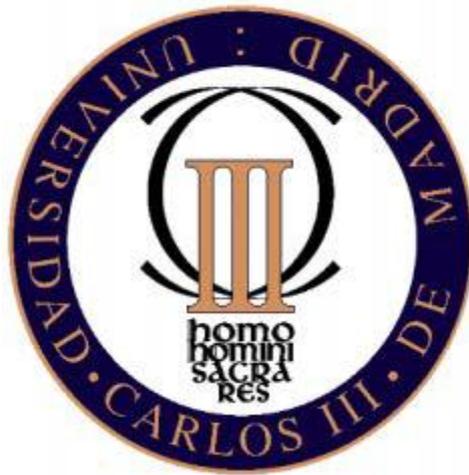


Universidad Carlos III de Madrid

Escuela Politécnica Superior

Departamento de Ingeniería Eléctrica



Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Eléctrica

Idioma: Español

*Análisis de métodos y tecnologías para
compensación de potencia reactiva en la red de
transporte.*

Autor: José Javier Alemany Gómez

Tutor: Víctor Julián Hernández Jiménez

Junio, 2016

Resumen

El presente trabajo aborda el tema de la compensación de potencia reactiva en la red de alta tensión. Definido el problema que surge durante el transporte de energía eléctrica por la presencia de la potencia reactiva, se trata de analizar cómo se puede solventar utilizando compensadores conectados en paralelo.

Planteado el problema, se identifican los tres objetivos que persigue la compensación de potencia reactiva: reducir el factor de potencia, equilibrar las cargas y regular la tensión.

A continuación, se describen los elementos compensadores de reactiva existentes en el sistema español y de qué forma se adaptan a las necesidades de la red: generadores síncronos, reactancias (shunt y por tomas), condensadores, SVC y STATCOM.

Para estudiar los diferentes compensadores y ver cómo se comportan, se ha hecho un estudio práctico con PowerWorld. Consiste en investigar cómo influye cada compensador en una red de alta tensión en función de la demanda diaria y qué alteraciones sufrirá el sistema al soterrar una de las líneas de conexión.

Con los resultados obtenidos, se ha realizado una comparativa analizando variables técnicas y económicas, pudiendo de esta forma, extraer conclusiones.

Abstract

This project addresses the issue of reactive power compensation in a high-voltage grid. A problem that comes up transport of electricity is the presence of reactive power. This project focuses on how this issue can be solved using shunt compensators.

Reactive Power compensation has three main objectives: reducing the power factor, load balancing and voltage regulation.

Following on, it will describe the existing reactive compensating devices in the Spanish system and how they adapt to the needs of the network: synchronous generators, reactors, capacitors, SVC and STATCOM.

In order to study the different compensators and understand how they behave, it has considered different practical cases with PowerWorld. The purpose is to investigate how each compensator affects in a high-voltage network based on the daily demand and what alterations the system will undergo if one of the connecting lines is subterranean.

With the results, it is analyzed a technical and economic comparative for the purpose of draw conclusions.

Índice general

1. Introducción	10
1.1. Estructura de la memoria	11
1.2. Herramientas utilizadas.....	11
2. Corriente alterna y corriente continua	12
2.1. Corrección del factor de potencia.	16
2.2. Equilibrado de cargas.....	16
2.3. Regulación de tensión.	17
3. Compensadores de potencia reactiva	20
3.1. Generadores síncronos y compensadores síncronos	20
3.2. Compensadores estáticos instalados paralelos a la carga.	24
3.2.1. Reactancias tipo shunt.	24
3.2.2. Reactancias con cambiador de tomas.	27
3.2.3. Batería de condensadores.	28
3.2.4. Compensador estático de potencia reactiva (Static Var Compensator, SVC)	30
3.2.5. STATCOM	49
4. Análisis de los Compensadores en la Red	54
4.1. Sistema de nudos	54
4.2. Definición del caso de estudio	59
4.3. Estudio comparativo de las magnitudes del sistema en función de la potencia demandada y equipos compensadores	61
4.3.1 Casos según la potencia demandada.....	61
4.3.1.1. Caso 1: Aumento de la demanda un 30%.....	61
4.3.1.2 Caso 2: Aumento de la demanda un 15%.....	64
4.3.1.3. Caso 3: Demanda en el punto intermedio.....	65
4.3.1.4. Caso 4: Disminución de la demanda un 15%	67
4.3.1.5. Caso 5: Disminución de la demanda un 30%.....	68
4.3.2. Tensión nudo crítico	70
4.3.3. Diferencia de tensión	72
4.3.4. Perdidas del sistema.....	73

4.3.5. Ahorro por compensador	73
4.4. Estudio comparativo de magnitudes del sistema en el caso de soterramiento de una línea aérea.	77
4.4.1. Casos según la potencia demandada y línea subterránea.....	79
4.4.1.1. Caso 1: Aumento de la demanda un 30%	79
4.4.1.2 Caso 2: Aumento de la demanda un 15 %	82
4.4.1.3. Caso 3: Demanda en el punto intermedio.....	84
4.4.1.4. Caso 4: Disminución de la demanda un 15 %	86
4.4.1.5. Caso 5: Disminución de la demanda un 30%	88
4.4.2. Tensión nudo crítico	89
4.4.3 Diferencia de tensión	91
4.4.4. Perdidas del sistema.....	92
4.4.5 Ahorro por compensador	93
5. Conclusión	96
6. Bibliografía.....	98

Índice de Figuras

Figura 1: Relación lineal entre potencia reactiva y tensión en un punto de red.	18
Figura 2: Circuito equivalente de una máquina síncrona.	20
Figura 3: Comportamiento de la máquina síncrona en función del ángulo de carga.	21
Figura 4: Diagrama vectorial sobreexcitado sin considerar las pérdidas de potencia activa.	22
Figura 5: Diagrama vectorial subexcitado sin considerar las pérdidas de potencia activa.	22
Figura 6: Relación entre la corriente de excitación y la tensión en vacío de un generador síncrono.	23
Figura 7: Esquema de los puntos de conexión de las reactancias shunt.	25
Figura 8: Reactancias shunt conectadas al terciario del transformador.	25
Figura 9: Cambio de tomas de una reactancia.	28
Figura 10: Característica de un compensador estático ideal.	30
Figura 11: Compensación discreta SVC/MS.	31
Figura 12: Tiristores en antiparalelo trabajando con Reactancias o con Condensadores.	32
Figura 13: Compensador SVC/TCR-TSC.	32
Figura 14: Compensador SVC/TCR-FC.	32
Figura 15: Compensador SVC/TCR-MS.	33
Figura 16: Compensador SVC/TSR-TSC.	33
Figura 17: (a) Esquema TCR, (b) Retraso del ángulo de disparo y (c) Formas de onda.	34
Figura 18: Variación de la corriente fundamental TCR respecto al ángulo de disparo.	35
Figura 19: (a) Área de operación del TCR y (b) del TSR.	36
Figura 20: (a) Esquema de un TSC y (b) Formas de onda.	37
Figura 21: Condiciones de conmutación para un TCR con diferente voltaje residual.	38
Figura 22: Área de operación V-I de un TSC.	39
Figura 23: Esquema de operación SVC/FC-TSC y su potencia reactiva característica.	40
Figura 24: Área de operación V-I del SVC/FC-TCR.	41
Figura 25: Pérdidas frente a salida de potencia reactiva del SVC/FC-TCR.	42
Figura 26: Esquema de operación del SVC/TSC-TCR y su potencia reactiva característica.	43
Figura 27: Área de operación V-I del SVC/TSC-TCR con dos bancos de TSC.	44
Figura 28: Pérdidas frente a salida de potencia reactiva del SVC/TSC-TCR.	45
Figura 29: Composición de la característica de un compensador estático.	46
Figura 30: Compensador estático con tres escalones de condensadores.	47
Figura 31: Esquema general de un STATCOM.	49
Figura 32: Área de operación V-I de un STATCOM.	51
Figura 33: Red de 9 nudos del IEEE.	54
Figura 34: Modelo de una línea de transporte en pi.	57
Figura 35: Red de 9 nudos en PowerWorld.	58



Figura 36: Curva de la demanda 03/02/2014.....	59
Figura 37: Curva de la demanda fraccionada 03/02/2014.....	60
Figura 38: Evolución de la tensión del nudo 5.	71
Figura 39: Diferencia de tensión del sistema.....	72
Figura 40: Pérdidas del sistema.	73
Figura 41: Evolución de la tensión del nudo 5 con línea subterránea.	90
Figura 42: Diferencia de tensión del sistema con línea subterránea.....	91
Figura 43: Pérdidas de potencia del sistema.....	92

Lista de Tablas

Tabla 1: Características de los nudos.	55
Tabla 2: Parámetros de los generadores síncronos.	56
Tabla 3: Datos de la excitatriz.	56
Tabla 4: Características de las líneas aéreas.	57
Tabla 5: Tensiones y potencias de los nudos del sistema del caso base.	58
Tabla 6: Duración de cada caso según la curva de la demanda del día 03/02/2014.	60
Tabla 7: Tensión y potencia característica de los nudos del caso 1.	62
Tabla 8: Tensión de los nudos utilizando compensadores del caso 1.	63
Tabla 9: Sobrecargas dependiendo del compensador del caso 1.	63
Tabla 10: Tensión y potencia característica de los nudos del caso 2.	64
Tabla 11: Tensión de los nudos utilizando compensadores del caso 2.	64
Tabla 12: Sobrecargas dependiendo del compensador del caso 2.	65
Tabla 13: Tensión y potencia característica de los nudos del caso 3.	65
Tabla 14: Tensión de los nudos utilizando compensadores del caso 3.	66
Tabla 15: Sobrecargas dependiendo del compensador del caso 3.	66
Tabla 16: Tensión y potencia característica de los nudos del caso 4.	67
Tabla 17: Tensión de los nudos utilizando compensadores del caso 4.	68
Tabla 18: Sobrecargas dependiendo del compensador del caso 4.	68
Tabla 19: Tensión y potencia característica de los nudos del caso 5.	69
Tabla 20: Tensión de los nudos utilizando compensadores del caso 5.	69
Tabla 21: Sobrecargas dependiendo del compensador del caso 5.	70
Tabla 22: Evolución de la tensión del nudo 5.	71
Tabla 23: Diferencia de tensión del sistema.	72
Tabla 24: Perdidas del sistema.	73
Tabla 25: Ahorro de potencia con el uso de compensadores.	74
Tabla 26: División de la curva de la demanda en intervalos según el caso.	74
Tabla 27: Ahorro de energía con el uso de compensadores.	75
Tabla 28: Precio medio de la energía el 03/02/2014.	75
Tabla 29: Ahorro económico con el uso de compensadores.	76
Tabla 30: Inversión económica para la instalación de compensadores capacitivos.	76
Tabla 31: Amortización de los compensadores capacitivos.	77
Tabla 32: Parámetros característicos de la línea subterránea en secuencia directa por unidad de longitud.	77
Tabla 33: Parámetros característicos de la línea subterránea en secuencia directa.	78
Tabla 34: Parámetros característicos de la línea subterránea.	79
Tabla 35: Tensión y potencia característica de los nudos del caso 1 con línea subterránea.	80
Tabla 36: Tensiones de los nudos utilizando compensadores del caso 1 con línea subterránea.	81

Tabla 37: Sobrecargas dependiendo del compensador del caso 1 con línea subterránea.	82
Tabla 38: Tensión y potencia característica de los nudos del caso 2 con línea subterránea.	82
Tabla 39: Tensión de los nudos utilizando compensadores del caso 2 con línea subterránea.	83
Tabla 40: Sobrecargas dependiendo del compensador del caso 2 con línea subterránea.	83
Tabla 41: Tensión y potencia característica de los nudos del caso 3 con línea subterránea.	84
Tabla 42: Tensión de los nudos utilizando compensadores del caso 3 con línea subterránea.	85
Tabla 43: Sobrecargas dependiendo del compensador del caso 3 con línea subterránea.	85
Tabla 44: Tensión y potencia característica de los nudos del caso 4 con línea subterránea.	86
Tabla 45: Tensión de los nudos utilizando compensadores del caso 4 con línea subterránea.	87
Tabla 46: Sobrecargas dependiendo del compensador del caso 4 con línea subterránea.	87
Tabla 47: Tensión y potencia característica de los nudos del caso 5 con línea subterránea.	88
Tabla 48: Tensión de los nudos utilizando compensadores del caso 5 con línea subterránea.	88
Tabla 49: Sobrecargas dependiendo del compensador del caso 5 con línea subterránea.	89
Tabla 50: Evolución de la tensión del nudo 5 con línea subterránea.	90
Tabla 51: Diferencia de tensión del sistema con línea subterránea.	91
Tabla 52: Perdidas del sistema con línea subterránea.	92
Tabla 53: Ahorro de potencia con el uso de compensadores con línea subterránea.	93
Tabla 54: Ahorro de potencia en porcentaje con el uso de compensadores con línea subterránea.	93
Tabla 55: Ahorro de energía con el uso de compensadores con línea subterránea.	94
Tabla 56: Ahorro económico con el uso de compensadores con línea subterránea.	94
Tabla 57: Inversión económica para la instalación de compensadores inductivos.	95
Tabla 58: Amortización de los compensadores inductivos.	95

1. Introducción

El sistema eléctrico de España debe garantizar la seguridad, la continuidad y la calidad del suministro eléctrico. Para ello es necesario un diseño y planificación de la red de transporte en función de los puntos de consumo.

El sistema eléctrico tiene que asegurar una tensión de 220 V y una frecuencia de 50 Hz al consumidor. Será necesario controlar estos dos parámetros durante la distribución de electricidad para garantizar la estabilidad del sistema. La tensión está íntimamente relacionada con la potencia reactiva, ya que esta última se transmite en función del voltaje, la potencia reactiva ira del nudo de mayor al de menor tensión.

Controlando el flujo de potencia reactiva, se asegura que la tensión esté dentro de los límites de estabilidad, consiguiendo así que el sistema eléctrico sea fiable.

Además, la reactiva es un factor muy importante a tener en cuenta ya que, con su presencia, la red estará desaprovechada. Esto se debe a que se transmite tanto potencia activa como reactiva, siendo la activa la única que se transforma en trabajo y puede ser aprovechada por el cliente. Como resultado se genera más energía de la que realmente se demanda.

El objetivo de este trabajo es analizar cómo se puede controlar la tensión, mediante el aporte o la absorción de potencia reactiva, conectando compensadores en paralelo en el sistema, y cómo se ve afectado dicho sistema según el elemento de compensación empleado.

El trabajo seguirá la demanda diaria y se estudiará, en cada caso, qué compensador se adapta mejor a las necesidades del sistema. Se analizará tanto técnica como económicamente.

1.1. Estructura de la memoria

El trabajo que se expone a continuación seguirá la siguiente estructura:

- Capítulo 1: Introducción de la memoria donde se plantean los objetivos y la estructura que seguirá el documento.
- Capítulo 2: Evolución histórica de la electricidad y descripción de los problemas que surgen con la transmisión en corriente alterna y la aparición de la potencia reactiva.
- Capítulo 3: Definición y explicación de los elementos de compensación de reactiva conectados en paralelo.
- Capítulo 4: Estudio comparativo de las magnitudes del sistema en función de la demanda diaria y los equipos compensadores. Amortización de los costes de instalación de cada componente.
- Capítulo 5: Conclusiones del trabajo.

1.2. Herramientas utilizadas.

Las herramientas utilizadas para la elaboración de este trabajo han sido:

- Programa PowerWorld: empleado para analizar y estudiar cómo influye cada compensador de reactiva en la red de transporte.
- Microsoft Excel: usado para la manipulación de los resultados obtenidos en el programa y para la elaboración de las gráficas y tablas presentes en la memoria.
- Microsoft Word: utilizado para la redacción de la memoria.

2. Corriente alterna y corriente continua.

La electricidad surgió con la aparición de la Tierra, sin embargo se descubrió en la Edad Antigua por Tales de Mileto al frotar una varilla de ámbar y observar que producían unas pequeñas cargas, las cuales atraían pequeñas partículas. [1]

Hasta finales del siglo XVIII la electricidad no adquiere suficiente relevancia, hasta que Alessandro Volta invento la primera pila en 1799, pero no fue hasta el invento de la bombilla de cristal al vacío por Thomas Alva Edison en 1879 cuando se le da la importancia que se merece. [2]

Hasta el momento los principales avances habían sido en generadores y acumuladores de corriente continua por lo que se ideó la distribución con esta energía. En 1882 se instaló el primer tendido de electricidad en corriente continua en New York fue de baja tensión, el problema que presentaba la corriente continua eran las grandes pérdidas que se producían en las líneas. [2]

Las centrales eléctricas de corriente continua fueron las primeras en instalarse pero no se han extendido a lo largo de los años por dos problemas fundamentalmente, se construían cerca de los puntos de consumo para reducir las pérdidas y la dificultad que presentaban al cambiar el nivel de tensión. [3]

El cambio de corriente en la distribución de electricidad fue debido no solo a los descubrimientos y mejora de la generación de corriente alterna sino también al invento del transformador en 1885, gracias a él se podía cambiar la tensión de forma sencilla y eficiente lo que provocó la posibilidad de transportar electricidad a grandes distancias con menores pérdidas. [2]

La corriente continua consiste en un circuito cerrado, en el cual la corriente circula en un solo sentido, la tensión es constante y estable en todo momento. [4]

La corriente alterna en cambio es una senoide esto se debe a que cambia el sentido de circulación en un determinado periodo de tiempo constante, en Europa 20 ms, es decir a una frecuencia de 50 Hz. Este efecto es producido por el cambio de polaridad de la tensión aplicada en los extremos del conductor. [4]

Las ventajas de la corriente alterna frente a la corriente continua: [5]

1. Se necesitan más recursos para construir una línea en corriente continua debido a los convertidores a no ser que la línea sea lo suficientemente larga.
2. La corriente continua necesita filtrar los armónicos procedentes de los convertidores ideados para transformar la corriente alterna en continua.
3. Suponiendo un mismo nivel de tensión entre corriente continua y alterna, se necesitara mayor aislamiento en las líneas de corriente continua.
4. La corriente alterna tiene la ventaja de poder contar con multitud de transformadores favoreciendo el cambio del nivel de tensión.
5. La operación de las redes de corriente continua es más compleja que las redes de corriente alterna.

Los inconvenientes de la corriente alterna frente a la corriente continua: [5]

1. La corriente continua es capaz de transmitir más potencia por conductor esto se debe a la propia definición de las corrientes, la corriente continua no transporta potencia reactiva mientras la alterna sí, lo que provoca un retraso lo que se llama factor de potencia y por lo tanto una disminución en la capacidad de transporte.

$$\text{Corriente continua } P = V \cdot I \quad (1)$$

$$\text{Corriente alterna } P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (2)$$

2. Las líneas de corriente alterna tienen menor intensidad admisible que las de continua debido al efecto piel. El efecto piel es la tendencia de la densidad de corriente a viajar por el exterior del conductor, este efecto solo está presente en corriente alterna y es más acusado cuanto mayor sea la frecuencia.
3. El efecto corona, la ionización del aire, es superior en corriente alterna que en continua
4. Las líneas de corriente continua son capaces de conectar dos sistemas asíncronos, es decir, con frecuencias diferentes.

Actualmente el transporte de la electricidad se realiza mayoritariamente en corriente alterna, debido a los sucesivos descubrimientos que se han descrito. Pero en algunos tramos se realizan en corriente continua, llamadas HVDC (siglas en inglés: High Voltage Direct Current).

Cada vez se extienden más los HVDC ya que la potencia en este sistema se mantiene prácticamente constante independientemente de la longitud de la línea, en cambio las líneas de corriente alterna al ir equipadas con elementos inductivos si dependen de la longitud de la línea, además que estos provocan un desfase respecto a la tensión. [2]

Para decidir qué tipo de línea se tienen en cuenta tanto criterios económicos como medioambientales, ya que los enlaces en HVDC son más respetuosos con el medio ambiente y según la distancia de la línea también económica. [2]

Desde el punto de vista económico, las líneas subterráneas de longitudes superiores a 40 km serán más eficientes si se construyen en corriente continua y las aéreas cuando superen los 600 km. El coste tiene en cuenta la instalación de todos los elementos necesarios para el funcionamiento de la línea, es decir, de los convertidores AC/DC (rectificador) y DC/AC (inversor), transformadores de conversión, línea de transmisión y filtros AC y DC. [6]

Al margen de tipo de línea que se utilice para el transporte de electricidad, el sistema tiene que asegurar el equilibrio entre carga y generación, es decir conseguir la potencia suficiente para que las cargas puedan funcionar.

La red eléctrica para ser estable tiene que asegurar la igualdad entre generación y demanda, ya que la energía eléctrica no se puede almacenar de forma eficiente, por lo tanto las centrales eléctricas generaran la energía suficiente para contrarrestar los aumentos de demanda y equilibrar producción-consumo en todo momento.

La demanda no se puede controlar ni medir a tiempo real, debido a la gran cantidad de consumidores y diversidad de usos que existen en la red.

La generación de electricidad se hace mediante maquinas rotativas, generalmente son los generadores síncronos los encargados de producir la energía eléctrica que se

consume, en régimen permanente funcionan en sincronismo, es decir a una velocidad constante de giro. [7]

Se realizan estimaciones de la demanda que habrá para dar servicio a todo el sistema pero al ser variable tendremos que tener centrales de apoyo para solventar alguna desviación.

Los equipos eléctricos se pueden dividir en resistivas y en reactivas. Las cargas del primer tipo funcionan con la corriente en fase con la tensión y pueden utilizar toda la energía eléctrica para transformarla en trabajo, la potencia eléctrica dedicada a un trabajo útil es la llamada activa. [8]

Las cargas reactivas tienen la peculiaridad de que la corriente este desfasada 90° respecto la tensión. Dependiendo si el desfase es positivo (adelantado 90° , carácter capacitivo) o negativo (retrasado, carácter inductivo) el elemento genere o consuma potencia reactiva, siendo un condensador o una bobina. Las bobinas en el semiperiodo positivo almacenan energía en forma de campos magnéticos y los condensadores en ese intervalo de tiempo almacenan energía en forma de campo eléctrico, [9] que posteriormente será devuelta a la red, se puede decir que la potencia reactiva es un excedente que se necesita para que algunos equipos funcionen. [8]

La potencia reactiva se da en los dispositivos que requieren campos magnéticos para su funcionamiento, como pueden ser los transformadores o los motores. [10]

En el transporte de la electricidad hay que tener en cuenta que los generadores producen energía activa pero tanto en las líneas como en los consumidores se consume o se genera energía reactiva, siendo la suma la que hay que transportar. Esto provoca una serie de inconvenientes: mayores caídas de tensión, mayores pérdidas por efecto Joule, menor capacidad de transporte de potencia activa y cambios de tensión producidos por las variaciones de las cargas. [8]

La potencia reactiva por definición está desfasada 90° respecto a la potencia activa, por lo tanto produce desfases entre tensión y corriente, además la capacidad de transmisión de la línea disminuye cuanto mayor sea la potencia reactiva.

Por ello la compensación de potencia reactiva busca tres objetivos importantes:

2.1. Corrección del factor de potencia.

Siendo la potencia aparente la suma compleja entre potencia activa y potencia reactiva.

$$\bar{S} = P + jQ = \sqrt{P^2 + Q^2} \angle \varphi \quad (3)$$

El factor de potencia es el coseno del ángulo φ es decir el ángulo o desfase que existe entre la tensión y la corriente, también es la relación entre la potencia aparente y la potencia activa.

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

Aumentando el factor de potencia, es decir disminuyendo el ángulo φ se consigue un aumento en la capacidad de transporte ya que supone una disminución de la potencia reactiva, por lo tanto también se conseguirá una reducción de pérdidas y por último también se consigue una reducción en la facturación de los clientes ya que en España se puede aplicar un recargo en la factura en el caso de un consumo excesivo de potencia reactiva. [11]

Si se consigue un factor de potencia cercano a la unidad, se logra que se consuma mayor potencia activa esto se consigue compensando la reactiva en los puntos de consumo, mediante los elementos que se definirán más adelante.

2.2. Equilibrado de cargas.

En distribuciones trifásicas no solo el consumo de potencia reactiva es causante de la pérdida de potencia sino también el desequilibrio en las intensidades que originen las cargas, incluso puede darse el caso que un receptor con mayor factor de potencia de más pérdidas que otro con menor ya que sus cargas estén desequilibradas. [12]

Por lo tanto tendremos que tener en cuenta los dos aspectos, intentado conseguir el ahorro energético. [8]

Los desequilibrios además de provocar mayores pérdidas en las líneas también provocan desequilibrios en las tensiones de fase. [8]

2.3. Regulación de tensión.

La regulación de tensión además de ser un objetivo que buscan los compensadores de potencia reactiva también es un objetivo necesario que busca el operador del sistema

El operador del sistema tiene que asegurar que el suministro de la energía a los consumidores se realice bajo unas condiciones de seguridad, fiabilidad y calidad. [13]

Según el procedimiento de operación 7.4 Servicio complementario de control de tensión de la red de transporte: *“el control de tensión consiste en el conjunto de actuaciones sobre los recursos de generación y absorción de potencia reactiva (generadores, reactancias, condensadores, etc.) y otros elementos de control de tensión como los transformadores con cambiador de tomas, orientadas a mantener las tensiones en los nudos de la red de transporte dentro de los márgenes especificados para garantizar el cumplimiento de los criterios de seguridad y calidad del suministro eléctrico.”* [13]

Los márgenes de tensión los establece el Procedimiento de Operación P.O.-1.4 Condiciones de entrega de la energía en los puntos frontera de la red gestionada por el operador del sistema. Según establecen las condiciones técnicas de entrega de la energía: *“3.2 Tensiones en los nudos.- En condiciones normales de operación, la tensión en el nivel de 400 kV en los puntos frontera estará comprendida entre 390 y 420 kV. En el nivel de 220 kV la tensión estará comprendida entre 205 y 245 kV.”* [14]

La red del sistema ibérico se puede considerar como un sistema que consume potencia reactiva debido al predominio de las cargas inductivas. [15]

Tiene gran importancia controlar la tensión en el sistema ya que una mala gestión produce flujos de potencia reactiva provocando pérdidas en la línea. Hay que tener en cuenta también que con una tensión superior al máximo admisible se deterioran los aislantes e instalaciones, mientras que con las tensiones inferiores se reducen la capacidad del sistema para transmitir potencia activa. [15]

Las líneas aéreas por donde se transporta la energía eléctrica presenta efectos inductivos y capacitivos, la circulación de corriente produce campos magnéticos (de carácter inductivo) y la tensión a la que están sometidos campos eléctricos (de carácter capacitivo). Cuando las líneas están cargadas la corriente en ellas será alta por lo tanto predominan los efectos inductivos consumiendo potencia reactiva, lo contrario ocurre cuando las líneas están descargadas. Las líneas subterráneas debido al recubrimiento tendrá mayor efecto capacitivo por lo tanto en ellos se suele generar potencia reactiva. [15]

Por lo tanto, las tensiones en las horas de mayor demanda, las llamadas habitualmente horas punta, suelen ser bajas ya que el consumo de reactiva es alto y suelen ser altas cuando el consumo es bajo. La regulación consiste en inyectar reactiva en las horas punta y consumir reactiva en las horas valle. La regulación de tensión y por tanto de potencia reactiva se hace de forma local, es decir que no es necesario ni transportarla ni sobredimensionar la red. [15]

El control de tensión se hace en los llamados nudos piloto, son nudos que representan una determinada área en la que se ha dividido el sistema. En estos nudos se asegura que estén a la tensión consigna ya que se les asignan generadores que estén próximos. [15]

Debido a que la relación entre la variación de tensión y la reactiva consumida en un punto es aproximadamente lineal, solo se realiza en los puntos donde exista un alto consumo. [8]

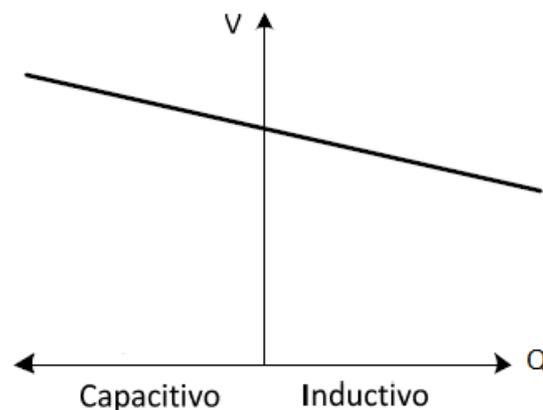


Figura 1: Relación lineal entre potencia reactiva y tensión en un punto de red.

Fuente: [8] y elaboración propia.

En la red se pueden encontrar elementos que producen o consumen potencia reactiva como son: [16]

- Generadores síncronos: son capaces de generar o consumir potencia reactiva dependiendo de su excitación, aunque esta capacidad se ve restringida por los márgenes de funcionamiento de la máquina, entre un 15 y un 20% de la potencia máxima para asegurar que la maquina no se salga del sincronismo. [17] Los generadores síncronos suelen tener incorporada una función para controlar de forma continua la tensión en el nudo de conexión.

- Líneas aéreas: dependiendo de su funcionamiento pueden generar o consumir potencia reactiva, en general cuando están cargadas absorben potencia reactiva y cuando están descargadas la generan.

- Líneas subterráneas: generan potencia reactiva ya que su capacidad distribuida es muy elevada.

- Transformadores: en todo momento consumen potencia reactiva. Si están descargados mediante la reactancia de magnetización y cuando están cargados por la reactancia en serie.

- Cargas: suelen consumir potencia reactiva pero dependen de cómo sea la carga: las lámparas incandescentes y los sistemas de calefacción son resistivos, mientras que los motores de inducción y las lámparas fluorescentes son inductivos. Las industrias con gran consumo de potencia reactiva tienen que instalar compensadores de reactiva para que las compañías eléctricas no las penalicen económicamente.

- Dispositivos compensadores: pueden generar o consumir potencia reactiva dependiendo de su naturaleza y de las necesidades del sistema.

3. Compensadores de potencia reactiva

3.1. Generadores síncronos y compensadores síncronos

Los generadores síncronos son máquinas eléctricas que giran a la velocidad de sincronismo (n se mide en r.p.m.), la cual se define por la frecuencia característica del sistema de conexión y el número de polos que tenga la máquina. [17]

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (5)$$

Siendo:

n La velocidad de sincronismo de la máquina síncrona.

f La frecuencia del sistema, en Europa 50 Hz.

p El número de pares de polos de la máquina.

Las máquinas síncronas también pueden funcionar como motores síncronos en aplicaciones que se necesite un trabajo constante como se puede dar en la industria del cemento o de la metalurgia. [18]

Teniendo en cuenta que las máquinas síncronas tienen la composición de la figura 2 en función de si se aporta energía eléctrica a la red o potencia mecánica al sistema se podrá considerar que es un alternador o un motor. [17]

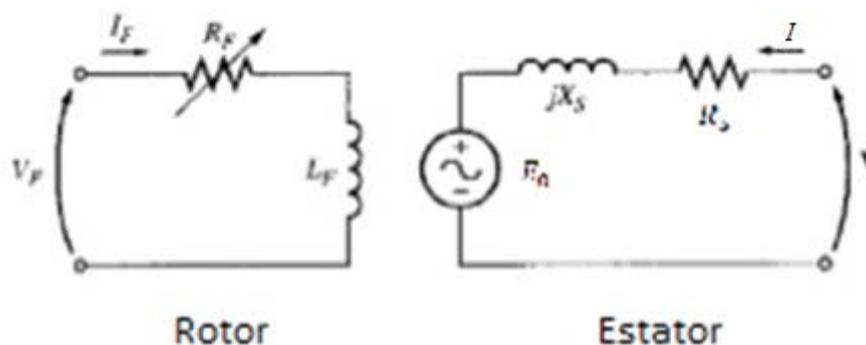


Figura 2: Circuito equivalente de una máquina síncrona.

Fuente: [18] y elaboración propia.

Estando la máquina conectada a la red se puede saber cuál será la potencia aparente de la máquina, se supone despreciable la resistencia de inducido frente a la reactancia de inducido: [17]

$$S = \frac{3 \cdot E_0 \cdot V}{X_s} \cdot \sin \delta + j 3 \cdot \frac{E_0 \cdot V \cdot \cos \delta - V^2}{X_s} \quad (6)$$

Siendo:

E_0 La fuerza electromotriz inducida en vacío.

V La tensión en bornes de la máquina.

X_s La reactancia síncrona

δ El ángulo de potencia

En función del ángulo de potencia o también llamado ángulo de carga la máquina se comportará como generador o como motor, según el criterio de signos para ángulos mayores de cero la máquina trabajará como generador y para ángulos negativos como motor, siendo la potencia activa positiva o negativa respectivamente. [17]

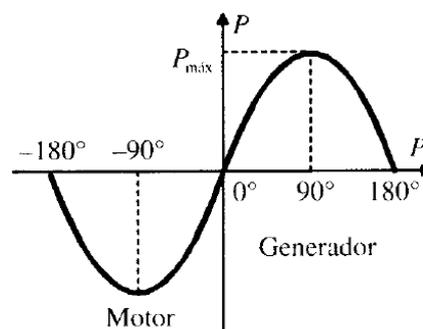


Figura 3: Comportamiento de la máquina síncrona en función del ángulo de carga.

Fuente: [17] y elaboración propia.

Estas máquinas son capaces de trabajar como compensadores de reactiva, también llamados condensadores síncronos en el caso de trabajar en vacío, es decir sin carga mecánica conectada al eje, lo que supone que no se absorba ni se ceda potencia activa, el único consumo de activa será el equivalente a las pérdidas de la máquina. [19]

La compensación de reactiva se produce variando la excitación del compensador síncrono, es decir aumentando o disminuyendo la corriente de excitación. [17]

En el caso de que la corriente de excitación aumente, es decir este sobreexcitado, se produce un aumento en la f.e.m. inducida E_0 por lo que surgirá una circulación de corriente inductiva por el inducido. Es decir, la corriente de inducido está retrasada respecto a la tensión de inducido y produce un efecto desmagnetizante. El alternador vera a la red como una carga inductiva por lo que actuara como si fuera un condensador. [17]

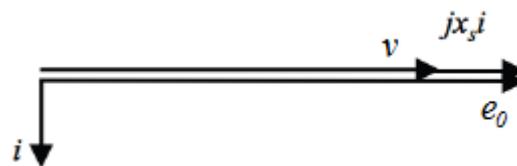


Figura 4: Diagrama vectorial sobreexcitado sin considerar las pérdidas de potencia activa.

Fuente: [17] y elaboración propia.

En el caso de que la corriente de excitación disminuya, es decir este subexcitado, la f.e.m. inducida E_0 sera menor que la tensión de la red provocando que la corriente de inducido sea capacitiva, produciendo el efecto de magnetización. El alternador en este caso vera a la red como un condensador y actuara como una inductancia. [17]

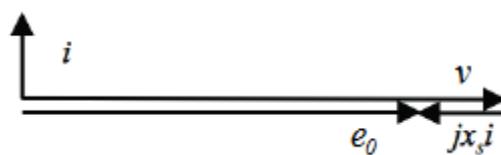


Figura 5: Diagrama vectorial subexcitado sin considerar las pérdidas de potencia activa.

Fuente: [17] y elaboración propia.

La corriente de excitación regula la tensión en vacío de forma lineal hasta que se satura, en donde se necesita demasiada corriente de excitación para aumentar más la tensión de vacío. [15]

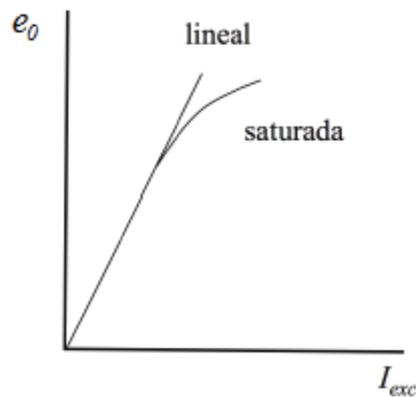


Figura 6: Relación entre la corriente de excitación y la tensión en vacío de un generador síncrono.

Fuente: [17] y elaboración propia

Las características relevantes de los compensador síncronos son: [8]

- Cuanto mayor sea la potencia instalada menor será el precio del KVA.
- Son flexibles pueden compensar en régimen transitorio y estacionario, pueden compensar tanto cargas inductivas como capacitivas.
- Incluso funcionando en vacío tiene una serie de pérdidas por lo tanto consumirá potencia activa para compensar estas pérdidas.
- Coste muy elevado.

Si utilizamos este compensador podemos encontrar las siguientes ventajas respecto a otro compensador. [16]

- Regula la tensión de forma continua, sin ningún transitorio electromagnético que nos podemos encontrar en otros dispositivos.
- No introduce armónicos en la red, ni se ve afectado por ellos.
- No causa problemas por resonancia eléctrica.

En caso de caída de tensión provocada por una falta en la red es capaz de proporcionar la corriente de cortocircuito durante un tiempo limitado, facilitando el ajuste de las protecciones de sobrecorriente. [16]

3.2. Compensadores estáticos instalados paralelos a la carga.

Están formadas por elementos pasivos, es decir por bobinas o por condensadores, controlados por dispositivos electrónicos, se compone de elementos que no tengan ninguna parte móvil.

3.2.1. Reactancias tipo shunt.

Las reactancias shunt se conectan en paralelo al sistema de transmisión, se instalan en lugares donde se quiere compensar la potencia reactiva capacitiva. Las reactancias tienen dos aplicaciones diferentes, se pueden encontrar en líneas largas donde están en servicio indefinidamente para conseguir la estabilidad en el transporte o para controlar la tensión en sistemas interconectados, en este caso se conectarán en los momentos que se detecte un exceso de potencia reactiva capacitiva. [20]

Existen dos tipos de reactancias shunt: [21]

a) Reactancias inmersas en aceite.

Están compuestas de una bobina y un núcleo de hierro, se encuentran instaladas dentro de un tanque de acero el cual será llenado por aceite aislante.

b) Reactancias secas con núcleo de aire.

Están compuestas únicamente por una bobina y aisladores de soporte, el aislamiento a tierra será el espacio comprendido entre la bobina y los aisladores de soporte. El embobinado debe soportar los esfuerzos de tensión impuestos por el sistema, por lo tanto dependiendo de la longitud de la bobina podrá soportar una determinada tensión. En el caso de que la tensión sea superior se conectarán más reactancias por fase.

Debido a la ausencia de un tanque de acero o un núcleo de hierro que contenga el campo magnético, será considerado ya que podrá afectar a los componentes metálicos que estén próximos.

Las reactancias shunt se pueden instalar en diferentes lugares a lo largo de la línea, los más extendidos: conectados en el arrollamiento terciario de un transformador de potencia (1), directamente en el nudo de la subestación (2) o en los extremos de la línea de transmisión (3). [21]

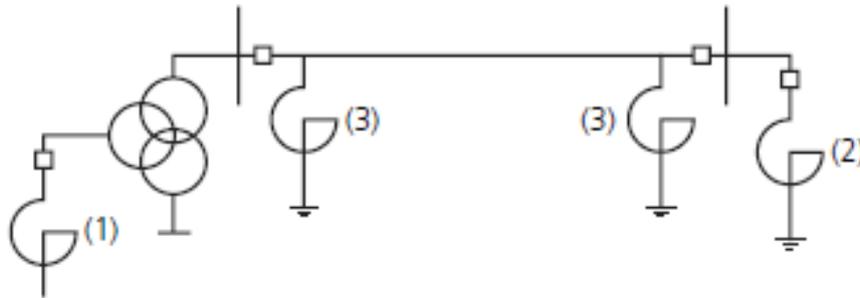


Figura 7: Esquema de los puntos de conexión de las reactancias shunt.

Fuente: [21] y elaboración propia.

1. Conectados al terciario de un transformador de potencia.

Según los requerimientos de la red tendremos que instalar reactancias de más o menos potencia reactiva. Los diseños más efectivos y económicos en esta posición suelen ser las reactancias de tipo seco y cuya longitud de embobinado sea mínima.



Figura 8: Reactancias shunt conectadas al terciario del transformador.

Fuente: [21]

2. Conectados al nudo de la subestación.

La mayoría de reactancias conectadas al nudo o a las líneas de transmisión son inmersas en aceite. Sin embargo, recientemente con las energías renovables se han empezado a instalar reactancias de tipo seco con núcleo en aire las cuales pueden actuar con un nivel de tensión de 345 kV.

3. Conectadas a la línea de transmisión.

Las reactancias shunt que suelen ser conectadas en la línea de transmisión son de tipo seco, se conectaran en estrella siendo de aproximadamente 5 metros para una tensión de 115 kV, para tensiones superiores se deberán conectar más bobinados en serie.

Las reactancias shunt también son capaces de eliminar cortocircuitos de fase a tierra, se producen por la ruptura de aislamiento dieléctrico en el aire. Para contingencias de estas características se abrirá la fase hasta solventar la falta y a continuación se cerrara el interruptor, esta secuencia de operación recibe el nombre de Auto cierre de Fase o SPAR (single-phase auto-reclosing). [21]

Las reactancias shunt presentes en las líneas están permanentemente conectadas y llevan a cabo el SPAR gracias al fenómeno llamado arqueo secundario. Consiste en eliminar el arco que se puede propagar hacia las otras dos fases mientras el interruptor está abierto, cuando se consigue esto se cierra el interruptor. [21]

Las reactancias shunt implementados en la línea suelen ser de tipo seco. Estarán descargadas cuando el funcionamiento de la red sea estable pero cuando se ocasionan las faltas se cargaran entre un 15% y un 25% de la tensión del sistema, dependiendo de los parámetros de la línea. [21]

3.2.2. Reactancias con cambiador de tomas.

Las reactancias con cambiador de tomas siguen el mismo principio de funcionamiento que los transformadores que incluyen un cambiador de tomas en un arrollamiento.

Tanto las reactancias como los transformadores que incluyen el cambiador de tomas, son capaces de absorber la potencia reactiva y regular la tensión del nudo de conexión.

El cambiador de tomas decide la cantidad de espiras que entran en funcionamiento y se conectan al sistema, de esta forma se consigue un óptimo control de tensiones, es decir se considera una regulación discreta.

La regulación de tensión se puede realizar en vacío, es decir se cambia la toma estando el transformador sin tensión. Este tipo de transformadores se encuentran ubicados en las centrales de generación y en la red de distribución de electricidad, el objetivo que persiguen los transformadores de distribución es compensar las caídas de tensión producidas por la línea, y los transformadores de generación regulan la tensión mediante la corriente de excitación del generador. [22]

La regulación de tensión también se puede realizar en carga, es decir el cambio de tomas se hace en tensión. Los transformadores dispuestos con esta tecnología se encuentran ubicados en las redes de transporte y distribución, el cambio de tomas se realiza varias veces al día ya que ajusta la tensión a la consigna. [22]

El cambio de toma en los transformadores en carga se realiza mediante un selector y un conmutador, el selector selecciona la toma de destino y el conmutador realiza el cambio como se ve en la figura siguiente. El selector trabaja sin interrumpir la corriente y puede estar instalado en la misma cuba de arrollamiento mientras el conmutador interrumpe la corriente y se encuentra en otra cuba. [23]

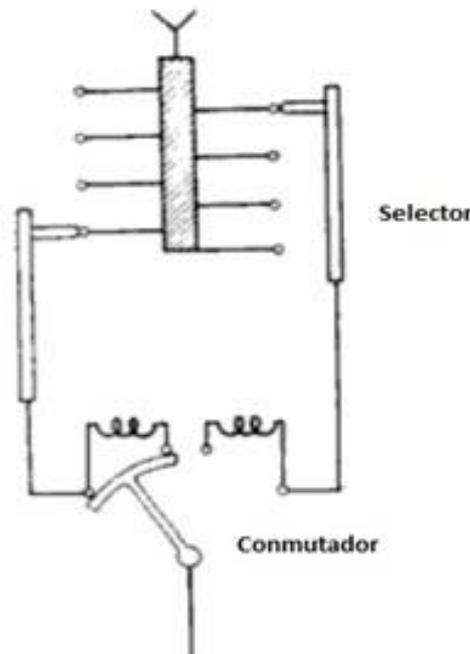


Figura 9: Cambio de tomas de una reactancia.

Fuente: [23] y elaboración propia.

El conmutador tiene conectada una impedancia, pudiendo ser una resistencia para limitar la corriente que se origina al cambiar de toma. [22]

Las reactancias con cambiador de tomas tienen un sensor que detecta la desviación respecto a la tensión de referencia, se cambiara la toma en el caso de que la tensión del nudo este fuera del umbral asignado. [16]

3.2.3. Batería de condensadores.

Los condensadores por definición almacenan energía en forma de campo eléctrico, están formados por dos placas metálicas separadas por un dieléctrico. [24]

Este método consiste en instalar una batería de condensadores en paralelo a la carga, aportando así la potencia reactiva necesaria para compensar la carga, el problema se plantea cuando la demanda varia, ya que este método no es flexible, por lo tanto se deberá de configurar de tal forma que consigamos un factor de potencia aceptable en cualquier circunstancia. [8]

Si nos fijamos en la definición de los condensadores podemos ver que no soportan bien los armónicos ya que decrece su impedancia con la frecuencia, lo que provoca calentamiento y puede llegar a causar la destrucción del condensador. [8]

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (7)$$

Siendo:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (8)$$

Las características de los compensadores son: [8]

- El precio por KVA es igual cualquiera que sea la potencia instalada.
- No es flexible por lo tanto el factor de potencia será diferente dependiendo de la carga, la energía reactiva que suministra la batería de condensadores solo depende de la tensión con la que es alimentado.
- La potencia activa absorbida es muy pequeña
- Tienen un coste asociado bastante bajo.
- Posibilidad de redistribuir los condensadores, es decir de fraccionar la potencia instalada.
- Sensibles a la presencia de armónicos de tensión.

Para conseguir que la batería de condensadores se adapte a la demanda es necesario la actuación de elementos electrónicos, a la primera solución que se llevó a cabo fue la implantación de relés, esta solución se adecua a la demanda pero su respuesta es demasiado lenta, además al ser elementos mecánicos, se desgastan y suponen un gasto en mantenimiento. [8]

Con esta configuración se plantea un problema adicional ya que al desconectar los condensadores de la red se genera una carga residual, la cual debe de ser disipada por un una resistencia o por una bobina de descarga en paralelo al condensador. [8]

Los bancos de condensadores suelen tener instalada una bobina en serie para limitar la corriente de conexión para filtrar en el caso de transitorios o de posibles resonancias a determinadas frecuencias. [8]

3.2.4. Compensador estático de potencia reactiva (Static Var Compensator, SVC)

El control de tensión y de potencia reactiva puede ser controlado de forma constante gracias a la electrónica de potencia, usando tiristores podemos adecuarnos a las necesidades de la red dando paso a una potencia reactiva variable, combinando los compensadores clásicos, condensadores y reactancias, y los tiristores nacieron los compensadores estáticos de potencia reactiva, los conocidos como los SVC (Static Var Compensator).

Los compensadores estáticos de potencia reactiva están conectados en paralelo mediante semiconductores controlando la absorción y la generación de potencia reactiva, está compuesto por un condensador y una reactancia en paralelo, regulables, es decir su capacidad e inductancia se ajustan para intercambiar la reactiva necesaria para controlar la tensión en el nudo. [16]

Un SVC ideal podría generar y absorber de forma indefinida para garantizar la tensión en sus terminales, además no tendría pérdidas y respondería de forma inmediata, por tanto la característica de tensión-corriente sería una recta horizontal, como se puede ver en la siguiente figura. [16]

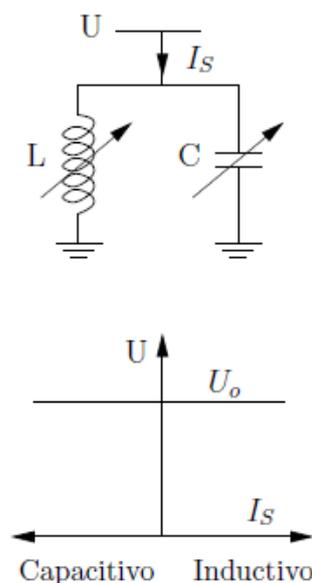


Figura 10: Característica de un compensador estático ideal.

Fuente: [16] y elaboración propia.

Este control de potencia reactiva se puede hacer de dos formas: [25]

- Compensación discreta o por paquetes: el control se realiza mediante un interruptor electrónico, antiguamente se utilizaban interruptores mecánicos.
- Compensación continua en este caso el control se realiza mediante tiristores, lo cual nos da una ventaja considerable consiguiendo abrir y cerrar el interruptor en el momento deseado.

La compensación discreta que se realizaba mediante un interruptor mecánico se les conoce como SVC/MS y tienen la siguiente distribución: [25]



Figura 11: Compensación discreta SVC/MS.

Fuente: [25] y elaboración propia.

Pero actualmente se han cambiado los interruptores mecánicos por tiristores en antiparalelo aportan la ventaja que se conseguirá abrir y cerrar en el momento deseado por lo que se consigue un control más adecuado de la potencia reactiva y de la tensión en los nudos. [25]

Los tiristores se instalan en antiparalelo para así conseguir que funcione como interruptor y como controlador, en el caso de que funcione como interruptor se le llamara TS, en el caso de que lo haga como controlador TC. Si los tiristores trabajan como interruptor se conseguirá una compensación discreta, si trabajan como controladores hablaremos de compensación continua. [25]

Si los tiristores trabajan con reactancias se le añadirá la letra R, en el caso de que lo hagan con condensadores se utilizara C por lo tanto se diferencia entre los siguientes esquemas: [25]

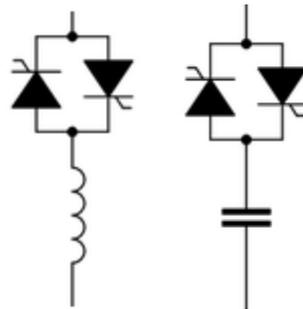


Figura 12: Tiristores en antiparalelo trabajando con Reactancias o con Condensadores.

Fuente: [25] y elaboración propia.

Los compensadores estáticos de potencia reactiva que se utilizan en la práctica son la combinación de los nombrados anteriormente como por ejemplo: [25]

- SVC/TCR-TSC (Compensador estático de potencia reactiva con reactancias controladas por tiristores y condensadores interrumpidos por tiristores).

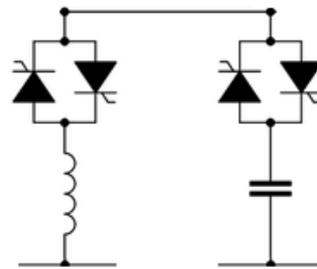


Figura 13: Compensador SVC/TCR-TSC.

Fuente: [25] y elaboración propia.

- SVC/TCR-FC (Compensador estático de potencia reactiva con reactancias controladas por tiristores y condensador con capacidad fija).

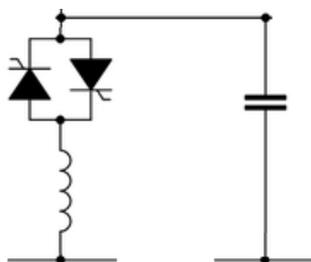


Figura 14: Compensador SVC/TCR-FC.

Fuente: [25] y elaboración propia.

- SVC/TCR-MSVC (Compensador estático de potencia reactiva con reactancias controladas por tiristores y condensador con interruptor mecánico).

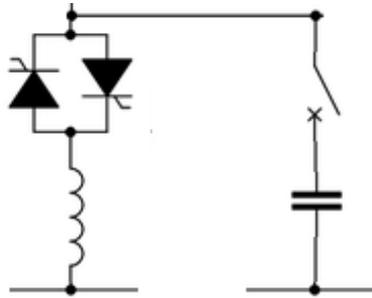


Figura 15: Compensador SVC/TCR-MSVC.

Fuente: [25] y elaboración propia.

- SVC/TSR-TSC (Compensador estático de potencia reactiva con reactancias interrumpidas por tiristores y condensadores interrumpidos por tiristores).

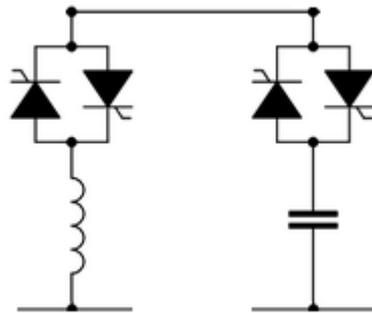


Figura 16: Compensador SVC/TSR-TSC.

Fuente: [25] y elaboración propia.

Para poder entender todas estas configuraciones entre condensadores e inductancias primero se explicaran en los sucesivos apartados las características de cada rama por separado. [26]

3.2.4.1 Compensador de reactancia controlado por tiristores (TCR) o conmutado por tiristores (TSR).

Una reactancia controlada por tiristores de una sola fase como el que se puede ver en la figura 17(a). Consiste en una reactancia fija de inductancia L y tiristores en antiparalelo. Estos tiristores son capaces de soportar entre 4 y 9 kV y conducir

corrientes de 3000 o 6000 A. Los tiristores se bloquean automáticamente en el momento que la corriente pase por cero.

La corriente en la reactancia puede ser controlada por el ángulo de disparo de los tiristores. El periodo de conducción de los tiristores está íntimamente relacionado con el ángulo de disparo, este ordena cuando entra en funcionamiento el tiristor, el ángulo de conducción se define:

$$\sigma = \pi - 2\alpha \quad (9)$$

En el caso de que el ángulo de disparo $\alpha=0$, el interruptor está completamente cerrado y la corriente en la bobina será la misma que la calculada en estado estacionario, pero para ángulos comprendidos entre $(0 \leq \alpha \leq \pi/2)$ la corriente será expresada por:

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_{\alpha}^{\omega t} v(t) dt = \frac{V}{\omega L} (\sin \omega t - \sin \alpha) \quad (10)$$

La puerta de apertura de los tiristores por definición, abre cuando la corriente llega a cero (10) es válido para el intervalo $\alpha \leq \omega t \leq \pi - \alpha$. Para semiciclos negativos, el signo será inverso.

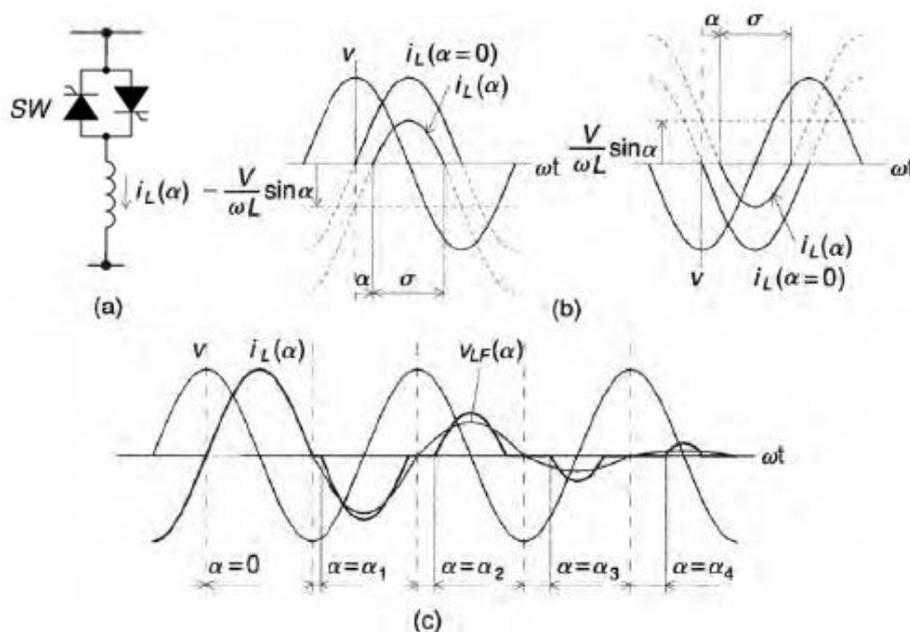


Figura 17: (a) Esquema TCR, (b) Retraso del ángulo de disparo y (c) Formas de onda.

Fuente: [26] y elaboración propia.

La amplitud de la componente fundamental $I_{LF}(\alpha)$ de la corriente de la impedancia puede ser expresada en función del ángulo α :

$$I_{LF}(\alpha) = \frac{V}{\omega L} \left(1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right) \quad (11)$$

Donde V es la amplitud de la tensión alterna aplicada, L es la inductancia del tiristor controlado del reactor, y ω es la frecuencia angular de la tensión aplicada. La variación de la amplitud $I_{LF}(\alpha)$, normalizada para la máxima corriente $I_{LFmax}(\alpha)$ ($I_{LFmax}(\alpha) = V/\omega \cdot L$) se muestra representada frente retraso ángulo en la figura 18.

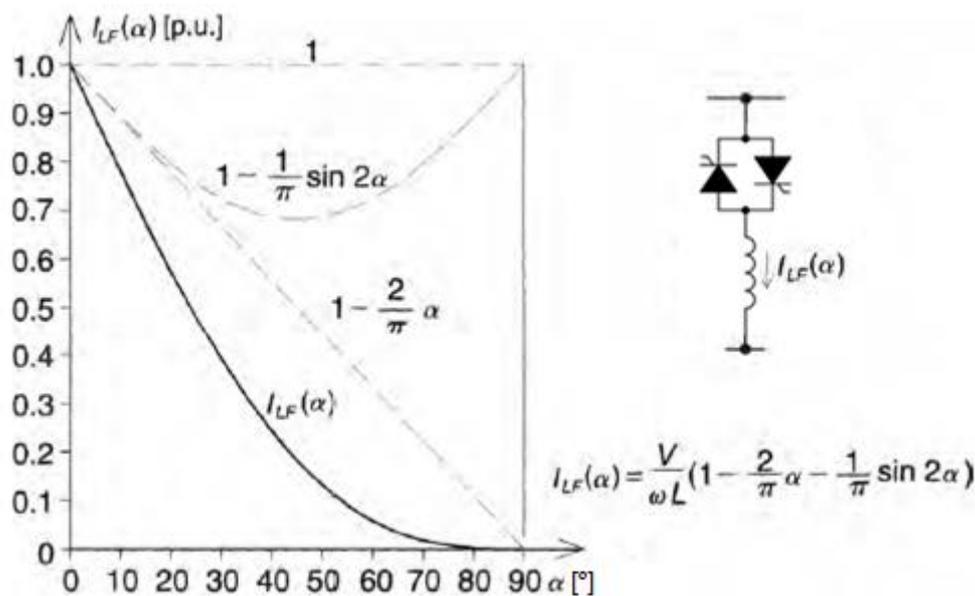


Figura 18: Variación de la corriente fundamental TCR respecto al ángulo de disparo.

Fuente: [26] y elaboración propia.

Se puede apreciar en la figura 18 que el TCR puede controlar la corriente fundamental constantemente desde cero (valor de apertura) hasta un máximo (valor cerrado) consiguiendo una admitancia variable. Es decir, una admitancia reactiva efectiva, $B_L(\alpha)$ para el TCR puede ser definido como una función de ángulo α , de la misma forma que se define la corriente fundamental.

$$B_L(\alpha) = \frac{1}{\omega L} \left(1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right) \quad (12)$$

Evidentemente la admitancia $B_L(\alpha)$ varia con α en la misma magnitud que la corriente fundamental $I_{LFmax}(\alpha)$

Por lo tanto por cada retraso de ángulo α una admitancia efectiva $B_L(\alpha)$ puede ser definida por la que determina la magnitud de la corriente fundamental, $I_{LF}(\alpha)$ en el TCR dando una tensión aplicada V . En la práctica, la magnitud máxima de la tensión aplicada y la de la corriente correspondiente estarán limitadas por la clasificación de los componentes de potencia (reactancias y tiristores en antiparalelo) utilizados. Es decir, un TCR práctico puede ser operado en cualquier área definida por V - I , los límites del cual se determinan por su admisión máxima de tensión y corriente, como se ilustra en la figura 19 (a). Los límites del TCR son establecidos por el diseño de los requerimientos de operación.

Si el TCR está restringido para un retraso de ángulo fijado, normalmente $\alpha = 0$, entonces se considerara un TSR. El TSR proporciona una inductancia fija y por lo tanto, cuando conectamos un sistema de corriente alterna, la corriente reactiva sería proporcionada por la tensión aplicada como el dibujo V - I de la figura 19 (b). Varios TSR pueden proporcionar una admitancia reactiva controlable de manera escalonada. Si los TSR están operando $\alpha = 0$, el resultado escalonado de la corriente será sinusoidal.

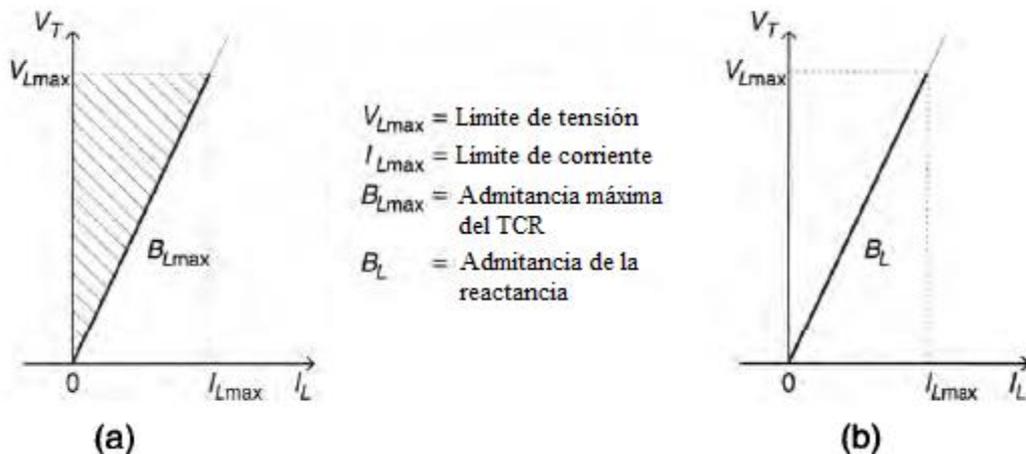


Figura 19: (a) Área de operación del TCR y (b) del TSR.

Fuente: [26] y elaboración propia.

3.2.4.2 Condensador con interruptores de tiristores (TSC) [Thyristor-switched Capacitor]

Una línea monofásica con un TSC se muestra en la figura 20(a). Se compone de un condensador, dos tiristores en antiparalelo y una reactancia relativamente pequeña.

Esta reactancia es necesaria principalmente para limitar las sobrecargas de corriente en los tiristores en antiparalelo en condiciones anormales de funcionamiento, también puede ser usado para evitar resonancias con la impedancia del sistema de corriente alterna a frecuencias particulares.

En condiciones de estado estacionario, cuando la válvula de tiristores está cerrada y la rama de TSC está conectada a una fuente de corriente alterna sinusoidal, $v = V \cdot \sin \omega \cdot t$ la corriente en la rama está dada por:

$$i(\omega t) = V \frac{n^2}{n^2-1} \cdot \omega \cdot C \cdot \cos \omega t \quad (13)$$

Donde

$$n = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 \cdot L \cdot C}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (14)$$

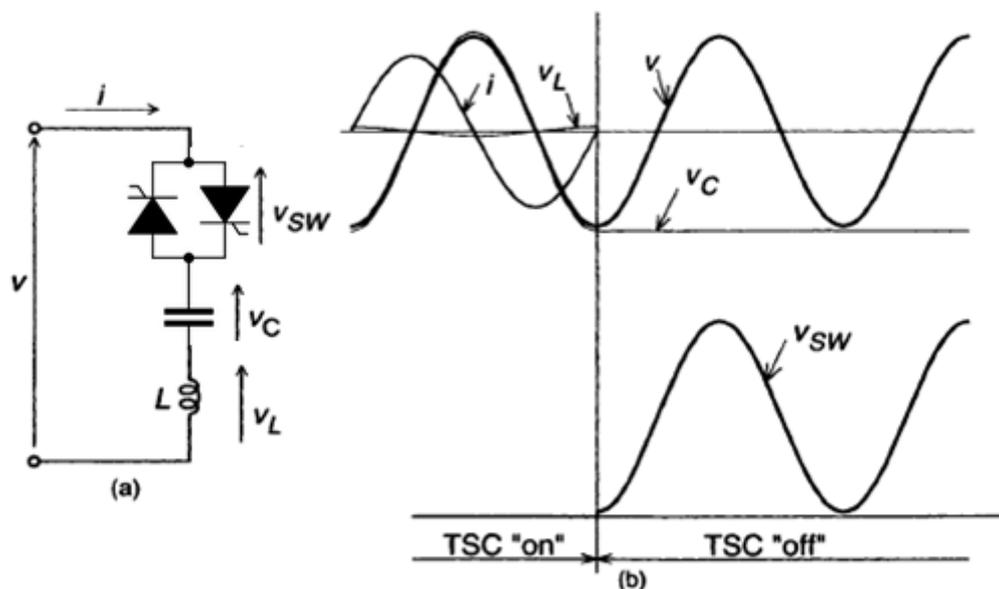


Figura 20: (a) Esquema de un TSC y (b) Formas de onda.

Fuente: [26] y elaboración propia.

La amplitud de la tensión que cruza el condensador es

$$V_C = \frac{n^2}{n^2-1} \cdot V \quad (15)$$

La rama TSC puede ser desconectada en cualquier paso por cero de corriente. En ese momento, la tensión del condensador está en su valor máximo $v_{c,i=0} = V \cdot n^2/(n^2 - 1)$. El condensador desconectado está cargado a esta tensión y, consecuentemente, la tensión a través de la válvula del tiristor no conductor varía entre cero y el valor pico de la tensión alterna aplicada, como ilustra la figura 20(b).

Las condiciones para la conmutación sin transitorios de un condensador se pueden resumir en la figura 21. Como se ve, dos reglas simples cubren todos los casos posibles: el primer caso en el supuesto que la tensión residual del condensador es menor que la tensión de pico de corriente alterna ($V_c < V$), entonces el instante correcto de conexión se da cuando la tensión de corriente alterna se hace igual a la tensión del condensador; y el segundo caso en el supuesto que la tensión residual del condensador es igual o mayor que la tensión pico de corriente alterna ($V_c \geq V$) entonces el momento de conexión correcto se da en el pico de tensión de corriente alterna cuando la tensión en la válvula de tiristores es mínima.

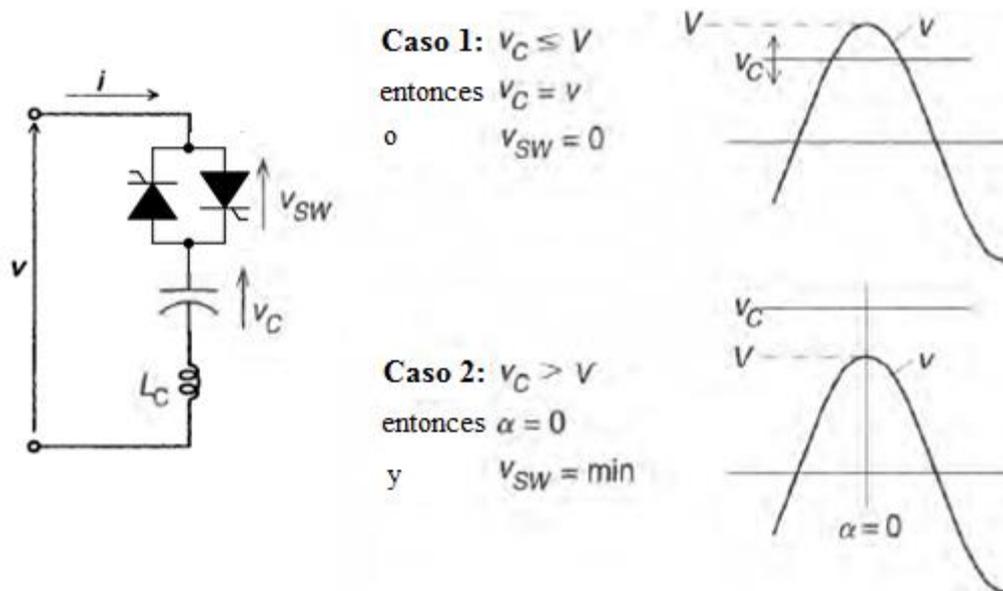


Figura 21: Condiciones de conmutación para un TCR con diferente voltaje residual.

Fuente: [26] y elaboración propia.

De lo anterior, se deduce que el retraso máximo posible en la conexión en una batería de condensadores es un ciclo completo de la tensión alterna aplicada. También se deduce que el retraso del ángulo de disparo controlado no es aplicable a los condensadores; la conexión del condensador debe tener lugar en ese instante específico

en cada ciclo en el que las condiciones de mínimo transitorio se satisfacen, es decir, cuando la tensión en los tiristores en antiparalelo es cero o mínima. Por esta razón, una rama TSC puede proporcionar solo un cambio de escalón en la corriente reactiva que se dibuja (máximo o cero). En otras palabras, la rama TSC representa una sola entrada capacitiva ya sea conectada o desconectada del sistema de corriente alterna. La corriente en la rama TSC varía linealmente con la tensión aplicada acorde con la admitancia del condensador como se ve en la figura 22. La tensión máxima aplicable y la corriente correspondiente están limitadas por los componentes del TSC (condensadores y tiristores antiparalelos).

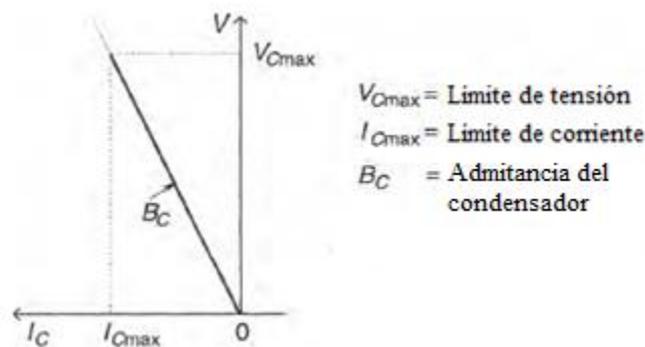


Figura 22: Área de operación V-I de un TSC.

Fuente: [26] y elaboración propia.

3.2.4.3. Condensador Fijo, reactancias controladas por tiristores. [Fixed Capacitor, Thyristor-Controlled Reactor] (FC-TCR)

Esta disposición del SVC, consta de un condensador fijo (conectado permanentemente) y una reactancia controlada por tiristores, la figura 23(a) muestra su disposición. La corriente en el compensador es variada por el método discutido previamente por el control del ángulo de disparo. El condensador fijo en la práctica se suele sustituir, total o parcialmente, por una red de filtros que a la frecuencia fundamental tiene la impedancia capacitiva necesaria para generar la potencia reactiva requerida, pero proporciona una baja impedancia a frecuencias seleccionadas para derivar los armónicos dominantes producidos por el TCR.

Para explicar el funcionamiento de esta disposición tendremos que tener en cuenta que el condensador al ser fijo siempre aportara reactiva (Q_C) y la reactancia se opondrá

a ese aporte controlando el ángulo de disparo de los tiristores. El compensador aportara la máxima potencia reactiva en el caso de que los tiristores estén apagados es decir el ángulo de disparo $\alpha=90^\circ$. En el caso de que la capacidad de la reactancia sea superior al del compensador se conseguirá una absorción de reactiva, el momento máximo se da cuando el ángulo de disparo $\alpha=0^\circ$ ya que estará funcionando en todo momento. Por lo tanto se puede considerar el generador de reactiva de tipo FC-TCR como una admitancia reactiva controlable.

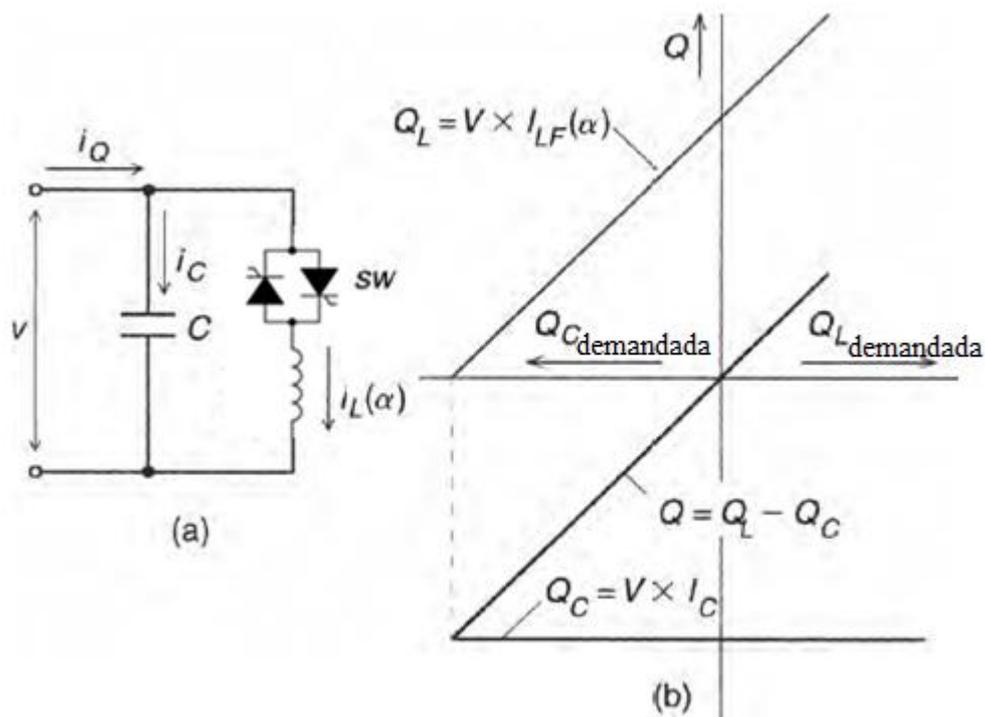


Figura 23: Esquema de operación SVC/FC-TSC y su potencia reactiva característica.

Fuente: [26] y elaboración propia.

El área de operación V-I del FC-TCR es definido por la máxima capacidad alcanzable e inductancia admisible y por la tensión y corriente de los principales componentes de potencia (condensador, reactancia y tiristores antiparalelos) como ilustra la figura 24 el valor de los componentes de potencia.

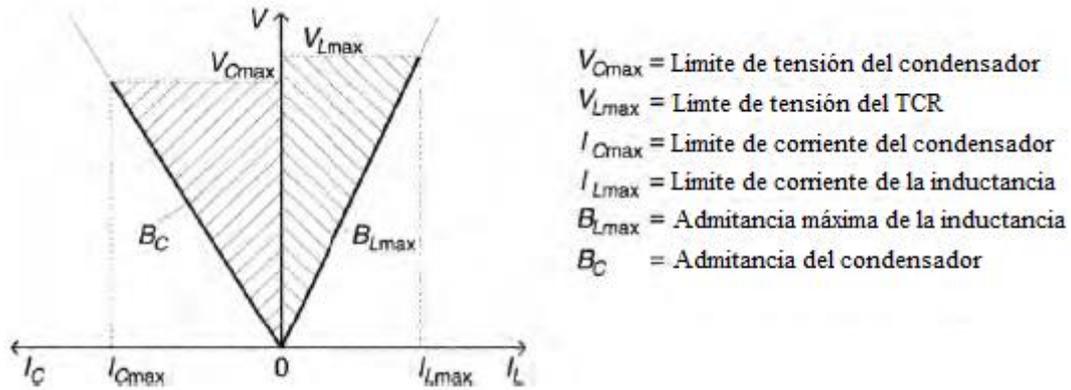


Figura 24: Área de operación V-I del SVC/FC-TCR.

Fuente: [26] y elaboración propia.

Las pérdidas frente a las salidas de reactiva característica de los generadores de reactiva en aplicaciones prácticas es de mayor importancia. En el tipo FC-TCR, hay tres componentes principales de las pérdidas encontrados: (1) el condensador (o filtro capacitivo) las pérdidas son relativamente pequeñas pero constantes, (2) Las pérdidas de la reactancia aumentan con el cuadrado de la corriente, y (3) las pérdidas de tiristores aumentan casi linealmente con la corrientes. Por lo tanto, las pérdidas totales incrementan con un incremento en la corriente TCR y, consecuentemente, decrecen incrementando capacitivamente la salida de potencia reactiva. Este tipo de pérdidas características es ventajoso cuando la media de salida de potencia reactiva capacitiva es relativamente mayor como, por ejemplo, en aplicaciones industriales requieren una corrección del factor de potencia, y es desventajoso cuando la producción media de potencia reactiva es baja, como por ejemplo en el caso de compensación dinámica de los sistemas de transmisión de potencia.

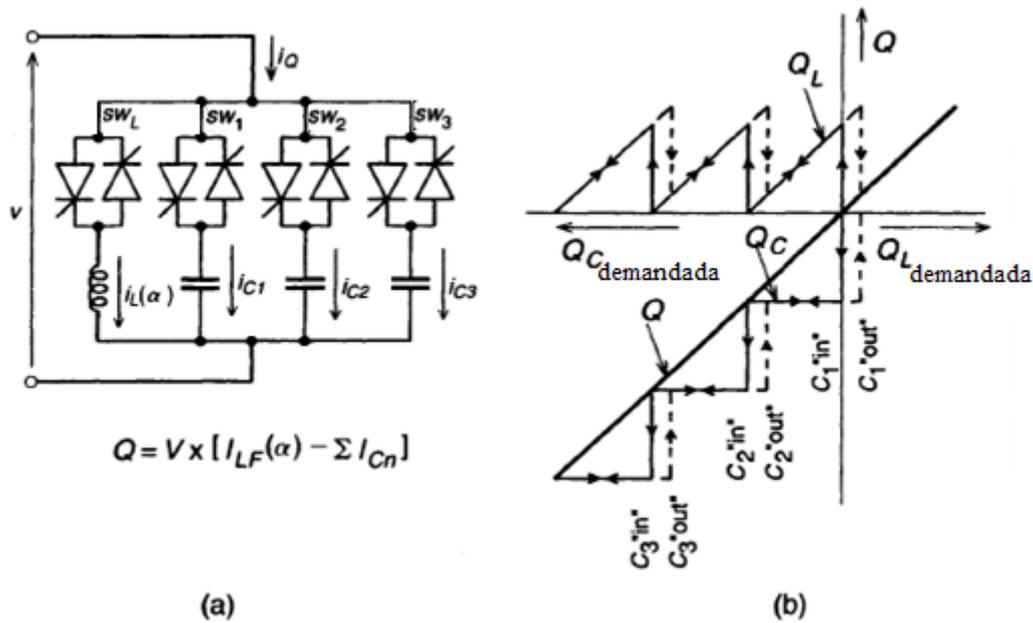


Figura 26: Esquema de operación del SVC/TSC-TCR y su potencia reactiva característica.

Fuente: [26] y elaboración propia.

La operación del TSC-TCR mostrada en la figura 26 (a) puede ser descrita como sigue:

La capacidad máxima capacitiva es dividida entre n intervalos. En el primer intervalo, la salida del generador de reactiva es controlable en el cero hasta el rango Q_{Cmax}/n , donde Q_{Cmax} es el rango total producido por las ramas TSC. En este intervalo, un banco de condensadores es conectado (por el disparo, por ejemplo, válvula de tiristores SW_1) y, simultáneamente la corriente en el TCR es fijada por el ángulo de disparo apropiado de modo que la suma de la potencia reactiva de los TSC (negativos) y de los TCR (positivos) es igual a la capacitiva de salida requerida.

Conectando el resto de intervalos la potencia reactiva capacitiva aumentara y el TCR absorberá el excedente capacitivo de potencia reactiva, como muestra la figura 26 (b)

Para ser capaz de conectar y desconectar los bancos de condensadores en un ciclo de la tensión alterna aplicada, el máximo excedente capacitivo de potencia reactiva en la salida puede restringirse a la producida por un banco de condensadores, y por lo tanto, teóricamente, el TCR debe tener la misma cantidad de potencia reactiva que el TSC. Sin embargo, para asegurar que las condiciones de conmutación en los puntos extremos de

los intervalos no son indeterminados, la cantidad de potencia reactiva del TCR tiene que ser algo mayor en la práctica que la del TSC con el fin de superponerse entre el momento de encendido y apagado.

La demanda de potencia reactiva frente a la salida de potencia reactiva caracterizada por el generador de tipo TSC-TCR se muestra en la figura 26 (b). Como se ve, la salida de capacitiva reactiva, Q_C , es cambiado de manera escalonada por los TSC para aproximarse a la demanda de potencia reactiva con un excedente capacitivo neto, y la relativamente pequeña salida inductiva reactiva del TCR, Q_L , es usado para cancelar el excedente capacitivo.

En cierto modo, este esquema podría ser considerado como un condensador especial fijo, reactancia controlada por tiristores, en el que la capacidad de la reactancia es relativamente pequeña (1/n veces el máximo de la salida capacitiva), y la capacidad del condensador es cambiado en pasos discretos así como para mantener el funcionamiento del TCR dentro de su rango normal de control.

El compensador del tipo TSC-TCR, similarmente para FC-TCR, se puede considerar como una admitancia controlable, que, cuando se conecta a un sistema de corriente alterna, sigue fielmente una señal de referencia de entrada arbitraria. La tensión y la corriente a la salida del TCR-TSC sera idéntica al FC-TCR.

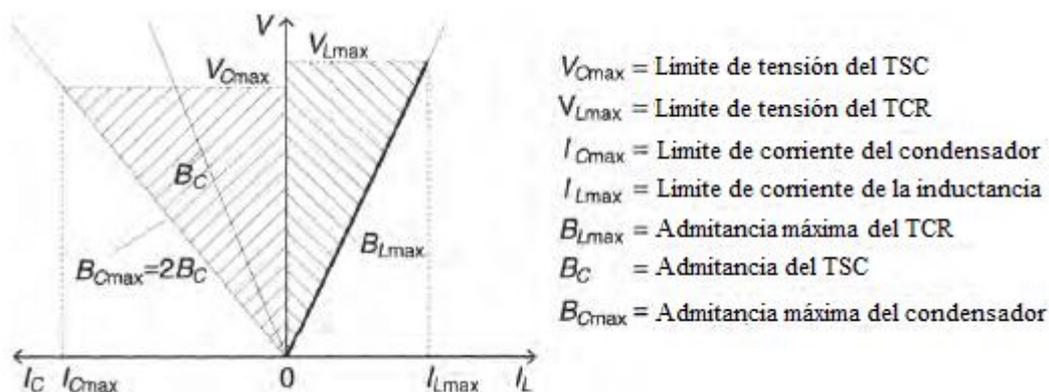


Figura 27: Área de operación V-I del SVC/TSC-TCR con dos bancos de TSC.

Fuente: [26] y elaboración propia.

La pérdida en comparación con la salida de potencia reactiva característica del TSC-TCR siguiendo su principio de operación básico. Estando la potencia reactiva por

debajo de cero, todos los bancos de condensadores están desconectados, la corriente de TCR es cero o depreciable, y en consecuencia, las pérdidas son cero o casi cero. A medida que aumenta la salida capacitiva, un número creciente de bancos TSC son conectados con el TCR absorbiendo el excedente capacitivo de potencia reactiva. Por lo tanto, con cada conexión de TSC, aumentan las pérdidas una cantidad fija. Para esta pérdida fija, hay que añadir las pérdidas del TCR, que varían desde el máximo hasta cero entre los sucesivas conexiones de los bancos TSC, como ilustra la figura 28. En general, las pérdidas del compensador de potencia reactiva tipo TSC-TCR varían, en promedio, en proporción de la salida de potencia reactiva. Este tipo de pérdidas características es claramente ventajoso en aquellas aplicaciones en las que el generador de potencia reactiva se utiliza para la compensación dinámica y no está obligado a proporcionar una alta producción media de potencia reactiva de salida para el funcionamiento normal del sistema de potencia.

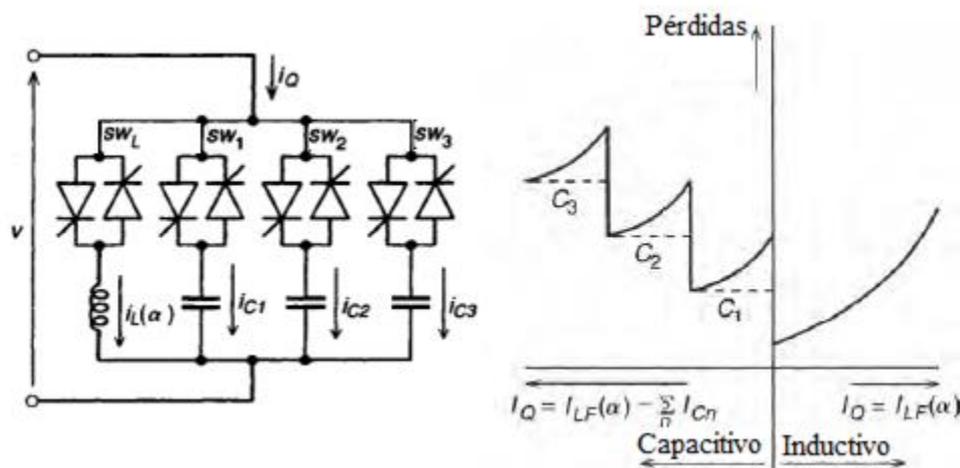


Figura 28: Pérdidas frente a salida de potencia reactiva del SVC/TSC-TCR.

Fuente: [26] y elaboración propia.

La configuración MSC-TCR trata de reducir las pérdidas en altas salidas capacitivas, pero esta configuración no consigue una compensación dinámica, ya que un control preciso y constante del cierre del interruptor mecánico no es posible, el banco de condensadores debe ser cambiado sin ninguna carga residual apreciable para evitar fallos. Por esta razón, cada vez que el condensador se desconecta, se descarga (normalmente a través de una reactancia de saturación) antes de que la siguiente conmutación tenga lugar. Considerando en la práctica un tiempo de descarga alrededor de 3-4 ciclos, un tiempo de cierre del interruptor típico de 3-7 ciclos, el tiempo de

retraso del MSC puede ser de 6-11 ciclos, que es de 6 a 11 veces mayor que la que puede conseguir con un TSC bajo las peores condiciones.

La salida de la combinación MSC-TCR no sería capaz de seguir un cambio en la corriente reactiva de referencia a menos que el cambio sea muy lento, o que se trate de un solo cambio escalonado en un momento en el que el condensador ya está descargado listo para conectarse.

3.2.4.5. Funcionamiento del SVC

Para entender el funcionamiento real de un SVC se considerara un sistema formado por una bobina controlable y un condensador fijo. Ya que la bobina es controlable podremos elegir como será su pendiente característica, siempre y cuando nos mantengamos dentro de los límites de inductancia mínima y máxima. El condensador al ser fijo su recta característica la determina la ecuación $I_C = \omega CU$. [16]

La suma de las características tensión-corriente nos dará la característica del SVC, como se puede observar en la figura el compensador se divide en tres zonas y puede funcionar tanto capacitivamente como inductivamente, la corriente nula corresponde a la tensión nominal del nudo de conexión. [16]

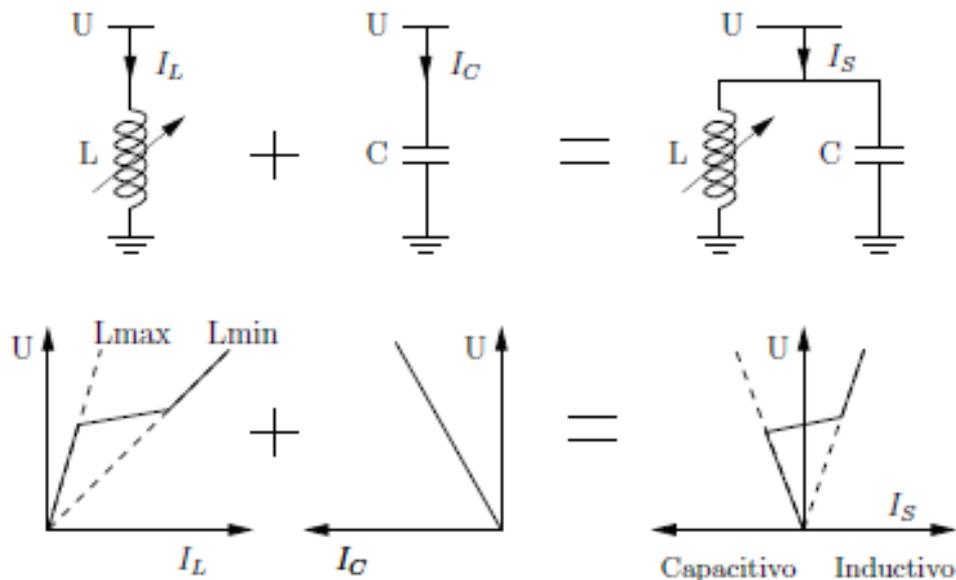


Figura 29: Composición de la característica de un compensador estático.

Fuente: [16] y elaboración propia.

Cuando la tensión es superior a la nominal, el compensador SVC absorberá potencia reactiva, si la tensión está por debajo del valor nominal aportará potencia reactiva. Hasta conseguir la tensión nominal en el nudo de conexión. [16]

En el caso de que el nudo este sometido a tensiones excesivamente bajas el compensador actuara de forma totalmente capacitiva nos encontramos en la zona 1, corresponde a la línea que sale del origen, donde la inductancia se reduce al mínimo y el compensador actúa como un condensador, el aporte de reactiva será proporcional al cuadrado de la tensión. Por lo tanto se puede decir que los SVC son capaces de adaptarse a las contingencias y regular su aporte de reactiva a la red, incluso adaptarse en el caso de huecos de tensión provocados por cortocircuitos. [16]

La compensación del SVC puede ampliarse mediante condensadores conmutados, los cuales se podrán conectar o desconectar en función de las necesidades del sistema. En la etapa 1 están conectados una inductancia regulable y un condensador, en el caso de que el sistema necesite más aporte de reactiva se conectarán también los condensadores de la etapa 2 y 3 sucesivamente de tal forma que la curva característica tensión-corriente se desplazara hacia la zona capacitiva. [16]

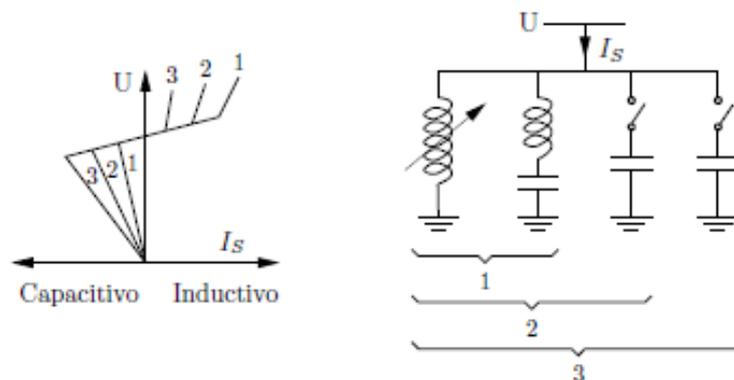


Figura 30: Compensador estático con tres escalones de condensadores.

Fuente: [16] y elaboración propia.

Los condensadores se conectan también mediante tiristores para evitar los transitorios electromagnéticos producidos por los interruptores, además mediante los componentes electrónicos se conseguirá una mayor rapidez de conexión. [16]

Los SVC tienen las siguientes aplicaciones: [16]

En redes de transporte:

- Control de sobretensiones temporales
- Prevención del colapso de tensión
- Mejora de la estabilidad transitoria.
- Atenuación de las oscilaciones electromecánicas en la red.

En redes de distribución:

- Balance de sistemas desequilibrados.
- Reducción del efecto parpadeo (flicker) en las proximidades de hornos de arco u otras cargas variables.

Los compensadores estáticos de potencia reactiva tienen algunas ventajas desde el punto de vista de las compañías eléctricas: [27]

- Consiguen soportar a la red durante las faltas.
- Compensan en paralelo.
- Controlan la tensión de la red.
- Amortiguan las oscilaciones.
- Controlan los bancos de condensadores.

Desde el punto de vista de la industria. [27]

- Controlan el factor de potencia
- Mitigación del parpadeo
- Reducen los armónicos

3.2.5. STATCOM

El STATCOM (Static Synchronous Compensator) es un convertidor estático síncrono es capaz de generar o absorber de forma controlada tanto potencia reactiva como potencia activa. [28]

El STATCOM se puede considerar como la evolución del SVC. Su funcionamiento se basa en controlar el voltaje que genera un inversor de tensión, éste se conecta a la red mediante la reactancia de dispersión de un transformador, el control depende de la diferencia de tensiones a través de la reactancia llevando a un intercambio de potencia activa y reactiva entre la red y el STATCOM. [28]

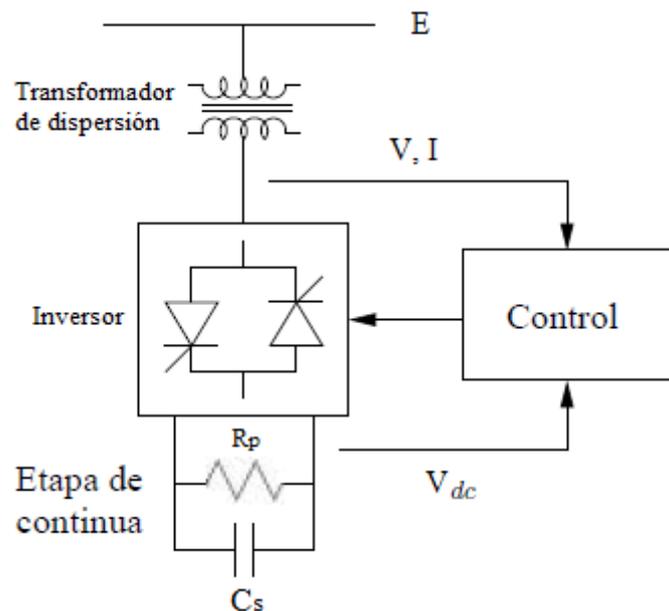


Figura 31: Esquema general de un STATCOM.

Fuente: [16] y elaboración propia.

El circuito del STATCOM consiste en un inversor de tensión y un condensador (C_s) en el lado de corriente continua, la resistencia (R_p) representa las pérdidas del condensador. El STATCOM se conecta al sistema mediante una impedancia de dispersión. [28]

El STATCOM compensa la potencia reactiva consiguiendo que el ángulo de fase entre la tensión de línea y la tensión del inversor se ajuste dinámicamente de forma que se genere o se absorba potencia reactiva en el punto de conexión.

Se pueden dar diferentes situaciones en la conexión entre el STATCOM y la red. [29]

1. En el supuesto que la tensión del STATCOM este adelantada respecto a la tensión de red, el compensador aportara potencia activa a la red.
2. En el caso que la tensión V_S esté atrasada respecto de la tensión V_R , se originara un flujo de potencia activa desde la red hacia el compensador.
3. Cuando la tensión V_R esté en fase con la tensión V_S , y además $|V_R| = |V_S|$, no existirá flujo de potencia activa ni reactiva.
4. En el supuesto que la tensión V_R esté en fase con la tensión V_S , y además $|V_R| < |V_S|$, no existe flujo de potencia activa pero el STATCOM funcionara de forma capacitiva ya que ve al sistema como una reactancia inductiva.
5. En el supuesto que la tensión V_R esté en fase con la tensión V_S , y además $|V_R| > |V_S|$, no existe flujo de potencia activa pero el STATCOM funcionara de forma inductiva ya que ve al sistema como una reactancia capacitiva.

Por lo tanto podemos decir que una fuente de tensión con capacidad de control de fase puede direccionar el flujo de potencia activa y controlando la amplitud puede controlar la potencia reactiva. [29]

Como se ha visto el STATCOM puede suministrar tanto potencia capacitiva como inductiva a la tensión deseada. Como se ve en la siguiente figura el STATCOM tiene una capacidad transitoria adicional tanto en el caso de aportar potencia inductiva como capacitiva. En la región inductiva, está limitada la capacidad de corriente transitoria por la temperatura permisible en la unión de los conmutadores, ya que los inversores son naturalmente conmutados. En la región capacitiva, está limitada por la máxima capacidad de corriente de encendido y apagado de los inversores. [28]

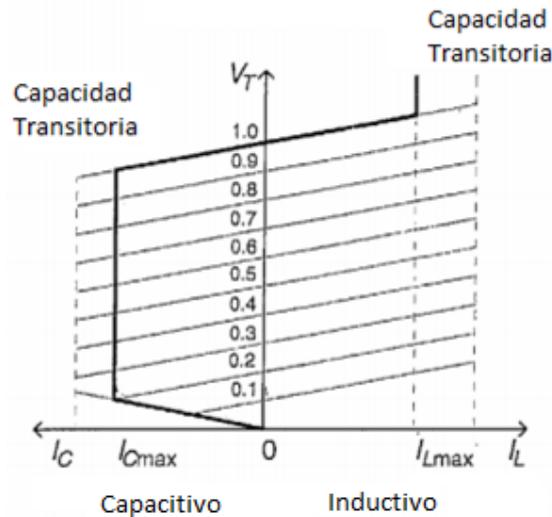


Figura 32: Área de operación V-I de un STATCOM.

Fuente: [28] y elaboración propia.

En la práctica, los semiconductores presentan pérdidas, por lo tanto la energía almacenada en el capacitor DC eventualmente se utilizará para proporcionar las pérdidas internas del inversor, disminuyendo el voltaje del capacitador. Si el STATCOM funciona generando potencia reactiva el inversor mismo puede mantener cargado el condensador en el nivel deseado de voltaje, esto se puede conseguir haciendo que la salida del inversor atrase al voltaje del sistema en un pequeño ángulo (generalmente entre 0.1° y 0.2°). De esta manera el inversor absorbe una pequeña cantidad de potencia real del sistema para proporcionar las pérdidas internas, y mantener el voltaje del capacitador en el nivel deseado. De la misma forma se puede aumentar o disminuir la tensión del condensador y con ello la amplitud del voltaje de salida del inversor, con el propósito de controlar la generación o absorción de potencia reactiva. [28]

El funcionamiento del STATCOM depende de la amplitud de las tensiones, inyectará potencia reactiva en el sistema en el caso de que la tensión del compensador sea mayor que la tensión del nudo AC, es decir la corriente circulara del compensador al sistema. Consumirá potencia reactiva en el caso de que la tensión del nudo AC sea mayor que la tensión del compensador, es decir funcionara como una reactancia. En el caso de que las amplitudes sean iguales no habrá intercambio de potencia reactiva. [28]

El intercambio de potencia activa entre el compensador y el sistema es análogo al intercambio de potencia reactiva pero en este caso nos fijaremos en los ángulos de las tensiones. [28]

Las partes en las que se divide el STATCOM son: [29]

a) Inversores.

Está compuesto por un conjunto de válvulas (GTO's o IGBT's) con capacidad de corte y conducción controladas, Con ellos se consigue invertir la corriente continua proporcionada por el condensador en corriente alterna.

La modulación de los inversores se hace según la frecuencia de conmutación, con frecuencia baja, es decir, próximas a la frecuencia de red se utiliza la técnica PAM (Pulse Amplitud Modulation) cuya forma de onda son cuadradas, con bajo número de pulsos lo que provoca un alto número de armónicos de ordenes bajos.

En el caso de las frecuencias de conmutación sean altas del orden de KHz se utiliza la técnica PWM Modulación por ancho de pulso (Pulse Width Modulation), esta técnica provoca armónicos más altos y por lo tanto pueden ser filtrados más fácilmente, además de esta forma conseguimos una respuesta más rápida, el principal problema lo encontramos cuando aparecen cargas no lineales ya que este tipo de modulación no se adapta bien a la respuesta dinámica.

La técnica que suelen utilizar los STATCOM es la llamada SVPWM (Modulación por ancho de pulso del vector espacial) también llamada control vectorial. Esta modulación sustituye el sistema trifásico por un solo vector donde la frecuencia se representa como la velocidad de giro con el paso del tiempo.

b) Condensador del lado de corriente continua.

El condensador se utiliza como fuente de tensión de continua o como acumulador de energía, de esta forma se consigue la compensación de potencia reactiva que se desea, permitiendo el intercambio entre el nudo de conexión y el STATCOM [30]

c) Transformadores.

El STATCOM cuenta con dos grupos de transformadores, con dos funciones distintas. El transformador ideado para el acoplamiento, consigue aumentar la tensión de salida del STATCOM para poder conectarlo con la red, estos transformadores tienen conexión estrella-estrella o estrella-triángulo. El transformador ideado para la reducción de armónicos generados en los inversores son de estructura, este transformador está conectado en zig-zag o en estrella-triángulo.

4. Análisis de los Compensadores en la Red.

En este capítulo se compara cómo influye cada compensador en la transmisión de potencia, en el control de tensiones y como pueden ser los aportes o absorción de potencia reactiva para cada uno de ellos.

4.1. Sistema de nudos

Para poder analizar el funcionamiento de los compensadores de reactiva definidos en los capítulos anteriores en un sistema e recurrirá al sistema de 9 nudos del IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). El cual se muestra en la siguiente figura. [31]

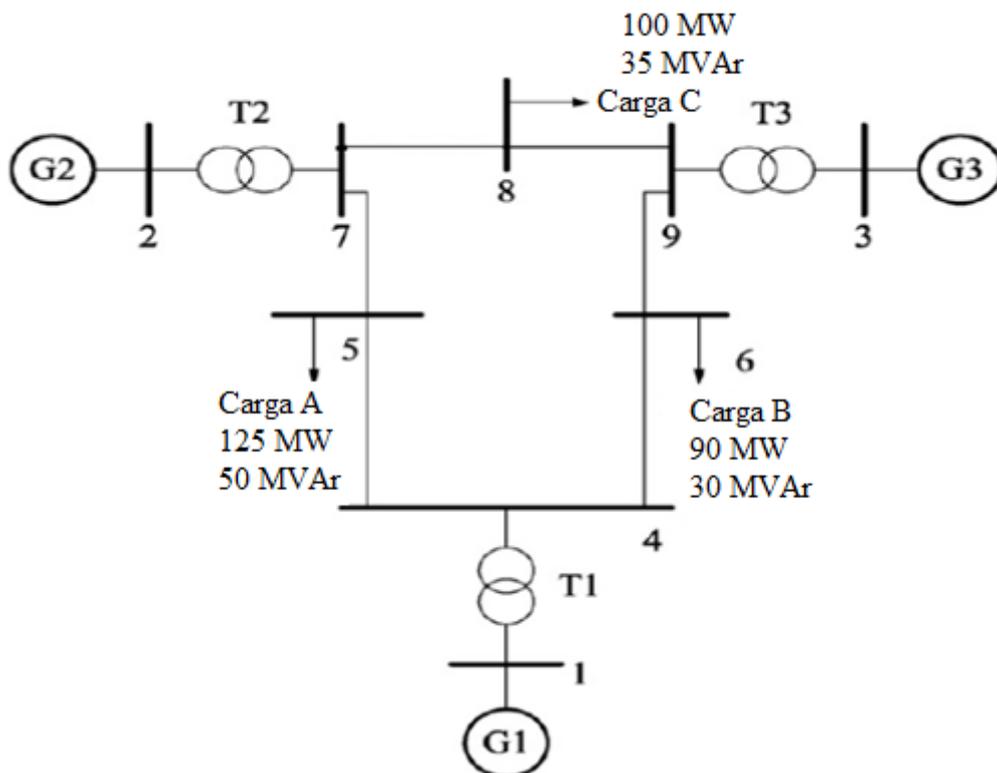


Figura 33: Red de 9 nudos del IEEE.

Fuente: [31] y elaboración propia.

Según define el IEEE este sistema está formado por 3 generadores síncronos, tres cargas y tres centros de transformación, estos elevan la tensión hasta 230 kV. Aunque para el estudio se considerara una tensión de 220 kV ya que en el sistema ibérico las tensiones consiguas para la red de transporte son 400 kV y 220 kV.

El sistema IEEE considera que cada generador tendrá una tensión diferente a la salida de los generadores, para el estudio se considerara 1 p.u, de esta forma se considera que la tensión más óptima y la que pretenden conseguir los compensadores será la unidad.

Por lo tanto el sistema de 9 nudos para el estudio que sigue tendrá las siguientes características:

NUDO	TIPO	V(pu)	δ (°)	Pg (MW)	Pd (MW)	Qd (MW)
1	Oscilante	1.00	0	---	---	---
2	PV	1.00	---	163	---	---
3	PV	1.00	---	85	---	---
5	PQ	---	---	---	125	50
6	PQ	---	---	---	90	30
8	PQ	---	---	---	100	35

Tabla 1: Características de los nudos.

Fuente: [31] y elaboración propia.

Siendo el nudo oscilante, el nudo de referencia, consta de un generador síncrono, se suponen estables la tensión y el ángulo. Los nudos PV también son de generación, serán definidas la tensión y la potencia generada. Los nudos PQ son nudos de carga, se definirán la potencia tanto activa como reactiva demandadas.

Los generadores síncronos del sistema IEEE vendrán definidos por sus parámetros característicos y por los datos de la excitatriz.

Parámetros de los generadores síncronos de polos salientes:

Parámetros	Generador 1	Generador 2	Generador 3
H (secs)	23,64	6,4	3,01
X_d (p.u.)	0,146	0,8958	1,3125
X'_d (p.u.)	0,0608	0,1198	0,1813
X_q (p.u.)	0,0969	0,8645	1,2578
X'_q (p.u.)	0,0969	0,1969	0,25
T'_{d0} (p.u.)	8,96	6,0	5,89
T'_{q0} (p.u.)	0,31	0,535	0,6

Tabla 2: Parámetros de los generadores síncronos.

Fuente: [31] y elaboración propia.

Siendo:

H es la constante de inercia

X_d es la reactancia síncrona de eje directo

X'_d es la reactancia síncrona transitoria de eje directo

X_q es la reactancia síncrona de eje cuadratura

X'_q es la reactancia síncrona transitoria de eje cuadratura

T'_{d0} es el tiempo constante de apertura transitorio del eje directo

T'_{q0} es el tiempo constante de apertura transitorio del eje cuadratura

Datos de la excitatriz:

Parámetros	Generador 1	Generador 2	Generador 3
K_A	20	20	20
T_A (sec)	0,2	0,2	0,2
K_E	1,0	1,0	1,0
T_E (sec)	0,314	0,314	0,314
K_F	0,063	0,063	0,063
T_F (sec)	0,35	0,35	0,35

Tabla 3: Datos de la excitatriz.

Fuente: [31] y elaboración propia.

Siendo:

K_A es la ganancia del regulador de tensión.

T_A es el tiempo constante del regulador de tensión.

K_E es el margen de inclinación de la resistencia del campo de excitación.

T_E es el tiempo constante del campo de excitación.

K_F es la ganancia de retroalimentación.

T_F es el tiempo constante de retroalimentación.

Las líneas de interconexión entre los nudos serán aéreas siguiendo el modelo en pi como se muestra en la siguiente figura y tendrán las características que se presentan en la tabla:

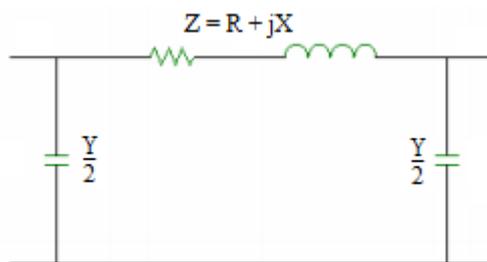


Figura 34: Modelo de una línea de transporte en pi

Fuente: Elaboración propia.

Desde Nudo	Hasta Nudo	Resistencia [p.u.]	Reactancia [p.u.]	Susceptancia [p.u.]
1	4	0,00	0,0576	0,00
2	7	0,00	0,0625	0,00
3	9	0,00	0,0586	0,00
4	5	0,0100	0,068	0,1760
4	6	0,0170	0,092	0,1580
7	5	0,0320	0,161	0,3060
9	6	0,0390	0,1738	0,3580
7	8	0,0085	0,0576	0,1490
9	8	0,0119	0,1008	0,2090

Tabla 4: Características de las líneas aéreas.

Fuente: [32] y elaboración propia.

Además las líneas tendrán un límite máximo de transmisión de potencia de 120 MVA.

Para el análisis del sistema se utilizara el programa PowerWorld, lo primero que se hace es representar la red con las características definidas anteriormente, el sistema de 9 nudos nos quedara representado así:

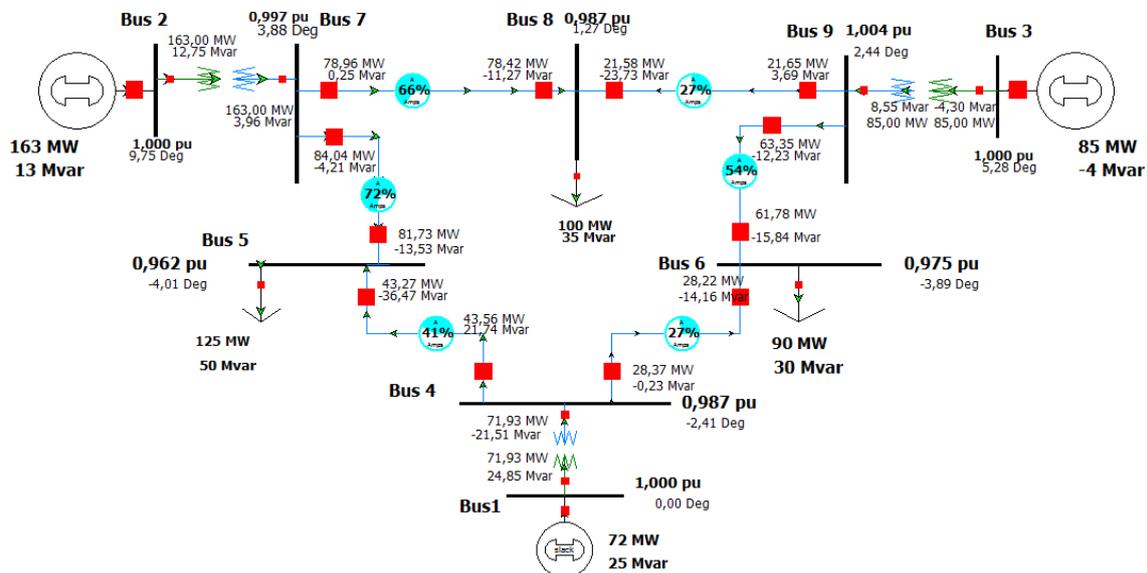


Figura 35: Red de 9 nudos en PowerWorld.

Fuente: Elaboración propia.

Resolviendo el sistema mediante el método Newton-Raphson, se establecerán las características de cada nudo que se pueden ver representadas en la siguiente tabla:

Nudo	Vnom [kV]	V [p.u.]	V [kV]	δ [Deg]	Pd [MW]	Qd [Mvar]	Pg [MW]	Qg [Mvar]
1	16,5	1	16,5	0	---	---	71,93	24,85
2	18	1	18	9,75	---	---	163	12,75
3	13,8	1	13,8	5,28	---	---	85	-4,3
4	220	0,98656	217,043	-2,41	---	---	---	---
5	220	0,96163	211,559	-4,01	125	50	---	---
6	220	0,97503	214,508	-3,89	90	30	---	---
7	220	0,99725	219,395	3,88	---	---	---	---
8	220	0,98712	217,166	1,27	100	35	---	---
9	220	1,00376	220,827	2,44	---	---	---	---

Tabla 5: Tensiones y potencias de los nudos del sistema del caso base.

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Definición del caso de estudio

El estudio se centra en la actuación de los diferentes compensadores en las situaciones que se presentan en la realidad

La red de transmisión de potencia se adecua a la demanda en cada instante, se seleccionara un día en el cual haya habido mucha diferencia de demanda es posible que las tensiones en los nudos salgan de la estabilidad del sistema.

El día de estudio será el 03/02/2014 este día hubo una gran diferencia entre la demanda mínima y la máxima, 17000 MW aproximadamente. El momento de mayor demanda se dio a las 19 horas y 52 minutos siendo la potencia demandada de 38738 MW, el momento de menor demanda se dio a las 4 horas siendo la potencia demandada en ese momento de 21840 MW.

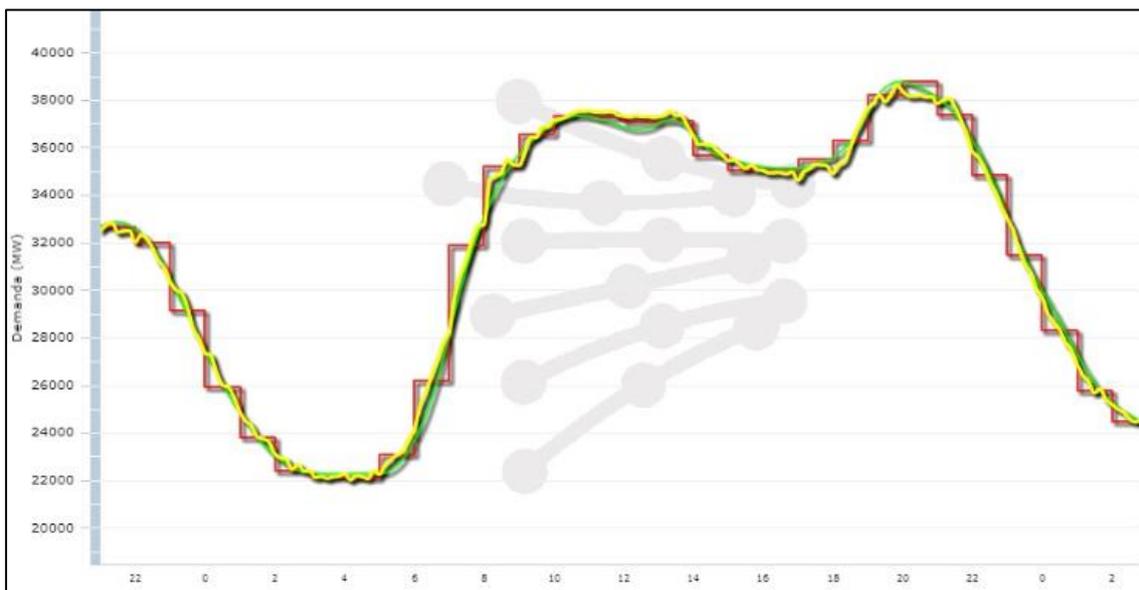


Figura 36: Curva de la demanda 03/02/2014.

Fuente: [33]

Si se considera el punto medio entre ambos como el de referencia, 30289 MW, se puede decir que hay un aumento y una disminución de carga de un 27,89%.

Para el análisis del sistema de estudio se utilizara como referencia un aumento y una disminución de la carga del 30%, esos serán los casos más desfavorables, pero a lo largo del día la demanda va variando por lo tanto no solo se estudiaran los casos más desfavorables.

La curva de la demanda se dividirá en 5 zonas desde la más desfavorable hasta la menos desfavorable, la curva de la demanda por lo tanto quedara definida por 5 zonas delimitadas como sigue:

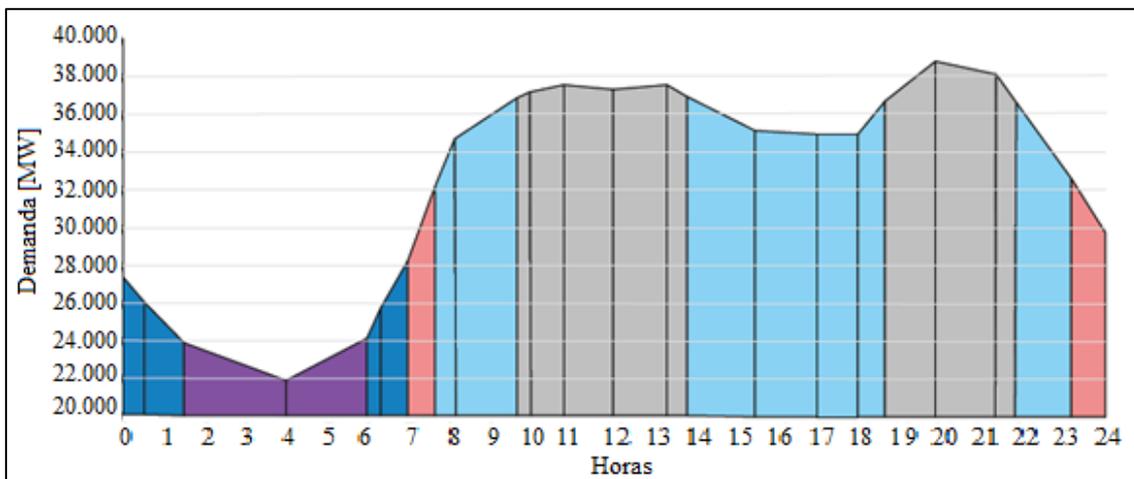


Figura 37: Curva de la demanda fraccionada 03/02/2014.

Fuente: [33] y elaboración propia.

Según esta división la demanda se puede dividir en 10 intervalos según los cinco casos de estudio, al inicio del día, en la hora 0:00 el sistema se encontrara en el caso 4, es decir con una disminución del 15%, el resto de los intervalos:

Intervalos	Casos	Horas	Duración
Intervalo 1	Caso 4	1:30:00	1:30:00
Intervalo 2	Caso 5	6:00:00	4:30:00
Intervalo 3	Caso 4	7:00:00	1:00:00
Intervalo 4	Caso 3	7:40:00	0:40:00
Intervalo 5	Caso 2	9:40:00	2:00:00
Intervalo 6	Caso 1	13:50:00	4:10:00
Intervalo 7	Caso 2	18:40:00	4:50:00
Intervalo 8	Caso 1	21:50:00	3:10:00
Intervalo 9	Caso 2	23:10:00	1:20:00
Intervalo 10	Caso 3	0:00:00	0:50:00

Tabla 6: Duración de cada caso según la curva de la demanda del día 03/02/2014.

Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis de los compensadores que se explica en los apartados siguientes se tendrán en cuenta los márgenes de tensión establecidos por el Procedimiento de Operación P.O.-1.4 Condiciones de entrega de la energía en los puntos frontera de la red gestionada por el operador del sistema.

Los márgenes de tensión los establece el Procedimiento de Operación P.O.-1.4 Condiciones de entrega de la energía en los puntos frontera de la red gestionada por el operador del sistema. Según establecen las condiciones técnicas de entrega de la energía: “3.2 Tensiones en los nudos.- En condiciones normales de operación, la tensión en el nivel de 400 kV en los puntos frontera estará comprendida entre 390 y 420 kV. En el nivel de 220 kV la tensión estará comprendida entre 205 y 245 kV.” [14]

4.3. Estudio comparativo de las magnitudes del sistema en función de la potencia demandada y equipos compensadores

Los compensadores de potencia reactiva que se utilizaran para el análisis serán:

- Banco de condensadores. Estará formado por condensadores de 50 MVar, según las necesidades del sistema se conectarán o desconectarán aportando mayor o menor reactiva.
- Reactancias tipo shunt, no se diferencia entre inmersas en aceite o al aire, al igual que los condensadores, serán inductancias de 50 MVar, en función de la tensión del sistema se conectarán más o menos reactancias.
- Reactancias con cambiador de tomas según las necesidades del sistema se incluirán más o menos espiras para un mayor o menor absorción de potencia reactiva, supondremos que el cambiador tendrá saltos de 15 MVar.
- SVC influirá en el sistema de una forma dinámica.
- STATCOM se adaptará al sistema para conseguir una óptima compensación.

4.3.1 Casos según la potencia demandada

4.3.1.1. Caso 1: Aumento de la demanda un 30%.

En el supuesto de aumentar la potencia demandada un 30% provocará una disminución en las tensiones de los nudos lo que podría provocar una subtensión en este caso al ser tan grande el aumento de demanda se producirá dicha subtensión, esto podría desestabilizar el sistema por esto es importante el uso de compensadores de potencia reactiva, ya que cuando se produce algún desajuste los compensadores equilibrarán y volverán a ajustar el sistema.

El sistema de 9 nudos ante un aumento de un 30% quedara de la siguiente forma:

Nudo	Unom [kV]	u [p.u.]	U [kV]	δ [°]	Pd [MW]	Qd [Mvar]	Pg [MW]	Qg [Mvar]
1	16,5	1	16,5	0	---	---	95,92	55,54
2	18	1	18	12,87	---	---	211,9	40,02
3	13,8	1	13,8	6,9	---	---	110,5	13,83
4	220	0,96958	213,3076	-3,27	---	---	---	---
5	220	0,93061	204,7342	-5,48	162,5	65	---	---
6	220	0,9482	208,604	-5,25	117	39	---	---
7	220	0,98394	216,4668	5,14	---	---	---	---
8	220	0,96966	213,3252	1,63	130	42,5	---	---
9	220	0,994	218,68	3,17	---	---	---	---

Tabla 7: Tensión y potencia característica de los nudos del caso 1.

Fuente: Elaboración propia.

A la vista de los resultados de este caso se necesitara un aporte de potencia reactiva, mediante compensadores capacitivos se conseguirá aumentar la tensión y por lo tanto la estabilidad del sistema.

El nudo que más se ve afectado por esta variación es el nudo 5, en el supuesto que se aumentara más la demanda la subtensión producida podría provocar la inestabilidad del nudo ya que estará fuera de los márgenes que marca el procedimiento de operación. Los compensadores de reactiva conseguirán estabilizar el sistema y que los nudos estén dentro de los límites.

Se suplirá esta contingencia mediante los compensadores de reactiva, dependiendo de cuál se utilice las tensiones en los nudos serán diferentes:

Caso 1		Inicial	Condensador Q= 100MVA _r	SVC Q=80,6MVA _r	STATCOM Q=80,6 MVA _r
Nudo	U[kV]	u [p.u.]	u [p.u.]	u [p.u.]	u [p.u.]
1	16,5	1	1	1	1
2	18	1	1	1	1
3	13,8	1	1	1	1
4	220	0,96958	1,00686	0,99949	0,99949
5	220	0,93061	1,01711	1	1
6	220	0,9482	0,97831	0,97236	0,97236
7	220	0,98394	1,00573	1,00142	1,00142
8	220	0,96966	0,98817	0,98451	0,98451
9	220	0,994	1,00494	1,00278	1,00278

Tabla 8: Tensión de los nudos utilizando compensadores del caso 1.

Fuente: Elaboración propia.

El compensador que más se adapta a las necesidades del sistema es el compensador que consigue que el nudo este lo más compensado posible.

Comparando como afecta a la sobrecarga de las líneas se obtendrá la siguiente tabla:

Líneas		Caso 1			
Origen	Destino	Inicial [%]	Condensador [%]	SVC [%]	STATCOM [%]
4	5	61	49	49	49
5	7	95	91	89	89
7	8	87	86	85	85
8	9	35	33	32	32
9	6	69	69	69	69
6	4	38	40	41	41

Tabla 9: Sobrecargas dependiendo del compensador del caso 1.

Fuente: Elaboración propia.

Por estos dos criterios se concluye que para este caso los compensadores que más se ajustan y consiguen que el nudo 5 alcance la tensión consigna son el SVC y el STATCOM además de conseguir que las líneas estén lo menos sobrecargadas posible.

4.3.1.2 Caso 2: Aumento de la demanda un 15%.

La demanda en este segundo caso aumentara un 15%, será menos extremo que el caso anterior, sin esperar que ningún nudo alcance subtensiones fuera del rango, pues la demanda será inferior al caso anterior.

Las características de este segundo caso serán:

Nudo	Unom [kV]	u [p.u.]	U [kV]	δ [°]	Pd [MW]	Qd [Mvar]	Pg [MW]	Qg [Mvar]
1	16,5	1	16,5	0	---	---	83,76	39,83
2	18	1	18	11,3	---	---	187,45	26,38
3	13,8	1	13,8	6,09	---	---	97,75	4,91
4	220	0,97825	215,215	-2,83	---	---	---	---
5	220	0,94643	208,2146	-4,72	143,75	57,5	---	---
6	220	0,96185	211,607	-4,55	103,5	34,5	---	---
7	220	0,99046	217,9012	4,51	---	---	---	---
8	220	0,97773	215,1006	1,46	115	40,25	---	---
9	220	0,99876	219,7272	2,81	---	---	---	---

Tabla 10: Tensión y potencia característica de los nudos del caso 2.

Fuente: Elaboración propia.

Como cabía de esperar las tensiones en este segundo caso son superiores al primer caso por lo tanto el aporte de potencia reactiva en el nudo 5 será inferior a la anterior.

Caso 2		Inicial	Condensador Q=50MVar	SVC Q=63,89 MVar	STATCOM Q=63,89 MVar
Nudo	U[kV]	u [p.u.]	u [p.u.]	u [p.u.]	u [p.u.]
1	16,5	1	1	1	1
2	18	1	1	1	1
3	13,8	1	1	1	1
4	220	0,97825	0,99607	1,00128	1,00128
5	220	0,94643	0,98789	1	1
6	220	0,96185	0,97611	0,98027	0,98027
7	220	0,99046	1,00084	1,00387	1,00387
8	220	0,97773	0,9865	0,98906	0,98906
9	220	0,99876	1,00394	1,00545	1,00545

Tabla 11: Tensión de los nudos utilizando compensadores del caso 2.

Fuente: Elaboración propia.

Vuelven a ser los compensadores SVC y STATCOM los que más se ajustan a la tensión consigna.

Las sobrecargadas de las líneas para este caso:

Líneas		Caso 2			
Origen	Destino	Inicial [%]	Condensador [%]	SVC [%]	STATCOM [%]
4	5	51	42	43	43
5	7	83	79	79	79
7	8	77	75	75	75
8	9	31	29	29	29
9	6	61	61	61	61
6	4	32	34	35	35

Tabla 12: Sobrecargas dependiendo del compensador del caso 2.

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que con compensadores la potencia de transmisión por las líneas es inferior.

4.3.1.3. Caso 3: Demanda en el punto intermedio.

La demanda en este tercer caso no sufre ninguna variación con respecto al caso inicial, ya que es el caso intermedio. Las características serán las mismas al sistema de 9 nudos del IEEE.

Nudo	Unom [kV]	u [p.u.]	U [kV]	δ [°]	Pd [MW]	Qd [Mvar]	Pg [MW]	Qg [Mvar]
1	16,5	1	16,5	0	---	---	71,93	24,85
2	18	1	18	9,75	---	---	163	12,75
3	13,8	1	13,8	5,28	---	---	85	-4,3
4	220	0,98656	217,043	-2,41	---	---	---	---
5	220	0,96163	211,559	-4,01	125	50	---	---
6	220	0,97503	214,508	-3,89	90	30	---	---
7	220	0,99725	219,395	3,88	---	---	---	---
8	220	0,98712	217,166	1,27	100	35	---	---
9	220	1,00376	220,827	2,44	---	---	---	---

Tabla 13: Tensión y potencia característica de los nudos del caso 3.

Fuente: Elaboración propia.

Siendo la tensión del nudo 5 la menor del sistema aportando reactiva se conseguirá que el sistema sea más estable, en función del compensador utilizado las tensiones en los nudos serán:

Caso 3		Inicial	Condensador Q=50 MVar	SVC Q=46,41 MVar	STATCOM Q=46,41 MVar
Nudo	U[kV]	u [p.u.]	u [p.u.]	u [p.u.]	u [p.u.]
1	16,5	1	1	1	1
2	18	1	1	1	1
3	13,8	1	1	1	1
4	220	0,98655	1,00434	1,00302	1,00302
5	220	0,96157	1,00308	1	1
6	220	0,97503	0,98913	0,98808	0,98808
7	220	0,99724	1,00756	1,00679	1,00679
8	220	0,98711	0,99579	0,99514	0,99514
9	220	1,00375	1,00887	1,00849	1,00849

Tabla 14: Tensión de los nudos utilizando compensadores del caso 3.

Fuente: Elaboración propia.

Curiosamente en este caso no está tan claro que los mejores compensadores son los variables, ya que el condensador consigue ajustarse bastante bien a las necesidades del sistema.

En cuanto a la sobrecarga de las líneas:

Líneas		Caso 3			
Origen	Destino	Inicial [%]	Condensador [%]	SVC [%]	STATCOM [%]
4	5	41	37	37	37
5	7	72	68	69	69
7	8	66	65	65	65
8	9	27	25	25	25
9	6	54	54	54	54
6	4	27	29	29	29

Tabla 15: Sobrecargas dependiendo del compensador del caso 3.

Fuente: Elaboración propia.

Sera buena opción conectar compensadores en el nudo 5 ya que se reducirá la sobrecarga de la línea.

4.3.1.4. Caso 4: Disminución de la demanda un 15%

En este cuarto caso la demanda disminuye en un 15% por lo tanto las tensiones aumentaran incluso esta pérdida de potencia podrá provocar sobretensiones en algún nudo.

El sistema de 9 nudos ante la variación:

Nudo	Unom [kV]	u [p.u.]	U [kV]	δ [°]	Pd [MW]	Qd [Mvar]	Pg [MW]	Qg [Mvar]
1	16,5	1	16,5	0	---	---	60,42	11,02
2	18	1	18	8,23	---	---	138,55	0,65
3	13,8	1	13,8	4,48	---	---	72,25	-12,63
4	220	0,99426	218,7372	-2,01	---	---	---	---
5	220	0,97577	214,6694	-3,34	106,25	42,5	---	---
6	220	0,98735	217,217	-3,26	76,5	25,5	---	---
7	220	1,00334	220,7348	3,28	---	---	---	---
8	220	0,99578	219,0716	1,09	85	29,75	---	---
9	220	1,00829	221,8238	2,08	---	---	---	---

Tabla 16: Tensión y potencia característica de los nudos del caso 4.

Fuente: Elaboración propia.

Esta disminución de carga produce un aumento de la tensión, pero como se puede observar en la tabla anterior ningún nudo sufre una sobretensión significativamente grande para conectar inductancias que reduzcan la tensión. Conectando los compensadores al nudo 5, la tensión en los nudos quedara, en función del compensador utilizado:

Caso 4		Inicial	Condensador Q=50 MVar	SVC Q=29,68 MVar	STATCOM Q=29,68 MVar
Nudo	U[kV]	u [p.u.]	u [p.u.]	u [p.u.]	u [p.u.]
1	16,5	1	1	1	1
2	18	1	1	1	1
3	13,8	1	1	1	1
4	220	0,99426	1,01203	1,00464	1,00464
5	220	0,97577	1,01726	1	1
6	220	0,98735	1,00133	0,99552	0,99552
7	220	1,00334	1,01361	1,00934	1,00934
8	220	0,99578	1,00438	1,0008	1,0008
9	220	1,00829	1,01336	1,01125	1,01125

Tabla 17: Tensión de los nudos utilizando compensadores del caso 4.

Fuente: Elaboración propia.

Los compensadores que más se acercan al óptimo son el SVC y el STATCOM.

El banco de condensadores en este caso no se conectara al nudo de conexión ya que sin su conexión se consigue un mejor regulación de tensión.

En cuanto a la sobrecarga de las líneas:

Líneas		Caso 4			
Origen	Destino	Inicial [%]	Condensador [%]	SVC [%]	STATCOM [%]
4	5	33	35	31	31
5	7	61	58	58	58
7	8	56	55	55	55
8	9	23	21	22	22
9	6	46	47	47	47
6	4	22	24	23	23

Tabla 18: Sobrecargas dependiendo del compensador del caso 4.

Fuente: Elaboración propia.

Los compensadores reducirán la transmisión de potencia.

4.3.1.5. Caso 5: Disminución de la demanda un 30%.

En el supuesto de disminuir la carga un 30% supondrá un aumento en la tensión de los nudos, pero no se conseguirá ninguna sobretensión por la distribución del sistema, pero en el supuesto de conseguir que la potencia disminuya tanto que provoque una sobretensión, para poder estabilizar el sistema se consumirá potencia reactiva en el

nudo para conseguir que disminuya la tensión esto lo podremos conseguir con inductancias.

El sistema tras la disminución máxima de carga quedara:

Nudo	Unom [kV]	u [p.u.]	U [kV]	δ [°]	Pd [MW]	Qd [Mvar]	Pg [MW]	Qg [Mvar]
1	16,5	1	16,5	0	---	---	49,19	-1,79
2	18	1	18	6,75	---	---	114,1	-10,02
3	13,8	1	13,8	3,69	---	---	59,5	-20,16
4	220	1,00143	220,3146	-1,62	---	---	---	---
5	220	0,98897	217,5734	-2,71	87,5	35	---	---
6	220	0,99891	219,7602	-2,66	63	21	---	---
7	220	1,00879	221,9338	2,69	---	---	---	---
8	220	1,00379	220,8338	0,9	70	24,5	---	---
9	220	1,01241	222,7302	1,72	---	---	---	---

Tabla 19: Tensión y potencia característica de los nudos del caso 5.

Fuente: Elaboración propia.

En el nudo de estudio la tensión en el nudo 5 sigue siendo menor al de referencia 1 p.u por lo tanto no se conectaran reactancias en ningún caso.

Los compensadores que tendrán que aportar potencia reactiva al nudo 5 influirán en las tensiones de los nudos de la siguiente forma:

Caso 5		Inicial	Condensador Q=50MVar	SVC Q=13,67 MVar	STATCOM Q=13,67 MVar
Nudo	U[kV]	u [p.u.]	u [p.u.]	u [p.u.]	u [p.u.]
1	16,5	1	1	1	1
2	18	1	1	1	1
3	13,8	1	1	1	1
4	220	1,00143	1,0192	1,00615	1,00615
5	220	0,98897	1,03051	1	1
6	220	0,99891	1,01278	1,00259	1,00259
7	220	1,00879	1,01904	1,01151	1,01151
8	220	1,00379	1,01232	1,00605	1,00605
9	220	1,01241	1,01745	1,01375	1,01375

Tabla 20: Tensión de los nudos utilizando compensadores del caso 5.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar que el aporte de reactiva es tan pequeño que aunque el sistema trabaje mejor cuando se conectan los compensadores SVC y STATCOM quizás en este caso no compensa trabajar con compensadores.

El banco de condensadores al igual que en el caso anterior no se conectara al nudo de referencia ya que la tensión sin su conexión se aproxima más a la unidad.

En cuanto a la sobrecarga de las líneas:

Líneas		Caso 5			
Origen	Destino	Inicial [%]	Condensador [%]	SVC [%]	STATCOM [%]
4	5	25	34	25	25
5	7	50	47	49	49
7	8	46	45	46	46
8	9	19	17	19	19
9	6	40	41	40	40
6	4	17	19	18	18

Tabla 21: Sobrecargas dependiendo del compensador del caso 5.

Fuente: Elaboración propia.

En este último supuesto no hay gran diferencia en el caso de trabajar con o sin compensadores.

4.3.2. Tensión nudo crítico

El nudo crítico, el nudo 5 es el punto que interesa controlar ya que es el nudo que puede estar fuera de los límites. Por lo tanto a modo de resumen según cada caso se podrá seguir la evolución de la tensión en función de la demanda diaria, desde el momento de mayor demanda hasta el de menor demanda.

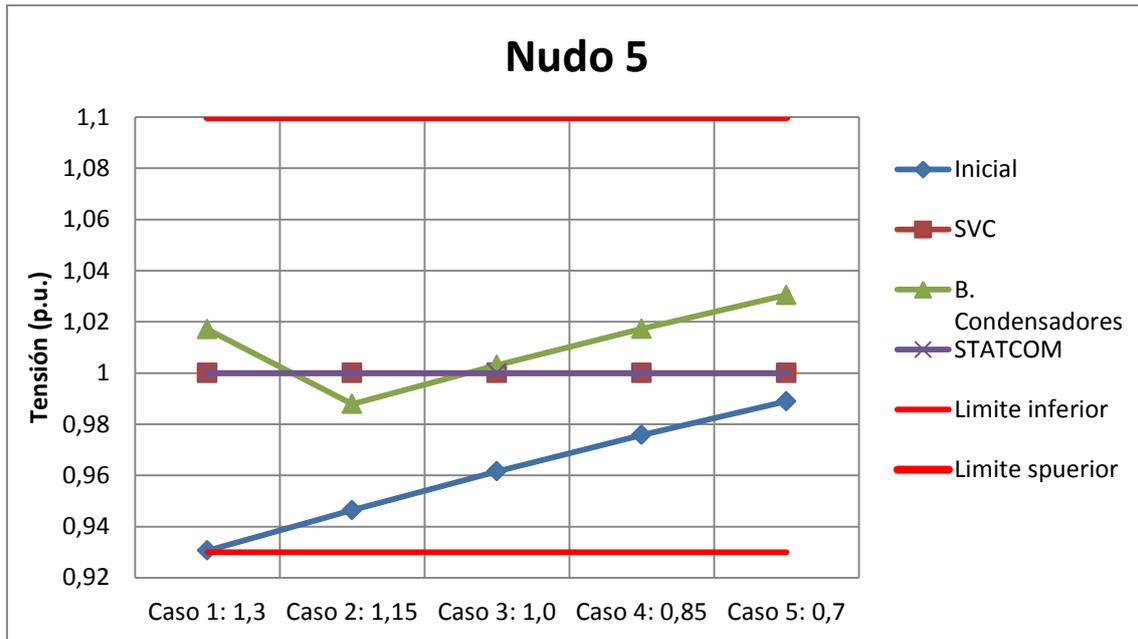


Figura 38: Evolución de la tensión del nudo 5.

Fuente: Elaboración propia.

Nudo 5 u[p.u.]	Caso 1: 1,3	Caso 2: 1,15	Caso 3: 1,0	Caso 4: 0,85	Caso 5: 0,7
Inicial	0,93061	0,94643	0,96157	0,97577	0,98897
B. Condensadores	1,01711	0,98789	1,00308	1,01726	1,03051
SVC	1	1	1	1	1
STATCOM	1	1	1	1	1

Tabla 22: Evolución de la tensión del nudo 5.

Fuente: Elaboración propia.

Los compensadores que más se ajusta a la variación de la demanda diaria son los dinámicos ya que la tensión en el nudo de conexión para todos los casos será de 1p.u. ambos compensadores aportan o consumen una determinada potencia reactiva en función de las necesidades del sistema.

En el caso de utilizar el banco de condensadores se tendrá que decidir en qué circunstancias es mejor conectarlo o desconectarlo, es decir en el caso de un aumento de la demanda un 30% la mejor opción será conectar dos condensadores de 50 MVar cada uno, en el segundo caso y en el tercer caso será mejor conectar únicamente un condensador, para el cuarto y quinto caso conseguiremos un mejor ajuste a la tensión de consigna si no conectamos el banco de condensadores.

4.3.3. Diferencia de tensión

Otra forma de poder comparar cada compensador es según las diferencias de tensión, entendiendo diferencia de tensión como la diferencia que hay entre las tensiones de cada nudo y la tensión de referencia. En cada caso nos quedaran unos resultados:

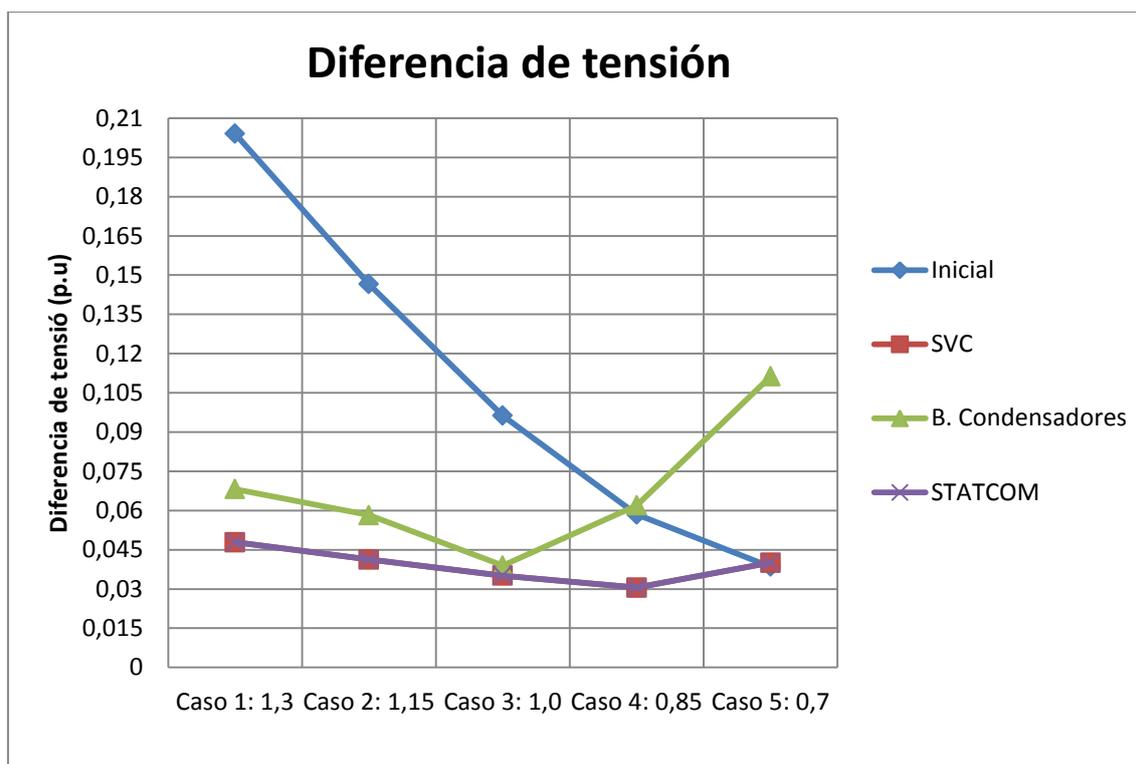


Figura 39: Diferencia de tensión del sistema.

Fuente: Elaboración propia.

Diferencia de Tensión [p.u.]	Caso 1: 1,3	Caso 2: 1,15	Caso 3: 0,0	Caso 4: 0,85	Caso 5: 0,7
Inicial	0,20401	0,14652	0,09625	0,05847	0,03854
B. Condensadores	0,06816	0,05821	0,03893	0,06197	0,11113
SVC	0,04784	0,04127	0,03508	0,03051	0,04005
STATCOM	0,04784	0,04127	0,03508	0,03051	0,04005

Tabla 23: Diferencia de tensión del sistema.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar tanto en la tabla como en la gráfica los compensadores que consiguen menor diferencia de tensión de los nudos son el SVC y el STATCOM, en el único caso que es mejor no conectar los compensadores variables es en el caso 5 ya que sin ningún aporte de potencia reactiva se consigue una diferencia menor.

4.3.4. Pérdidas del sistema

Otro criterio de comparación entre compensadores es las pérdidas del sistema con su funcionamiento:

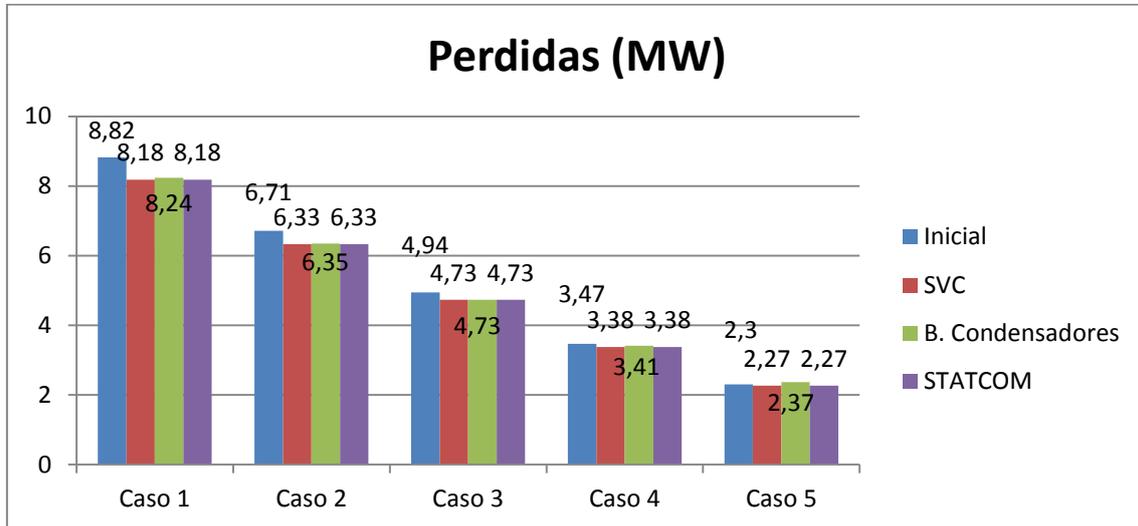


Figura 40: Pérdidas del sistema.

Fuente: Elaboración propia.

Pérdidas de Potencia Activa [MW]					
	Caso 1:	Caso 2:	Caso 3:	Caso 4:	Caso 5:
	1,3	1,15	0,0	0,85	0,7
Inicial	8,82	6,71	4,94	3,47	2,3
B. Condensadores	8,24	6,35	4,73	3,41	2,37
SVC	8,18	6,33	4,73	3,38	2,27
STATCOM	8,18	6,33	4,73	3,38	2,27

Tabla 24: Pérdidas del sistema.

Fuente: Elaboración propia.

En todos los casos los compensadores que menos pérdidas tienen son los compensadores variables, el SVC y el STATCOM.

4.3.5. Ahorro por compensador

Si se comparan las pérdidas entre el sistema sin compensadores y con compensadores se conseguirán saber las ventajas que tienen los compensadores en cada caso:

	Ahorro de MW para cada Compensador				Ahorro en porcentaje		
	Inicial	Condensador	SVC	STATCOM	Condensador	SVC	STATCOM
Caso 1	8,82	0,58	0,64	0,64	6,58%	7,26%	7,26%
Caso 2	6,71	0,36	0,38	0,38	5,37%	5,66%	5,66%
Caso 3	4,94	0,21	0,21	0,21	4,25%	4,25%	4,25%
Caso 4	3,47	0,06	0,09	0,09	1,73%	2,59%	2,59%
Caso 5	2,3	-0,07	0,03	0,03		1,30%	1,30%

Tabla 25: Ahorro de potencia con el uso de compensadores.

Fuente: Elaboración propia.

El banco de condensadores en el caso de disminuir la demanda un 30% no tiene relevancia ya que conectándolo se consiguen mayores pérdidas por lo tanto no aportara ninguna ventaja.

Se puede ver un importante ahorro gracias a los compensadores, especialmente cuando se conecta el SVC y el STATCOM.

Para saber cuánto será el ahorro que proporciona cada compensador en un día, se tendrán en cuenta los intervalos de división de la demanda diaria, como se mostró en la figura 37.

Intervalos	Casos	Hasta la hora	Duración intervalo
Intervalo 1	Caso 4	1:30:00	1:30:00
Intervalo 2	Caso 5	6:00:00	4:30:00
Intervalo 3	Caso 4	7:00:00	1:00:00
Intervalo 4	Caso 3	7:40:00	0:40:00
Intervalo 5	Caso 2	9:40:00	2:00:00
Intervalo 6	Caso 1	13:50:00	4:10:00
Intervalo 7	Caso 2	18:40:00	4:50:00
Intervalo 8	Caso 1	21:50:00	3:10:00
Intervalo 9	Caso 2	23:10:00	1:20:00
Intervalo 10	Caso 3	0:00:00	0:50:00

Tabla 26: División de la curva de la demanda en intervalos según el caso.

Fuente: Elaboración propia.

Sabiendo cuanta es la duración de cada caso se calculara la energía de cada uno de los compensadores y de esta forma saber cuánto será el ahorro por su funcionamiento:

	Ahorro de MWh gracias al uso de Compensadores		
	Condensador	SVC	STATCOM
Caso 1	4,2514	4,6912	4,6912
Caso 2	2,9412	3,1046	3,1046
Caso 3	0,315	0,315	0,315
Caso 4	0,15	0,225	0,225
Caso 5	0	0,135	0,135
Diario	7,6576	8,4708	8,4708
Anual	2795,024	3091,842	3091,842

Tabla 27: Ahorro de energía con el uso de compensadores.

Fuente: Elaboración propia.

Los compensadores que más ahorro producen son los compensadores que se ajustan a las necesidades del sistema es decir el STATCOM y el SVC.

Sabiendo cual es el ahorro de energía y consultando la página del sistema de información del operador del sistema (esios) se sabrá cuál es el precio medio horario para el día de estudio.

Hora	Precio medio (€/MWh)	Hora	Precio medio (€/MWh)
0	35,8	12	47,15
1	23,41	13	42,57
2	14,19	14	42,29
3	10,68	15	40,76
4	10,15	16	38,23
5	10,89	17	43,28
6	19,97	18	69,44
7	37,99	19	77,8
8	48,77	20	70,64
9	51,35	21	64,1
10	53,22	22	50,19
11	49,93	23	41,29

Tabla 28: Precio medio de la energía el 03/02/2014.

Fuente: [34] y elaboración propia.

Debido a la división de la curva de la demanda en 10 intervalos estando cada intervalo definido por un caso, para saber qué precio está asociado a cada intervalo se supondrá que en ese intervalo el precio de la energía es el mismo.

Según la tabla de precios anterior se escoge para cada intervalo el precio más bajo, de esta forma se calculara la rentabilidad económica en las peores circunstancias.

Intervalos	Horas	Precio medio (€/MWh)	Ahorro (€)		
			B. Condensadores	SVC	STATCOM
Intervalo 1	1:30:00	23,41	2,11	3,16	3,16
Intervalo 2	6:00:00	10,15	0,00	1,37	1,37
Intervalo 3	7:00:00	19,97	1,20	1,80	1,80
Intervalo 4	7:40:00	37,99	5,35	5,35	5,35
Intervalo 5	9:40:00	51,35	36,97	39,03	39,03
Intervalo 6	13:50:00	42,57	102,96	113,61	113,61
Intervalo 7	18:40:00	38,23	66,61	70,31	70,31
Intervalo 8	21:50:00	64,1	117,48	129,64	129,64
Intervalo 9	23:10:00	50,19	24,03	25,37	25,37
Intervalo 10	0:00:00	41,29	7,20	7,20	7,20
Diario			363,90	396,82	396,82

Tabla 29: Ahorro económico con el uso de compensadores.

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto se consigue mayor ahorro económico con el SVC y el STATCOM, con ambos compensadores se consigue el mismo ahorro ya que ambos reducen en la misma cantidad las pérdidas del sistema.

Para saber cuándo se recuperar la inversión en este sistema de potencia. Se debe saber cuánto será la inversión inicial teniendo en cuenta la instalación, el montaje y el equipo. Estos precios son privados y los fabricantes no los publican, por lo tanto serán estimados.

	B. Condensadores	SVC	STATCOM
Precio (€)	1 000 000,00	5 000 000,00	10 000 000,00

Tabla 30: Inversión económica para la instalación de compensadores capacitivos.

Fuente: Elaboración propia.

Suponiendo estos costes de inversión para la instalación de cada compensador y suponiendo que todos los días se ahorra la misma cantidad de energía y los costes serán iguales se podrá estimar el tiempo para recuperar dicha inversión:

Compensador	Precio [€]	Ahorro diario [€]	Años
B. Condensadores	1 000 000,00	363,90	7
SVC	5 000 000,00	396,82	34
STATCOM	10 000 000,00	396,82	69

Tabla 31: Amortización de los compensadores capacitivos.

Fuente: Elaboración propia.

Con el banco de condensadores se conseguirá una amortización en un menor periodo de tiempo pero como los precios son estimados no se puede asegurar que sea la opción más óptima.

Teniendo presente los aspectos técnicos, los dispositivos de compensación que consiguen un mayor ajuste de tensión en el nudo de conexión son los compensadores variables (el SVC y el STATCOM) que se adaptan según sean las necesidades del sistema, además con su aportación de potencia reactiva se reducirán las pérdidas totales del sistema.

4.4. Estudio comparativo de magnitudes del sistema en el caso de soterramiento de una línea aérea.

Para este estudio se supone que se tiene la necesidad de soterrar la línea 4-5, habrá que tener en cuenta que la tensión en los nudos aumentara ya que una línea soterrada es más capacitiva que una línea aérea.

Para poder llevar a cabo este proyecto se necesitan las características de la línea subterránea, la información nos la aportara un proyecto de Red Eléctrica de España (REE) extraeremos las características en secuencia directa del conductor.

Resistencia ($\mu\Omega/m$)	Reactancia ($\mu\Omega/m$)	Capacidad (pF/m)
12,19	159,89	274,31

Tabla 32: Parámetros característicos de la línea subterránea en secuencia directa por unidad de longitud.

Suponiendo que la línea 4-5 tiene una distancia de 50 km se obtendrán los valores del conductor independientemente de la distancia.

Resistencia (Ω)	Reactancia (Ω)	Capacidad (μF)
0,6095	7,9945	13,7155

Tabla 33: Parámetros característicos de la línea subterránea en secuencia directa.

Fuente: Elaboración propia.

El programa PowerWorld para poder analizar el sistema de nueve nudos con esta línea subterránea necesita saber los valores en p.u de la resistencia, la reactancia y la susceptancia.

Para calcular los valores en p.u. de la impedancia lo primero que se calculara será la impedancia base.

$$z (p. u.) = \frac{Z}{Z_{base}} \quad (16)$$

Para calcular el valor de la impedancia base se establecerán la tensión base, 220 kV y la potencia base 100 MVA siendo por lo tanto:

$$Z_{base} = \frac{U_{base}^2}{S_{base}} = \frac{(220 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 10^6} = 484 \Omega \quad (17)$$

La impedancia del conductor será:

$$z(p. u.) = \frac{0,6095 + 7,9945j}{484} = 1,259 \cdot 10^{-3} + 0,0165j (p. u.) \quad (18)$$

Por otro lado la susceptancia es la componente imaginaria de la admitancia, la parte real, la conductancia, se supondrá cero para este estudio al igual que considera el IEEE para el sistema de 9 nudos.

$$\bar{Y} = \frac{1}{\bar{Z}} = G + Bj \quad (19)$$

La susceptancia se calculara mediante la siguiente formula:

$$B = jC\omega = jC \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \quad (20)$$

Siendo:

C la capacidad del condensador

ω La velocidad angular del sistema

f La frecuencia del sistema, en nuestro caso al estar en el sistema español, 50 Hz.

Sabiendo que la conductancia es cero el valor de la admitancia sera el mismo que la susceptancia quedando:

$$Y = B = j13,7155 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 = 4,309 \cdot 10^{-3} j S \quad (21)$$

Para calcular el valor en p.u. se tendrá en cuenta que la admitancia es la inversa de la impedancia por lo tanto:

$$y (p.u.) = b (p.u.) = 4,309 \cdot 10^{-3} j \cdot 484 = 2,0855 p.u. \quad (22)$$

Por lo tanto la línea en valores en p.u será de las siguientes características:

Desde nudo	Hasta nudo	Resistencia (p.u)	Reactancia inductiva (p.u.)	Susceptancia (p.u.)
4	5	0,001259	0,0165	2,0855

Tabla 34: Parámetros característicos de la línea subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

Para el estudio de la línea subterránea también se seguirá la demanda diaria, es decir se estudiaran los mismos casos que en el supuesto de líneas aéreas.

4.4.1. Casos según la potencia demandada y línea subterránea

4.4.1.1. Caso 1: Aumento de la demanda un 30%

En todos los casos se verá una gran diferencia ya que los parámetros difieren significativamente entre las líneas aéreas y las subterráneas.

El sistema de 9 nudos para este caso tendrá las siguientes características:

Nudo	Unom [kV]	u [p.u.]	U [kV]	δ [°]	Pd [MW]	Qd [Mvar]	Pg [MW]	Qg [Mvar]
1	16,5	1	16,5	0	---	---	95,65	-89,16
2	18	1	18	13,7	---	---	211,9	-9,56
3	13,8	1	13,8	7,85	---	---	110,5	-19,94
4	220	1,0528	231,616	-3	---	---	---	---
5	220	1,04782	230,521	-3,61	162,5	65	---	---
6	220	1,01296	222,852	-4,37	117	39	---	---
7	220	1,01466	223,225	6,2	---	---	---	---
8	220	0,99726	219,397	2,84	130	42,5	---	---
9	220	1,01376	223,026	4,19	---	---	---	---

Tabla 35: Tensión y potencia característica de los nudos del caso 1 con línea subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que las tensiones en los nudos han aumentado respecto al caso con líneas aéreas y por consiguiente en el nudo de referencia, el nudo 5, se tendrá que absorber reactiva en vez de inyectarla.

Siendo este caso el de mayor potencia demanda, por consiguiente el caso con tensiones más bajas, en ningún momento del día se necesitara aporte de potencia reactiva lo que limitara la elección del compensador adecuado, únicamente regularan la tensión los compensadores inductivos.

Los compensadores que se utilizaran para conseguir solventar esta contingencia, explicados anteriormente, son: el SVC, la inductancia fija o con cambiador de espiras y el STATCOM.

El SVC y el STATCOM son elementos variables que se adaptan a las necesidades del sistema, como se ha visto en los casos anteriores consiguen la misma regulación de tensión, por lo tanto en casos sucesivos solo se trabajara con el STATCOM.

La inductancia fija estará provista de cuatro reactancias de 50 MVAR y en función de las necesidades del sistema se conectaran o desconectaran las reactancias.

La inductancia que incorpora un cambiador de espiras tendrá una capacidad máxima de 300 MVAR, cada toma, es decir cada salto en del cambiador se conseguirá un aumento o disminución de 15 MVAR en la potencia reactiva del elemento.

La siguiente tabla muestra como varia la tensión de los nudos dependiendo del tipo de compensador que se utilice.

Caso 1		Inicial	Inductancia fija Q= -50 MVar	Inductancia fija Q= -100 MVar	Inductancia por tomas Q= -90 MVar	STATCOM Q= -80 MVar
Nudo	U [kV]	u [p.u.]	u [p.u.]	u [p.u.]	u [p.u.]	u [p.u.]
1	16,5	1	1	1	1	1
2	18	1	1	1	1	1
3	13,8	1	1	1	1	1
4	220	1,0528	1,02979	1,00802	1,01228	1,01659
5	220	1,04782	1,01745	0,98867	0,9943	1
6	220	1,01296	0,99491	0,97779	0,98115	0,98454
7	220	1,01466	1,00665	0,99906	1,00055	1,00205
8	220	0,99726	0,98992	0,98296	0,98432	0,9857
9	220	1,01376	1,00835	1,00321	1,00422	1,00523

Tabla 36: Tensiones de los nudos utilizando compensadores del caso 1 con línea subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

El compensador que más se ajustan a las necesidades del sistema es el STATCOM y por lo tanto también el SVC son capaces de conseguir la tensión consigna en el nudo de conexión.

A la vista de los resultados es más aconsejable utilizar una inductancia fija de 100 MVar, en el resto de casos al disminuir la demanda la tensión aumentara por lo tanto la inductancia mínima que se deberá conectar estará formada por dos reactancias de 50 MVar.

Otro criterio que se tiene en cuenta es lo sobrecargadas de las líneas.

Líneas		Caso 1			
Origen	Destino	Inicial [%]	Inductancia fija Q=-100MVar [%]	Inductancia por tomas [%]	STATCOM [%]
4	5	113	60	64	67
5	7	86	85	85	85
7	8	87	90	90	90
8	9	29	30	30	30
9	6	74	74	74	74
6	4	47	40	40	41

Tabla 37: Sobrecargas dependiendo del compensador del caso 1 con línea subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

Según este criterio la inductancia fija de 100 MVar consigue menores sobrecargas en las líneas, pero los tres compensadores consiguen reducir la sobrecarga de la línea 4-5 por lo tanto cualquiera de los tres será adecuado.

4.4.1.2 Caso 2: Aumento de la demanda un 15 %

Como se indicó anteriormente en este caso se estudiara con una inductancia fija formada por dos reactancias.

El sistema de nueve nudos con una demanda del 15% superior al caso base será:

Nudo	Unom [kV]	u [p.u.]	U [kV]	δ [°]	Pd [MW]	Qd [Mvar]	Pg [MW]	Qg [Mvar]
1	16,5	1	16,5	0	---	---	83,92	-105,07
2	18	1	18	12,07	---	---	187,45	-21,08
3	13,8	1	13,8	6,97	---	---	97,75	-28,18
4	220	1,06162	233,556	-2,61	---	---	---	---
5	220	1,0592	233,025	-3,21	143,75	57,5	---	---
6	220	1,02617	225,758	-3,79	103,5	34,5	---	---
7	220	1,01993	224,384	5,48	---	---	---	---
8	220	1,00429	220,944	2,55	115	40,25	---	---
9	220	1,01813	223,988	3,75	---	---	---	---

Tabla 38: Tensión y potencia característica de los nudos del caso 2 con línea subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

Como se suponía las tensiones de los nudos aumentan y en este caso la tensión de todos los nudos está por encima de la unidad, se deberá vigilar que ningún nudo sobrepase las tensiones límites.

Las tensiones de los nudos del sistema en función del compensador utilizado se comportaran:

Caso 2		Inicial	Inductancia fija Q= -100 MVar	Inductancia por tomas Q= -105 MVar	STATCOM Q= -100,1 MVar
Nudo	U [kV]	u [p.u.]	u [p.u.]	u [p.u.]	u [p.u.]
1	16,5	1	1	1	1
2	18	1	1	1	1
3	13,8	1	1	1	1
4	220	1,06162	1,01683	1,01472	1,01679
5	220	1,0592	1,00006	0,99726	1
6	220	1,02617	0,99133	0,98968	0,99129
7	220	1,01993	1,00443	1,0037	1,00442
8	220	1,00429	0,99016	0,98949	0,99014
9	220	1,01813	1,00771	1,00721	1,0077

Tabla 39: Tensión de los nudos utilizando compensadores del caso 2 con línea subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

Como era esperado la potencia reactiva aumentara en todos los compensadores, los que mejor ajustan la tensión del nudo 5 a la consigna son el STATCOM, el SVC y la inductancia fija, los tres consiguen la tensión consigna en sus terminales.

En cuanto al criterio de las sobrecargas:

Líneas		Caso 2			
Origen	Destino	Inicial [%]	Inductancia fija Q= -100 MVar [%]	Inductancia por tomas [%]	STATCOM [%]
4	5	119	59	57	59
5	7	77	75	75	75
7	8	76	79	80	79
8	9	26	27	27	27
9	6	68	66	66	66
6	4	42	35	34	35

Tabla 40: Sobrecargas dependiendo del compensador del caso 2 con línea subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

Tanto los compensadores dinámicos como la inductancia fija y por tomas consiguen una mínima sobrecarga de las líneas esto es debido a la relación entre la

potencia reactiva y las sobrecargas, ya que cuanto menor sea la reactiva que se encuentra en las líneas menores serán sus sobrecargas.

4.4.1.3. Caso 3: Demanda en el punto intermedio.

Se puede considerar este caso como el caso base, ya que es el caso del que parte el resto.

Las características de cada nudo de este caso son:

Nudo	Unom [kV]	u [p.u.]	U [kV]	δ [°]	Pd [MW]	Qd [Mvar]	Pg [MW]	Qg [Mvar]
1	16,5	1	16,5	0	---	---	72,17	-119,7
2	18	1	18	10,6	---	---	163	-34,35
3	13,8	1	13,8	6,19	---	---	85	-37,07
4	220	1,06975	235,346	-2,23	---	---	---	---
5	220	1,07448	236,386	-2,63	125	50	---	---
6	220	1,03875	228,525	-3,2	90	30	---	---
7	220	1,02654	225,838	4,9	---	---	---	---
8	220	1,01339	222,947	2,38	100	35	---	---
9	220	1,02293	225,046	3,4	---	---	---	---

Tabla 41: Tensión y potencia característica de los nudos del caso 3 con línea subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

En este caso al aumentar tanto las tensiones, quizás sea necesaria la conexión de una tercera reactancia en la inductancia fija, para decidir que compensador consigue una mejor regulación de tensión:

Caso 3		Inicial	Inductancia fija Q= -150 MVar	Inductancia fija Q= -100 MVar	Inductancia por tomas Q= -135 MVar	STATCOM Q= -127,42 MVar
Nudo	U [kV]	u [p.u.]	u [p.u.]	u [p.u.]	u [p.u.]	u [p.u.]
1	16,5	1	1	1	1	1
2	18	1	1	1	1	1
3	13,8	1	1	1	1	1
4	220	1,06975	1,00362	1,0245	1,00976	1,01291
5	220	1,07448	0,98783	1,01518	0,99588	1
6	220	1,03875	0,98794	1,00401	0,99266	0,99508
7	220	1,02654	1,00396	1,01109	1,00606	1,00713
8	220	1,01339	0,99295	0,99942	0,99485	0,99583
9	220	1,02293	1,00781	1,01259	1,00921	1,00993

Tabla 42: Tensión de los nudos utilizando compensadores del caso 3 con línea subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

El STATCOM y por lo tanto el SVC consiguen disminuir la tensión hasta conseguir la tensión consigna en su nudo de conexión, se puede considerar que los compensadores dinámicos como los que más se ajustan a las necesidades del sistema, pero el resto de elementos también consiguen una buena regulación de tensiones.

Si comparamos la inductancia fija de 100 MVar y la de 150 MVar podemos considerar que consigue una mejor regulación la de 150 MVar por lo tanto para los siguientes casos se considerara tres reactancias conectadas en el caso de la inductancia fija.

En cuanto a las sobrecargas de las líneas:

Líneas		Caso 3			
Origen	Destino	Inicial [%]	Inductancia fija Q= -150 MVar [%]	Inductancia por tomas [%]	STATCOM [%]
4	5	125	40	43	45
5	7	67	66	66	66
7	8	66	68	68	68
8	9	22	24	24	24
9	6	62	57	57	57
6	4	37	27	28	28

Tabla 43: Sobrecargas dependiendo del compensador del caso 3 con línea subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

La inductancia de 150 MVar consigue menor sobrecarga ya que se absorbe mayor reactiva, pero el resto de compensadores consiguen solventar el problema de sobrecarga en la línea 4-5,

4.4.1.4. Caso 4: Disminución de la demanda un 15 %

Al disminuir la potencia demandada la tensión del nudo 5 seguirá aumentando por lo tanto será preciso conectar los compensadores en dicho nudo y así reducir su tensión.

Las características del sistema de nueve nudos sin ningún compensador conectado:

Nudo	Unom [kV]	u [p.u.]	U [kV]	δ [°]	Pd [MW]	Qd [Mvar]	Pg [MW]	Qg [Mvar]
1	16,5	1	16,5	0	---	---	61,27	-135,1
2	18	1	18	8,88	---	---	138,55	-43,32
3	13,8	1	13,8	5,24	---	---	72,25	-44,7
4	220	1,07839	237,247	-1,88	---	---	---	---
5	220	1,08087	237,791	-2,47	106,25	42,5	---	---
6	220	1,05129	231,284	-2,7	76,5	25,5	---	---
7	220	1,03072	226,759	4,06	---	---	---	---
8	220	1,0206	224,531	1,96	85	29,75	---	---
9	220	1,02707	225,955	2,87	---	---	---	---

Tabla 44: Tensión y potencia característica de los nudos del caso 4 con línea subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

Como se suponía las tensiones de los nudos aumentan, se deberá vigilar que ningún nudo sobrepase la tensión límite.

Debido a este aumento de tensión la potencia reactiva de los compensadores aumentara por lo tanto como se indicaba anteriormente la inductancia fija estará formada por tres reactancias.

Según qué compensador se instale la tensión de los nudos del sistema será:

Caso 4		Inicial	Inductancia fija Q=-150 MVar	Inductancia por tomas Q=-150 MVar	STATCOM Q= -139,32 MVar
Nudo	U [kV]	u [p.u.]	u [p.u.]	u [p.u.]	u [p.u.]
1	16,5	1	1	1	1
2	18	1	1	1	1
3	13,8	1	1	1	1
4	220	1,07839	1,0128	1,0128	1,01713
5	220	1,08087	0,99428	0,99428	1
6	220	1,05129	1,00105	1,00105	1,00437
7	220	1,03072	1,00826	1,00826	1,00974
8	220	1,0206	1,00032	1,00032	1,00167
9	220	1,02707	1,0121	1,0121	1,01309

Tabla 45: Tensión de los nudos utilizando compensadores del caso 4 con línea subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

Todos los elementos consiguen regular la tensión pero únicamente los dinámicos representados por el STATCOM absorben la reactiva suficiente para conseguir la tensión consigna en el nudo 5.

Los compensadores también reducen la sobrecarga de las líneas:

Líneas		Caso 4			
Origen	Destino	Inicial [%]	Inductancia fija Q=-150MVar [%]	Inductancia por tomas [%]	STATCOM [%]
4	5	132	40	40	44
5	7	59	56	56	55
7	8	55	59	59	59
8	9	19	21	21	21
9	6	56	51	51	51
6	4	33	22	22	22

Tabla 46: Sobrecargas dependiendo del compensador del caso 4 con línea subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

Los compensadores que trabajen con mayor potencia reactiva serán los elementos que conseguirán menor sobrecarga, por lo tanto en este caso las inductancias fijas y por tomas, con 150 MVar, son las que reducen en mayor medida las sobrecargas, aunque tanto el SVC como el STATCOM solventan la sobrecarga de la línea problemática.

4.4.1.5. Caso 5: Disminución de la demanda un 30%

Este es el caso más extremo ya que las tensiones en este supuesto serán las más extremas y los compensadores deberán trabajar con mayor potencia reactiva, es posible que este caso este fuera de los límites de estabilidad que marca el procedimiento de operación.

El sistema de 9 nudos sin compensador tendrá las siguientes características:

Nudo	Unom [kV]	u [p.u.]	U [kV]	δ [°]	Pd [MW]	Qd [Mvar]	Pg [MW]	Qg [Mvar]
1	16,5	1	16,5	0	---	---	50,34	-148,76
2	18	1	18	7,32	---	---	114,1	-52,62
3	13,8	1	13,8	4,39	---	---	59,5	-51,87
4	220	1,08607	238,936	-1,53	---	---	---	---
5	220	1,09082	239,981	-2,11	87,5	35	---	---
6	220	1,06282	233,82	-2,2	63	21	---	---
7	220	1,03535	227,777	3,37	---	---	---	---
8	220	1,02791	226,141	1,67	70	24,5	---	---
9	220	1,03099	226,817	2,45	---	---	---	---

Tabla 47: Tensión y potencia característica de los nudos del caso 5 con línea subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

Afortunadamente ningún nudo está por encima de los límites de estabilidad pero los nudos 4 y 5 se acercan demasiado a la inestabilidad por lo tanto será necesario la instalación de compensadores de reactiva para reducir las tensiones en estos nudos:

Caso 5		Inicial	Inductancia fija Q=-150 MVar	Inductancia por tomas Q=-165 MVar	STATCOM Q= -157,72 MVar
Nudo	U[kV]	u [p.u.]	u [p.u.]	u [p.u.]	u [p.u.]
1	16,5	1	1	1	1
2	18	1	1	1	1
3	13,8	1	1	1	1
4	220	1,08607	1,02035	1,01434	1,01724
5	220	1,09082	1,00411	0,99616	1
6	220	1,06282	1,01282	1,00825	1,01046
7	220	1,03535	1,01292	1,01087	1,01186
8	220	1,02791	1,00778	1,00593	1,00682
9	220	1,03099	1,01611	1,01474	1,0154

Tabla 48: Tensión de los nudos utilizando compensadores del caso 5 con línea subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

El compensador que consigue una mejor regulación es el STATCOM seguido de la inductancia por tomas y la inductancia fija.

Si analizamos como en el resto de casos la sobrecarga de las líneas podremos ver que todos los compensadores consiguen reducirla y minimizarla.

Líneas		Caso 5			
Origen	Destino	Inicial [%]	Inductancia fija Q=-150MVar [%]	Inductancia por tomas [%]	STATCOM [%]
4	5	138	39	35	36
5	7	50	46	46	46
7	8	45	49	49	49
8	9	15	17	18	17
9	6	52	44	44	44
6	4	29	17	17	17

Tabla 49: Sobrecargas dependiendo del compensador del caso 5 con línea subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

El compensador que consigue reducirlo al máximo es la inductancia por tomas, por ser el elemento con mayor potencia reactiva, aunque todos los compensadores consiguen una reducción considerable de las sobrecargas.

4.4.2. Tensión nudo crítico

Como en el análisis con todas las líneas aéreas el nudo crítico, es decir el nudo de referencia donde se conectan los compensadores para el control de tensiones, es el nudo 5.

Podemos hacer una gráfica donde veamos cómo afecta cada compensador dependiendo del caso de estudio.

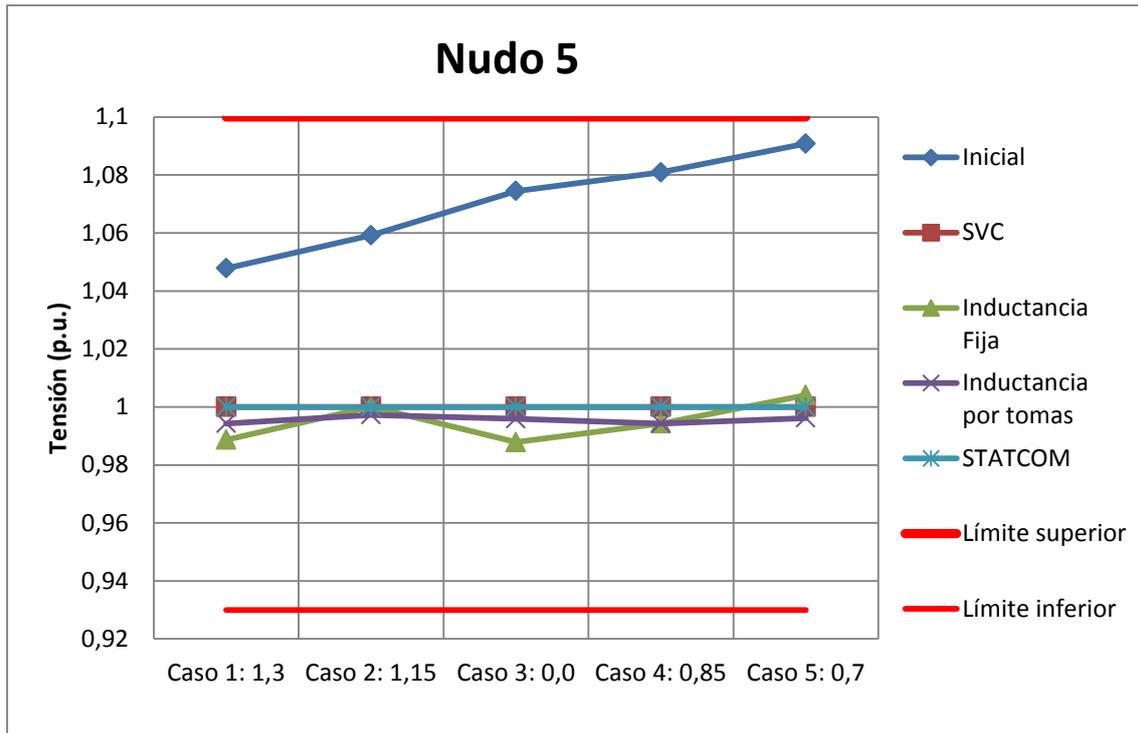


Figura 41: Evolución de la tensión del nudo 5 con línea subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

Nudo 5 u [p.u.]	Caso 1: 1,3	Caso 2: 1,15	Caso 3: 0,0	Caso 4: 0,85	Caso 5: 0,7
Inicial	1,04782	1,0592	1,07448	1,08087	1,09082
Inductancia Fija	0,98867	1,00006	0,98783	0,99428	1,00411
Inductancia por tomas	0,9943	0,99726	0,99588	0,99428	0,99616
STATCOM	1	1	1	1	1
SVC	1	1	1	1	1

Tabla 50: Evolución de la tensión del nudo 5 con línea subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver y como se explica detenidamente anteriormente, los compensadores que reducen en mayor medida la tensión en el nudo de conexión son el STATCOM y el SVC ya que son elementos variables que se ajusta a las requerimientos del sistema.

4.4.3 Diferencia de tensión

Otra forma de diferenciar cada compensador es según las diferencias de tensión que tenga cada nudo respecto a la unidad. Según el caso y el compensador:

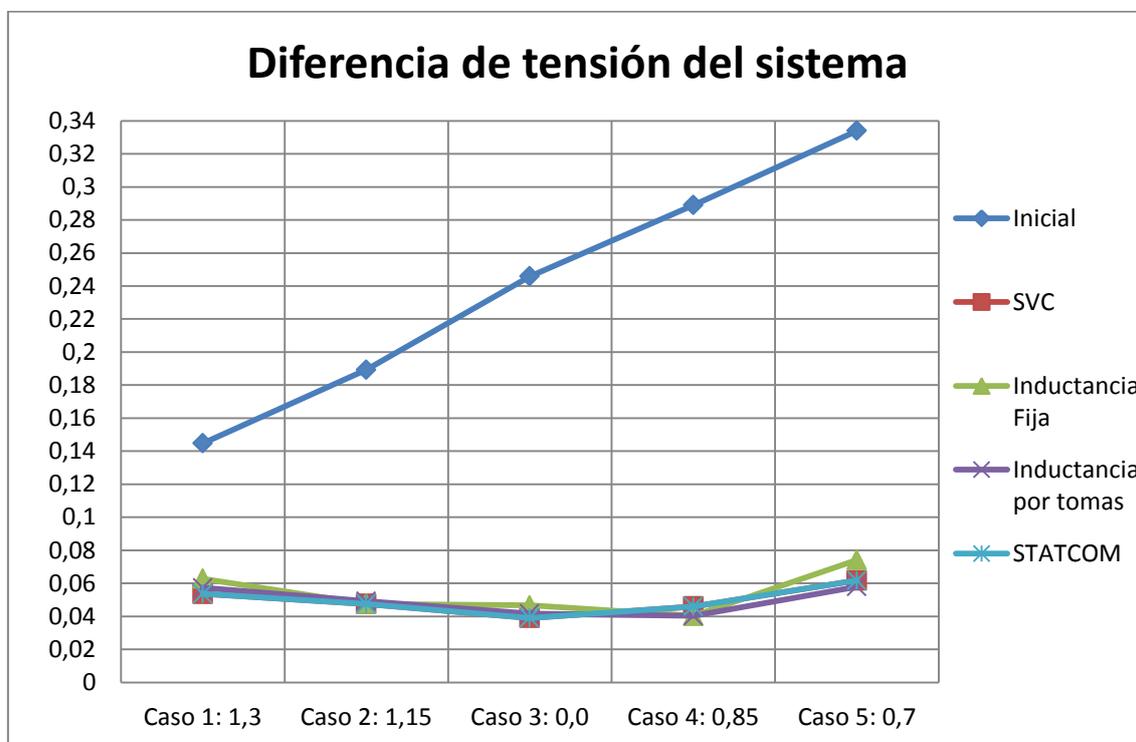


Figura 42: Diferencia de tensión del sistema con línea subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

Diferencia de Tensión [p.u.]	Caso 1: 1,3	Caso 2: 1,15	Caso 3: 0,0	Caso 4: 0,85	Caso 5: 0,7
Inicial	0,14474	0,18934	0,24584	0,28894	0,33396
Inductancia Fija	0,06275	0,04754	0,04667	0,04025	0,07409
Inductancia por tomas	0,05728	0,0492	0,04164	0,04025	0,05797
STATCOM	0,05363	0,04748	0,03906	0,046	0,06178
SVC	0,05363	0,04748	0,03906	0,046	0,06178

Tabla 51: Diferencia de tensión del sistema con línea subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

Tanto el STATCOM como el SVC en las horas punta y llano son los compensadores que menor diferencia de tensión provocan con su funcionamiento, en cambio en las horas valle la inductancia por tomas consigue menor diferencia de tensión, en el caso 4, es decir, con una reducción del 15% en la demanda, la inductancia

fija reduce en la misma medida las pérdidas ya que ambos compensadores, la inductancia fija y por tomas, tienen la misma capacidad de compensación.

4.4.4. Pérdidas del sistema

Otro método de comparación es en función las pérdidas que tenga el sistema.

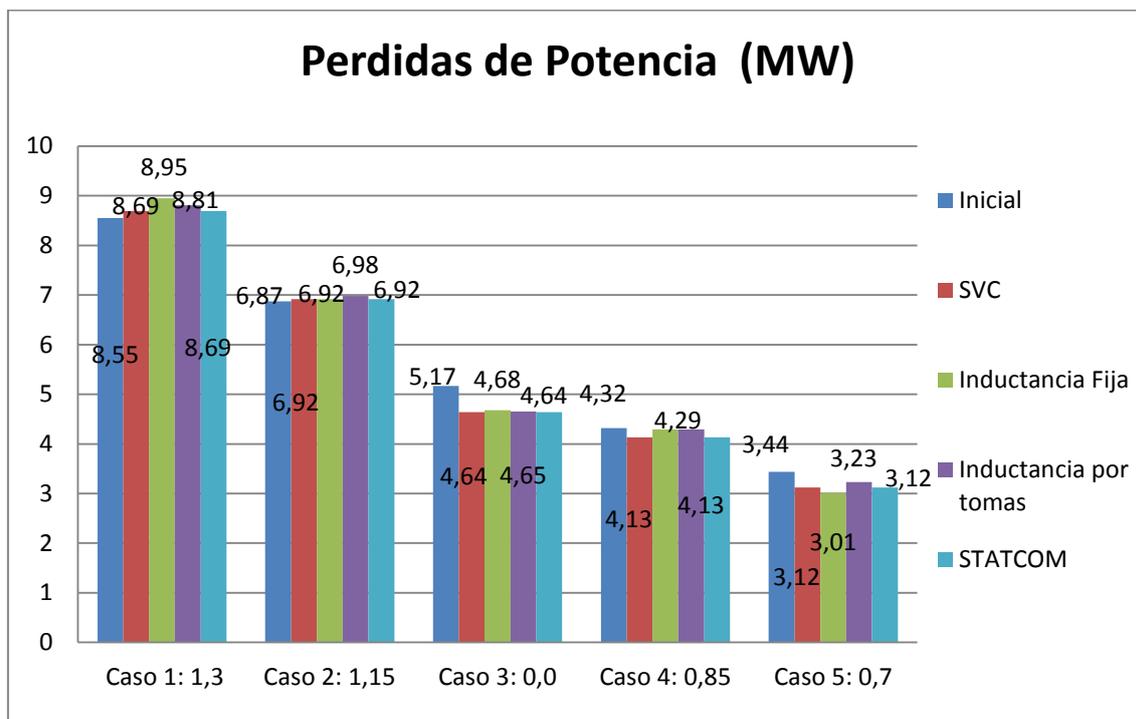


Figura 43: Pérdidas de potencia del sistema.

Fuente: Elaboración propia.

Pérdidas de Potencia Activa (MW)					
	Caso 1: 1,3	Caso 2: 1,15	Caso 3: 0,0	Caso 4: 0,85	Caso 5: 0,7
Inicial	8,55	6,87	5,17	4,32	3,44
Inductancia Fija	8,95	6,92	4,68	4,29	3,01
Inductancia por tomas	8,81	6,98	4,65	4,29	3,23
STATCOM	8,69	6,92	4,64	4,13	3,12
SVC	8,69	6,92	4,64	4,13	3,12

Tabla 52: Pérdidas del sistema con línea subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

Los elementos de compensación variable en los casos 3,4 y 5 tienen menores pérdidas, es decir en las horas valle y llano, pero en las horas punta, casos 1 y 2 el sistema sin compensadores tendrá pérdidas inferiores.

Las corrientes que se producen con la regulación de tensión provocan que se aumente las pérdidas del sistema.

4.4.5 Ahorro por compensador

Para saber cuál es la ventaja económica usando compensadores se comparara el sistema con el uso y sin el uso de los compensadores.

El ahorro que conseguiremos usándolos será:

	Pérdidas[MW]	Ahorro de MW para cada compensador			
	Inicial	Inductancia fija	Inductancia por tomas	STATCOM	SVC
Caso 1	8,55	-0,4	-0,26	-0,14	-0,14
Caso 2	6,87	-0,05	-0,11	-0,05	-0,05
Caso 3	5,17	0,49	0,52	0,53	0,53
Caso 4	4,32	0,03	0,03	0,19	0,19
Caso 5	3,44	0,43	0,21	0,32	0,32

Tabla 53: Ahorro de potencia con el uso de compensadores con línea subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

Ahorro para cada compensador [%]				
	Inductancia fija	Inductancia por tomas	STATCOM	SVC
Caso 1	-4,68%	-3,04%	-1,64%	-1,64%
Caso 2	-0,73%	-1,60%	-0,73%	-0,73%
Caso 3	9,48%	10,06%	10,25%	10,25%
Caso 4	0,69%	0,69%	4,40%	4,40%
Caso 5	12,50%	6,10%	9,30%	9,30%

Tabla 54: Ahorro de potencia en porcentaje con el uso de compensadores con línea subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

Para conocer la eficiencia de cada compensador supondremos no se conectara siempre y cuando produzca mayores pérdidas que el sistema sin dispositivos, es decir en el primer y segundo caso no se conectarán los compensadores.

Para saber cuánto será el ahorro diario se seguirá la curva de la demanda fraccionada, la figura 37, la cual divide en franjas el día dependiendo del caso, y por lo tanto la duración diaria en función del caso de estudio.

Ahorro de MWh gracias al uso de Compensadores				
	Inductancia fija	Inductancia por tomas	STATCOM	SVC
Caso 1	0	0	0	0
Caso 2	0	0	0	0
Caso 3	0,735	0,78	0,795	0,795
Caso 4	0,075	0,075	0,475	0,475
Caso 5	1,935	0,945	1,44	1,44
Diario	2,745	1,8	2,71	2,71
Anual	1001,925	657	989,15	989,15

Tabla 55: Ahorro de energía con el uso de compensadores con línea subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver el compensador que consigue una mayor compensación es la inductancia fija, ya que en el caso de una reducción de un 30% se reducen considerablemente las pérdidas.

Siguiendo el mismo criterio de precios que el análisis de la línea aérea se estudiara el ahorro económico gracias al uso de compensadores:

Intervalos	Casos	Precio medio [\$ /MWh]	Ahorro (€)			
			Inductancia fija	Inductancia por tomas	SVC	STATCOM
Intervalo 1	Caso 4	23,41	1,05	1,05	6,67	6,67
Intervalo 2	Caso 5	10,15	19,64	9,59	14,62	14,62
Intervalo 3	Caso 4	19,97	0,60	0,60	3,79	3,79
Intervalo 4	Caso 3	37,99	12,47	13,24	13,49	13,49
Intervalo 5	Caso 2	51,35	0,00	0,00	0,00	0,00
Intervalo 6	Caso 1	42,57	0,00	0,00	0,00	0,00
Intervalo 7	Caso 2	38,23	0,00	0,00	0,00	0,00
Intervalo 8	Caso 1	64,1	0,00	0,00	0,00	0,00
Intervalo 9	Caso 2	50,19	0,00	0,00	0,00	0,00
Intervalo 10	Caso 3	41,29	16,79	17,82	18,16	18,16
	Diario		50,56	42,30	56,74	56,74
	Anual		18453,51	15439,78	20708,59	20708,59

Tabla 56: Ahorro económico con el uso de compensadores con línea subterránea.

Fuente: [34] y elaboración propia.

Se consigue mayor ahorro económico con los compensadores variables.

Para saber cuándo recuperaríamos la inversión supondremos los siguientes costes:

	Inductancia fija	Inductancia por tomas	STATCOM	SVC
Precio (€)	1 000 000,00	2 500 000,00	10 000 000,00	5 000 000,00

Tabla 57: Inversión económica para la instalación de compensadores inductivos.

Fuente: Elaboración propia.

Se conseguiría amortizar la inversión inicial suponiendo que tanto el demanda como los costes de energía son idénticos a este:

Compensador	Precio [€]	Ahorro diario	Años
Inductancia fija	1 000 000,00	50,56	54
Inductancia por tomas	2 500 000,00	42,30	162
STATCOM	10 000 000,00	56,74	483
SVC	5 000 000,00	56,74	241

Tabla 58: Amortización de los compensadores inductivos.

Fuente: Elaboración propia.

Se conseguirá una amortización en un menor periodo de tiempo con la inductancia fija, ya que el coste de instalación es considerablemente menor.

Si se tienen en cuenta los aspectos técnicos, los dispositivos de compensación que consiguen un mayor ajuste de tensión en el nudo de conexión son los compensadores variables (el SVC y el STATCOM) que se adaptan según sean las necesidades del sistema.

5. Conclusión

En este trabajo se ha estudiado como actúan los compensadores de reactiva en función de la demanda diaria, es decir cómo se adapta cada elemento de compensación a las necesidades del sistema.

Se ha elegido un día con gran variación entre la demanda en las horas punta y en las horas valle para estudiar cómo cambian las magnitudes más significativas del sistema a lo largo del día y como los compensadores se ajustan a estas variaciones.

Para el estudio se han analizado tanto los parámetros técnicos como los económicos, para comprender que elemento es más viable teniendo en cuenta ambos criterios, para el análisis se ha supuesto que el día de estudio se repite a lo largo del año, es decir que todos los días serán como el estudiado.

Para comprender como trabaja cada compensador se ha decidido trabajar con una red del IEEE, la cual trabaja con todas las líneas aéreas, el primer estudio adapta la red IEEE según la variación de la demanda diaria, el segundo estudio lleva a cabo el soterramiento de una línea, de esa forma se verá cómo aumenta la potencia reactiva.

El primer estudio trabaja con tensiones inferiores a la consigna, por lo tanto para estos casos se trabaja con compensadores que aporten potencia reactiva al nudo de conexión, en cambio el segundo caso al tener una línea subterránea tendrá tensiones superiores a la referencia, en estos casos se conectarán compensadores que absorban reactiva en el nudo de conexión originando la reducción de la tensión.

Para ambos análisis los compensadores que consiguen una tensión más cercana a la referencia son los elementos de compensación variables, es decir tanto el SVC como el STATCOM son capaces de conseguir la tensión consigna independientemente de las variaciones del sistema.

Las pérdidas del sistema serán mayores en las horas punta ya que la demanda será mayor y las líneas estarán más sobrecargadas. Para el primer análisis los elementos compensadores conseguirán reducir las pérdidas del sistema salvo el caso de horas valle

en donde conectar el banco de condensadores supone aumentar las pérdidas del sistema. En cualquier caso los elementos compensadores reducen las pérdidas.

Las pérdidas del segundo análisis serán mayores que las del primer análisis al igual que las tensiones. En este caso en las horas punta habrá menores pérdidas con el sistema sin compensadores, esto es debido a que la intensidad circulante será inferior.

En cuanto al ahorro económico que se produce en función del ahorro energético, son los compensadores variables los que consiguen tener mayor ahorro diario, ya que los compensadores discretos producen mayores pérdidas. Aunque la amortización de los compensadores variables se consigue en un mayor periodo de tiempo ya que son más caros que los discretos.

Por lo tanto si se tiene en cuenta exclusivamente los aspectos económicos se instalaran bancos de condensadores para el primer caso e inductancias fijas para el segundo caso, pero si se tienen en cuenta los técnicos se instalaran los compensadores variables ya que la fiabilidad y seguridad del sistema será mayor.

En cuanto a mi experiencia personal, la elaboración de este trabajo ha supuesto un complemento a mi formación. Con su desarrollo, he conseguido aumentar mi conocimiento en métodos y tecnologías para compensar la potencia reactiva. Por otra parte he aprendido a utilizar el PowerWorld un programa que desconocía pero necesario para la elaboración de este trabajo.

6. Bibliografía

- [1] **EPEC.** La historia de la electricidad. [En línea]
<http://www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/historia.pdf>.
- [2] *Transporte de energía eléctrica en corriente continua: HVDC.* **Frau, Joan Ignasi y Gutiérrez, Jordi.** 361, Abril, 2005.
- [3] **Bustelo Muiños, David.** Abengoa. 6 de Noviembre de 2015. [En línea]
<http://www.laenergiadelcambio.com/corriente-alterna-vs-corriente-continua>.
- [4] **Area Tecnología.** Area Tecnología. [En línea]
<http://www.areatecnologia.com/corriente-continua-alterna.htm>.
- [5][En línea]
<http://ddtorres.webs.ull.es/Docencia/Instalaciones/Electrifica/Tema%202.htm>.
- [6] **Hernando Mateos, Adolfo.** *Apuntes Centrales II.* Leganes : Universidad Carlos III de Madrid, 2015.
- [7] **Wildi, Theodore.** *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia.* México : Pearson Educación, 2007. Sexta edición.
- [8] **Carrillo González, Camilo J. y Cidrás Pidre, José.** *Análisis de Redes Eléctricas.* Universidad de Vigo : s.n., 1995.
- [9] **Cabrera Romero, Manuel John.** *Simulación de transientes electromagnéticos en las líneas de transmisión de EAT.* Guayaquil (Ecuador) : Escuela Superior Politecnica del Litoral, 2012.
- [10] **Mogollón Marcelio, Angel de Jesús y Vargas Rodríguez, José Giuseppe.** *Motores Sincronos y sus Aplicaciones en la Industria.* Xalapa Enriquez (México) : Universidad Veracruzana, 2013.
- [11] **Martínez Gracia, Amaya, y otros, y otros.** *Disminución de costes energeticos en la empresa.* Madrid : Fundación Confemetal, 2006.
- [12] **Quintela, F. R., y otros, y otros.** *La medida de la energía reactiva, un método imperfecto de evaluación de las perdidas en el sistema eléctrico.*
- [13] **Ministerio de Industria y Energía.** *P.O. - 7.4 Servicio complementario de control de tensión de la red de transporte.* Madrid : BOE, 2000. 67.
- [14] **Ministerio de Industria y Energía.** *P.O.-1.4 Condiciones de entrega de la energía en los puntos frontera de la red gestioada por el operador del sistema.* Madrid : BOE, 1998. 197.

- [15] **Usaola Garcia, Julio.** *Control tensión-reativa.* Leganes : Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2014.
- [16] **Ledesma, Pablo.** *Control de tensión.* Leganes : Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2008.
- [17] **Fraile Mora, Jesús.** *Maquinas Eléctricas.* Madrid : Mc Graw Hill, 2003. Quinta edición.
- [18] **Chapman, Stephen J.** *Máquinas Eléctricas.* México D.F. : McGraw-Hill, 1985.
- [19] **Rodríguez Pozueta, Miguel Angel.** *La máquina síncrona funcionando en red de potencia infinita y en paralelo con otras. Motor síncrono.* Santander : Universidad de Cantabria. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, 2014.
- [20] **ABB.** *Reactancias de compensación. Un historial de eficiencia demostrada para el éxito del futuro.* Zúrich : s.n., 2011.
- [21] **Trench Group.** *Reactores Secos con Núcleo en Aire Tipo Shunt Para Aplicacione hasta 500 kV.* Linz-Leonding (Austria) : s.n.
- [22] **Burgos Díaz, Juan Carlos.** *Tema 4: Transformadores Trifásicos, Apuntes de Circuitos Magnéticos y Transformadores.* Leganes : Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2013.
- [23] **Ras Oliva, Enrique.** *Transformadores de potencia, de medida y de protección.* Barcelona : Marcombo Boixareu Editores, 1994.
- [24] **Bruce Carlson, A.** *Circuits.* Nueva York : Thomson, 2001.
- [25] **de la Bodega, Faustino, y otros, y otros.** *FACTS Formas de usar mas eficientemente las líneas eléctricas existentes.* Bilbao : E.U.I.T.I. de Bilbao, Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- [26] **G. Hingorani, Narain y Gyugyi, Laszlo.** *Understanding FACTS.* New York : Wiley-Interscience, 2000.
- [27] **Azar, Ramy.** *Introducción al Compensador Estático de Energía Reactiva y a los sistemas de Transmisión Flexible AC (FACTS).* s.l. : SNC-LAVALIN, 2013.
- [28] **Dovalos M., Ricardo J. y Ramírez A., Juan M.** *Características funcionales del STATCOM.* Guadalajara (México) : Biental, 2001.
- [29] **Sierra Rodríguez, Edgar Enrique.** *Compensador Estático Síncrono (STATCOM) Modelado y Simulación.* Santander : Universidad Industrial de Santander, 2006.
- [30] **Alzate, Alfonso y Mancera, David.** *Aplicación del control difuso en un STATCOM.* s.l. : Universidad Tecnológica de Pereira, 2007.

[31] **Kumar Nallagalva, Swaroop, Kumar Kirar, Mukesh y Ganga Agnihotri, Dr.** *Transient Stability Analysis of the IEEE 9-Bus Electric Power System*. Bhopal (India) : Department of Electrical Engineering, MANIT Bhopal, 2012.

[32] **University of Illinois.** Institute Information Trust. [En línea]
<http://icseg.iti.illinois.edu/wsc-9-bus-system/>.

[33] **Red Eléctrica España.** Seguimiento de la demanda de energía eléctrica. [En línea]
03 de Febrero de 2014. <https://demanda.ree.es/demanda.html>.

[34] **Red Eléctrica de España S.A.** Sistema de Información del Operador del Sistema.
[En línea] 03 de Febrero de 2014. <https://www.esios.ree.es/es/mercados-y-precios?date=03-02-2014>.