencia. En el IEEE (IEEE – Instituto de Ingeniería de Electricidad y Electrónica), el término calidad de potencia ha ganado un estatus oficial, como lo refleja el comité IEEE SCC22 (IEEE SCC-22 – IEEE), el cual coordina las necesidades de estandarización en esta área. El diccionario del IEEE, basándose en el estándar IEEE paginas 1100-1999, ofrece la siguiente definición para este término: "La calidad de potencia es el concepto de alimentación y puesta a tierra de un equipo sensible en la manera apropiada para la operación de aquel equipo". A pesar de que esta definición resulta algo restrictiva, el IEEE utiliza el concepto de calidad de potencia de una manera más general, y el SCC-22 también cubre los estándares relacionados con la polución armónica creada por las cargas. Por otro lado, el organismo internacional para el desarrollo de normativa en Ingeniería Eléctrica, el IEC (IEC-Comisión Electrotécnica Internacional), no suele hablar de calidad de potencia en sus estándares, y en su lugar utiliza el término "Compatibilidad Electromagnética, EMC" (EMC-Compatibilidad Electromagnética). Aunque el significado de ambos términos es diferente, existe un marcado solapamiento entre ellos.

Además el concepto de FACTS se basa en la incorporación de dispositivos y métodos de electrónica de potencia en el lado de alta tensión de la red, para hacerla electrónicamente controlable. FACTS parece una forma de capitalizar los grandes avances que han tenido lugar en el área de electrónica de potencia de alta tensión y elevada corriente con el objetivo de incrementar el control de los flujos de potencia en el lado de alta tensión de la red, tanto durante el funcionamiento en régimen permanente como en

condiciones transitorias.

Muchas de las ideas y experiencias sobre las cuales se asientan los equipamientos FACTS, se desarrollaron durante un amplio período de muchas décadas. Entre estas, se encuentra la experiencia que se ha obtenido con el transporte HVDC y la compensación electrónica de potencia reactiva. No obstante, FACTS, como filosofía integrada, es un concepto que ha producido sus frutos durante los ochenta en el EPRI.

Las soluciones que se adopten para mejorar la calidad de la energía (PQ-Calidad de Potencia) en el lado de la carga son de gran importancia cuando los procesos de producción se vuelven más complicados y requieren un alto nivel de responsabilidad, la cual incluye aspectos tales como proporcionar energía sin interrupciones, sin distorsión armónica y con una regulación de tensión dentro de un margen muy pequeño. Los dispositivos que pueden cumplir con estos requerimientos son los "Potencia Personalizada", un concepto que podríamos incluir entre los FACTS, pero que es diferente debido a su uso final. De hecho las topologías que emplean son idénticas a las de los dispositivos FACTS con ligeras modificaciones y adaptaciones a los niveles de tensión, por lo tanto se orientan más al uso en redes de distribución de baja y media tensión, reemplazando a veces a los filtros activos.

Los desarrollos recientes en los sistemas eléctricos de potencia tales como la desregularización, acceso abierto y cogeneración están creando escenarios de congestión en la transmisión y forzando las interrupciones. Además construir nuevas líneas de transmisión es una solución prácticamente imposible debido a problemas ambientales y otras consideraciones, por ello es necesario desarrollar nuevas propuestas para el funcionamiento y control de los sistemas de potencia para soportar las sobrecargas y para un eficiente y fiable funcionamiento. Sistema Flexible de transmisión Corriente Alterna (FACTS), con el subyacente concepto de un control independiente del flujo de potencia activa y reactiva, ofrece una alternativa atractiva para alcanzar estos objetivos.

La utilización de convertidores estáticos de potencia en las redes de electricidad tiene el potencial de incrementar la capacidad de transmisión de las líneas eléctricas y mejorar la calidad de suministro de la energía eléctrica. Los dispositivos utilizados para conseguir esto, son los FACTS (Sistema Flexible de transmisión Corriente Alterna). La tecnología FACTS tiene una colección de controladores que se pueden usar individualmente o de forma coordinada con otros controles instalados en la red, permitiendo así un mayor beneficio en las características de control de las redes.

Los controladores FACTS ofrecen la gran oportunidad de regular la transmisión de corriente alterna (AC), incrementando o disminuyendo el flujo de potencia en líneas específicas y respondiendo casi instantáneamente a los problemas de estabilidad. La potencialidad de esta tecnología se basa en la posibilidad de controlar el flujo de potencia y la capacidad de conectar redes que no están adecuadamente interconectadas, dando la posibilidad de la venta de energía entre agentes distantes.

La nueva realidad de hacer que la red de potencia se controle electrónicamente, ha venido a modificar la forma de pensar y, también, los procedimientos que se tenían en la planificación y funcionamiento de las redes de transporte y distribución en muchas partes del mundo. Las fuerzas que conducen estas tendencias son la desregulación de los mercados mundiales de electricidad, el desarrollo de los procesos productivos que requieren fuentes de energía libres de perturbaciones (por ejemplo, fabricación de láminas de plástico o de semiconductores), y requerimientos medioambientales. Asimismo, es preciso enfatizar la importancia que supone una eficiente transmisión y consumo de electricidad, lo cual a veces aconseja tomar ciertas medidas como pueden ser, por ejemplo, la instalación de líneas de transporte adicionales.

Actualmente la tecnología de los FACTS tiene éxito y se sigue poniendo en práctica en sitios de transmisión en los Estados Unidos (USA). Los controladores FACTS instalados han proporcionado nuevas posibilidades y una flexibilidad si precedentes con la intención de maximizar la utilización del equipo de transmisión de manera eficiente y confiable.

Además el estado de desarrollo y el desarrollo en marcha de los controladores FACTS es el siguiente:

- ➤ Capacitor en serie controlado por tiristores (TCSC) "Controlador de Impedancia de la Línea" TCSC de 208 Mvar en la Subestación Slatt (BPA)
- ➤ Compensador (STATCOM) "Controlador de la Tensión": STATCOM de ±100Mvar en la subestación de Sullivan (TVA).
- ➤ Controlador unificado del flujo de potencia (UPFC) "Controlador de todos los parámetros de transmisión": ±160MVA en derivación y ±160MVA en serie en la subestación de Inés (AEP).
- ➤ Compensador estático convertible (CSC) "Compensador flexible multifuncional" de ±200MVA en la subestación Marcy (NYPA)

1.5 Aspectos Generales

El SEP generalmente está diseñado para que ciertas variables se puedan modificar por medio de algún tipo de dispositivo. La acción del control se logra mediante la coordinación de todos los dispositivos de control que se encuentran instalados en el sistema. El objetivo general del sistema de control se puede resumir como sigue:

- > Protección de las partes importantes del equipo y la integridad del sistema.
- > Continuidad del servicio con alta calidad.
- Operación segura del sistema.
- Operación económica y ambiental aceptable del sistema.
- > Control en estado de emergencia.
- Restauración del control en el menor tiempo posible.

Como una regla, la acción de control se basa en la información obtenida desde alguna medición directa y/o remota. Cada uno de los dispositivos de control requiere cierto tipo de información basada en las siguientes consideraciones.

- > Requerimientos de velocidad de respuesta.
- ➤ Impacto de la acción del control (por ejemplo global vs local)
- > Importancia relativa de las diferentes partes de la información (local vs remota).

El mantener un perfil de voltaje satisfactorio en la red es un problema típico de control en sistemas de potencia. El voltaje programado en terminales del generador se alcanza por medio de un control con retroalimentación local para el excitador. Los puntos de ajuste en el lazo de retroalimentación son los valores del voltaje programado, y se establecen tomando en consideración una amplia gama de condiciones de operación del sistema. En la mayoría de los casos, el análisis fuera de línea conduce a los valores de voltaje programados. Los centros modernos de control de energía (ECC) tienen la capacidad de procesar información global en línea y actualizar los puntos de ajuste del perfil de voltaje.

La función del control de la excitación es regular el voltaje del generador y la salida de potencia reactiva al sistema. Es decir, el propósito principal del control del sistema de generación es balancear la generación total del sistema contra la carga y las pérdidas, de tal forma que la frecuencia deseada y el intercambio de potencia con los sistemas vecinos se mantenga en los niveles establecidos.

Los controles de las líneas de transmisión incluyen dispositivos de control de voltaje y potencia, como por ejemplo los Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna (dispositivos FACTS). Estos controles contribuyen a satisfacer los

requerimientos de operación del SEP manteniendo los voltajes, frecuencia y otras variables de interés del sistema dentro de límites aceptables. También tienen un profundo efecto en el desempeño dinámico del sistema y tienen la habilidad para hacer frente a disturbios. El objetivo de control es operar tan eficientemente como sea posible con voltajes y frecuencia cercanos a los valores nominales. Cuando se desarrolla una condición anormal, se deben de satisfacer nuevos objetivos para regresar al sistema a su condición de operación normal.

Por lo tanto, un diseño correcto y una operación satisfactoria del sistema de potencia deben incluir los siguientes requerimientos fundamentales.

- ➤ El sistema debe ser capaz de satisfacer los continuos cambios en la demanda de potencia activa y reactiva. A diferencia de otros tipos de energía, la electricidad no puede ser almacenada convenientemente en cantidades apropiadas para la demanda.
- ➤ El sistema debe suministrar energía al mínimo costo y con un mínimo de impacto ecológico.
- ➤ La calidad del suministro de potencia debe cumplir ciertos estándares mínimos considerando: frecuencia constante, voltaje constante y nivel de confiabilidad elevado.

1.6 Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna (FACTS)

Los dispositivos FACTS son una parte de la revolución de la electrónica de potencia que toma lugar en todas las áreas de la ingeniería eléctrica. Esta variedad de poderosos dispositivos semiconductores no únicamente ofrecen ventajas de alta velocidad y confiabilidad en la conmutación sino, lo que es más importante, la posibilidad de trabajar en conjunto en un concepto de circuitos innovadores que mejoran las características de la energía eléctrica.

La tecnología de FACTS abre nuevas oportunidades para controlar la potencia y mejorar el aprovechamiento de la capacidad instalada en la red de transmisión. El uso de dispositivos FACTS permite el control correspondiente al flujo de potencia a través de ciertas líneas, para incrementar la capacidad de transmisión de potencia bajo condiciones de operación normal y de contingencia del sistema.

Estas oportunidades se alcanzan por medio de la habilidad de los dispositivos FACTS para controlar los parámetros interrelacionados que rigen la operación de los sistemas de transmisión incluyendo la impedancia serie, la impedancia en derivación, la corriente, el voltaje, el ángulo de fase y el amortiguamiento de oscilaciones a diferentes frecuencias por

debajo de la frecuencia nominal. La tecnología FACTS no es únicamente un controlador de alta potencia, sino una colección de controladores, que se pueden aplicar individual o coordinadamente con otros controles instalados en la red permitiendo así un mejor aprovechamiento de sus características de control.

El objetivo de los dispositivos FACTS de incrementar la capacidad de transmisión de potencia implica que una línea de transmisión dada pueda ser capaz de operar cerca de sus límites térmicos, permitiendo que circule una mayor cantidad de corriente a través de su impedancia serie. Al mismo tiempo, debe mantener la estabilidad del sistema por medio de un control apropiado en tiempo real del flujo de potencia durante y después de una falla en el sistema.

El segundo objetivo de los dispositivos FACTS implica que, al ser capaces de controlar la corriente en una línea (por ejemplo, cambiando la impedancia efectiva de una línea), el flujo de potencia puede ser restringido seleccionando corredores de transmisión. Se encuentra implícito en este objetivo que la trayectoria de flujo de potencia primaria debe ser rápidamente modificable a una trayectoria secundaria, disponible bajo condiciones de contingencia para mantener los requerimientos globales de potencia.

La implementación de los dos objetivos anteriores requiere el desarrollo de compensadores y controles de alta potencia. La tecnología necesaria para esta tarea es la electrónica de potencia con su control operando en tiempo real. Sin embargo, una vez que un gran número de estos dispositivos se integran al sistema, la coordinación y control global para proporcionar máximos beneficios al sistema y prevenir interacciones indeseables con los diferentes objetivos y configuraciones del sistema, cubriendo condiciones de operación normal y de contingencia, presentan una nueva tecnología poco explorada. Esta tecnología debe desarrollar estrategias apropiadas de control y optimización del sistema, sistemas de comunicación adecuados y protocolos de seguridad convenientes. La realización de tal control optimizado del sistema se puede considerar como el tercer objetivo de los dispositivos FACTS.

CAPITULO II COMPENSACION DE POTENCIA REACTIVA.

2.1 Introducción

El control de voltaje y potencia reactiva constituye una de las áreas de mayor interés en la Planeación y operación de un sistema eléctrico de potencia. La importancia del control V — Q proviene básicamente de la necesidad de satisfacer los requerimientos de calidad en el suministro de energía eléctrica. Adicionalmente, un control adecuado de voltaje y potencia reactiva permite obtener beneficios importantes en la operación del sistema de potencia como la reducción de los gradientes de voltaje, una utilización más eficiente de las capacidades de transmisión y el aumento en los márgenes de estabilidad.

El objetivo del control de voltaje es ajustar todos los voltajes nodales dentro de una banda operativa. Esto hace que la solución del problema sea más compleja, comparada con el control de frecuencia, ya que se tiene un problema multivariable. Es conveniente recordar que en estado estable se tiene un valor de frecuencia único en el sistema, en cambio todos los voltajes nodales pueden ser diferentes.

Con el desarrollo de los grandes proyectos de generación alejados de los centros de consumo, así como el empleo de niveles de tensión más elevados, es necesario llevar a cabo un análisis detallado, de modo de balancear la potencia reactiva, y por lo tanto tener un control de voltaje adecuado. Para éste análisis es necesario tener en cuenta limitantes no únicamente técnicas, sino además el impacto social, ambiental y económico que determina el uso de dispositivos de compensación de potencia reactiva o la construcción de nuevas líneas de transmisión. El balance de la potencia reactiva debe lograrse idealmente dentro de cada región de un sistema de potencia, en cada subsistema de transmisión y en cada zona de distribución. Sin embargo, en la práctica, esto no siempre se logra por una u otra razón.

2.2 Conceptos básicos del flujo de potencia reactiva en SEP

Un aspecto fundamental de la compensación y control de la potencia reactiva es su

balance. Las líneas de transmisión producen y consumen potencia reactiva; y el valor neto debe ser absorbido o generado por el sistema en cada una de las terminales de la línea. La capacitancia en derivación de la línea de transmisión produce potencia reactiva proporcional al cuadrado del voltaje. Puesto que el voltaje debe mantenerse en el rango de ± 5% del voltaje nominal, la producción o consumo de potencia reactiva es relativamente constante. La inductancia serie de la línea de transmisión consume potencia reactiva proporcional al cuadrado de la corriente. Puesto que la corriente varía desde los períodos de demanda máxima a los períodos de demanda mínima, se modifica también el consumo de potencia reactiva por la línea de transmisión. Por lo tanto, el flujo de potencia reactiva neta de la línea de transmisión cambia con el ciclo de carga. El modelo de la línea de transmisión se muestra en la Figura. 2.1, donde B es la susceptancia en derivación.

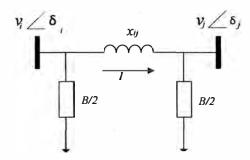


Figura 2.1: Modelo π de una línea de transmisión.

Producción de la línea de transmisión = v^2B (relativamente constante)

Consumo de la línea de transmisión = I² X_{ij} (variable)

A medida que la relación x/r aumenta (sistemas de transmisión de alta tensión donde r es la resistencia de la línea de transmisión y x su reactancia) y el factor de potencia se modifica, el efecto de la corriente reactiva es mayor en el cambio de voltaje.

Esto se deduce de la ecuación. (2.1) al analizar el diagrama fasorial de la Figura 2.2, donde $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_i$.

$$\Delta v \cong \frac{P}{V_j} r + \frac{Q}{V_j} x \tag{2.1}$$

Figura 2.2: Diagrama fasorial con factor de potencia en atraso

Para diferencias angulares pequeñas, la potencia reactiva tiende a circular del nodo de mayor voltaje al nodo de menor voltaje, esto está determinado por la ecuación de flujos de potencia reactiva (2.2), para la línea de transmisión mostrada en la Figura.2.3.

$$Qij \cong \frac{vi}{xij}(vi - vjcos\delta) \tag{2.2}$$

donde $\delta = \delta_i - \delta_j$

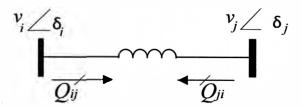


Figura 2.3: Flujo de reactivos en una línea de transmisión

Las pérdidas en la línea de transmisión se pueden calcular por medio de la expresión:

$$Q_p = Q_{ij} + Q_{ji} \tag{2.3}$$

Sustituyendo las ecuaciones de Q_{ij} y Q_{ji} resulta:

$$Q_{ij} \cong \frac{v_i^2}{x_{ij}} + \frac{v_j^2}{x_{ij}} - \frac{2v_i 2v_j}{x_{ij}} \cos \delta$$
 (2.4)

Las pérdidas reactivas en (2.4) dependen en forma aproximada de la diferencia de voltajes al cuadrado. Del análisis de las ecuaciones de flujo de reactivos en una línea de transmisión, se pueden resumir los siguientes puntos fundamentales:

- ➤ El flujo de reactivos produce una caída de tensión que depende de la reactancia del elemento de transmisión.
- ➤ La diferencia de voltajes incrementa el consumo de potencia reactiva en la reactancia del elemento.
- Las pérdidas reactivas tienen un comportamiento no-lineal, con cambios crecientes al tener una diferencia de voltaje mayor.
- ➤ La distribución de flujos reactivos en los extremos de la línea depende de la corriente de carga y del consumo de reactivos en la reactancia de la línea de transmisión.

En un sistema de potencia los nodos de voltaje controlado actúan como compensadores de potencia reactiva suministrando los reactivos necesarios, de acuerdo a las variaciones de la demanda, de forma tal que se mantenga el voltaje especificado. El resultado de modificar el voltaje de generación es un cambio en el flujo de reactivos. Por lo tanto, se tiene un intercambio de potencia reactiva entre generadores, y como consecuencia se altera el perfil de voltaje del sistema. La efectividad del cambio (mejoramiento del perfil de voltaje), depende de que se reduzca el flujo de reactivos en las

trayectorias de mayor impedancia.

De acuerdo a los conceptos presentados se puede concluir que el problema básico para evitar la degradación del perfil de voltaje es, eliminar o reducir el flujo de potencia reactiva en el sistema a través de largas distancias. Debido a que esto involucra: mayores caídas de voltaje, complicación en el control del mismo y mayores pérdidas, resultado de corrientes más elevadas. Por lo tanto, implica mayores costos de operación y utilización innecesaria de la capacidad térmica de los equipos principalmente transformadores y conductores. Es importante señalar que en estado estable los controles mantienen el voltaje del nodo controlado en un valor especificado. En cambio, ante perturbaciones, se tienen cambios en los voltajes y el regreso a los valores de referencia depende de la respuesta dinámica del sistema de excitación y de la respuesta de control del dispositivo utilizado. En forma natural se tiene la tendencia a suministrar la potencia reactiva requerida por la carga a través de las líneas con menor impedancia. La ecuación (2.5) muestra que la relación de flujos reactivos depende de las reactancias de las ramas, Figura. (2.4).

$$\frac{Q_{ij}}{Q_{kj}} = \frac{x_{kj}}{x_{ij}} \tag{2.5}$$

Donde se considera que los voltajes $v_i = v_k$; $\delta_{ij} = \delta_{kj}$.

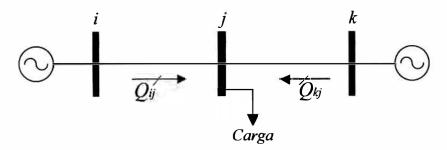


Figura 2.4: Sistema Eléctrico de Potencia de 2 máquinas

La necesidad de fuentes controlables de potencia reactiva se puede resumir fundamentalmente en tres puntos esenciales.

- 1. Controlar el voltaje en valores cercanos al nominal. Al ocurrir cambios súbitos de carga o de topología puede requerirse corregir el voltaje en unos cuantos ciclos. Para otras variaciones de voltaje la corrección puede hacerse en segundos. Si no se corrigen las desviaciones de voltaje, aunque sean temporales, se puede ocasionar daño a los equipos de los usuarios.
- 2. Regular el perfil de voltaje en la red. De manera de evitar la circulación de potencia reactiva y con ello reducir pérdidas de energía aprovechando mejor la capacidad del equipo de transmisión y transformación.

3. Mantener el sincronismo de los generadores. El control de voltaje mediante fuentes controlables de potencia reactiva tiene efectos estabilizadores sobre el sistema de potencia, ante la ocurrencia de disturbios que provocan que los rotores cambien sus posiciones relativas. Las fuentes de reactivos pueden mejorar tanto la estabilidad transitoria como la estabilidad de pequeña señal.

Esto es, la tarea del control de voltaje en niveles de transmisión es compartida por diferentes medios de control y técnicas de operación. El control puede realizarse en forma discreta mediante equipo de compensación pasiva en derivación, por ejemplo, reactores y capacitores equipados con interruptores mecánicos; cambios en las derivaciones de transformadores; con maniobras de operación, tales como apertura y cierre de líneas de transmisión. Otra alternativa es por medio de compensación capacitiva serie.

Sin embargo en forma continua, el control de voltaje se puede efectuar básicamente por los Reguladores Automáticos de Voltaje (RAV) de las máquinas síncronas, Condensadores Síncronos (CS) y mediante la instalación de dispositivos basados en electrónica de potencia como pueden ser el Compensador Estático de Reactivos (SVC), el Compensador Estático Síncrono (STATCOM) y el Controlador Unificado de Flujos de Potencia (UPFC), que se instalan en puntos estratégicos de la red de transmisión.

En la planificación para incorporar dispositivos de compensación de potencia reactiva a un sistema eléctrico de potencia se deben considerar y analizar los siguientes puntos: aplicación principal del dispositivo, dimensionamiento, tipo y localización. Las respuestas a los aspectos anteriores no son obvias o generales. Es necesario enfocarlas al sistema de potencia particular mediante estudios completos considerando distintas condiciones de operación. Los análisis deben incluir: estudios de fallas, estudios de flujos de potencia, estudios de estabilidad transitoria y de pequeña señal, estudios de transitorios y estudios de armónicas.

Es un trabajo difícil definir un programa apropiado de compensación reactiva para controlar los niveles de voltaje de un sistema con líneas de transmisión de gran longitud. Uno de los primeros problemas es decidir emplear compensación en derivación o serie, o en qué cantidad deben ser usadas cada una de ellas. Existen algunas diferencias en el desempeño de los esquemas de compensación en derivación y serie que deben ser reconocidas y estudiadas, como por ejemplo el desempeño dinámico y de estabilidad transitoria que afecta la confiabilidad de estos sistemas compensadores. Otras diferencias incluyen la riesgosa resonancia subsíncrona con capacitores serie, y los problemas de

armónicas asociados con los dispositivos basados en electrónica de potencia. Estos factores al igual que el desempeño del control de voltaje se toman en consideración en estudios de planeación y operación del SEP.

2.3 Compensador Serie

Compensar una línea de transmisión significa modificar sus características eléctricas, teniendo como objetivo incrementar su capacidad de transmisión de potencia. En el caso particular de la compensación serie, la modificación consiste en cancelar parte de la reactancia inductiva de la línea utilizando capacitores serie. Es importante mencionar que un alto grado de compensación serie acentúa problemas en la calibración de relevadores de protección y el perfil de voltaje durante fallas. Otro problema detectado en la utilización de capacitores serie es la resonancia subsíncrona, que puede producir fallas severas en las flechas de generadores y turbinas. La compensación con capacitores serie se ha relacionado tradicionalmente con la longitud de las líneas de transmisión y con el mejoramiento de la estabilidad transitoria. Sin embargo en los últimos años, los capacitores serie se aplican también a líneas más cortas para mejorar el perfil de voltaje, y pueden normalmente excluirse e insertarse rápidamente después de haber ocurrido un disturbio.

Con el desarrollo de la electrónica de potencia, se ha logrado desarrollar dispositivos FACTS para compensación serie como por ejemplo el TCSC, con el cual se puede obtener una compensación variable, que ayuda a resolver problemas de estabilidad de voltaje, mejoramiento de la estabilidad transitoria, amortiguamiento de oscilaciones de potencia y el incremento del flujo de potencia a través de las líneas de transmisión .

El TCSC es un dispositivo caracterizado por una rápida respuesta, un amplio rango de operación y una alta confiabilidad. Es un dispositivo basado en tiristores en conjunto con un banco de capacitores y reactores (inductores). La configuración más popular para este dispositivo es un capacitor fijo en paralelo con un reactor controlado por tiristores (TCR).

Un modelo básico del TCSC se muestra en la Figura. 2.5 que puede operar básicamente en tres modos:

- Modo de bloqueo o de no-conducción.
- Modo de conducción.
- > Modo vernier.

Para el modo de bloqueo o no-conducción por los tiristores no circula corriente, y los tiristores se comportan como un interruptor abierto. Si los tiristores se encuentran conduciendo en todo momento se dice que el dispositivo está operando en modo de

conducción; para este caso los tiristores se comportan como un interruptor cerrado.

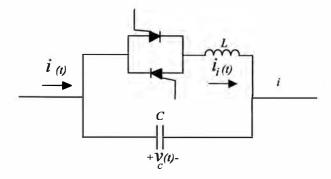


Figura 2.5: Módulo básico de un TCSC

El modo de operación donde normalmente funciona el dispositivo se denomina modo vernier. En este caso los tiristores conducen de forma parcial formando un ciclo sucesivo de encendido/apagado. En resumen se puede decir que el TCSC es un dispositivo de compensación serie versátil ya que puede variar la impedancia de la línea de una forma continua según lo requiera el SEP para mejorar el perfil de voltaje, esto se puede lograr con el control adecuado del ángulo de disparo de los tiristores.

2.4 Compensación en derivación

La idea principal de la compensación en derivación es inyectar o absorber potencia reactiva al sistema según se requiera. Los dispositivos que se encargan de llevar a cabo ésta tarea se conectan en derivación en un nodo del sistema (adecuadamente seleccionado), que sirve de soporte para controlar el nivel de voltaje en nodos vecinos. La compensación en derivación ha evolucionado rápidamente en los últimos años. Este tipo de compensación comenzó con la conexión y desconexión de bancos de capacitores y reactores por medio de interruptores mecánicos, esta conmutación tenía problemas con la rapidez del control de voltaje al existir variaciones de carga, que en algunos casos no era suficiente para un control adecuado del perfil de voltaje. En la década de los 70's se comenzó a utilizar el SVC cuyas características permiten un mejor control de los niveles de voltaje del sistema, ofreciendo un control rápido y continuo sobre la inyección o absorción de potencia reactiva al nodo compensado. En la actualidad, con el avance de la electrónica de potencia ha sido posible tener dispositivos de control de voltaje con mejores características que los empleados en décadas anteriores, este tipo de tecnología se puede ejemplificar con el STATCOM. Este dispositivo es capaz de proporcionar soporte de potencia reactiva al sistema sin la necesidad de emplear bancos de capacitores y reactores, empleando únicamente un inversor de voltaje (o corriente) que utiliza tiristores para su funcionamiento. Una gran ventaja que se tiene al utilizar la nueva tecnología es

que se obtiene una alta eficiencia y versatilidad al emplearlo en el control de voltaje.

Aun cuando la compensación en derivación constituye un medio efectivo y deseable de control V-Q, su aplicación en sistemas de potencia con propósitos de regulación de voltaje en estado estable ha sido restringida, principalmente debido a su alto costo. En sistemas débiles, en donde la rapidez y continuidad del control de voltaje son en ocasiones factores más importantes que el costo de compensación, la aplicación de éste tipo de dispositivos ha constituido una de las opciones más efectivas que permiten una mejor utilización de las capacidades de transmisión y una elevación de los márgenes de estabilidad. A continuación se presenta una breve descripción de algunos dispositivos que se emplean para la compensación en derivación.

2.4.1 Reactores y capacitores operados con interruptores mecánicos

Este tipo de dispositivos están constituidos por bancos de reactores o capacitores que se pueden conectar o desconectar al sistema por medio de interruptores mecánicos. La característica de éstos, es que el suministro de potencia reactiva al SEP aumenta si el voltaje en el nodo del SEP disminuye por debajo del valor de referencia. De la misma forma si el voltaje en el nodo de la red tiene un valor por arriba del valor de referencia, el dispositivo absorbe potencia reactiva del sistema. Así, estos elementos en derivación tienden a mantener el voltaje del sistema en un rango de operación específico.

Por otro lado, un generador estático de reactivos (SVG) es una combinación de bancos de capacitores y reactores estáticos en derivación que se integran mediante interruptores y controles, que permiten soporte en estado estable y dinámico para el control de voltaje. Este generador puede tener características tan buenas o mejores que un generador rotatorio de reactivos cuando opera en su rango de control. Si se excede el rango de control el efecto depende de sí el sistema resultante es equivalente a un reactor o un capacitor estático en derivación.

2.4.2 Condensador Síncrono

Los condensadores síncronos han tenido un papel relevante en el control de voltaje y potencia reactiva por casi seis décadas. Se conectan a niveles de tensión tanto de subtransmisión como de transmisión para controlar los voltajes en los límites deseados ante condiciones variantes de carga, en situaciones de contingencia y para mejorar la estabilidad. Por razones económicas muchas aplicaciones en el área de subtransmisión se han reemplazado por capacitores en derivación. Los condensadores síncronos tienen una ventaja inherente (los CS tienen salida de potencia reactiva instantánea) sobre los

capacitores para soportar el voltaje en emergencia y mantener o aumentar su salida a voltaje reducido. Esto ha motivado su instalación a niveles de voltaje de transmisión, donde se pueden requerir grandes capacidades de reactivos (MVARs). Otra aplicación primaria para los condensadores síncronos es en la transmisión de corriente directa donde suministran una parte de los requerimientos de potencia reactiva de las estaciones convertidoras, y proveen el refuerzo necesario al sistema cuando la capacidad de cortocircuito es baja. Funcionalmente, un condensador síncrono es igual que un generador síncrono que se lleva a velocidad nominal y se sincroniza al sistema de potencia. Una vez que la unidad está sincronizada, el campo se controla ya sea para generar o absorber potencia reactiva, según lo requiera la red eléctrica.

2.4.3 Compensador Estático de Reactivos (SVC)

Los compensadores estáticos de reactivos generalmente están integrados por bancos de capacitores y/o reactores, es decir elementos pasivos. Con el uso de la electrónica de potencia y estrategias de control adecuadas se logra una respuesta sumamente rápida (lciclo) para conectar elementos en derivación. La conexión/desconexión de capacitores se realiza en forma discreta mediante el control de tiristores en los períodos de conducción. La conexión de reactores se efectúa en forma controlada variando el ángulo de disparo de los tiristores, logrando de esta forma el control continuo de la corriente del reactor.

En los sistemas de transmisión las características adecuadas de control de voltaje y potencia reactiva con SVCs son por lo general obtenidas en base a estrategias de control de lazo cerrado. Haciendo la distinción de las diferentes jerarquías de operación, el esquema de control del SVC consiste de un lazo primario de regulación de voltaje y en algunos esquemas de compensación, un lazo secundario superpuesto de control de potencia reactiva. Del análisis del lazo de control se determinan las características casiestáticas de operación o de estado estable del SEP, Figura. 2.6.

Asimismo, del análisis de la función de transferencia de lazo cerrado se establecen las características de estabilidad del lazo de control y su dependencia respecto del estado de operación del SEP. La lógica de control queda determinada por un controlador de voltaje cuya forma más simple es de característica proporcional, que traduce la señal de error en una señal de cambio en la susceptancia del compensador, donde I_{SVC} es la corriente que circula de las terminales del SVC al sistema, B_{SVC} es la susceptancia equivalente del SVC, v_t es el voltaje en terminales del SEP, V_v es la señal proporcional a

la magnitud del voltaje en terminales, $G_m(s)$ es la función de transferencia del dispositivo de medición, $G_r(s)$ es la función de transferencia del controlador de voltaje, y $G_y(s)$ esquema de control de disparo en tiristores.

Desde el punto de vista de operación, la característica de interés es la relación entre el voltaje en terminales y la corriente aportada por el compensador, esto es:

$$I_{SVC} = B_{SVC} *V (2.6)$$

Dónde: Isvc = Corriente del SVC y Bsvc = Subceptancia del Statcom.

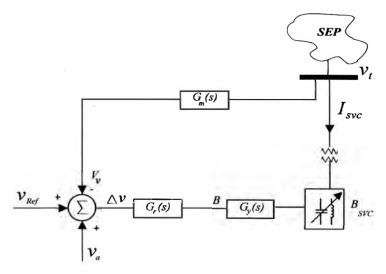


Figura 2.6: Esquema de control de un SVC Empleando retroalimentación de voltaje

La representación gráfica de la ecuación. (2.6) se conoce como la curva característica de control en estado estable de un compensador estático. Su determinación es importante ya que define la operación del SVC dentro del rango lineal de control. La curva característica de operación del compensador se muestra en la Figura. 2.6 y es función de los dos parámetros de control en estado estable: del voltaje de referencia v_{ref}, y de la

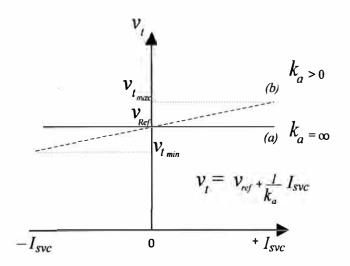


Figura 2.7: Característica de operación de un SVC

pendiente ajustable de la curva de operación. k_a es la ganancia del controlador; el voltaje se regula de acuerdo a ésta pendiente característica. La pendiente se relaciona con la ganancia en estado estable y es generalmente de 1-5% sobre el rango de control.

Se pueden realizar dos formas de control de voltaje de acuerdo a la selección de la pendiente figura 2.7:

- 1. Control rígido (plano) de voltaje. En éste esquema se requiere una ganancia del regulador de voltaje infinita, implicando un voltaje constante en terminales del compensador para cualquier condición de operación.
- 2. Control polarizado de voltaje. En éste esquema la ganancia del regulador de voltaje tiene un valor finito positivo, permitiendo una cierta variación en la magnitud del voltaje alrededor del valor de referencia.

Para ganancias grandes del controlador de voltaje se obtienen pendientes pequeñas de la curva característica, aumentando así la rapidez de respuesta del compensador. Un efecto similar se logra al disminuir el valor de las constantes de tiempo del controlador. El segundo factor que influye en la respuesta del SVC es la capacidad de cortocircuito del sistema de potencia. Es importante mencionar que para estudios de regulación de voltaje la característica de operación del SEP se define por su equivalente de Thevenin visto desde el nodo compensado, donde la impedancia del sistema se considera aproximadamente igual a la reactancia de cortocircuito. La respuesta del compensador es muy rápida para las condiciones más débiles de operación. Es decir, para un sistema con menor capacidad de cortocircuito. Respectivamente un aumento en el nivel de cortocircuito se traduce en una respuesta más lenta del compensador. El valor de la pendiente se determina en base a estudios dinámicos y de estado estable del sistema de potencia. Por lo tanto, prácticamente los requerimientos de estabilidad y tiempo de respuesta del lazo de control, deben determinarse mediante una selección apropiada de la constante de tiempo del regulador de voltaje.

La curva característica consta de tres zonas o rangos de control que son de interés:

- 1. Una zona lineal de operación definida por el esquema de control del compensador. El voltaje en terminales del SVC es regulado entre sus límites mínimo y máximo de operación Vt_{min} y Vt_{máx}, respectivamente.
- 2. Una zona de operación de bajo voltaje. En ésta el compensador opera en su límite mínimo de control, perdiendo así su capacidad como elemento de regulación de voltaje. Esta zona vista desde el sistema de potencia indica que la operación del SVC está

determinada por la capacidad nominal de su rama capacitiva, con el voltaje en terminales variando entre cero y Vt_{min}, de acuerdo a los requerimientos del sistema eléctrico.

3. Una zona de operación de sobre-voltaje. En ésta el compensador opera en su valor máximo de control, surgiendo una característica de variación de voltaje en terminales del SVC, correspondiente al de un reactor fijo con una capacidad nominal igual a la rama inductiva del SVC.

En forma analítica, la característica de regulación de voltaje del compensador en su rango nominal de operación se expresa mediante la relación (ecuación 2.7).

$$V_t = V_{ref.} + m*I_{SVC}$$
 (2.7)

Siendo m la pendiente de la curva característica e I_{SVC} satisface las restricciones (ecuación 2.8).

$$Is_{min} < I_{SVC} < Is_{max}$$
 (2.8)

Donde Is_{min} y Is_{máx} representan respectivamente, las capacidades nominales de inyección de corriente en las ramas capacitiva e inductiva del compensador.

De acuerdo al control del compensador la operación del SVC en la zona de bajo voltaje corresponde un capacitor fijo, descrita por la relación (ecuación 2.9).

$$I_{SVC} = B_{Smin} * V_t \tag{2.9}$$

Donde Bs_{min} representa la capacidad nominal de la rama capacitiva del SVC.

En el rango de sobre voltaje la característica de operación del SVC corresponde por tanto al de un reactor fijo de capacidad Bs_{min} con la ecuación 2.10.

$$I_{SVC} = B_{Sm\acute{a}x} * Vt \tag{2.10}$$

En general, solamente la operación del compensador dentro de su rango nominal de control representa una característica deseable de regulación de voltaje, considerándose las otras dos como modos degradados de operación.

2.4.4 Compensador Estático Síncrono (STATCOM)

Su nombre proviene de Static Compensator, es un compensador estático sincrónico, no tiene inercia y esto hace que tenga una dinámica mejor, menor inversión y menores costes de mantenimiento. Sus principales aplicaciones son:

- > Aumento de la transmisión de energía y menores variaciones de tensión (estabilización de la tensión dinámica).
- > Mejor estabilidad en régimen transitorio, mejor amortiguamiento del sistema de transmisión, amortiguamiento de SSR (mejora de la estabilidad sincrónica).
- Equilibrio dinámico de carga.

- Mejora de la calidad de la energía.
- > Soporte de tensión en régimen permanente.

Un STATCOM está compuesto de un condensador en el lado de continua y de tiristores con capacidad de desconectarse, como los GTO, IGCT o IGBT, que pueden actuar a elevadas frecuencias (Figura 2.8). Suele llevar un transformador de acoplamiento. Es posible controlar la tensión del convertidor, por lo tanto, también la energía reactiva. Las válvulas de este convertidor se abren y cierran siguiendo impulsos de tipo PWM, de modo que se puede conectar cualquiera de las tres fases a uno de los dos bornes del condensador. La secuencia de conmutación suele seguir el sistema SVPWM (Space Vector Modulation) ya que se generan menos harmónicos.

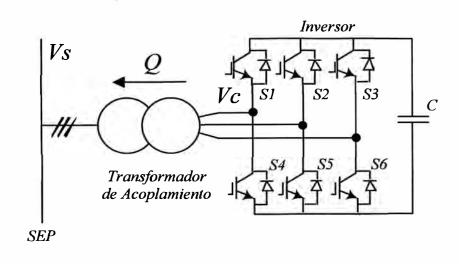


Figura 2.8: Esquema de un Statcom

CAPITULO III COMPENSADOR SINCRONO ESTATICO (STATCOM)

3.1 Introducción

El STATCOM es un dispositivo conectado en derivación que no emplea bancos de capacitores o reactores para producir potencia reactiva como es el caso del SVC. En el STATCOM, el banco de capacitores se usa para mantener un voltaje constante de CD para la operación del inversor de voltaje. El STATCOM es un dispositivo muy adecuado para el control del voltaje puesto que rápidamente puede inyectar o absorber potencia reactiva para estabilizar las variaciones de voltaje. La habilidad del STATCOM para mantener un nivel de voltaje predeterminado por medio de compensación de potencia reactiva ha mostrado mejorar la estabilidad transitoria y el amortiguamiento de oscilaciones subsíncrona.

3.2 Inversor Trifásico de 6 pulsos

El inversor de seis pulsos, es un inversor trifásico en el cual las amplitudes de las tensiones de salida son controladas regulando el valor de la tensión DC de entrada al inversor a través de un rectificador controlado cuya tensión es filtrada por un filtro pasa bajos de tipo L, C como se muestra en la figura 3.1.

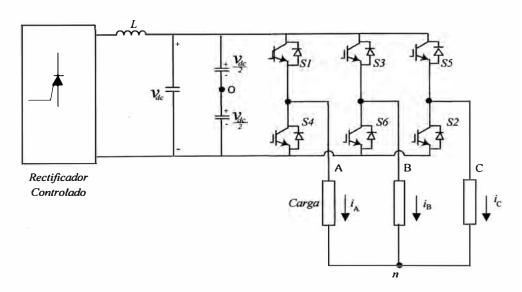


Figura 3.1: Inverso de Trifásico de seis pulsos

La operación del inversor se puede explicar con la ayuda de la figura 3.1. Específicamente, las señales de control para cada uno de los seis interruptores se muestran en la Figura 3.2. Evidentemente, cada interruptor se mantiene en 180 ° para todos los 60 ° y un nuevo interruptor se enciende y uno de los grupos anteriores se apaga. En un momento dado, un interruptor de cada fase está encendido.

Asumiendo el punto medio ficticio (O) esté disponible, tres formas de onda cuadrada de tipo para la V_{AO} , V_{BO} , y V_{CO} se pueden extraer, como se muestra en la Figura 3.3. Cada una de las formas de onda de voltaje tiene dos valores máximos de $\frac{v_{dc}}{2}$, y $-\frac{v_{dc}}{2}$, y son desplazados en 120 ° el uno del otro. De las tres formas de onda V_{AO} , V_{BO} , y V_{CO} , el voltaje de línea a línea de formas de onda se pueden extraer de las ecuaciones 3.1, 3.2 y 3.3:

$$V_{AB} = V_{AO} - V_{BO} (3.1)$$

$$V_{BC} = V_{BO} - V_{CO} (3.2)$$

$$V_{CA} = V_{CO} - V_{AO} (3.3)$$

Las tres formas de onda resultante de la tensión de línea-línea entonces se muestran en la Figura 3.2, 3.3 y 3.4. Está claro que cada forma de onda toma tres valores (V_{cc}, 0,-V_{cc}) y hay una fase de cambio de 120° entre ellos. Estas formas de onda tienen un intervalo de 60° cuando son cero para cada mitad del período, un total de 120° por período. Cada fase puede manejar corriente en ambas direcciones en cualquier momento, ya sea desde el interruptor o del diodo anti paralelo del interruptor.

El potencial del punto neutro de carga (n) que se muestra en la Figura 3.1 con respecto al punto medio del bus de C-C (0) se dibuja en la Figura 3.4. Se puede observar que tal forma de onda tiene una frecuencia tres veces la frecuencia de salida y el doble de amplitud.

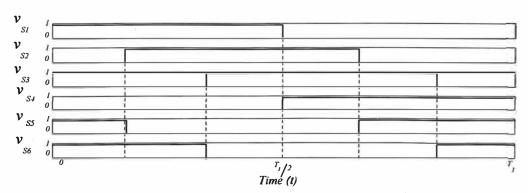


Figura 3.2: Formas de Onda del Control y desfasajes Para los interruptores S1, S2, S3, S4, S5, S6

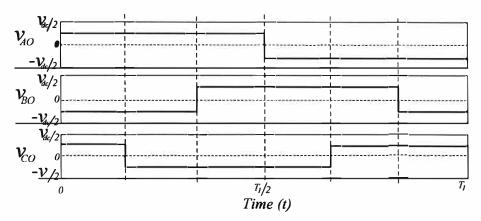


Figura 3.3: Formas de onda de tensión VAO, VBO, y VCO

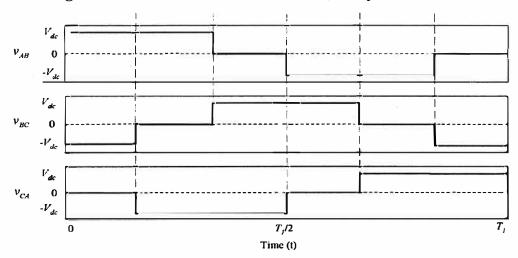


Figura 3.4: Formas de onda de la tensión de salida VAB, VBC, VCA

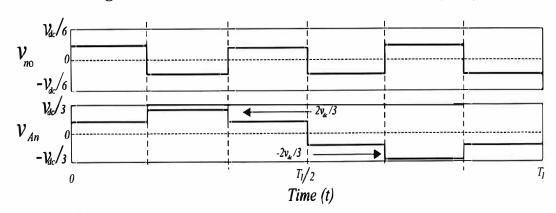


Figura 3.5: Formas de onda de la tensión Vno y VAn

Los armónicos de las formas de onda se pueden calcular utilizando las series de Fourier. La amplitud de la onda fundamental de la tensión de V_{AO} V_{BO} , y V_{CO} es:

$$(V_{AO})_1 = (V_{BO})_1 = (V_{CO})_1 = \frac{4*V_{dC}}{2*\pi}$$
(3.4)

$$(V_{AO})_h = (V_{BO})_h = (V_{CO})_h = \frac{4*V_{dc}}{2*\pi*h}$$
 h=3, 5, 7 (3.5)

En la siguiente figura 3.6, se muestra que se elimina los armonicos 3, 9 y 15. Donde h es la orden del armónico.

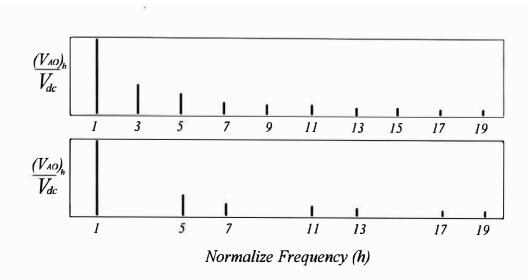


Figura 3.6: Espectro armónico de la línea de VAO y VAB

Para el voltaje de línea, la amplitud fundamental es:

$$V_{AB1} = \frac{2*\sqrt{3}}{\pi} * V_{dc} \tag{3.6}$$

y por lo tanto el valor eficaz de la componente fundamental es:

$$V_{AB1,rms} = \frac{2*\sqrt{3}}{\pi*\sqrt{2}} * V_{dc} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * V_{dc} = 0.78 * V_{dc}$$
 (3.7)

Similarmente la amplitud del voltaje del armónico es:

$$(V_{AB1})_h = \frac{2*\sqrt{3}}{\pi*h} * V_{dc} \quad h=5, 7, 11, 13$$
 (3.8)

El valor del voltaje eficaz de la Línea incluido todos los armónicos es:

$$V_{AB,rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} V_{dc}^2 * \partial \omega t} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * V_{dc} = 0.816 * V_{dc}$$
 (3.9)

El espectro normalizado de la línea al punto medio del C-C y la tensión de línea como se muestra en la figura 3.6. Se puede observar que la tensión de V_{AO}, V_{BO}, y V_{CO}, contienen todos los armónicos impares. La conexión de la carga como se muestra en la figura 3.1, no permite los terceros múltiplos armónicos, y esto se confirma en el espectro del V_{AB} de la tensión de Línea, donde el tercero, noveno y décimo quinto armónico se eliminan como se muestra en la Figura 3.6.

3.3 Modulación del Ancho de pulso PWM (Modulación de ancho de Pulso)

Esta técnica permite el accionamiento de los semiconductores de potencia para controlar la magnitud y frecuencia de la tensión de salida. Además permite controlar el contenido armónico reduciéndolo, mejorando la calidad de la onda de tensión. Los métodos de modulación del ancho de pulso se pueden dividir dos tipos realimentados y no realimentados.

Entre los métodos no realimentados se puede mencionar:

- La modulación sinusoidal natural SPWM (analógico).
- La modulación sinusoidal por muestreo regular simétrico y asimétrico (digital).
- La modulación por eliminación selectiva de armónicos. SHEPWM.
- La modulación por vector espacial SVPWM.
- La modulación por técnicas de optimización.

3.3.1 Modulación Sinusoidal (SPWM)

Cuando es necesario que la corriente presente muy baja distorsión como es el caso de las máquinas herramientas el uso del modulador PWM en combinación con controlador de corriente lineal es preferible que el control on-off de corriente, figura 3.7.

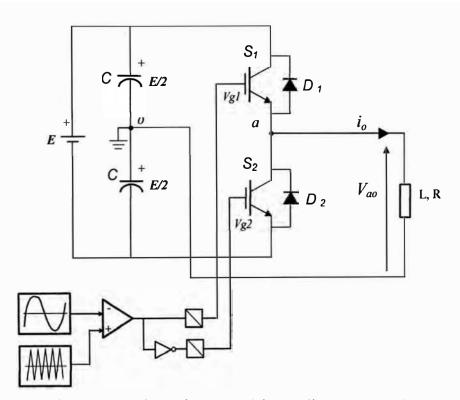


Figura 3.7: Inversor de tensión monofásico medio puente con SPWM

A continuación se muestra figura 3.8, las señales de la modulación senoidal SPWM para IM = 0.8, donde se muestra la señal triangular y la señal de control.

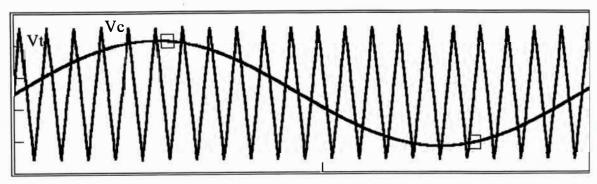


Figura 3.8: Modulación Senoidal SPWM para IM = 0.8

Se muestra en la figura 3.9. y 3.10, en la se muestra las señales de control de modulacion Vg1 y Vg2, que haran activar y apagar las llaves del inversor en estado ON y OFF.

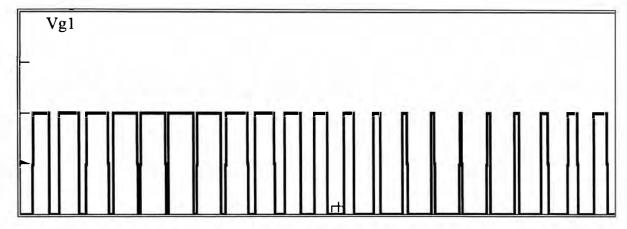


Figura 3.9: Señales de control del modulador 1

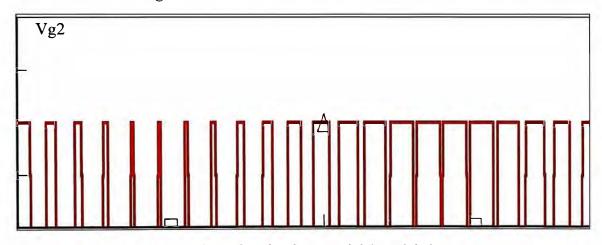


Figura 3.10: Señales de control del modulador 2

Se muestra en la siguiente figura 3.11, la señal de salida de las llaves del inversor, se muestra que la tension es E/2 y -E/2.

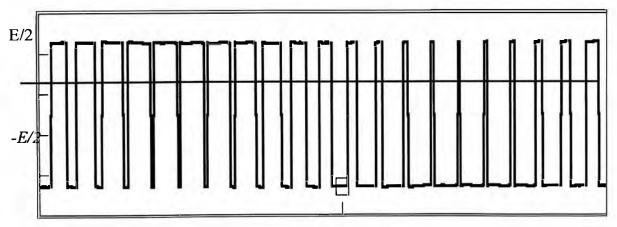


Figura 3.11: Tensión de salida resultante PWM

En la figura 3.12, se muestra la señal triangular y control, cuando el IM>0.8, obteniéndose una cantidad mayor de onda triangulares en el mismo de periodo de tiempo de la onda de control con respecto a la figura 3.8.

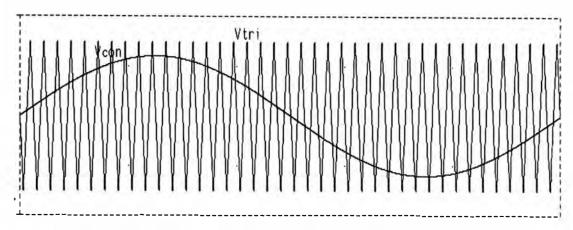


Figura 3.12: Señales de control (V_{con}) y portadora (V_{tri}).

En la figura 3.13 se muestra la tensión del inversor Van, y el IM>0.8, se muestra los pulsos de disparo del inversor, con una frecuencia mayor frecuencia que la figura 3.11.

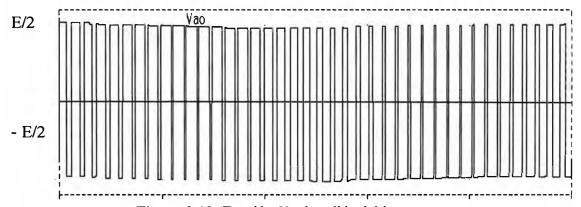


Figura 3.13: Tensión V_{ao} de salida del inversor.

En la figura 3.14 se muestra que debido al IM>0.8 se tiene que la corriente de carga disminuye el rizado, entonces ante un aumento del IM este produciría que la corriente de la carga tenga un rizado mínimo.

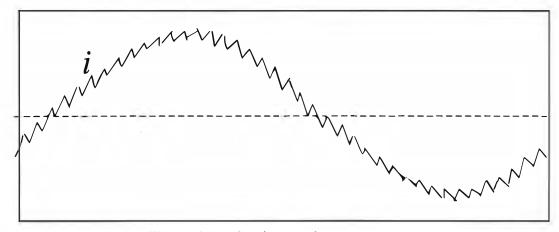


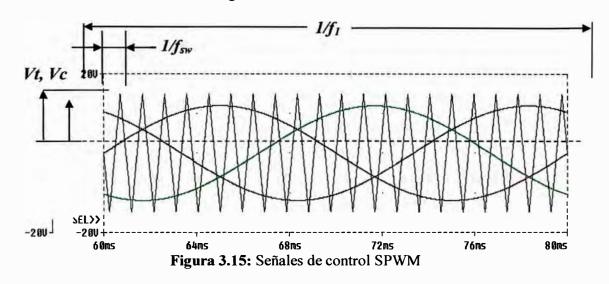
Figura 3.14: Corriente i_o de carga.

3.3.2 Modulador Sinusoidal Trifásico

En este caso cuatro son las señales de control empleadas para generar los pulsos como se muestra en la figura 3.15. Una de las señales es de tipo triangular de amplitud y

frecuencia constante, múltiplo de la onda de tensión fundamental que se desea sintetizar. Las otras tres señales de control, corresponden a tres sinusoides de amplitud y frecuencia variable que representan a la tensión trifásica que se desea tener en la carga.

Cada onda sinusoidal de control es comparada con la onda triangular a través de un circuito de comparación electrónico de manera que cada onda sinusoidal genere en el cruce con la onda triangular las conmutaciones con que las llaves correspondientes en cada fase serán accionadas como muestra la figura 3.15:



Señales de control para cada fase y señal triangular

En las figuras 3.16, 3.17 y 3.18 se muestran las tensiones del inversor Vao, Vbo y Vco, donde la amplitud es E/2 y –E/2 (E=Vdc=Tensión del Condensador).

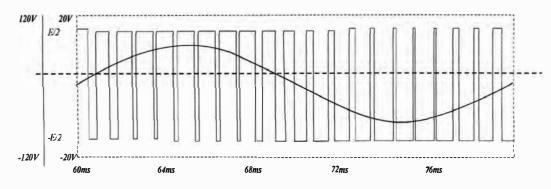


Figura 3.16: Tensión VAO

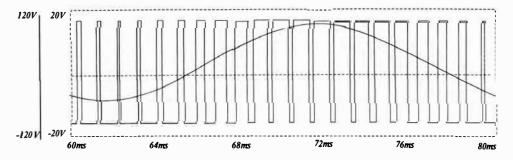


Figura 3.17: Tensión VBO

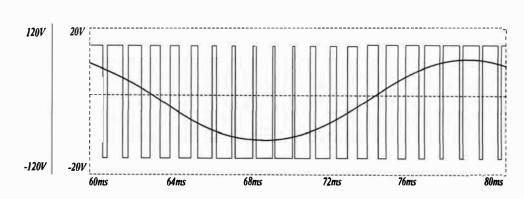


Figura 3.18: Tensión Vco

Se define como índice de modulación a la relación entre el valor máximo de la tensión de control sinusoidal y el valor máximo de la onda triangular. De la misma forma se define una relación entre las frecuencias de la onda triangular y la frecuencia de la sinusoidal de control, según las ecuaciones (3.10 y 3.11).

$$m_a = \frac{\hat{V}_c}{\hat{V}_f}$$
 , $m_f = \frac{f_{sw}}{f_1}$ (3.10)

$$0 \le m_a \le 1$$
 , $f_{sw} = 1/T_{sw}$, $f_1 = 1/T_1$ (3.11)

Cuando la relación m_f es grande ($m_f \ge 9$) se puede establecer una relación entre las señales de control y la tensión de salida por fase del inversor.

$$V_{ao1}(t) = \hat{V}_{ao1} Sen \ w_1 t$$
, donde $\hat{V}_{ao1} = (\frac{E}{2 \cdot \hat{V}_t}) \cdot \hat{V}_c$ (3.12)

El índice (IM) de modulación define como:

$$IM = \frac{\hat{V}_{ao1}}{E/2} , \quad 0 \le IM \le 1$$
 (3.13)

$$IM = \frac{\hat{V}_{ao1}}{E/2} = \frac{\hat{V}_c}{\hat{V}_c} = m_a \tag{3.14}$$

$$\hat{V}_{ao1} = (\frac{E}{2}) \cdot IM \tag{3.15}$$

La máxima tensión que se puede obtener a la salida del inversor con este tipo de Modulación se obtiene cuando IM = 1 es decir:

$$\hat{V}_{ao\,l(\text{máx})} = \frac{E}{2} \tag{3.16}$$

Que corresponde a 78% de la tensión máxima que se obtiene con una onda cuadrada.

$$\hat{V}_{ao1(SPWM)}/\hat{V}_{ao1}(seis pulsos) = 0.78$$
(3.17)

El orden de los armónicos presentes en la tensión de salida es determinado por la siguiente relación:

$$n = i \cdot (m_f) \pm j \tag{3.18}$$

Dónde:

Si "i" es impar "j" será par Si "i" es par "j" será impar

A continuación se emplea una onda triangular de 1050 Hz y una onda de control sinusoidal de 50Hz, se tendrá una relación para las frecuencias de $m_f = 21\,$ y que generará los siguientes órdenes:

Los términos armónicos pares no existieran en la tensión debido a la simetría de la onda. Los términos impares múltiplos de tres aparecen solo en la tensión de fase del inversor pero no aparecerán en la tensión de línea ni en la tensión por fase de la carga.

En la siguiente figura 3.19 se muestra los armónicos de la tensión Vao, en el cual se muestra para m∈21, los armónicos aparecen a partir de n=19.

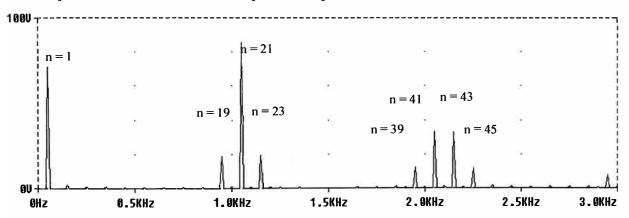


Figura 3.19: Espectro armónico de la tensión por fase del inversor Vao

En la siguiente figura 3.20, se muestra los armónicos de la tensión V_{ab}, en el cual se muestra para mf=21, los armónicos aparecen a partir de n=19 y debido al transformador de acoplamiento los armónicos múltiplos de 3, se hacen nulo.

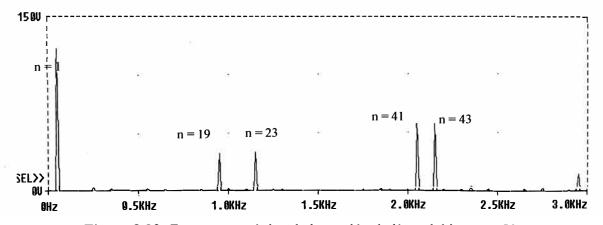


Figura 3.20: Espectro armónico de la tensión de línea del inversor Vab

En la siguiente figura 3.21, se muestra los armónicos de la tensión Van, en el cual que para m=21, los armónicos aparecen a partir de n=19, en el lado de carga.

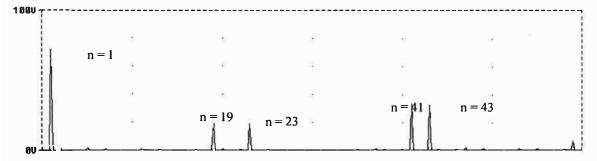


Figura 3.21: Espectro armónico de la tensión por fase de la carga Van

En la siguiente figura 3.22, se muestra la tensión Vab, que es la tensión de salida del inversor.

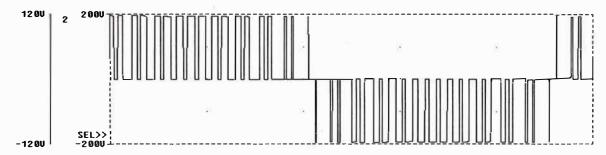


Figura 3.22: Tensión de Línea Vab

En la siguiente figura 3.23, se muestra la tensión en la carga Van.

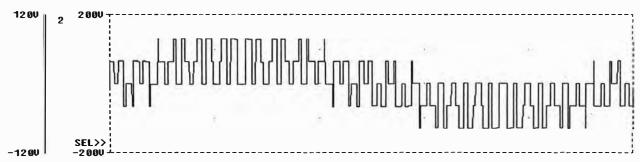


Figura 3.23: Tensión por fase (Van) en la carga

En la siguiente figura 3.24, se muestra la corriente de la carga ia, que debido a mf=21, este tiene una forma de onda sinusoidal con un rizado al mínimo.

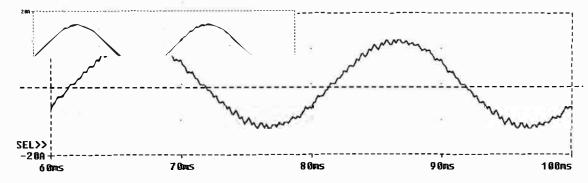


Figura 3.24: Corriente por fase de la carga (i_a)

En la siguiente figura 3.25, se compara la tensión Van y la corriente ia de la carga, observándose que tiene formas de onda semejante.

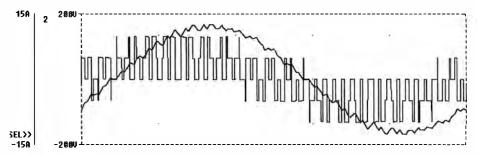


Figura 3.25: Corriente "ia" vs tensión "Van" por fase en la carga

En la siguiente figura 3.26, se muestra la corriente de entrada io (corriente de salida del rectificador controlado LC).



Figura 3.26: Corriente de entrada (i₀) al inversor

La componente fundamental de la corriente de entrada *io* se relaciona con la corriente de salida en la carga por la igualdad de las potencias, según la ecuación 3.19:

$$i_o = \frac{3 \cdot V_{an} \cdot I_a}{E} \cdot Cos\phi \tag{3.19}$$

Se observa que la corriente de entrada al inversor presenta además de la componente fundamental (DC), componentes de alta frecuencia los que podrían tener efecto negativo sobre la tensión de condensador E.

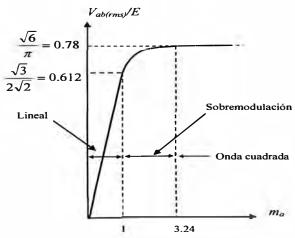


Figura 3.27: Inversor trifásico de tensión; $V_{ab (rms)}$ /E como función del índice de modulación m_a con $m_f = 15$

En la figura 3.27, cuando ma está entre 0 y 1, este actúa de forma lineal, y cuando ma es mayor a 1, está en la zona sobre modulada y tiene comportamiento no lineal hasta llegar a la forma de onda cuadrada.

3.4 Operación del inversor conectado en la red eléctrica

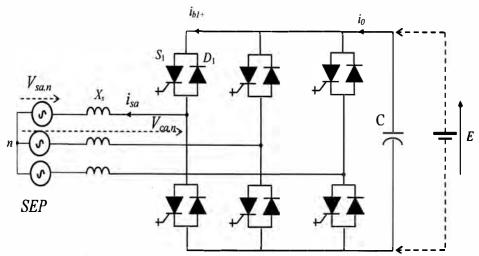


Figura 3.28: Inversor trifásico de tensión (VSC)

Conectado a la red trifásica de potencia

Con el inversor de tensión se puede generar tensión trifásica controlada en amplitud, fase y frecuencia pudiendo por tanto ser considerado como una máquina síncrona pero sin momento de inercia. Bajo este concepto el convertidor fuente de tensión (Convertidor de voltaje) puede ser conectado a la red trifásica de potencia a través de tres reactancias como muestra la figura 3.28 o en forma aislada, través de un transformador trifásico en el que X_S representa la reactancia de dispersión como se muestra en la figura 3.28. En este caso, el inversor será controlado de manera que el flujo de potencia activa entre los terminales DC y AC puede ser regulado en magnitud y dirección así como también se podrá regular la potencia reactiva en sus terminales AC. En cualquiera de los casos la generación de la tensión Vca,n deberá estar sincronizada con la tensión de la red Vsa,n a través de un circuito sincronismo (PLL) como muestra la figura 3.29.

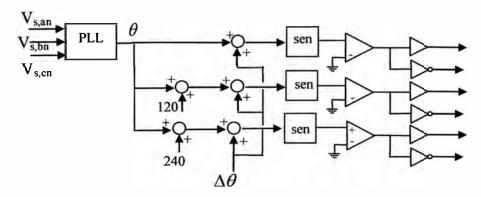


Figura 3.29: Esquema de bloques del sistema de sincronización.

En la siguiente figura 3.30, se muestra el angulo Vs con respecto al sistema y las tensiones de fase Vc,an y Vc,bn, sirven para obtener la tension Vc,ab,esta forma de onda tiene una amplitud que es el doble de la tension de la fase (Vc,an y Vc,bn), y de forma semejante para las tensiones de Vs,an, Vs,bn y Vs,ab, tal como se muestra en la figura 3.30.

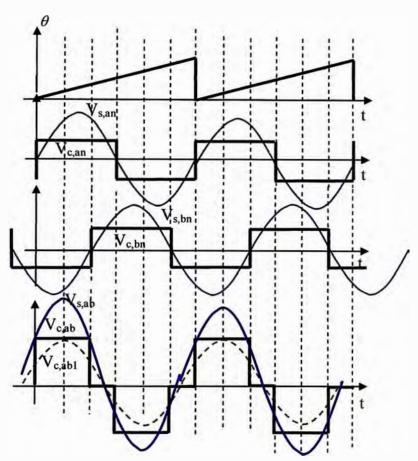


Figura 3.30: Sincronización de las tensiones cuadradas Del inversor con la Red eléctrica ($\Delta \theta$ = 0)

3.4.1 Modulación Senoidal

Para este caso la generación de la tensión V_{ca,n} deberá estar sincronizada con la tensión de la red V_{sa,n} a través de un circuito sincronismo (PLL) como muestra la figura 3.31.

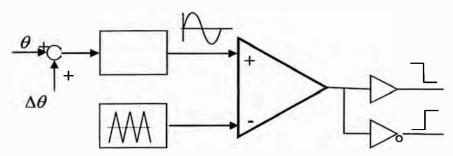


Figura 3.31: Modulador de ancho de pulso de tipo senoidal

En la siguiente figura 3.32, se muestra el angulo Vs con respecto al sistema y las tensiones de fase Vc,an y Vc,bn, que sirven para obtener la tension Vc,ab,esta forma de onda mantiene la amplitud de las tensiones de fase(Vc,an y Vc,bn), ademas la obtencion de la forma de onda Vc,ab, es debido a la cantidad de pulsos producidos por el modulador de ancho de pulso del tipo senoidal,que dependen del Indice de modulacion(IM), ademas las tensiones Vs,an y Vs,bn sirven para obtener Vs,ab, obteniendo la comparacion de Vs,ab y Vc,ab, tal como se muestra en la figura 3.32.

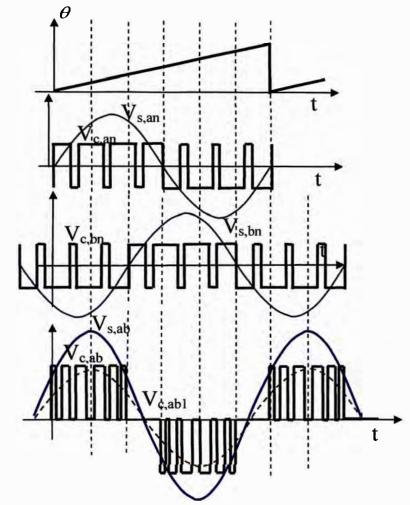


Figura 3.32: Sincronización de las tensiones PWM del inversor con la red eléctrica ($\Delta\theta$ =0). 3.5 Sistema de sincronización (PLL)

Para la operación del inversor conectado con la red se necesita de un medio para sincronizar las tensiones generadas por el inversor con las tensiones de la red. La sincronización puede ser hecha con relación al ángulo de fase de la tensión o de la corriente. El sistema de sincronización debe detectar, por ejemplo, el ángulo de fase de la tensión da red con suficiente rapidez y con capacidad de filtrar los efectos causados por las fuentes que contaminan la tensión de la red. El proceso de sincronización, además de actualizar el cruce por cero de la señal deberá también actualizar continuamente el ángulo

en todo el período da la componente fundamental de la señal.

3.5.1 Método de Sincronización (PLL)

Existen varios métodos de sincronización, los cuales están clasificados en métodos de lazo abierto, que hacen una estimación del ángulo de fase de la tensión basado en la señal de tensión obtenida directamente del sistema $\alpha\beta$. Los métodos de lazo cerrado, que emplean un método adaptativo para la estimación del ángulo de fase, que es actualizado a través de un mecanismo de lazo cerrado.

Esquema 1

A partir da ecuación (3.20), que representa el seno de la diferencia de dos ángulos, se puede deducir un método adaptativo para el sincronismo, ecuación (3.21).

$$Sen(\gamma - \theta) = Sen \gamma \cdot Cos \theta - Cos \gamma \cdot Sen\theta$$
 (3.20)

$$Sen(\gamma - \theta) = \frac{V_{\beta}}{\sqrt{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2}} \cdot Cos \ \theta - \frac{V_{\alpha}}{\sqrt{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2}} \cdot Sen\theta$$
 (3.21)

Dónde: γ ángulo da rede e θ ángulo estimado.

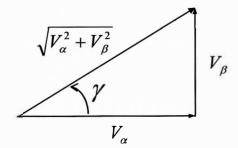


Figura 3.33: Principio de operación del PLL.

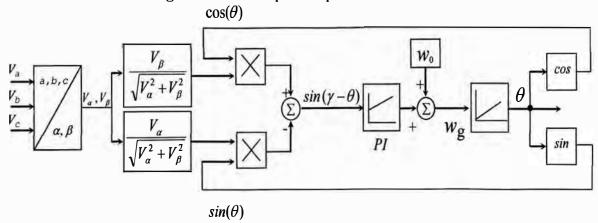


Figura 3.34: Principio de operación del esquema del sistema de sincronismo PLL.

El esquema del PLL es mostrado en la figuras 3.33 y 3.34, en el que se genera la función seno de la diferencia entre el ángulo γ da rede y θ , el ángulo estimado, como se muestra en la ecuación (3.21). Esta diferencia puede ser reducida a cero, ecuación (3.22),

cuando es utilizado un controlador de tipo PI que hace que el ángulo θ estimado se aproxime al ángulo γ de la redes:

$$\sin(\gamma - \theta) \approx \gamma - \theta = \Delta\theta \tag{3.22}$$

De la señal de salida de controlador PI, en la figura, que corresponde a la frecuencia w_g estimada que integrada genera el ángulo de fase θ estimado, que debe ser igual al ángulo γ . Para mejorar la respuesta dinámica en el inicio de la operación del PLL, la frecuencia nominal de la red w_0 es sumada con la salida del controlador PI (Feed-Forward).

La Simulación del sistema de sincronismo PLL en un sistema trifásico de 220V a 60Hz. La tensión de la red esta distorsionada presentando una componente armónica de orden 11 con frecuencia de 660 Hz y amplitud de 1% de la amplitud de la tensión nominal como se muestra en la figura 3.35. En la figura se muestra también la función seno del ángulo generado por el sistema PLL donde se verifica la sincronización con la componente fundamental de la tensión (señal sin distorsión).

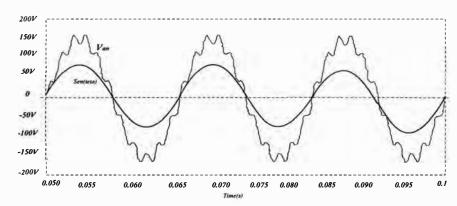


Figura 3.35: Señal distorsionada de la tensión de la red y la función seno del ángulo teta de salida del PLL.

En la siguiente figura 3.36 se muestra la señal de sincronización θ^* , que es el ángulo del sistema con Vs.

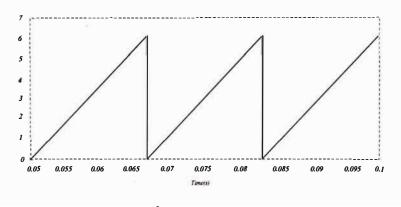


Figura 3.36: Señal θ *(teta) estimada de salida del PLL.

3.6 Operación del Convertidor inyectando o absorbiendo potencia activa

En las figura 3.37 se muestran los diagramas fasoriales correspondientes al control del flujo de potencia activa en la que se indica como la tensión del convertidor $V_{ca,n}$ debe ser regulada en magnitud y fase respecto de la tensión de la red $V_{sa,n}$ (obtenida a través de un circuito de sincronización) para atender los requerimientos de corriente Isa.

- En el primer caso cuando la corriente de lado AC del inversor (i_{sa}) está en fase con la tensión de la red $(V_{sa,n})$ como se muestra en la figura 3.37. Es la fuente de corriente alterna (Corriente de red-SEP), la que entrega potencia activa al convertidor y que será consumida por la fuente E del condenador (operación como rectificador).
- ➤ En el segundo caso cuando la corriente de lado AC del inversor (i_{sa}) está en contrafase con la tensión de la red (V_{sa,n}) como en la figura 3.37, le corresponde a la fuente de corriente alterna (Corriente de red-SEP), absorber potencia activa la que es entregada por la fuente E del condensador (operación como inversor).

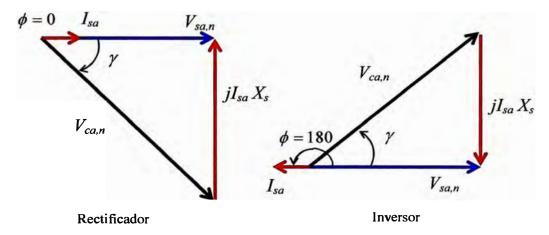


Figura 3.37: Diagrama fasoriales de la operación del convertidor conectado a la red Como rectificador y como inversor.

En las siguiente figuras se muestra los resultados de simulación del inversor conectado a un sistema de potencia, donde el periodo de conducción de los semiconductores de potencia corresponde a 1/60 s (seis pulsos) mientras que la amplitud $V_{ca,n}$ y la fase γ^o son modificados para cada caso.

Para la figura 3.38, se muestra en fase la corriente y la tensión de línea, debido a que actúa como rectificador, y en la figura 3.40, se muestra en desfasaje de 180° la tensión y corriente de línea.

Para la figura 3.39, se muestra la tensión V_c , adelantado γ^o , con respecto a la tensión de V_s , debido a que actúa como rectificador, además en la figura 3.41, se muestra la tensión V_c atrasado en γ^o , con respecto a la tensión de V_s , debido a que actúa como

inversor.

Operación como Rectificador

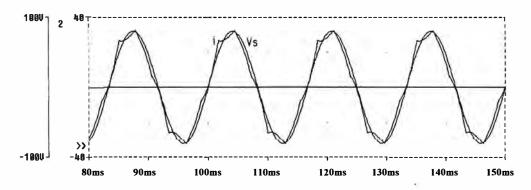


Figura 3.38: Tensión Vs Corriente de Línea

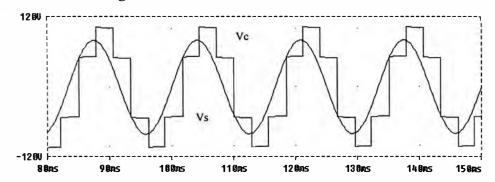


Figura 3.39: Forma de onda Vc vs Vs

Operación como Inversor

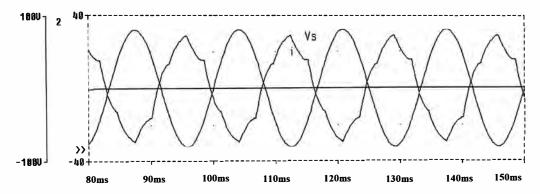


Figura 3.40: Tensión Vs Corriente de Línea

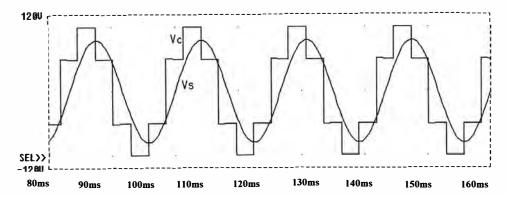


Figura 3.41: Forma de onda Vc vs Vs

3.7 Operación del Convertidor inyectando o absorbiendo potencia reactiva

En esta forma de operación el ángulo γ de fase entre la tensión del convertidor $V_{ca,n}$ y la tensión de la red $V_{sa,n}$ se mantiene en cero grados es decir en fase. Si con esta condición, la magnitud de la tensión del convertidor se incrementa a valores mayores que la tensión de la red la corriente se adelantará 90 grados respecto de las tensiones y el convertidor entregará potencia reactiva (Fig.3.42). Si por el contrario, la tensión del convertidor se hace menor que la de la red la corriente se atrasará 90 grados y el convertidor absorberá potencia reactiva (Fig. 3.42).

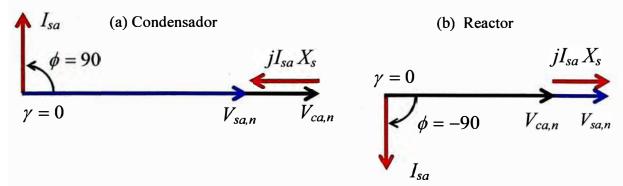


Figura 3.42: Diagrama fasorial de la operación del VSC Como condensador y reactor.

En la figura 3.43, se muestra la corriente se atrasa 90° a la tensión de línea, debido a que actúa como reactor y en la figura 3.45 la corriente se adelanta 90°, a la tensión de línea debido a que actúa como condensador.

Además en la figura 3.44, se muestra que la tensión Vc <Vs, y en la figura 3.46, se muestra que la tensión Vc>Vs, y están en fase.

Operación Inductiva

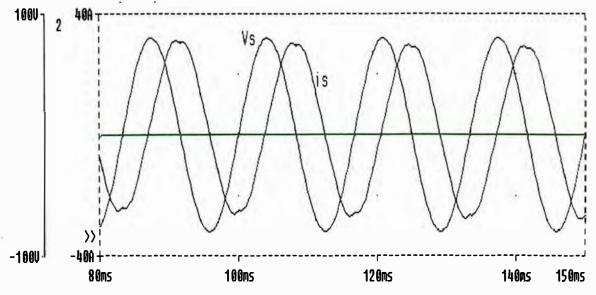


Figura 3.43: Tensión Vs y Corriente Is

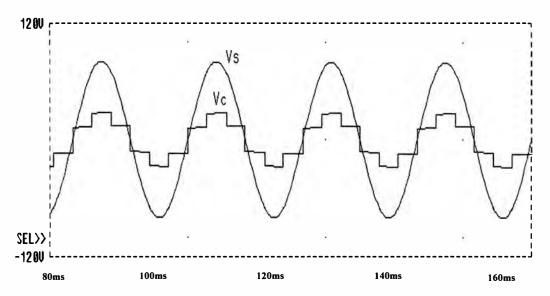


Figura 3.44: Tensión Vs y Tensión Vc.

Operación Capacitiva

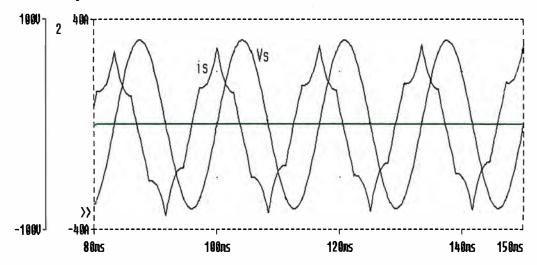


Figura 3.45: Tensión Vs y Corriente Is

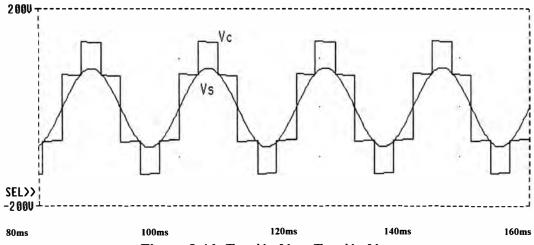


Figura 3.46: Tensión Vc y Tensión Vs

En la figura 3.47 y 3.48, se muestra la corriente promedio que pasa por el condensador, que demuestra el no uso de fuente externa, debido a que el valor promedio es cero.

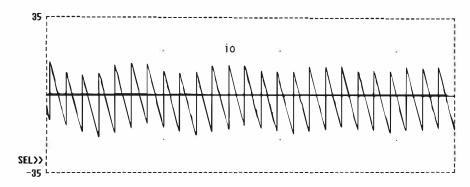


Figura 3.47: Corriente Io (Condensador)-Inductivo

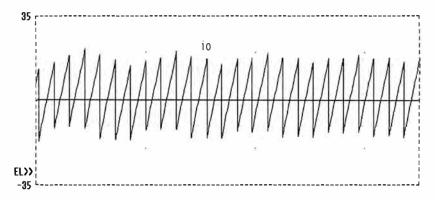


Figura 3.48: Corriente Io (Condensador)-Capacitivo

3.8 STATCOM (Static Synchronous Compensator)

El compensador síncrono estático como se muestra en la figura 3.49 y 3.50, consiste en un inversor tipo fuente de tensión conectado al sistema de potencia a través de un transformador de acoplamiento o conectado directamente a través de tres reactores. Con esta estructura es posible entregar o absorber potencia reactiva de la red de manera que puede ser utilizado para compensar cargas de tipo inductivas o de regular la tensión en el punto donde está conectado. Para estas aplicaciones será necesario solo de la presencia del condensador C ya que como se mostró anteriormente el valor medio de la corriente en el lado DC es cero.

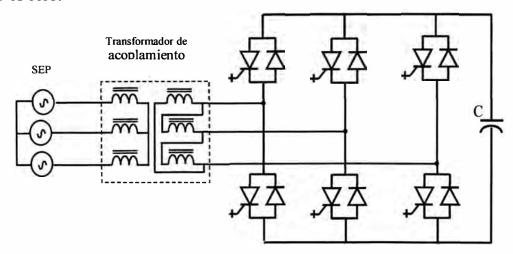


Figura 3.49: STATCOM conectado a la red mediante transformador

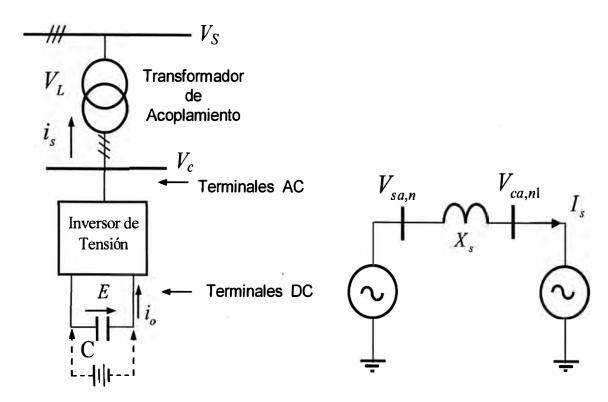


Figura 3.50: Esquema Unifilar y Circuito equivalente -STATCOM

3.8.1 Proceso de inyección de potencia reactiva

Inicialmente con el condensador descargado y sin el accionamiento de las llaves de potencia, el condensador es cargado a través de los diodos hasta un valor máximo determinado por la rectificación de la tensión trifásica. Para la inyección de potencia reactiva, el ángulo " γ " de la tensión generada por STATCOM deberá incrementarse (negativamente como el caso de rectificador figura 3.37) a partir de cero y en magnitud reducida, produciéndose con esto un flujo de corriente i_d con valor medio positivo que cargará al condensador e incrementará su tensión E_{dc} , que al mismo tiempo incrementará la tensión $V_{ca,n}$, que deberá superar a la tensión $V_{sa,n}$ de la red de manera que una corriente en adelanto en 90° a la tensión de la red (capacitiva) sea inyectada en el punto de conexión.

Considerando solo a la componente fundamental de la tensión de convertidor $V_{ca,n1}$, el sistema se puede representar por un circuito equivalente como el mostrado en la figura 3.50, en el cual el control del flujo de potencia activa y reactiva, está determinado por la conocida ecuación:

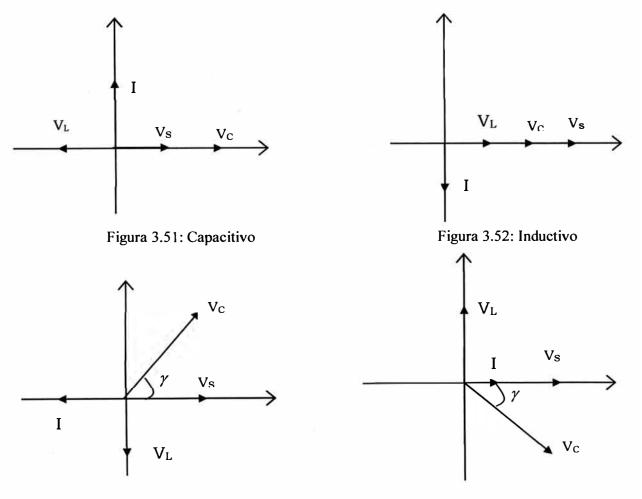
$$S_{1\phi} = \frac{V_{sa,n} \cdot V_{ca,nl}}{X_s} sen (\gamma) - j \left\{ \frac{V_{sa,n} \cdot V_{ca,nl}}{X_s} cos (\gamma) - \frac{V^2_{sa,n}}{X_s} \right\}$$
(3.23)

Cuando el ángulo " γ " en la ecuación se modifica dentro de un pequeño intervalo, se incrementará o reducirá la tensión E_{dc} en el condensador y al mismo tiempo la tensión

 $V_{ca,n1}$ y la potencia reactiva Q entregada o absorbida por el STATCOM ya que esta depende de la amplitud relativa de la tensión del convertidor $V_{ca,n1}$ respecto de la tensión de la red $V_{sa,n}$.

En las siguientes figuras se muestra el statcom como inversor y compensador, como compensador en las figuras 3.51 y 3.52 (Capacitor e inductor respectivamente).

Además las figuras 3.53 y 3.54 como inversor (potencia activa entregada y absorbida al SEP), (V_L= Tensión de dispersión del transformador).



Si se asume que la diferencia angular es igual a cero, es decir γ =0. La corriente reactiva que fluye hacia adentro o hacia fuera del compensador síncrono depende de la diferencia entre el voltaje del SEP (Vs) y el voltaje de salida en las terminales del STATCOM(Vc). Cuando la amplitud de voltaje en las terminales de salida del STATCOM es mayor que la amplitud del voltaje del SEP, la corriente fluye del inversor del STATCOM hacia el sistema; esto es, el inversor genera potencia reactiva (capacitiva) figura 3.51, para el SEP. Por otro lado, si la amplitud de voltaje de salida del STATCOM

Figura 3.54: Potencia activa

absorbida

Figura 3.53: Potencia activa

entregada

disminuye por debajo del voltaje del SEP (Vs), la corriente reactiva fluye del SEP al inversor del STATCOM; esto es, el inversor absorbe potencia reactiva (inductiva) figura 3.52. Si el voltaje de salida es igual al voltaje del SEP(Vs), la potencia intercambiada es cero. El intercambio de potencia activa entre el inversor y el SEP se puede controlar ajustando el ángulo del voltaje de salida del inversor respecto al ángulo del voltaje del SEP. Esto es, el inversor puede suministrar potencia activa al SEP de su energía almacenada CD, si el voltaje de salida del inversor adelanta al voltaje del SEP(Vs) figura (3.53). Por otro lado, el inversor puede absorber potencia activa del SEP, si su voltaje atrasa al voltaje del SEP (Vs) (figura 3.54).

EL STATCOM tradicional tiene dos modos posibles modos de operación en estado estable. Ellos son modo inductivo (atraso) y modo capacitivo (adelanto).

3.8.2 Característica V-I del STATCOM

El STATCOM es esencialmente una fuente de voltaje alterno detrás de una reactancia de acoplamiento con característica V-I como se muestra en la Figura. 3.55. Se enfatiza que el STATCOM puede operar sobre el rango total de corriente de salida, aún a niveles de voltaje del sistema muy bajos, teóricamente cero. La corriente capacitiva o inductiva de salida máxima del STATCOM se puede mantener independientemente del voltaje del SEP, y la máxima generación o absorción de reactivos cambia linealmente con el voltaje del SEP (Vs).

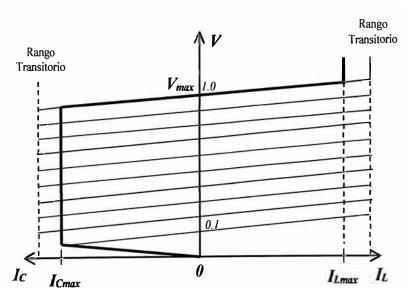


Figura 3.55: Característica V-I del STATCOM

La característica natural del voltaje-corriente en las terminales del STATCOM, Figura.3.56, es completamente dependiente de la fuente inversora de voltaje V_C y de la reactancia de acoplamiento, (donde V_C es el voltaje en las terminales del STATCOM).

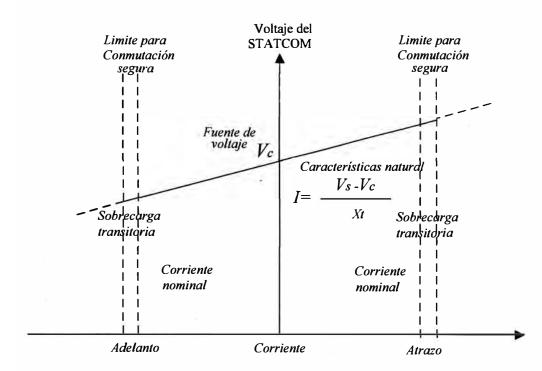


Figura 3.56: Característica V-I del STATCOM

Las aplicaciones prácticas en sistemas de potencia requieren algún tipo de STATCOM que operan con una pendiente de la característica que cae típicamente entre 1% y 5%. Debido a que se fija la reactancia de acoplamiento, la fuente inversora de voltaje se debe cambiar como se muestra en la Figura. 3.56 aumentando a Vc para obtener las condiciones de corriente de adelanto deseado (capacitivo), o reduciendo Vc para obtener las condiciones de atraso (inductivo).

3.8.3 Regulación de la pendiente

En muchas aplicaciones el STATCOM, no es controlado como un regulador de tensión perfecto, en lugar de esto, al voltaje se le permite variar en forma proporcional a la corriente de compensación. Las razones para esto son:

- El rango de operación lineal del compensador pueden ser extendidos.
- La regulación perfecta (pendiente cero) podría resultar en un punto de operación no muy bien definido, con tendencia a la oscilación, si la impedancia del sistema exhibe una región plana en el rango de operación de interés.
- ➤ La regulación de la pendiente tiende a forzar la división automática de la potencia reactiva entre los condensadores estáticos, así como entre otros dispositivos reguladores de tensión.

La deseada pendiente de regulación, define la característica del voltaje versus la corriente del compensador, como se muestra en la figura 3.56, pudiendo ser establecida por un lazo de control interno usando una de las entradas auxiliares en el esquema de control.

La señal proporcional a la amplitud de la corriente de compensación k I_{comp} , con una determinada polaridad (corriente capacitiva es negativa y corriente inductiva es positiva), es derivada y sumada con la referencia V_r , resultando la referencia actual del controlador de voltaje:

$$V *_{ref} = V_{ref} + k I_{comp} \tag{3.2)4}$$

La ecuación indica que $V *_{ref} y$ así la amplitud de voltaje terminal V_S disminuye a partir del valor sin carga con el incremento de la corriente capacitiva y se incrementa con el incremento de la corriente inductiva de compensación, hasta alcanzar el máximo capacitivo o inductivo.

La característica del sistema o de la red de potencia se puede expresar como:

$$V = E_{th} - X_{th} \cdot I_S \tag{3.26}$$

La característica del STATCOM, dentro del rango de control definido por la pendiente X_{SL} está dado por:

$$V = V_{ref} + X_{SL} \cdot I_S \tag{3.27}$$

La solución de las ecuaciones características del STATCOM y del sistema de potencia se presenta gráficamente en la figura 3.57, para tres valores del voltaje de la fuente o de la red.

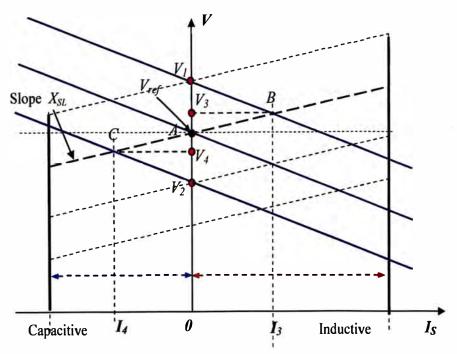


Figura 3.57: Característica de Operación del STATCOM Para diferentes situaciones del sistema

La característica intermedia corresponde a la condición nominal del sistema y su intersección con la característica del STATCOM corresponde al punto A donde $V = V_{ref}$ y $I_S = 0$. Si el voltaje se incrementa en ΔE_{th} (por ejemplo, debido a una disminución en el nivel de carga del sistema) V se incrementa a V_I sin la intervención del STATCOM. Con el STATCOM sin embargo, el punto de operación se desplaza al punto B absorbiendo una corriente inductiva I_3 el STATCOM retiene el voltaje en V_3 . Similarmente, si el voltaje disminuye (por ejemplo, debido a un incremento en el nivel de carga del sistema) el STATCOM retiene el voltaje en V_4 , en lugar de V_2 si es que no tuviera el STATCOM.

Sí la pendiente X_{SL} de la característica del STATCOM fuese cero, el voltaje sería retenido en el valor V_{ref} para los casos considerados anteriormente. El valor de X_{SL} está determinado por la ganancia en estado estacionario del controlador de tensión (regulador de voltaje). El valor típico para la pendiente se encuentra en el rango de 1 a 5%, dependiendo de qué tan fuerte sea la red.

3.8.4 Esquema de control.

El control de la tensión V_S en donde está conectado el STATCOM se realiza a través del control de la corriente reactiva que se inyecta o absorbe de la red. Un diagrama de bloques simplificado del lazo de control interno de corriente es mostrado en la figura 3.58, que se basa en el aumento o disminución de la tensión Vc del convertidor a través del incremento o la reducción de la tensión E_{dc} del condensador (ecuación. 3.6). Las señales de entrada al control son: la tensión de la red V_s, la corriente i_s del convertidor y la referencia de corriente reactiva i_{sq,ref}. Del voltaje V_S y a través del sistema PLL se obtiene el ángulo φ de la tensión de la red V_S . La corriente i_s del compensador se descompone en sus componentes activa isd y reactiva isq, siendo esta última comparada con el valor de referencia i_{sq,ref}. El error es aplicado a un controlador de tipo PI que generará el ángulo $(\Delta \gamma)$ de desfasaje necesario entre el voltaje V_C del convertidor y de la red V_S para reducir el error de corriente. Este desfasaje hará que el condensador se cargue (o descargue) variando el nivel de tensión E_{dc} requerido que incrementara o reducirá la tensión Vc (figura 3.42). De esta forma, el ángulo $\Delta \gamma$ es sumado con el ángulo φ representando la señal de sincronización para las tensiones del convertidor con la que se logra que la componente reactiva de la corriente del compensador sea igual al valor de corriente reactiva de referencia.

La magnitud y ángulo de la tensión V_C son los parámetros utilizados para controlar la

componente activa y reactiva de la corriente del convertidor y por lo tanto la potencia activa y reactiva que este intercambiará con la red (sistema de potencia).

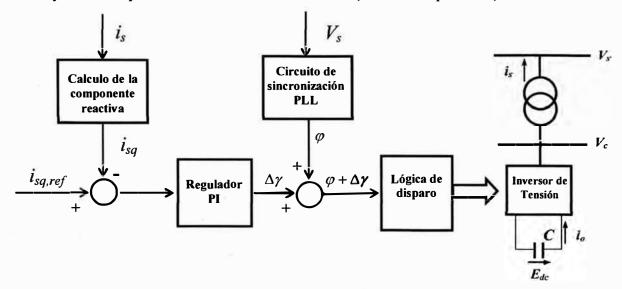


Figura 3.58: Esquema Básico de control del inversor de tensión para regulación de la potencia reactiva por variación de la tensión E_{dc} del condensador

Si el convertidor está restringido a intercambiar solo potencia reactiva, la señal de referencia de control será la corriente reactiva requerida $i_{sq,ref}$ y el control establecerá el ángulo y la magnitud de la tensión de salida del convertidor V_C así como la tensión E_{dc} necesaria en el condensador. Esta proporcionalidad es utilizada como una forma para controlar indirectamente la corriente reactiva a través de la tensión del condensador. Otra posibilidad para el control de la componente reactiva de la corriente del STATCOM consiste en mantener la tensión E_{dc} constante a través del control del ángulo γ mientras que la variación de la amplitud de la tensión V_C del convertidor se obtendrá por medio de la variación del índice modulación (IM) del método de modulación de ancho de pulso (PWM).

Un diagrama de bloques simplificado del control interno de corriente del convertidor con capacidad de control de la tensión E_{dc} es mostrado en la figura 3.59. Las señales de entrada son la tensión V_S de la red, la corriente i_S de salida del convertidor, las referencias o señales de consigan de la corriente reactiva $i_{sq,ref}$ y de tensión $E_{dc,ref}$. Con el error entre la referencia de tensión $E_{dc,ref}$ y el valor medido E_{dc} aplicado al regulador PI que genera la componente activa ($i_{sd,ref}$) de la corriente del convertidor que debe absorber de la red para compensar las pérdidas internas y mantener la tensión E_{dc} igual al valor de referencia $E_{dc,ref}$ Con el error entre la referencia de corriente $i_{sq,ref}$ y el valor medido i_{sq} aplicado a un regulador PI se genera el índice de modulación IM que ajusta la amplitud de la tensión V_C

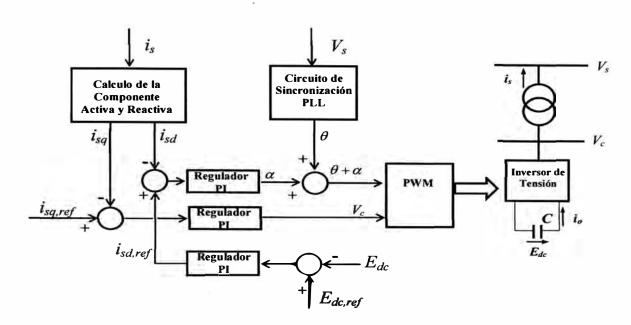


Figura 3.59: Esquema Básico para el control de la potencia reactiva necesaria para que la corriente i_{sq} sea igual a la corriente i_{sq,ref}.

La dinámica de este tipo de control debido a su cuasi despreciable tiempo de respuesta es generalmente más rápida que la respuesta obtenida con los sistemas que emplean la técnica de impedancia variable como el SVC. Esto se debe a que el control sobre los semiconductores de potencia como GTO es tanto en el encendido como en el apagado a diferencia de los tiristores que solo tienen control en el encendido.

3.9 Modelo y simulación del Statcom

3.9.1 Modelo del Statcom

A continuación se muestra las diferentes partes del modelo del Statcom.

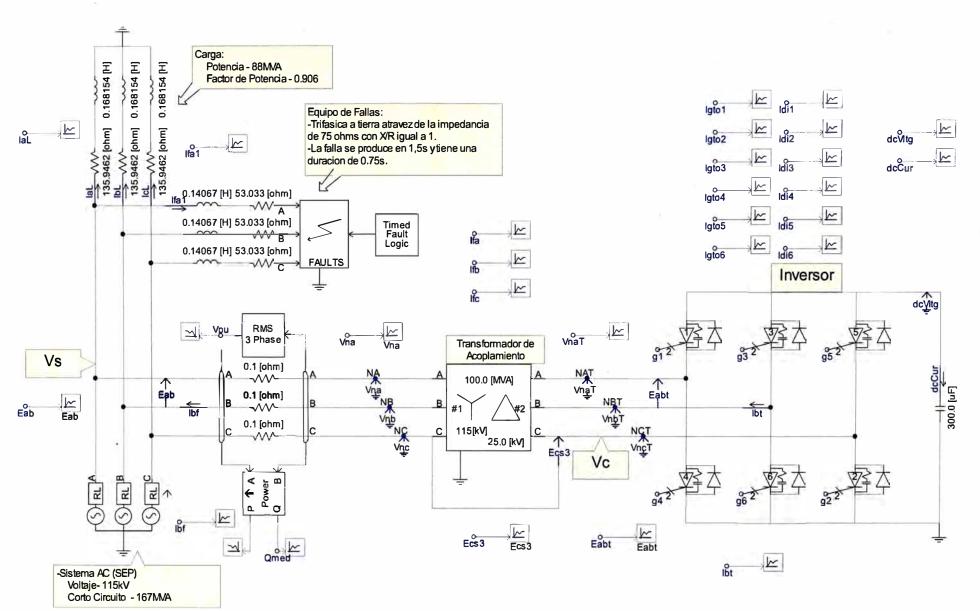
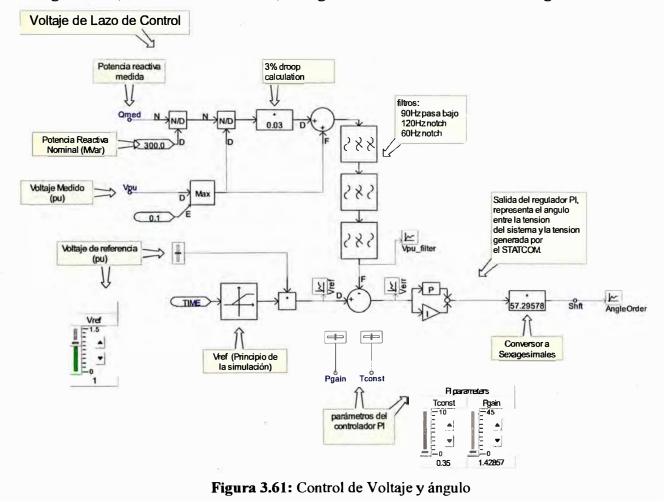


Figura 3.60: Esquema del Statcom

Sistema de Control del Statcom

El sistema de control de tensión toma como datos de entada la potencia reactiva medida(Qm), y la tensión medida(Vpu), que ingresan a los divisores , multiplicadores , y luego pasan por filtros de frecuencia de 60, 90 y 120Hz para poder alisar la señal obtenida, y luego pueda ingresar al sumador, este se suma con la función rampa que contiene la tensión de referencia (cuyo valor varia manualmente), luego al salir del sumador este ingresa al regulador proporcional e integrador "regulador PI", (cuyos parámetros de ganancia e integración , se varían manualmente), obteniéndose el ángulo de control en radianes y luego pasa a multiplicar por un factor de 57.29578 para convertirlo en ángulo sexagesimales, obteniendo a la salida, el ángulo de control de tensión. Ver figura 3.61.



El generador de ondas triangulares (Sistema de Control PWM parte I)(figura 3.62), toma como datos de entrada, las tensiones de fase de línea y los parámetros GpPLL y GiPLL (cuyos parámetros se ingresan manualmente), que ingresan al bloque de sincronismo (PLL), para luego pasar al multiplicador que tiene el PWM (cuyo valor se ingresa manualmente, este valor debe ser divisible por 3), y luego ingresa al módulo 360 que se encarga de dividir la señal obtenida en 360°, obteniéndose la frecuencia de las

señales y luego pasa al bloque de las funciones rampa, para combinarlos y obtener las funciones triangulares con la frecuencia obtenida anteriormente y las señales triangulares se separan en ON y OFF (sincronización encendido y apagado de las llaves del Statcom). Ver figura 3.63.

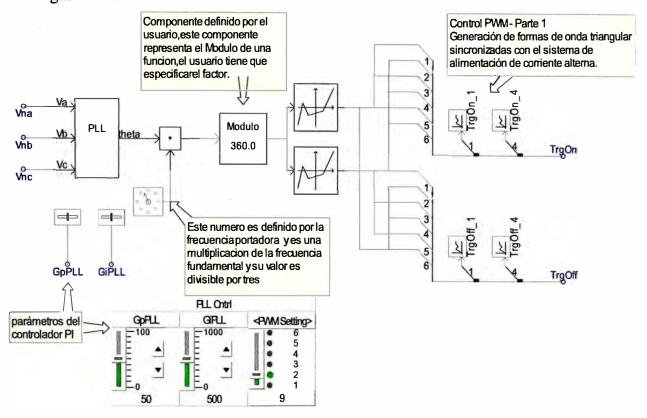


Figura 3.62: Sistema de Control parte I

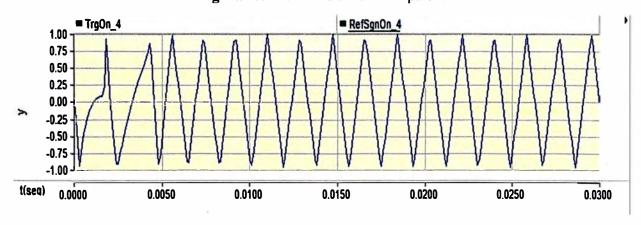


Figura 3.63: Señal de Salida del Control parte I

El Generador de señal de control (Sistema de Control PWM parte II)(figura 3.64), toma como datos de entrada las tensiones de fase de la línea que ingresan al bloque de sincronismo (PLL), y luego ingresa al bloque desfasador, que tiene el ángulo de la tensión de control que está desfasado adicionalmente en 30° debido al transformador de acoplamiento, para luego ingresar al bloqué de las funciones senoidales, y luego estas señales de control se separan en grupos ON y OFF(Ver figura 3.65).

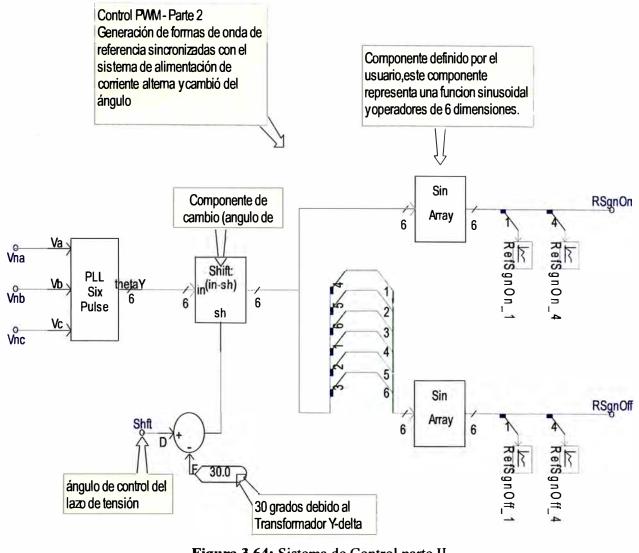


Figura 3.64: Sistema de Control parte II

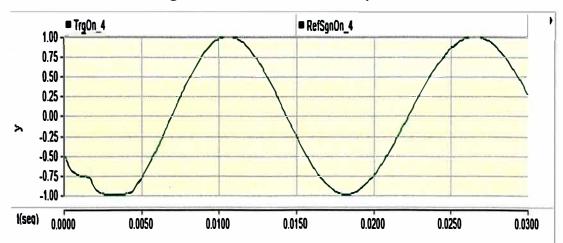


Figura 3.65: Señal de Salida del Control parte II

El Generador de pulsos de control del Statcom (figura 3.66), tiene como datos de entrada, las salidas de los sistemas de Control PWM parte I y II (señal triangular y señal de control), este bloque se encarga de comparar las señales generando pulsos de ciclo útil modulado que serán aplicados a las llaves de potencia del Statcom. (Ver figura 3.67).

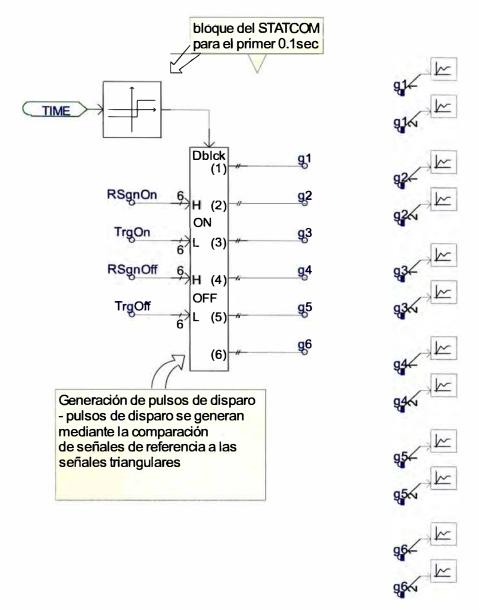


Figura 3.66: Generador de pulsos de disparo

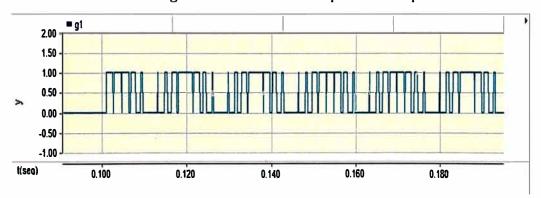


Figura 3.67: Señal de pulsos de control

3.9.2 Simulación del Statcom

A continuación en la figura 3.68 se muestra un sistema eléctrico compuesto de una fuente AC de 115kV, una carga trifásica, además se ha instalado un equipo de fallas (para simular la falla trifásica).

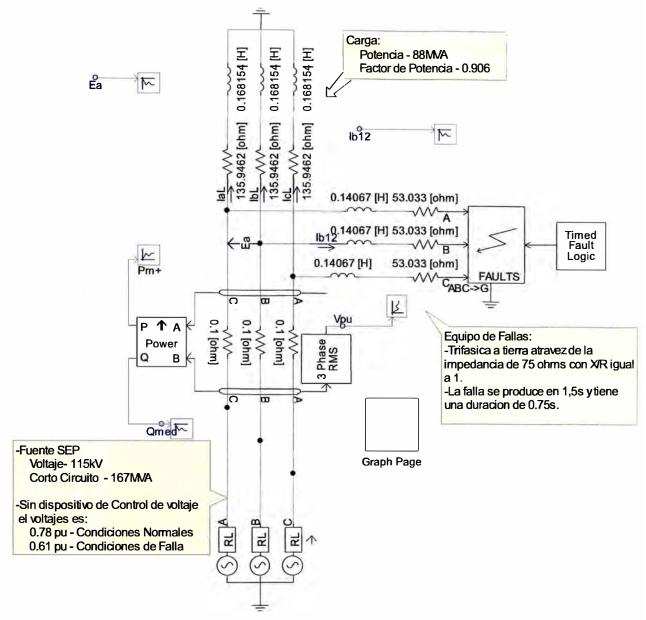


Figura 3.68: Esquema trifásico de Falla

Las características del sistema mostrado en la figura son:

- > Fuente SEP:
- -Voltaje trifásico de 115kV (Vs), 60 Hz.
- -Capacidad de Corto Circuito de 167MVA
- > Carga Trifásica AC:
- -Tensión de 115 kV.
- -Potencia de 88MVA.
- -Factor de Potencia de 0.906 (inductivo)
- > Equipo de Fallas:
- -Falla trifásica a tierra atreves de la impedancia de 75 ohm con X/R igual a 1.
- -La falla se produce en 1 seg y tiene una duración de 0.75 seg.

a) Simulación en Condiciones Normales y sin Sistema de Compensación.

Para esta simulación se tiene la tensión del sistema en 0.78pu (Condición Normal) (figura 3.69), y obteniéndose de la simulación la potencia reactiva y activa (figura 3.70 y figura 3.71) consumida por la carga en 22.81Mvar y 50Mw respectivamente.

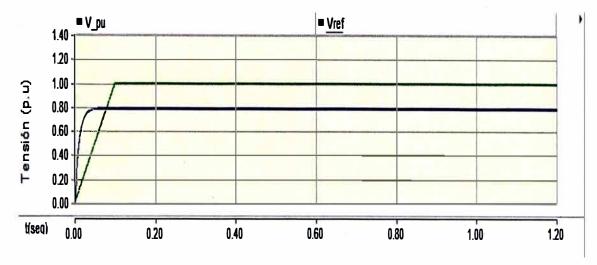


Figura 3.69: Tensión de Línea Vs Referencia en (p.u)

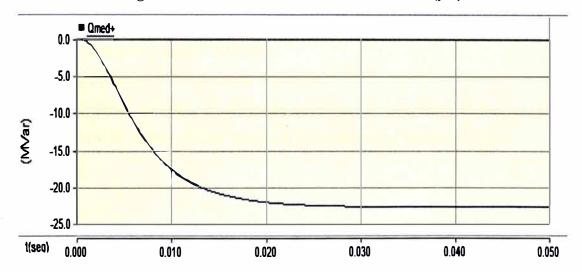


Figura 3.70: Potencia Reactiva de la carga en condiciones Normales

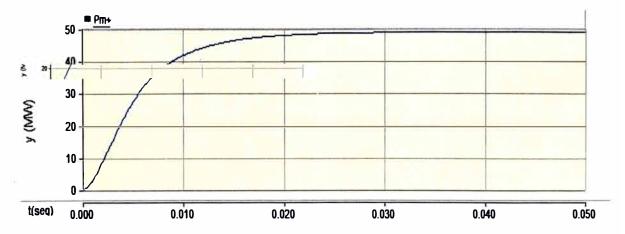


Figura 3.71: Potencia Activa en condiciones Normales

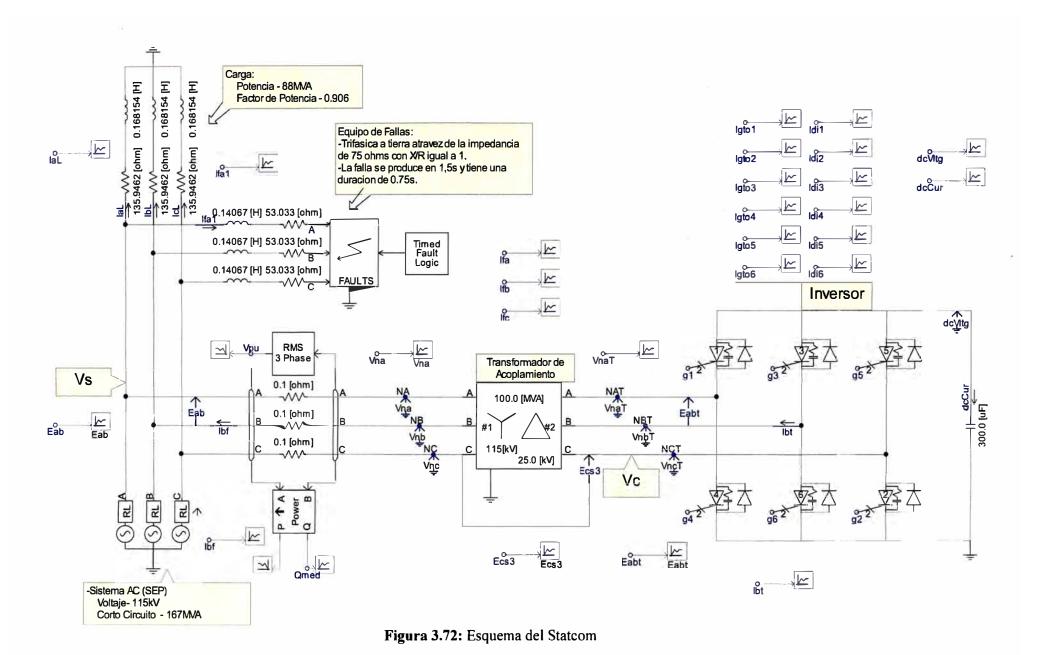
b) Simulación en Condiciones Normales y con Sistema de Compensación.

A continuación en la figura 3.72, se muestra un sistema compuesto de una fuente AC de 115kV, una carga trifásica de 88MVA, además se ha instalado un equipo de fallas (para simular la falla trifásica) y un sistema de compensación (STATCOM).

Las características del sistema mostrado en la figura 3.72 son:

- > Fuente SEP:
- -Voltaje trifásico de 115kV (Vs), 60 Hz.
- -Capacidad de Corto Circuito de 167MVA
- Carga Trifásica AC:
- -Tensión de 115 kV.
- -Potencia de 88MVA.
- -Factor de Potencia de 0.906 (inductivo)
- > Equipo de Fallas:
- -Falla Trifásica a tierra atreves de la impedancia de 75 ohm con X/R igual a 1.
- -La falla se produce en 1s y tiene una duración de 0.75s.
- ➤ Sistema de Compensación(STATCOM)
- Sistema de Compensación (Statcom de 6 pulsos).

Además se tiene que para condiciones normales de operación el Sistema Eléctrico tiene una tensión de0.78pu y cuando ocurre la falla trifásica a tierra es 0.61pu



Este sistema de compensación regula la tensión en 1.0 p.u, compensando la caída de tensión que se produce en la impedancia de la carga como se muestra en la figura 3.73, en él se muestra que durante el primer 0.1 seg, el sistema tiene una tensión de 0.78 pu (sistema sin compensación), y luego del primer 0.1 seg la tensión se eleva a 1.00 pu (sistema compensado), esto es debido al STATCOM, está entregado potencia reactiva al sistema (figura 3.74).

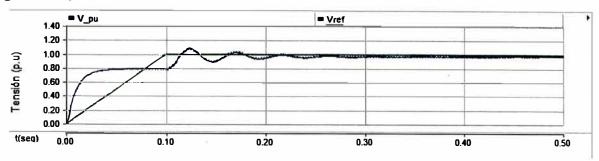


Figura 3.73: Tensión de Línea en p.u

En la figura 3.74, se muestra la potencia reactiva que entrega el STATCOM al sistema, que durante el primer 0.1 seg el STATOM no entrega potencia reactiva al sistema porque esta deshabilitado, pero pasado el primer 0.1 seg, se habilita la operación del STATCOM entrega 100 Mvar, para llevar la tensión del sistema de 0.78 a 1.0 pu figura 3.73.

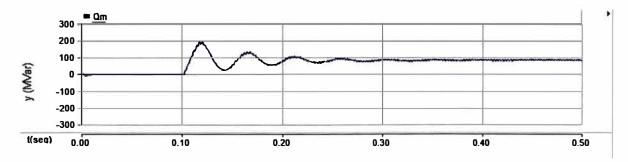


Figura 3.74: Potencia Reactiva

En la siguiente figura 3.75, se muestra la potencia activa que consume el statcom del sistema, durante el primer 0.1seg la potencia activa consumida es nula, y pasado el primer 0.1seg, este tiene un consumo mínimo como se muestra en la figura.

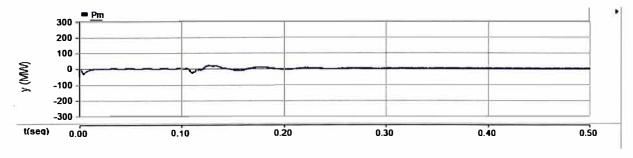


Figura 3.75: Potencia Activa

En la figura 3.76, se muestra el ángulo de fase de la tensión del convertidor, que durante el primer 0.1seg, el sistema de compensación no entrega potencia reactiva y luego del primer 0.1seg el ángulo aumenta a un valor positivo, manteniéndose positivo durante todo el tiempo de la simulación.

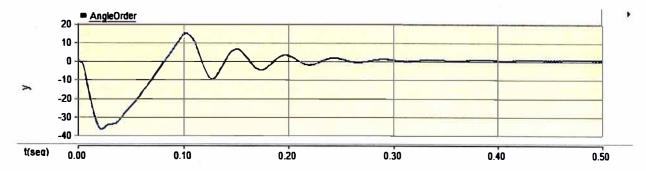


Figura 3.76: Potencia Reactiva

En la siguiente figura 3.77, se muestra, la tensión del Statcom (Vc) y la tensión de línea (Vs) de la red, además se muestra que después del primer 0.1seg, las tensiones Vc y Vs aumentan, y la tensión del convertidor Vc es pulsante (PWM) como se muestra en la figura 3.78.

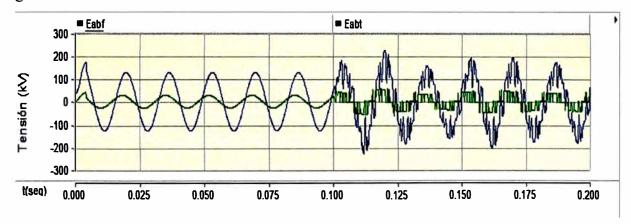


Figura 3.77: Tensión de Línea del Statcom y de la red

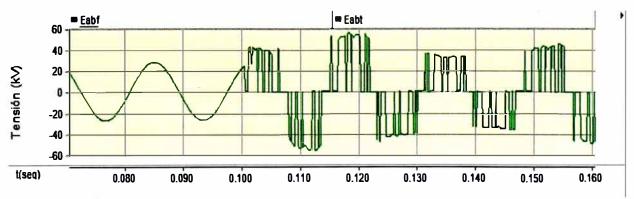


Figura 3.78: Tensión de línea del Statcom

En la siguiente figura 3.79, se muestra que la tensión del condensador es 40 KV durante el primer 0.1 seg y luego del primer del 0.1 seg, la tensión del condensador se eleva

dcVoltage 60 50 Tensión (kV) 40 30 20 10 t(seq) 0.000 0.050 0.100 0.150 0.200 0.250 0.300 0.350 0.400

a 42KV, debido a que la tensión del sistema se eleva de 0.78pu a 1.0pu. (Figura 3.73)

Figura 3.79: Tensión del Condensador

En la figura 3.80, se muestra la señal triangular y la señal de control de los sistemas de control I y II (TrgOn 4 y RefSgnOn 4).

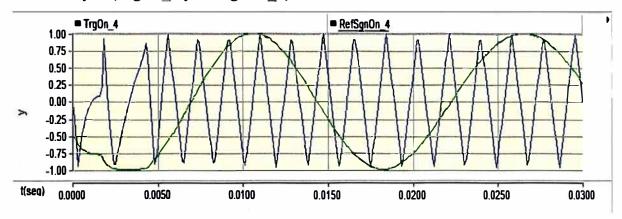


Figura 3.80: Señal de salida del control 1 y 2

En la figura 3.81, se muestra la señal de salida del bloque comparador (g1)

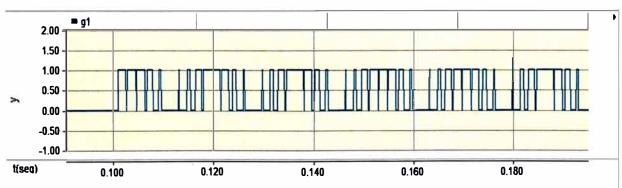


Figura 3.81: Señal de salida del bloque de comparación

c) Simulación con falla trifásica y con Sistema de Compensación.

Este sistema de compensación regula la tensión en 1.0 p.u compensando la caída de tensión que se produce en la impedancia equivalente de cortocircuito, como se muestra en la figura 3.82, durante el primer 0.1seg, el sistema tiene una tensión de 0.78pu (sin compensación), y luego del primer 0.1seg la tensión se eleva a 1.00pu (sistema

compensado), esto es debido a que el STATCOM entregada potencia reactiva al sistema (figura 3.82), además luego del primer 1 seg, el equipo de falla produce una falla trifásica a tierra originando que la potencia reactiva inyectada se eleve para poder mantener la tensión del sistema en el valor de consigna. Luego en 1.75 seg la potencia de reactiva se reduce para mantener la tensión del sistema debido a la eliminación de la falla trifásica.

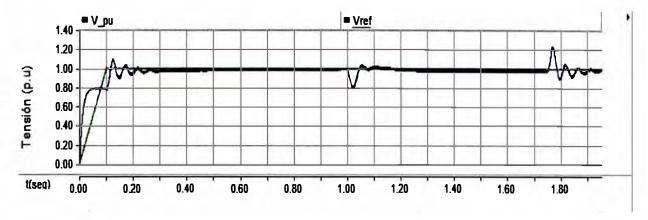


Figura 3.82: Tensión de Línea en p.u

En la figura 3.83, se muestra la potencia reactiva entregada por el STATCOM al sistema, en el que durante 0.1 segundos el STATOM no entrega potencia reactiva, pero pasado este tiempo, el STATCOM entrega 100Mvar, para llevar la tensión del sistema de 0.78 a 1.0pu (figura 3.82), y luego del primer 1seg, ante la presencia de la falla, el compensador pasa a entrega 300Mvar, y luego de 1.75seg (figura 3.85), la potencia reactiva disminuye a 100Mvar, debido a la eliminación de la falla y la compensación de la tensión del sistema.

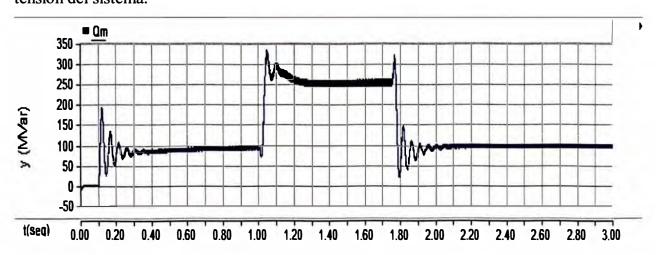


Figura 3.83: Potencia Reactiva desde 0 a 3seg

En la siguiente figura 3.84, se muestra que durante el primer 0.1seg la potencia reactiva entregada es cero, luego del 0.1seg el statcom hace su ingreso y la potencia reactiva se incrementa en 100Mvar.

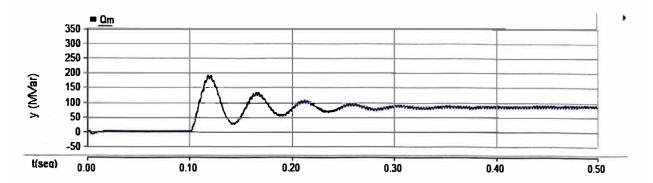


Figura 3.84: Potencia Reactiva desde 0 a 0.5seg

En la siguiente figura 3.85, se muestra la falla trifásica durante el primer 1 seg el statcom entrega 300Mvar, para poder compensar la tensión del sistema, y luego en 1.75 seg la potencia reactiva disminuye a 100Mvar esto es debido a que el STATCOM compensa la tensión del sistema.

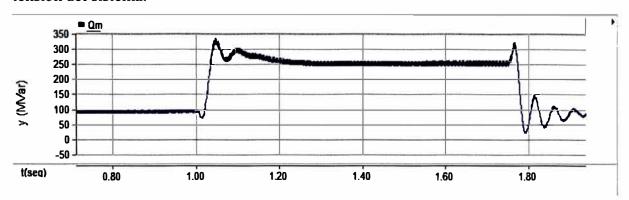


Figura 3.85: Potencia Reactiva desde 1 a 1.75seg

En la siguiente figura 3.86, se muestra la variación de la potencia activa, el STATCOM tiene un consumo mínimo, debido a los elementos propios del STATCOM (transformador de acoplamiento, llaves de potencia y conductores).

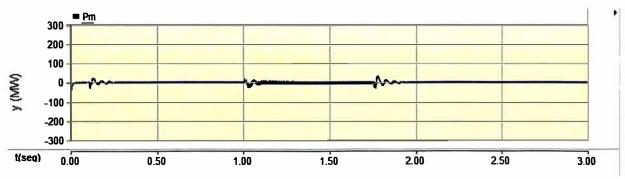


Figura 3.86: Potencia Activa

En la siguiente figura 3.87, se muestra el ángulo de fase de la tension del convertidor Vc que durante el primer 0.1 seg este tiene un valor negativo y luego del primer 0.1 seg al ingreso del statcom, el ángulo de control se mantiene en 0.43 positivo, y en el instante t=1 seg que se produce la falla, se produce una variación positiva del ángulo de tensión, debido a que el STATCOM entrega potencia reactiva y en el instante de t=1.75seg, el ángulo de tensión tiene una variacion negativa, debido a que el statcom disminuye la potencia reactiva entregada, esto es para poder compensar la tension del sistema.

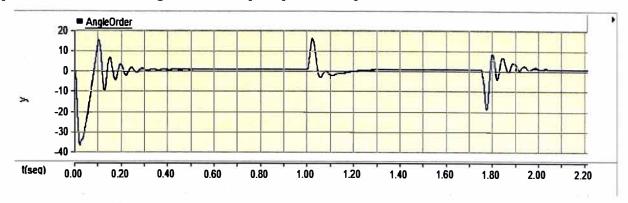


Figura 3.87: Angulo de Control de Tensión

En la siguiente figura 3.88, se muestra, la tensión del Statcom (Vc) y la tensión de línea (Vs), además se muestra que después del primer 0.1seg, hay un aumento de la tensión Vs (figura 3.90) y la tensión Vc (figura 3.89) se modifica en señales pulsantes durante todo el intervalo de tiempo, aun al ingreso de la falla trifásica.

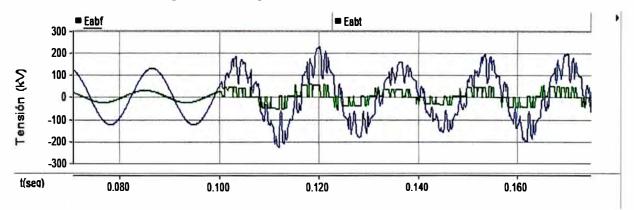


Figura 3.88: Tensión de Línea y del Statcom

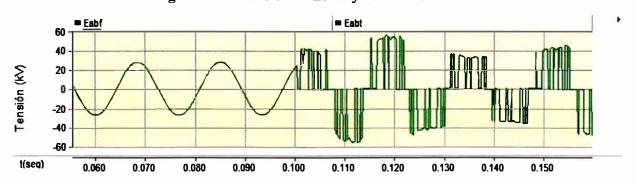


Figura 3.89: Tensión de fase del Stacom

En la figura 3.90, se muestra la tensión de Línea Vs, y este no tiene variación durante el primer 0.1seg, luego pasado el primer 0.1seg, la tensión Vs aumenta debido a que el Statcom compensa la tensión del sistema, inyectando potencia reactiva.

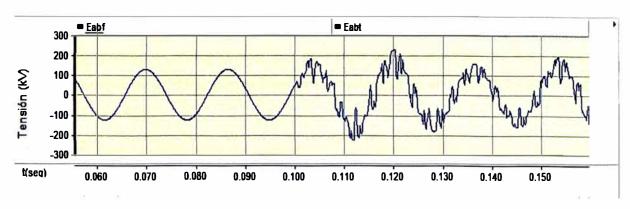


Figura 3.90: Tensión de Línea

En la figura 3.91, se muestra la función de salida del generador de pulsos PWM del Statcom, se tiene que durante el primer 0.1seg su valor es cero ,debido a que no entra en funcionamiento el Statcom, luego del primer 0.1seg aparece la señal de control.

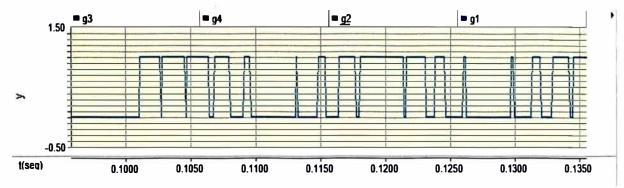


Figura 3.91: Señal de Salida del bloque de disparo

En la figura 3.92, se muestra la tensión del condensador en 40KV durante el primer 0.1 seg, y luego del primer 0.1 seg este se eleva hasta a 42KV, debido al ingreso del Statcom está compensando la tensión del sistema; y luego del primer 1 seg la tensión del condensador es 53KV esto es debido a la falla trifásica ,el STATCOM inyecta potencia reactiva al sistema y luego de 1.75 seg, la tensión en el condensador disminuye hasta 42KV, debido a que la falla trifásica ha sido eliminada, y el Statcom disminuye la cantidad de potencia reactiva inyectada al sistema.

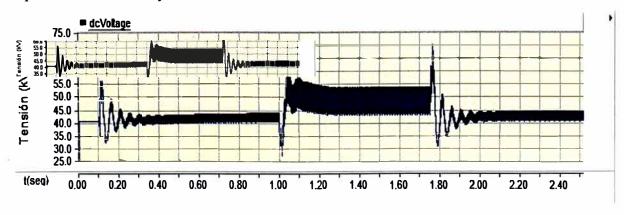


Figura 3.92: Tensión del Condensador

En la figura 3.93, se muestra la corriente de falla (que circula por el equipo), se observa que durante el primer 0.1 seg que no existe falla la corriente es nula, y luego del 1 seg que se produce de falla, la corriente de cortocircuito es de 1.kA, durante 0.75 seg que dura la falla trifásica.

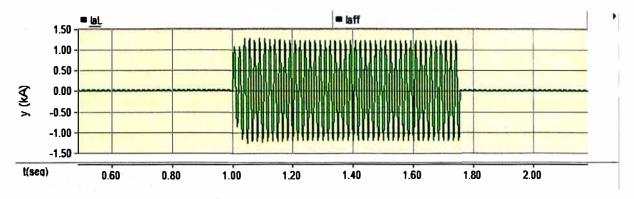


Figura 3.93: Corriente de Falla laff

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1. Los FACTS en los sistemas de potencia permite superar las limitaciones impuestas a los sistemas de transmisión que son controlados mecánicamente, facilitando la transferencia de potencia. Estos dispositivos ayudan a minimizar la necesidad de ampliar las plantas generadoras y líneas de transmisión, permitiendo a las industrias eléctricas intercambiar potencia, aprovechando al máximo las instalaciones existentes.
- 2. Se concluye que el funcionamiento del STATCOM contribuye considerablemente a mejorar las condiciones de operación, que se mantienen en el sistema en relación con la estabilidad de voltaje, en comparación con un caso no compensado. Reduciendo con esto las posibilidades de que se presenten problemas de esta índole.
- 3. Se concluye que el STATCOM logra estabilizar la magnitud de voltaje en el nodo del sistema donde se encuentra conectado, aun cuando ha violado sus límites de operación, que para el caso particular analizado se encuentran en función del nivel de voltaje que mantienen en sus terminales.
- 4. La utilización de convertidores estáticos de potencia en las redes de electricidad tiene el potencial de incrementar la capacidad de transmisión de las líneas eléctricas y mejorar la calidad de suministro de la energía eléctrica.
- 5. Se recomienda la implementación en laboratorio de un dispositivo STATCOM, para su estudio experimental en régimen estacionario y transitorio de sus aplicaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] "Articulo-Calidad de Corriente Eléctrica- Leonardo Energy", CITEA, UPC-Año 2008.
- [2] J.Duncar Glover, "Sistemas de Potencia-Análisis y Diseño, 3era Edición, 2004".
- [3] "Static Synchronous Series Compensator", Paper IEEE Transactions on Power delivery, Vol.12 N°1, January 1997.
- [4] E.Acha, V.G.Agelidis, O.Anaya-Lara, TJE.Miller, "Power Electronic Control in Electrical Systems".
- [5] Rubén Tapia Olvera "Criterio óptimo para coordinar estabilizadores enfocado mediante una técnica global heurística". Tesis de maestría en ciencias, Cinvestav, Unidad Guadalajara, Agosto, 2002.
- [6] José Luis Murillo Pérez". Análisis del STATCOM trifásico en estado estacionario y dinámico para la estabilidad de Voltaje. Tesis de maestría en ciencias, Cinvestav, Unidad Guadalajara, Noviembre 2005.
- [7] K.R.Padiyar, "Facts Controllers in Power Transmission and Distribution", Department of Electrical Engineering India Institute of Science Bangalore-560 012 India, 2007.