



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Eléctrica

*Incorporación de diferentes modos de control de un
STATCOM en el análisis de flujos de carga de un
Sistema Eléctrico*

Autor:

Morán Río, Diana Patricia

Tutores:

Riesco Sanz, Manuel-Vicente

Duque Pérez, Óscar

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Valladolid, Julio de 2014

A mi familia, a las Ingenieras de los Jueves, a mi tutor y al resto de personas que han estado ahí durante estos cuatro años.

Resumen

Los avances producidos en la electrónica de potencia han traído consigo el desarrollo de modernos sistemas que permiten un control más fiable de las redes eléctricas, los FACTS “Flexible AC Transmission Systems” o “sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna”. El presente trabajo centra su estudio en uno de estos dispositivos, el STATCOM (Static Synchronous Compensator) y desarrolla una metodología para la inclusión de este tipo de dispositivos en el cálculo de los flujos de carga de una red. Es también objeto de este Trabajo de Final de Grado estudiar la influencia de este tipo de dispositivos en las redes eléctricas, para lo cual se han diseñado y realizado diversas pruebas en una red, que incorpore un dispositivo STATCOM, estableciendo las prestaciones que se pueden esperar de la inclusión de este tipo de dispositivos.

Palabras clave:

FACTS, Sistemas eléctricos de potencia, regulación, control, STATCOM

Abstract

Power electronics improvements have brought the development of modern devices which offer a more reliable control of the electrical grids, FACTS “Flexible AC Transmission Systems”. This dissertation focuses on one of these devices, the STATCOM (Static Synchronous Compensator), and describes a methodology to include it on an electrical grid power flow study. In addition, studying STATCOM’s influence on electrical grids is an objective of this BEng dissertation. Due to this, it has been designed and performed various trials in a grid which includes a STATCOM. The trials performed will establish the expected benefits of the use of these devices.

Keywords:

FACTS, Electric power systems, STATCOM, regulation, control

Índices

Índice de contenidos

Introducción y objetivos	1
1. Flujos de carga en sistemas eléctricos. Necesidades de control.	5
1.1. Método de cálculo	6
1.2. Tipos de nudos	8
1.3. Límites del sistema.....	10
1.4. Necesidades de regulación y control	12
2. Dispositivos FACTS	15
2.1. Dispositivos FACTS. Tipos.....	15
2.2. Características de los dispositivos FACTS.....	19
2.3. Dispositivos STATCOM	19
2.3.1. Principios de funcionamiento.	20
2.3.2. Compensación en paralelo.....	22
2.3.3. Empleo de un STATCOM en una red eléctrica real	24
3. Modelo multifuncional de STATCOM para flujos de carga.....	27
3.1. Modelo eléctrico	27
3.2. Modos de control.....	28
4. Implementación del modelo en el análisis de flujos de carga mediante Newton Raphson	33
4.1. Planteamiento para la resolución de flujos de carga con Newton Raphson	33
4.2. Procedimiento para la resolución de flujos de carga con Newton Raphson	37
4.3. Inclusión de dispositivos STATCOM en el método de Newton-Raphson.....	41
4.4. Implementación de los diferentes modos de control.....	44
4.5. Otros aspectos importantes a tener en cuenta	52
4.6. Interface gráfica	56
5. Ejemplos de aplicación.....	65
5.1. Validación de los resultados obtenidos.	65
5.1.1. TEST de comprobación 1.....	68
5.1.2. TEST de comprobación 2.....	71
5.2. Influencia del STATCOM en la red de estudio.....	72



5.2.1. Control de la tensión del nudo del STATCOM: Prueba 1	73
5.2.2. Control de la tensión de un nudo no conectado al nudo del STATCOM: Prueba 2	75
5.2.3. Control de la tensión de un nudo conectado al nudo del STATCOM: Prueba 3	78
5.2.4. Control de la corriente capacitiva absorbida: Prueba 4	80
5.2.5. Control de la corriente inductiva absorbida: Prueba 5	82
5.2.6. Control de la potencia reactiva en una línea adyacente al nudo del STATCOM: Prueba 6	85
5.2.7. Control de la potencia reactiva en una línea remota: Prueba 7	88
5.2.8. Control de la potencia activa en una línea: Prueba 8	90
5.2.9. Control de la tensión equivalente del STATCOM	93
5.2.10. Control de la potencia reactiva del STATCOM	95
Conclusiones	99
Bibliografía	107

Índice de figuras

Fig. 1. Modelo en π de una línea	7
Fig. 2. Nudo genérico.....	8
Fig. 3. Símbolo general de un controlador FACTS	16
Fig. 4. Símbolo para controlador serie	16
Fig. 5. Símbolo para controlador paralelo	17
Fig. 6. Símbolo para controlador unificado serie-serie	18
Fig. 7. Símbolo para controlador coordinado serie-paralelo	18
Fig. 8. Símbolo para controlador unificado serie-paralelo	18
Fig. 9. Esquemas unifilares de generador síncrono y STATCOM respectivamente.....	20
Fig. 10. Característica I-V del STATCOM	21
Fig. 11. Flujo de potencia en una línea de transmisión.....	23
Fig. 12. Línea de transmisión con compensación en paralelo.....	24
Fig. 13. Circuito equivalente para STATCOM	27
Fig. 14. Modelo en π de una línea	31
Fig. 15. Matriz Jacobiana modificada	39
Fig. 16 Diagrama de flujo para Newton-Raphson	40
Fig. 17. Red de cinco nudos con STATCOM	45
Fig. 18. Matriz Jacobiana para el modo 1.....	46
Fig. 19. Matriz Jacobiana para el modo 2.....	47
Fig. 20. Matriz Jacobiana para el modo 5.....	49
Fig. 21. Matriz Jacobiana para el modo 6.....	50

Fig. 22. Matriz Jacobiana para el modo 7	51
Fig. 23. Jacobiana para el modo 2 con STATCOM en un nudo PV	54
Fig. 24. Jacobiana para el modo 6 con STATCOM en un nudo PV	54
Fig. 25. Jacobiana para el modo 7 con STATCOM en un nudo PV	55
Fig. 26. Ventana principal de la interface	57
Fig. 27. Ejemplo de representación de datos en la red predeterminada	59
Fig. 28. Introducir_Datos.....	60
Fig. 29. Mensaje de aviso	61
Fig. 30. Ventana ejemplo para cargar un archivo	62
Fig. 31. Red de cinco nudos sin STATCOM	66
Fig. 32. Red del Test 1	69
Fig. 33. Esquema del TEST de comprobación 1.....	70
Fig. 34. Esquema del TEST de comprobación 2.....	71
Fig. 35. Red de la Prueba 2.....	75
Fig. 36. Red de la Prueba 3.....	78
Fig. 37. Red de la Prueba 4.....	80
Fig. 38. Red de la Prueba 5.....	83
Fig. 39. Red del control de la reactiva por la línea 1	85
Fig. 40. Red de la Prueba 6.....	86
Fig. 41. Red de la Prueba 7.....	88
Fig. 42. Red de la Prueba 8.....	90
Fig. 43. Red para el control de la tensión equivalente del STATCOM.....	93
Fig. 44. Pérdidas de potencia activa en función de V_{st}	94
Fig. 45. Pérdidas de potencia activa en función de V_{st} para ambos nudos.....	94
Fig. 46. Red para el control de la reactiva del STATCOM.....	95
Fig. 47. Pérdidas de potencia activa en función de Q_{st}	96
Fig. 48. Pérdidas de potencia activa en función de Q_{st} para todos los nudos	97

Índice de tablas

Tabla 1. Datos de los nudos de la red de la Fig. 31	66
Tabla 2. Parámetros de las líneas de la red de la Fig. 31	66
Tabla 3. Datos de los generadores de la red de la Fig. 31.....	67
Tabla 4. Datos de las cargas de la red de la Fig. 31.....	67
Tabla 5. Valores de las tensiones y la potencia en los nudos según la referencia [1]	67
Tabla 6. Valores de las potencias en las líneas según la referencia [1]	67
Tabla 7. Valores de las tensiones y la potencia en los nudos con nuestra herramienta ..	68
Tabla 8. Valores de las potencias en las líneas con nuestra herramienta	68
Tabla 9. Prueba 1: Resultados de los nudos	69
Tabla 10. Prueba 1: Resultados de las líneas	69
Tabla 11. Prueba 1: Resultados del STATCOM.....	70
Tabla 12. Tabla resumen de las pruebas realizadas.....	73
Tabla 13. Prueba 2: Resultados de los nudos	76



Tabla 14. Prueba 2: Resultados de las líneas	76
Tabla 15. Prueba 2: Resultados del STATCOM	76
Tabla 16. Prueba 3: Resultados de los nudos.....	79
Tabla 17. Prueba 3: Resultados de las líneas	79
Tabla 18. Prueba 3: Resultados del STATCOM	79
Tabla 19. Prueba 4: Resultados de los nudos.....	81
Tabla 20. Prueba 4: Resultados de las líneas	81
Tabla 21. Prueba 4: Resultados del STATCOM	81
Tabla 22. Prueba 5: Resultados de los nudos.....	83
Tabla 23. Prueba 5: Resultados de las líneas	83
Tabla 24. Prueba 5: Resultados del STATCOM	83
Tabla 25. Prueba 6: Resultados de los nudos.....	87
Tabla 26. Prueba 6: Resultados de las líneas	87
Tabla 27. Prueba 6: Resultados del STATCOM	87
Tabla 28. Prueba 7: Resultados de los nudos.....	89
Tabla 29. Prueba 7: Resultados de las líneas	89
Tabla 30. Prueba 7: Resultados del STATCOM	89
Tabla 31. Prueba 8: Resultados de los nudos.....	91
Tabla 32. Prueba 8: Resultados de las líneas	91
Tabla 33. Prueba 8: Resultados del STATCOM	91

Introducción y objetivos

La energía eléctrica es un tipo de energía ampliamente empleada debido a su facilidad de generación y transporte, así como a su capacidad de ser transformada en casi cualquier otro tipo de energía. Sin embargo, debido a sus características intrínsecas, presenta una serie de inconvenientes.

Ya que se trata de una energía no almacenable, la totalidad de la potencia demandada en un instante debe ser generada en ese mismo instante en algún tipo de central, lo que supone un estricto control de la generación. Además, a pesar de su facilidad de transporte, la transmisión de energía eléctrica no se realiza por unos caminos establecidos sino que depende de leyes físicas y por tanto de los distintos parámetros de las redes eléctricas. A esto también se le debe sumar que los sistemas eléctricos de potencia tienen unos márgenes de operación entre los cuales debe estar el sistema, ya sea la tensión de un nudo de la red, la corriente en una determinada línea, la potencia reactiva transmitida o cualquier otro.

El control de los parámetros de la red se ha venido realizando a través de diferentes técnicas que permiten tener controlada una o más magnitudes del sistema. Así, si se prevén demandas muy elevadas, se ampliará la red para garantizar los límites térmicos de los conductores; se emplean transformadores de tomas para mantener la tensión dentro de unos límites o compensadores puntuales para que la circulación de potencia reactiva no sea elevada. Los compensadores más típicos que se pueden encontrar son los condensadores y las inductancias, que conectados en un punto de la red permiten regular, además de demandas anormales de potencia reactiva, caídas o aumentos de tensión debidas a esta. Uno de los inconvenientes que presenta este tipo de sistemas de compensación es que no supone una compensación continua, sino que se debe realizar a escalones más o menos grandes. A ello también se le debe incluir que los sistemas que accionan este tipo de sistemas son mecánicos y por tanto lentos. Esto hace que sea un campo en el que se puedan producir grandes avances.

Por otra parte, en los últimos años, debido a los avances en la electrónica de potencia, se han desarrollado sistemas que permiten un control más fino de los flujos de potencia de un sistema. Estos sistemas son los denominados FACTS, “Flexible AC Transmission Systems” o “sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna”, que emplean la electrónica de potencia para realizar la conmutación y gracias a ello permitir un mayor control de la red.

Debido a la novedad que suponen este tipo de sistemas, su estudio y en especial su influencia en los flujos de carga es un tema no desarrollado en



profundidad durante el Grado, por lo que este Trabajo de Final de Grado pretende ahondar más en el tema. Puesto que se trata del Grado en Ingeniería Eléctrica no se tratarán temas constructivos ni de funcionamiento, que implican un conocimiento profundo de la electrónica de potencia sino que se centrará en los aspectos más relacionados con la actuación de este tipo de sistemas dentro de un flujo de potencia.

Existen en la actualidad gran variedad de FACTS, diferenciados tanto por su forma de construcción, componentes... como por el tipo de control que pueden realizar. Por ello se estudiará solo la influencia de uno de estos tipos, el STATCOM (Static Synchronous Compensator). Debido a la forma de control, se trata de un control en paralelo, no modifica los parámetros iniciales de la red y se adecúa, por tanto, mejor a una primera toma de contacto con este tipo de dispositivos. De esta forma este trabajo constituirá una base a partir de la cual se podrán desarrollar otros trabajos futuros en este mismo ámbito.

Para el estudio de la influencia del STATCOM en la red será necesario primero desarrollar un modelo de este, indicando los parámetros que lo definen en el flujo de carga y qué consideraciones hay que tener en cuenta para incluirlo en él. Este tipo de dispositivo FACTS permite el control de varios parámetros de la red por lo que una vez establecido el modelo, se tratarán los diferentes modos de control que puede proporcionar el STATCOM y todo ello se incluirá en un método de resolución de flujos de carga. Será necesario en este punto comprobar la validez de los resultados obtenidos gracias al método, por lo que se comprobarán con los obtenidos por diferentes autores de la bibliografía.

Para la resolución de los flujos de carga se empleará el método de Newton-Raphson que, por sus características de convergencia, es el empleado para este tipo de problemas de forma generalizada. Debido a la naturaleza iterativa del método y a la necesidad de trabajar con matrices de grandes dimensiones, se hace necesario el empleo de ordenadores para esta tarea, por ello, será objeto de este Trabajo de Final de Grado el desarrollo de una herramienta informática de resolución de flujos de potencia mediante Newton-Raphson para redes que incluyan dispositivos STATCOM.

Existe una gran variedad de software de programación que, gracias a su tratamiento matemático, podría haberse empleado para la programación del método de resolución del flujo de carga. En este caso el software que se empleará será Matlab, debido al mayor conocimiento que se posee de él y las prestaciones que ofrece. Con objeto de que el modelo de resolución de flujos de carga sea generalista y fácil de usar en futuras ocasiones, tanto la introducción de datos como su cálculo y la posterior visualización de los resultados se hará a través de una interface gráfica, aprovechando el entorno de programación gráfica de Matlab, GUIDE.

Finalmente se observará la influencia del STATCOM en una red estudiada en múltiples ocasiones en la bibliografía consultada. En el estudio de la influencia del STATCOM en los flujos de carga se trabajará con los diferentes modos de control para comprobar qué beneficios puede reportar cada uno de ellos. Se pretende también estudiar qué diferencia supone la inclusión del STATCOM en diferentes puntos de la red, para lo que se harán los cálculos correspondientes incluyendo este dispositivo en diferentes nudos. Por último, con todo ello se determinará qué modos de control suponen mayores ventajas y cuáles son los lugares óptimos empleo del STATCOM.

Teniendo en cuenta lo anterior se recoge a continuación una lista de los objetivos que se esperan haber conseguido al término del presente Trabajo de Fin de Grado:

- Realizar un modelo del dispositivo STATCOM para su inclusión en el cálculo de flujos de carga.
- Definir los diferentes modos de control que se desean incluir en el modelo y caracterizarlos.
- Incorporación de un dispositivo STATCOM en el cálculo trabajando según diferentes modos de control.
- Desarrollar un código en Matlab que permita el cálculo de flujos de carga incorporando dispositivos STATCOM.
- Desarrollo de una metodología de comprobación de la bondad de los resultados obtenidos.
- Evaluación de los resultados mediante la metodología de comprobación.
- Creación de un interface gráfica que facilite el empleo de la aplicación desarrollada.
- Uso de la aplicación creada para el cálculo de flujos de potencia en una red de cinco nudos.
- Comprobar qué efectos tiene sobre la red el empleo de este tipo de dispositivos.
- Definir el alcance de los diferentes modos de control
- Determinar cuál sería la situación óptima de este tipo de dispositivos en la red dependiendo del control que se desea realizar.

La memoria que recoge el trabajo realizado se ha estructurado en cinco capítulos más las conclusiones y la bibliografía consultada y utilizada como referencia.



En el capítulo uno se ha realizado una somera descripción de lo que es un flujo de cargas en un sistema de energía eléctrica, poniendo de manifiesto el método de cálculo así como las limitaciones del sistema y las necesidades de regulación y control de dichos sistemas.

El capítulo dos se ha dedicado a introducir una tecnología, los dispositivos FACTS, que, si bien arranca entorno a 1995, el desarrollo de la electrónica de potencia de los últimos años ha hecho de ella una potente herramienta de control de los sistemas eléctricos.

En el capítulo tres, a partir de su modelo eléctrico, se han definido los diferentes modos de control del STATCOM incorporados en este trabajo.

El capítulo cuatro se ha dedicado a la implementación de una herramienta informática, desarrollada en Matlab, capaz de resolver el flujo de cargas de un sistema eléctrico, que incluya dispositivos STATCOM, por el método de Newton Raphson. Para facilitar la toma de datos y la simulación de los diferentes modos de control del STATCOM se ha diseñado e implementado un interface gráfica

En el capítulo cinco se han recogido todos los ejemplos de aplicación utilizados para validar los resultados obtenidos con la herramienta desarrollada así como para comprobar la influencia del STATCOM en la red para los diferentes modos de control establecidos.

Por último, se ha dedicado un apartado para recoger minuciosamente las conclusiones a las que se han llegado con el trabajo fin de grado realizado indicando una posible vía de continuación en la línea de investigación iniciada.

1. Flujos de carga en sistemas eléctricos. Necesidades de control.

El cálculo de los flujos de carga o flujos de potencia es una técnica empleada en los sistemas de transporte y distribución para la toma de decisiones tanto en la explotación como en la planificación del sistema. Determina la transmisión de potencia por los diferentes componentes del sistema a partir de los valores complejos de la tensión de cada uno de los nudos de la red, dadas unas condiciones de carga determinadas.

Este cálculo se lleva a cabo para sistemas trifásicos equilibrados, empleando las ecuaciones que caracterizan los flujos de potencia y proporciona la información necesaria para conocer el estado estacionario del sistema, esto es, los valores de las tensiones en cada uno de los nudos. A diferencia de otros métodos de cálculo en los que se trabaja con ecuaciones de nudo, en los que los generadores son considerados generadores de tensión o intensidad, en el cálculo de los flujos de potencia se consideran los generadores como fuentes de potencia. Debido a la consideración de los generadores como fuentes de potencia y no tensión o intensidad el sistema de ecuaciones resultante será no lineal. El trabajar con ecuaciones no lineales implica el uso de métodos iterativos que en el mejor de los casos linealizarán el sistema para obtener más rápidamente la solución.

El problema matemático que se plantea en el conocimiento de los flujos de carga de un sistema está definido por un sistema de ecuaciones no lineales que representan, como ya se ha dicho, los intercambios de potencia entre los distintos nudos de la red. Las primeras soluciones que se dieron al problema estaban basadas en métodos numéricos de tipo Gauss. Se trataba de resoluciones trabajosas por no emplear el análisis nodal de la red. Cuando



comenzó a emplearse el análisis nodal se evolucionó hacia métodos menos laboriosos. Sin embargo, la convergencia del sistema era el mayor escollo que se encontraba ya que el tiempo de resolución era muy elevado para las aplicaciones que se empleaba. Con la intención de obtener una resolución más rápida, se introdujo la aplicación del método de Gauss-Seidel con factores de aceleración, presentando todavía una convergencia insuficiente cuando se aplicaba a redes con parámetros reales. También se emplearon otros métodos basados en la matriz de admitancia de nudo pero en aquella época, mediados de la década de 1970, su tratamiento con ordenadores requería mucha capacidad de almacenamiento. En esta misma época se comienza a desarrollar el método de Newton-Raphson que es el empleado hasta ahora debido a su facilidad de implementación con ordenadores y a su velocidad de convergencia.

1.1. Método de cálculo

A continuación se detallarán los modelos empleados para la representación de los diferentes elementos del sistema. Será la formulación de estos modelos la que pondrá de manifiesto la no linealidad de las ecuaciones resultantes. Asimismo, se clasificarán los nudos del sistema en función de las variables conocidas en cada uno de ellos.

El sistema eléctrico del que se pretenden conocer los flujos de carga será un sistema trifásico equilibrado, por lo que podrá hacerse un análisis por fase del mismo. Por otra parte, las redes eléctricas de transporte son redes malladas con multitud de nudos en los cuales se sitúan generadores y/o cargas. El modelo empleado para la caracterización de las cargas se lleva a cabo a través de una potencia aparente conocida y constante. Esta suposición es válida debido al carácter de la energía demandada por los consumidores. Se puede determinar con cierta precisión el valor de la energía consumida, por lo que puede considerarse conocida. Por otra parte, las variaciones que experimenta suelen ser lentas, por lo que no sería erróneo tomarla como constante. En cuanto a los generadores, la modelización de estos elementos vendrá dada por sus características de potencia generada o bien por la potencia activa y la tensión a la que trabajan.

Los transformadores, en el caso de que no introduzcan desfase en las tensiones, en la mayoría de los casos, podrán representarse como una impedancia en serie con la línea. Despreciándose las pérdidas en el cobre, el modelo queda reducido a una reactancia. Cuando los transformadores que se encuentran en la red disponen de cambiadores de tomas el modelo que se empleará para su representación será el de su cuadripolo equivalente. Se empleará también el modelo de cuadripolo equivalente para los transformadores cambiadores del ángulo de fase.

El modelo empleado para la representación de las líneas de transmisión será su modelo en π , que aparece representado en **Fig. 1**.

Para la constitución de un modelo matemático que relacione las magnitudes de la red es necesario construir la matriz de admitancias de nudos, que relaciona las tensiones e intensidades de un sistema mediante la expresión **Ec. 1**. La matriz de admitancias de nudos es una matriz cuadrada de $n \times n$ elementos, siendo n el número de nudos de la red. Los elementos de la diagonal (k,k) de esta matriz serán la suma de las admitancias directamente conectadas al nudo cuyo elemento de la diagonal se está considerando (k) y se denominan admitancias propias. El resto de elementos (j,k) , admitancias mutuas, son la suma algebraica (cambiada de signo) de los elementos conectados al nudo j y al k simultáneamente.

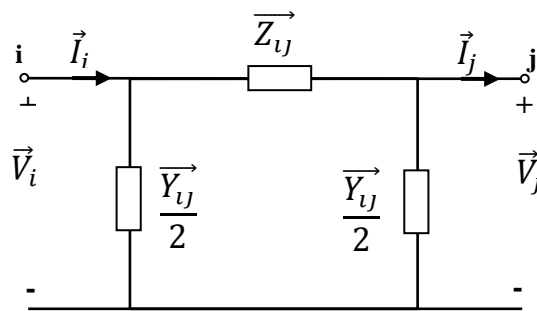


Fig. 1. Modelo en π de una línea

$$I = Y * V$$

Ec. 1

Como se ha mencionado anteriormente, el problema de flujos de potencia consiste en el cálculo de las tensiones nodales de un sistema eléctrico de potencia, trifásico y equilibrado a partir de una situación inicial determinada por las potencias demandadas y generadas en cada nudo. El balance local de estas potencias en cada nudo vendrá determinado por la transmisión de potencia de cada una de las líneas conectadas al nudo, mediante la expresión **Ec. 2**. Siendo Y_{ik} el elemento ik de la matriz de admitancias de nudos.

$$\vec{S}_l = \vec{V}_l \left(\sum_{k=1}^n \vec{Y}_{lk} * \vec{V}_k \right)^*$$

Ec. 2

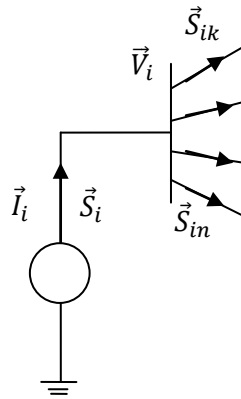


Fig. 2. Nudo genérico

El desarrollo de esta expresión y su aplicación en cada uno de los nudos de la red nos da el sistema de $2n$ ecuaciones no lineales que definen el problema de flujos de carga. Las $2n$ ecuaciones que obtenemos del desarrollo de la potencia en cada nudo corresponden a la potencia activa y reactiva del nudo n que se está considerando (Ec. 3 y Ec. 4).

$$P_i = \sum_{k=1}^n |V_i||V_k|(G_{ik}\cos\delta_{ik} + B_{ik}\sen\delta_{ik})$$

Ec. 3

$$Q_i = \sum_{k=1}^n |V_i||V_k|(G_{ik}\sen\delta_{ik} - B_{ik}\cos\delta_{ik})$$

Ec. 4

Donde n es el número de nudos de la red; V_i es la tensión en el nudo i ; V_k , la correspondiente al nudo k ; G_{ik} es la parte real del elemento que ocupa la posición i,k en la matriz de admitancias de nudo de la red; B_{ik} , la parte imaginaria de dicho elemento y δ_{ik} , la diferencia de argumentos de las tensiones de los nudos i y k .

Estas ecuaciones deberán emplearse para conocer las incógnitas, que son el conjunto de magnitudes que caracterizan el estado del sistema, los valores de módulo y argumento de cada una de las tensiones nodales.

1.2. Tipos de nudos

Con este planteamiento del sistema, a cada nudo están asociadas dos ecuaciones y cuatro magnitudes eléctricas: el módulo de la tensión, su argumento, la potencia activa en el nudo y la potencia reactiva. Atendiendo al conocimiento o no de estas magnitudes, derivado del funcionamiento del nudo en la red, se clasifican los nudos según tres tipos.

Nudos PV

Se trata de nudos de generación en los que tanto el módulo de la tensión del nudo como la potencia activa inyectada en ese nudo son magnitudes conocidas ya que dependen del generador conectado a ese nudo. Por otra parte, también es conocida la potencia activa demandada en cada uno de los nudos de la red por lo que en este tipo de nudos serán conocidas V_i y P_i , también representada como la diferencia de potencia generada en un nudo y la demandada en ese mismo nudo.

Ya que en este tipo de nudos es conocida V_i , se tiene una incógnita menos que es necesario conocer, de lo que deriva la necesidad de reducir las ecuaciones de nudo a una. Debido a la estrecha relación que existe entre los ángulos de las tensiones y la potencia de los nudos serán éstas la incógnita y la ecuación relativas a este nudo. La ecuación de la potencia reactiva Q_i , al no ser conocido su balance en el nudo no podrá ser empleada y el valor de la tensión es conocido, por lo que no es una incógnita.

Nudos PQ

Reciben esta denominación los nudos en los que se encuentra una carga o bien un pequeño generador de potencia constante y conocida. En este tipo de nudos son conocidas la potencia activa P_i y la potencia reactiva Q_i . En la práctica, la mayoría de los nudos de una red son de este tipo.

Para este tipo de nudos se emplearán las dos ecuaciones **Ec. 3** y **Ec. 4** definidas anteriormente. Las dos incógnitas a conocer en los nudos PQ son las que se definieron en un principio, la magnitud y el argumento de la tensión en ese nudo.

Nudo oscilante o slack

Si los nudos que forman el sistema fueran PQ o PV únicamente, la potencia demandada por los nudos PQ debería ser la generada por los PV más las pérdidas derivadas de la red. Puesto que las pérdidas derivadas de la explotación de la red no son conocidas hasta la resolución de los flujos de carga, se hace necesario contar con un nudo generación cuya potencia varíe según esas pérdidas. Este nudo se denomina nudo slack.

Se trata de un nudo de generación en el que la potencia activa se deja como una incógnita para que pueda variar y tomar el valor necesario para cumplir el balance de potencia activa ya que en el resto de generadores su potencia activa está definida de antemano. De forma arbitraria y por conveniencia se suele tomar como nudo slack el nudo 1. En lugar de especificarse la potencia activa en ese nudo, la variable especificada es el argumento de la tensión, tomando el valor 0 y convirtiéndose en la referencia del resto de tensiones de la red. También sirve de referencia la magnitud de



la tensión ya que se le suele asignar el valor 1, aunque no siempre. Este nudo, en la mayor parte de los casos, corresponde al de un generador de importancia o un nudo de interconexión con el exterior del sistema eléctrico.

El nudo slack, por ser conocidas las magnitudes consideradas como incógnitas al principio, no es necesario que aporte ninguna ecuación nodal más al sistema de ecuaciones a resolver. Por otra parte, no son conocidas de antemano ni la potencia activa ni la reactiva generada en el nudo por lo que no podría llevarse a cabo el balance de potencias.

El problema de flujos de carga inicial quedaba definido por $2n$ ecuaciones no lineales que se empleaban para la obtención de $2n$ incógnitas: el valor de la magnitud y el argumento de la tensión de cada nudo. Puesto que en el nudo slack son conocidas ambas magnitudes el número de ecuaciones e incógnitas se reduce a $2n-2$, ya que las ecuaciones relativas al nudo slack proporcionan los valores de la potencia en función de la magnitud y el ángulo de la tensión. De igual manera, en los nudos PV es conocida la tensión por lo que la ecuación de la potencia reactiva no será necesario emplearla. Con estas consideraciones el sistema final constará de $2n-2-n_{PV}$ incógnitas, siendo n el número de nudos de la red y n_{PV} el número de nudos PV.

1.3. Límites del sistema

La solución obtenida para el problema debe estar en consonancia con el sistema. De este modo, tanto tensiones como potencias deberán estar comprendidas entre los límites técnicos o de operación del sistema o los equipos. A continuación se comentan las restricciones a las que están sometidos los resultados obtenidos.

Tensiones nodales

El valor de la magnitud de la tensión de cada nudo debe estar comprendido entre los límites máximo y mínimo que se consideren para el correcto funcionamiento del sistema. Ya que en los nudos slack y PV el valor de la magnitud de la tensión es conocido de antemano, esta restricción solo afectará a los nudos PQ. Tras la obtención de los valores de tensión en los nudos se debe comprobar si la tensión se encuentra dentro de los márgenes óptimos. Si no fuera así deberán tomarse las medidas adecuadas en la situación inicial para que tras la resolución del flujo de carga la tensión no se encuentre fuera de esos márgenes.

También deberán estar los valores del argumento de las tensiones nodales entre unos límites. En este caso la restricción viene dada por la diferencia de argumento entre dos nudos conectados por una línea. La razón de esta restricción es que la potencia transmitida por esa línea no supere el

máximo determinado por el límite de estabilidad estática. Al igual que para la magnitud de la tensión, si se supera el límite establecido deberán modificarse los datos de partida, esto es, las cargas, para que no sean superados los límites.

Potencias de los generadores

Los límites de la potencia generada, tanto activa como reactiva, vienen impuestos por limitaciones físicas de los generadores. Las potencias activas de los generadores están definidas de antemano por tratarse de nudos PV a excepción del generador situado en el nudo slack, por ello los posibles desajustes que se produzcan se deberán a las pérdidas del sistema, desconocidas hasta la resolución del problema. Es por esta razón que solo se tienen en cuenta los límites de potencia activa una vez conocida la solución del flujo de carga. Los límites de potencia activa de un generador responden a más condiciones que las eléctricas ya que se determinan tras haber efectuado el despacho eléctrico.

Al contrario de lo que ocurriría con las limitaciones de potencia activa de los generadores y con la magnitud y ángulo de la tensión nodal, en el caso de la potencia reactiva deberá comprobarse tras cada iteración que no se han violado los límites de generación. En caso de que se hayan violado los límites en un nudo PV, se asignará como potencia generada la del límite violado, superior o inferior según sea, y el nudo pasará a ser tratado como si de un nudo PQ se tratara.

Una vez resuelto el sistema de ecuaciones, mediante los valores de tensión obtenidos, se calcularán las potencias de cada uno de los generadores así como las transmitidas por las líneas. Calculando la potencia al principio y al final de la línea podrán contabilizarse también las pérdidas en las que se incurre.

Para el cálculo de las potencias al principio y al final de la línea se tendrá en cuenta el modelo en π de ésta mostrado anteriormente (**Fig. 1**). Las expresiones de la potencia al principio y final de la línea serán:

$$P_i = Re \left[\left(\frac{\vec{V}_i - \vec{V}_j}{\vec{Z}_{ij}} + \vec{V}_i \cdot \frac{\vec{Y}_{ij}}{2} \right) \vec{V}_i \right] \quad \text{Ec. 5}$$

$$Q_i = Im \left[\left(\frac{\vec{V}_i - \vec{V}_j}{\vec{Z}_{ij}} + \vec{V}_i \cdot \frac{\vec{Y}_{ij}}{2} \right) \vec{V}_i \right] \quad \text{Ec. 6}$$



$$P_j = \text{Re} \left[\left(\frac{\vec{V}_j - \vec{V}_i}{\vec{Z}_{ij}} + \vec{V}_j \cdot \frac{\vec{Y}_{ij}}{2} \right) \vec{V}_j \right]$$

Ec. 7

$$Q_j = \text{Im} \left[\left(\frac{\vec{V}_j - \vec{V}_i}{\vec{Z}_{ij}} + \vec{V}_j \cdot \frac{\vec{Y}_{ij}}{2} \right) \vec{V}_j \right]$$

Ec. 8

Siendo V_i y V_j las tensiones complejas en los extremos de la línea y Z_{ij} e Y_{ij} los parámetros que definen la línea. Todas las potencias se consideran saliendo del nudo.

1.4. Necesidades de regulación y control

Las exigencias de convergencia demandadas a los diferentes métodos de resolución vienen impuestas por la necesidad de conocer el estado de la red en una situación determinada lo más rápidamente posible y poder actuar en ella para llegar a la situación que se desea, o lo que es lo mismo, para gestionar la red se necesita conocer con antelación y de forma rápida, cómo afectarán las decisiones que se van a tomar para tomarlas en consecuencia.

Los datos relativos al estado estacionario de los nudos y líneas de la red proporcionan la información necesaria para el correcto control del sistema, control que es necesario llevar a cabo para cumplir unas restricciones impuestas por el propio sistema o por su modo de explotación. En primera instancia se deberán garantizar la estabilidad y seguridad del sistema, teniendo prioridad sobre otras características como la calidad del suministro. En orden de prioridad, las características tenidas en cuenta para realizar el control de la red son: continuidad de suministro, valores de frecuencia y tensión eficaz adecuados, y por último conseguir una onda senoidal pura.

En cuanto a la estabilidad de la red es necesario detallar qué se entiende por un sistema estable. Un sistema eléctrico estable es aquel que mantiene las tensiones de los distintos puntos de la red dentro de unos límites, tanto en magnitud como en fase y que ante cambios en el estado puede responder a ellos de forma que retorna a su estado inicial. En este aspecto, el control del sistema tiene como objetivo mantener este en unas condiciones que garanticen su estabilidad.

En lo que respecta a la seguridad, el control debe estar orientado a mantener el sistema en unos límites que no supongan riesgo para la explotación. Uno de estos aspectos es el de garantizar que las líneas no estén sobrecargadas. Ante una sobrecarga en una línea, además de las pérdidas de potencia sufridas, están circulando por ellas corrientes que puedan implicar

altas temperaturas perjudiciales para los conductores o la aparición de efecto corona.

Asimismo, en la actualidad nos encontramos con que la mayor parte de los sistemas eléctricos constituyen una gran red interconexiónada, por lo que una falta en un punto del sistema puede repercutir a multitud de consumidores, llegando, en casos extremos, a dejar sin suministro grandes áreas y siendo necesario su aislamiento del resto del sistema. El hecho de que la mayor parte de los sistemas eléctricos estén interconexiónados presenta una clara ventaja: el aumento de la estabilidad del sistema, ya que se compensan más fácilmente los estados transitorios, pero a la vez supone la necesidad de un control más estricto, para que las faltas en un punto de la red no puedan extenderse causando graves problemas.

Por otra parte, a medida que las sociedades evolucionan, su demanda de energía incrementa y no solo eso, sino que la calidad de onda de la energía demandada tiende a ser mayor; por ejemplo, el valor de la tensión debe estar comprendido entre el $\pm 7\%$, según indica el RD 1955/2000. Como ya se ha comentado, a la tensión podemos añadir la frecuencia como magnitud que debe estar entre unos límites para una correcta explotación de sistema. También hay que destacar que tras la liberalización del mercado, y por tanto la libertad del consumidor de elegir su proveedor de energía, se genera un mercado más competitivo en el que la calidad del servicio es un aspecto importante.

Otro aspecto importante a tener en cuenta en el control es la gran importancia que han cobrado las energías renovables. En los últimos años la generación de electricidad mediante este tipo de energías ha aumentado considerablemente, siendo necesaria la construcción de nuevas líneas de transmisión para su aprovechamiento o el rediseño de las ya existentes. La inclusión de las energías renovables, por lo general, dependientes de parámetros externos como pueden ser los meteorológicos, las hace energías menos controlables en cuanto a generación y obliga a que el control deba ser más fiable.

Este conjunto de circunstancias hace que del control de los parámetros de la red un aspecto muy importante en la operación de un sistema eléctrico y el método de los flujos de carga una importante herramienta para su correcta explotación.

2. Dispositivos FACTS

En la actualidad los sistemas eléctricos de potencia están mayoritariamente controlados de forma mecánica, accionando elementos como condensadores, inductancias, transformadores con tomas, generadores o consumidores locales de potencia reactiva como motores síncronos; o variando la potencia mecánica de las turbinas empleadas y la excitación de los generadores. Se trata, excepto en algunos casos, de un control discreto y lento que solo podrá tomar los valores de las tomas que tengamos; por lo que en unos casos el valor de la magnitud a controlar será superior al deseado y en otras inferior.

Por otra parte, aunque los cálculos y las comunicaciones se hacen mediante ordenadores, implicando grandes velocidades de trabajo, los elementos finales de control y maniobra son mecánicos, lo que supone una menor velocidad de respuesta. A ello se debe añadir que los elementos mecánicos de operación, por contener partes móviles tienden a desgastarse más pronto, disminuyendo su vida útil. Todo ello lleva a que las redes eléctricas se estén explotando con este tipo de elementos gracias a los grandes márgenes con los que se trabaja y a la redundancia de equipos.

2.1. Dispositivos FACTS. Tipos

Los dispositivos FACTS, “Flexible AC Transmission Systems” o “sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna”, podrían desempeñar determinadas funciones hasta ahora realizadas por los elementos ya mencionados de una forma más rápida y fiable que permitiera un aprovechamiento óptimo de la capacidad del sistema. El símbolo que los representa es el de la **Fig. 3**.

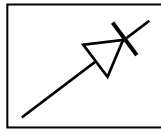


Fig. 3. Símbolo general de un controlador FACTS

Este tipo de dispositivos emplean la conmutación mediante electrónica de potencia para controlar el flujo de potencia en la red, lo que los hace actuar de forma más rápida y precisa. Pueden emplear diferentes tecnologías de conmutación, con o sin control del apagado: GTOs (Gate Turn-off Thyristor), IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor), MTOs (MOS-controlled thyristor) e IGCTs (Integrated Gate-commutated thyristor). En cuanto a la arquitectura de este tipo de elementos, la electrónica de potencia puede estar combinada con equipos convencionales: transformadores, condensadores y con elementos destinados a realizar las telecomunicaciones. Todo ello confiere al dispositivo unas mejores características para una operación coordinada y de mayor flexibilidad del sistema.

Existen gran variedad de controladores FACTS. Atendiendo a cómo están conectados a la red y el tipo de compensación que realizan se clasifican de la siguiente manera:

- **Controladores serie** (Fig. 4). Pueden ser una impedancia variable: un condensador o una reactancia o una fuente variable basada en electrónica de potencia. Los controladores serie proporcionan tensión en serie con la línea. En tanto en cuanto la tensión está en cuadratura con la corriente de la línea el dispositivo solo consume o genera potencia reactiva. Pertenecientes al grupo de los controladores en serie nos encontramos los siguientes dispositivos:
 - SSSC (Static Synchronous Series Compensator)
 - IPFC (Interline Power Flow Controller)
 - TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)
 - TSSC (Thyristor-Switched Series Capacitor)
 - TCSR (Thyristor-Controlled Series Reactor)
 - TSSR (Thyristor-Switched Series Reactor)

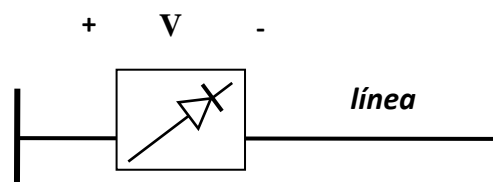


Fig. 4. Símbolo para controlador serie

- **Controladores paralelo (Fig. 5).** Como en el caso de los controladores serie, pueden estar formados por una impedancia variable. Generalmente este tipo de controladores inyectan corriente al sistema en el punto en el que están conectados. El balance de potencia activa en el controlador será nulo cuando la corriente inyectada esté en cuadratura con la tensión del punto en que se encuentra colocado el dispositivo. Este grupo engloba:
 - STATCOM (Static Synchronous Compensator)
 - SSG (Static Synchronous Generator)
 - BESS (Battery Energy Storage System)
 - SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage)
 - SVC (Static Var Compensator)
 - ICR (Thyristor Controlled Reactor)
 - TSR (Thyristor Switched Reactor)
 - TSC (Thyristor Switched Capacitor)
 - SVG (Static Var Generator or Absorber)
 - SYS (Static Var System)
 - TCBR (Thyristor Controlled Braking Resistor)

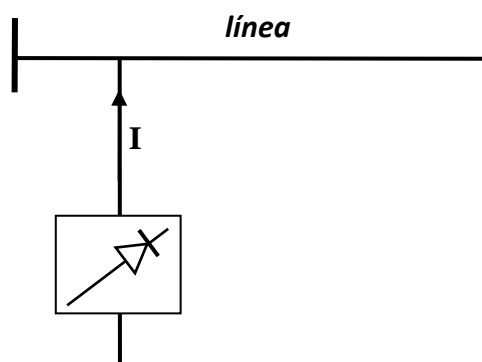


Fig. 5. Símbolo para controlador paralelo

- **Controladores combinados serie-serie.** Puede tratarse de una combinación de controladores serie separados actuando sobre líneas diferentes que son controlados de forma conjunta o un controlador serie unificado (Fig. 6). En el caso del controlador unificado cada uno de los controladores serie trabaja sobre una línea y además hay flujo de potencia activa entre ellos, lo que hace posible el control de ambas potencias, activa y reactiva, en las líneas.

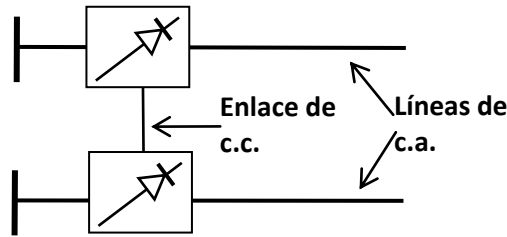


Fig. 6. Símbolo para controlador unificado serie-serie

- **Controladores combinados serie-paralelo.** Puede tratarse de la combinación de un controlador serie y uno paralelo (Fig. 7) o un controlador unificado (Fig. 8) a través del cual existe un intercambio de potencia activa. En ambos casos la parte en paralelo inyectará una corriente al sistema mientras que la que está en serie supondrá una fuente de tensión. A los controladores combinados serie-paralelo pertenecen:
 - Unified Power Flow Controller (UPFC):
 - Thyristor-Controlled Phase Shifting Transformer (TCPST)
 - Interphase Power Controller (IPC):

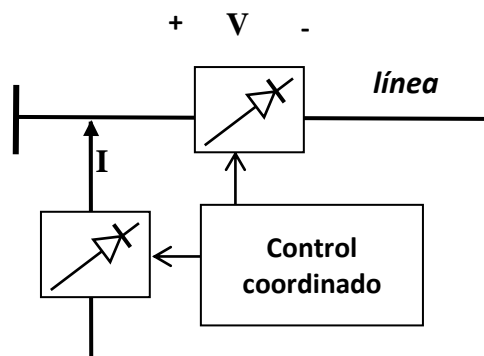


Fig. 7. Símbolo para controlador coordinado serie-paralelo

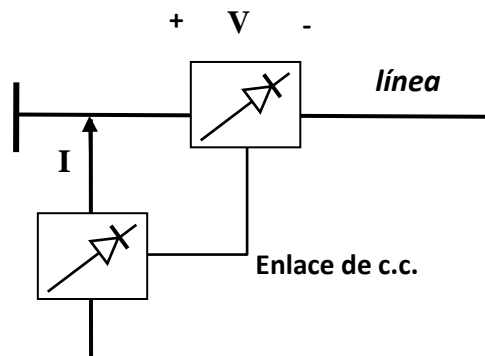


Fig. 8. Símbolo para controlador unificado serie-paralelo

2.2. Características de los dispositivos FACTS

Debido a la amplia variedad de dispositivos FACTS que existen, los beneficios que puede reportar su uso en la red son numerosos. Dependiendo del tipo de dispositivo empleado se obtendrán unos u otros. Se muestran a continuación los más significativos:

- Control de los flujos de potencia ajustándose a indicaciones económicas, de emergencia o para garantizar la situación más óptima.
- Incrementar la capacidad de carga de las líneas hasta su capacidad térmica real, consecuencia de limitar otros parámetros críticos y de distribuir la potencia de forma diferente a la normal.
- Incremento de la seguridad del sistema al minimizar el número de faltas y sus consecuencias y al aumentar los límites de seguridad.
- Mejora de las líneas.
- Reducción de la potencia reactiva por las líneas, permitiendo mayores flujos de potencia activa.
- Uso de tecnologías de generación más económicas debido a la posibilidad de líneas más eficientes económicamente.

2.3. Dispositivos STATCOM

El STATCOM (Static Synchronous Compensator) es un dispositivo FACTS que realiza el control de la red conectado en paralelo a un nudo de ésta. Su denominación, Compensador Síncrono Estático, se debe a su forma de funcionamiento.

Como se ha visto anteriormente, los dispositivos FACTS en ocasiones reciben el nombre de generador y en otras el de compensador, la diferencia entre ambos está en que el generador es un dispositivo autosuficiente que proporciona potencia aparente proporcional a una referencia, mientras que los compensadores proporcionan una potencia que varía para controlar ciertos parámetros de la red. En el caso del STATCOM, su funcionamiento es como el de los segundos, recibiendo el nombre de *Compensador*. Desde el punto de vista de la potencia reactiva generada, los STATCOM se comportan como una máquina ideal síncrona cuya potencia reactiva varía según la excitación, sin almacenamiento de ella; de ello deriva la denominación de *Síncrono*. Por último se trata de dispositivos *Estáticos* ya que no contienen partes móviles, las conmutaciones se realizan con tiristores.

2.3.1. Principios de funcionamiento.

Como ya se ha mencionado, el principio básico de funcionamiento del STATCOM es el de un generador síncrono (Fig. 9) en el que el flujo de potencia activa es nulo (Ec. 10). Cuando el flujo de potencia es puramente reactivo (Ec. 11), en las tres fases se inducen tres fuerzas electromotrices que están en fase con las correspondientes tensiones del nudo del sistema en que se encuentra. La corriente inyectada al sistema viene determinada por la fuerza electromotriz, la tensión del nudo y la impedancia equivalente del STATCOM (Ec. 9). Las expresiones Ec. 10 y Ec. 11 representan la potencia activa y reactiva del generador síncrono para el caso general en el que ninguna de las dos son nulas.

$$I = \frac{E - V}{Z} \tag{Ec. 9}$$

$$P = \frac{V \cdot E}{X} \text{sen}(\delta - \theta) \tag{Ec. 10}$$

$$Q = \frac{VE \text{cos}(\delta - \theta) - V^2}{X} \tag{Ec. 11}$$

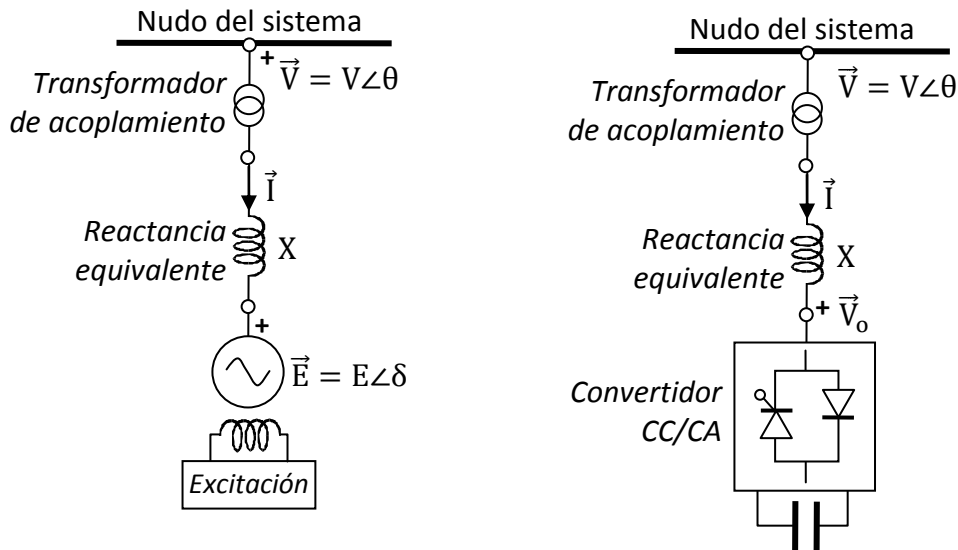


Fig. 9. Esquemas unifilares de generador síncrono y STATCOM respectivamente

Controlando la excitación de la máquina, y por tanto la amplitud de E y su relación con V, se consigue controlar la potencia reactiva inyectada. Cuando la fuerza electromotriz es inferior a la tensión del nudo el generador se comporta como una inductancia, consumiendo potencia reactiva; mientras

que si está sobre excitado, será un generador de potencia reactiva, comportándose como un condensador.

En (Fig. 9) se puede observar un esquema unifilar básico de la composición del STATCOM. Está formado por un condensador que actúa como una fuente de corriente continua y un inversor CC/CA que es el que genera una tensión trifásica senoidal de la misma frecuencia que el sistema. Internamente está compuesto por puentes de tiristores que varían en número y disposición dependiendo de las prestaciones del equipo. Las pérdidas debidas a la conmutación de los tiristores se cubren con una pequeña potencia activa absorbida de la red desfasando el ángulo de la tensión generada respecto a la nodal.

El inversor se acopla al sistema de corriente alterna a través de un transformador que es el elemento que aporta la impedancia. Esta impedancia puede variar entre $0.1 \div 0.15$ p.u. Al igual que ocurría con el generador síncrono, variando las tensiones generadas se puede controlar el flujo de potencia reactiva entre el convertidor y el sistema de corriente alterna.

La generación de la tensión a través de la conmutación hace que se inyecten armónicos a la red, lo que supone uno de los inconvenientes de este tipo de tecnología. Estos armónicos serán de orden $6n \pm 1$. A medida que la electrónica de potencia ha ido avanzando los armónicos de menor orden se han ido eliminando hasta llegar al 13º, a base de aumentar la frecuencia de conmutación.

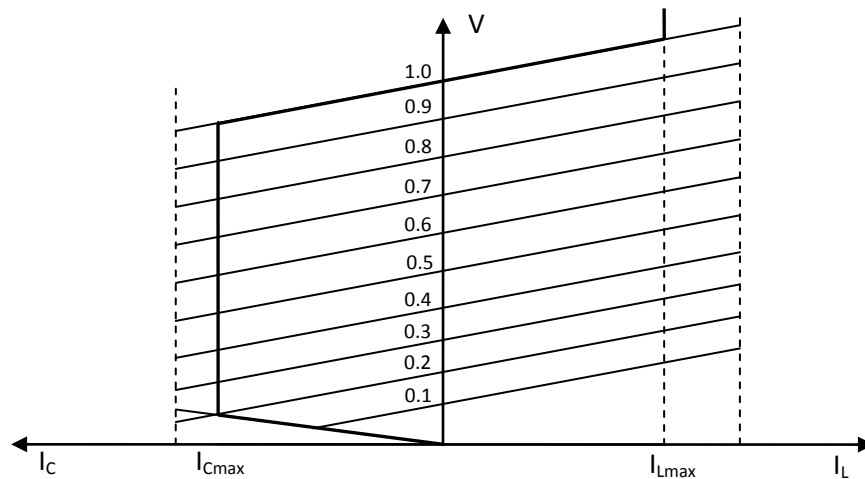


Fig. 10. Característica I-V del STATCOM

A pesar de la inyección de armónicos, los dispositivos STATCOM suponen una importante mejora en el control de la red; siendo usados para la regulación de la tensión de la línea en un punto intermedio o el final de la línea y para mejorar la estabilidad estática y dinámica. Esto en parte es



debido a sus características de corriente (**Fig. 10**), ya que el STATCOM puede trabajar en todo su rango de corrientes de salida, incluso a muy bajos voltajes. Esto se traduce en que la máxima corriente puede ser proporcionada independientemente del nivel de tensión y que la potencia aparente generada o absorbida varía linealmente con la tensión del sistema de corriente alterna. Esta característica no es común a todos los dispositivos FACTS, pudiendo algunos proporcionar la máxima corriente para la mayores tensiones únicamente. Respecto a los sistemas de compensación tradicionales, los condensadores o las inductancias, para los que la corriente de compensación es linealmente dependiente de la tensión, esta característica supone una gran ventaja.

Otra ventaja que presenta este tipo de dispositivos frente a los usados convencionalmente se deriva de su carácter estático. Por no contener partes móviles permite un control más rápido y también por esta razón el mantenimiento es menor.

2.3.2. Compensación en paralelo

Para caracterizar las ventajas de la inclusión de dispositivos STATCOM en una red se explicará a continuación, de forma general, qué supone la compensación paralelo. De esta forma, al comportarse los dispositivos STATCOM como compensadores paralelo, se podrán estimar los posibles beneficios que reporta su empleo en un sistema eléctrico.

El objetivo primero de la compensación en paralelo es inyectar o absorber potencia reactiva de manera que aumente la potencia activa que se puede transmitir por una línea. En condiciones de carga baja, el compensador consume la potencia reactiva necesaria para que no existan sobretensiones y en el caso de que la carga se alta, el compensador inyectará potencia reactiva para disminuir la subtensión.

En condiciones normales, sin compensador, podemos representar una línea idealmente a través de dos reactancias en serie (**Fig. 11a**). Con esta representación obtenemos el diagrama de fases de (**Fig. 11b**), en el que para una mayor simplificación consideramos que la magnitud de la tensión al principio y final de la línea es igual. La magnitud de la potencia de la línea se obtiene multiplicando los valores absolutos de E_m (E) e I (**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Dependiendo del ángulo de desfase entre el principio y el final de la línea la potencia variará, siendo máxima para $\pi/2$ (**Fig. 11c**).

$$P = |E_m||I| = 3E \cos \frac{\delta}{2} \frac{2V}{X} \sin \frac{\delta}{2} = 3 \frac{E^2}{X} \sin \delta$$

Ec. 12

$$Q = 3 \frac{E^2}{X} (1 - \cos \delta)$$

Ec. 13

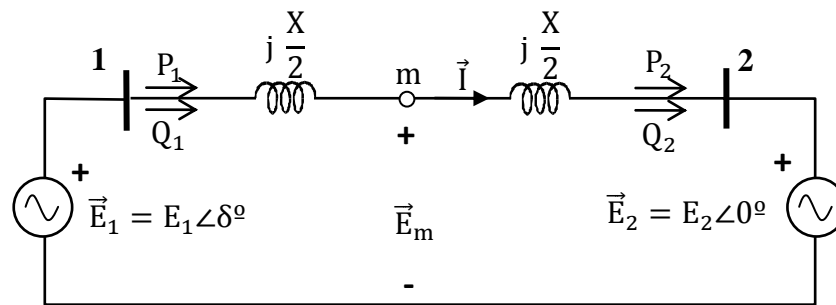


Fig. 11a Esquema unifilar

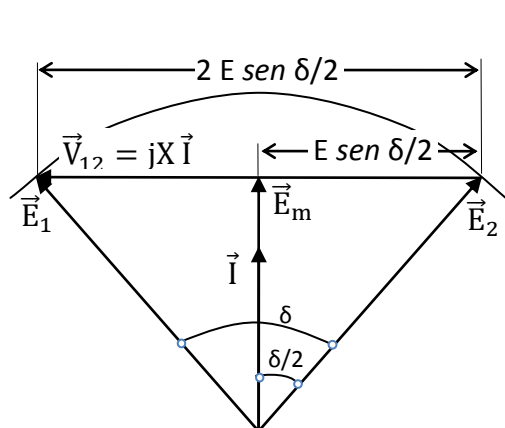


Fig. 11b Esquema fasorial

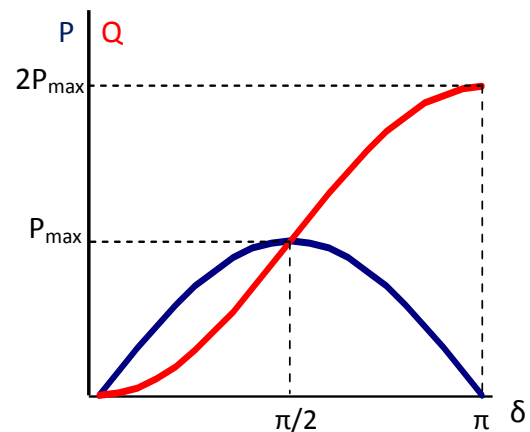


Fig. 11c Potencias en función del ángulo

Fig. 11. Flujo de potencia en una línea de transmisión

Para el estudio de la potencia de la línea con compensación se colocará en el punto medio de esta un compensador, representado por una tensión en paralelo de igual magnitud que los extremos de la línea (Fig. 12a). La potencia que es capaz de transmitir la línea se duplicará como muestra Fig. 12c siendo su valor máximo cuando el desfase entre las tensiones de los extremos de la es de 180° . La mayor transmisión de potencia a lo largo de la línea se consigue a costa de cuadruplicar la potencia reactiva transmitida por la línea.

El lugar más apropiado para colocar la compensación en paralelo es el punto medio de la línea porque es en este punto donde se produce la mayor caída de tensión. Esto divide la línea en dos partes para cada una de la cuales la potencia transmitida es igual. En caso de que la línea no estuviese dividida en partes iguales el mayor de los tramos indicaría la máxima potencia que se transmitiría por la línea.

En los sistemas radiales sin compensación, en los que al final de la línea se encuentra la carga, la tensión en el punto medio varía con la potencia demanda y con el factor de potencia de la carga. Para cargas capacitivas la tensión en el punto en que está conectada la carga tiende a ser superior a la del extremo que la alimenta y al contrario para cargas inductivas. Para solucionar los problemas de inestabilidad que esto puede producir un dispositivo STATCOM podría mantener la tensión en un valor constante al final de la línea.

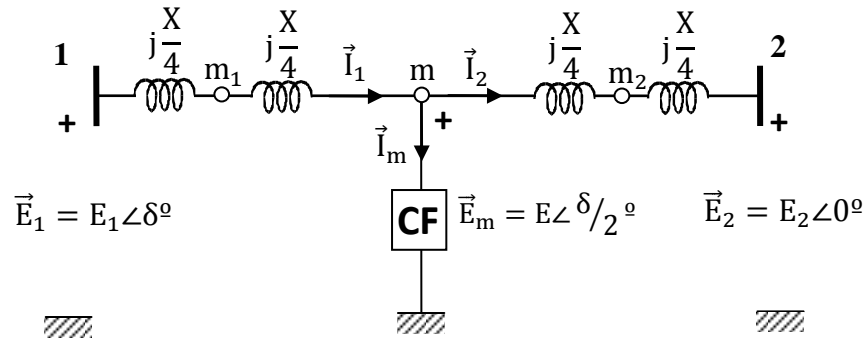


Fig. 12a Esquema unifilar

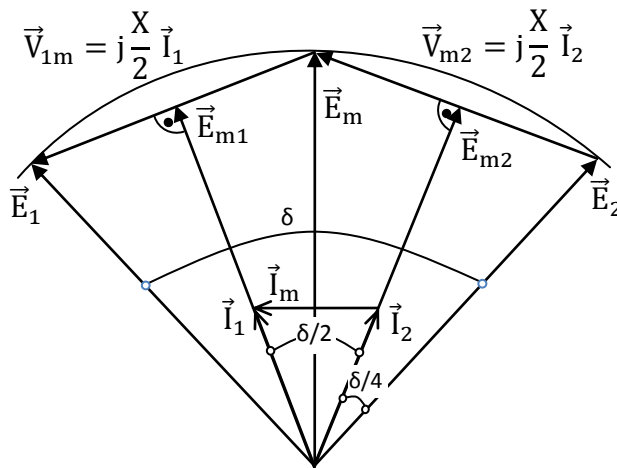


Fig. 12b Esquema fasorial

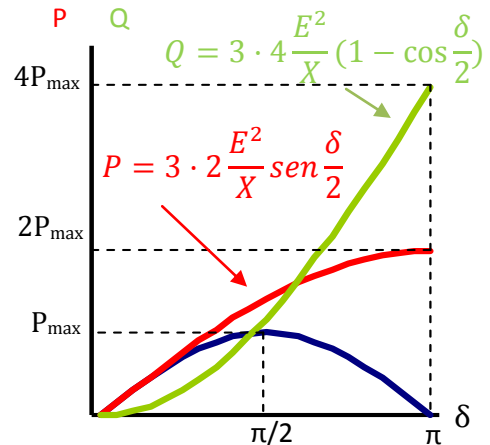


Fig. 12c Flujo de potencias

Fig. 12. Línea de trasmisión con compensación en paralelo

2.3.3. Empleo de un STATCOM en una red eléctrica real

Se presenta a continuación un ejemplo de aplicación de esta tecnología que por ser una de las primeras instalaciones realizadas se emplea con el objetivo básico de la compensación capacitiva en paralelo, regular la tensión de un nudo en situaciones de carga alta o baja.

En 1995 se instaló en la subestación de Sullivan el primer STATCOM para alta tensión de Estados Unidos. Este proyecto fue patrocinado por el Electric Power Research Institute y la Tennessee Valley Authority (TVA) y

diseñado y fabricado por Westinghouse Electric Corporation. La Tennessee Valley Authority es una agencia del gobierno federal estadounidense que se encarga de gestionar la generación y el transporte de energía eléctrica en un total de siete estados del este de Estados Unidos.

La subestación de Sullivan se localiza al noroeste Tennessee y está alimentada por líneas de 500kV y 161kV. Debido a la gran extensión de Estados Unidos, éste cuenta con un conjunto de redes ligeramente interconexiónadas para establecer el suministro eléctrico. Dentro de este sistema la subestación de Sullivan se encuentra en los límites de la red de la que la TVA es responsable por lo que su estabilidad es menor que la de otras subestaciones de la red eléctrica. Debido a la capacidad intrínseca de las líneas de 500kV, este nudo de la red se encuentra sometido a aumentos de la tensión durante las épocas de baja carga. Asimismo el nudo de 161kV se verá expuesto a subtensiones durante las situaciones de carga alta. Por ello, la subestación de Sullivan constituye un punto de la red donde tanto la compensación inductiva como la capacitiva son necesarias. El dispositivo STATCOM podría emplearse en esta situación trabajando de ambos modos.

Existían también indicios de oscilación de tensión en este punto de la red, por lo que el STATCOM podría emplearse también para paliar estas oscilaciones. De este modo el STATCOM realizaría dos funciones: la regulación de la tensión del nudo de la red en que se coloca y reducir las posibles oscilaciones en tensión.

En el día a día la función del STATCOM es regular la tensión de 161kV durante los periodos de carga alta, reduciendo el uso del transformador de tomas allí localizado que supone la mayoría de las faltas producidas. Ante el fallo de uno de los bancos de reactancias de que se disponía para regular la tensión durante los periodos de baja carga, el STATCOM realizará también esa función. Gracias al banco de condensadores que se instala conjuntamente con el STATCOM, este podrá proporcionar un rango de compensación de 100MVar reactivos y 184MVar capacitivos. Sin la inclusión de este equipo sería necesaria la instalación de un nuevo transformador o una nueva línea de 161kV.

En cuanto a las características del equipo empleado, este cuenta con un neutralizador de armónicos y las redundancias necesarias en la electrónica de potencia para proporcionar una la fiabilidad necesaria. Las características eléctricas de la instalación son las que se detallan a continuación:

- Compensación nominal: $\pm 100\text{MVar}$
- Compensación máxima: $\pm 120\text{MVar}$
- Tensión de la línea de transporte: 161kV



- Tensión de salida del dispositivo: 5.1kV
- 8 inversores de 6 pulsos
- 240 GTOs
- Rango de operación de los GTO: 4,5kV, 4kA (máxima)
- Transformador de acoplamiento: 161kV/5,1kV Δ/Y
- Condensador: 65kJ
- Tensión nominal continua: 6,6kV.

Las dimensiones del edificio que contiene el STATCOM y los equipos necesarios para el control son 27,4m x 15,2 m, una menor área que la necesaria para albergar los condensadores y reactancias convencionales. El transformador de acoplamiento se sitúa fuera de este edificio. Las válvulas asociadas a los controles se encuentran conectadas mediante fibra óptica y controladas mediante un sistema SCADA.

Consecuencia del uso del STATCOM y de la regulación de tensión que realiza, las operaciones con el transformador de tomas se redujeron considerablemente. Por otra parte, gracias a los inversores empleados, las transiciones de 100MVar se pueden llevar a cabo en unos pocos milisegundos con apenas transitorios. Frente a los tradicionales equipos de reactancias y condensadores esta característica supone una importante mejora. Diferentes pruebas realizadas que simulaban la conexión y desconexión del banco de condensadores instalado a la par del STATCOM mostraban que la tensión inyectada por el STATCOM permanecía siendo senoidal bajo condiciones de maniobra. Esto mismo ocurría cuando se abría el interruptor que conectaba las líneas de 500kV y 161kV. Debido a estas características, la instalación del STATCOM, supone una notable mejora respecto a los sistemas convencionales.

3. Modelo multifuncional de STATCOM para flujos de carga.

3.1. Modelo eléctrico

Teniendo en cuenta lo dicho en el apartado anterior es razonable que el modelo del STATCOM para el flujo de carga sea el de un generador síncrono de secuencia directa (**Fig. 13**). La fuente de tensión ($V_{ST} \angle \delta_{ST}$) representará la componente fundamental de del inversor CC/CA que forma parte del STATCOM, en la que es posible variar tanto la tensión como el ángulo de fase. En serie con el generador síncrono se encuentra una impedancia (Z_{ST}) que modelará las impedancias internas del transformador de acoplamiento a la red.

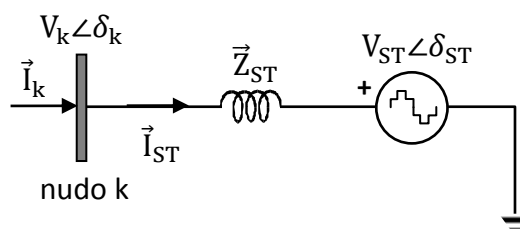


Fig. 13. Circuito equivalente para STATCOM

Debido a que el STATCOM se encuentra conectado en paralelo con un nudo k de la red, la corriente I_{ST} se puede representar según **Ec. 14**. Desarrollando la expresión para la potencia aparente (**Ec. 15**) obtenemos las expresiones de la potencia activa (**Ec. 16**) y reactiva (**Ec. 17**) que circulan del nudo al STATCOM.



$$I_{ST} = \frac{V_k - V_{ST}}{Z_{ST}}$$

Ec. 14

$$S_{ST} = V_k(V_k^* - V_{ST}^*)Y_{ST}^*$$

Ec. 15

$$P_{ST} = V_k^2 G_{ST} - V_k V_{ST} (G_{ST} \cos(\delta_k - \delta_{ST}) + B_{ST} \sin(\delta_k - \delta_{ST}))$$

Ec. 16

$$Q_{ST} = -V_k^2 B_{ST} - V_k V_{ST} (G_{ST} \sin(\delta_k - \delta_{ST}) - B_{ST} \cos(\delta_k - \delta_{ST}))$$

Ec. 17

El flujo de potencia activa es nulo por lo que para la resolución del flujo de carga será necesario especificarlo. Por otra parte Q_{ST} , la potencia reactiva absorbida por el STATCOM, podrá tomar tanto valores positivos como negativos. Cuando Q_{ST} tome valores positivos el STATCOM se comportará como una reactancia, mientras que si los valores son negativos, lo hará como un condensador.

Para el estudio de los flujos de potencia no se tendrán en cuenta los posibles armónicos generados ni los transitorios debidos a la operación del STATCOM ya que se trata de un estudio del estacionario de la red.

3.2. Modos de control

En su interacción con la red, el STATCOM modificará la tensión del nudo en el cual se encuentra, inyectando o absorbiendo potencia reactiva, lo que hará que cambien los flujos de potencia de toda la red respecto a la situación sin STATCOM. Este cambio en los flujos de potencia da lugar a los diferentes modos de control del STATCOM. Se podrán controlar las tensiones de diferentes nudos, así como la potencia transmitida por una línea o el tipo de compensación que se desea realizar. Los modos de control que aparecen a continuación no son todos los posibles ya que se podría controlar casi cualquier variable del sistema, sin embargo sí aparecen los más significativos.

1. Control de la tensión del nudo del STATCOM.

El hecho de que el STATCOM sea un generador o consumidor local de potencia reactiva hace que se pueda controlar la tensión del nudo en el que se encuentra conectado como lo podría hacer un condensador o una reactancia. Este modo puede ser empleado para compensar caídas o aumentos de tensión o para mantener estable la tensión en nudos en los que deba ser controlada estrictamente. La condición que se debe cumplir para la resolución del flujo de carga es que la tensión del nudo sea la especificada por la referencia (Ec. 18):

$$V_k - V_k^{Ref} = 0$$

Ec. 18

Siendo V_k la tensión del nudo en el que está conectado el STATCOM y V_k^{Ref} la tensión de referencia de ese nudo.

II. Control de la potencia reactiva absorbida.

En este modo de control la potencia reactiva del STATCOM es controlada para ser mantenida igual a una referencia. Se puede representar de forma matemática a través de la expresión:

$$Q_{ST} - Q_{ST}^{Ref} = 0$$

Ec. 19

Siendo Q_{ST} la potencia reactiva saliente del nudo hacia el STATCOM que viene representada por Ec. 17.

III. Control de la corriente del STATCOM. Control capacitivo.

Gracias a este control se especifica la magnitud de la corriente que circula por el STATCOM, I_{ST} . (Ec. 20) Este tipo de control nos da dos posibles soluciones, que la corriente esté adelantada respecto a la tensión del STATCOM o que esté retrasada. Cada una de las dos posibles soluciones constituye un modo de control. Primero se tratará el modo en el que la corriente está adelantada respecto a la tensión, el control capacitivo. Este control puede ser descrito matemáticamente de dos formas diferentes (Ec. 21 y Ec. 22) debido a estar trabajando con números complejos. Desarrollando la primera obtenemos la relación matemática que modela este control (Ec. 23).

$$I_{ST} = \frac{V_i - V_{ST}}{Z_{ST}}$$

Ec. 20

$$Re \left(I_{ST}^{Ref} \angle (\delta_{ST} + \pi/2) \right) = Re \left(\frac{V_i - V_{ST}}{Z_{ST}} \right)$$

Ec. 21

$$Im \left(I_{ST}^{Ref} \angle (\delta_{ST} + \pi/2) \right) = Im \left(\frac{V_i - V_{ST}}{Z_{ST}} \right)$$

Ec. 22

$$I_{ST}^{Ref} = \frac{G_{ST}(V_k \cos \delta_k - V_{ST} \cos \delta_{ST}) - B_{ST}(V_k \sin \delta_k - V_{ST} \sin \delta_{ST})}{\cos (\delta_{ST} + \pi/2)}$$

Ec. 23

IV. Control de la corriente del STATCOM. Control inductivo.

En este modo de control la corriente por el STATCOM está sujeta a ser igual a una referencia y además a ser inductiva, esto es, a estar en retraso respecto a V_{ST} . Análogamente al modo anterior obtenemos dos posibles



representaciones de la restricción, **Ec. 24** y **Ec. 25**, resultando **Ec. 26** del desarrollo matemático de la primera de ellas.

$$\operatorname{Re}\left(I_{ST}^{Ref} \angle(\delta_{ST} - \pi/2)\right) = \operatorname{Re}\left(\frac{V_i - V_{ST}}{Z_{ST}}\right) \quad \text{Ec. 24}$$

$$\operatorname{Im}\left(I_{ST}^{Ref} \angle(\delta_{ST} - \pi/2)\right) = \operatorname{Im}\left(\frac{V_i - V_{ST}}{Z_{ST}}\right) \quad \text{Ec. 25}$$

$$I_{ST}^{Ref} = \frac{G_{ST}(V_k \cos \delta_k - V_{ST} \cos \delta_{ST}) - B_{ST}(V_k \sin \delta_k - V_{ST} \sin \delta_{ST})}{\cos(\delta_{ST} - \pi/2)} \quad \text{Ec. 26}$$

V. Control de la tensión equivalente del STATCOM.

A diferencia de otros modos, en los que se fija un parámetro de la red y la tensión del STATCOM se calcula para hacer que el flujo de potencia cumpla la condición impuesta; este modo fija V_{ST} . Fijando V_{ST} el flujo de potencia cambia debido a la potencia del STATCOM, función de V_{ST} . Se puede expresar de forma matemática del siguiente modo (**Ec. 27**):

$$V_{ST} - V_{ST}^{Ref} = 0 \quad \text{Ec. 27}$$

VI. Control de la tensión de un nudo remoto.

Este modo de control consiste en hacer coincidir la tensión de un nudo remoto de la red con una tensión de referencia. Por nudo remoto se entiende cualquiera de los nudos de la red a excepción del nudo en que se sitúa el STATCOM. La condición matemática que representa este control es la que se observa en **Ec. 28**.

$$V_j - V_j^{Ref} = 0 \quad \text{Ec. 28}$$

V_j representa la tensión de un nudo distinto al del STATCOM.

VII. Control de la potencia reactiva por una línea

Ya sea mencionado anteriormente que la inclusión de STATCOM modifica los flujos de potencia de toda la red, no solo los de las líneas adyacentes. Con este modo se pretende que la potencia reactiva que circule por una de las líneas sea fijada. Para ello se debe cumplir la siguiente relación (**Ec. 29**):

$$Q_{ij} - Q_{ij}^{Ref} = 0 \quad \text{Ec. 29}$$

Siendo Q_{ij} la potencia reactiva que circula por la línea que tiene como inicio el nudo i y como final el j . Ya que existen pérdidas en las líneas la potencia al inicio de la línea y al final es diferente por lo que se la potencia reactiva que se controlará será la del inicio de la línea. Teniendo en cuenta el modelo en π (Fig. 14) de la línea, la potencia saliente del inicio de la línea se puede escribir según Ec. 30.

$$Q_{ij} = -V_i^2 \left(B'_{ij} + \frac{B_{ij}}{2} \right) + G'_{ij} V_i V_j \text{sen}(\delta_j - \delta_i) + B'_{ij} V_i V_j \text{cos}(\delta_i - \delta_j) \quad \text{Ec. 30}$$

$$Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$$

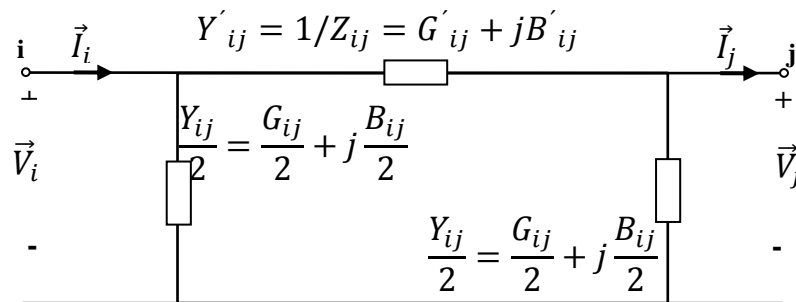


Fig. 14. Modelo en π de una línea

VIII. Control de la potencia activa por una línea

Este modo controla la transferencia de potencia activa a través de una línea adyacente o no al nudo en que se encuentra el dispositivo. La relación se puede modelar a través de la expresión (Ec. 31):

$$P_{ij} - P_{ij}^{Ref} = 0 \quad \text{Ec. 31}$$

Siendo P_{ij} la potencia activa de la línea que comienza en el nudo i y termina en el j . En este caso sucede lo que ya sucedía en el caso anterior, es necesario especificar sobre qué potencia se desea realizar el control. Ya que en el modo anterior el control se realiza sobre la potencia saliente del nudo inicial, se seguirá ahora el mismo criterio. Según el modelo en π de la línea la potencia activa al inicio de ésta es Ec. 32:

$$P_{ij} = V_i^2 \left(G'_{ij} + \frac{G_{ij}}{2} \right) + B'_{ij} V_i V_j \text{sen}(\delta_j - \delta_i) - G'_{ij} V_i V_j \text{cos}(\delta_j - \delta_i) \quad \text{Ec. 32}$$

De forma general se pueden resumir las condiciones Ec. 18, Ec. 19, Ec. 23, Ec. 26, Ec. 27, Ec. 28, Ec. 29, Ec. 30 y Ec. 31 con la siguiente expresión:

$$W_i - W_i^{Ref} = 0 \quad \text{Ec. 33}$$

Siendo W_i la condición dependiente del modo de control del STATCOM i .

4. Implementación del modelo en el análisis de flujos de carga mediante Newton Raphson

Para estudiar la influencia de estos dispositivos en los flujos de carga se ha creado una aplicación en Matlab que resuelve un flujo de carga empleando el método de Newton-Raphson. Para ello, se ha programado de tal forma que la resolución de Newton-Raphson incluya las nuevas condiciones relativas al modo de control del STSTCOM (**Ec. 18, Ec. 19, Ec. 23, Ec. 26, Ec. 27, Ec. 28, Ec. 29, Ec. 30 y Ec. 31**), así como la condición de potencia activa (**Ec. 16**) nula. Con objeto de facilitar tanto la entrada de datos a la aplicación como la visualización de los resultados se ha creado también una interface gráfica.

4.1. Planteamiento para la resolución de flujos de carga con Newton Raphson

El método de Newton-Raphson se emplea para la resolución de flujos de carga a gran escala debido a sus características de convergencia. Este tipo de resoluciones presenta una velocidad de convergencia cuadrática, esto es, el orden del error cometido disminuye a la mitad en cada iteración.

De forma general la resolución mediante Newton-Raphson parte de un sistema de ecuaciones no lineales que se pueden escribir como (**Ec. 34**). La solución que se obtiene deriva de la linealización de ese sistema a través de sus series de Taylor de primer orden (**Ec. 35**), por lo que será una aproximación de la solución y no la solución exacta. Para la obtención de una solución mejor se deberá iterar.



La expresión **Ec. 36** muestra de forma general la forma de obtención de las soluciones en cada iteración. El primer término constituye los valores de las funciones que componen el sistema en la iteración i , el segundo término es el valor de esas funciones en la iteración anterior, la matriz tras el segundo término es la matriz Jacobiana de sistema en la que se han sustituido las variables por los valores obtenidos para ellas en la iteración anterior y finalmente, el último término constituye el vector de variables de estado.

En realidad, lo que interesa conocer es X , el vector de variables de estado; por ello es necesario despejarlo. **Ec. 37** muestra en notación compacta el valor que tomaría dicho vector en cada iteración. En esta expresión se ha despreciado el término $F(X^{(i)})$ ya que en cada iteración se busca que ese término se aproxime más a cero.

La aproximación que obtenemos para X se toma como referencia en la siguiente iteración y se vuelve a calcular otra aproximación de la solución. El proceso iterativo continúa hasta que el sistema de ecuaciones se aproxima a cero con una tolerancia que es considerada como suficiente. En el empleo de este tipo de método para la resolución de flujos de carga, esta tolerancia suele tomar el valor de 10^{-12} .

$$\left. \begin{aligned} f_1(x_1, \dots, x_n) &= 0, \\ &\vdots \\ f_n(x_1, \dots, x_n) &= 0, \end{aligned} \right\} \text{o } F(X) = 0$$

Ec. 34

$$F(X) \approx F(X^{(0)}) + J(X^{(0)})(X - X^{(0)})$$

Ec. 35

$$\underbrace{\begin{bmatrix} f_1(X^{(i)}) \\ \vdots \\ f_n(X^{(i)}) \end{bmatrix}}_{F(X^{(i)})} \approx \underbrace{\begin{bmatrix} f_1(X^{(i-1)}) \\ \vdots \\ f_n(X^{(i-1)}) \end{bmatrix}}_{F(X^{(i-1)})} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(X)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1(X)}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(X)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n(X)}{\partial x_n} \end{bmatrix}}_{J(X^{(i-1)})} \Big|_{X=X^{(i-1)}} \underbrace{\begin{bmatrix} x_1^{(i)} - x_1^{(i-1)} \\ \vdots \\ x_n^{(i)} - x_n^{(i-1)} \end{bmatrix}}_{X^i - X^{(i-1)}}$$

Ec. 36

$$X^{(i)} = X^{(i-1)} - J^{-1}(X^{(i-1)})F(X^{(i-1)})$$

Ec. 37

En la resolución de flujos de carga las variables de estado son las tensiones de los diferentes nudos de la red, tanto la magnitud como el ángulo, ya que a partir de ellas conoceremos los flujos de potencia. Por ello, en una red de n nudos tendremos inicialmente un sistema de $2n$ incógnitas, alguna de las cuales son conocidas, dependiendo del tipo de nudo, como ya se explicó anteriormente.

Las $2n$ funciones que relacionan las variables de estado (la solución dada al hecho de que haya más funciones que incógnitas se explica más adelante) son los balances de potencia activa y reactiva en cada uno de los nudos de la red. La potencia neta, generada o demandada en un nudo de la red debe ser igual a la suma de los flujos de potencia que salen de ese nudo, o lo que es lo mismo, la potencia neta en un nudo menos la suma de las potencias salientes del nudo debe ser cero. Estos flujos de potencia variarán con cada iteración siendo las potencias demandadas y generadas constantes. Los balances de potencia en cada nudo constituyen las funciones que antes se representaban mediante **Ec. 34** y que ahora modelan las expresiones **Ec. 38** y **Ec. 39**.

$$P_i^{Neta} - P_i = 0 \quad \text{Ec. 38}$$

$$Q_i^{Neta} - Q_i = 0 \quad \text{Ec. 39}$$

Siendo P_i^{Neta} y Q_i^{Neta} las potencias netas activa y reactiva demandadas o generadas en el nudo i de la red respectivamente. Y P_i y Q_i las potencias activa y reactiva salientes en cada nudo de la red (**Ec. 40** y **Ec. 41**).

$$P_i = \sum_{k=1}^n |V_i||V_k|(G_{ik}\cos\delta_{ik} + B_{ik}\sen\delta_{ik}) \quad \text{Ec. 40}$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^n |V_i||V_k|(G_{ik}\sen\delta_{ik} - B_{ik}\cos\delta_{ik}) \quad \text{Ec. 41}$$

Donde n es el número de nudos de la red; V_i es la tensión en el nudo i ; V_k , la correspondiente al nudo k ; G_{ik} es la parte real del elemento que ocupa la posición i,k en la matriz de admitancias de nudo de la red; B_{ik} , la parte imaginaria de dicho elemento y δ_{ik} , la diferencia de argumentos de las tensiones de los nudos i y k .

Derivando las expresiones **Ec. 38** y **Ec. 39** respecto a $V_1 \dots V_n$, y $\delta_1 \dots \delta_n$ obtenemos la matriz Jacobiana del sistema (**Ec. 43**). Tanto **Ec. 38** como **Ec. 39** contienen un término constante, por lo que solo será necesario derivar los otros términos, **Ec. 41** y **Ec. 40**. Para la resolución de flujos de carga y simplificar las expresiones, los términos de la matriz Jacobiana que son consecuencia de derivar respecto a una tensión van multiplicados por esa tensión.

La matriz Jacobiana se puede descomponer en cuatro submatrices de $n \times n$ elementos, H , N , M y L , donde:



$$H_{ik} = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_k} \quad N_{ik} = \frac{\partial P_i}{\partial V_k} V_k \quad M_{ik} = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_k} \quad L_{ik} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_k} V_k$$

Ec. 42

Como se puede ver en la matriz Jacobiana (**Ec. 43**), están colocadas de derecha a izquierda y de arriba abajo.

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_n} V_n \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial V_n} V_n \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_n} V_n \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} V_n \end{pmatrix}$$

Ec. 43

El valor que toman cada uno de los términos de la Jacobiana es el que se detalla a continuación.

Para $i \neq k$	
$H_{ik} = L_{ik} = V_i V_k (G_{ik} \text{sen} \delta_{ik} - B_{ik} \text{cos} \delta_{ik})$ $N_{ik} = -M_{ik} = V_i V_k (G_{ik} \text{cos} \delta_{ik} + B_{ik} \text{sen} \delta_{ik})$	
Para $i = k$	
$H_{ii} = -Q_i^r - V_i^2 B_{ii}$	$N_{ii} = P_i^r + V_i^2 G_{ii}$
$M_{ii} = P_i^r - V_i^2 G_{ii}$	$L_{ii} = Q_i^r - V_i^2 B_{ii}$

Ec. 44

La forma de constitución de la Jacobiana determina la forma del vector de variables de estado, en el que los primeros elementos corresponden a los ángulos y los últimos a las magnitudes. La formulación que nos da el valor de cada variable de estado en cada iteración es la siguiente (**Ec. 45** y **Ec. 46**)

$$\begin{pmatrix} \Delta \delta_1 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \Delta V_1 / V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_n / V_n \end{pmatrix}^{(i)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_n} V_n \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial V_n} V_n \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_n} V_n \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} V_n \end{pmatrix}^{-1(i-1)} \begin{pmatrix} P_1^{Neta} - P_1 \\ \vdots \\ P_n^{Neta} - P_n \\ Q_1^{Neta} - Q_1 \\ \vdots \\ Q_n^{Neta} - Q_n \end{pmatrix}^{(i-1)}$$

Ec. 45

$$\begin{pmatrix} \delta_1 \\ \vdots \\ \delta_n \\ V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{pmatrix}^{(i)} = \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \vdots \\ \delta_n \\ V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{pmatrix}^{(i-1)} + \begin{pmatrix} \Delta\delta_1 \\ \vdots \\ \Delta\delta_n \\ \Delta V_1/V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_n/V_n \end{pmatrix}^{(i)} \quad (1 \quad \dots \quad 1 \quad V_1 \quad \dots \quad V_n)$$

Ec. 46

Gracias a la primera expresión obtenemos las variaciones en las variables de estado que se producen en cada iteración. Estos incrementos hay que sumárselos a los valores de la iteración anterior con las correcciones necesarias. Estas correcciones se deben a haber multiplicado ciertos términos de la Jacobiana por la tensión nodal para simplificarla.

El número de iteraciones que se realizarán viene marcado por el último término de **Ec. 45**. Cuando este término sea menor a la tolerancia deseada el valor de las variables de estado será el que buscamos.

4.2. Procedimiento para la resolución de flujos de carga con Newton Raphson

En este apartado se describe la forma de llevar a cabo la resolución de flujos de carga, detallando las operaciones que son necesarias llevar a cabo tanto antes del proceso iterativo, como una vez terminado éste.

El primer paso que es necesario llevar a cabo es la construcción de la matriz de admitancias de nudos. Esta matriz no cambiará durante el proceso iterativo ya que solo depende de la topología de la red, por esta razón se calculará en un paso previo. Antes de comenzar el proceso iterativo se debe calcular el valor de otras magnitudes que permanecen constantes como son las potencias netas en cada nudo. El valor de la potencia neta es la diferencia entre la potencia generada y la demandada en cada nudo. Este término constituye la parte constante de las ecuaciones nodales del sistema. La parte variable la constituye el sumatorio de las potencias debidas a las líneas en un nudo. La primera iteración de la parte variable de estas ecuaciones se calcula a continuación a través de las expresiones **Ec. 40** y **Ec. 41** y no se incluirá en el proceso iterativo.

En la primera iteración no es necesario pero en sucesivas iteraciones será necesario comprobar que las potencias reactivas asociadas a los generadores no se han violado. La potencia reactiva que debe suministrar el generador será la suma de la potencia recién calculada y la demandada por las cargas. En caso de que la potencia calculada para un generador no se encuentre dentro de los límites se le asignará el valor del límite que se ha violado y el nudo en que se encuentra pasará a ser PQ en lugar de PV. Al contarse con un nudo PQ más deberán calcularse de nuevo las potencias



netas en cada nudo. Hecho lo cual, se podrán calcular las diferencias entre las potencias calculadas y las netas de cada nudo. Estos valores corresponden al último término de **Ec. 45**.

Para obtener el incremento en las variables de estado se necesita la inversa de la matriz Jacobiana por lo que el siguiente paso es la constitución de la matriz Jacobiana, siguiendo las fórmulas de **Ec. 44**. Un paso importante en este método de cálculo es la modificación de la matriz Jacobiana dependiendo del tipo de nudos que se trate. Y es que es esta operación la que da solución al hecho de que se tienen más ecuaciones en el sistema que incógnitas. En ciertas formulaciones este hecho se solventa construyendo una matriz Jacobiana de un tamaño adecuado al número de incógnitas, pero en este caso se ha preferido continuar con la matriz inicial y modificarla para generalizar el método para cualquier red o incluso si durante el proceso iterativo se viola algún límite de generación.

A continuación se detalla cada uno de los cambios que es necesario realizar. Ya que conocemos los valores de tensión y ángulo del *nudo slack*, las ecuaciones relativas a este nudo no se emplearán, esto se traduce en que en la Jacobiana los elementos de las columnas y filas relativas a este nudo serán todos ceros a excepción de los elementos que ocupen la diagonal que tomarán el valor 1 para que la matriz se pueda invertir. De este modo estos valores no influirán en el cálculo de las variables de estado. Al incluir el 1 en la diagonal no lo debemos tener en cuenta al multiplicar la Jacobiana por la diferencia entre las potencias netas y las debidas a los flujos de potencia en esa iteración, por lo que deberá ser eliminado este resultado a posteriori. Cuando se trata de un *nudo PV*, lo conocido es la magnitud de la tensión y la ecuación que no tenemos en cuenta para el sistema es la de la reactiva. En este caso se eliminará la columna relativa a la tensión de ese nudo y la fila correspondiente a su potencia reactiva. También será necesario no tener en cuenta el nuevo valor obtenido para la tensión conocida. En los casos en los que se excede la potencia de un generador tras una iteración y se fije su potencia al límite, estos nudos dejarán de ser *nudos PV* para pasar a ser *nudos PQ*. En la siguiente imagen (**Fig. 15**) se muestra un ejemplo de matriz Jacobiana de una red de 5 nudos en la que el nudo 1 es *slack* y el 3 *PV*.

Una vez constituida la matriz Jacobiana pueden obtenerse las variaciones en las variables de estado. Estas variaciones han de sumarse a los valores existentes para obtener el nuevo valor de las variables de estado.

Con los nuevos valores de las variables de estado se calcularán las nuevas potencias en cada nudo. Comparando las potencias calculadas y las netas se decidirá si se realiza una nueva iteración. En caso de que sea necesario volver a iterar se comenzará comprobando los límites de los generadores. En caso de que se haya llegado a la solución del sistema en esa

iteración, se calcularán los flujos de potencia, las pérdidas y las potencias que es necesario que aporten los generadores.

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	H_{22}	H_{23}	H_{24}	H_{25}	0	N_{22}	0	N_{24}	N_{25}	
0	H_{32}	H_{33}	H_{34}	H_{35}	0	N_{32}	0	N_{34}	N_{35}	
0	H_{42}	H_{43}	H_{44}	H_{45}	0	N_{42}	0	N_{44}	N_{45}	
0	H_{52}	H_{53}	H_{54}	H_{55}	0	N_{52}	0	N_{54}	N_{55}	
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	M_{22}	M_{23}	M_{24}	M_{25}	0	L_{22}	0	L_{24}	L_{25}	
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	M_{42}	M_{43}	M_{44}	M_{45}	0	L_{42}	0	L_{44}	L_{45}	
0	M_{52}	M_{53}	M_{54}	M_{55}	0	L_{52}	0	L_{54}	L_{55}	

Fig. 15. Matriz Jacobiana modificada

Teniendo en cuenta las consideraciones mencionadas se puede programar el método de resolución de flujos de carga mediante Newton-Raphson. El diagrama de flujo de dicha programación es el mostrado en Fig. 16. En él se aprecian cada uno de los pasos que hasta ahora se han detallado.

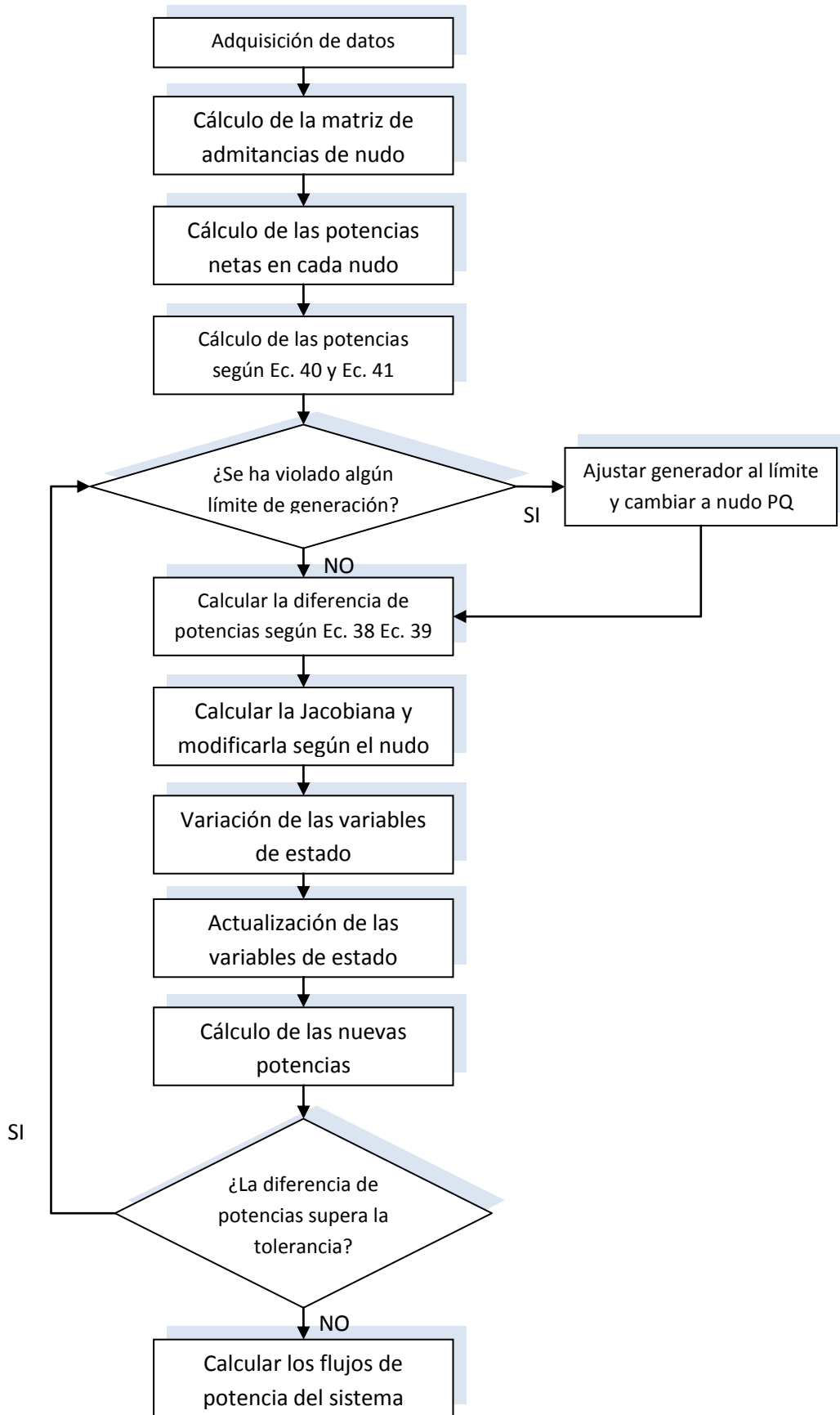


Fig. 16 Diagrama de flujo para Newton-Raphson

4.3. Inclusión de dispositivos STATCOM en el método de Newton-Raphson

El modo de resolución del flujo de potencia es el mismo para tanto para la red sin STATCOM como para la red con él. Sin embargo, las acciones llevadas a cabo para la resolución del flujo de carga con STATCOM son más complejas por el hecho de incluir un nuevo elemento.

El nuevo elemento añadido aumentará la complejidad del sistema de ecuaciones a resolver, añadiendo dos nuevas condiciones a las ya impuestas por **Ec. 38** y **Ec. 39**, relativas a la potencia en cada nudo. Una de estas dos nuevas condiciones es la de no inyección de potencia activa (**Ec. 16**) a la red y la otra vendrá impuesta por el modo de control, será una de las indicadas anteriormente (**Ec. 18, Ec. 19, Ec. 23, Ec. 26, Ec. 27, Ec. 28, Ec. 29** o **Ec. 31**). Por tanto, el sistema de ecuaciones para la inclusión del STATCOM es ahora (**Ec. 47**):

$$\left. \begin{array}{l} P_i^{Neta} - P_i = 0 \\ \vdots \\ P_n^{Neta} - P_n = 0 \\ Q_n^{Neta} - Q_n = 0 \\ \vdots \\ Q_n^{Neta} - Q_n = 0 \\ P_{STi} \\ \vdots \\ P_{STn} \\ W_i - W_i^{Ref} \\ \vdots \\ W_n - W_n^{Ref} \end{array} \right\}$$

Ec. 47

Ahora las potencias P_i y Q_i de cada nudo comprenderán también las potencias que salen del nudo hacia el STATCOM P_{ST} y Q_{ST} ya que varían en cada iteración. Al no conocerse de antemano la potencia que va a generar se trata como se trataba anteriormente las líneas. En uno de los modos de control sí se conoce la potencia que aporta a la red pero aun así se tratará como una línea y no una carga, esto es, incluyendo su potencia en la parte a calcular del balance de potencias y no en las potencias especificadas o netas.

Con la inclusión de dos nuevas condiciones se deben incluir también dos nuevas variables de estado. Las nuevas variables de estado son la tensión del STATCOM y su ángulo, V_{ST} y δ_{ST} . Las variables de estado serán las mismas independientemente del modo de control con el que se trabaje, de hecho, estos valores son los estrictamente necesarios para conocer la potencia reactiva inyectada a la red y por tanto los nuevos flujos de potencia.



Consecuencia de aumentar la dimensión del vector de variables de estado, aumentará también la de la matriz Jacobiana. Por cada STATCOM que se añade al flujo de potencia la dimensión de la Jacobiana aumentará dos unidades. Se añadirán dos columnas nuevas por cada STATCOM, una por cada variable de estado y dos nuevas filas, una por cada condición (condición de no transferencia de potencia activa y la condición dependiente del modo de control).

La nueva matriz Jacobiana tendrá una forma como **Ec. 48**.

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_n} V_n & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{ST1}} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_{STn}} & \frac{\partial P_1}{\partial V_{ST1}} V_{ST1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_{STn}} V_{STn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial V_n} V_n & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_{ST1}} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_{STn}} & \frac{\partial P_n}{\partial V_{ST1}} V_{ST1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial V_{STn}} V_{STn} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_n} V_n & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_{ST1}} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_{STn}} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_{ST1}} V_{ST1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_{STn}} V_{STn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} V_n & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_{ST1}} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_{STn}} & \frac{\partial Q_n}{\partial V_{ST1}} V_{ST1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial V_{STn}} V_{STn} \\ \frac{\partial P_{ST1}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_{ST1}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_{ST1}}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial P_{ST1}}{\partial V_n} V_n & \frac{\partial P_{ST1}}{\partial \delta_{ST1}} & \dots & \frac{\partial P_{ST1}}{\partial \delta_{STn}} & \frac{\partial P_{ST1}}{\partial V_{ST1}} V_{ST1} & \dots & \frac{\partial P_{ST1}}{\partial V_{STn}} V_{STn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_{STn}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_{STn}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_{STn}}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial P_{STn}}{\partial V_n} V_n & \frac{\partial P_{STn}}{\partial \delta_{ST1}} & \dots & \frac{\partial P_{STn}}{\partial \delta_{STn}} & \frac{\partial P_{STn}}{\partial V_{ST1}} V_{ST1} & \dots & \frac{\partial P_{STn}}{\partial V_{STn}} V_{STn} \\ \frac{\partial W_{ST1}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial W_{ST1}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial W_{ST1}}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial W_{ST1}}{\partial V_n} V_n & \frac{\partial W_{ST1}}{\partial \delta_{ST1}} & \dots & \frac{\partial W_{ST1}}{\partial \delta_{STn}} & \frac{\partial W_{ST1}}{\partial V_{ST1}} V_{ST1} & \dots & \frac{\partial W_{ST1}}{\partial V_{STn}} V_{STn} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial W_{STn}}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial W_{STn}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial W_{STn}}{\partial V_1} V_1 & \dots & \frac{\partial W_{STn}}{\partial V_n} V_n & \frac{\partial W_{STn}}{\partial \delta_{ST1}} & \dots & \frac{\partial W_{STn}}{\partial \delta_{STn}} & \frac{\partial W_{STn}}{\partial V_{ST1}} V_{ST1} & \dots & \frac{\partial W_{STn}}{\partial V_{STn}} V_{STn} \end{pmatrix}$$

Ec. 48

En este caso el rango de J (**Ec. 48**) es $2(n+m)$, siendo n el número de nudos de la red y m el número de STATCOM. Al igual que en la matriz Jacobiana original existían cuatro submatrices, en la nueva matriz Jacobiana se pueden distinguir 16 submatrices que se definen de una forma similar a como se definieron anteriormente H, N, M y L, de hecho, estas cuatro matrices también forman parte de la nueva matriz Jacobiana. El resto de matrices que componen J (**Ec. 48**) son:

$$\begin{aligned} A_{ik} &= \frac{\partial P_i}{\partial \delta_{STk}} & B_{ik} &= \frac{\partial P_i}{\partial V_{STk}} V_{STk} & C_{ik} &= \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_{STk}} & D_{ik} &= \frac{\partial Q_i}{\partial V_{STk}} V_{STk} \\ E_{ik} &= \frac{\partial P_{STi}}{\partial \delta_k} & F_{ik} &= \frac{\partial P_{STi}}{\partial V_k} V_k & G_{ik} &= \frac{\partial Q_{STi}}{\partial \delta_k} & P_{ik} &= \frac{\partial Q_{STi}}{\partial V_k} V_k \\ Q_{ik} &= \frac{\partial P_{STi}}{\partial \delta_{STk}} & R_{ik} &= \frac{\partial P_{STi}}{\partial V_{STk}} V_{STk} & S_{ik} &= \frac{\partial Q_{STi}}{\partial \delta_{STk}} & T_{ik} &= \frac{\partial Q_{STi}}{\partial V_{STk}} V_{STk} \end{aligned}$$

Ec. 49

Las nuevas matrices que componen la matriz Jacobiana se obtienen de derivar las ecuaciones de potencia de nudo, la de potencia activa del STATCOM y la de la condición de modo respecto de las variables de estado. Ya que la última fila de matrices es la que alberga la condición relativa al modo de control cambiará dependiendo de éste, manteniéndose el resto de la matriz Jacobiana independientemente del modo.

Las matrices H, N, M y L, que conforman ahora la matriz Jacobiana son ligeramente diferentes a las que la formaban antes. Esto es consecuencia de que P_i y Q_i , son la suma de las potencias salientes del nudo, tanto las de las líneas como las del STATCOM. Consecuencia de que las potencias del STATCOM solo se ven afectadas por las variables de estado del nudo en que se encuentra y las propias, los cambios en las matrices existentes: H, N, M y L, serán mínimos. Los elementos de las matrices existentes que se ven afectados son los elementos que perteneciendo a la diagonal de cada una de estas matrices, albergan la derivada de la potencia de un nudo en el que hay un dispositivo STATCOM.

Se muestra a continuación un resumen de los valores que toman las diferentes matrices que componen la Jacobiana y que se mantienen en todos los modos. Para el caso de las matrices H, N, M y L se muestran solo los elementos que cambian y para el resto de matrices los elementos no nulos, es decir, los relativos al STATCOM.

$$H_{ii} = H_{ii}^0 - V_i V_{ST} (G_{ST} \sin \delta_{iST} - B_{ST} \cos \delta_{iST}) \quad \text{Ec. 50}$$

$$N_{ii} = N_{ii}^0 - 2V_i^2 G_{ST} + V_i V_{ST} (G_{ST} \cos \delta_{iST} + B_{ST} \sin \delta_{iST}) \quad \text{Ec. 51}$$

$$M_{ii} = M_{ii}^0 + V_i V_{ST} (G_{ST} \cos \delta_{iST} + B_{ST} \sin \delta_{iST}) \quad \text{Ec. 52}$$

$$L_{ii} = L_{ii}^0 + 2V_i^2 B_{ST} + V_i V_{ST} (G_{ST} \sin \delta_{iST} - B_{ST} \cos \delta_{iST}) \quad \text{Ec. 53}$$

$$A_{i,ST} = D_{i,ST} = V_i V_{ST} (G_{ST} \sin \delta_{iST} - B_{ST} \cos \delta_{iST}) \quad \text{Ec. 54}$$

$$B_{i,ST} = -C_{i,ST} = V_i V_{ST} (G_{ST} \cos \delta_{iST} + B_{ST} \sin \delta_{iST}) \quad \text{Ec. 55}$$

$$E_{ST,i} = -V_i V_{ST} (G_{ST} \sin \delta_{iST} - B_{ST} \cos \delta_{iST}) \quad \text{Ec. 56}$$

$$F_{ST,i} = -2V_i^2 G_{ST} + V_i V_{ST} (G_{ST} \cos \delta_{iST} + B_{ST} \sin \delta_{iST}) \quad \text{Ec. 57}$$



$$Q_{ST,ST} = V_i V_{ST} (G_{ST} \sin \delta_{iST} - B_{ST} \cos \delta_{iST}) \quad \text{Ec. 58}$$

$$R_{ST,ST} = V_i V_{ST} (G_{ST} \cos \delta_{iST} + B_{ST} \sin \delta_{iST}) \quad \text{Ec. 59}$$

En **Ec. 54** a **Ec. 59** a los elementos X_{ii}^0 denotan el valor que toma la Jacobiana para ese elemento en caso de no haber dispositivos STATCOM, los calculados según **Ec. 44**; δ_{iST} es la diferencia de argumentos del nudo y el STATCOM; V_{STi} es el valor de la magnitud de la tensión equivalente del STATCOM i y G_{ST} y B_{ST} , la admitancia en serie del STATCOM. Los elementos de las nuevas matrices vienen denotados por lo subíndices i y ST que indican el nudo en que se encuentra el STATCOM y el número del STATCOM respectivamente. En estas matrices los elementos que no se han nombrado en **Ec. 54** a **Ec. 59** son nulos.

El proceso de cálculo de los flujos de carga es básicamente el explicado para una red sin este tipo de dispositivos siendo la matriz Jacobiana la gran diferencia entre ambas resoluciones. Además de las diferencias que se dan en la matriz Jacobiana existen otras consideraciones que se deben tener en cuenta para la correcta resolución de los flujos de carga. Todos los cambios realizados para la nueva resolución se detallan en los siguientes apartados.

4.4. Implementación de los diferentes modos de control

Dependiendo del modo de control seleccionado, la forma de la matriz Jacobiana varía en cuanto al valor de sus elementos ya que además de contener las derivadas de distintas expresiones, en algunos casos existen filas o columnas de ceros. Cabe destacar que las matrices H, N, M, L, A, B, C, D, E, F, Q y R no varían de un modo a otro ya que es en G, P, S y T donde se incluye la condición que depende del modo de control. A continuación se detallan la forma y contenido de esta matriz para cada uno de los modos de control. A medida que se vayan explicando los diferentes modos de control se definirán los valores que deben tomar las matrices G, P, S y T. En esta parte será de gran utilidad la definición que se acaba de hacer de las submatrices que componen la Jacobiana (**Ec. 49**).

Para simplificar la explicación y porque la matriz Jacobiana de la red ensayada es de este tamaño, de ahora en adelante se trabajará con la matriz de una red de cinco nudos con un STATCOM conectado en el tercero. El nudo *slack* del sistema será el uno y el dos será de tipo *PV* (**Fig. 17**).

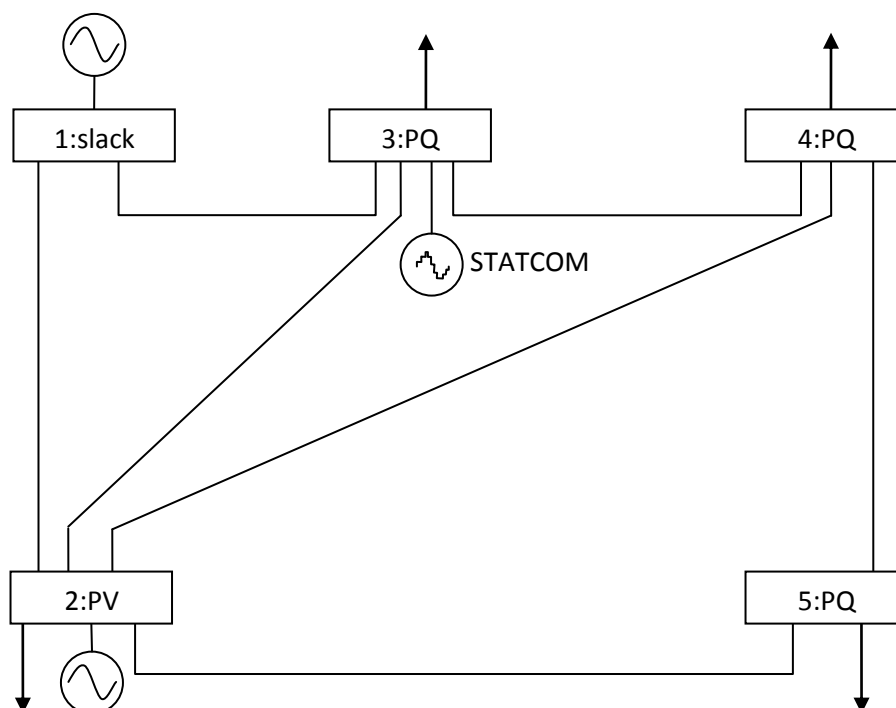


Fig. 17. Red de cinco nudos con STATCOM

I. Control de la tensión del nudo del STATCOM.

En este caso, por estar conectado el STATCOM en el nudo 3, la tensión que se va a controlar es la de este nudo. Las modificaciones realizadas en la Jacobiana son muy similares a las hechas a esta cuando se trata de un nudo PV. En aquel caso se eliminan la columna relativa a la tensión del nudo y la fila que contiene las derivadas de la potencia reactiva en ese nudo. La columna se elimina porque conocemos la tensión de ese nudo y la fila porque el balance de potencias no está restringido a ningún valor, excepto los límites del generador en cuyo caso ya se ha mencionado qué se debe hacer, y porque ya no es necesaria para el cálculo de la tensión. En el caso que se trata ahora, la columna de la tensión del nudo del STATCOM también puede ser eliminada ya que el modo fija la tensión del nudo pero no se puede hacer lo mismo con la fila relativa a la potencia. En el modo 1, con el STATCOM controlando la tensión del nudo, se deben cumplir también los balances de potencia reactiva, por lo que la fila se debe conservar. Sin embargo, no la podemos emplear al invertir la matriz ni al calcular las variaciones en las variables de estado.

Por otra parte, no existe una expresión (Ec. 33) que relacione la tensión en un nudo con el resto de variables, lo que nos dejaría la última fila de la matriz Jacobiana, las submatrices G, P, S y T sin contenido alguno. Uniendo estas dos circunstancias, en el modo 1, las submatrices G, P, S y T albergarán

la condición **Ec. 39** relativa al nudo del STATCOM, que determina los flujos de potencia reactiva en el nudo.

Finalmente, la matriz Jacobiana que obtenemos para el modo 1 es la que se muestra en **Fig. 18**. Los cambios más significativos que ha sufrido la matriz están señalados de forma gráfica. Las filas y columnas eliminadas; las relativas al nudo 1 por ser el slack, las del 2 por ser PV y las del 3 por el control del STATCOM; están sombreadas en diferentes colores. En la diagonal de estas filas deben ir unos para que sea posible invertir la matriz. También sombreada se encuentra la última fila que antes ocupaba la posición que indica la fecha.

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	H_{22}	H_{23}	H_{24}	H_{25}	0	0	0	N_{24}	N_{25}	0	0
0	H_{32}	H_{33}	H_{34}	H_{35}	0	0	0	N_{34}	N_{35}	A_{31}	B_{31}
0	H_{42}	H_{43}	H_{44}	H_{45}	0	0	0	N_{44}	N_{45}	0	0
0	H_{52}	H_{53}	H_{54}	H_{55}	0	0	0	N_{54}	N_{55}	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	M_{42}	M_{43}	M_{44}	M_{45}	0	0	0	L_{44}	L_{45}	0	0
0	M_{52}	M_{53}	M_{54}	M_{55}	0	0	0	L_{54}	L_{55}	0	0
0	0	E_{13}	0	0	0	0	0	0	0	Q_{11}	R_{11}
0	M_{32}	M_{33}	M_{34}	M_{35}	0	0	0	L_{34}	L_{35}	C_{31}	D_{31}

Fig. 18. Matriz Jacobiana para el modo 1

Además de las celdas sombreadas se pueden distinguir las diferentes matrices en que se encuentra dividida la Jacobiana ya que aparecen rodeadas de forma individual. Llama la atención que en las submatrices A, B, C, D, E, F, G, P, Q,R,S y T un gran número de sus elementos toma el valor cero. Esto se debe a que la potencia generada por el STATCOM solo influye al nudo en que se encuentra y a que dicha potencia solo depende de las variables de estado de dicho nudo y las propias del STATCOM. Al ser independientes, cuando se deriva el resultado es cero.

II. Control de la potencia reactiva absorbida.

En el modo 2 se controla la potencia reactiva que el STATCOM absorbe de la red. En este caso la matriz Jacobiana que obtenemos es bastante más sencilla que la que se obtenía para el modo anterior. A la matriz base formada

por H, N, M, L, A, B, C, D, E, F, Q y R, que es la parte que no cambia, hay que incluirle la fila del modo de control, formado por las submatrices G, P, S y T. en este caso la forma de la matriz es la de **Fig. 19**.

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	H_{22}	H_{23}	H_{24}	H_{25}	0	0	N_{23}	N_{24}	N_{25}	0	0
0	H_{32}	H_{33}	H_{34}	H_{35}	0	0	N_{33}	N_{34}	N_{35}	A_{31}	B_{31}
0	H_{42}	H_{43}	H_{44}	H_{45}	0	0	N_{43}	N_{44}	N_{45}	0	0
0	H_{52}	H_{53}	H_{54}	H_{55}	0	0	N_{53}	N_{54}	N_{55}	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	M_{32}	M_{33}	M_{34}	M_{35}	0	0	L_{33}	L_{34}	L_{35}	C_{31}	D_{31}
0	M_{42}	M_{43}	M_{44}	M_{45}	0	0	L_{43}	L_{44}	L_{45}	0	0
0	M_{52}	M_{53}	M_{54}	M_{55}	0	0	L_{53}	L_{54}	L_{55}	0	0
0	0	E_{13}	0	0	0	0	F_{13}	0	0	Q_{11}	R_{11}
0	0	G_{13}	0	0	0	0	P_{13}	0	0	S_{11}	T_{11}

Fig. 19. Matriz Jacobiana para el modo 2

En **Fig. 19** se aprecia mejor de lo que se apreciaba en **Fig. 18** el hecho de que la potencia del STATCOM solo afecta al balance de potencias del nudo en que está situado y solo se ve afectada por la tensión de dicho nudo y la propia.

Las expresiones para las matrices G, P, S y T para este nudo son:

$$G_{ST,i} = -V_i V_{ST} (G_{ST} \cos \delta_{iST} + B_{ST} \sin \delta_{iST}) \quad \text{Ec. 60}$$

$$P_{ST,i} = 2V_i^2 B_{ST} + V_i V_{ST} (G_{ST} \sin \delta_{iST} - B_{ST} \cos \delta_{iST}) \quad \text{Ec. 61}$$

$$S_{ST,ST} = -V_i V_{ST} (G_{ST} \cos \delta_{iST} + B_{ST} \sin \delta_{iST}) \quad \text{Ec. 62}$$

$$T_{ST,ST} = V_i V_{ST} (G_{ST} \sin \delta_{iST} - B_{ST} \cos \delta_{iST}) \quad \text{Ec. 63}$$

III. Control de la corriente del STATCOM. Control capacitivo.

Este tipo de control no implica modificaciones en la forma de la Jacobiana que sigue el modelo de la Jacobiana para el modo 2, **Fig. 19**. En cuanto a los valores de las matrices G, P, S y T, estos responden a las expresiones (**Ec. 64a Ec. 67**):



$$G_{ST,i} = \frac{(-G_{ST}V_i \text{ sen } \delta_i - B_{ST}V_i \text{ cos } \delta_i)}{\text{cos } (\delta_{ST} + \pi/2)} \quad \text{Ec. 64}$$

$$P_{ST,i} = V_i \frac{(G_{ST} \text{ cos } \delta_i - B_{ST} \text{ sen } \delta_i)}{\text{cos } (\delta_{ST} + \pi/2)} \quad \text{Ec. 65}$$

$$S_{ST,ST} = \frac{V_{ST}(G_{ST} \text{ sin } \delta_{ST} + B_{ST} \text{ cos } \delta_{ST})}{\text{cos}(\delta_{ST} + \pi/2)} + \dots$$

$$\dots + \frac{\text{sen}(\delta_{ST} + \pi/2) [G_{ST}(V_i \text{ cos } \delta_i - V_{ST} \text{ cos } \delta_{ST}) - B_{ST}(V_i \text{ sen } \delta_i - V_{ST} \text{ sen } \delta_{ST})]}{\text{cos}^2(\delta_{ST} + \pi/2)} \quad \text{Ec. 66}$$

$$T_{ST,ST} = V_{ST} \frac{(-G_{ST} \text{ cos } \delta_{ST} + B_{ST} \text{ sen } \delta_{ST})}{\text{cos } (\delta_{ST} + \pi/2)} \quad \text{Ec. 67}$$

En el apartado 4.5 se detallan otros aspectos de esta matriz y lo que ello supone. También se especifican las acciones que son necesario llevar a cabo.

IV. Control de la corriente del STATCOM. Control inductivo.

La matriz Jacobiana tiene la misma forma que para los controles 2 y 3, cambiando solo los valores de los elementos de la última fila que no son nulos (Ec. 68 a Ec. 71).

$$G_{ST,i} = \frac{(-G_{ST}V_i \text{ sen } \delta_i - B_{ST}V_i \text{ cos } \delta_i)}{\text{cos } (\delta_{ST} - \pi/2)} \quad \text{Ec. 68}$$

$$P_{ST,i} = V_i \frac{(G_{ST} \text{ cos } \delta_i - B_{ST} \text{ sen } \delta_i)}{\text{cos } (\delta_{ST} - \pi/2)} \quad \text{Ec. 69}$$

$$S_{ST,ST} = \frac{V_{ST}(G_{ST} \text{ sin } \delta_{ST} + B_{ST} \text{ cos } \delta_{ST})}{\text{cos}(\delta_{ST} - \pi/2)} + \dots$$

$$\dots + \frac{\text{sen}(\delta_{ST} - \pi/2) [G_{ST}(V_i \text{ cos } \delta_i - V_{ST} \text{ cos } \delta_{ST}) - B_{ST}(V_i \text{ sen } \delta_i - V_{ST} \text{ sen } \delta_{ST})]}{\text{cos}^2(\delta_{ST} - \pi/2)} \quad \text{Ec. 70}$$

$$T_{ST,ST} = V_{ST} \frac{(-G_{ST} \text{ cos } \delta_{ST} + B_{ST} \text{ sen } \delta_{ST})}{\text{cos } (\delta_{ST} - \pi/2)} \quad \text{Ec. 71}$$

V. Control de la tensión equivalente del STATCOM.

En el control de la tensión equivalente del STATCOM ocurre algo similar a lo que ocurría en el primer modo de control. En este caso también se controla una tensión, que es una variable de estado del sistema, pero ahora no se trata de una tensión asociada a un nudo de la red. Por otra parte, no existe una relación como **Ec. 33** entre la variable a controlar y las de estado. La segunda circunstancia nos permite actuar como si de un nudo PV se tratase, esto es, eliminar la columna y la fila de la tensión del STATCOM y del modo respectivamente y dar el valor 1 al elemento de la diagonal para que la matriz sea inversible. La forma de esta matriz será como la que muestra **Fig. 20**.

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	H_{22}	H_{23}	H_{24}	H_{25}	0	0	N_{23}	N_{24}	N_{25}	0	0
0	H_{32}	H_{33}	H_{34}	H_{35}	0	0	N_{33}	N_{34}	N_{35}	A_{31}	0
0	H_{42}	H_{43}	H_{44}	H_{45}	0	0	N_{43}	N_{44}	N_{45}	0	0
0	H_{52}	H_{53}	H_{54}	H_{55}	0	0	N_{53}	N_{54}	N_{55}	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	M_{32}	M_{33}	M_{34}	M_{35}	0	0	L_{33}	L_{34}	L_{35}	C_{31}	0
0	M_{42}	M_{43}	M_{44}	M_{45}	0	0	L_{43}	L_{44}	L_{45}	0	0
0	M_{52}	M_{53}	M_{54}	M_{55}	0	0	L_{53}	L_{54}	L_{55}	0	0
0	0	E_{13}	0	0	0	0	F_{13}	0	0	Q_{11}	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Fig. 20. Matriz Jacobiana para el modo 5

Al igual que ocurría cuando se trataba de un nudo PV se debe obviar el incremento que sufre la tensión, consecuencia del 1 que se coloca en la diagonal para que la matriz pudiera ser invertida.

VI. Control de la tensión de un nudo remoto.

En este modo de control la matriz Jacobiana es como la matriz del modo 1 salvo por un detalle, ya que se controla en ambos la tensión de un nudo. En este caso el nudo cuya tensión se controla no es el nudo del STATCOM sino otro, es esta la razón de la diferencia entre ambas matrices. Suponiendo que se quiera controlar la tensión del nudo cuatro la Jacobiana sería como **Fig. 21**.

La diferencia que se observa entre la Jacobiana del modo 1 (Fig. 18) y la del modo 7 (Fig. 21) es que en el segundo caso en las matrices C y E no todos los elementos son cero como en Fig. 18. Esto es porque los elementos no nulos (nudo 3) no se eliminan, se eliminan las filas referentes al nudo de control (nudo 4). También los elementos S y T de la última fila son nulos, representan la derivada de la tensión de un nudo respecto a las variables de estado del STATCOM y son independientes. En el siguiente apartado se amplía la descripción de la Jacobiana empleada para este modo y de otras.

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	H_{22}	H_{23}	H_{24}	H_{25}	0	0	N_{23}	0	N_{25}	0	0	0
0	H_{32}	H_{33}	H_{34}	H_{35}	0	0	N_{33}	0	N_{35}	A_{31}	B_{31}	0
0	H_{42}	H_{43}	H_{44}	H_{45}	0	0	N_{43}	0	N_{45}	0	0	0
0	H_{52}	H_{53}	H_{54}	H_{55}	0	0	N_{53}	0	N_{55}	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	M_{32}	M_{33}	M_{34}	M_{35}	0	0	L_{33}	0	L_{35}	C_{31}	D_{31}	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	M_{52}	M_{53}	M_{54}	M_{55}	0	0	L_{53}	0	L_{55}	0	0	0
0	0	E_{13}	0	0	0	0	F_{13}	0	0	Q_{11}	R_{11}	0
0	M_{42}	M_{43}	M_{44}	M_{45}	0	0	L_{43}	0	L_{45}	0	0	0

Fig. 21. Matriz Jacobiana para el modo 6

VII. Control de la potencia reactiva por una línea

En este modo de control, como ya ocurría en los modos de control 2, 3, 4 y 5 las matrices H, N, M, L, A, B, C, D, E, F, Q y R no se ven modificadas porque no se controla ninguna de las variables de estado. La diferencia entre esta Jacobiana y las de los modos mencionados es que la condición de control no depende de las variables de estado del STATCOM, por lo que S y T serán nulas. Este hecho se da porque con este modo se persigue controlar la potencia por una línea, que no depende directamente de las variables de estado del STATCOM, aunque sí variará dependiendo de la potencia reactiva inyectada. A modo de explicación se muestra cómo sería la matriz Jacobiana para el control de la potencia reactiva por una línea que va del nudo 4 al 5 (Fig. 22).

Cuando la línea cuya potencia se desea controlar conecte dos nudos que sean *slack* o tipo *PV* la matriz se verá reducida siguiendo las pautas que se han indicado para este tipo de nudos. Si conecta un nudo *slack*, uno más

de los elementos de G y uno más de los de P serán nulos en la fila que caracteriza el modo de control. En caso de conectar un nudo PV solo será nulo uno más de los elementos de P. En el caso más extremo, en el que la potencia reactiva controlada sea la de una línea que une un nudo *slack* y uno PV, la última fila de la matriz Jacobiana solo contendría el elemento de G relativo al nudo PV. En el apartado 4.5 se detallan otras características de esta matriz que es necesario tener en cuenta.

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	H_{22}	H_{23}	H_{24}	H_{25}	0	0	N_{23}	N_{24}	N_{25}	0	0
0	H_{32}	H_{33}	H_{34}	H_{35}	0	0	N_{33}	N_{34}	N_{35}	A_{31}	B_{31}
0	H_{42}	H_{43}	H_{44}	H_{45}	0	0	N_{43}	N_{44}	N_{45}	0	0
0	H_{52}	H_{53}	H_{54}	H_{55}	0	0	N_{53}	N_{54}	N_{55}	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	M_{32}	M_{33}	M_{34}	M_{35}	0	0	L_{33}	L_{34}	L_{35}	C_{31}	D_{31}
0	M_{42}	M_{43}	M_{44}	M_{45}	0	0	L_{43}	L_{44}	L_{45}	0	0
0	M_{52}	M_{53}	M_{54}	M_{55}	0	0	L_{53}	L_{54}	L_{55}	0	0
0	0	E_{13}	0	0	0	0	F_{13}	0	0	Q_{11}	R_{11}
0	0	0	G_{14}	G_{15}	0	0	0	P_{14}	P_{15}	0	0

Fig. 22. Matriz Jacobiana para el modo 7

Los valores de los elementos no nulos de las matrices de la última fila son:

$$G_{ST,i} = -V_i V_j B'_{ij} \text{sen}(\delta_i - \delta_j) - G'_{ij} V_i V_j \text{cos}(\delta_j - \delta_i) \quad \text{Ec. 72}$$

$$G_{ST,j} = V_i V_j B'_{ij} \text{sen}(\delta_i - \delta_j) + G'_{ij} V_i V_j \text{cos}(\delta_j - \delta_i) \quad \text{Ec. 73}$$

$$P_{ST,i} = -V_i [-2V_i (B'_{ij} + B_{ij}) + B'_{ij} V_j \text{cos}(\delta_i - \delta_j) + G'_{ij} V_j \text{sen}(\delta_j - \delta_i)] \quad \text{Ec. 74}$$

$$P_{ST,j} = -V_j [B'_{ij} V_i \text{cos}(\delta_i - \delta_j) + G'_{ij} V_i \text{sen}(\delta_j - \delta_i)] \quad \text{Ec. 75}$$

VIII. Control de la potencia activa por una línea

En cuanto a la forma de la matriz Jacobiana, este modo es idéntico al anterior. En lo que respecta a la Jacobiana la diferencia reside en los valores que toman G y P.



$$G_{ST,i} = -V_i V_j B'_{ij} \cos(\delta_j - \delta_i) - G'_{ij} V_i V_j \sin(\delta_j - \delta_i) \quad \text{Ec. 76}$$

$$G_{ST,j} = V_i V_j B'_{ij} \cos(\delta_j - \delta_i) + G'_{ij} V_i V_j \sin(\delta_j - \delta_i) \quad \text{Ec. 77}$$

$$P_{ST,i} = V_i [2V_i (G'_{ij} + G_{ij}) + B'_{ij} V_j \sin(\delta_j - \delta_i) - G'_{ij} V_j \sin(\delta_j - \delta_i)] \quad \text{Ec. 78}$$

$$P_{ST,j} = V_j [B'_{ij} V_i \sin(\delta_j - \delta_i) - G'_{ij} V_i \cos(\delta_j - \delta_i)] \quad \text{Ec. 79}$$

4.5. Otros aspectos importantes a tener en cuenta

Los cambios más significativos que se llevan a cabo en el flujo de carga con STATCOM frente al normal se dan en la matriz Jacobiana pero no son los únicos. A continuación se explicarán otros cambios necesarios para la inclusión del STATCOM en el flujo de potencia.

- Uno de ellos, quizá uno de los más importantes, es la inclusión de la potencia absorbida por el STATCOM en el sumatorio de las potencias en cada nudo. Se puede considerar uno de los más importantes ya que supone el cambio en las ecuaciones del sistema.
- En el caso de los modos de control 1, 5 y 6, en los que se controlan las tensiones de diferentes nudos de la red o del STATCOM, se deberán hacer nulos los incrementos de tensión obtenidos tras la iteración, debidos, como ya se ha mencionado, al uno que es necesario colocar en la diagonal para que la matriz sea inversible.
- Por último, no debe olvidarse que en los modos 1 y 6 se han intercambiado dos filas de la matriz Jacobiana por lo que también deberán intercambiarse los valores de referencia empleados para calcular el incremento de potencia reactiva que multiplica a la Jacobiana.

Debido al carácter especial que presentan los nudos tipo slack y PV no es posible llevar a cabo todos los modos de control cuando el STATCOM se encuentra conectado a uno de estos nudos. Estas consideraciones no afectan al normal desempeño del cálculo pero es necesario que cuando se intente emplear el STATCOM de esta manera el usuario sea advertido.

La característica común entre los nudos tipo slack y PV es que su tensión es conocida de antemano y viene fijada por el generador que se encuentra conectado en ese nudo. Por esta razón si se pretende controlar la

tensión de un nudo, este nudo no podrá ser un nudo tipo slack o PV. Esta característica afecta a los modos de control 1 y 6 que no podrán ser empleados en estos o sobre estos nudos respectivamente.

Las siguientes restricciones de uso del STATCOM están motivadas por la forma que toma la matriz Jacobiana en cada uno de los modos. En ellas el problema que se plantea no es de control de la red sino de resolución del problema de flujos de carga. No todos los modos presentan problemas; los modos 2, control de Q_{ST} , y 5, control de V_{ST} , están exentos de ellos pudiéndose encontrar una solución a los flujos de carga sea cual sea el nudo en que se encuentre el STATCOM. Para el resto de modos de control, cuando el STATCOM se sitúa en un nudo slack o PV tras varias iteraciones la Jacobiana es singular e impide alcanzar una solución.

I. Modos 3 y 4: Control de la corriente del STATCOM

En los casos en los que el STATCOM se encuentra situado en un nudo slack o PV y se desea controlar la corriente, ya sea capacitiva o inductiva, la forma que toma la matriz Jacobiana es la de la figura **Fig. 19** con dos posibles variantes, una para el nudo slack y la otra para el PV.

Cuando el STATCOM se encuentra en el nudo slack los elementos de E, G, F, P, A, B, C, y D son nulos, por lo que las dos últimas filas y columnas de la matriz solo contienen los elementos de Q, R, S y T, definidos por **Ec. 64** a **Ec. 71**, según se trate de un corriente capacitiva o inductiva. Prestando atención a estas expresiones se aprecia que la expresión para el elemento de S consta de dos términos, cuyos denominadores son: $\cos(\delta \pm \pi/2)$ y $\cos^2(\delta \pm \pi/2)$ respectivamente, mientras que Q, R y T están formados por un único término cuyo denominador es $\cos(\delta \pm \pi/2)$. Al tratarse de ángulos tan próximos a $\pi/2$ los valores obtenidos para el segundo término de S son muy superiores a los obtenidos para el resto de términos, lo que supone un problema a la hora de obtener los incrementos de cada iteración ya que las matrices se convierten fácilmente en singulares.

Este mismo problema se plantea cuando el STATCOM se encuentra en un nudo PV. En este caso la Jacobiana está compuesta por cuatro elementos no nulos más que en el caso anterior: A, B, E y G (**Fig. 23**); pero no aportan la suficiente información para que el método converja antes de que los valores de S se disparen. Cuando la matriz Jacobiana está “completa” los elementos de las dos últimas filas y columnas hacen que el método converja antes de que los valores de S sean demasiado grandes.

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	H_{22}	H_{23}	H_{24}	H_{25}	0	0	N_{23}	N_{24}	N_{25}	A_{21}	B_{21}
0	H_{32}	H_{33}	H_{34}	H_{35}	0	0	N_{33}	N_{34}	N_{35}	0	0
0	H_{42}	H_{43}	H_{44}	H_{45}	0	0	N_{43}	N_{44}	N_{45}	0	0
0	H_{52}	H_{53}	H_{54}	H_{55}	0	0	N_{53}	N_{54}	N_{55}	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	M_{32}	M_{33}	M_{34}	M_{35}	0	0	L_{33}	L_{34}	L_{35}	0	0
0	M_{42}	M_{43}	M_{44}	M_{45}	0	0	L_{43}	L_{44}	L_{45}	0	0
0	M_{52}	M_{53}	M_{54}	M_{55}	0	0	L_{53}	L_{54}	L_{55}	0	0
0	E_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0	Q_{11}	R_{11}
0	G_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0	S_{11}	T_{11}

Fig. 23. Jacobiana para el modo 3 / 4 con STATCOM en un nudo PV

II. Modos 6: Control de la tensión de un nudo remoto.

Cuando el STATCOM se localiza en un nudo slack o PV y el modo de control es el 6, al menos los siguientes elementos de la matriz Jacobiana (Fig. 21) son nulos: C, D y F y A, B y E en caso de ser un nudo slack. Las dos últimas columnas de esta matriz Jacobiana estarán definidas por A y B (en caso de no ser nulos, nudo PV) y Q y R. (Fig. 25)

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	H_{22}	H_{23}	H_{24}	H_{25}	0	0	N_{23}	0	N_{25}	A_{31}	B_{31}
0	H_{32}	H_{33}	H_{34}	H_{35}	0	0	N_{33}	0	N_{35}	0	0
0	H_{42}	H_{43}	H_{44}	H_{45}	0	0	N_{43}	0	N_{45}	0	0
0	H_{52}	H_{53}	H_{54}	H_{55}	0	0	N_{53}	0	N_{55}	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	M_{32}	M_{33}	M_{34}	M_{35}	0	0	L_{33}	0	L_{35}	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	M_{52}	M_{53}	M_{54}	M_{55}	0	0	L_{53}	0	L_{55}	0	0
0	E_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0	Q_{11}	R_{11}
0	M_{42}	M_{43}	M_{44}	M_{45}	0	0	L_{43}	0	L_{45}	0	0

Fig. 24. Jacobiana para el modo 6 con STATCOM en un nudo PV

En la peor de las situaciones, con A y B nulos, la matriz no es de rango máximo, ya que la última columna se puede obtener a partir de la penúltima. Esto hace que la matriz no sea inversible y por tanto no se pueda llevar a cabo la resolución del sistema.

Cuando se trata de un nudo PV en lugar de un nudo slack se cuenta además con la información que proporcionan A y B. Sin embargo, esta información es la misma que ya proporcionan Q y R por lo que la matriz será no inversible de nuevo. A y B y Q y R proporcionan la misma información porque ambos pares de elementos representan la derivada de la potencia del STATCOM respecto a las variables del STATCOM. En caso de que este modo de control se emplee en un nudo PQ se dispone también de la información que proporcionan las derivadas de la potencia reactiva del STATCOM por lo que las dos últimas columnas ya no son dependientes la una de la otra.

III. Modos 7 y 8: Control de potencia en una línea

Consecuencia de que la variable de control no depende de las variables de estado del STATCOM, la situación que se da para estos dos modos de control es similar a la última explicada. Cuando el STATCOM se localiza en un nudo slack los únicos elementos no nulos de las dos últimas columnas son Q y R. Estas columnas se ampliarán con A y B en caso de ser un nudo PV. Para estos dos modos de control la forma de la Jacobiana cuando el STATCOM se sitúa en el nudo PV, el 2, es la de **Fig. 25**

1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	H_{22}	H_{23}	H_{24}	H_{25}	0	0	N_{23}	N_{24}	N_{25}	A_{21}	B_{21}
0	H_{32}	H_{33}	H_{34}	H_{35}	0	0	N_{33}	N_{34}	N_{35}	0	0
0	H_{42}	H_{43}	H_{44}	H_{45}	0	0	N_{43}	N_{44}	N_{45}	0	0
0	H_{52}	H_{53}	H_{54}	H_{55}	0	0	N_{53}	N_{54}	N_{55}	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	M_{32}	M_{33}	M_{34}	M_{35}	0	0	L_{33}	L_{34}	L_{35}	0	0
0	M_{42}	M_{43}	M_{44}	M_{45}	0	0	L_{43}	L_{44}	L_{45}	0	0
0	M_{52}	M_{53}	M_{54}	M_{55}	0	0	L_{53}	L_{54}	L_{55}	0	0
0	E_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0	Q_{11}	R_{11}
0	0	0	G_{14}	G_{15}	0	0	0	P_{14}	P_{15}	0	0

Fig. 25. Jacobiana para el modo 7 con STATCOM en un nudo PV



La solución a estas restricciones de uso del programa de cálculo pasan por la inclusión de una alerta que avise al usuario de la imposibilidad de calcular los flujos de potencia.

En cuanto al diagrama de flujo que hay que seguir para la resolución del flujo de carga se trata del mismo que para el flujo de carga sin STATCOM (**Fig. 16**). Las operaciones que se llevan a cabo son las mismas solo que en cada una de ellas deberán tenerse en cuenta las indicaciones mencionadas.

4.6. Interface gráfica

El desarrollo de una aplicación matemática que resuelva flujos de carga puede ser de gran utilidad para este tipo de resoluciones. Sin embargo, debido a la gran cantidad de datos que es necesario introducir, sobre todo para sistemas eléctricos de un tamaño considerable, puede resultar poco atractivo a la hora de usarse. Otra limitación de este tipo de aplicaciones es que normalmente es necesario tener una base de programación para poder usarla. Por esta razón se diseña una interface gráfica que permite introducir los datos de una forma sencilla y que no hace necesario tener conocimientos de programación. Gracias a la interface gráfica no es necesario crear un *Script* en *Matlab* ni escribir los comandos en la línea de comando.

Las principales actividades que se pueden llevar a cabo mediante la aplicación son las siguientes:

- Introducir los datos de una red.
- Generar un archivo con los datos iniciales del cálculo.
- Visualizar los datos de una red.
- Cálculo de los flujos de carga.
- Visualización en tablas de los resultados obtenidos.
- Visualización de forma gráfica, sobre la red, de los resultados obtenidos.
- Generación de un archivo con los resultados obtenidos.

La aplicación creada consta de tres ventanas diferentes, siendo dos de ellas secundarias y pudiéndose abrir solo desde la principal (**Fig. 26**). En la ventana principal nos encontramos tres zonas claramente diferenciadas: la zona de datos, con el fondo amarillo; la zona de resultados, con el fondo verde y las botoneras de *Calcular* y *Display*. También dispone de tres iconos: *Crear Archivo de Datos*, *Cargar Archivo de Datos* y *Guardar Resultados*.

NSLME_ST_3.mat

Calcular
Display

Número de iteraciones: 5

Nodos

Nudo	Tipo	Tensión
1	1	1.0600
2	2	1
3	3	1
4	3	1
5	3	1

Líneas de transmisión

Línea	Nudo Inicial	Nudo Final	R	X	G	B
1	1	2	0.0200	0.0400	0	0.0600
2	1	3	0.0800	0.2400	0	0.0800
3	2	3	0.0600	0.1800	0	0.0400
4	2	4	0.0600	0.1800	0	0.0400
5	2	5	0.0400	0.1200	0	0.0300
6	3	4	0.0100	0.0300	0	0.0200

Generadores

Nudo	P	Q	Qmin	Qmax
1	1	0	0	-5
2	2	0.4000	0	-3

Cargas

Nudo	P	Q
1	2	0.2000
2	3	0.4500
3	4	0.4000
4	5	0.6000

Elementos en paralelo

Nudo	R	X
1	0	0

STATCOM

Nudo	R	X	Modo	Valor de control	Nudo/Línea de control
1	3	0	0.1000	6	1

Nodos

Nudo	Tensión	Delta	P	Q
1	1.0600	0	1.3584	0.4504
2	1	-0.0369	0.4000	-1.8657
3	1.0910	-0.1116	-0.4500	-0.1500
4	1.0674	-0.1105	-0.4000	-0.0500
5	1	-0.1079	-0.6000	-0.1000

Líneas

Línea	P1	Q1	P2	Q2	P pérdidas	Q pérdidas
1	0.9085	0.7385	-0.8833	-0.7235	0.0252	0.0120
2	0.4508	-0.2851	-0.4316	0.2848	0.0192	-3.2320e-04
3	0.2603	-0.5952	-0.2364	0.6232	0.0239	0.0279
4	0.2646	-0.4735	-0.2074	0.4023	0.0172	0.0086
5	0.5384	-0.1735	-0.5258	0.1813	0.0126	0.0070
6	0.2180	0.7765	-0.2125	-0.7772	0.0055	-0.0067
7	0.0796	0.2449	-0.0742	-0.2613	0.0057	-0.0384

STATCOM

Nudo	Tensión ST	Delta ST	Q ST
1	1.2596	-0.1116	-1.8285

Fig. 26. Ventana principal de la interface



- En la zona de **datos** nos encontramos con seis tablas en las que aparecen los datos que se han introducido. Cada una de las tablas recoge los datos relativos a cada tipo de elemento que es posible encontrarse en la red: nudos, líneas de transmisión generadores, cargas, elementos en paralelo y STATCOM. Se indicarán:
 - Nudos: nudo, tipo y tensión. En los nudos en los que la tensión es desconocida a priori aparece la tensión con la que se realiza la primera iteración,1.
 - Líneas de transmisión: nudos inicial y final y los parámetros de su cuadripolo en π .
 - Generadores: nudo, potencias activa y reactiva y potencia reactiva máxima y mínima. En lo nudos PV en los que la potencia reactiva no es conocida aparecerá el valor introducido aunque no influya en el cálculo.
 - Cargas: nudo y potencias activa y reactiva consumidas.
 - Elementos en paralelo: nudo e impedancia equivalente.
 - STATCOM: nudo, impedancia en serie, modo de control, variable de control y nudo o línea de control. Este último dato indica la línea cuya potencia se controla en el caso de estarse empleando los modos 7 u 8 y el nudo cuya tensión se controla en caso de que el modo de control sea el 6.
- La zona de **resultados**, con fondo verde, contiene los resultados obtenidos para los flujos de carga de los datos que se visualizan en la zona de datos. En este caso existen tres tablas diferentes que muestran los resultados relativos a los nudos, las líneas y el STATCOM:
 - Nudos: tensión en módulo y argumento; si se trata de un nudo generación, la potencia del generador y si se trata de un nudo de carga la potencia de la carga conectada.
 - Líneas: potencias salientes de su nudo inicial P1 y Q1, potencias salientes de su nudo final P2 y Q2 y la pérdidas en ellas, entendidas ambas como la suma de la potencia que sale del nudo inicial y la que sale del nudo final.
 - STATCOM: tensión en forma módulo-argumental y potencia reactiva que absorbe de la red.

- El botón Calcular ejecuta el cálculo del flujo de potencias y muestra los resultados en las tablas anteriormente mencionadas. A la par que se muestran los resultados obtenidos, se muestra también el número de iteraciones necesario para llegar a la solución.
- Al pulsar el botón *Display* se representan los resultados de forma gráfica sobre la red de Fig. 27 en una ventana dependiente de la principal. Si se trata de otra red los resultados no se mostrarán de forma correcta o simplemente no se mostrarán porque hay algún error. Para representar otras redes sería necesario conocerlas con anterioridad. En este caso se ha decidido representar esta red únicamente porque es la que se ha empleado para comprobar la influencia del STATCOM.

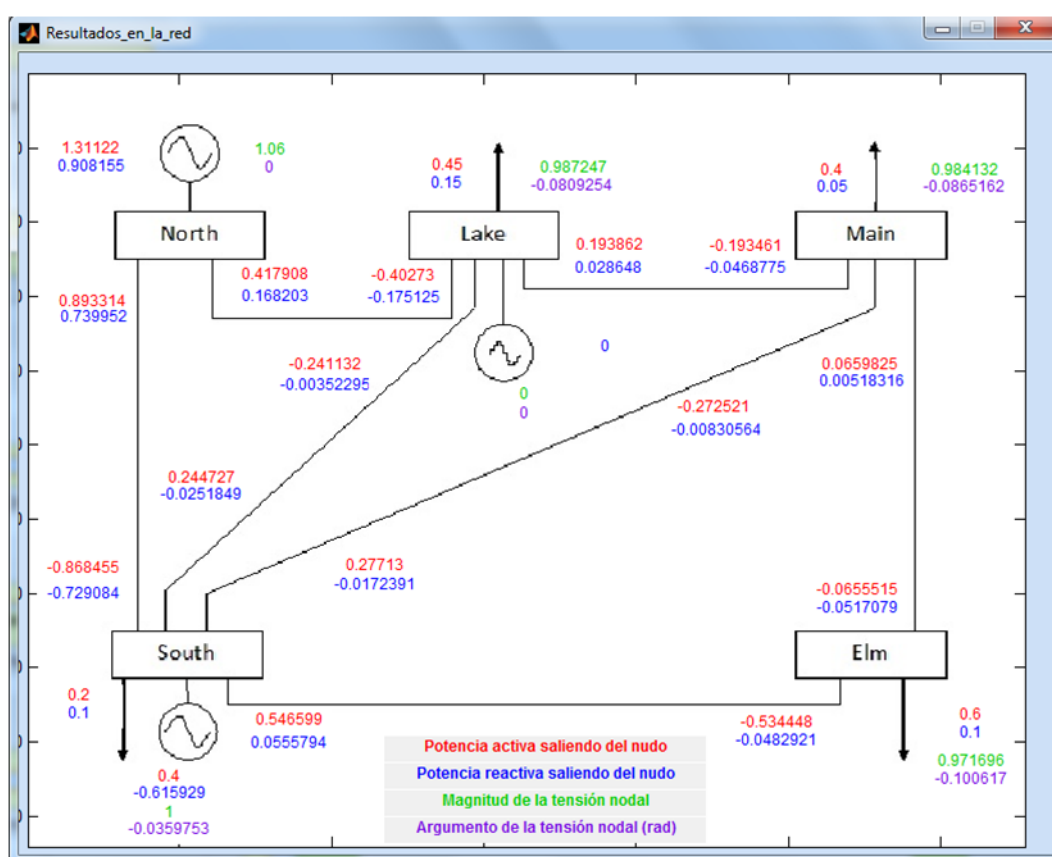


Fig. 27. Ejemplo de representación de datos en la red predeterminada

Los datos que se muestran en la red son: las potencias de cada línea (P1, P2, Q1 y Q2), las tensiones y ángulos de los nudos, la potencia de las cargas y para el STATCOM su tensión equivalente (módulo y ángulo) y la potencia que absorbe de la red. Para su fácil identificación se muestran mediante un código de colores:

en rojo la potencia activa (P1 o P2), en azul la reactiva (Q1 o Q2), en verde la magnitud de la tensión y en morado el ángulo.

- El botón Crear Archivo de Datos, en la esquina superior izquierda de la ventana principal, nos permite, como indica su nombre, crear un archivo de datos si no disponemos de uno. Al hacer clic en él se abre la ventana Introducir_Datos, con el fondo azul, en la que se pueden ir introduciendo los distintos datos (Fig. 28).

The screenshot shows the 'Introducir_Datos' window with the following sections:

- Datos Generales:** Fields for 'Número de nudos', 'Número de líneas de Transmisión', 'Número de cargas', 'Número de generadores', 'Número de elementos en paralelo', and 'Número de STATCOM'.
- Nudos:** 'Nudo' dropdown (1), 'Tipo' dropdown (Slack), and 'Guardar' button.
- Líneas de Transmisión:** 'Línea' dropdown (1), 'Nudo inicial' dropdown (1), 'Nudo final' dropdown (1), and input fields for R, X, G, and B. Includes a 'Guardar' button.
- Generadores:** 'Generador' dropdown (1), 'Nudo' dropdown (1), and input fields for P, V, Q, Qmin, and Qmax. Includes a 'Guardar' button.
- Cargas:** 'Carga' dropdown (1), 'Nudo' dropdown (1), and input fields for P and Q. Includes a 'Guardar' button.
- Elementos en paralelo:** 'Elemento' dropdown, 'Nudo' dropdown (1), and input fields for R and X. Includes a 'Guardar' button.
- STATCOM:** 'STATCOM' dropdown (1), 'Nudo' dropdown (1), and input fields for R and X. Includes a 'Guardar' button.
- Control:** 'Modo de control' dropdown (Tensión nodal), 'Valor de control' input field, 'Nudo remoto de control' dropdown (1), and 'Línea de control' dropdown (1).

Fig. 28. Introducir_Datos

Esta ventana la forman siete cuadros diferentes compuestos por paneles de entrada de texto, listas desplegadas y botones. Para comenzar a introducir los datos se debe comenzar por el cuadro de Datos Generales, en el que se introducen el número de elementos de cada tipo que hay en la red. Una vez hecho esto, en las diferentes listas desplegadas aparecerán para poder ser seleccionados los diferentes elementos; por ejemplo, si el número de nudos es cinco, en cada lista de nudos aparecerán 5 para poder ser seleccionados.

En el cuadro de *Nudos* podremos seleccionar el nudo y su tipo. Una vez seleccionados, haciendo clic en *Guardar* se habrán guardado internamente y aparecerán en las tablas de datos, con el fondo amarillo.

En el apartado de *Líneas de Transmisión* se debe seleccionar la línea, sus nudos inicial y final y sus parámetros característicos del cuadripolo en π . El botón *Guardar* tiene la misma misión que en el caso anterior y que en los siguientes.

Los datos relativos a *Generadores* son: número de generador, nudo en el que está, potencia reactiva mínima y máxima, y por último tensión, potencia activa y reactiva. En este apartado deberán introducirse todos los datos mencionados aunque no sean conocidos ya que dependiendo del tipo de nudo que se haya seleccionado se ignorarán unos u otros. Si se trata de un nudo PV no se tendrá en cuenta la potencia reactiva, mientras que si el nudo es PQ el valor de la tensión será el tomado para ese nudo en la primera iteración.

En el cuadro *Cargas* nos encontramos el número de carga, el nudo en que se encuentra y la potencia que supone para la red.

En *Elementos en Paralelo* se deben introducir los parámetros que caracterizan a este tipo de elementos, incluyendo el nudo al que se conectan, y su resistencia y reactancia equivalentes.



Fig. 29. Mensaje de aviso

Por último nos encontramos el cuadro *STATCOM*, en el que se deben definir los parámetros de estos dispositivos: número, nudo, impedancia, modo de control, valor de referencia para el control; y en caso de controlar la tensión de un nudo remoto o la potencia en una línea, el elemento en cuestión de que se trate. Debido a las restricciones de localización del *STATCOM* que se han mencionado, en caso de incurrir en una de ellas se mostrará un mensaje de aviso (**Fig. 29**) y no se guardarán los datos.

Además de los cuadros de introducción de datos, en la esquina superior izquierda se encuentran dos iconos: *Abrir Archivo para Modificar* y *Guardar Archivo*. El primero permite abrir un archivo existente y modificar sus datos **Fig. 30**. Al seleccionar un archivo para cargar se representan en las tablas de datos los datos que se han cargado. El segundo icono permite guardar los datos que se han introducido hasta el momento y que se pueden visualizar en las tablas de la ventana principal. El guardar los datos es condición indispensable para poder hacer el cálculo ya que si no se guardan no estarán accesibles desde la ventana principal. La ventana que se abre al pulsar este icono es muy similar a la que se abre para cargar un archivo.

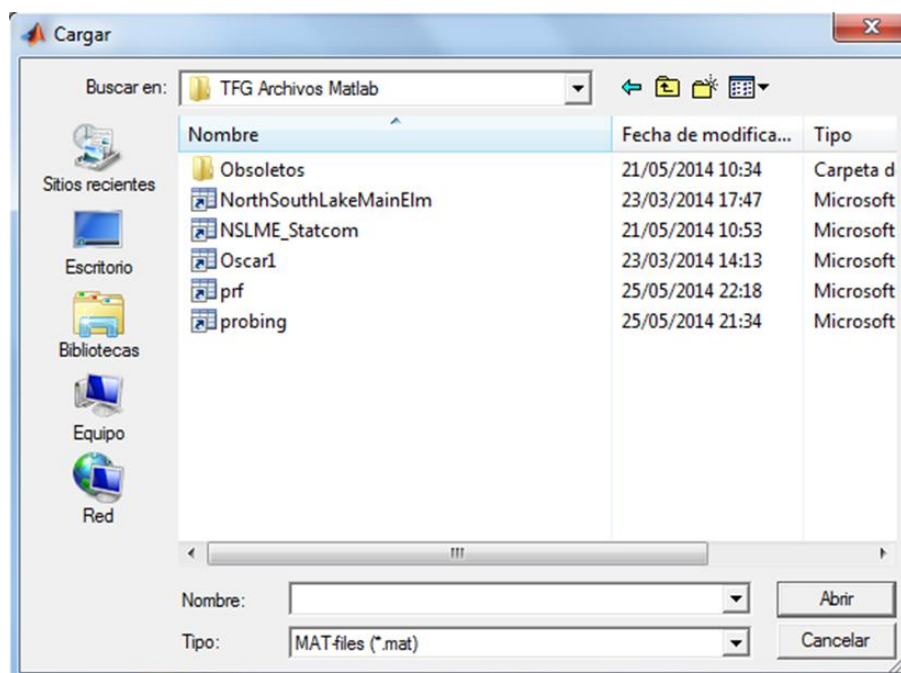


Fig. 30. Ventana ejemplo para cargar un archivo

- En la esquina superior izquierda de la ventana principal, el botón Cargar Archivo de Datos nos permite abrir un archivo de datos de la carpeta en la que nos encontramos trabajando y visualizarlos en las tablas dispuestas para ello (**Fig. 30**). Se trata de la misma

ventana que en la parte de introducir datos. Este es un paso indispensable para hacer el cálculo ya que si no existe ningún archivo cargado no se dispone de datos para realizarlo. En el caso en el que se haya creado un archivo recientemente y aparezcan sus datos en pantalla también será necesario cargarlo antes del cálculo. Al cargar un archivo aparece su nombre sobre los botones de Calcular y *Display*.

- Con el icono típico de guardar aparece Guardar resultados que abre una ventana de guardar predeterminada a partir de la cual se genera un archivo con los datos obtenidos tras el cálculo de los flujos de carga. Esta ventana es igual a la que se abre para guardar los datos iniciales de la red.

5. Ejemplos de aplicación

La aplicación creada se empleará para el cálculo de los flujos de carga de una red con un STATCOM, razón por la cual se deberá probar previamente para asegurarse su correcto funcionamiento. Un correcto funcionamiento será aquel que permita el uso de todas sus herramientas de forma correcta, prestando especial atención al cálculo de los flujos de potencia de la red. Una vez conocida la bondad de los resultados obtenidos mediante la aplicación se estudiará la influencia en los flujos de potencia del nuevo elemento incluido en la red, el STATCOM.

Durante el proceso de prueba, tanto en la validación de los resultados obtenidos, como para comprobar la influencia del STATCOM en la red, se hicieron innumerables pruebas. Las que se muestran en los siguientes apartados son las que se han considerado más importantes. Las magnitudes que aparecen en las tablas son las mismas que las que aparecen en el apartado resultados de la aplicación.

5.1. Validación de los resultados obtenidos.

El proceso de validación de los resultados se hizo de forma progresiva: comenzando por probar el cálculo de los flujos de carga sin el empleo de dispositivos STATCOM y continuando con la comprobación de la bondad de los resultados que se obtienen cuando la red cuenta con un dispositivo STATCOM.

La primera de las pruebas llevadas a cabo fue la resolución de los flujos de carga de la red de **Fig. 31**, extraída de la referencia bibliográfica [1], sin incluir el dispositivo STATCOM con objeto de tener una base sólida sobre la que trabajar.

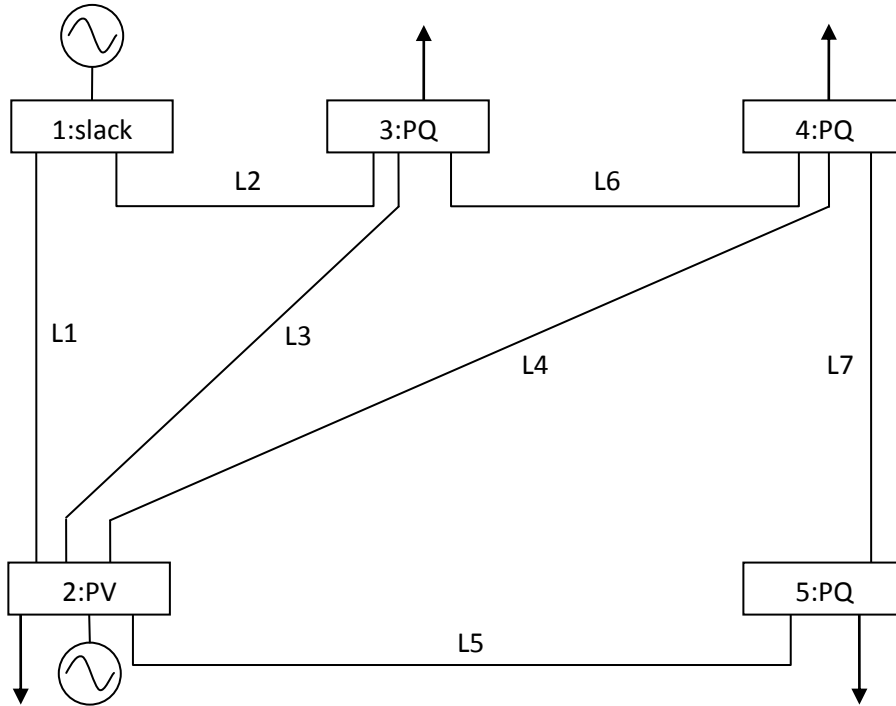


Fig. 31. Red de cinco nodos sin STATCOM

Los datos que caracterizan esta red se pueden obtener de las tablas: **Tabla 1**, **Tabla 2**, **Tabla 3** y **Tabla 4** siguientes.

Nudo	Tipo	V
1	Slack	1,0600
2	PV	1
3	PQ	--
4	PQ	--
5	PQ	--

Tabla 1. Datos de los nodos de la red de la Fig. 31

LÍNEA	Nudo Inicial	Nudo Final	R	X	G	B
1	1	2	0,0200	0,0600	0	0,0600
2	1	3	0,0800	0,2400	0	0,0500
3	2	3	0,0600	0,1800	0	0,0400
4	2	4	0,0600	0,1800	0	0,0400
5	2	5	0,0400	0,1200	0	0,0300
6	3	4	0,0100	0,0300	0	0,0200
7	4	5	0,0800	0,2400	0	0,0500

Tabla 2. Parámetros de las líneas de la red de la Fig. 31

GENERADOR	Nudo	P	Q	Q _{min}	Q _{max}
1	1	--	--	-5	5
2	2	0,4000	--	-3	3

Tabla 3. Datos de los generadores de la red de la Fig. 31

CARGA	Nudo	P	Q
1	2	0,2000	0,1000
2	3	0,4500	0,1500
3	4	0,4000	0,0500
4	5	0,6000	0,1000

Tabla 4. Datos de las cargas de la red de la Fig. 31

Se trata de una red empleada en el libro de Enrique Acha, “FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks” (referencia [1]), por lo que los resultados para los flujos de carga son conocidos y reproducidos en las tablas **Tabla 5** y **Tabla 6**).

NUDO	V	δ	P	Q
1	1,0600	0	1,3112	0,9082
2	1	-0,0360	0,4000	-0,6159
3	0,987	-0,0810	-0,4500	-0,1500
4	0,984	-0,0866	-0,4000	-0,0500
5	0,972	-0,1007	-0,6000	-0,1000

Tabla 5. Valores de las tensiones y la potencia en los nudos según la referencia [1]

LÍNEA	P ₁	Q ₁	P ₂	Q ₂
1	0,893	0,7402	-0,868	-0,729
2	0,418	0,168	-0,403	-0,175
3	0,245	-0,025	-0,241	-0,0035
4	0,277	-0,017	-0,273	-0,0083
5	0,547	0,056	-0,5345	-0,048
6	0,194	0,029	-0,193	-0,047
7	0,066	0,0055	-0,0655	-0,052

Tabla 6. Valores de las potencias en las líneas según la referencia [1]

Los resultados, mostrados en las **Tabla 7** y **Tabla 8**, obtenidos con la herramienta desarrollada en este trabajo tras 4 iteraciones, se compararon con los recogidos en las tablas **Tabla 5** y **Tabla 6**, obtenidos tras 6 iteraciones. Como puede observarse en las tablas citadas, los resultados coinciden salvo pequeñas diferencias debidas a la diferente forma de llevar a cabo el flujo de carga. En cuanto al número de iteraciones, en la bibliografía citada el número de iteraciones para llegar a la solución es una más debido a la programación,



por lo que los resultados pueden verse afectados en esa última iteración. Además de realizar una iteración más, la programación empleada en la bibliografía para calcular los resultados cuenta una iteración de más. Estos dos aspectos justifican que el número de iteraciones en que se llega a la solución sea 2 menos que en la bibliografía. Teniendo en cuenta todo ello se puede llegar a la conclusión de que el programa de cálculo desarrollado funciona de forma correcta.

NUDO	V	δ	P	Q
1	1,0600	0	1,3112	0,9082
2	1	-0,0360	0,4000	-0,6159
3	0,9872	-0,0809	-0,4500	-0,1500
4	0,9841	-0,0865	-0,4000	-0,0500
5	0,9717	-0,1006	-0,6000	-0,1000

Tabla 7. Valores de las tensiones y la potencia en los nudos con nuestra herramienta

LÍNEA	P ₁	Q ₁	P ₂	Q ₂	P _{pérdidas}	Q _{pérdidas}
1	0,8933	0,7400	-0,8685	-0,7291	0,0249	0,0109
2	0,4179	0,1682	-0,4027	-0,1751	0,0152	-0,0069
3	0,2447	-0,0252	-0,2411	-0,0035	0,0036	-0,0287
4	0,2771	-0,0172	-0,2725	-0,0083	0,0046	-0,0255
5	0,5466	0,0556	-0,5344	-0,0483	0,0122	0,0073
6	0,1939	0,0286	-0,1935	-0,0469	4,0072e-04	-0,0182
7	0,0660	0,0052	-0,0656	-0,0517	4,3100e-04	-0,0465

Tabla 8. Valores de las potencias en las líneas con nuestra herramienta

Tras la comprobación del correcto funcionamiento del cálculo de los flujos de carga en una red sin STATCOM se pasó a comprobar si tras la inclusión del STATCOM el cálculo presentaba los resultados correctos.

En esta ocasión en la referencia bibliográfica citada [1]; es decir en el libro de *Enrique Acha, "FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks"* solo existían resultados para un modo de control de los ocho programados por lo que el método de comprobación de los resultados debía ser diferente. Se han diseñado y realizado dos TEST diferentes a la hora de realizar las comprobaciones. El primer método o TEST toma como base los resultados de que se dispone en la bibliografía, mientras que el segundo TEST se hace un segundo cálculo para verificar los resultados.

5.1.1. TEST de comprobación 1

En *"FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks"* se daban resultados para los flujos de potencia empleando el modo de control 1, en el que se controla la tensión del nudo en que se conecta el STATCOM, por lo que

la primera prueba que se hizo fue empleando ese mismo modo de control. Las diferentes acciones llevadas a cabo a partir de este punto constituyen el TEST de comprobación 1. En este caso el STATCOM es conectado en el nudo 3 y mantendrá la tensión de ese nudo igual a la unidad (Fig. 32).

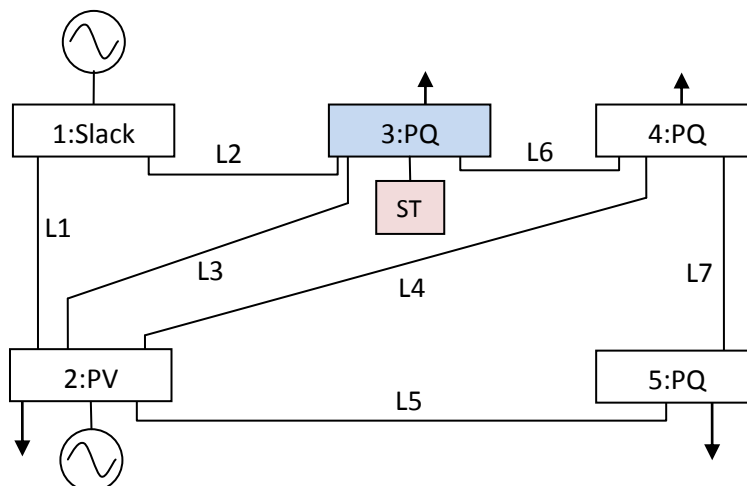


Fig. 32. Red del Test 1

Tras ejecutar el programa de cálculo desarrollado se comprueba que los resultados obtenidos (Tabla 9, Tabla 10 y Tabla 11) son los mismos que los que ofrece “FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks” por lo que se llega a la conclusión de que cálculo con el modo de control empleado funciona correctamente.

NUDO	V	δ	P	Q
1	1,0600	0	1,3106	0,8534
2	1	-0,0358	0,4000	-0,7707
3	1	-0,0844	-0,4500	-0,1500
4	0,9944	-0,0891	-0,4000	-0,0500
5	0,9752	-0,1012	-0,6000	-0,1000

Tabla 9. Prueba 1: Resultados de los nudos

LÍNEA	P_1	Q_1	P_2	Q_2	$P_{pérdidas}$	$Q_{pérdidas}$
1	0,8933	0,7400	-0,8685	-0,7291	0,0249	0,0109
2	0,4179	0,1682	-0,4027	-0,1751	0,0152	-0,0069
3	0,2447	-0,0252	-0,2411	-0,0035	0,0036	-0,0287
4	0,2771	-0,0172	-0,2725	-0,0083	0,0046	-0,0255
5	0,5466	0,0556	-0,5344	-0,0483	0,0122	0,0073
6	0,1939	0,0286	-0,1935	-0,0469	4,0072e-04	-0,0182
7	0,0660	0,0052	-0,0656	-0,0517	4,3100e-04	-0,0465

Tabla 10. Prueba 1: Resultados de las líneas

STATCOM	V	δ	Q
	1,0205	-0,0844	-0,2047

Tabla 11. Prueba 1: Resultados del STATCOM

Teniendo como referencia los resultados que se obtuvieron para el modo de control 1 se pretende comprobar el correcto funcionamiento del resto de modos de control. Para realizar estas comprobaciones se partirá de los datos obtenidos en los resultados del modo 1. Los resultados que se obtienen incluyen, entre otros, la reactiva que el STATCOM absorbe de la red; este dato se puede emplear para demostrar que el cálculo de flujos de potencia es correcto cuando el modo de control es el 2. Para ello, a la hora de introducir los datos se seleccionará el modo 2 y como valor de referencia se especificará el que se obtuvo para la reactiva absorbida por el STATCOM y que sabemos es correcto. A la hora de calcular, los resultados obtenidos deberán ser los mismos que los que se habían obtenido anteriormente para el modo 1.

Este mismo procedimiento, que se ha explicado para comprobar el correcto funcionamiento de la aplicación cuando el STATCOM trabaja en el modo 2 puede emplearse para los modos 5,6, 7 y 8, que controlan la tensión equivalente del STATCOM, la de un nudo remoto y la potencia activa y reactiva de una línea respectivamente. En estos modos el valor de control es proporcionado en los resultados de la aplicación, los valores para los últimos modos formarán parte de la columna Q1 y P1 respectivamente.

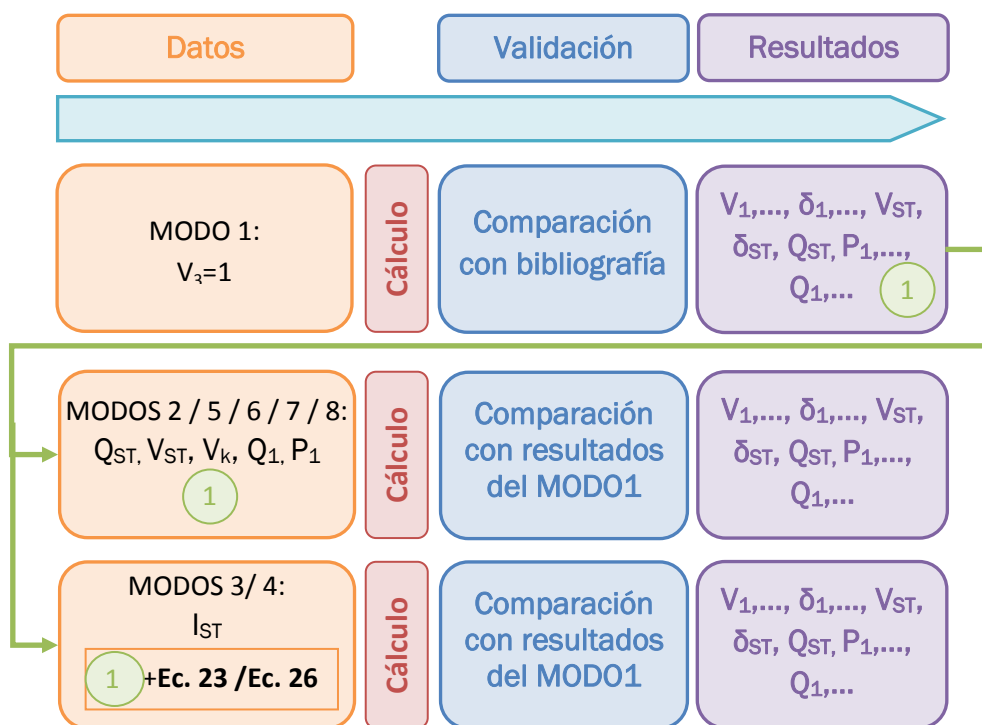


Fig. 33. Esquema del TEST de comprobación 1

Los modos de control restantes, el 3 y el 4, controlan la corriente absorbida por el STATCOM que es una magnitud que no se indica en los resultados de la aplicación. Puesto que se tienen los valores de todas las variables de estado del sistema, el cálculo es muy sencillo. Para el cálculo de estas variables se emplearán las fórmulas **Ec. 23** y **Ec. 26** que aparecen en la definición de los modos de control. El valor obtenido se empleará como se han utilizado los anteriores, es decir, se seleccionara el modo de control correspondiente en la ventana de datos y se especificará este valor como valor de referencia. El esquema de este método de comprobación de los resultados es el que aparece en **Fig. 33**.

5.1.2. TEST de comprobación 2

El TEST de comprobación 2 aprovecha los resultados obtenidos tras el empleo de cualquier modo de control para realizar un nuevo cálculo. Sea cual sea el modo de control que se está empleando; el STATCOM está absorbiendo una potencia reactiva de la red, ya sea positiva o negativa; que tras el cálculo de los flujos de carga es conocida. Esta reactiva absorbida nos permitirá establecer una nueva carga reactiva de este valor que conectada al mismo nudo en que está el STATCOM simulará su funcionamiento. Al añadir una carga del mismo valor que la potencia reactiva absorbida por el dispositivo de la red se deben obtener los mismos flujos de carga que cuando el STATCOM era quien la absorbía. Además de poderse emplear para la comprobación de cualquier modo de control, este método tiene la ventaja de que no necesita ningún resultado inicial para realizar la comparación. El esquema que muestra el procedimiento a seguir en este caso es el de **Fig. 34**.

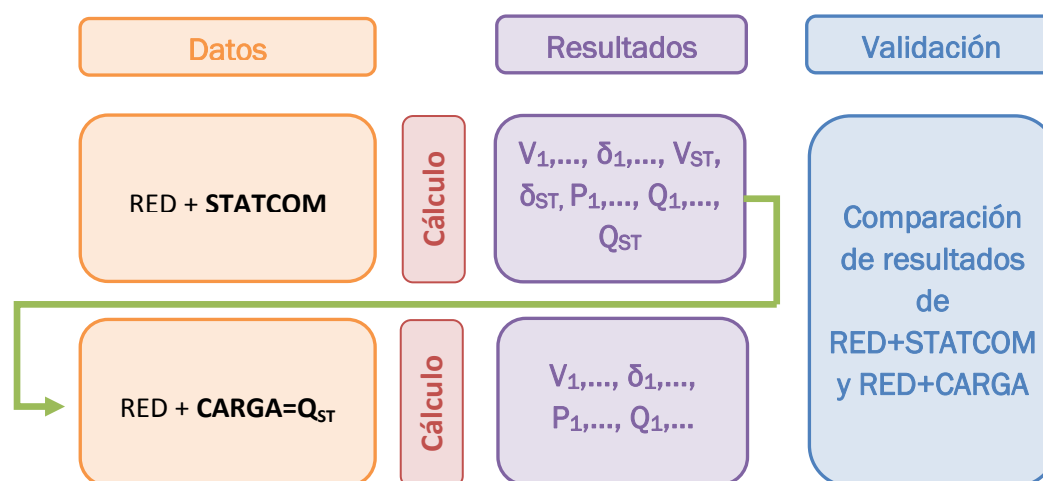


Fig. 34. Esquema del TEST de comprobación 2

En este punto conviene mencionar ciertos aspectos que se han observado durante la realización de las distintas pruebas mencionadas. Se



trata de aspectos que tienen que ver con los resultados obtenidos y con el método de resolución.

Durante las pruebas que se llevaron a cabo para comprobar el correcto funcionamiento de los distintos modos se ha observado que el número de iteraciones necesario es de 4, a excepción de los modos de control 3, 4 y 8 en los cuales son necesarias 7 u 8 iteraciones para las pruebas hechas. Estos modos controlan la intensidad absorbida, tanto capacitiva como inductiva y la potencia reactiva y activa saliente del nudo inicial de una línea respectivamente. El hecho de que se necesiten más iteraciones puede ser por dos posibles razones: que la formulación de la Jacobiana no proporcione toda la información necesaria para la convergencia del método o que la magnitud que se intenta controlar no esté suficientemente ligada a las variables de estado por lo que se tarda más en llegar a la solución. En principio, la razón del empleo de un mayor número de iteraciones en los modos 3 y 4 es la primera de las dos mencionadas, necesitando el modo de control 8 más iteraciones debido a que la variable de control está más desvinculada de las variables de estado que mayores cambios sufren en los flujos de carga. En los apartados correspondientes a las pruebas que emplean estos modos de control se ofrece una explicación más extensa de las razones por las cuales se precisa de un mayor número de iteraciones para llegar a la solución de los flujos de carga del sistema.

Por otra parte, cuando se pretende controlar la potencia activa al principio de una línea se obtienen dos posibles soluciones. Este hecho sale a relucir cuando se está comprobando el funcionamiento del modo 8. La distribución de potencias en las distintas líneas y los valores de las tensiones en los nudos no son las mismas cuando se calculan los flujos de potencia empleando el control del modo 1 que cuando se emplea el control del modo 8 tomando como referencia la potencia activa de una de las líneas obtenida mediante el modo 1, esto se debe a que la reactiva del STATCOM no converge para el mismo valor en los dos cálculos.

Para dar solución a estas cuestiones y para caracterizar la influencia del STATCOM en los flujos de carga de la red de cinco nudos presentada, se realizarán una serie de ensayos que se describen en el siguiente apartado.

5.2. Influencia del STATCOM en la red de estudio

En estos ensayos se calcularán los flujos de potencia con el STATCOM conectado a distintos nudos de la red y empleando los diferentes modos de control. Finalmente los resultados serán comparados con los logrados para la red sin STATCOM y con otros modos o localizaciones del STATCOM. Cada uno de los ensayos realizados aparece en la siguiente tabla especificando el nudo

del STATCOM, el tipo de control que se realiza y el valor de referencia del control.

Prueba	Nudo del STATCOM	Modo	Valor de control
1	3	Control de la tensión del nudo del STATCOM (3)	1
2	3	Control de la tensión del nudo 5	1
3	3	Control de la tensión del nudo 4	1
4	3	Control de la corriente capacitiva absorbida	0.5
5	4	Control de la corriente inductiva absorbida	0.5
6	5	Control de la potencia reactiva por la línea 7	0
7	4	Control de la potencia reactiva por la línea 2	0
8	4	Control de la potencia activa por la línea 7	0.1

Tabla 12. Tabla resumen de las pruebas realizadas

5.2.1. Control de la tensión del nudo del STATCOM: Prueba 1

Se trata de la situación que se ha tomado como base para la realización de las comprobaciones de funcionamiento. El STATCOM se encuentra conectado en el nudo 3 y lleva a cabo el control de la tensión de ese mismo nudo para mantenerla igual a la unidad (**Fig. 32**). Los resultados obtenidos tras el cálculo con estos parámetros ya se han mostrado en **Tabla 9**, **Tabla 10** y **Tabla 11**.

El número de iteraciones necesario para llegar a estos resultados fue de 4, que coincide con las iteraciones, para este tipo de resoluciones, que se indican en la referencia bibliográfica [4]; es decir, en el libro de Xiao-Ping Zhang y otros, "Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control".

De los datos de las tablas se observa que para aumentar la tensión del nudo 3, el STATCOM debe aportar una potencia reactiva de 0.2047 (p.u.). Esta potencia reactiva desde el STATCOM hacia la red se debe a que la tensión equivalente del STATCOM (1.0205 p.u.) es mayor que la del nudo, 1 p.u.

También se observa que el ángulo de la tensión equivalente del STATCOM es igual al del nudo 3. Esta equivalencia es debida a la condición de no generación (ni absorción) de potencia activa. En los casos en los que la impedancia del STATCOM solo está formada por una reactancia ambos argumentos deberán ser iguales o estar desfasados π radianes. Los ángulos del resto de tensiones de la red permanecen constantes o varían muy poco respecto al valor original, lo que tendrá efecto sobre el valor de los flujos de potencia activa. En general, en la mayoría de las pruebas realizadas los ángulos de las tensiones nodales no sufren cambios significativos.



A partir de los datos de la **Tabla 9**; que muestra las tensiones nodales, tanto magnitud como ángulo, y las potencias en cada nudo, se observa que, además de aumentar la tensión del nudo al que está conectado, el STATCOM eleva la tensión del nudo 4 de la red un 1% respecto a la red sin STATCOM, pasando a valer 0,9944 p.u. La reactiva inyectada por el dispositivo en la red no afecta de una forma tan destacada al nudo 5 ya que no existe ninguna línea que los una.

En el sistema existen dos generadores colocados en los nudos 1 y 2. Mientras que el del nudo 1 es generador neto de potencia reactiva, el del nudo 2 es consumidor. Con la inyección de potencia reactiva procedente del STATCOM el primero de los generadores reduce su producción de este tipo de energía un 6%, a la vez que el segundo generador aumenta su consumo de potencia reactiva un 25%, ambos porcentajes referidos a la red sin STATCOM. El porcentaje de variación de la potencia de los generadores difiere entre ellos debido a que inicialmente generaban o absorbían potencias diferentes.

La distribución de potencias aparentes en la red es muy similar a la anterior, las líneas que más potencia aparente transportaban son las que más potencia transportan ahora y viceversa, no obstante, algunas líneas experimentan aumentos o disminuciones de la potencia reactiva muy importantes. Es el caso de la línea 1, que une los nudos 1 y 2, cuya reactiva a la salida del nudo 1 se ve reducida un tercio su valor inicial. Otra línea que ve reducida su potencia reactiva transportada es la línea 5, entre los nudos 2 y 5. En este caso la reactiva transmitida por la línea es menor de la mitad de la reactiva que se transmitía en la situación inicial. En el lado opuesto a estas dos situaciones están los casos de las líneas 6 y 7, que ven aumentada la potencia reactiva que transportan. En el caso de las línea 6 y 7, al llegar a triplicar la reactiva que transportan el nuevo valor de la potencia aparente de esas líneas llega a ser un 20% superior al de la red sin STATCOM. Por otra parte, las líneas 3 y 4 cambian el sentido de transmisión de la reactiva en uno de sus extremos debido al hecho de que en la situación inicial transportaban poca potencia reactiva. Salvo para el caso de las líneas 6 y 7, cuya potencia ya se ha mencionado cómo aumenta, el resto de líneas no experimentan grandes cambios en la transmisión de potencia aparente debido a la diferencia de magnitud de la potencia activa y la reactiva. Para las líneas 6 y 7 sería conveniente comprobar los niveles térmicos y verificar que en la nueva situación no se sobrepasan.

Prestando atención a las pérdidas de potencia activa se observa que se reducen casi un 2%. En el caso de las pérdidas por potencia activa, su decrecimiento se ve favorecido por el descenso de las perdidas en líneas más cargadas y el aumento de éstas en las menos cargadas. La potencia generada por el nudo slack permanece prácticamente constante ya que su

variación contrarresta las pérdidas de potencia y estas no se han visto modificadas en exceso.

Se ha hablado hasta ahora de las distribuciones de potencias reactivas en la red. En lo que a la potencia activa respecta, los nuevos flujos de potencia no se ven sometidos a grandes cambios, no experimentando variaciones superiores al 2%. Esto es debido a que los ángulos de las tensiones de los nudos apenas se han modificado y es esta la variable que más influye en la potencia activa.

En resumen, la reactiva inyectada por el STATCOM eleva la tensión de los nudos más cercanos, no teniendo casi influencia sobre el resto de nudos. Esta potencia reactiva, se distribuye por las diferentes líneas que parten del nudo modificando los valores de potencia reactiva pero no los de potencia activa. Finalmente, debido a la inyección de reactiva por parte del STATCOM, los generadores generan menos reactiva y absorben más.

5.2.2. Control de la tensión de un nudo no conectado al nudo del STATCOM: Prueba 2

La Prueba 2 se concibe con la intención de caracterizar el control que tiene el STATCOM sobre la tensión de los nudos que no están directamente conectados con el nudo en el que se localiza. Se ha visto en el caso anterior que la influencia no es muy elevada pero se pretende profundizar en este aspecto y dejarlo bien definido. En la Prueba 2 el dispositivo STATCOM estará situado en el nudo 3 de nuevo, solo que en esta ocasión controlará la tensión del nudo 5 (**Fig. 35**), por lo que el modo de control será el 6. El valor de referencia que debe alcanzar la tensión de este nudo es 1..

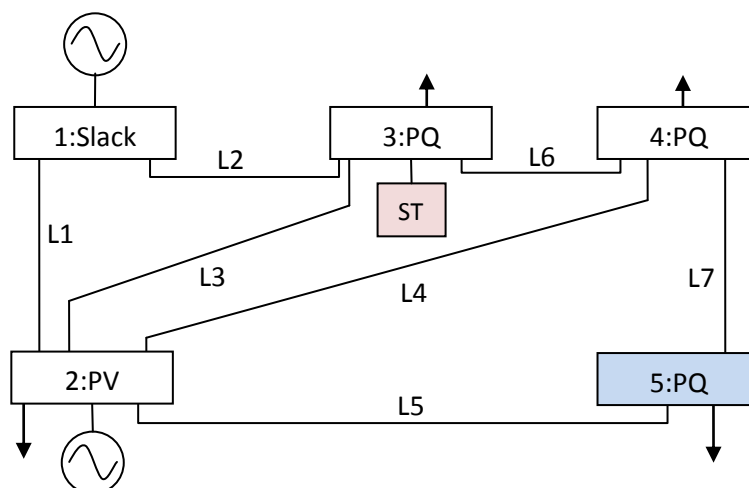


Fig. 35. Red de la Prueba 2

Los resultados obtenidos tras el cálculo de los flujos de carga aparecen en **Tabla 13**, **Tabla 14** y **Tabla 15**



NUDO	V	δ	P	Q
1	1,0600	0	1,3594	0,4504
2	1	-0,0369	0,4000	-1,8657
3	1,0910	-0,1116	-0,4500	-0,1500
4	1,0674	-0,1105	-0,4000	-0,0500
5	1	-0,1079	-0,6000	-0,1000

Tabla 13. Prueba 2: Resultados de los nudos

LÍNEA	P ₁	Q ₁	P ₂	Q ₂	P _{pérdidas}	Q _{pérdidas}
1	0,9085	0,7355	-0,8833	-0,7235	0,0252	0,0120
2	0,4508	-0,2851	-0,4316	0,2848	0,0192	-3,2320e-04
3	0,2603	-0,5952	-0,2364	0,6232	0,0239	0,0279
4	0,2846	-0,4735	-0,2674	0,4823	0,0172	0,0088
5	0,5384	-0,1735	-0,5258	0,1813	0,0126	0,0078
6	0,2180	0,7705	-0,2125	-0,7772	0,0055	-0,0067
7	0,0798	0,2449	-0,0742	-0,2813	0,0057	-0,0364

Tabla 14. Prueba 2: Resultados de las líneas

STATCOM	V	δ	Q
	1,2586	-0,1116	-1,8285

Tabla 15. Prueba 2: Resultados del STATCOM

En este caso para la resolución del flujo de carga se ha necesitado realizar un total de 5 iteraciones, una más que en el caso anterior. Esto denota un aspecto ya sabido, que la tensión de un nudo alejado se controla con mayor dificultad.

Los valores obtenidos ahora para la tensión equivalente del STATCOM son mucho superiores a los obtenidos en el caso anterior (1,2586 p.u.), también son considerablemente superiores los valores de tensión nodales comparados con los de la red sin STATCOM. Este es uno más de los indicios que dejan ver el mal control que se realizaría en la red si se tratara de controlar la tensión de un nudo alejado. Consecuencia de esta tensión, el STATCOM está inyectando a la red una potencia reactiva equiparable incluso a la de los generadores en los nudos 1 y 2.

El objetivo del control es mantener la tensión del nudo 5 en 1 p.u., para lo cual es necesario aumentar la tensión de los nudos entre el STATCOM y este. Ambos nudos presentan una tensión superior a los nudos generación, siendo mayor para el nudo en que se encuentra el STATCOM. La tensión del nudo 3 es de 1,0910 p.u. y la del nudo 4 de 1,0674 p.u., ambas superiores a las tensiones permitidas en los nudos de las redes de transporte de 400kV que se establece en 1.05 p.u., o muy cercanas al valor límite en caso de

tratarse de una red de 220kV (1.114), por lo que su uso se vería muy limitado. A pesar de que este modo de control, empleado de esta forma, es de dudosa eficiencia se mostrarán el resto de consecuencias que tiene para la red.

Desde el punto de vista de los generadores, se reducen en gran medida la potencia reactiva generada por el generador situado en el nudo 1, pasando a ser la mitad que en la red base y se triplica la reactiva que consume el generador del nudo 2, consecuencia directa de la inyección reactiva del STATCOM (-1,8285 p.u.). En lo que respecta a la distribución de potencias aparentes en la red, si en el caso anterior se mantenía más o menos sin cambios, ahora las líneas más cercanas al nudo 3 experimentan grandes incrementos de la reactiva transmitida, dejando de ser de las líneas con menos transporte de reactiva para ser de las que más reactiva transportan. La línea 6 pasaría a ser la línea con mayor transporte de energía reactiva, superando la línea 1 que une ambos generadores; 0,7705 frente a 0,7355. Las líneas que más incrementan la reactiva transportada son: 3, 4, y 7 debido a que eran las líneas por las que menos reactiva circulaba. Además del aumento de la potencia reactiva transmitida sufrido por estas líneas, la línea 5 pasa de transmitir reactiva del nudo 2 al 5 a hacerlo al revés. Esta nueva distribución de los flujos de potencia tiene su justificación en la enorme cantidad de potencia reactiva generada en el nudo 3 que tiene que ser redirigida al 2.

Estos inmensos flujos de reactiva son debidos a la necesidad de inyección de este tipo de energía a la red para que aumente su tensión del nudo 5 hasta el valor especificado. Y son la causa de que los flujos de potencia aparente por la red se lleguen a cuadruplicar y doblar para más de una de las líneas, con el consiguiente riesgo de sobrepasar los límites térmicos que ello supone.

En lo que respecta a las pérdidas de potencia activa del sistema, como no cabía esperar otra cosa, son muy elevadas. El valor que toman supera en un 78% las pérdidas que existían en la red inicial. Este incremento de las pérdidas debe ser compensado por la potencia activa generada en el nudo slack, que en comparación con la red sin STATCOM debe generar un 3% más de potencia activa. Aunque se trate de un aumento del 3%, no se trata de un pequeño aumento ya que está referido a la potencia total del sistema. En este caso los valores de los ángulos de las tensiones sí se ven modificados, llegando a experimentar incrementos del 30% respecto a la red original. Los nudos en los que los ángulos sufren un mayor cambio son los nudos 3 y 4.

La suma de las circunstancias anteriores ponen de relieve la no idoneidad de este modo de control empleado sobre nudos alejados. Ante la

necesidad de control de la tensión del nudo 5 la mejor opción sería la de la colocación del STATCOM en ese mismo nudo. Debido a la similitud que presenta con la Prueba 1, los resultados obtenidos al colocar el STATCOM en el nudo 5 no se han incluido, pero sí se hará mención a las ventajas que presenta frente al control desde el nudo 3. A excepción de la tensión del nudo de control, el resto de tensiones no se ven afectadas lo que supone una gran ventaja en su explotación. Debido a la menor tensión a la que se encontraba inicialmente el nudo 5, la reactiva debida al STATCOM debe ser mayor que en la Prueba 1 pero en ningún caso las potencias aparentes presentan aumentos tan desproporcionados como los de la Prueba 2. En comparación con la red sin STATCOM, la potencia aparente al inicio de la línea 7 es un 50% mayor, permaneciendo el resto de potencias aparentes en márgenes inferiores al +10%. En este caso, las pérdidas de potencia activa no son tan elevadas como en la Prueba 2, aumentando solo un 7% respecto a las de la red sin STATCOM y no influyendo apenas en la generación de potencia activa.

5.2.3. Control de la tensión de un nudo conectado al nudo del STATCOM: Prueba 3

Ya que no queda definida completamente la posible influencia del STATCOM sobre la tensión de nudos que sí están conectados con el suyo, se plantea la siguiente prueba. En este caso se pretende controlar la tensión de un nudo que si bien no es en el que está el STATCOM, está conectado a este. El STATCOM se localizará de nuevo en el nudo 3. Por lo dicho y por la topología de la red, el único nudo cuya tensión puede ser controlada será el 4; ya que las tensiones de los nudos 1 y 2 son conocidas. En **Fig. 36** se observa el esquema de esta prueba. El valor de referencia que se fija es 1.

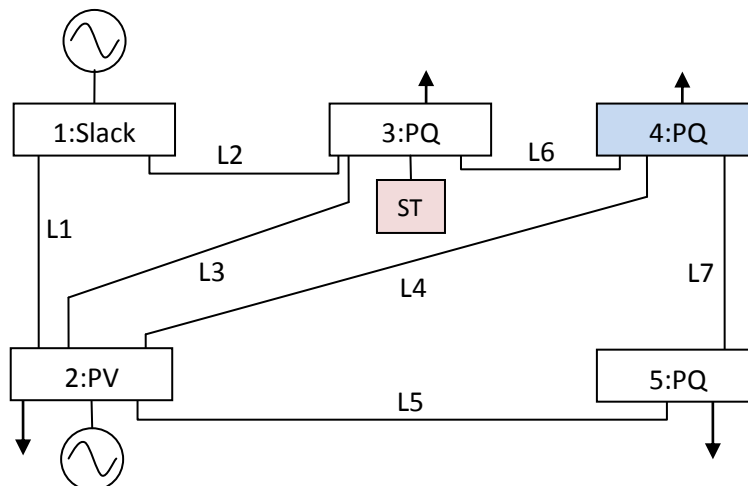


Fig. 36. Red de la Prueba 3

Partiendo de estos datos el resultado del flujo de carga es el mostrado en las tablas: **Tabla 16**, **Tabla 17** y **Tabla 18**.

NUDO	V	δ	P	Q
1	1,0600	0	1,3110	0,8233
2	1	-0,0358	0,4000	-0,8552
3	1,0070	-0,0864	-0,4500	-0,1500
4	1	-0,0906	-0,4000	-0,0500
5	0,9771	-0,1015	-0,6000	-0,1000

Tabla 16. Prueba 3: Resultados de los nudos

LÍNEA	P ₁	Q ₁	P ₂	Q ₂	P _{pérdidas}	Q _{pérdidas}
1	0,8904	0,7408	-0,8656	-0,7302	0,0248	0,0107
2	0,4206	0,0825	-0,4071	-0,0955	0,0135	-0,0130
3	0,2452	-0,1333	-0,2408	0,1062	0,0044	-0,0271
4	0,2765	-0,1038	-0,2715	0,0788	0,0050	-0,0250
5	0,5440	0,0121	-0,5321	-0,0058	0,0119	0,0063
6	0,1979	0,1584	-0,1973	-0,1766	6,6654e-04	-0,0181
7	0,0687	0,0477	-0,0679	-0,0942	8,0098e-04	-0,0465

Tabla 17. Prueba 3: Resultados de las líneas

STATCOM	V	δ	Q
	1,0387	-0,0864	-0,3191

Tabla 18. Prueba 3: Resultados del STATCOM

En esta ocasión el número de iteraciones necesarias para alcanzar la solución del problema de los flujos de potencias es 4. Este número de iteraciones es el que cabría esperar, no superando las empleadas para hacer el cálculo de la red original.

A diferencia de lo que ocurría en la prueba anterior la tensión equivalente del STATCOM no es tan elevada y, por tanto, la reactiva inyectada es menor. En comparación con el control de la tensión del propio nudo donde se encuentra el STATCOM, los valores obtenidos en esta ocasión para tensión y potencia reactiva inyectada son superiores ya que el nudo cuya tensión se pretende controlar se encuentra más alejado del STATCOM.

Las tensiones de los nudos experimentan un ligero aumento, siendo más notable en el nudo 3, que es en el que se encuentra el STATCOM. Como ya ocurría anteriormente, el nudo menos afectado es el 5 que apenas ve modificado su valor de tensión.

Los flujos de potencia presentan los mismos cambios que en la Prueba 1 pero en este caso están más acentuados debido a la mayor reactiva inyectada en la red. Las potencias aparentes transmitidas por las líneas llegan a ser un 40% superiores a la red original, en el caso más extremo; frente al aumento del 20% que se experimentaba en la Prueba 1. En ningún

caso llegan a ser tan elevados como para la Prueba 2. Las pérdidas de potencia activa son ligeramente mayores en este caso que en la Prueba 1, siendo inferiores a las de la red inicial.

Comparando las pruebas 2 y 3 se hace evidente que el modo de control 6 debe emplearse para controlar la tensión de nudos adyacentes al nudo del STATCOM. Este modo permite el control de la tensión de un nudo sin variar en gran medida los valores de las tensiones de nudo y manteniendo unos flujos de potencia que permiten que las pérdidas no sean elevadas. Las prestaciones que ofrece son muy similares a las que se obtienen con el control de la tensión del nudo local pero en este caso los flujos de reactiva son mayores por lo que convendría revisar este aspecto para decidir sobre su conveniencia. Los mayores aumentos relativos de reactiva por la red se dan en las líneas que transportaban menor potencia reactiva, esto unido a que la potencia reactiva transportada es menor que la activa hace que los aumentos en la potencia aparente de la línea no sean muy significativos.

5.2.4. Control de la corriente capacitiva absorbida: Prueba 4

El modo de control 3 permite decidir qué corriente capacitiva I_{ST} circula de la red al STATCOM. La corriente I_{ST} está definida por **Ec. 14**, que considera la circulación de corriente desde la red al STATCOM, por esta razón el valor final de I_{ST} será negativo cuando la corriente es capacitiva. Este tipo de control es muy similar a la compensación que se realiza con condensadores, solo que en el caso de emplear condensadores la magnitud que se suele emplear para caracterizarla suele ser la potencia reactiva o la reactancia.

En la Prueba 4 se localiza el STATCOM en el nudo 3 (**Fig. 37**) trabajando en el modo de control 3 y con un valor de referencia asignado de 0.5 (capacitivo).

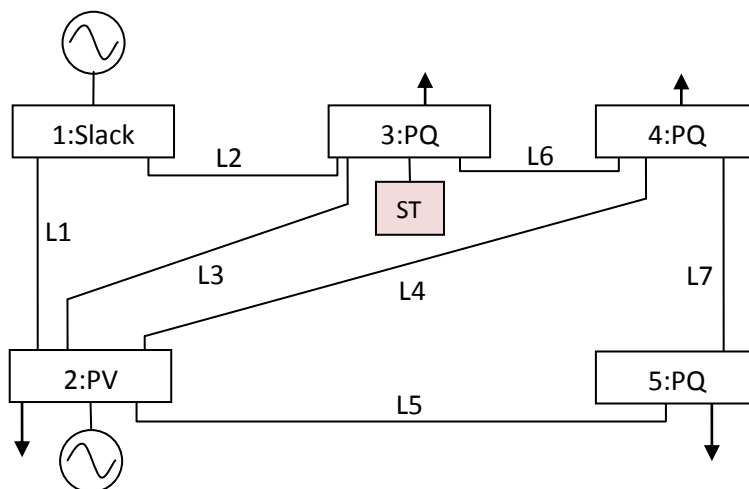


Fig. 37. Red de la Prueba 4

Teniendo en cuenta estas consideraciones se ha realizado el cálculo de los flujos de carga, obteniéndose los resultados de las tablas: **Tabla 19**, **Tabla 20** y **Tabla 21**.

NUDO	V	δ	P	Q
1	1,0600	0	1,3128	0,7739
2	1	-0,0358	0,4000	-0,9929
3	1,0184	-0,0896	-0,4500	-0,1500
4	1,0091	-0,0931	-0,4000	-0,0500
5	0,9802	-0,1022	-0,6000	-0,1000

Tabla 19. Prueba 4: Resultados de los nudos

LÍNEA	P_1	Q_1	P_2	Q_2	$P_{pérdidas}$	$Q_{pérdidas}$
1	0,8899	0,7409	-0,8652	-0,7303	0,0248	0,0106
2	0,4229	0,0329	-0,4099	-0,0480	0,0130	-0,0150
3	0,2460	-0,1958	-0,2405	0,1715	0,0055	-0,0243
4	0,2765	-0,1538	-0,2709	0,1304	0,0057	-0,0234
5	0,5427	-0,0130	-0,5309	0,0190	0,0118	0,0059
6	0,2004	0,2357	-0,1994	-0,2533	9,7087e-04	-0,0176
7	0,0703	0,0729	-0,0691	-0,1190	0,0011	-0,0460

Tabla 20. Prueba 4: Resultados de las líneas

STATCOM	V	δ	Q
	1,0684	-0,0896	-0,5092

Tabla 21. Prueba 4: Resultados del STATCOM

En esta ocasión el número de iteraciones llevado a cabo ha sido de 7. En comparación con otros modos de control este presenta una peor convergencia, necesitando más iteraciones para llegar a la solución del problema. Esto puede ser debido a una no apropiada construcción de la matriz Jacobiana, que es el elemento del método de resolución a través del cual se obtienen las soluciones, a unos valores iniciales no adecuados o debido a que la variable a controlar, I_{ST} , no depende en demasía de las variables de estado.

A partir de las distintas Jacobianas que se generan en el proceso iterativo, así como de las diferencias entre las potencias netas y las calculadas se observan grandes diferencias entre esta resolución y cualquiera de las anteriores para las que se han necesitado solamente 4 iteraciones. A continuación se señalan las diferencias que motivan la necesidad de un mayor número de iteraciones. La fila de elementos de la Jacobiana correspondientes a la condición de control toma valores muy superiores a los que se suelen dar debido a la existencia de términos muy pequeños en los



denominadores de las expresiones que definen estos elementos (**Ec. 64 a Ec. 71**). El valor inicial del argumento de la tensión equivalente del STATCOM cobra especial importancia, variando considerablemente el número de iteraciones dependiendo del valor inicial escogido. Al principio se trabajaba con valores iniciales de 0 radianes pero las matrices obtenidas eran singulares y se precisaban muchas iteraciones por lo que finalmente el valor inicial empleado es -0,1 radianes.

Por otra parte, el vector de diferencias que se multiplica por la inversa de la matriz Jacobiana toma valores superiores a la unidad hasta la tercera iteración, mientras que cuando se necesitan cuatro iteraciones para resolver el problema solo se presentan estos valores en la primera iteración. Una vez la solución de la iteración está próxima a la final, el método tarda igual en converger que cuando se trata de otros modos, 4 iteraciones.

En cuanto a los valores obtenidos para las diferentes magnitudes, ya que se trata de una compensación capacitiva como en los casos anteriores, son similares a los ya vistos. Las tensiones de los distintos nudos de la red aumentan y con ellas, los flujos de potencia reactiva por las todas las líneas a excepción de la que une los dos generadores, que no varía.

Al estar la tensión del nudo 3 muy próxima a la unidad y no existir demanda ni generación de potencia activa por parte del STATCOM, el valor de la potencia reactiva absorbida (en p.u.) es prácticamente igual al valor asignado como referencia para la corriente capacitiva. Efectivamente, el valor de la potencia reactiva es mayor que en las pruebas 3 y 1 por lo que los flujos por las líneas son también mayores.

Aunque en los casos anteriores (Pruebas 1 y 3) las pérdidas de potencia activa se veían reducidas respecto a la red sin STATCOM, en este caso son un 2% mayores. Estas pérdidas de potencia activa se ven compensadas por el leve aumento de potencia activa generada. También se modifica la potencia reactiva generada, disminuyendo la inductiva y aumentando la capacitiva.

5.2.5. Control de la corriente inductiva absorbida: Prueba 5

Esta prueba se realiza para contrastar la compensación inductiva y la capacitiva. Teniendo en cuenta que la tensión de todos los nudos con tensión variable es inferior a la unidad, el empleo de este tipo de compensación la reducirá más por lo que en la práctica no sería de mucha utilidad para esta red. En esta ocasión el STATCOM se sitúa en el nudo 4 de la red (**Fig. 38**) y el valor de referencia será de nuevo 0.5, el modo de control empleado es el 4, control de la corriente capacitiva absorbida. Los valores de las magnitudes obtenidos tras el cálculo se muestran en la **Tabla 22**, la **Tabla 23** y la **Tabla 24**.

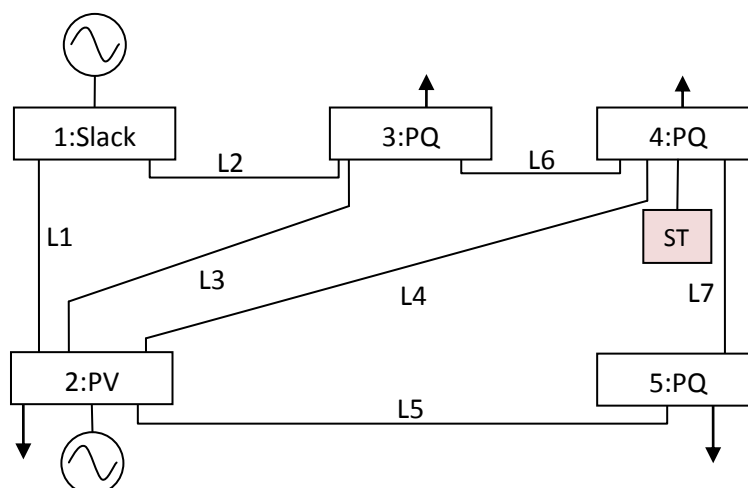


Fig. 38. Red de la Prueba 5

NUDO	V	δ	P	Q
1	1,0600	0	1,3203	1,0137
2	1	-0,0365	0,4000	-0,2112
3	0,9622	-0,0745	-0,4500	-0,1500
4	0,9519	-0,0779	-0,4000	-0,0500
5	0,9607	-0,0989	-0,6000	-0,1000

Tabla 22. Prueba 5: Resultados de los nudos

LÍNEA	P_1	Q_1	P_2	Q_2	$P_{pérdidas}$	$Q_{pérdidas}$
1	0,9024	0,7373	-0,8773	-0,7258	0,0251	0,0115
2	0,4180	0,2764	-0,3989	-0,2705	0,0190	0,0059
3	0,2470	0,1116	-0,2423	-0,1360	0,0047	-0,0244
4	0,2783	0,1589	-0,2718	-0,1773	0,0066	-0,0184
5	0,5520	0,1441	-0,5388	-0,1333	0,0132	0,0108
6	0,1912	0,2566	-0,1901	-0,2714	0,0012	-0,0148
7	0,0618	-0,0773	-0,0612	0,0333	6,0052e-04	-0,0439

Tabla 23. Prueba 5: Resultados de las líneas

STATCOM	V	δ	Q
	0,9019	-0,0779	0,4760

Tabla 24. Prueba 5: Resultados del STATCOM

En este caso el número de iteraciones necesario fue de 8, una más que en el anterior. Vuelve a ocurrir lo mismo que anteriormente, las diferencias entre los valores de referencia y los calculados son muy elevadas al principio y tardan unas iteraciones en reducirse.

El hecho de proporcionar una compensación inductiva en lugar de capacitiva es el motivo de que ahora la reactiva absorbida por el STATCOM



sea positiva. Para que esta potencia reactiva sea positiva la tensión equivalente del SATACOM debe ser menor que la del nudo al que está conectado en el caso en que ambas tensiones estén en fase, en este caso es de 0,9019 p.u.. Al estar absorbiendo potencia reactiva de la red la tensión del nudo 4 se ve reducida por lo que la potencia tomada de la red por el STATCOM no está tan cerca del valor de referencia (p.u.) dado para la corriente como en el control capacitivo.

La potencia inductiva tomada de la red da como resultado los efectos contrarios a los que se daban hasta ahora empleando compensación capacitiva. A pesar de que la tensión de los nudos 3, 4 y 5 se ve reducida, su valores no son nunca inferiores a 0.95 p.u.. En el caso de el STATCOM se encontrara conectado a una red de 400kV esta tensión sería inferior al límite de 0.975 p.u. establecido, si la red a la que se encuentra conectado es de 220kV no habría problema ya que el límite se fija en 0.932 p.u.

Respecto a la compensación capacitiva de los casos anteriores, se produce un cambio en el sentido de transmisión de la potencia reactiva en las líneas 3, 4 y 7. Al haber aumentado el consumo de potencia reactiva en el nudo 4 los flujos de potencia reactiva acaban en este nudo en lugar de partir de él. Las líneas cuyo flujo de potencia reactiva no cambia de sentido aumentan la transmisión. Además de la línea 1, cuya potencia reactiva no se ha visto afectada hasta el momento por ninguno de los modos de control empleados, existe otra línea que respecto a la compensación capacitiva realizada en la anterior prueba no modifica la potencia que transmite, esta línea es la línea que une los nudos 3 y 4. La línea 6 no cambia ni el sentido ni la magnitud de la potencia reactiva que transmite respecto a la prueba anterior porque en el caso anterior la reactiva era generada por el STATCOM en el nudo 3 y ahora esa misma reactiva es consumida por el dispositivo en el otro extremo de la línea. Como viene ocurriendo en todas las pruebas realizadas los flujos de potencia activa no se ven afectados en gran manera por la inclusión de este dispositivo. Esto es debido a la poca influencia que tiene sobre los ángulos de las tensiones nodales la inyección o absorción de potencia reactiva. De forma general la potencia aparente transmitida aumenta.

Las pérdidas de potencia activa a lo largo de la red son muy superiores a las existentes cuando se realizó la compensación capacitiva. En esta ocasión llegan a ser un 14% superiores a las que presentaba la red sin el STATCOM. Estas pérdidas han de ser compensadas por el generador del nudo slack que debe aumentar la potencia activa generada más de un 10%. En lo que a potencia reactiva se refiere, sucede lo contrario a lo que había estado sucediendo, se genera más reactiva inductiva y menos capacitiva ya que la demanda de la primera ha aumentado.

Este modo de control se ha empleado en esta red para comprobar qué efectos tenía sobre ella y compararlos con los producidos con el modo de control de la corriente capacitiva. En condiciones normales no debería haberse empleado puesto que se trata de una compensación inductiva que está indicada para casos de carga baja y por tanto perfiles de tensión elevados y no para esta situación en la que las tensiones de todos los nudos eran inferiores a la unidad.

5.2.6. Control de la potencia reactiva en una línea adyacente al nudo del STATCOM: Prueba 6

Como se ha venido viendo a lo largo de las distintas pruebas realizadas, la inclusión del STATCOM modifica los flujos de carga viéndose más afectadas aquellas líneas directamente en contacto con el nudo en el que se sitúa el STATCOM. Aunque no es una forma de control que se emplee de forma generalizada, es evidente que si este tipo de dispositivos modifican los flujos de carga podrían emplearse para hacer que por ciertas líneas circulase la reactiva deseada.

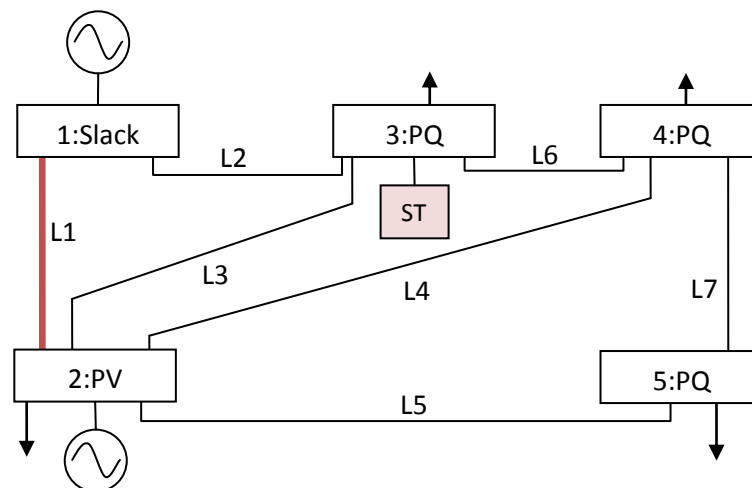


Fig. 39. Red del control de la reactiva por la línea 1

Teniendo en cuenta lo anterior se hizo una prueba en la que el STATCOM, localizado en el nudo 3, controlaba la reactiva por la línea 1, que conecta los nudos 1 y 2 para que su valor fuese de 0.7 p.u. (Fig. 39). La resolución de este problema de flujos de carga precisaba 24 iteraciones para llegar a la solución deseada. Los resultados obtenidos tras las 24 iteraciones estaban fuera de todo margen. Por ejemplo, las tensiones de los nudos llegaban a 1,4 (p.u.); la tensión equivalente del STATCOM superaba 2 (p.u.) y la reactiva inyectada a la red ascendía a 17, todos ellos en valores por unidad. Esto deja ver que la potencia reactiva entre estos dos nudos no puede ser controlada.

Las dos ideas anteriores: que la potencia reactiva de una línea puede ser controlada y que la potencia reactiva de la línea 1 no puede ser controlada es algo que aunque contradictorio ya se intuía de antemano. En las pruebas anteriores; tanto si se inyectaba potencia reactiva como si se absorbía, la reactiva por la línea 1 no sufría cambios significativos. Por otra parte, atendiendo a la expresión **Ec. 30** que describe la potencia reactiva saliente de un nudo, la única variable que podemos alterar para modificar la reactiva por la línea 1 es el ángulo de la tensión del nudo 2 ya que el resto de variables son fijas. Ya que los STATCOM actúan variando la magnitud de la tensión de los diferentes nudos de la red teniendo y tienen muy poca influencia sobre el argumento, el control de la potencia reactiva en esta línea no ha podido ser llevado a cabo.

Ya que en cualquiera de las otras líneas existen más variables para ser modificadas se plantea una nueva prueba en la que se emplea el modo de control 7. En esta prueba se intentará controlar la potencia reactiva que circula por la línea 7 (Q_1), que une los nudos 4 y 5. El valor de referencia especificado será 0 y el STATCOM se situará en el nudo 5. Esta situación es la que se muestra en **Fig. 40**.

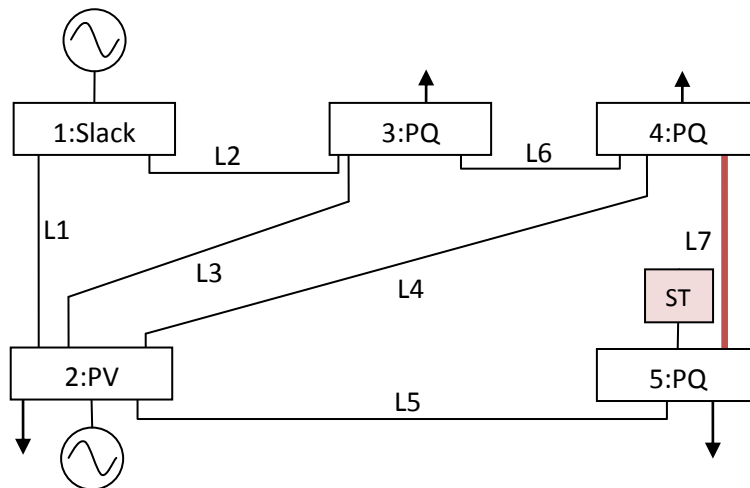


Fig. 40. Red de la Prueba 6

Los resultados tras la resolución de los flujos de carga son los que se observan en la **Tabla 25**, la **Tabla 26**, y la **Tabla 27**.

Esta prueba no conllevó ningún problema de convergencia ya que el número de iteraciones necesarias para la resolución fue 4.

El hecho de que la reactiva al principio de la línea sin STATCOM fuese de solo 0.066 p.u. unido que la línea se encuentra directamente conectada al nudo en que está el STATCOM hace que la potencia reactiva que es necesario inyectar sea solo de 0.0186 p.u. Por esta razón tanto las tensiones como los flujos de potencia apenas se ven modificados. Para la potencia activa no se

producen cambios notables mientras que los cambios en los flujos de potencia reactiva varían entorno al $\pm 10\%$.

NUDO	V	δ	P	Q
1	1,0600	0	1,3111	0,9068
2	1	-0,0360	0,4000	-0,6338
3	0,9876	-0,0810	-0,4500	-0,1500
4	0,9845	-0,0866	-0,4000	-0,0500
5	0,9734	-0,1011	-0,6000	-0,1000

Tabla 25. Prueba 6: Resultados de los nudos

LÍNEA	P_1	Q_1	P_2	Q_2	$P_{pérdidas}$	$Q_{pérdidas}$
1	0,8932	0,7400	-0,8684	-0,7291	0,0249	0,0109
2	0,4179	0,1668	-0,4027	-0,1739	0,0151	-0,0071
3	0,2446	-0,0269	-0,2411	-0,0018	0,0036	-0,0287
4	0,2771	-0,0195	-0,2724	-0,0061	0,0046	-0,0256
5	0,5467	0,0417	-0,5346	-0,0347	0,0121	0,0070
6	0,1938	0,0257	-0,1934	-0,0439	3,9791e-04	-0,0183
7	0,0658	-2,9143e-16	-0,0654	-0,0467	4,0619e-04	-0,0467

Tabla 26. Prueba 6: Resultados de las líneas

STATCOM	V	δ	Q
	0,9753	-0,1011	-0,0186

Tabla 27. Prueba 6: Resultados del STATCOM

En la línea objeto del control la potencia en el inicio de la línea es de $0.0658 + 0j$ p.u.. El valor de la potencia reactiva coincide con el especificado y la potencia activa es la misma que cuando no se emplea ningún tipo de control. Esto da como resultado que la potencia aparente al inicio de la línea pase de 0,0662 a 0,0658 p.u. Aunque la disminución de la potencia aparente no es muy elevada es la mayor que podría conseguirse transmitiendo la misma potencia activa. En el extremo final de la línea la potencia reactiva no es nula, resultando una potencia aparente de 0,0804 que se ha reducido desde 0,0835. Debido a que las potencias reactivas en el resto de las líneas no aumentan demasiado, la potencia aparente en ellas no solo no aumenta sino que en algunas de ellas se reduce. En todas ellas los valores de potencia aparente al inicio no ha sufrido cambios superiores al 4%.

Al reducir hasta cero el valor de la potencia reactiva podría aumentarse la potencia activa que se transmite sin sobrepasar los límites térmicos ya que la reducción de la potencia aparente en la línea representa una disminución en la corriente que circula, disminuyéndose la temperatura de la línea. Este modo de control podría emplearse en situaciones en las que es necesaria una

mayor transmisión de potencia activa sin aumentar la carga de la línea o cuando la carga está muy cercana su al límite térmico de la línea.

Ha quedado probado que el control de la potencia reactiva que circula por una línea adyacente al nudo en que se encuentra el STATCOM es fácilmente controlable y de gran utilidad. Si esa línea, además, está poco cargada, la influencia de este control sobre el resto de los flujos de potencia a lo largo de la red es mínima.

5.2.7. Control de la potencia reactiva en una línea remota: Prueba 7

Conocida la capacidad de control de la potencia reactiva en una línea adyacente, se pretende ahora caracterizar el alcance del control de la potencia reactiva de una línea que no está directamente conectada con el nudo en que se encuentra el STATCOM. Con este fin se plantea la Prueba 7 en la que desde el nudo 4 se pretende controlar la potencia reactiva por la línea 2, que une los nudos 1 y 3 (Fig. 41). El valor de referencia para la potencia reactiva al principio de la línea será de 0. Esta prueba se diferencia de la anterior no solo en que la línea no se encuentra en contacto con el STATCOM, sino también en que la reactiva que circulaba inicialmente por la línea 2 era mayor que la que circulaba por la línea 7: 0,1682 p.u. en el nudo 1, frente a 0,0052 en el nudo 4..

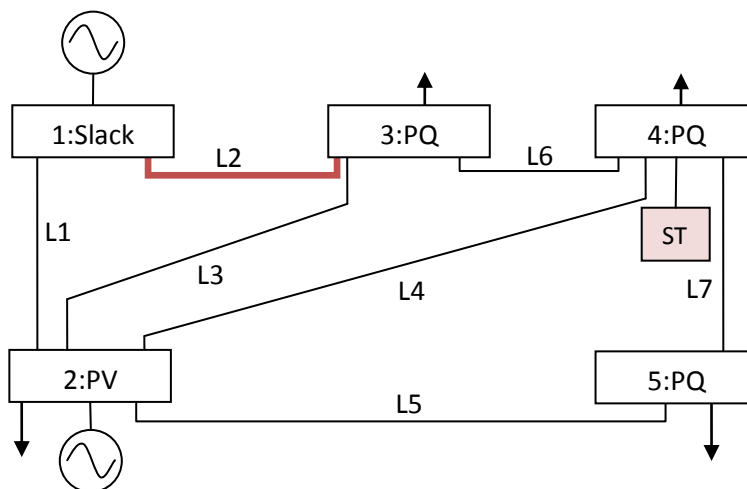


Fig. 41. Red de la Prueba 7

En las Tabla 28, Tabla 29 y Tabla 30 se muestran los resultados obtenidos para este control

En esta ocasión tanto la tensión equivalente del STATCOM como la potencia reactiva inyectada son significativamente mayores que en el caso anterior, 1,1115 y 0,8029 respectivamente. La mayor inyección de potencia reactiva propicia que las tensiones de los nudos de la red aumenten, afectando más al nudo en que se encuentra el STATCOM que eleva su tensión hasta 1,0339 p.u.. Respecto a la red sin STATCOM, las líneas 3, 4 y 7

aumentan en gran medida la transmisión de potencia reactiva, lo que se hace notar en los flujos de potencia aparente en la red. Además, la línea 6 cambia su sentido de transmisión de la reactiva, siendo ahora mayor la transmisión de este tipo de energía. Las únicas líneas en las que disminuye la potencia aparente son la línea de control y la línea 5 que al cambiar el sentido del flujo de reactiva, transmite menos potencia.

NUDO	V	δ	P	Q
1	1,0600	0	1,3194	0,7397
2	1	-0,0360	0,4000	-1,2370
3	1,0259	-0,0919	-0,4500	-0,1500
4	1,0339	-0,1008	-0,4000	-0,0500
5	0,9886	-0,1045	-0,6000	-0,1000

Tabla 28. Prueba 7: Resultados de los nudos

LÍNEA	P_1	Q_1	P_2	Q_2	$P_{pérdidas}$	$Q_{pérdidas}$
1	0,8942	0,7397	-0,8693	-0,7288	0,0249	0,0109
2	0,4251	-2,5376e-16	-0,4122	-0,0156	0,0129	-0,0156
3	0,2459	-0,2369	-0,2395	0,2152	0,0065	-0,0217
4	0,2817	-0,2900	-0,2726	0,2761	0,0091	-0,0140
5	0,5417	-0,0814	-0,5298	0,0874	0,0119	0,0061
6	0,2017	-0,3496	-0,2002	0,3328	0,0015	-0,0168
7	0,0728	0,1440	-0,0702	-0,1874	0,0026	-0,0434

Tabla 29. Prueba 7: Resultados de las líneas

STATCOM	V	δ	Q
	1,1115	-0,1008	-0,8029

Tabla 30. Prueba 7: Resultados del STATCOM

En ninguna de las líneas se ve modificada la potencia activa transmitida a lo largo de ellas de forma significativa. Sin embargo, las pérdidas de potencia activa aumentan más de un 10% respecto al caso sin STATCOM y también respecto al caso en el que se controlaba la potencia reactiva por una línea adyacente.

Debido al aumento de las pérdidas de potencia activa y a la mayor transmisión de reactiva por las líneas, este método de control de la potencia reactiva de una línea no es tan conveniente como el realizado desde el nudo 5 para el control de la línea que une los nudos 4 y 5. La diferencia de resultados obtenidos para las dos pruebas está influida por la diferencia de carga de ambas líneas y porque en el segundo caso la línea no se encuentra conectada al nudo del STATCOM. Si el control de la línea que une los nudos 1 y 3 se realizase desde el nudo 3 la potencia reactiva que es necesario

inyectar a la red sería menor, 0.6378 frente a 0.8029 (p.u.). Esta forma de control supondría además menores flujos de reactiva por las líneas y una reducción en las pérdidas de potencia activa en ellas, resultando un mejor control de la línea.

De las pruebas realizadas empleando este método de control se advierte que el control de la potencia reactiva de casi cualquiera de las líneas de una red es posible. Sin embargo, como ocurre con el control de la tensión de un nudo que no es el local, cuando el control es de una línea alejada del nudo local las pérdidas de potencia de la red aumentan. Asimismo, cuanto mayor sea la variación de potencia reactiva que se quiera conseguir, mayor será el coste, tanto en pérdidas como en reactiva a inyectar y circulación de reactiva por las líneas. Por todo ello su utilización estará condicionada a las características que se quieran obtener de la red.

5.2.8. Control de la potencia activa en una línea: Prueba 8

El modo de control 8 se ha desarrollado para el control de la potencia activa por una línea. En las pruebas hasta ahora realizadas esta magnitud no experimentaba grandes cambios por lo que un control efectivo de ella sería un gran logro. Para el empleo de este método de control se ha decidido situar el dispositivo STATCOM en el nudo 3 de la red con objeto de elevar la potencia activa al inicio de la línea 6, que une los nudos 3 y 4. Esta situación se ilustra en **Fig. 42**. Se han realizado varias pruebas para determinar el máximo incremento de potencia activa que es posible conseguir.

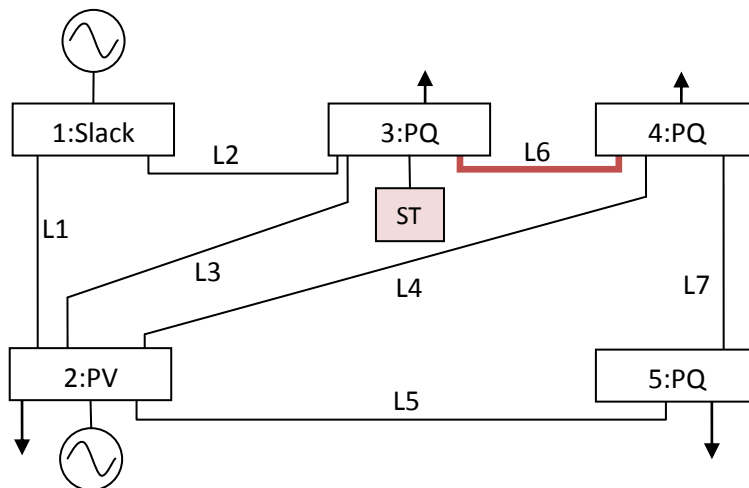


Fig. 42. Red de la Prueba 8

En las **Tabla 31**, **Tabla 32** y **Tabla 33** se muestran los resultados obtenidos cuando la potencia activa al inicio de la línea 6 se incrementó en un 10% respecto a la red sin STATCOM, pasando a valer 0.215 p.u.

NUDO	V	δ	P	Q
1	1,0600	0	1,6594	4,7843
2	0,8156	0,0116	0,4000	-3,0000
3	0,8169	-0,0585	-0,4500	-0,1500
4	0,8088	-0,0660	-0,4000	-0,0500
5	0,7825	-0,0865	-0,6000	-0,1000

Tabla 31. Prueba 8: Resultados de los nudos

LÍNEA	P ₁	Q ₁	P ₂	Q ₂	P _{pérdidas}	Q _{pérdidas}
1	1,1455	3,9039	-0,8462	-3,0595	0,2993	0,8444
2	0,5138	0,8804	-0,4363	-0,6925	0,0776	0,1879
3	0,2342	-0,0884	-0,2287	0,0782	0,0055	-0,0103
4	0,2681	-0,0612	-0,2615	0,0549	0,0067	-0,0063
5	0,5438	0,0591	-0,5258	-0,0241	0,0181	0,0351
6	0,2150	0,1426	-0,2140	-0,1527	0,0010	-0,0101
7	0,0754	0,0479	-0,0742	-0,0759	0,0012	-0,0281

Tabla 32. Prueba 8: Resultados de las líneas

STATCOM	V	δ	Q
	0,7775	-0,0585	0,3218

Tabla 33. Prueba 8: Resultados del STATCOM

En este caso el número de iteraciones necesario para llegar a la solución del flujo de carga ha sido de 8. Esto es debido a la gran influencia que suponen los argumentos de las tensiones nodales en la transmisión de potencia activa y la tan pequeña variación de ellos que con la inclusión del STATCOM.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la dificultad de control de esta magnitud. Las tensiones que se obtienen en todos los nudos excepto el slack se encuentran por debajo de 0.85 p.u., incluso el generador que se encuentra en el nudo 2 ve modificado su nivel de tensión. Esto último es consecuencia de que su nivel de reactiva ha sido superado y ha pasado a comportarse como un nudo PQ. Los argumentos de las tensiones nodales también se ven modificados en gran medida.

Los resultados muestran que las reactivas en todas las líneas han aumentado. Excepto para la línea que une los nudos 2 y 5, cuyo aumento de reactiva es del 6%, el resto de líneas triplican al menos la potencia reactiva al inicio de ellas. En cuanto a la potencia activa en las líneas, en este caso ha sufrido mayores cambios que en las pruebas realizadas con antelación. La línea cuya potencia se deseaba controlar ha aumentado un 10% la potencia al inicio de la misma pero no es la que más ha aumentado. Las líneas 1 y 2,



que unen los nudos 1 y 2 y 1y 3 respectivamente, experimentan aumentos del más del 20% respecto a la red sin STATCOM. A excepción de las líneas 4 y 5 cuya potencia aparente llega a ser menor que la de la red inicial, el resto de líneas incluso triplican la potencia aparente que transportan.

Las pérdidas de potencia activa debidas a esta situación son 6 veces superiores a la situación sin STATCOM. Esto hace que la potencia generada en el nudo slack aumente un 26%.

Si bien la potencia activa en la línea de control está en el valor deseado, se ha conseguido a costa de aumentar la transmisión de potencia por todas las líneas y también las pérdidas del sistema. El aumento de la potencia aparente en las líneas tiene asociado un menor nivel de seguridad al encontrarse éstas más cerca de los límites térmicos. Además, los valores de pérdidas obtenidos hacen de esta posible explotación una explotación bastante más ineficiente que la inicial. Este conjunto de características indican que el control de la potencia activa en una línea no es el tipo de control más indicado para estos dispositivos.

En caso de que existiera una necesidad de control de la potencia activa a transmitir por una línea, los aumentos de ésta no podrán ser muy marcados. En esta misma línea en la que se ha controlado la potencia activa para que valiese 0,215 p.u., se ha realizado un nuevo control de la potencia activa, en este caso para que el aumento sea del 3%. En este caso los flujos de potencia son muy similares a la Prueba 3 ya que el STATCOM se localiza en el nudo 3 y la potencia inyectada es similar. En contraposición a la Prueba 8 los niveles de potencia activa se mantienen casi invariantes frente a la red sin STATCOM. Al no ser muy acentuado el aumento de potencia activa en la línea 6, las pérdidas del sistema se mantienen más o menos en el mismo nivel. Esto denota que la potencia activa de una línea podrá ser ligeramente controlada.

Si se pretende controlar la potencia de una línea para que aumente de igual manera a como ha aumentado la reactiva, además de necesitarse muchas más iteraciones para llegar al resultado final, las diferentes magnitudes tomarán valores que no son posibles un sistema eléctrico. Las tensiones pueden llegar a encontrarse por debajo de cualquier límite que se pueda considerar, las reactivas en las líneas pueden alcanzar valores de hasta 10 veces los originales y las pérdidas de potencia activa del sistema llegarán a ser mayores que la activa generada en el sistema original. Grosso modo estos valores eran los que se obtenían si se intentaba controlar la potencia en la línea entre los nudos 4 y 5 para que valiese 0.1p.u. en lugar de los 0.066 originales.

La dificultad de control de la potencia activa de una línea con este tipo de dispositivos es debida a las pequeñas variaciones en los argumentos de las tensiones nodales que producen Como se hacía notar en **Ec. 12**, la

potencia activa transmitida por una línea depende directamente del seno del ángulo de desfase de las tensiones a los extremos de la línea. Para valores infinitesimales el seno del ángulo tiende al valor del ángulo, por lo que como los ángulos no varían tampoco lo harán ni el seno ni la potencia transmitida.

Cuando las variaciones en la potencia activa de una línea no son muy acentuadas los beneficios que reporta este tipo de control son comparables a las desventajas y podrá considerarse su empleo.

5.2.9. Control de la tensión equivalente del STATCOM

Además del control de la intensidad que se absorbe de la red, el modelo de STATCOM que se ha desarrollado permite el control de otros dos parámetros relacionados únicamente con él, esto es, los parámetros controlados no son magnitudes de la red sino del STATCOM. Estos dos modos de control que aún no se han tratado son el control de la potencia reactiva absorbida de la red (Modo 2) y el control de la tensión equivalente del STATCOM (Modo 5). En las siguientes pruebas se probará el control de la tensión equivalente del STATCOM.

Puesto que ya se conoce el comportamiento de la red en diferentes situaciones y aprovechando las prestaciones que brinda este tipo de control, se han realizado distintas pruebas situando el STATCOM en el nudo 5 (Fig. 43) y especificando distintos valores para la tensión del STATCOM. En las diferentes situaciones definidas se calcularán los flujos de potencia y se representarán las pérdidas frente a la tensión del STATCOM. Puesto que la variable de control en este caso es la tensión del STATCOM se representarán en función de ésta las pérdidas.

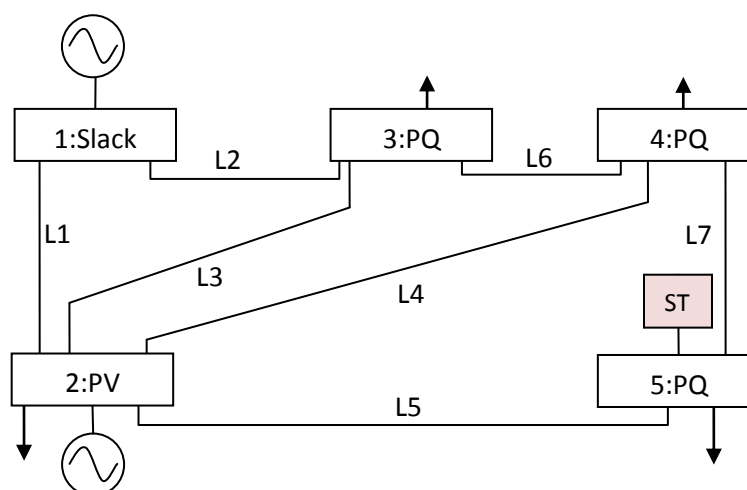


Fig. 43. Red para el control de la tensión equivalente del STATCOM

La gráfica que representa las pérdidas de la red de cinco nudos en función de la tensión equivalente del STATCOM, colocado en el nudo 5 es la de (Fig. 44). Los valores de tensión del STATCOM están comprendidos entre



0.93 y 1.05 p.u., que por estar situado el STATCOM en el nudo 5 corresponden a potencias reactivas que van desde 0.2103 inductiva hasta 0.4191 capacitiva respectivamente. La forma de la gráfica resultante es muy similar a una parábola, dándose las menores pérdidas cuando la tensión del STATCOM es 1 p.u., aproximadamente.

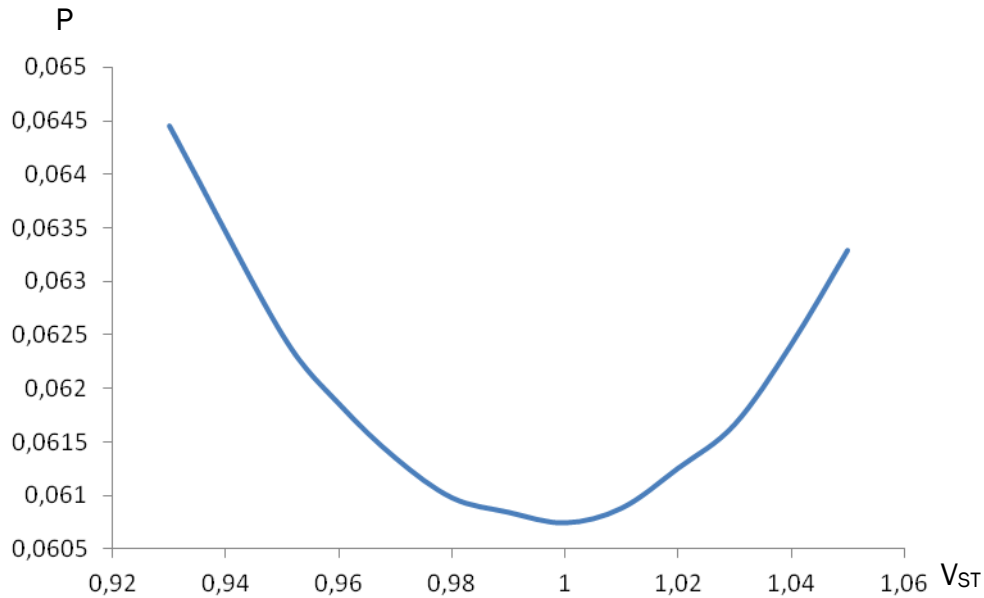


Fig. 44. Pérdidas de potencia activa en función de V_{st}

Si se representaran las pérdidas de la red frente a la tensión del STATCOM colocando éste en diferentes nudos, las gráficas resultantes tomarán formas muy similares a la de Fig. 44.

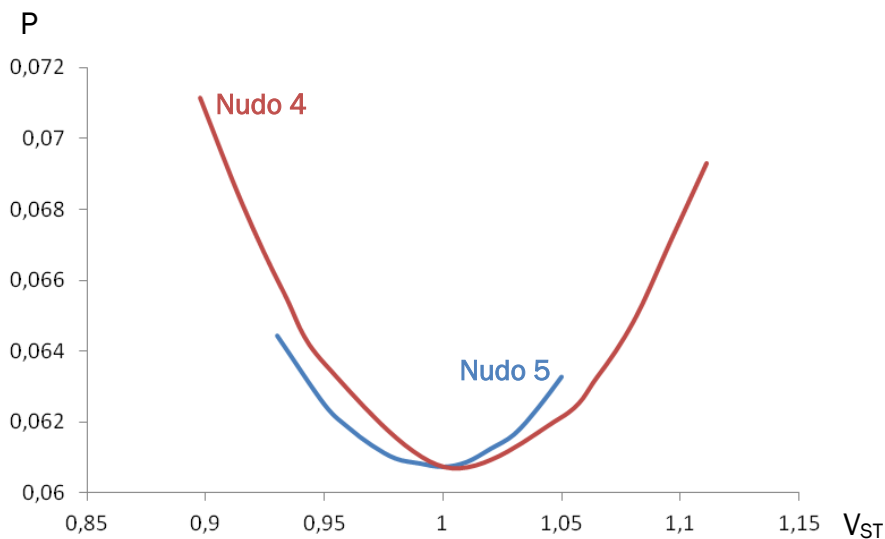


Fig. 45. Pérdidas de potencia activa en función de V_{st} para ambos nudos

Dependiendo del nudo en que se encuentre el STATCOM y por tanto la tensión de este nudo, las pérdidas variarán con los valores de tensión del STATCOM. Este hecho se pone de manifiesto en **Fig. 45** donde se representan las pérdidas de la red frente a V_{ST} si el STATCOM se sitúa en el nudo 4 y el 5. Se observa que en ambos casos las menores pérdidas se dan para valores muy similares de tensión.

5.2.10. Control de la potencia reactiva del STATCOM

En las siguientes pruebas se ha empleado el STATCOM con el modo de control de la potencia reactiva. Este modo de control es muy similar a los modos de control 3 y 4 en los que se controlaba la corriente hacia el STATCOM. Si se desea realizar una compensación capacitiva el valor de referencia de la reactiva deberá ser negativo y si la compensación es inductiva la potencia tomará valores positivos.

Actuando de forma análoga al apartado anterior se han realizado los cálculos de los flujos de potencia para diversos valores de la potencia reactiva Q_{ST} . En este caso, el STATCOM se sitúa en el nudo 4, como indica **Fig. 46**.

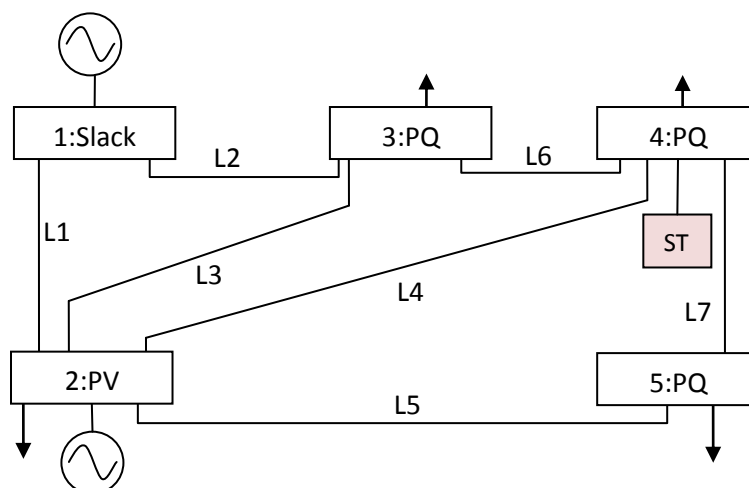


Fig. 46. Red para el control de la reactiva del STATCOM

Con los datos que se obtienen tras el cálculo de los flujos de carga se representan las pérdidas de potencia activa de la red frente a la potencia reactiva inyectada por el STATCOM (**Fig. 47**).

La gráfica de **Fig. 47** representa las pérdidas del sistema para un rango de potencias reactivas que comprende desde 0.8 p.u. capacitiva hasta 0.5 inductiva. El valor 0 de la reactiva corresponde a cuando el STATCOM no se encontraba conectado. Al igual que para la gráfica que representaba las pérdidas del sistema frente a la tensión del STATCOM, la forma es muy similar a la de una parábola. La similitud entre ambas gráficas es debida a que la tensión del STATCOM y la reactiva de éste tienen una dependencia lineal en el rango representado.

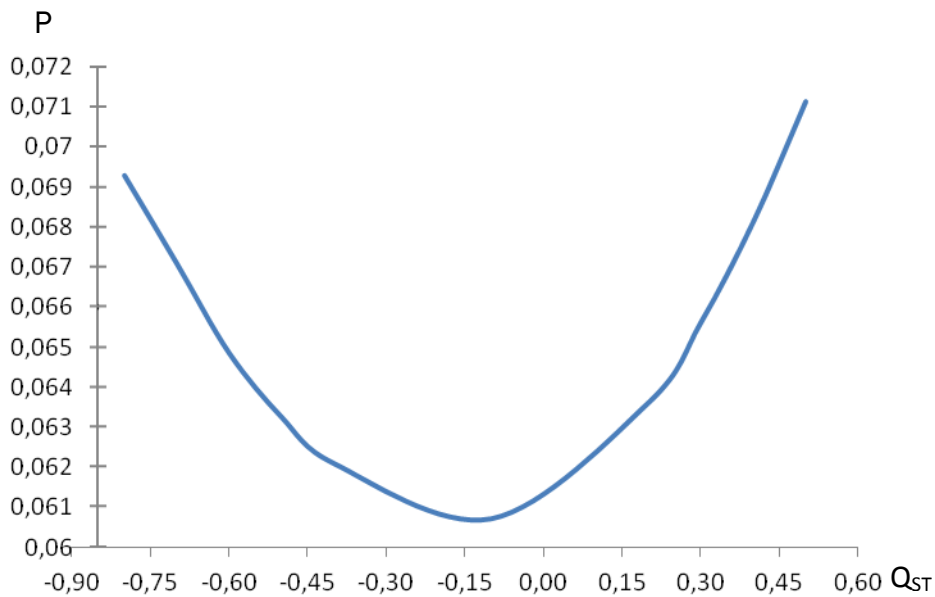


Fig. 47. Pérdidas de potencia activa en función de Q_{ST}

Se observa que el punto de menores pérdidas se da para una Q_{ST} capacitiva de aproximadamente 0.1 p.u. En esta situación los flujos de potencia reactiva a lo largo de las líneas 3, 4 y 7 llegan a duplicarse, mientras que las líneas 2, 5 y 6 transportan ahora un tercio menos de potencia reactiva, comparado con la red en la que no se incluía STATCOM. En la situación de menores pérdidas el flujo de potencia reactiva de las líneas 5 y 6 ha cambiado de sentido: mientras que en la situación original la potencia reactiva se transmitía desde el nudo 2 hasta el 5 y desde el 3 hasta el 4, en la situación de menores pérdidas es al contrario. Los sentidos de flujo de la potencia reactiva dependen en gran medida de dónde se sitúe el STATCOM.

Para el rango de potencias reactivas representado en la gráfica la tensión equivalente del STATCOM tomó valores comprendidos entre 0,8976 y 1,1100 p.u.. El valor de la tensión del STATCOM para la situación en la que se dan las menores pérdidas es de 1 p.u. de forma aproximada. Este hecho puede observarse en Fig. 45.

La representación de Fig. 45 se puede realizar para todos los nudos empleando en lugar de la tensión del STATCOM la reactiva de éste. El resultado de esta representación es el que se muestra en Fig. 48, que representa las pérdidas de la red en función de la potencia reactiva absorbida de esta por un STATCOM colocado en cada uno de los nudos. Lo que más llama la atención es que las pérdidas de la red son independientes de la potencia reactiva inyectada por el STATCOM cuando este se localiza en los nudos que cuentan con un generador. Además estas pérdidas son iguales a las de la red sin STATCOM y es que la inclusión de un STATCOM en un nudo que cuenta con un generador no modifica los flujos de potencia por la red. Al

estar inyectando o absorbiendo reactiva donde se encuentra un generador, éste se encargará de modificar la reactiva que genera para compensar la situación. Por esta razón la inclusión de un dispositivo STATCOM en este tipo de nudos será de nula utilidad.

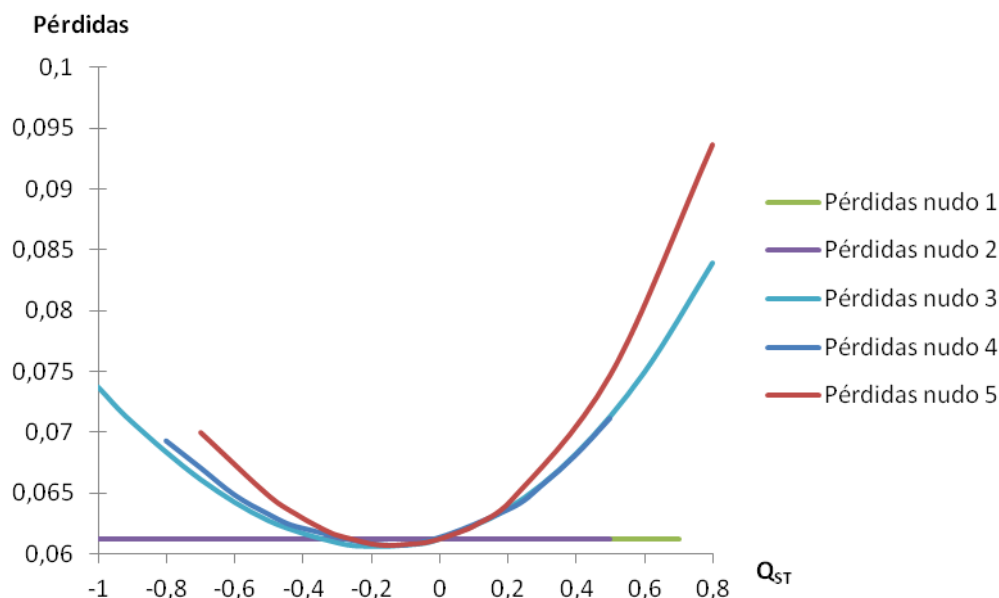


Fig. 48. Pérdidas de potencia activa en función de Q_{st} para todos los nudos

Cuando el STATCOM se sitúa en cualquiera de los otros nudos las pérdidas de potencia sí dependen de la reactiva del STATCOM. Cuando la reactiva toma valores cercanos a 0 se puede observar que las pérdidas son muy similares. El valor nulo de reactiva del STATCOM corresponde a cuando este no está conectado por lo que el valor de las pérdidas independientemente del nudo en que se considere que está el STATCOM debe ser el mismo.

A medida que la reactiva del STATCOM se aleja de la no compensación, las pérdidas del sistema se diferencian dependiendo del nudo en que se encuentre el STATCOM. Las pérdidas cuando el STATCOM se encuentra en los nudos 3 y 4 son muy similares. Ambas gráficas tienen una forma más abierta que la gráfica de las pérdidas del sistema cuando el STATCOM se sitúa en el nudo 5. Este hecho deja constancia de que para los mismos valores de compensación, si el STATCOM se encuentra situado en los nudos 3 o 4 en lugar del 5, las pérdidas serán menores. Para la red que se está tratando, los nudos 3 y 4 tomaban los mayores valores de tensión sin contar los nudos con generadores.

Los diferentes resultados obtenidos para las pruebas que se han realizado permiten obtener una visión general del comportamiento del STATCOM en un sistema eléctrico. Ya que todas las pruebas se han realizado



sobre la misma red los resultados, sobre todo los relativos a los flujos de potencia, no podrán extrapolarse a cualquier otra red. Estos resultados pueden dar una visión general de los posibles efectos del empleo del STATCOM pero en ningún caso podrán tomarse como exactos. Debido a los diferentes parámetros que puedan tomar las líneas de otros sistemas, para conocer la influencia del STATCOM en esa red deberá ser estudiado el caso concreto que supone la inclusión del STATCOM en ella.

Conclusiones

Partiendo de la base teórica con la cual se contaba gracias a las distintas asignaturas cursadas durante el Grado en Ingeniería Eléctrica se ha podido redactar el presente Trabajo de Final de Grado. Este Trabajo no ha pretendido ser un proyecto técnico sino más bien un trabajo de investigación motivado por las nuevas necesidades y técnicas que se están dando en la ingeniería eléctrica. Teniendo en cuenta esto, se presentan a continuación una serie de aspectos que se han tratado a lo largo de este documento y que suponen los aspectos más relevantes del mismo.

Como se había mencionado en la introducción y detallado en los apartados siguientes, el número de dispositivos FACTS que existen en la actualidad es muy elevado por lo que este trabajo se ha centrado en uno de ellos. Debido a que los dispositivos STATCOM se conectan en paralelo, el modelo eléctrico que lo representa no modifica los parámetros iniciales de la red. Este modelo no supone la inclusión de nuevos nudos en la red ni la modificación de los nudos ya existentes, sino un elemento más a ser considerado. De hecho el STATCOM podría llegar a considerarse como una carga cuyo valor varía según las necesidades.

La inclusión en la red de dispositivos STATCOM modifica los flujos de potencia existentes. Por esta razón se han definido ocho modos de control, en cada uno de los cuales un parámetro de la red o del STATCOM debe tomar un valor especificado. Basándose en la bibliografía y en los resultados esperados tras la inclusión del STATCOM se han definido los siguientes modos de control:

1. Control de la tensión del nudo del STATCOM.
2. Control de la potencia reactiva inyectada.
3. Control de la corriente del STATCOM. Control capacitivo.
4. Control de la corriente del STATCOM. Control inductivo.
5. Control de la tensión equivalente del STATCOM.
6. Control de la tensión de un nudo remoto.
7. Control de la potencia reactiva por una línea.
8. Control de la potencia activa por una línea.

Cada uno de estos modos está definido por una expresión que describe la magnitud cuyo valor se desea controlar en ese modo.



Para lograr integrar el dispositivo STATCOM en los cálculos de los flujos de potencia ha sido necesario hacer una serie de modificaciones al método básico de cálculo de los flujos de potencia. Estas modificaciones se han realizado de tal forma que el diagrama de flujo general del cálculo sea el mismo que el original. Para llevar a cabo el cálculo de los flujos de potencia en las líneas han sido necesarias varias modificaciones en la Jacobiana que varían según el modo de control que se esté empleando. Como ya ocurría en el cálculo de los flujos de potencia sin STATCOM, los nudos slack y PV presentan ciertas singularidades a la hora de construir la Jacobiana. Esto, unido al hecho de que existen ocho posibles modos de control, impone una serie de restricciones a la hora de emplear cada uno de ellos. A modo de resumen se muestra en la siguiente tabla los modos que es posible o no llevar a cabo dependiendo de en qué nudo se sitúe el STATCOM y en su caso la razón por la que no pueden ser llevados a cabo. Los modos 3 y 4 y 7 y 8 aparecen juntos ya que la forma de la matriz Jacobiana es la misma y ,por tanto, la razón que impide el control también.

	Modo 1	Modo 2	Modos 3 y 4	Modo 5	Modo 6	Modos 7 y 8
Slack	NO Posible (1)	Posible	NO Posible (2)	Posible	NO Posible (3)	NO Posible (3)
PV	NO Posible (1)	Posible	NO Posible (2)	Posible	NO Posible (3)	NO Posible (3)
PQ	Posible	Posible	Posible	Posible	Posible/ NO Posible (4)	Posible

(1) Se está intentando controlar la tensión de un nudo de tensión fija.
(2) Tras varias iteraciones la matriz Jacobiana es singular.
(3) Las dos últimas columnas de la Jacobiana son linealmente dependientes y por tanto no es inversible.
(4) El control es posible si se realiza sobre un nudo PQ, la tensión de los nudos slack y PV es fija y el control sobre ellos no es posible.

Los diferentes modos de control definidos, junto con las restricciones de uso que presentan se han incorporado en una aplicación de Matlab para el cálculo de los flujos de carga en una red. La necesidad de obtener unos valores válidos en la resolución de los flujos de carga ha llevado al desarrollo de 2 métodos diferentes de comprobación. El primero de ellos contrasta los valores obtenidos mediante la aplicación desarrollada con la solución que una fuente fiable, en este caso Enrique Acha, “FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks” proporciona para ese mismo flujo de carga. El segundo método calcula de nuevo los flujos de carga simulando el STATCOM como una carga, debiéndose obtener los mismos resultados.

El primer método presenta la ventaja de necesitar un solo cálculo para conocer si el funcionamiento del programa de cálculo es correcto. Sin

embargo, al no disponer de soluciones para todos los modos de control, para probar el resto de modos de control se deben tener en cuenta los resultados recién obtenidos. Respecto al primer método, el segundo no necesita tener ninguna solución previa del problema de flujos de carga por lo que podría ser empleado sin disponer de una bibliografía para contrastar. El segundo método, además, se puede emplear indistintamente para cualquier modo de control. El inconveniente de este segundo método estriba en que es necesario realizar dos cálculos diferentes, pero esto no es tanto un inconveniente ya que el tiempo que lleva realizar el cálculo es mínimo. El empleo de uno de los métodos mencionados o el de ambos demostró que el método de cálculo funcionaba de forma correcta.

Conocido el buen funcionamiento de la aplicación se ha diseñado una interface gráfica que permite el cálculo de los flujos de potencia en una red que incluye dispositivos STATCOM. Gracias a la interface gráfica la introducción de los datos es más intuitiva ya que incluye elementos como listas desplegadas y botones en lugar de tener que introducir los datos en forma de vectores. Además, la forma en que esta se ha diseñado permite la visualización de los datos que se van introduciendo así como los que se han empleado para realizar el cálculo. Otras ventajas que se obtienen del empleo de la aplicación es que ofrece la posibilidad de crear archivos con los datos de la red y con los resultados obtenidos, así como visualizar los resultados de forma gráfica en una red predeterminada.

Empleando la aplicación creada se han realizado las pruebas descritas y otras que se han considerado necesarias para observar el comportamiento del STATCOM en la red. Ha sido durante este proceso cuando se ha comprobado la utilidad de la interface gráfica. Su uso ha hecho más fácil la toma de los datos y también la introducción de los mismos ya que se pueden modificar archivos de datos existentes para crear los nuevos.

Para observar a influencia de los dispositivos STATCOM en un sistema eléctrico se han realizado multitud de pruebas situando el STATCOM en distintos nudos y empleando distintos modos de control. Todas ellas se han realizado sobre la misma red por lo que los efectos que tiene el empleo del STATCOM no podrán ser completamente extrapolables a cualquier otra red. Sin embargo, sí darán una imagen global de los posibles cambios que se produzcan.

Tras la inclusión del STATCOM en la red de estudio se han observado una serie de modificaciones en los flujos de carga que se resumirán a continuación. De forma general la inclusión de un dispositivo STATCOM en la red modifica los flujos de carga por las líneas. La potencia reactiva en las líneas se ve modificada en gran manera ante la inclusión de dispositivos STATCOM. Dependiendo del lugar de colocación del STATCOM y de del sentido



de transmisión de la potencia reactiva antes de la inclusión del STATCOM así como de la reactiva inyectada a la red los flujos de reactiva experimentarán diferentes variaciones.

Cuando el STATCOM se localiza en un nudo y está inyectando reactiva a la red, las líneas que antes de la inclusión del STATCOM transportaban reactiva del nudo hacia la red aumentan el transporte de potencia reactiva, mientras que las líneas que aportaban potencia reactiva al nudo disminuyen el valor de la magnitud. Esto es así ya que el total de la potencia inyectada debe distribuirse por las diferentes líneas que llegan al nudo. En el caso de las líneas que transportaban potencia reactiva de la línea al nudo la reactiva por la línea disminuye porque se inyecta reactiva con un sentido contrario al inicial. Se han dado casos en este tipo de líneas en los que la potencia reactiva sin la inclusión del STATCOM eran tan pequeña que al incluir el STATCOM inyectando reactiva, el sentido de la transmisión de la reactiva ha cambiado.

En los casos en los que en lugar de inyectar potencia reactiva ésta se está absorbiendo, los cambios producidos en los flujos de carga vienen a tener la misma explicación que en el caso anterior, la reactiva absorbida debe ser proporcionada por el conjunto de líneas que llegan al nudo. Al comportarse el STATCOM como un consumidor neto de potencia reactiva, las líneas que antes transportaban reactiva del nudo hacia la línea disminuyen la reactiva que transportan, mientras que en las líneas que transportaban reactiva hacia el nudo aumentan la magnitud de reactiva transportada. Al igual que cuando se inyectaba reactiva, si los flujos de potencia reactiva no son lo suficientemente grandes pueden cambiar de sentido al verse reducida la reactiva que transportan.

Ya que las líneas adyacentes al nudo del STATCOM varían la reactiva que transportan, también varía la reactiva transportada por las líneas que tienen un nudo en común con éstas. En este caso la variación será menor que la que se da en las líneas adyacentes.

El valor del aumento o disminución de la potencia reactiva por la línea dependerá de la potencia reactiva inyectada o absorbida por el STATCOM y de las características de las líneas y de los nudos al otro extremo de éstas. Ya que con la inclusión del STATCOM la reactiva total de la red se ve modificada, los generadores existentes en la red deben encargarse de absorber o generar esa reactiva que el STATCOM está inyectando o absorbiendo respectivamente. En la red de estudio, antes de la inclusión del STATCOM, uno de los generadores se encargaba de generar reactiva y el otro absorbía parte de esa reactiva. Al inyectarse reactiva a la red el primero de los generadores generará menos reactiva y el segundo absorberá más,

variándose los flujos de potencia por las líneas adyacentes a los nudos en que se encuentran para que la reactiva se modifique de esta forma.

Como se ha dicho, no todas las líneas se ven afectadas de igual manera con la inclusión del STATCOM. Salvo casos excepcionales, en los que la potencia reactiva del STATCOM era muy elevada, la reactiva por la línea que une los nudos en los que se encuentran ambos generadores no varía ya que los generadores tienden a compensar la variación de reactiva que se ha producido en el sistema. Por esta razón, cuando el STATCOM se coloca en un nudo en el que hay un generador, la influencia del STATCOM sobre la red es nula, ya que la potencia neta generada en el nudo no varía.

Con la inclusión del STATCOM se han observado, en los nudos que no contaban con un generador, variaciones de la magnitud de la tensión. Estas variaciones han sido más acentuadas en los nudos más cercanos al nudo del STATCOM. Cuando la reactiva se ha inyectado en lugar de absorbido las tensiones de los nudos han aumentado como si de una compensación capacitiva se tratara y viceversa. Las variaciones que han experimentado los argumentos de las tensiones nodales no han sido marcadas para casi ninguna de las pruebas hechas. De nuevo, a medida que la inyección o absorción de reactiva por parte del STATCOM ha tomado valores más elevados, los argumentos han experimentado mayores variaciones.

Debido a la gran dependencia de la potencia activa transportada por una línea de los valores de los argumentos de las tensiones a ambos extremos de la línea y la poca variación de estos valores, las potencias activas a lo largo de las líneas no sufren apenas variaciones. Las variaciones a las que se ven sometidas no llegan en ningún caso a ser tan grandes como las que sufre la reactiva. Para que las potencias activas en las líneas varíen grandes porcentajes respecto a la potencia inicial por ellas los valores de la reactiva del STATCOM deben ser muy elevados.

De forma general, la potencia activa que transportan las líneas supone el grueso de la potencia aparente transportada. Es por esta razón que la magnitud de la potencia aparente por la línea no experimenta grandes cambios si la reactiva del STATCOM no es muy elevada.

En cuanto a las pérdidas de potencia activa de la red, se puede decir que la situación inicial no es la de menores pérdidas. Las pérdidas de este sistema se reducen ligeramente si se inyecta una pequeña cantidad de reactiva, alcanzando las pérdidas mínimas. Esto sucede cuando el STATCOM se encuentra en los nudos que no disponen de generador, en los nudos con generador, al no modificarse los flujos de potencia las pérdidas son iguales para cualquier valor de reactiva del STATCOM. Las pérdidas en la red aumentan de forma considerable a medida que la reactiva se aleja del valor de mínimas pérdidas.



De forma general estas son las variaciones que experimenta la red con la inclusión del STATCOM. Teniéndolas en cuenta, los diferentes modos de control presentan una serie de limitaciones en su uso. Estas limitaciones vienen en general determinadas por las pérdidas de la red y los aumentos en la potencia aparente por las líneas. Tanto por eficiencia, como por economía, las pérdidas del sistema deberán ser las menos posibles y la potencia aparente no deberá superar los valores máximos delimitados por los límites térmicos. Se detallan a continuación las características de uso de cada uno de los modos de control así como las limitaciones que presentan.

- **Modo 1:** Control de la tensión del nudo del STATCOM. Este modo de control es muy útil, permitiendo mantener estable la tensión del nudo del STATCOM ante variaciones en la carga del sistema. Ya que el STATCOM se encuentra directamente conectado al nudo cuya tensión se desea controlar, la reactiva del STATCOM no alcanza valores muy elevados, no variando mucho las tensiones del resto de nudos y no produciéndose grandes pérdidas.
- **Modo 2:** Control de la potencia reactiva inyectada. Las limitaciones que puede presentar este modo de control están debidas a los niveles de reactiva del STATCOM, que deberán mantenerse dentro de unos límites para no incurrir en demasiadas pérdidas o superar los límites térmicos de las líneas adyacentes al nudo en que se localiza, las más afectadas. En cuanto a su uso, presenta las mismas características que la compensación mediante condensadores y bobinas.
- **Modos 3 y 4:** Control de la corriente del STATCOM. Estos dos modos de control presentan características iguales al modo de control 2. La diferencia entre ambos es que el modo de control 2 aúna los modos 3 y 4.
- **Modo 5:** Control de la tensión equivalente del STATCOM. De forma general, cuanto mayor sea la diferencia entre la tensión del STATCOM y la del nudo a que se conecta, mayor será la reactiva del STATCOM. Teniendo en cuenta este aspecto, este control presenta características similares al modo 2.
- **Modo 6:** Control de la tensión de un nudo remoto. La influencia del STATCOM sobre la tensión de los nudos al otro extremo de una línea adyacente se puede decir que es posible sin llegar a producirse demasiadas pérdidas en la red. En todo caso, la misma modificación que se quiera conseguir en el nudo remoto se producirá en el nudo del STATCOM acentuada, por lo que si no

se desea variar en demasía la tensión del nudo del STATCOM este no sería un buen control. Cuanto mayor sea la variación que se desea conseguir en la tensión mayor deberá ser la reactiva del STATCOM, y por tanto, mayores las pérdidas. En el empleo de este modo de control sobre un nudo no conectado al nudo del STATCOM los valores obtenidos para la reactiva fueron muy elevados y también las pérdidas del sistema por lo que no se aconseja el empleo del STATCOM para controlar la tensión de este tipo de nudos. En cualquier caso, la mejor opción para controlar la tensión de un nudo es colocar el STATCOM en el mismo nudo.

- Modo 7: Control de la potencia reactiva por una línea. Debido a la influencia en los flujos de reactiva que supone la inclusión del STATCOM, el control de esta magnitud en las líneas adyacentes es relativamente sencillo, pudiendo lograrse que en el inicio o en el final de las mismas la reactiva sea nula con relativamente pocas pérdidas. Los flujos de reactiva del resto de la red también se ven modificados, tendiendo a aumentar, por lo que la potencia aparente también lo hará. Cuando el control se realiza sobre líneas no adyacentes al nudo de control los flujos de potencia de la red aumentan demasiado y también las pérdidas del sistema. Ya que las pérdidas dependen de la reactiva del STATCOM, en este modo tendrán una gran dependencia de la variación de reactiva que se quiera conseguir en la línea.
- Modo 8: Control de la potencia activa por una línea. Las prestaciones de este modo de control no son tan buenas como las obtenidas para el modo 7. Sin incurrir en grandes pérdidas en la red, las variaciones de potencia activa en líneas adyacentes no son muy elevadas, para uno de los casos probados, las pérdidas se triplicaban cuando la potencia de una línea no llegaba a aumentar un 10%.

El conjunto de características asociadas a cada uno de los nudos permite identificar cuál es la mejor localización del STATCOM en la red para conseguir la situación deseada. La localización de los STATCOM en los nudos con generadores permite que la reactiva generada por ellos sea menor pero no cambia ningún otro aspecto de la red. Cuando se desea controlar la tensión de un nudo, la mejor situación para el STATCOM es ese mismo nudo. En caso de no ser posible situarlo en el mismo nudo, situarlo en un nudo adyacente permitirá el control de la tensión sin producirse demasiadas pérdidas. Ocurre lo mismo para el control de la potencia reactiva de una línea, la mejor situación del STATCOM para este control es uno de los nudos en los extremos



de la línea. En cuanto a la potencia activa de una línea, esta solo debe ser controlada desde uno de los nudos de los extremos ya que si no las pérdidas serían muy grandes. En cualquier caso, la variación de potencia activa transmitida no deberá ser muy elevada. En lo que respecta al control de las variables del STATCOM: tensión, corriente e intensidad, como se ha mencionado, todas ellas serán controlables desde nudos PQ.

Además de los resultados relativos a los flujos de carga, gracias a la realización de las diferentes pruebas se ha comprobado que el control de todas las variables no entraña la misma dificultad. En los modos de control 1, 2, 5, 6 y 7 el número de iteraciones necesarias para llegar a la solución es de 4, siendo mayos para los modos 3, 4 y 8. En los modos 3 y 4 esto se debe a que uno de los elementos de la Jacobiana toma valores muy elevados dificultando la inversión y por tanto la convergencia. La dificultad de control del modo 8 está motivada por la escasa vinculación de las variables de estado y la magnitud que se desea controlar.

En definitiva se han conseguido los objetivos marcados al inicio del trabajo. En las conclusiones enumeradas han quedado definidas, de forma clara, las prestaciones que se pueden esperar de la inclusión de estos dispositivos en la red. Ciertas magnitudes como la potencia activa por una línea no han variado en gran medida con la inclusión del STATCOM por lo que los objetivos de posteriores estudios podrían centrarse en este hecho. Ya que este estudio es el primero que se realiza de este tipo sobre dispositivos FACTS, si se continúan realizando trabajos de este tipo podrá ser empleado como base de trabajo.

Bibliografía

- [1] Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Pérez and César Ángeles-Camacho “FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks” John Wiley and Sons 2004
- [2] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi “Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems” IEEE Press 2000
- [3] Fermín Barrero “Sistemas de Energía Eléctrica” Thomson Paraninfo 2004
- [4] Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, and Bikash Pal “Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control” Springer 2012
- [5] Kothari, D. P.; Nagrath, I. J. “Sistemas Eléctricos de Potencia” McGraw Hill. 2008
- [6] Muhammad H. Rashid “ELECTRÓNICA DE POTENCIA Circuitos, dispositivos y aplicaciones” Pearson Ed 3
- [7] Adepoju, G. A. ,Komolafe, O.A. “Analysis and Modelling of Static Synchronous Compensator (STATCOM): A comparison of Power Injection and Current Injection Models in Power Flow Study” International Journal of Advanced Science and Technology Vol. 36, November, 2011
- [8] The MathWorks, Inc. “Creating Graphical User Interfaces” 2011