



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERIA (ICAI)
GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

**MODELADO EN RÉGIMEN PERMANENTE DEL
STATCOM EN LA RED ELÉCTRICA**

Autor: Sara Rodríguez-Portugal Dobarro

Director: Enrique Acha Daza (Tampere University of Technology)

Madrid

Agosto 2016

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESINAS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor Dña. Sara Rodríguez-Portugal Dobarro DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: MODELADO EN RÉGIMEN PERMANENTE DEL STATCOM EN LA RED ELÉCTRICA, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor CEDE a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 29 de Julio de 2016

ACEPTA

Fdo.....

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
MODELADO EN RÉGIMEN PERMANENTE DEL STATCOM EN LA RED
ELÉCTRICA

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2015-2016 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Sara Rodríguez-Portugal Dobarro

Fecha://

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Enrique Acha Daza

Fecha: ...25.../ ...08.../ ...2016...

Vº Bº del Coordinador de Proyectos

Fdo.: Fernando de Cuadra García

Fecha://



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERIA (ICAI)
GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

**MODELADO EN RÉGIMEN PERMANENTE DEL
STATCOM EN LA RED ELÉCTRICA**

Autor: Sara Rodríguez-Portugal Dobarro

Director: Enrique Acha Daza (Tampere University of Technology)

Madrid

Agosto 2016

A Enrique Acha, por su compromiso personal y permanente ayuda durante mi estancia en TUT (Finlandia).

A mis profesores y amigos veteranos de ICAI, por sus consejos y sabiduría compartida.

A Ernesto Rodríguez, de ADELANTA Ingeniería, por su inestimable colaboración.

A mi familia, por inculcarme los valores de esfuerzo y sacrificio, y por darme su apoyo en todo momento.

MODELADO EN RÉGIMEN PERMANENTE DEL STATCOM EN LA RED ELÉCTRICA

Autor: Rodríguez-Portugal Dobarro, Sara.

Director: Acha Daza, Enrique.

Entidad colaboradora: TUT - Tampere University of Technology & ICAI - Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DE PROYECTO

En la última década, se ha producido un incremento de la penetración de la generación distribuida, y por ello se ha hecho necesario el uso de equipos para garantizar el control de tensión, así como la forma idónea de la onda.

Las principales razones que hacen necesario este control son:

- Optimizar el funcionamiento de los equipos.
- Reducir las caídas de tensión, que provocan sobrecalentamientos en los equipos eléctricos.
- Eliminar las subidas de tensión, que conllevan un deterioro del aislamiento.
- Minimizar el flujo de reactiva por la red y las pérdidas del sistema, gracias a un perfil de tensiones correcto.

Con el desarrollo de la electrónica de potencia, han aparecido soluciones para compensar las fluctuaciones de tensión observadas en las redes de distribución. Entre ellas se encuentran los equipos usados para la compensación de potencia reactiva, donde se incluyen los STATCOM (Static Synchronous Compensator). Estos dispositivos consisten en convertidores de tensión conectados a un elemento de almacenamiento de energía por un lado y al sistema eléctrico por el otro, y que permiten proporcionar un soporte de potencia reactiva en los nudos de la red.

El problema del flujo de cargas o flujo de potencia consiste en encontrar el punto de funcionamiento en régimen permanente de un sistema eléctrico. Más específicamente, se trata de que, dada la carga demandada en los buses de consumo y la potencia suministrada por los generadores, se obtengan todas las tensiones de los nudos y la potencia que fluye a través de todos los componentes de la red.

Entre los métodos iterativos más populares para resolver flujo de cargas en la actualidad se incluye el método de Newton-Raphson, que es el que se emplea en este caso de estudio. Estos métodos asignan unos valores iniciales a las variables y poco a poco establecen nuevos valores resultantes de las ecuaciones iterativas, repitiendo este mismo proceso hasta que el valor de las variables se encuentre dentro de un rango de error determinado.

En este proyecto se introduce un nuevo modelo de STATCOM destinado a soluciones de flujo de potencia utilizando el método de Newton-Raphson que se acaba de mencionar, y que toma como base el paper “A New STATCOM Model for Power Flows Using the Newton-Raphson Method”. En él no se trata al controlador como una fuente de tensión controlable ideal, sino más bien como un dispositivo transformador compuesto al que están vinculadas ciertas propiedades de control de los convertidores basados en PWM. El ángulo del cambiador de tomas complejo representa el desplazamiento de fase que existiría en un inversor de PWM, y coincide con el ángulo del modelo de fuente de tensión convencional del VSC. De manera más específica, éste sería el ángulo requerido por el VSC para permitir bien la generación o la absorción de potencia reactiva puramente gracias al procesamiento electrónico de la tensión y la corriente dentro del VSC. Tanto las pérdidas de conmutación como las pérdidas óhmicas y el transformador LTC de conexión están representados de forma explícita en este modelo STATCOM. El cambiador de tomas complejo en el modelo del VSC y el cambiador de tomas real en el modelo del LTC permiten una regulación efectiva de la tensión en el punto de conexión con la red y en el nudo de CA del VSC.

Partiendo de este modelo simple de STATCOM, se trata de ampliar su funcionalidad desarrollando un modelo similar pero más complejo. De esta manera, se consigue obtener un regulador con las mismas ventajas que el anterior, pero aplicable a sistemas trifásicos. No sólo esto, sino que se amplían sus capacidades de control, haciendo que sea muy útil también para tratar casos desequilibrados, en los que resulta muy beneficioso mantener el voltaje de ciertos nudos en un valor deseado. Para ello, se emplean los mismos principios de funcionamiento que rigen al modelo simple, pero en este caso lo que se hace es triplicar todas las variables del sistema simulando así sus tres fases, y se añade además en el resto de la red un cuarto cable que cumple las funciones de neutro.

El análisis de resultados de la operación del STATCOM consiste en varias simulaciones, que permiten apreciar tanto las mejoras en su operación como las diferencias entre los dos modelos que se tratan a lo largo del documento, es decir, el simple y el complejo (con control y sin control de voltaje, y en red equilibrada y desequilibrada).

Como es de esperar, uno de los beneficios de la compensación shunt es el de reducir las pérdidas del sistema gracias a un perfil de tensiones mejorado, que se hace posible gracias a la regulación del voltaje. La compensación proporcionada por el STATCOM introduce un tipo adicional de pérdidas de potencia que está asociada con la conmutación de alta frecuencia del control PWM empleado por la tecnología del VSC, así como pérdidas óhmicas. Sin embargo, las pérdidas del STATCOM son relativamente bajas, y tanto unas como otras están explícitamente representadas en su modelo equivalente.

Respecto al ángulo Φ del transformador de tomas complejo del VSC, se concluye que éste representa el cambio de fase que existiría en un inversor de PWM y que coincide con la fase

del modelo de fuente de tensión convencional de VSC, tal y como ya se había explicado anteriormente.

La B equivalente actúa de distinta forma según los distintos casos de estudio. Si no existe control de tensiones por parte del STATCOM, la variable mantiene su valor inicial dado en el modelado, ya que no interviene en el flujo de cargas. En el caso de que el control de tensiones se encuentre activo, la B se comportará de distinta forma dependiendo de si la consigna del control ordena un aumento o una disminución de la tensión. De esta forma, toma signo positivo actuando como inductancia cuando lo que se desea es bajar el voltaje, mientras que se hace negativa actuando como condensador cuando lo que se quiere es aumentar el valor de tensión. En el caso de que haya desequilibrio de ángulo, adicionalmente sirve para re dirigir el flujo de potencia.

Se comprueba que el neutro, por su parte, tiene un modelado correcto. En el último caso de estudio, en el que se incluye un desequilibrio en la línea tanto en módulo como en ángulo, se ve cómo la descarga se produce a través del neutro. En el caso donde no existe desequilibrio de ningún tipo, este cable también está presente y por él circulan únicamente las pérdidas remanentes.

En el anexo del proyecto se analiza la viabilidad económica de la inclusión de un STATCOM en un punto de carga superior a 15 kW. Estos puntos de carga incluyen cualquier tipo de negocio, desde grandes industrias hasta comercios locales, que al incluir compensación de reactiva pretenden conseguir una mayor eficiencia en su factura eléctrica. Para realizar este análisis se sigue la ITC 1723/2009, incluida en el BOE en diciembre de 2009.

Los métodos de estudio que se emplean para valorar el proyecto son el VAN el TIR y el Pay-Back. Según los resultados obtenidos a partir del flujo de caja se concluye que el factor de utilización anual que hace que sea económicamente viable la instalación del STATCOM es aproximadamente del 3%, siendo el método del Valor Actual Neto el más restrictivo de los tres.

STEADY-STATE MODELING OF THE STATCOM IN THE POWER GRID

ABSTRACT OF THE PROJECT

In the last decade, there has been an increased penetration of distributed generation and, therefore, the use of equipment to ensure voltage control and an ideal waveform has become necessary.

The main reasons that make this control important are namely the following:

- Optimize the equipment operation.
- Reduce voltage drops, which may cause overheating in the electrical equipment.
- Eliminate voltage rises, which lead to a deterioration of the insulation.
- Minimize the reactive power flow through the network and the system losses, thanks to a proper voltage profile.

With the development of power electronics, several solutions to compensate voltage fluctuations in distribution networks have appeared. Such solutions comprise the equipment used for reactive power compensation, which include the STATCOM (Static Synchronous Compensator). These devices consist on voltage converters connected to an energy storage element on one side and to the electrical system on the other, allowing to provide reactive power support at the nodes of the network.

The load flow or power flow problem is to find the steady state operation point of an electrical system. More specifically, it means that given the required load on the consumption buses and the power supplied by the generators, all the voltages of the nodes and the power flowing through all the network components are obtained.

For this study case, the Newton-Raphson method, one of the most popular iterative method for solving load flow, was used. These methods assign some initial values to variables and gradually set new values resulting from the iterative equations, repeating the same process until the value of the variables is within a certain range of error.

This project presents a new model of STATCOM aimed at power flow solutions using the above mentioned Newton-Raphson method and, moreover, based on the paper "A New STATCOM Model for Power Flows Using the Newton-Raphson Method". In this device, the controller is not treated as an ideal controllable voltage source, but as a composite transformer that includes certain control properties based on PWM converters. The complex tap changer angle represents the phase shift that would exist in a PWM inverter, and coincides with the angle of the conventional VSC voltage source model. More specifically, it would be the angle required by the VSC to allow either the generation or absorption of purely reactive power thanks to the electronic processing of the voltage and current within the VSC. Both switching and resistive losses and also the LTC transformer connection are explicitly represented in this STATCOM model. The complex tap changer on the VSC model and the

real tap changer in the LTC model allow an effective regulation of the voltage at the connection point with the network and in the AC node of the VSC.

Taking this simple model of STATCOM as a start point, the objective is to extend its functionality by developing a similar but more complex model. Thus, it is possible to obtain a controller with the same advantages as the one above, but applicable to three-phase systems. Not only this, but its control capabilities can be extended, making it also useful to treat imbalanced cases where it is very beneficial to maintain the voltage of certain buses at a desired value. In order to achieve this, the same operating principles governing the simple model are used, but in this case all the system variables are triplicated to simulate the three phases, and also a fourth wire which performs the functions of the neutral is added in the rest of the network.

The analysis of the results of the STATCOM operation consists of several simulations that allow us to appreciate both the improvements in its operation and the differences between the two models discussed throughout the document, i.e., the simple and the complex one (with and without voltage control, and with balanced or unbalanced network).

As expected, one of the benefits of shunt compensation is to reduce system losses thanks to an improved voltage profile, which is possible because of the voltage regulation. The compensation provided by the STATCOM introduces an additional type of power loss that is associated with the high frequency switching of the PWM control used by the VSC technology, as well as resistive losses. However, STATCOM losses are relatively low, and both types are explicitly represented in the equivalent model.

Regarding the Φ angle of the complex tap changer transformer of the VSC, we conclude that it represents the phase shift that would exist in a PWM inverter and that it coincides with the phase angle of the conventional VSC voltage source model, as it has already been explained above.

The equivalent B acts differently according to different study cases. If there is no voltage control in the STATCOM, the variable maintains its initial value given in the modeling, and it does not get involved in the load flow. In the event that the voltage control is active, the B will behave differently depending on whether the setpoint control commands an increase or decrease in the voltage. Thus, it takes positive sign acting as inductance when a lower voltage is required, and it becomes negative acting as a condenser when a higher value of voltage is wanted. In case there is angle imbalance, it serves additionally to redirect power flow.

It is found that the neutral wire, for his part, has a correct modeling. In the latter case study, in which a magnitude and angle imbalance is included in the line, it can be seen how the

discharge occurs through the neutral phase. In the case where there is no imbalance of any kind, this cable is also present but only the remaining losses circulate through it.

In the annex to the project the economic feasibility of the inclusion of a STATCOM at a load point exceeding 15 kW is analyzed. These charging points comprise any business, from large industries to local businesses, which include reactive compensation that aims to achieve greater efficiency in their electric bill. To perform this analysis, the ITC 1723/2009, included in the BOE in December 2009 is employed.

The study methods used to evaluate the project are the NPV, the IRR and the Pay-Back methods. According to the results obtained from the cash flow, it is concluded that the annual utilization factor that makes it possible for the installation of the STATCOM to be economically viable is about 3%, being the Net Present Value the most restrictive method.

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN | 15 |
| CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA | 17 |
| 2.1. DEFINICIÓN DEL STATCOM..... | 17 |
| 2.1.1. ELECTRÓNICA DE POTENCIA..... | 18 |
| 2.1.2. PRINCIPIO DE OPERACIÓN..... | 19 |
| 2.1.3. APLICACIONES Y USOS..... | 23 |
| 2.2. FLUJO DE CARGAS..... | 24 |
| 2.2.1. MODELADO DEL SISTEMA Y LA MATRIZ DE ADMITANCIAS (YBUS)..... | 25 |
| 2.2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA..... | 28 |
| 2.2.3. MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON..... | 32 |
| 2.2.4. INCORPORACIÓN DE DISPOSITIVOS DE REGULACIÓN..... | 37 |
| 2.3. FORMULACIÓN DEL MODELO SIMPLE O UNIFILAR DEL STATCOM..... | 38 |
| 2.3.2. MATRIZ DE ADMITANCIAS (YBUS)..... | 40 |
| 2.3.3. ECUACIONES DE POTENCIA NODALES..... | 44 |
| 2.3.4. LINEALIZACIÓN Y MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON..... | 46 |
| 2.4. FORMULACIÓN DEL MODELO COMPLEJO O TRIFÁSICO DEL STATCOM..... | 48 |
| 2.4.2. TEOREMA DE FORTESQUE Y CONEXIÓN DE HOLLGREEN..... | 49 |
| 2.4.3. MATRIZ DE ADMITANCIAS (YBUS)..... | 52 |
| 2.4.4. ECUACIONES DE POTENCIA NODALES..... | 55 |
| 2.4.5. LINEALIZACIÓN Y MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON..... | 58 |
| 2.5. CONCLUSIONES..... | 60 |
| CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS | 62 |
| 3.1. MODELO SIMPLE SIN CONTROL DE VOLTAJE..... | 62 |
| 3.2. MODELO SIMPLE CON CONTROL DE VOLTAJE..... | 65 |
| 3.3. MODELO COMPLEJO CON CONTROL DE VOLTAJE Y RED EQUILIBRADA..... | 70 |

| | | |
|--|---|-----------|
| 3.4. | MODELO COMPLEJO CON CONTROL DE VOLTAJE Y RED Desequilibrada | 77 |
| 3.5. | CONCLUSIONES..... | 82 |
| CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y FUTURO DESARROLLO..... | | 85 |
| 4.1. | CONCLUSIONES..... | 85 |
| 4.2. | FUTURO DESARROLLO..... | 87 |
| CAPÍTULO 5. REFERENCIAS | | 89 |
| CAPÍTULO 6. ANEXO: ANÁLISIS ECONÓMICO DEL STATCOM | | 91 |
| 6.1. | LEGISLACIÓN SOBRE COMPENSACIÓN DE REACTIVA..... | 91 |
| 6.2. | MODELO DE STATCOM..... | 91 |
| 6.3. | VIABILIDAD ECONÓMICA Y RETRIBUCIÓN | 93 |

En la última década, se ha producido un incremento de la penetración de la generación distribuida, que se entiende como el conjunto de instalaciones de generación conectadas a la red de distribución, según la directiva 2009/72/CE. Por ello, se ha hecho necesario el uso de equipos para garantizar el control de tensión, así como la forma idónea de la onda.

Los proveedores de electricidad están hoy en día preocupados por la calidad de la energía que distribuyen a sus clientes, ya que la retribución que reciben va en función de esta. Con el desarrollo de la electrónica de potencia, han aparecido soluciones para compensar las fluctuaciones de tensión observadas en las redes de distribución. Se trata de “Dispositivos de Calidad de Energía” (Dispositivos PQ) que son convertidores electrónicos de potencia conectados en serie o en paralelo con las líneas, cuyo funcionamiento es controlado por un controlador digital, y que se encargan de asegurar la máxima calidad que se buscaba en la energía suministrada al consumidor.

Entre estos equipos usados para la compensación de potencia reactiva en una red de distribución se encuentran los STATCOM (Static Synchronous Compensator), unos dispositivos que consisten en convertidores de tensión conectados a un elemento de almacenamiento de energía por un lado y al sistema eléctrico por el otro, y que permiten proporcionar un soporte de potencia reactiva en los nudos de la red.

El control de tensión garantiza que entre los nudos del sistema eléctrico el voltaje esté dentro de un margen de un $\pm 5\%$, establecido por la regulación. La tensión está estrechamente relacionada con el flujo de la potencia reactiva, por tanto, la instalación de equipos de absorción y generación de ésta se hace imprescindible [1]. Las principales razones que hacen necesario este control son:

- Optimizar el funcionamiento de los equipos.
- Reducir las caídas de tensión, que provocan sobrecalentamientos en los equipos eléctricos.
- Eliminar las subidas de tensión, que conllevan un deterioro del aislamiento.
- Minimizar el flujo de reactiva por la red y las pérdidas del sistema, gracias a un perfil de tensiones correcto.

El flujo de potencia reactiva y activa se puede variar mediante la utilización de FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System), que son tecnologías activas monitoreadas en tiempo real mediante el TSO (en español, Operador del Sistema de Transmisión) [2]. Se trata de dispositivos basados en electrónica de potencia y otros componentes estáticos que proporcionan control sobre uno o más parámetros del sistema de transmisión en AC para mejorar la controlabilidad e incrementar la capacidad de transmisión de potencia.

Entre los parámetros a controlar se incluyen: impedancias serie de la línea, impedancias shunt, corriente de línea, amplitud y fase del voltaje, entre otros. Los FACTS se clasifican según el siguiente criterio:

- Shunt, aquellos que son capaces de proporcionar compensación de reactiva y control de tensión.
- Serie, que son aquellos adecuados para un control más efectivo del flujo de potencia activa, así como para la amortiguación de las oscilaciones y la estabilidad del transitorio.
- Combinados, que reúnen las características de los dos anteriores.

En la siguiente figura se muestra una clasificación de los FACTS según se acaba de explicar.

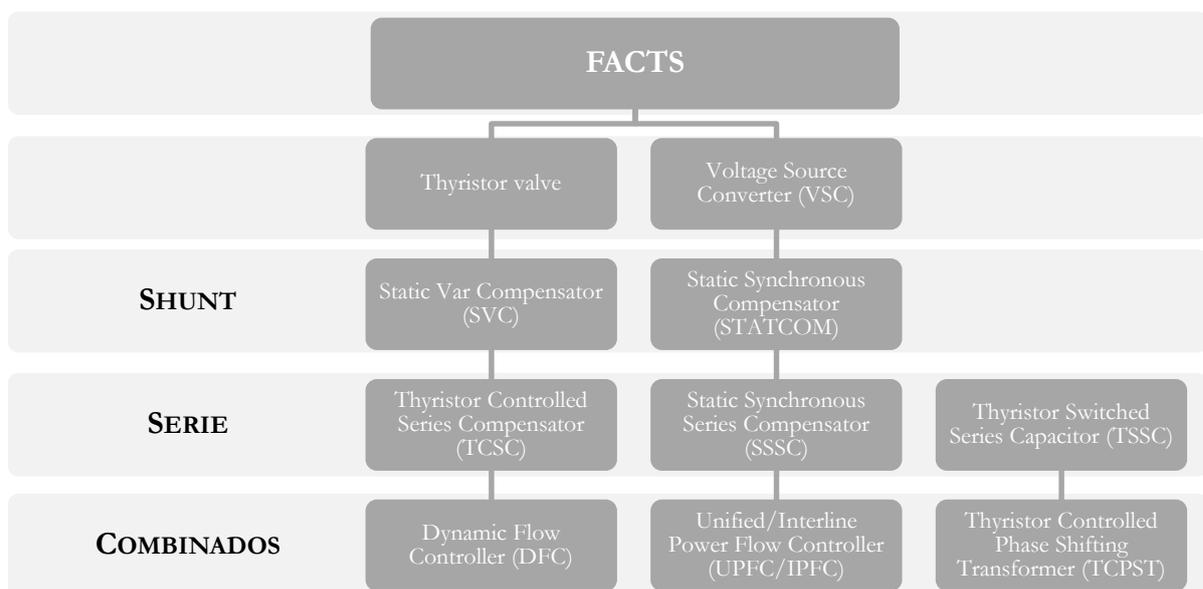


Figura 1.1. Clasificación de FACTS.

Entre los problemas que se pueden resolver con la utilización de los FACTS se encuentra la estabilidad, tanto en régimen permanente como transitorio u oscilatorio, así como el control del flujo de potencia y la compensación y limitación de las potencias por las líneas y transformadores eléctricos.

Capítulo 2. METODOLOGÍA

Este capítulo es la parte central del proyecto y se divide en cuatro secciones. En la primera, se trata de ofrecer una visión general del STATCOM, centrándose en su electrónica de potencia, principio de operación y usos. Para ello se parte de la definición básica del STATCOM, y se avanza describiendo cada uno de los dispositivos semiconductores que pueden ser empleados como elementos de conmutación en este tipo FACT. A continuación, se describe su funcionamiento partiendo de una representación esquemática unifilar, y se definen a partir de aquí las ecuaciones que relacionan sus intensidades y tensiones en cada punto. Se describe también su característica de operación, y como ésta influye en la circulación de potencia reactiva en el sistema, y se termina por último enumerando las distintas ventajas que ofrece.

En la segunda parte se describe de forma detallada el problema del flujo de cargas, partiendo del modelado del sistema y su matriz de admitancias (Y_{bus}) y continuando con la formulación del ejercicio y la aplicación del método de Newton-Raphson, para terminar explicando las modificaciones que aparecen cuando se incorporan al sistema ciertos dispositivos de regulación. En primer lugar, se explica la representación de cada elemento en la red, y a partir de ahí se relacionan las intensidades con las tensiones y admitancias en cada nudo. De esta manera se obtienen las llamadas ecuaciones nodales que se representan en forma matricial dando lugar a la Y_{bus} . A continuación, se presentan las relaciones de potencia que deben cumplirse, y se aplica el método de Newton-Raphson como algoritmo iterativo de resolución del sistema no lineal resultante.

En la tercera y cuarta sección se formulan tanto el modelo simple como el complejo del STATCOM que ocupa nuestro problema, ofreciendo una visión general del funcionamiento de las dos partes más importantes que lo constituyen (VSC y transformador LTC). Primero se presenta la matriz de admitancias que caracteriza al modelo conjunto, y a continuación se obtienen sus ecuaciones de potencia nodales. Éstas formarán un sistema que posteriormente se resolverá empleando el ya explicado método de Newton-Raphson, pero aplicado al modelo en cuestión.

2.1. DEFINICIÓN DEL STATCOM

El STATCOM (Static Synchronous Compensator) se define por el IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) como un “convertidor de potencia de conmutación auto-conmutado alimentado desde una fuente de energía eléctrica adecuada y que sirve para producir un conjunto de tensiones multifásicas ajustables, las cuales se pueden acoplar a un sistema de corriente alterna con el propósito de intercambiar potencia activa y reactiva, ambas controlables de forma independiente” [\[3\]](#).

Además, el IEEE ha explicado de la siguiente forma cada uno de los componentes estructurales de operación básicos del STATCOM:

- El primer componente es “estático” (Static): basado en dispositivos de conmutación de estado sólido sin componentes giratorios.
- El segundo es “síncrono” (Synchronous): análogo a una máquina síncrona ideal con tres tensiones sinusoidales de fase a frecuencia fundamental.
- El tercer componente es “compensador” (Compensator): dotado de compensación de reactiva.

El STATCOM es uno de los dispositivos más importantes dentro de los FACTS y representa el resultado de la tecnología más avanzada para compensación de reactiva [4]. Pertenece a la tercera generación de este tipo de elementos, después del FC, el MCR y el TCR, todos ellos distintos tipos de SVC (Static Var Compensator). Su potencia reactiva es fácilmente controlable de forma flexible y permite la compensación de potencia en el sistema de forma automática, tal y como se describe en los siguientes apartados. Además, resuelve el problema de los armónicos que surgen en la conmutación de los bancos de condensadores paralelos.

Por otra parte, ayuda también a mejorar la calidad de la potencia de acuerdo con las necesidades de los clientes. Además, presenta un rendimiento excepcional en muchos campos como la velocidad de respuesta, la estabilización de tensión en el sistema, la reducción de pérdidas, el incremento de la capacidad de transmisión y de los límites para el voltaje transitorio. También presenta como ventaja su pequeño tamaño.

2.1.1. ELECTRÓNICA DE POTENCIA

El STATCOM es uno de los controladores de potencia más populares en la actualidad, pero existe una gran variedad dispositivos [5]. Todos ellos se basan en convertidores electrónicos de potencia y son capaces de generar potencia reactiva sin necesidad de utilizar grandes sistemas de almacenamiento de energía reactiva, tal y como ocurre en los SVC (Static VAR Compensator). Esto se consigue haciendo que las corrientes circulen a través de las fases del sistema de corriente alterna con la ayuda de dispositivos de conmutación muy rápidos.

Los dispositivos semiconductores empleados en la nueva generación de convertidores electrónicos de potencia son totalmente controlados, tal y como ocurre con el IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) o el GTO (Gate Turn-Off Thyristor), cuyas principales características y respectivos símbolos se muestran a continuación:

- El GTO es una versión más avanzada del tiristor convencional, con una característica de encendido similar, pero con la habilidad de poder desconectarse en un momento distinto que cuando baja la corriente directa por debajo del nivel de la de

mantenimiento. La corriente de mantenimiento es la intensidad mínima necesaria para que el dispositivo mantenga su estado de conducción.

- El IGBT es uno de los componentes más desarrollados dentro de la familia de los transistores de potencia. Actualmente muy usado en aplicaciones de sistemas de potencia, debido a su creciente capacidad de manejo de altas de potencias y a sus relativamente bajas pérdidas de conducción.

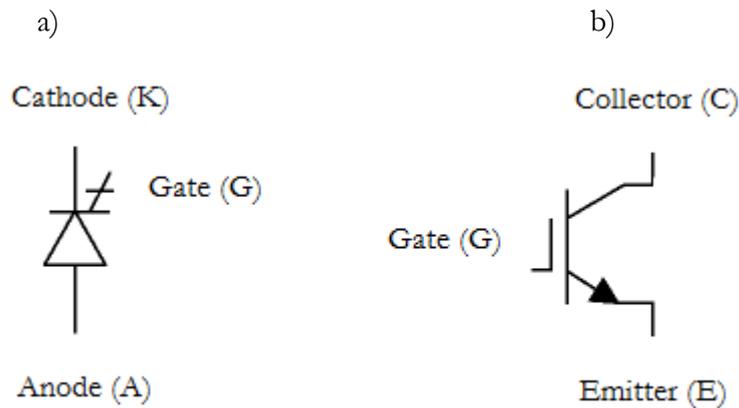


Figura 2.1. Símbolos para: a) GTO (Gate Turn-Off Thyristor) y b) IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).

En los convertidores de continua/alterna que usan semiconductores totalmente controlados en lugar de tiristores convencionales, la entrada en continua se puede modelar tanto como una fuente de tensión, que normalmente es un condensador, o como una fuente de corriente, que típicamente es una fuente de tensión en serie con una inductancia. En relación con este principio básico de operación, los convertidores se pueden clasificar bien en convertidores de fuente de tensión (VSCs) o bien en convertidores de fuente de corriente [6]. Por cuestiones económicas y de rendimiento la mayoría de controladores de potencia reactiva están basados en la topología del VSC, como ocurre en el caso del STATCOM.

La disponibilidad de semiconductores con alta capacidad nominal de tensión y corriente, tal y como los IGBT o los GTO, implica que el concepto de compensación de potencia reactiva actual se base en convertidores conmutados, incluso para aplicaciones de potencia sustancialmente alta.

2.1.2. PRINCIPIO DE OPERACIÓN

El STATCOM consiste en un VSC (Voltage Source Converter) y su transformador shunt asociado, y puede actuar tanto de fuente como de sumidero de alimentación de potencia reactiva a una red eléctrica. Además, si está conectada a una fuente de potencia también puede proporcionar potencia activa. Es el homólogo al condensador síncrono rotativo, pero

es capaz de absorber o generar potencia reactiva a mayor velocidad porque no hay partes móviles implicadas. En principio lleva a cabo la misma función de regulación de tensión que el SVC pero de forma más robusta, y a diferencia de lo que ocurre en este último su operación no se ve afectada en presencia de bajos voltajes.

A continuación, se muestra una representación esquemática del STATCOM y de su circuito equivalente unifilar. Se trata de una simplificación por Thévenin vista desde el nudo k , con la fuente de tensión E_1 siendo el componente de frecuencia fundamental del voltaje de salida del VSC, que resulta del producto de V_{DC} y m_a (factor de modulación de amplitud en PWM).

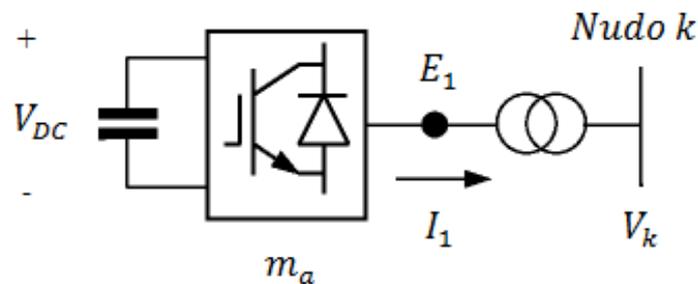


Figura 2.2. Sistema del STATCOM: VSC conectado a la red de corriente alterna a través de transformador shunt.

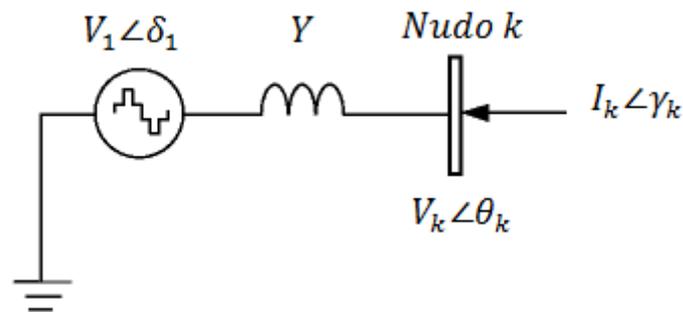


Figura 2.3. Sistema del STATCOM: Circuito equivalente.

En estudios de frecuencia fundamental en régimen permanente, el STATCOM puede ser representado de la misma forma que un condensador síncrono. En la mayoría de casos, coincide con el modelo de un generador síncrono con generación de potencia activa nula. Un modelo más flexible se puede conseguir representando el STATCOM como una fuente de tensión variable E_1 , en la cual se ajustan la magnitud y el ángulo para satisfacer un determinado valor de tensión en el punto de conexión con la red. Esta fuente de tensión shunt en el STATCOM trifásico se puede representar por la siguiente ecuación:

$$E_1^\rho = V_1^\rho (\cos \delta_1^\rho + j \sin \delta_1^\rho) \quad \text{Ec. 2.1.}$$

donde ρ indica las fases a, b y c.

Los límites, inferior y superior, del voltaje V_1^ρ son función del rango de operación del condensador del STATCOM. El ángulo δ_1^ρ , sin embargo, puede tomar cualquier valor comprendido entre 0 y 2π radianes.

Asumiendo que los parámetros sean trifásicos y haciendo referencia al circuito equivalente del STATCOM, se puede obtener la siguiente ecuación:

$$[I_k] = [Y \quad -Y] \begin{bmatrix} V_k \\ E_1 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.2.}$$

Donde

$$I_k = [I_k^a \angle \gamma_k^a \quad I_k^b \angle \gamma_k^b \quad I_k^c \angle \gamma_k^c]^t \quad \text{Ec. 2.3.}$$

$$V_k = [V_k^a \angle \theta_k^a \quad V_k^b \angle \theta_k^b \quad V_k^c \angle \theta_k^c]^t \quad \text{Ec. 2.4.}$$

$$E_1 = [V_{1k}^a \angle \delta_{1k}^a \quad V_{1k}^b \angle \delta_{1k}^b \quad V_{1k}^c \angle \delta_{1k}^c]^t \quad \text{Ec. 2.5.}$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{1k}^a & 0 & 0 \\ 0 & Y_{1k}^b & 0 \\ 0 & 0 & Y_{1k}^c \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.6.}$$

Empleando de nuevo el circuito equivalente y las relaciones clásicas que describen el flujo de potencia activa y reactiva a través de una línea, se pueden definir la P y la Q para el sistema [7]. Para ello, sólo hay que evaluar las ecuaciones en términos de V_1 , V_k , de la impedancia del transformador, que se puede asumir como ideal, y de la diferencia de fase entre los puntos 1 y k del sistema.

La diferencia de fase entre V_1 y V_k se puede denotar como α . Cuando el STATCOM opera con $\alpha = 0$ se observa que la potencia activa enviada a la red es nula, mientras que la reactiva depende básicamente del módulo de la tensión. Esta característica de operación implica que la corriente que circula a través del transformador debe tener una diferencia de $\pm 90^\circ$ con

respecto a V_k . En otras palabras, el flujo de potencia reactiva en el sistema se rige por el siguiente modelo:

- Si $V_1 > V_k$ entonces se presentará un flujo de corriente por la reactancia del convertidor hacia el sistema, es decir, el STATCOM generará potencia reactiva capacitiva y la entregará al sistema.
- Si $V_1 < V_k$ entonces habrá un flujo de corriente del sistema hacia el convertidor, que absorberá la potencia reactiva inductiva del sistema.
- Finalmente si $V_1 = V_k$, no habrá circulación de corriente y por tanto tampoco habrá flujo de potencia reactiva de un punto a otro del sistema.

Por tanto, podría decirse que en estado estacionario Q sólo depende de la diferencia de módulos entre V_1 y V_k , y que el flujo de reactiva es proporcional a dicha diferencia de tensiones [8].

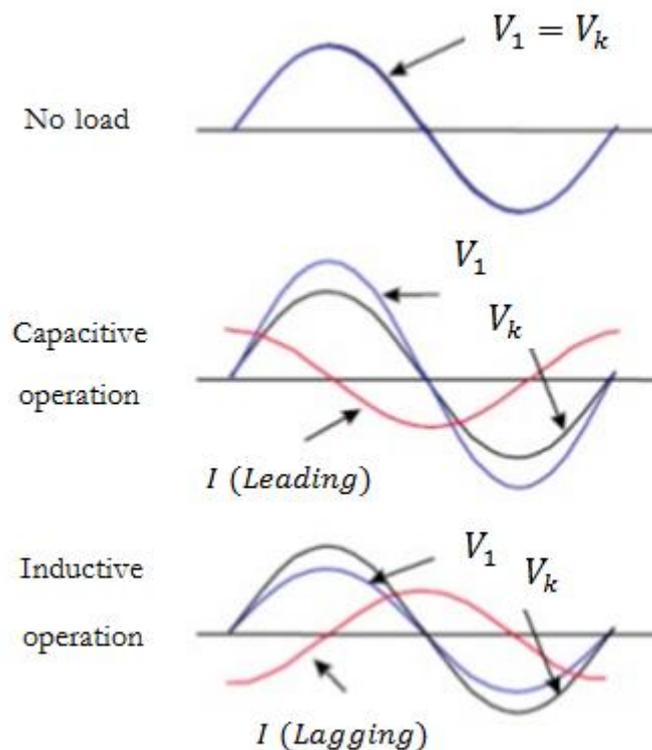


Figura 2.4. Modo de operación del STATCOM en función del módulo de las tensiones V_1 y V_k .

Por otra parte, también puede haber un pequeño intercambio de potencia activa entre el STATCOM y la red eléctrica, que puede ser controlado mediante un ajuste del ángulo de

desfase entre la tensión de salida del inversor y la tensión del sistema de corriente alterna. Por tanto, el flujo de potencia activa en el sistema se rige por el siguiente modelo:

- Si la salida del voltaje del convertidor se adelanta a la salida del sistema, entonces se suministra potencia activa a la red.
- Si la salida del convertidor se logra atrasar, entonces habrá una absorción de potencia activa.

El STATCOM controla de manera suave y continua la tensión entre los límites V_1 y V_2 , que están representados en la siguiente figura. Sin embargo, si el voltaje del sistema excede el límite inferior (V_1) o superior (V_2), entonces el STATCOM actúa como una fuente de corriente constante. En ella se controla la tensión de salida V_1 del convertidor de forma apropiada.

A continuación, se muestra una gráfica que ilustra la característica de V-I del STATCOM, y que además sirve también para entender el modo de operación del dispositivo en función del módulo de la tensión:

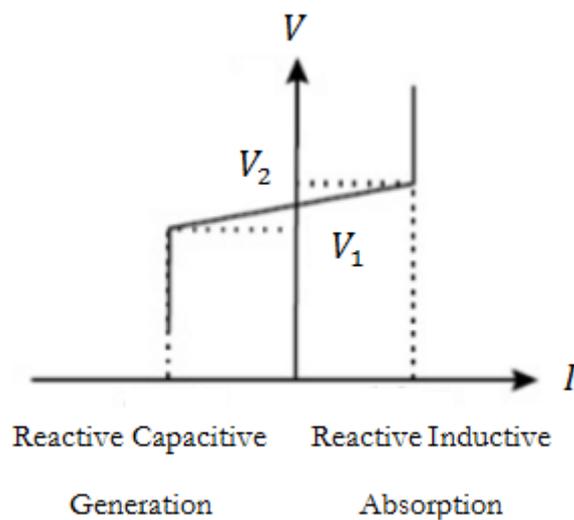


Figura 2.5. Característica V-I del STATCOM.

2.1.3. APLICACIONES Y USOS

Normalmente el STATCOM se instala para proporcionar soporte eléctrico a las redes con escaso factor de potencia o baja regulación de tensión. Sin embargo, hay otros usos que permiten mejorar el funcionamiento dentro de un sistema de potencia, como por ejemplo en las siguientes áreas:

- El control de tensión dinámico en redes de distribución y transmisión. La compensación serie y shunt tiene el propósito de inyectar potencia reactiva para mantener la magnitud del voltaje en los nudos próxima al valor nominal, y además reduce las corrientes de línea y por tanto las pérdidas totales del sistema.
- El amortiguamiento de las oscilaciones en las redes de transmisión.
- La estabilidad de régimen transitorio, que mejora gracias a un adecuado nivel de tensión.
- Contener el flicker del voltaje. Este fenómeno se trata de una distorsión en el módulo de la tensión, de tipo no simétrico.
- Controlar pequeñas caídas de voltaje.
- El control de la potencia reactiva, pero también de la potencia activa en la línea donde se encuentra conectado pudiendo inyectarla en caso de necesidad.

Además, otra de las ventajas del STATCOM es que ocupa un menor espacio físico, ya que sustituye a los elementos pasivos del circuito por convertidores electrónicos mucho más compactos. Por otra parte, minimiza el impacto ambiental ya que emplea módulos electrónicos compactos encapsulados.

2.2. FLUJO DE CARGAS

El problema del flujo de cargas o flujo de potencia consiste en encontrar el punto de funcionamiento en régimen permanente de un sistema eléctrico [9]. Más específicamente, se trata de que, dada la carga demandada en los buses de consumo y la potencia suministrada por los generadores, se obtengan todas las tensiones de los nudos y la potencia que fluye a través de todos los componentes de la red.

Durante la operación diaria del sistema, el flujo de cargas constituye una herramienta básica para el análisis de la seguridad, mediante la identificación de desviaciones de tensión inadmisibles o de la posible sobrecarga de algún componente, como consecuencia tanto de la evolución natural de la carga como de repentinos cambios estructurales. También permite al ingeniero encargado de la planificación simular diferentes escenarios futuros que puedan surgir para una demanda prevista.

La solución del flujo de potencia se desarrolla en dos etapas. La primera y más importante está enfocada a obtener la tensión en todos los nudos del sistema. Para ello, las técnicas de análisis de circuitos lineales convencionales no son útiles, ya que al especificarse como limitaciones una serie de potencias complejas, se llega a una serie de ecuaciones no lineales. El segundo paso consiste simplemente en el cálculo de las magnitudes restantes que sean de interés, tales como los flujos de energía activa y reactiva, pérdidas óhmicas, etc., lo cual será un problema trivial siempre y cuando los voltajes de todos los nudos estén disponibles.

En este capítulo, por tanto, se tratarán las técnicas más populares para el cálculo del flujo de cargas y se explicará también el modelado de la red que se emplea para estos métodos.

2.2.1. MODELADO DEL SISTEMA Y LA MATRIZ DE ADMITANCIAS (YBUS)

En el estudio del flujo de cargas es necesario representar cada elemento del sistema mediante su respectivo modelo equivalente, que son muy simples para este caso [10]. Cabe mencionar que dichos modelos equivalentes sencillos pueden ser utilizados siempre y cuando los cálculos lo permitan, ya que no existe ninguna ventaja por representar los elementos del sistema de forma exacta cuando las cargas solo se conocen con una precisión limitada. Del mismo modo, los modelos más complejos se limitan únicamente a casos muy especializados donde la exactitud es primordial, como es el caso de los estudios de estabilidad [11]. Es muy común que en los estudios de flujo de potencia se desprece la resistencia, perdiendo sólo una pequeña parte de precisión y ahorrando una gran cantidad de cálculos.

- Generadores: en los estudios de flujo de carga se representan generalmente como fuentes de P-V o P-Q. Se suelen representar con su tensión interna en serie con la impedancia que corresponda.
- Líneas de Transmisión: las líneas de transporte se representan mediante un modelo equivalente u otro dependiendo de su longitud. De esta forma, las líneas cortas cuya longitud es menos de 80 km se representan a través de una reactancia serie única, mientras que las líneas de transmisión de longitudes superiores a 320km se representan mediante un circuito equivalente en π .
- Transformadores: es frecuente representar al transformador a través de su reactancia de cortocircuito en serie con un transformador ideal que tiene en cuenta la posición del cambiador de tomas.

Todos los componentes del sistema (líneas, cables, transformadores) que interconectan los diferentes nudos pueden ser representados a través de un modelo en π de dos puertos [9]. Dadas las tensiones de los buses terminales, este sencillo modelo permite obtener los flujos de potencia que se desean y, por tanto, también pérdidas específicas.

Sin embargo, cuando el análisis se refiere a toda la red, en lugar de a componentes individuales, surge una representación más compacta recurriendo a la matriz de admitancia, que se obtiene como se explica a continuación.

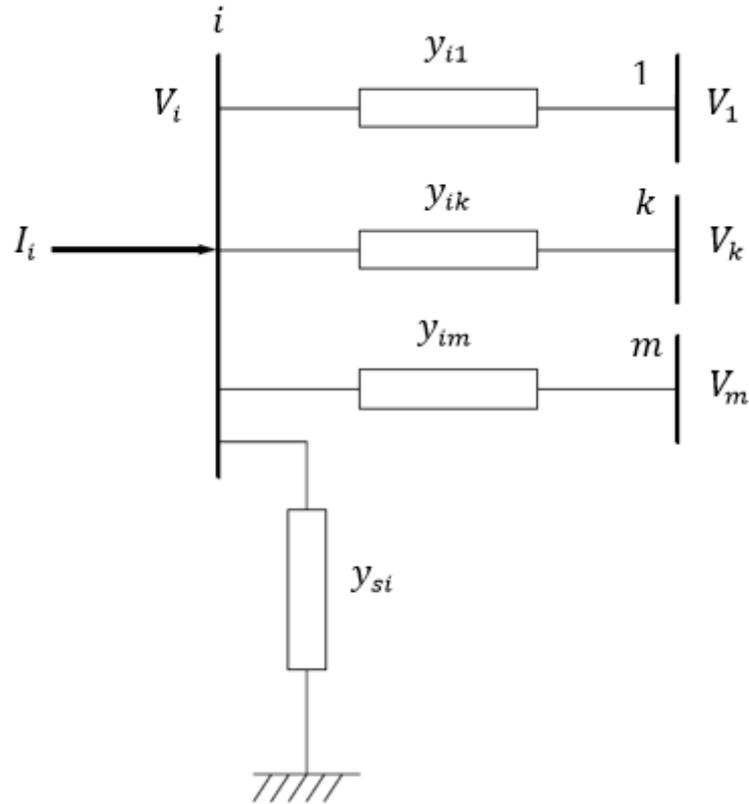


Figura 2.6. Elementos conectados a un nudo i genérico.

Se considera un bus i genérico, como se muestra en la siguiente figura, conectado por medio de admitancias serie a un subconjunto reducido de nudos. Además, puede existir también una pequeña admitancia en derivación conectada directamente al nudo de neutro o tierra, modelando la corriente total de carga. La corriente neta inyectada al nudo mediante generadores o cargas, obedece a la ley de Kirchhoff y, por tanto,

$$I_i = \sum_{j \in i} y_{ij}(V_i - V_j) + y_{si}V_i \quad \text{Ec. 2.7.}$$

donde V_j denota la tensión en el bus j , y $j \in i$ se refiere al conjunto de los buses $1, 2, \dots, m$ directamente conectados directamente al bus i . Reordenando los términos se obtiene,

$$I_i = \left[\sum_{j \in i} y_{ij} + y_{si} \right] V_i - \sum_{j \in i} y_{ij} V_j \quad \text{Ec. 2.8.}$$

Repitiendo el desarrollo anterior para todo el conjunto de los n buses se llega a lo que conocemos como ecuaciones nodales, que pueden ser escritas en forma matricial de la siguiente forma,

$$I = YV \quad \text{Ec. 2.9.}$$

Donde Y es la matriz de admitancias de $n \times n$, y los elementos de la columna de vectores de V e I representan las tensiones de nudo y las corrientes netas inyectadas, respectivamente. Los elementos de la matriz Y se pueden obtener mediante la relación entre los elementos de la fila i -ésima de la ecuación anterior.

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij}V_j \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \text{Ec. 2.10.}$$

Con la Ec. 2.8 llevando a,

$$y_{ii} = \left[\sum_{j \in i} y_{ij} + y_{si} \right]; \quad Y_{ij} = -y_{ij} \quad \text{Ec. 2.11.}$$

En resumen, los elementos de la diagonal de Y se obtienen añadiendo todas las admitancias conectadas a cada respectivo nudo, mientras que los elementos fuera de la diagonal son simplemente las admitancias negativas que interconectan los nudos involucrados. En caso de que haya varias admitancias en paralelo, la admitancia equivalente (es decir, la suma de estas admitancias) deberá ser calculada previamente. La gran mayoría de los elementos fuera de la diagonal serán nulos, debido a que normalmente un bus se conecta directamente sólo a unos pocos nudos.

Una desventaja de poca importancia del concepto de admitancia de nudo radica en el hecho de que las admitancias en derivación de componentes individuales, añadidos a su respectiva diagonal, no se pueden recuperar, lo que complica un poco las expresiones del flujo de potencia cuando se emplean los elementos de la matriz, en lugar de los parámetros del modelo en π . Este caso se da también cuando se pretende encontrar la energía que circula a través de alguna línea individual en paralelo.

2.2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Además de la ecuación lineal de 2.10 del apartado anterior, que representa en forma compacta la topología y los componentes del sistema, también se debe cumplir en cada bus la siguiente limitación de potencia:

$$S_i = S_{Gi} - S_{Li} = V_i I_i^* \quad \text{Ec. 2.12.}$$

donde S_i es la potencia neta compleja inyectada al nudo i , que se obtiene normalmente como la diferencia entre la potencia inyectada por los generadores, S_{Gi} , y la potencia absorbida por las cargas, S_{Li} . Esta última potencia puede reflejar el efecto de otros componentes pasivos no incluidas en la matriz Y . La expresión anterior, aplicada a todos los nudos, puede escribirse en forma matricial de la siguiente forma:

$$S = \text{diag}(V)I^* \quad \text{Ec. 2.13.}$$

donde S es el vector columna que incluye las potencias activa y reactiva de los nudos y $\text{diag}(V)$ denota una matriz diagonal cuyos elementos son los de vector V .

Dado Y , las Ec. 2.9 del apartado anterior y 2.13 de éste constituyen un sistema de ecuaciones de dimensión $2n$ en términos de las incógnitas S , V e I de dimensión $3n$. En teoría, sabiendo n de tales incógnitas, el sistema no lineal resultante podría resolverse para obtener las $2n$ variables restantes. En la práctica, sin embargo, las corrientes nodales rara vez se conocen o se especifican a priori en un sistema eléctrico. Por lo tanto, son generalmente averiguadas por sustitución de la ecuación 2.9 en la ecuación 2.13. Esto nos lleva al siguiente conjunto de n ecuaciones no lineales:

$$S = \text{diag}(V)[YV]^* \quad \text{Ec. 2.14.}$$

Expresando la potencia aparente de en términos de potencia activa y reactiva, $S = P + jQ$, y utilizando coordenadas rectangulares para los elementos de la matriz de admitancias, $Y = G + jB$, la expresión anterior resulta,

$$P + jQ = \text{diag}(V)[G - jB]V^* \quad \text{Ec. 2.15.}$$

$$P + jQ_i = V_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} - jB_{ij})V_j^* \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \text{Ec. 2.16.}$$

Los métodos más importantes para resolver el problema de flujo de carga que se describen a continuación no pueden trabajar directamente con las ecuaciones anteriores, porque el operador conjugado "*" impide la aplicación de derivadas en forma compleja. Por este motivo, es habitual dividir las ecuaciones en ecuaciones reales $2n$. Por lo general, los voltajes complejos se expresan en forma polar, $V = V\angle\theta$, dando lugar a

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad \text{Ec. 2.17.}$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \text{Ec. 2.18.}$$

Otra alternativa es expresar las tensiones en coordenadas rectangulares $V = V_r + jV_x$,

$$P_i = V_{ri} \sum_{j=1}^n (G_{ij}V_{rj} - B_{ij}V_{xj}) + V_{xi} \sum_{j=1}^n (G_{ij}V_{xj} + B_{ij}V_{rj}) \quad \text{Ec. 2.19.}$$

$$Q_i = V_{xi} \sum_{j=1}^n (G_{ij}V_{rj} - B_{ij}V_{xj}) - V_{ri} \sum_{j=1}^n (G_{ij}V_{xj} + B_{ij}V_{rj}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \text{Ec. 2.20.}$$

A menos que se indique lo contrario, se asumen coordenadas polares.

Cada nudo proporciona dos ecuaciones y cuatro incógnitas, lo que significa que se deben especificar dos variables por nodo para poder resolver las ecuaciones de flujo de carga resultantes. En función de las variables que se especifiquen, se pueden distinguir dos tipos principales de nudos:

- Carga o nudo PQ: se especifican tanto la potencia activa como reactiva absorbida por la suma de cargas conectadas al nudo. Suponiendo que la energía generada local es nula ($P_{Gi} = Q_{Gi} = 0$), esto lleva a las siguientes limitaciones en el este tipo de nudo:

$$P_i = P_i^{sp} = -P_{Li}^{sp}; \quad Q_i = Q_i^{sp} = -Q_{Li}^{sp} \quad \text{Ec. 2.21.}$$

dejando a los dos componentes de voltaje, V_i y θ_i , como las incógnitas restantes. La mayoría de nudos, sobre todo en bajos niveles de tensión, pertenecen a este tipo.

- Generación o nudo PV: son los nudos donde el regulador de voltaje de un generador local mantiene la magnitud de la tensión en un valor especificado (V_i^{sp}). Además, la potencia activa inyectada por el generador se especifica de acuerdo con ciertos criterios económicos. Teniendo en cuenta la posible demanda de la carga, las limitaciones resultantes son,

$$P_i = P_i^{sp} = P_{Gi}^{sp} - P_{Li}^{sp}; \quad V_i = V_i^{sp} \quad \text{Ec. 2.22.}$$

dejando Q_i y θ_i como incógnitas.

No obstante, si se consideran únicamente estos dos tipos de buses, todas las potencias activas inyectadas deberían ser especificadas a priori, lo que requeriría que las pérdidas óhmicas se conociesen de antemano. Sin embargo, las pérdidas de potencia dependen del flujo de potencia resultante y no pueden determinarse con precisión hasta que el propio flujo de carga esté resuelto. Por lo tanto, la potencia activa de al menos un generador debe ser dejado como incógnita. Afortunadamente, esta incógnita adicional está compensada por el hecho de que, al realizar un análisis de régimen permanente de CA, el ángulo de un fasor arbitrario se puede establecer arbitrariamente a cero. Éste constituye la referencia de ángulo para las ondas restantes.

Este particular nudo PV, conocida como nudo slack o swing, se elige generalmente entre aquellos nudos de generación con mayor capacidad, que se encuentra generalmente a cargo de la regulación de frecuencia. En resumen, para el nudo slack la tensión está especificada por completo, mientras que los dos componentes de la potencia, activa y reactiva, pertenecen a las incógnitas.

Sea n_L el número de nudos PQ. Entonces, el número de buses PV, excluyendo el nudo slack, será $n_G = n - n_L - 1$. Se supone que los primeros buses n_L corresponden con los nudos

PQ, seguido de buses PV ordinarios y a continuación del nudo slack. Siguiendo esta clasificación de los buses, las ecuaciones de flujo de carga en forma polar son,

$$P_i^{sp} = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad i = 1, 2, \dots, n_L + n_G \quad \text{Ec. 2.23.}$$

$$Q_i^{sp} = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad i = 1, 2, \dots, n_L \quad \text{Ec. 2.24.}$$

Resolver el flujo de carga consiste en encontrar el conjunto de ángulos $\theta_i, i = 1, 2, \dots, n_L + n_G$, y las magnitudes de tensión $V_i, i = 1, 2, \dots, n_L$, satisfaciendo las $2n_L + n_G$ ecuaciones del sistema anterior.

Como el sistema de ecuaciones resultante es no lineal, su solución implica necesariamente por un proceso iterativo, para el que se deben dar valores iniciales adecuados para las variables de estado. El llamado perfil plano es generalmente la mejor opción de inicialización para el problema de flujo de carga. Consiste en establecer $\theta_i^0 = 0$ en todos los nudos y $V_i^0 = 1$ para los buses PQ, reflejando el hecho de que las magnitudes de tensión se encuentran normalmente dentro de un rango de alrededor de 1 pu, mientras que las diferencias ángulo entre los nudos adyacentes son bastante pequeñas.

Una vez que las ecuaciones anteriores se resuelven, cualquier otra magnitud que se desee puede ser calculada fácilmente.

Cuando hay un solo elemento (línea o transformador) conectado entre los buses i y j , la potencia saliente del nudo i se pueden obtener de la siguiente forma,

$$P_{ij} = V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - G_{ij} V_i^2 \quad \text{Ec. 2.25.}$$

$$Q_{ij} = V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + V_i^2 (B_{ij} - b_{s,ij}) \quad \text{Ec. 2.26.}$$

donde $b_{s,ij}$ denota la susceptancia en derivación asociado al modelo en π respectivo (el flujo de potencia saliente del nudo j puede ser obtenido fácilmente mediante el intercambio adecuado de subíndices).

Del mismo modo, las pérdidas totales de la red (tanto activas y reactivas) se pueden calcular ya sea añadiendo las inyecciones de potencia en todos los nudos, siempre que la potencia

aparente del bus slack esté disponible, o añadiendo las pérdidas correspondientes a cada componente individual. La segunda alternativa es la única opción cuando se necesitan las pérdidas correspondientes a un área específica.

2.2.3. MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

Como se ha explicado en el apartado anterior, el sistema de ecuaciones no lineal resultante del flujo de cargas requiere de la utilización de métodos iterativos para su solución. Estos métodos llevan a cabo la aproximación de un problema mediante una sucesión infinita de aproximaciones que deben converger en un único valor, que será por tanto la solución del problema.

En estos métodos se asignan unos valores iniciales a las variables y poco a poco se establecen nuevos valores resultantes de las ecuaciones iterativas, repitiendo este mismo proceso hasta que el valor de las variables se encuentra dentro de un rango de error determinado. A continuación, se explica el método iterativo de Newton-Raphson, uno de los más populares para resolver flujo de cargas en la actualidad.

El método de Newton-Raphson mejora de forma notable los valores desconocidos de las variables mediante aproximaciones de primer orden de las funciones no lineales involucradas. Si se mantienen los dos primeros términos del desarrollo en serie de Taylor de la ecuación no lineal $f(x) = 0$ en torno a x^k (siendo x^0 el valor inicial y $x = F(x)$ el problema de punto fijo resultante de reformular la ecuación) se obtiene,

$$f(x) \cong f(x^k) + F(x^k)(x^{k+1} - x^k) = 0 \quad \text{Ec. 2.27.}$$

donde $F = \partial f / \partial x$ es la matriz jacobiana de $f(x)$. A continuación, a partir del valor inicial x^0 , las correcciones Δx^k se obtienen resolviendo el sistema de ecuaciones lineal:

$$-F(x^k)\Delta x^k = f(x^k) \quad \text{Ec. 2.28.}$$

y los valores x^{k+1} actualizados a partir de,

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k \quad \text{Ec. 2.29.}$$

El proceso iterativo se detiene cuando,

$$\max_i |f_i(x^k)| \leq \varepsilon \quad \text{Ec. 2.30.}$$

Para un valor de ε suficientemente pequeño. Para valores de x^0 cercanos de la solución, el método de Newton-Raphson converge cuadráticamente (sin embargo, cuando se aleja, lo hace también cuadráticamente). Independientemente del tamaño de la red, a partir del perfil plano de tensiones, se tarda de tres a cinco iteraciones en alcanzar la convergencia, pero esta cifra puede aumentar de manera significativa cuando se consideran ciertos ajustes en la solución.

La necesidad de este método de llevar a cabo derivadas en presencia del operador conjugado requiere que el sistema de ecuaciones se pueda descomponer en sus componentes reales. Por lo tanto, dependiendo de cómo se expresen las tensiones complejas, se obtiene la versión polar o rectangular del flujo de carga, siendo la primera la más popular.

- **FORMULACIÓN POLAR**

En este caso, el vector x comprende los siguientes elementos $2n_L + n_G$ elementos:

$$x = [\theta|V]^T = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{n-1}|V_1, V_2, \dots, V_{nL}]^T \quad \text{Ec. 2.31.}$$

y las respectivas funciones no lineales pueden ser expresadas, para todos los nudos, como la diferencia (residual) entre la potencia especificada y la potencia calculada con el valor de x más reciente, es decir

$$f(x) = [\Delta P|\Delta Q]^T = [\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_{n-1}|\Delta Q_1, \Delta Q_2, \dots, V_{nL}]^T \quad \text{Ec. 2.32.}$$

Donde

$$\Delta P_i = P_i^{sp} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad \text{Ec. 2.33.}$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{sp} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad i = 1, 2, \dots, n_L \quad \text{Ec. 2.34.}$$

En base a la notación anterior y dividiendo el Jacobiano en bloques correspondientes a los de los vectores residuales y desconocidos, la ecuación 2.28, aplicada al problema de flujo de carga se convierte en:

$$\begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^k \quad \text{Ec. 2.35.}$$

Y la ecuación 2.29

$$\begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^k + \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^k \quad \text{Ec. 2.36.}$$

El uso de $\Delta V/V$ en lugar de ΔV no afecta numéricamente al algoritmo, pero hace que la matriz Jacobiana sea más simétrica. Teniendo en cuenta que

$$-\partial(f_i^{sp} - f_i)/\partial x_j = \partial f_i/\partial x_j \quad \text{Ec. 2.37.}$$

donde f es indistintamente P o Q y x se refiere a V o θ , los elementos del Jacobiano se obtienen de acuerdo con sus definiciones de la siguiente forma:

$$H_{ij} = \partial P_i/\partial \theta_j; \quad N_{ij} = V_j \partial P_i/\partial V_j; \quad \text{Ec. 2.38.}$$

$$M_{ij} = \partial Q_i/\partial \theta_j; \quad L_{ij} = V_j \partial Q_i/\partial V_j; \quad \text{Ec. 2.39.}$$

Las expresiones resultantes se recogen en la siguiente tabla.

| EXPRESIONES CORRESPONDIENTES A LOS ELEMENTOS DEL JACOBIANO EN FORMA POLAR | |
|--|-------------------------------|
| <i>Para $i \neq j$</i> | |
| $H_{ij} = L_{ij} = V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})$ | |
| $N_{ij} = -M_{ij} = V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$ | |
| <i>Para $i = j$</i> | |
| $H_{ii} = -Q_i - B_{ii} V_i^2$ | $L_{ii} = Q_i - B_{ii} V_i^2$ |
| $N_{ii} = P_i + G_{ii} V_i^2$ | $M_{ii} = P_i - G_{ii} V_i^2$ |

Tabla 2.1. Expresiones correspondientes a los elementos del Jacobiano en forma polar.

La resolución del problema de flujo de carga por medio del método de Newton-Raphson consta de los siguientes pasos:

1. Inicializar el vector de estado con el perfil plano de tensiones o con la solución de un caso anterior.
2. Calcular $[\Delta P|\Delta Q]$ y los elementos del Jacobiano. Si todos los componentes del vector de mismatches tienen un valor absoluto menor que ε , entonces se para. De lo contrario, se continúa.
3. Obtener $[\Delta\theta|\Delta V/V]$ resolviendo el sistema de ecuaciones 2.35.
4. Actualizar $[\theta|V]$ por medio de la ecuación 2.36 y volver al paso 2.

▪ **FORMULACIÓN RECTANGULAR**

El vector de estado x está ahora compuesto por los siguientes $2n - 2$ elementos:

$$x = [V_{r1}, V_{r2}, \dots, V_{r(n-1)} | V_{x1}, V_{x2}, \dots, V_{x(n-1)}]^T \quad \text{Ec. 2.40.}$$

Los vectores de mismatches de potencia vienen dados por las siguientes expresiones

$$\begin{aligned} \Delta P_i = P_i^{sp} - [V_{ri} \sum_{j=1}^n (G_{ij}V_{rj} - B_{ij}V_{xj}) \\ + V_{xi} \sum_{j=1}^n (G_{ij}V_{xj} + B_{ij}V_{rj})] \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \end{aligned} \quad \text{Ec. 2.41.}$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_i = Q_i^{sp} - [V_{xi} \sum_{j=1}^n (G_{ij}V_{rj} - B_{ij}V_{xj}) \\ - V_{ri} \sum_{j=1}^n (G_{ij}V_{xj} + B_{ij}V_{rj})] \quad i = 1, 2, \dots, n_L \end{aligned} \quad \text{Ec. 2.42.}$$

Como se ve claramente, el número de ecuaciones todavía no coincide con el número de incógnitas. La razón es que las limitaciones de la magnitud del voltaje en los nudos PV

$$\Delta V_i^2 = (V_i^{sp})^2 - V_{ri}^2 - V_{xi}^2 = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_G \quad \text{Ec. 2.43.}$$

También deben hacerse cumplir.

Por lo tanto, en forma matricial, las ecuaciones de flujo de carga en coordenadas rectangulares son

$$\begin{bmatrix} S & T \\ U & W \\ C & D \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} \Delta V_r \\ \Delta V_x \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta V^2 \end{bmatrix}^k \quad \text{Ec. 2.44.}$$

$$\begin{bmatrix} V_r \\ V_x \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} V_r \\ V_x \end{bmatrix}^k + \begin{bmatrix} \Delta V_r \\ \Delta V_x \end{bmatrix}^k \quad \text{Ec. 2.45.}$$

donde los elementos del Jacobiano son los que aparecen en la siguiente tabla. En esa tabla, I_{ri} y I_{xi} se refieren, respectivamente, a los componentes real e imaginario de la corriente neta inyectada en el nudo i , calculada a partir de la expresión:

$$I_{ri} + jI_{xi} = \sum_{j=1}^n (G_{ij} + jB_{ij})(V_{rj} + jV_{xj}) \quad \text{Ec. 2.46.}$$

EXPRESIONES CORRESPONDIENTES A LOS ELEMENTOS DEL JACOBIANO EN FORMA RECTANGULAR

Para $i \neq j$

$$S_{ij} = -W_{ij} = G_{ij}V_{ri} + B_{ij}V_{xi}$$

$$T_{ij} = U_{ij} = G_{ij}V_{xi} - B_{ij}V_{ri}$$

$$C_{ij} = D_{ij} = 0$$

Para $i = j$

$$S_{ii} = I_{ri} + G_{ii}V_{ri} + B_{ii}V_{xi}$$

$$U_{ii} = -I_{xi} - B_{ii}V_{ri} + G_{ii}V_{xi}$$

$$W_{ii} = I_{ri} - G_{ii}V_{ri} - B_{ii}V_{xi}$$

$$T_{ii} = I_{xi} - B_{ii}V_{ri} + G_{ii}V_{xi}$$

$$C_{ii} = 2V_{ri}$$

$$D_{ii} = 2V_{xi}$$

Tabla 2.2. Expresiones correspondientes a los elementos del Jacobiano en forma rectangular.

El proceso iterativo consta de los mismos pasos que el descrito para la formulación polar, excepto lógicamente por las expresiones involucradas.

2.2.4. INCORPORACIÓN DE DISPOSITIVOS DE REGULACIÓN

La metodología descrita hasta ahora sólo tiene en cuenta las limitaciones impuestas por los buses de generación y carga. En la práctica, sin embargo, la solución aportada por un método de solución de flujo de cargas debe ajustarse para tener en cuenta las restricciones adicionales derivadas de una gran variedad de dispositivos de regulación.

Tales dispositivos están destinados a mantener una magnitud eléctrica y dada (flujo de potencia, magnitud de la tensión, etc.) lo más cerca posible de un valor objetivo y^{sp} , para lo que pueden actuar sobre una variable de control x dentro de unos límites especificados (x^{min}, x^{max}). A su vez, el valor especificado y^{sp} puede referirse bien a un punto de ajuste deseado o bien a un límite que ha sido superado.

En el caso de los compensadores shunt, tales como el STATCOM, el voltaje es la magnitud regulada, y corresponde la mayoría de veces con el del nudo donde el compensador está conectado, dando lugar a un nudo PV convencional con $P^{sp} = 0$. No importa si P^{sp} es nulo o no, la potencia reactiva necesaria para mantener la magnitud de la tensión que se controla debe calcularse en cada iteración, y los límites especificados deben comprobarse. Cuando se viola un límite, Q^{lim} , la magnitud de la tensión ya no puede ser igual a V^{sp} , y el bus se convierte en un nudo PQ con $Q^{sp} = Q^{lim}$. Posteriormente, si el voltaje de ese nudo PQ virtual satisface $V^K > V^{sp}$ con $Q^{sp} = Q^{max}$, o $V^K < V^{sp}$ con $Q^{sp} = Q^{min}$, entonces se convierte de nuevo un nudo PV (esto puede suceder debido a las interacciones no lineales entre los buses PV cercanos).

La forma de aplicar esos ajustes depende de la metodología de flujo de carga empleada. Los procedimientos existentes se pueden agrupar en las dos categorías siguientes:

1. Tanto el vector de estado como el de mismatches se adaptan dinámicamente en cada iteración para tener en cuenta las restricciones de igualdad adicionales. Por tanto, la estructura del sistema lineal que surge del método de Newton-Raphson se convierte en

$$\begin{bmatrix} H & N & \partial P/\partial x \\ M & L & \partial Q/\partial x \\ \partial y/\partial \theta & \partial y/\partial V & \partial y/\partial x \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta x \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta y \end{bmatrix}^k \quad \text{Ec. 2.47.}$$

donde

$$\Delta y^k = y^{sp} - y^k \quad \text{Ec. 2.48.}$$

representa los nuevos componentes del vector de mismatches, y x comprende el conjunto de variables de control asociadas. Si una variable en x supera un límite, entonces se pierde la capacidad de regulación, y el componente respectivo de Δy se retira del sistema de ecuaciones, junto con x .

2. Se implementa un proceso de realimentación local ajustando la variable de control en proporción al residuo de la magnitud regulada. Después de cada iteración, Δx viene dado por

$$\Delta x^k = \alpha \Delta y^k \quad \text{Ec. 2.49.}$$

donde la ganancia α de la realimentación debe ser elegida adecuadamente para no ralentizar el proceso de convergencia (si es muy pequeña) o para causar divergencia (si es muy grande). Cuando tanto x como y aparecen de manera explícita en el modelo linealizado, se asigna un valor adecuado para α mediante el cálculo de la sensibilidad entre ambas variables. De forma alternativa, se puede estimar α empíricamente observando las correcciones Δy conseguidas mediante Δx en iteraciones anteriores.

Cuando el número de ajustes de la solución es grande, las dos técnicas descritas anteriormente aumentan de manera significativa el número de iteraciones, en particular si se alcanzan varios límites de interacción. Para evitar un comportamiento oscilatorio, es aconsejable no poner en marcha el proceso de ajuste hasta que los componentes de y sean lo suficientemente precisos.

2.3. FORMULACIÓN DEL MODELO SIMPLE O UNIFILAR DEL STATCOM

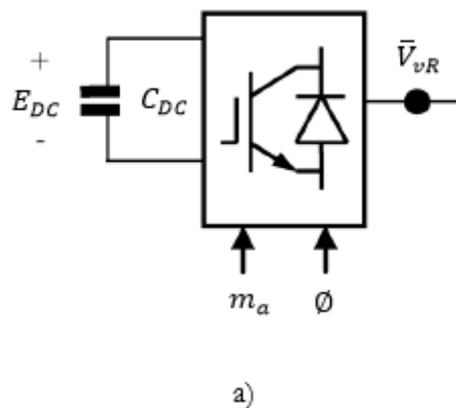
En este apartado se presenta un nuevo modelo de STATCOM destinado a problemas de flujo de potencia utilizando el método de Newton-Raphson. El STATCOM se compone de una conexión en serie de un convertidor de fuente de tensión (VSC) y un transformador de conexión [12].

El VSC se representa en este modelo por un transformador de cambiador de tomas (Load Tap Changer) complejo cuyos arrollamientos primario y secundario corresponden a los nudos de CA y CC del VSC, respectivamente. La magnitud y ángulo del cambiador de tomas complejo corresponden con el índice de modulación de amplitud y el desplazamiento de fase que existiría en un inversor de PWM para permitir tanto la generación como la absorción de potencia reactiva únicamente mediante el procesamiento electrónico de las ondas de tensión y corriente dentro del VSC.

Físicamente, el VSC está construido como un inversor de dos niveles o multinivel, que utiliza un puente convertidor formado por conmutadores de auto-conmutación accionados por control de tipo PWM. Emplea una pequeña batería de condensadores en su lado de corriente continua para mantener y estabilizar el voltaje de CC para permitir el funcionamiento del convertidor. El convertidor mantiene el condensador cargado al nivel de tensión requerido haciendo que su tensión de salida vaya retrasada un pequeño ángulo con respecto al voltaje del sistema de corriente alterna [13].

Se dice que el VSC no tiene inercia, su respuesta es prácticamente instantánea, no altera de forma significativa la impedancia del sistema y puede generar internamente potencia reactiva (tanto capacitiva e inductiva) [14]. Con el propósito del análisis de frecuencia fundamental, el procesamiento electrónico del VSC de las ondas de tensión y corriente está bien sintetizado por la susceptancia variable B_{eq} , que se conecta al bus de corriente alterna del transformador de cambiador de tomas ideal. Hay que destacar que B_{eq} es la responsable del total de la generación de potencia reactiva en el VSC.

El STATCOM, como ya se ha explicado anteriormente, puede ser visto como el conjunto de un VSC y un transformador de conexión, que puede ser de cambiador de tomas (LTC). La representación esquemática del VSC y del circuito equivalente, así como el circuito equivalente del transformador LTC se dan en la siguiente figura.



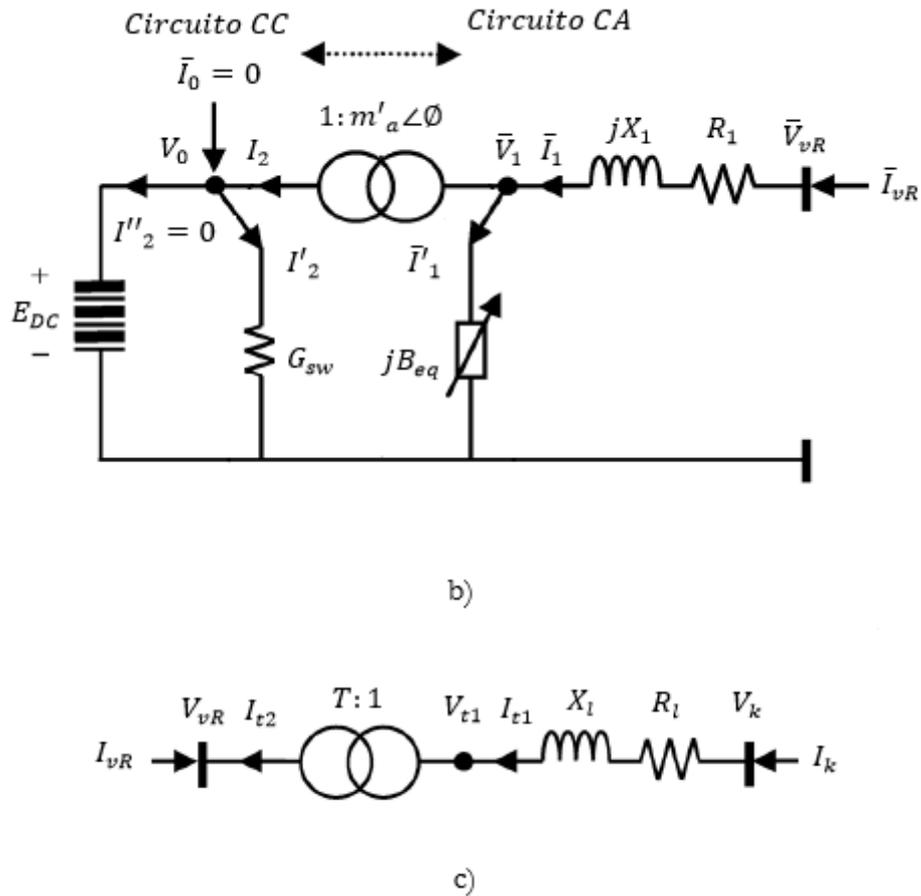


Figura 2.7. a) Representación esquemática del VSC. b) Circuito equivalente del VSC. c) Circuito equivalente del transformador LTC.

La incorporación de este modelo de STATCOM en una solución de flujo de potencia es sencillo. Sólo se requiere la representación explícita de las ecuaciones nodales de flujo de potencia del VSC conectado entre por ejemplo los nudos 0 y vR , y las ecuaciones de potencia nodales del transformador LTC conectado entre por ejemplo los nudos vR y k . De manera alternativa, se puede obtener un conjunto más compacto de las ecuaciones de flujo de potencia dándose cuenta de que el punto de conexión entre el VSC y el transformador LTC, es decir, el nudo vR , recibe una inyección nodal de corriente externa igual a cero. En este caso, la eliminación matemática del nudo vR se convierte en una opción.

2.3.2. MATRIZ DE ADMITANCIAS (YBUS)

En primer lugar, se expondrá el desarrollo de la matriz de admitancias del VSC siguiendo su modelo y explicando cada uno de sus componentes y relaciones. A continuación, se añadirán a la matriz los elementos correspondientes al transformador LTC, y de esta forma, se obtendrá una Ybus completa que represente el modelo de STATCOM propuesto.

Desde el punto de vista conceptual, el componente central del modelo de VSC es el transformador ideal de tomas complejas que, en ausencia de pérdidas por conmutación, actúa como un terminal nulo que limita la corriente de la fuente a cero, siendo dicha fuente el condensador, y el terminal libre asociado la susceptancia variable [15]. Hay dos elementos conectados al bus de corriente continua del VSC, que son la fuente E_{DC} y la resistencia G_{SW} que es dependiente de la corriente. Por lo tanto, el transformador de tomas ideal es el elemento que proporciona la interfaz para los circuitos de CA y CC del VSC. Cabe destacar que no existe potencia reactiva circulando a través de él, únicamente potencia activa que es similar a la de CC.

El modelo de VSC que se describe se desarrolla a partir de la siguiente relación fundamental:

$$\bar{V}_1 = m'_a e^{j\Phi} E_{DC} \quad \text{Ec. 2.50.}$$

donde la magnitud m'_a de la toma del transformador ideal corresponde al coeficiente de modulación de amplitud del VSC, donde se cumple la siguiente relación para un VSC de dos niveles y tres fases: $m'_a = \sqrt{3}/2 \cdot m_a$, donde, en el rango lineal de modulación, el índice de modulación de amplitud toma valores dentro de ciertos límites: $0 < m_a < 1$. El ángulo Φ es el ángulo de fase de la tensión compleja \bar{V}_1 con respecto a la referencia de fase del sistema, y E_{DC} es el voltaje del bus de CC que es un escalar real y que tomando una base de unitarias tiene un valor de $\sqrt{2}$.

Otros elementos del circuito eléctrico que se muestra en la fig. 2.7 b) son la impedancia en serie que está conectado al lado de CA del transformador ideal. La reactancia serie X_1 representa el magnetismo de la interfaz del VSC. La resistencia en serie R_1 representa las pérdidas óhmicas que son proporcionales a la corriente del terminal de CA al cuadrado. Hay que tener en cuenta que la corriente en el devanado secundario I_2 , que es siempre una cantidad real, se divide en I'_2 e I''_2 . Esta última corriente es siempre cero durante la operación de régimen permanente.

Como cabe esperar, la conservación de potencia aparente del transformador ideal en la 2.7 b) se mantiene, pero no existe potencia reactiva circulando a través de él, ya que todos los requerimientos de potencia reactiva del VSC (generación/absorción) se cumplen gracias a la rama en derivación conectada al nudo 1. Las relaciones de potencia entre los nudos 1 y 0, que representan el modelo completo de VSC, son

$$V_0 I_2 = \bar{V}_1 (\bar{I}_1^* - \bar{I}'_1) = \bar{V}_1 \bar{I}_1^* + j B_{eq} V_1^2; \quad V_0 I_2 = \text{Re}\{\bar{V}_1 \bar{I}_1^*\} \quad \text{Ec. 2.51.}$$

El modelo de pérdidas de conmutación corresponde a una resistencia constante (conductancia) G_0 , que en presencia de voltaje de corriente continua y corriente de carga constantes, produciría una pérdida de potencia constante para una frecuencia de conmutación dada del convertidor PWM. Es cierto que la característica de la resistencia constante puede ser inexacta porque a pesar de que la tensión de CC se mantiene en gran parte constante, la corriente de carga varía de acuerdo con las condiciones de funcionamiento predominantes. Por lo tanto, se propone que la característica de la resistencia obtenida a tensión y corriente nominal sea corregida por la relación cuadrática entre la corriente real y la nominal

$$G_0 \cdot \left(\frac{I_2^{real}}{I_2^{nom}} \right)^2 ; G_{sw} \quad \text{Ec. 2.52.}$$

donde G_{sw} sería un término resistivo que presenta un grado de comportamiento de potencia.

Las relaciones de tensión y corriente en el transformador de tomas ideal son

$$\frac{\bar{V}_1}{\bar{V}_0} = \frac{m'_a \angle \Phi}{1} \quad \frac{m'_a \angle -\Phi}{1} = \frac{I_2}{\bar{I}_1 - \bar{I}'_1} \quad \text{Ec. 2.53.}$$

La corriente a través de la admitancia conectada entre los nudos vR y 1 es

$$\bar{I}_1 = \bar{Y}_1 (\bar{V}_{vR} \bar{V}_1) = \bar{Y}_1 \bar{V}_{vR} - m'_a \angle \Phi \bar{Y}_1 V_0 = \bar{I}_{vR} \quad \text{Ec. 2.54.}$$

donde $\bar{Y}_1 = 1/(R_1 + jX_1)$.

En el nudo 0, se cumple la siguiente relación:

$$\begin{aligned} \bar{I}_0 &= -I_2 + I'_2 = -m'_a \angle -\Phi (\bar{I}_1 - \bar{I}'_1) + G_{sw} V_0 \\ &= -m'_a \angle -\Phi \bar{Y}_1 \bar{V}_{vR} + G_{sw} V_0 + m'^2_a (\bar{Y}_1 + jB_{eq}) V_0 \end{aligned} \quad \text{Ec. 2.55.}$$

Combinando las dos ecuaciones anteriores e incorporando las restricciones del circuito eléctrico de la fig. 2.7 b), se obtiene

$$\begin{pmatrix} \bar{I}_{vR} \\ \bar{I}_0 = 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{Y}_1 & -m'_a \angle \Phi \bar{Y}_1 \\ -m'_a \angle -\Phi \bar{Y}_1 & G_{sw} + m'^2_a (\bar{Y}_1 + jB_{eq}) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \bar{V}_{vR} \\ V_0 = E_{DC} \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 2.56.}$$

más explícitamente

$$\begin{pmatrix} \bar{I}_{vR} \\ \bar{I}_0 = 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{Y}_1 & -m'_a (\cos \Phi + j \sin \Phi) \bar{Y}_1 \\ -m'_a (\cos \Phi - j \sin \Phi) \bar{Y}_1 & G_{sw} + m'^2_a (\bar{Y}_1 + jB_{eq}) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \bar{V}_{vR} \\ V_0 = E_{DC} \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 2.57.}$$

Hay que señalar que esta expresión representa el circuito equivalente del VSC en la fig. 2.7 b) en régimen permanente, con el efecto del condensador representado por la tensión de corriente continua E_{DC} .

La matriz de admitancias nodales del transformador LTC de la fig. 2.7 c) es

$$\begin{pmatrix} \bar{I}_k \\ \bar{I}_{vR} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{Y}_l & -T\bar{Y}_l \\ -T\bar{Y}_l & T^2\bar{Y}_l \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \bar{V}_k \\ \bar{V}_{vR} \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 2.58.}$$

Al combinar los dos modelos individuales descritos se obtiene el modelo compuesto que representa el VSC-LTC o STATCOM dado por la siguiente ecuación.

$$\begin{pmatrix} \bar{I}_k \\ \bar{I}_{vR} \\ \bar{I}_0 = 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{Y}_l & -T\bar{Y}_l & 0 \\ -T\bar{Y}_l & T^2\bar{Y}_l + \bar{Y}_1 & -m'_a \angle \Phi \bar{Y}_1 \\ 0 & -m'_a \angle -\Phi \bar{Y}_1 & G_{sw} + m'^2_a (\bar{Y}_1 + jB_{eq}) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \bar{V}_k \\ \bar{V}_{vR} \\ V_0 = E_{DC} \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 2.59.}$$

La eliminación matemática del nudo vR da lugar a la matriz de admitancias nodales reducida que se muestra a continuación, donde $\Delta = T^2\bar{Y}_l + \bar{Y}_1$ y $\bar{Y}_{eq} = G_{sw} + jm'^2_a B_{eq}$.

$$\begin{aligned}
& \begin{pmatrix} \bar{I}_k \\ \bar{I}_0 = 0 \end{pmatrix} \\
& = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} \bar{Y}_1 \bar{Y}_l & -T m'_a \angle \Phi \bar{Y}_l \bar{Y}_1 \\ -T m'_a \angle -\Phi \bar{Y}_l \bar{Y}_1 & T^2 m'^2_a \bar{Y}_l \bar{Y}_1 + (T^2 \bar{Y}_l + \bar{Y}_1) \bar{Y}_{eq} \end{pmatrix} \\
& \times \begin{pmatrix} \bar{V}_k \\ V_0 = E_{DC} \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{Ec. 2.60.}$$

Sin embargo, cabe destacar que este modelo reducido sólo es atractivo si se está preparado para perder un grado de flexibilidad en el modelado, ya que este nudo vR no estará explícitamente disponible para la regulación de la acción tanto de T como de m'_a . En cambio, la acción combinada de regulación se llevará a cabo en el lado de alta tensión del transformador LTC.

2.3.3. ECUACIONES DE POTENCIA NODALES

El modelo de potencia reactiva para el VSC se obtiene a partir de su matriz de admitancias nodales, donde se hace referencia a la tensión de corriente continua sólo como V_0 en lugar de como E_{DC} .

$$\begin{aligned}
& \begin{pmatrix} \bar{S}_{vR} \\ \bar{S}_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{V}_{vR} & 0 \\ 0 & V_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{I}_{vR}^* \\ \bar{I}_0^* \end{pmatrix} \\
& = \begin{pmatrix} \bar{V}_{vR} & 0 \\ 0 & V_0 \end{pmatrix} \\
& * \left\{ \begin{pmatrix} \bar{Y}_1^* & -m'_a (\cos \Phi - j \sin \Phi) \bar{Y}_1^* \\ -m'_a (\cos \Phi + j \sin \Phi) \bar{Y}_1^* & G_{sw} + m'^2_a (\bar{Y}_1 - j B_{eq}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{V}_{vR}^* \\ V_0 \end{pmatrix} \right\}
\end{aligned} \tag{Ec. 2.61.}$$

Resolviendo este sistema, se obtienen las expresiones de potencia nodales tanto activa como reactiva para el VSC. Siguiendo un procedimiento similar al anterior, pero considerando ahora la matriz de matriz de admitancias nodales completa que representa al STATCOM, las ecuaciones de potencia nodales que se obtienen son las siguientes

$$\begin{aligned}
P_k & = G_{eq\ 11} V_k^2 - T m'_a V_k V_0 \\
& \times [G_{eq\ 11} \cos(\theta_k - \theta_0 - \Phi) \\
& + B_{eq\ 11} \sin(\theta_k - \theta_0 - \Phi)]
\end{aligned} \tag{Ec. 2.62.}$$

$$\begin{aligned}
Q_k = & -B_{eq\ 11}V_k^2 - Tm'_aV_kV_0 \\
& \times [G_{eq\ 11}\sin(\theta_k - \theta_0 - \Phi) \\
& - B_{eq\ 11}\cos(\theta_k - \theta_0 - \Phi)]
\end{aligned} \tag{Ec. 2.63.}$$

$$\begin{aligned}
P_0 = & (T^2m'^2_aG_{eq\ 11} + T^2G_{eq\ l0} + G_{eq\ 10})V_0^2 - Tm'_aV_kV_0 \\
& \times [G_{eq\ 11}\cos(\theta_0 - \theta_k + \Phi) \\
& + B_{eq\ 11}\sin(\theta_0 - \theta_k + \Phi)]
\end{aligned} \tag{Ec. 2.64.}$$

$$\begin{aligned}
Q_0 = & -(T^2m'^2_aB_{eq\ 11} + T^2B_{eq\ l0} + B_{eq\ 10})V_0^2 - Tm'_aV_kV_0 \\
& \times [G_{eq\ 11}\sin(\theta_0 - \theta_k + \Phi) \\
& - B_{eq\ 11}\cos(\theta_0 - \theta_k + \Phi)]
\end{aligned} \tag{Ec. 2.65.}$$

donde

$$G_{eq\ 11} = \frac{1}{\Delta} [T^2G_1(G_l^2 + B_l^2) + G_l(G_1^2 + B_1^2)] \tag{Ec. 2.66.}$$

$$B_{eq\ 11} = \frac{1}{\Delta} [T^2B_1(G_l^2 + B_l^2) + B_l(G_1^2 + B_1^2)] \tag{Ec. 2.67.}$$

$$\begin{aligned}
G_{eq\ 10} = & \frac{1}{\Delta} [T^2B_l(m'^2_aG_1B_{eq} + B_1G_{sw}) \\
& + T^2G_l(G_1G_{sw} - m'^2_aB_1B_{eq}) + G_{sw}(G_1^2 + B_1^2)]
\end{aligned} \tag{Ec. 2.68.}$$

$$\begin{aligned}
B_{eq\ 10} = & \frac{1}{\Delta} [T^2G_l(m'^2_aG_1B_{eq} + B_1G_{sw}) \\
& - T^2B_l(G_1G_{sw} - m'^2_aB_1B_{eq}) + m'^2_aB_{eq}(G_1^2 + B_1^2)]
\end{aligned} \tag{Ec. 2.69.}$$

$$\begin{aligned}
G_{eq\ l0} = & \frac{1}{\Delta} [T^2G_{sw0}(G_l^2 + B_l^2) + B_l(B_1G_{sw} - m'^2_aG_1B_{eq}) \\
& + G_l(G_1G_{sw} + m'^2_aB_1B_{eq})]
\end{aligned} \tag{Ec. 2.70.}$$

$$B_{eq\ 10} = \frac{1}{\Delta} \left[T^2 m'_a{}^2 B_{eq} (G_l^2 + B_l^2) - G_l (B_1 G_{sw} - m'_a{}^2 G_1 B_{eq}) \right. \\ \left. + B_l (G_1 G_{sw} + m'_a{}^2 B_1 B_{eq}) \right] \quad \text{Ec. 2.71.}$$

$$\Delta = (T^2 G_l + G_1)^2 + (T^2 B_l + B_1)^2 \quad \text{Ec. 2.72.}$$

2.3.4. LINEALIZACIÓN Y MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

La solución numérica del sistema de ecuaciones que se obtuvo en el apartado anterior, para un conjunto predefinido de generación y un determinado patrón de carga, se lleva a cabo de manera muy eficiente por iteración empleando el método de Newton-Raphson. Este proceso implica repetida linealización de las ecuaciones de potencia nodales, y su evaluación inicial requiere de una conjetura fundamentada de los valores de las variables de estado: $(\theta_k^{(0)}, \theta_0^{(0)}, T, m'_a{}^{(0)}, \Phi^{(0)}, B_0^{(0)})$. El sistema de ecuaciones linealizado se puede compactar mediante la eliminación de la fila y la columna asociadas a la variable θ_0 , ya que esta es una variable que se conoce a priori y que mantiene su valor en el punto de inicialización, que en este caso es cero. La ecuación resultante viene dada por la siguiente expresión, donde se utiliza Tm'_a para representar el uso bien de T o de m'_a .

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \Delta P_{0-k} \\ \Delta Q_{0-k} \end{bmatrix}^{(r)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \left(\frac{\partial P_k}{\partial Tm'_a} \right) Tm'_a & \frac{\partial P_k}{\partial \Phi} & \frac{\partial P_k}{\partial B_{eq}} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \left(\frac{\partial Q_k}{\partial Tm'_a} \right) Tm'_a & \frac{\partial Q_k}{\partial \Phi} & \frac{\partial Q_k}{\partial B_{eq}} \\ \frac{\partial P_{0-k}}{\partial \theta_k} & \left(\frac{\partial P_{0-k}}{\partial Tm'_a} \right) Tm'_a & \frac{\partial P_{0-k}}{\partial \Phi} & \frac{\partial P_{0-k}}{\partial B_{eq}} \\ \frac{\partial Q_{0-k}}{\partial \theta_k} & \left(\frac{\partial Q_{0-k}}{\partial Tm'_a} \right) Tm'_a & \frac{\partial Q_{0-k}}{\partial \Phi} & \frac{\partial Q_{0-k}}{\partial B_{eq}} \end{bmatrix}^{(r)} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta Tm'_a \\ \Delta \Phi \\ \Delta B_{eq} \end{bmatrix}^{(r)} \quad \text{Ec. 2.73.}$$

La atracción de la ecuación anterior es su naturaleza compacta para representar la operación combinada del VSC y del transformador LTC, con sólo cuatro variables. Sin embargo, esta sencillez tiene un precio, y es que se pierde algo de flexibilidad en el modelado. Se observa que, dado que el bus de conexión entre el VSC y el LTC no está explícitamente disponible en este modelo combinado, no puede ser controlado por la acción de regulación de T o de

m'_a . Además, dado que el bus de CC está regulado por la acción del condensador de corriente continua y se trata en la solución de flujo de potencia como un nudo *PV*, entonces T y m'_a están disponibles únicamente para regular la magnitud del voltaje en el bus de alta tensión del transformador LTC. Por lo tanto, la acción de regulación de T y m'_a es secuencial en este modelo. Debe hacerse hincapié en que, desde el punto de vista de resolución del flujo de potencia, no hay ninguna restricción en intentar controlar la tensión del bus de corriente continua, ya sea con T o m'_a . Sin embargo, desde el punto de vista del funcionamiento del equipo, esta acción reguladora no se hace casi nunca.

Las sucesivas evaluaciones de las ecuaciones de potencia nodales se llevan a cabo utilizando el conjunto mejorado de valores proporcionados por el proceso iterativo: $(\theta_k^{(r)}, \theta_0^{(r)}, T, m'_a^{(r)}, \Phi^{(r)}, B_0^{(r)})$, donde (r) es el contador de las iteraciones. Debe tenerse en cuenta que, en esta formulación del modelo conjunto, las capacidades de control se han ampliado en comparación con aquellas del VSC. Se hace posible regular la magnitud de la tensión nodal en la terminal del STATCOM (bus k) mediante la acción combinada de las tomas del LTC (T) y del coeficiente de modulación de amplitud del VSC (m'_a), de uno en uno. Hay que destacar que en un VSC, m'_a toma valores continuos y que en un transformador LTC, la toma (T) tiene valores discretos. Sin embargo, para la resolución del modelo de flujo de potencia utilizando el método de Newton-Raphson y para procurar mantener la característica de convergencia cuadrática de este algoritmo iterativo, se asume que la variable (T) toma valores continuos. Al final de la solución iterativa, la toma T se mueve al valor de la toma física más cercana, las tensiones nodales se reajustan y los flujos de potencia y las pérdidas se calculan.

Las variables de control y los términos de mismatch de potencia, que son la diferencia entre potencia neta y la calculada en un determinado nudo, son

$$\Delta P_k = P_{k,net} - P_{k,cal} = (P_{k,gen} - P_{k,load}) - P_{k,cal} \quad \text{Ec. 2.74.}$$

$$\Delta Q_k = Q_{k,net} - Q_{k,cal} = (Q_{k,gen} - Q_{k,load}) - Q_{k,cal} \quad \text{Ec. 2.75.}$$

$$\Delta P_{0-k} = P_{0-k,reg} - P_{0-k,cal} \quad \text{Ec. 2.76.}$$

$$\Delta Q_{0-k} = Q_{0-k,reg} - Q_{0-k,cal} \quad \text{Ec. 2.77.}$$

siendo el mismatch de flujo de potencia de la rama $0 - k$ la diferencia entre el flujo de potencia que se desea por la rama y la potencia calculada.

Los incrementos de las variables de estado calculadas en una iteración (r) son

$$\Delta\theta_k^{(r)} = \theta_k^{(r)} - \theta_k^{(r-1)} \quad \text{Ec. 2.78.}$$

$$\Delta T m_a'^{(r)} = T m_a'^{(r)} - T m_a'^{(r-1)} \quad \text{Ec. 2.79.}$$

$$\Delta\Phi^{(r)} = \Phi^{(r)} - \Phi^{(r-1)} \quad \text{Ec. 2.80.}$$

$$\Delta B_{eq}^{(r)} = B_{eq}^{(r)} - B_{eq}^{(r-1)} \quad \text{Ec. 2.81.}$$

donde T y m_a' se inicializan normalmente con valores de 1 y $\sqrt{3}/2$ respectivamente.

2.4. FORMULACIÓN DEL MODELO COMPLEJO O TRIFÁSICO DEL STATCOM

En este apartado se presenta la versión trifásica o compleja del modelo de STATCOM desarrollado anteriormente. Este modelo está también orientado a problemas de flujo de potencia empleando el método de Newton-Raphson, pero añade además la novedad de no sólo ser aplicable a sistemas trifásicos comunes, sino también a aquellos que se encuentran desequilibrados. Para que esto sea posible, se añade un cable de neutro a la red. De nuevo, el STATCOM se compone de una conexión en serie de un convertidor de fuente de tensión (VSC) y un transformador de conexión, en este caso multiplicados por tres (un bloque conectado a cada fase del sistema).

Igual que ocurría en el apartado anterior, el VSC se representa también en este modelo por un transformador de cambiador de tomas (Load Tap Changer) complejo cuyos arrollamientos primario y secundario corresponden a los nudos de CA y CC del VSC, respectivamente. La magnitud y ángulo del cambiador de tomas complejo corresponden con el índice de modulación de amplitud, que puede ser diferente en cada fase, y el desplazamiento de fase que existiría en un inversor de PWM para permitir tanto la generación como la absorción de potencia reactiva únicamente mediante el procesamiento electrónico de las ondas de tensión y corriente dentro del VSC. Por tanto, las principales características del modelo no varían del monofásico al trifásico.

Físicamente, el VSC está construido de la misma forma que ocurría para el modelo simple. Igual que antes, está constituido como un inversor de dos niveles o multinivel, emplea una batería de condensadores en el lado de continua para mantener el voltaje, no tiene inercia (su respuesta es prácticamente instantánea), no altera de forma significativa la impedancia del sistema y puede generar potencia reactiva (tanto capacitiva como inductiva). De nuevo, B_{eq}

(que se conecta al bus de CA del transformador de cambiador de tomas ideal) es la responsable de la totalidad de la generación de potencia reactiva en el VSC.

La representación esquemática del VSC y del circuito equivalente del STATCOM, que incluye también al transformador de conexión, sería el mismo que para el modelo simple, pero esta vez repetido tres veces para ser conectado uno a cada fase del sistema. En la siguiente figura, se aprecia como el STATCOM se conecta a la red trifásica.

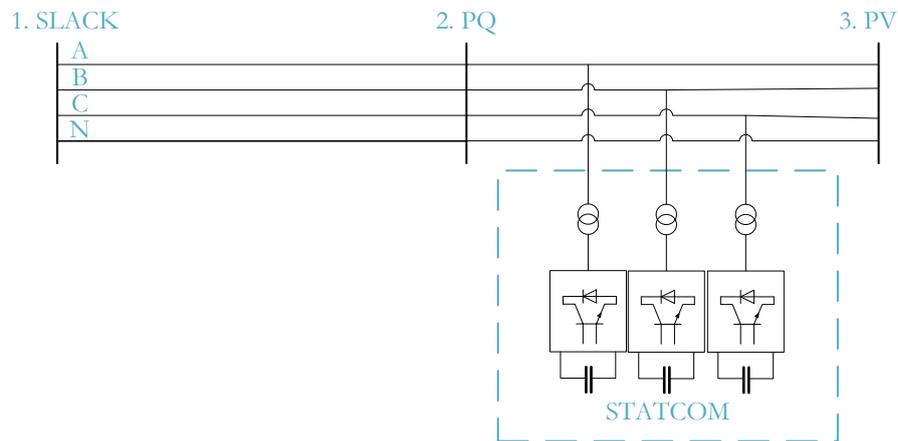


Figura 2.8. Conexión del STATCOM a la red trifásica.

Para incorporar este modelo trifásico de STATCOM en una solución de flujo de cargas hace falta es representar explícitamente las ecuaciones nodales de flujo de potencia del VSC conectado entre los nudos inicial y de conexión al LTC, y las ecuaciones de potencia nodales del LTC, conectado entre este último nudo y el de unión a la red. En el nuevo modelo que nos ocupa, será necesario repetir este proceso para cada una de las tres fases del sistema. De otra manera, se puede obtener también un conjunto más compacto de las ecuaciones de flujo de potencia si se es consciente de que el punto de conexión entre el VSC y el LTC recibe una inyección de corriente externa nula, por lo que convierte en una posibilidad la eliminación matemática de este nudo.

2.4.2. TEOREMA DE FORTESQUE Y CONEXIÓN DE HOLLGREEN

En este apartado, se analiza el estudio que habría que realizar sobre un sistema trifásico en el caso de que en este se den faltas desequilibradas. Para ello, se presenta el método de componentes simétricas, definiendo el Teorema de Fortesque y a continuación la conexión de Hollgreen, que permite medir la corriente homopolar de la red.

- MÉTODO DE COMPONENTES SIMÉTRICAS

El Teorema de Fortesque afirma que cualquier sistema desequilibrado se puede representar como superposición de tres sistemas trifásicos equilibrados (uno de secuencia directa, otro

de secuencia inversa y otro de secuencia homopolar). En la siguiente figura, se muestra la representación fasorial de los sistemas de tensiones de secuencia directa, inversa y homopolar.

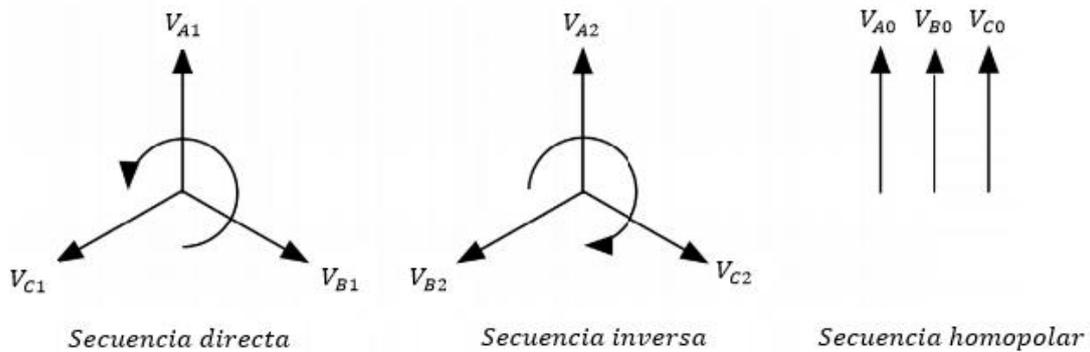


Figura 2.9. Representación fasorial de los sistemas de secuencia directa, inversa y homopolar.

El Teorema de Fortesque se puede formular matemáticamente a través de una transformación lineal llamada transformación directa de componentes simétricas, que se aplica tanto a tensiones como a intensidades:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.82.}$$

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.83.}$$

donde, como se puede ver en la siguiente figura,

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad \text{Ec. 2.84.}$$

$$a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} \quad \text{Ec. 2.85.}$$

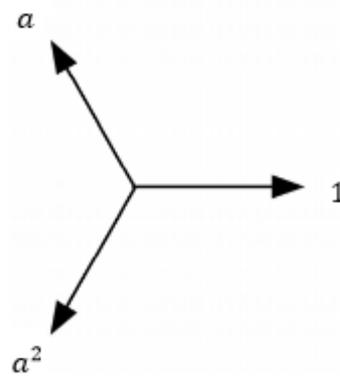


Figura 2.10. Representación fasorial de 1, a y a^2 .

Como es lógico, se puede definir la transformación inversa de componentes simétricas de tensiones e intensidades como:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.86.}$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 2.87.}$$

El significado físico de la intensidad homopolar (que se usará más adelante en el código de MATLAB) se muestra en el siguiente ejemplo. En él, la conexión paralelo de los secundarios de los transformadores de corriente (conexión Hollgreen) permite medir la corriente homopolar tal y como muestra la figura a continuación.

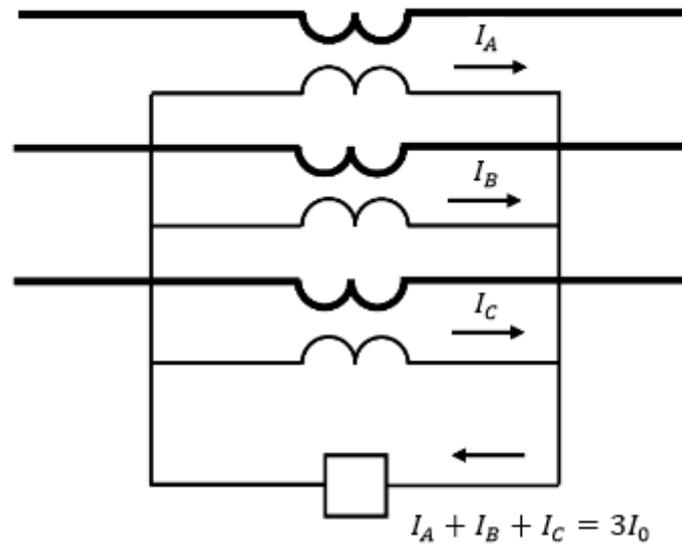


Figura 2.11. Conexión paralelo de los secundarios de los transformadores de corriente para medir la intensidad homopolar.

siendo $3I_0 = I_N$.

2.4.3. MATRIZ DE ADMITANCIAS (YBUS)

Para obtener la matriz Ybus completa que representa al nuevo modelo de STATCOM trifásico se imita el proceso implementado para el modelo simple. En primer lugar, se desarrolla la matriz de admitancias del VSC siguiendo su modelo, y a continuación se añaden a la matriz los elementos correspondientes al transformador LTC. En este caso, sin embargo, tanto la dimensión de la matriz de impedancias como su distribución será distinta y bastante más compleja que en el modelo anterior, ya que habrá que tener en cuenta las tres fases (sin incluir el neutro) de las que consta el sistema. Más tarde, será necesario combinar esta matriz Ybus del STATCOM con las aportaciones del resto de elementos de la red, que ahora ya sí constan de tres fases más el neutro.

Conceptualmente hablando, el transformador ideal de tomas complejas es de nuevo el componente central del modelo de VSC, y actúa como terminal nulo al limitar la corriente de la fuente (condensador) a cero. Además, proporciona el interfaz entre para los circuitos de CA y CC del VSC. Como dato, es útil saber también que través de él circula únicamente potencia activa, muy similar a la de CC.

El modelo de VSC descrito se desarrolla a partir de la siguiente ecuación:

$$\bar{V}_{1j} = m'_{aj} e^{j\phi_j} E_{DC} \quad \forall j \in A, B, C \quad \text{Ec. 2.88.}$$

donde la magnitud m'_a de la toma del transformador ideal corresponde al índice de modulación de amplitud del VSC, y cumple la relación $m'_a = \sqrt{3}/2 \cdot m_a$ para un VSC de tres fases y dos niveles, donde el coeficiente de modulación de amplitud m_a toma valores dentro del límite $0 < m_a < 1$. Este índice toma el mismo valor inicial para las tres fases del sistema, pero después de las iteraciones llevadas a cabo durante el flujo de cargas, puede adquirir valores finales diferentes para cada una en caso de darse un caso de desequilibrio. El ángulo Φ es el ángulo de fase de la tensión \bar{V}_1 , y será por tanto diferente para cada fase, tanto si hay desequilibrio como si no. E_{DC} es el voltaje del bus de CC, y en unitarias toma un valor de $\sqrt{2}$.

Los demás elementos que aparecían en el modelo sencillo se vuelven a repetir en el complejo, pero esta vez triplicados, y todos ellos (reactancia serie, impedancia serie, ...) representando los mismos fenómenos. Igual que ocurría antes, en la corriente del devanado secundario del transformador que se divide en dos componentes, sigue siendo nula en régimen permanente aquella que circula a través del condensador.

Como es lógico, la conservación de potencia aparente en el transformador ideal del VSC se mantiene, pero todos los requerimientos de potencia reactiva se cumplen gracias a la rama conectada en paralelo al primario del transformador, y por tanto no existe potencia reactiva circulando a través de él. Las relaciones de potencia entre ambos lados del transformador siguen siendo las siguientes.

$$V_{0j}I_{2j} = \bar{V}_{1j}(\bar{I}_{1j}^* - \bar{I}'_{1j}) = \bar{V}_{1j}\bar{I}_{1j}^* + jB_{eqj}V_{1j}^2; \quad V_{0j}I_{2j} = \text{Ec. 2.89.}$$

$$\text{Re}\{\bar{V}_{1j}\bar{I}_{1j}^*\} \quad \forall j \in A, B, C$$

El modelo de pérdidas de conmutación en el modelo complejo corresponde a una conductancia constante que, en presencia de voltaje de corriente continua e intensidad de carga constantes, produciría una pérdida de potencia constante para una frecuencia de conmutación del convertidor PWM dada. Sin embargo, se propone que la característica de la resistencia obtenida a tensión e intensidad nominal se corrija mediante la misma relación que se aplicaba en el modelo simple y que se muestra a continuación. Esta corrección se lleva a cabo porque, aunque la tensión de CC se mantiene constante, la intensidad de carga varía dependiendo de las condiciones de funcionamiento.

$$G_0 \cdot \left(\frac{I_{2j}^{real}}{I_{2j}^{nom}} \right)^2 ; G_{swj} \quad \forall j \in A, B, C \quad \text{Ec. 2.90.}$$

donde G_{sw} sería un término resistivo que presenta un grado de comportamiento de potencia.

Las relaciones de tensión y corriente en el transformador de tomas ideal son

$$\frac{\bar{V}_{1j}}{\bar{V}_{0j}} = \frac{m'_{aj} \angle \Phi_j}{1} \quad \frac{m'_{aj} \angle -\Phi_j}{1} = \frac{I_{2j}}{\bar{I}_{1j} - \bar{I}'_{1j}} \quad \forall j \in A, B, C \quad \text{Ec. 2.91.}$$

Siguiendo la misma metodología que en el modelo sencillo, se establecen las expresiones que relacionan los nudos finales e iniciales a los que se conectan tanto el VSC como el transformador LTC. Por tanto, al combinar los dos modelos individuales del VSC y del LTC que resultarían y utilizando para los nudos y elementos del circuito la misma nomenclatura que en el modelo simple, se obtiene el modelo compuesto que representa el VSC-LTC o STATCOM. Mediante la eliminación matemática del nudo vR se llega a la matriz de admitancias nodales reducida que se muestra a continuación, donde $\Delta = T^2 \bar{Y}_l + \bar{Y}_1$ y $\bar{Y}_{eqj} = G_{sw} + jm'_{aj}{}^2 B_{eqj} \quad \forall j \in A, B, C$.

$$\begin{pmatrix} \bar{I}_{k_A} \\ \bar{I}_{0_A} = 0 \\ \bar{I}_{k_B} \\ \bar{I}_{0_B} = 0 \\ \bar{I}_{k_C} \\ \bar{I}_{0_C} = 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} \bar{Y}_1 \bar{Y}_l & -Tm'_{a_A} \angle \Phi_A \bar{Y}_l \bar{Y}_1 & 0 \\ -Tm'_{a_A} \angle -\Phi_A \bar{Y}_l \bar{Y}_1 & T^2 m'^2_{a_A} \bar{Y}_l \bar{Y}_1 + (T^2 \bar{Y}_l + \bar{Y}_1) \bar{Y}_{eqA} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Y}_1 \bar{Y}_l \\ 0 & 0 & -Tm'_{a_B} \angle -\Phi_B \bar{Y}_l \bar{Y}_1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -Tm'_{a_B} \angle \Phi_B \bar{Y}_l \bar{Y}_1 & 0 & 0 \\ T^2 m'^2_{a_B} \bar{Y}_l \bar{Y}_1 + (T^2 \bar{Y}_l + \bar{Y}_1) \bar{Y}_{eqB} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Y}_1 \bar{Y}_l & -Tm'_{a_C} \angle \Phi_C \bar{Y}_l \bar{Y}_1 \\ 0 & -Tm'_{a_C} \angle -\Phi_C \bar{Y}_l \bar{Y}_1 & T^2 m'^2_{a_C} \bar{Y}_l \bar{Y}_1 + (T^2 \bar{Y}_l + \bar{Y}_1) \bar{Y}_{eqC} \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 2.92.}$$

$$\times \begin{pmatrix} \bar{V}_{k_A} \\ V_{0_A} = E_{DC_A} \\ \bar{V}_{k_B} \\ V_{0_B} = E_{DC_B} \\ \bar{V}_{k_C} \\ V_{0_C} = E_{DC_C} \end{pmatrix}$$

Al igual que ocurría anteriormente, hay que destacar que este modelo reducido sólo es útil si no hay inconveniente en perder un grado de flexibilidad en el modelado, ya que el nudo que conecta el VSC con el transformador LTC ya no estará disponible para regular tanto T como m'_a . La acción combinada de regulación se llevará a cabo, en este caso, en el lado de alta tensión del transformador LTC.

2.4.4. ECUACIONES DE POTENCIA NODALES

El modelo de potencia reactiva para el VSC se obtiene partiendo de su matriz de admitancias nodales Y_{bus} .

$$\begin{aligned}
\begin{pmatrix} \bar{S}_{vRA} \\ \bar{S}_{0A} \\ \bar{S}_{vRB} \\ \bar{S}_{0B} \\ \bar{S}_{vRC} \\ \bar{S}_{0C} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \bar{V}_{vRA} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & V_{0A} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{V}_{vRB} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & V_{0B} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{V}_{vRC} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & V_{0C} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{I}_{vRA}^* \\ \bar{I}_{0A}^* \\ \bar{I}_{vRB}^* \\ \bar{I}_{0B}^* \\ \bar{I}_{vRC}^* \\ \bar{I}_{0C}^* \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} \bar{V}_{vRA} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & V_{0A} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{V}_{vRB} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & V_{0B} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{V}_{vRC} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & V_{0C} \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{Ec. 2.93.}$$

$$\begin{aligned}
& * \left\{ \begin{array}{ccc} \bar{Y}_1^* & -m'_{aA}(\cos \Phi_A - j \sin \Phi_A) \bar{Y}_1^* & 0 \\ -m'_{aA}(\cos \Phi_A + j \sin \Phi_A) \bar{Y}_1^* & G_{swA} + m'^2_{aA}(\bar{Y}_1 - jB_{eqA}) & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Y}_1^* \\ 0 & 0 & -m'_{aB}(\cos \Phi_B + j \sin \Phi_B) \bar{Y}_1^* \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -m'_{aB}(\cos \Phi_B - j \sin \Phi_B) \bar{Y}_1^* & 0 & 0 \\ G_{swB} + m'^2_{aB}(\bar{Y}_1 - jB_{eqB}) & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Y}_1^* & -m'_{aC}(\cos \Phi_C - j \sin \Phi_C) \bar{Y}_1^* \\ 0 & -m'_{aC}(\cos \Phi_C + j \sin \Phi_C) \bar{Y}_1^* & G_{swC} + m'^2_{aC}(\bar{Y}_1 - jB_{eqC}) \end{array} \right\} \\
& * \begin{pmatrix} \bar{V}_{vRA}^* \\ V_{0A} \\ \bar{V}_{vRB}^* \\ V_{0B} \\ \bar{V}_{vRC}^* \\ V_{0C} \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

Al resolver este sistema, se obtienen las expresiones de potencia nodales tanto activa como reactiva para el VSC. Siguiendo un procedimiento similar, pero considerando ahora la matriz de admitancias nodales completa que representa al STATCOM, se obtienen las ecuaciones de potencia nodales que se muestran a continuación. Como es lógico, estas ecuaciones se repetirán para cada una de las tres fases del sistema, y variarán en la medida en que lo hagan las variables que intervienen en ellas.

$$\begin{aligned}
P_{k_j} &= G_{eq\ 11} V_{k_j}^2 - T m'_{a_j} V_{k_j} V_{0_j} \\
&\quad \times \left[G_{eq\ 11} \cos(\theta_{k_j} - \theta_0 - \Phi_j) \right. \\
&\quad \left. + B_{eq\ 11} \sin(\theta_{k_j} - \theta_0 - \Phi_j) \right]
\end{aligned} \tag{Ec. 2.94.}$$

$$\begin{aligned}
Q_{k_j} &= -B_{eq\ 11} V_{k_j}^2 - T m'_{a_j} V_{k_j} V_{0_j} \\
&\quad \times \left[G_{eq\ 11} \sin(\theta_{k_j} - \theta_0 - \Phi_j) \right. \\
&\quad \left. - B_{eq\ 11} \cos(\theta_{k_j} - \theta_0 - \Phi_j) \right]
\end{aligned} \tag{Ec. 2.95.}$$

$$\begin{aligned}
P_{0_j} &= (T^2 m'^2_{a_j} G_{eq\ 11} + T^2 G_{eq\ l0_j} + G_{eq\ 10_j}) V_{0_j}^2 - T m'_{a_j} V_{k_j} V_{0_j} \\
&\quad \times \left[G_{eq\ 11} \cos(\theta_0 - \theta_{k_j} + \Phi_j) \right. \\
&\quad \left. + B_{eq\ 11} \sin(\theta_0 - \theta_{k_j} + \Phi_j) \right]
\end{aligned} \tag{Ec. 2.96.}$$

$$\begin{aligned}
Q_{0_j} &= -(T^2 m'^2_{a_j} B_{eq\ 11} + T^2 B_{eq\ l0_j} + B_{eq\ 10_j}) V_{0_j}^2 - T m'_{a_j} V_{k_j} V_{0_j} \\
&\quad \times \left[G_{eq\ 11} \sin(\theta_0 - \theta_{k_j} + \Phi_j) \right. \\
&\quad \left. - B_{eq\ 11} \cos(\theta_0 - \theta_{k_j} + \Phi_j) \right]
\end{aligned} \tag{Ec. 2.97.}$$

$$\forall j \in A, B, C, N$$

donde

$$G_{eq\ 11} = \frac{1}{\Delta} [T^2 G_l (G_l^2 + B_l^2) + G_l (G_1^2 + B_1^2)] \tag{Ec. 2.98.}$$

$$B_{eq\ 11} = \frac{1}{\Delta} [T^2 B_l (G_l^2 + B_l^2) + B_l (G_1^2 + B_1^2)] \tag{Ec. 2.99.}$$

$$\begin{aligned}
G_{eq\ 10_j} &= \frac{1}{\Delta} \left[T^2 B_l (m'^2_{a_j} G_1 B_{eq_j} + B_1 G_{sw_j}) \right. \\
&\quad \left. + T^2 G_l (G_1 G_{sw_j} - m'^2_{a_j} B_1 B_{eq_j}) + G_{sw_j} (G_1^2 \right. \\
&\quad \left. + B_1^2) \right]
\end{aligned} \tag{Ec. 2.100}$$

$$B_{eq\ 10j} = \frac{1}{\Delta} \left[T^2 G_l (m'_{aj} G_1 B_{eqj} + B_1 G_{swj}) - T^2 B_l (G_1 G_{swj} - m'_{aj} B_1 B_{eqj}) + m'_{aj} B_{eqj} (G_1^2 + B_1^2) \right] \quad \text{Ec. 2.101}$$

$$G_{eq\ 10j} = \frac{1}{\Delta} \left[T^2 G_{sw0} (G_l^2 + B_l^2) + B_l (B_1 G_{swj} - m'_{aj} G_1 B_{eqj}) + G_l (G_1 G_{swj} + m'_{aj} B_1 B_{eqj}) \right] \quad \text{Ec. 2.102}$$

$$B_{eq\ 10j} = \frac{1}{\Delta} \left[T^2 m'_{aj} B_{eqj} (G_l^2 + B_l^2) - G_l (B_1 G_{swj} - m'_{aj} G_1 B_{eqj}) + B_l (G_1 G_{swj} + m'_{aj} B_1 B_{eqj}) \right] \quad \text{Ec. 2.103}$$

$$\Delta = (T^2 G_l + G_1)^2 + (T^2 B_l + B_1)^2 \quad \text{Ec. 2.104}$$

$$\forall j \in A, B, C, N$$

2.4.5. LINEALIZACIÓN Y MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

La solución numérica del sistema de ecuaciones para el modelo complejo que se obtuvo en el apartado anterior, se lleva a cabo de manera muy eficaz por iteración empleando el método de Newton-Raphson. Este proceso implica continua linealización de las ecuaciones de potencia nodales, así como una buena aproximación de los valores iniciales de las variables de estado, que serán las mismas que para el modelo simple pero extendidas a todas las fases. Generalmente, suele tomarse como valor inicial el mismo para todas ellas. La ecuación resultante, que compacta la acción conjunta del VSC y el LTC, se obtiene tras eliminar las filas y columnas asociadas a θ_0 para cada fase (que mantiene su valor en el punto de inicialización).

Sin embargo, como consecuencia de esta sencillez, se pierde flexibilidad en el modelado. Por una parte, el nudo que conecta el VSC con el LTC no se puede controlar por la acción de regulación de T o de m'_a , ya que este bus no está disponible en el modelo. Por otra parte, T y m'_a solamente sirven para regular la magnitud del voltaje en el bus de alta tensión del LTC, ya que el nudo de CC está regulado por la acción del condensador y se trata como un nudo PV en la solución de flujo de cargas. Cabe señalar que desde el punto de vista de resolución de flujo de potencia no existe restricción en intentar controlar el bus de CC, pero, desde la perspectiva de funcionamiento del equipo, esto no se hace casi nunca.

Con el conjunto mejorado de los valores proporcionados por el proceso iterativo se llevan a cabo las sucesivas evaluaciones de las ecuaciones de potencia nodales. Cabe destacar que, en comparación con el VSC, las capacidades de control con la formulación de este nuevo modelo conjunto aumentan de forma significativa. Por ejemplo, ahora es posible regular la tensión nodal en la terminal del STATCOM gracias a la acción de las tomas del LTC y del índice de modulación de amplitud del VSC, ambos por separado. Hay que destacar que en un VSC el coeficiente de modulación toma valores continuos, y que en un LTC la toma adquiere valores discretos. Sin embargo, para resolver el flujo de cargas se asume que esta última toma valores continuos, y al finalizar se mueve su valor al de la toma física más cercana.

Las variables de control y los términos de mismatch de potencia, que son la diferencia entre potencia neta y la calculada en un determinado nudo, son

$$\Delta P_{k_j} = P_{k,net_j} - P_{k,cal_j} = (P_{k,gen_j} - P_{k,load_j}) - P_{k,cal_j} \quad \text{Ec. 2.105}$$

$$\Delta Q_{k_j} = Q_{k,net_j} - Q_{k,cal_j} = (Q_{k,gen_j} - Q_{k,load_j}) - Q_{k,cal_j} \quad \text{Ec. 2.106}$$

$$\Delta P_{0-k_j} = P_{0-k,reg_j} - P_{0-k,cal_j} \quad \text{Ec. 2.107}$$

$$\Delta Q_{0-k_j} = Q_{0-k,reg_j} - Q_{0-k,cal_j} \quad \text{Ec. 2.108}$$

$$\forall j \in A, B, C, N$$

siendo el mismatch de flujo de potencia de la rama $0 - k$ la diferencia entre el flujo de potencia que se desea por la rama y la potencia calculada.

Los incrementos de las variables de estado calculadas en una iteración (r) son

$$\Delta \theta_{k_j}^{(r)} = \theta_{k_j}^{(r)} - \theta_{k_j}^{(r-1)} \quad \text{Ec. 2.109}$$

$$\forall j \in A, B, C, N$$

$$\Delta Tm_{a_j}^{(r)} = Tm_{a_j}^{(r)} - Tm_{a_j}^{(r-1)} \quad \text{Ec. 2.110}$$

$$\Delta \Phi_j^{(r)} = \Phi_j^{(r)} - \Phi_j^{(r-1)} \quad \text{Ec. 2.111}$$

$$\Delta B_{eq_j}^{(r)} = B_{eq_j}^{(r)} - B_{eq_j}^{(r-1)} \quad \text{Ec. 2.112}$$

$$\forall j \in A, B, C$$

donde T y m'_a se inicializan normalmente con valores de 1 y $\sqrt{3}/2$ respectivamente.

2.5. CONCLUSIONES

El STATCOM es un dispositivo shunt usado para mejorar el perfil de tensión en un nudo [\[16\]](#). Se utiliza comúnmente para mantener un voltaje constante a lo largo de las líneas de transmisión de CA y también sirve como controlador automático de potencia reactiva. En este documento se utilizó el entorno de MATLAB para simular un modelo de sistema eléctrico con un STATCOM conectado, y se presentaron sus características de control destinadas a mejorar los niveles de tensión y la calidad de potencia. La respuesta dinámica STATCOM es muy rápida (de tan sólo milisegundos) y capaz de pasar del modo de operación capacitivo al inductivo en unos pocos ciclos. Cuando la tensión de la fuente disminuye, el STATCOM reacciona mediante la generación de potencia reactiva, por lo que aumenta la tensión de corriente continua; este es el modo capacitivo. Por otro lado, cuando aumenta la tensión de CA, el STATCOM reacciona mediante la absorción de potencia reactiva, por lo que la tensión de DC disminuye; este es el modo inductivo. Los resultados de simulación muestran la efectividad de STATCOM para la regulación de la tensión del nudo que se desea y el control de flujo de potencia reactiva a través de la línea.

El método de Newton-Raphson es un método diseñado especialmente para ser aplicado en sistemas eléctricos de potencia, aunque también se usa en sistemas de distribución, y es el que se emplea para resolver el caso de flujo de cargas que nos ocupa [\[17\]](#). Es un método muy confiable, rápido desde el punto de vista computacional y económico en cuanto a requisitos de almacenamiento de información. Una de las principales ventajas del método de Newton es su mayor velocidad de convergencia respecto a otros métodos, pero, sin embargo, existen situaciones donde este método se comporta en forma ineficiente. Esto sucede, por ejemplo, cuando la aproximación inicial x^0 está demasiado lejos de la raíz deseada y la sucesión $\{x^n\}$ diverge debido a que la pendiente $f'(x^0)$ es pequeña y la recta tangente a la curva $y = f(x)$ es casi horizontal [\[18\]](#). También, cuando el cero se halla en la vecindad de un punto de

inflexión, un mínimo o un máximo local. Otra de las desventajas que presenta este método es el cálculo de la derivada primera de $f(x)$. Por esa razón, es importante disponer también de otros métodos que no requieran el cálculo de $f'(x)$ pero que tengan algunas de las propiedades favorables de convergencia del método de Newton-Raphson.

En este capítulo se ha introducido un nuevo modelo de STATCOM destinado a soluciones de flujo de potencia utilizando el método de Newton-Raphson [12]. El modelo representa un cambio de paradigma en la forma en que se representan los controladores VSC-FACTS de secuencia positiva y frecuencia fundamental. En él no se trata al controlador como una fuente de tensión controlable ideal, sino más bien como un dispositivo transformador compuesto al que están vinculadas ciertas propiedades de control de los convertidores basados en PWM [19]. El ángulo del cambiador de tomas complejo representa el desplazamiento de fase que existiría en un inversor de PWM, y coincide con el ángulo del modelo de fuente de tensión convencional del VSC. De manera más específica, éste sería el ángulo requerido por el VSC para permitir bien la generación o la absorción de potencia reactiva puramente gracias al procesamiento electrónico de la tensión y la corriente dentro del VSC. Tanto las pérdidas de conmutación como las pérdidas óhmicas y el transformador LTC de conexión están representados de forma explícita en este modelo STATCOM. El cambiador de tomas complejo en el modelo del VSC y el cambiador de tomas real en el modelo del LTC permiten una regulación efectiva de la tensión en el punto de conexión con la red y en el nudo de CA del VSC.

Tomando como base este modelo simple de STATCOM, se trató de ampliar su funcionalidad desarrollando un modelo similar pero más complejo. De esta manera, se consiguió obtener un regulador con las mismas ventajas que el anterior, pero aplicable a sistemas trifásicos. No sólo esto, sino que se ampliaron sus capacidades de control, haciendo que fuese muy útil también para tratar casos desequilibrados, en los que resulta muy beneficioso mantener el voltaje de ciertos nudos en un valor deseado. Para ello, se emplearon los mismos principios de funcionamiento que regían al modelo simple, pero en este caso lo que se hizo fue triplicar todas las variables del sistema simulando así sus tres fases, y se añadió además en el resto de la red un cuarto cable que cumpliera las funciones de neutro. Se buscaron las relaciones de tensión e intensidad existentes en este tipo de conductor, para que así llevase a cabo su función de intervenir en los casos desequilibrados ayudando a la regulación del voltaje. Para ello, se definió tanto el Teorema de Fortesque como la conexión de Hollgreen, que hace posible relacionar la intensidad de las tres fases de la red con la corriente homopolar y, por tanto, también con la del neutro ($3I_0 = I_N$). Como resultado, se obtuvieron matrices y ecuaciones bastante más complejas que en el caso del modelo simple, pero también un campo de aplicación más amplio, tal y como se muestra en el análisis de resultados donde se emplean redes trifásicas reales.

Capítulo 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de resultados de la operación del STATCOM consistirá en varias simulaciones, que permitirán apreciar tanto las mejoras en su operación como las diferencias entre los dos modelos que se trataron hasta ahora, es decir, el simple y el complejo. Para ello, se realizará un estudio de la efectividad del control de voltaje en el modelo monofásico, observando los resultados con y sin este elemento. A continuación, se presentará otro caso del modelo trifásico para comprobar lo mismo que antes, pero esta vez empleando una red equilibrada y después otra en desequilibrio (en módulo o en ángulo).

Es decir, la estructura de los resultados en este capítulo será la siguiente:

- Operación del STATCOM con modelo simple y control de voltaje desactivado.
- Operación del STATCOM con modelo simple y control de voltaje activado.
- Operación del STATCOM con modelo complejo, control de voltaje y red equilibrada.
- Operación del STATCOM con modelo complejo, control de voltaje y red desequilibrada.

En cada apartado se explicarán las características de la red empleada, y se presentarán tablas señalando los tipos de nudos que la componen y el valor de los parámetros (distinguiendo entre los de línea y los de VSC), así como las características iniciales y finales de las variables que se deseen estudiar para así poder sacar conclusiones y hacer las comparaciones que procedan.

3.1. MODELO SIMPLE SIN CONTROL DE VOLTAJE

En este caso, se emplea una red monofásica de tres nudos que representan cada uno de los distintos tipos que existen.

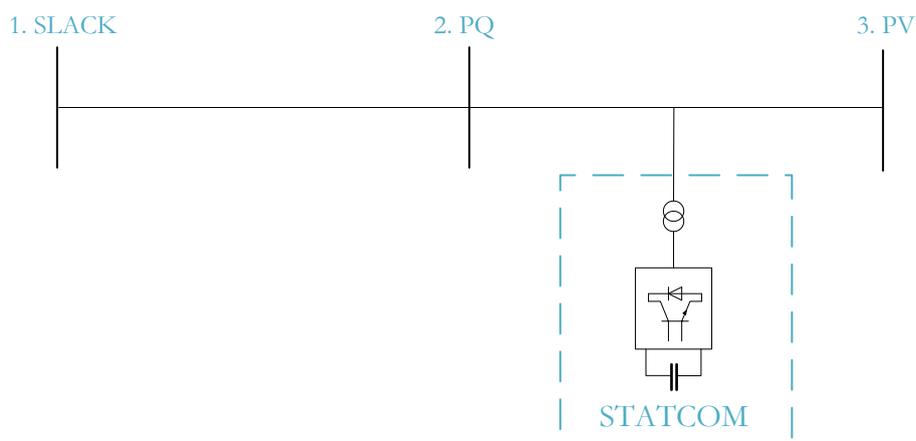


Figura 3.1. Red monofásica empleada para el caso de estudio de modelo simple con control de voltaje desactivado.

Los valores iniciales de magnitud y ángulo de las tensiones, así como los datos de generación y demanda se muestran en la siguiente tabla. Como se observa, únicamente existe generación en el nudo slack, mientras que la demanda se encuentra en el nudo PQ. Por otra parte, el valor inicial de la tensión sobrepasa en el caso del nudo 2 el máximo permitido, y esto es lo que se tratará de corregir al incluir el STATCOM.

| Nudos | 1 | 2 | 3 |
|--------------------------|----------|----------|----------|
| Tipo de Nudo | Slack | PQ | PV |
| V_0 [pu] | 1 | 1,2 | 1,05 |
| θ_0 [°] | 0 | 0 | 0 |
| Generación Activa [pu] | 0,5 | 0 | 0 |
| Demanda Activa [pu] | 0 | 0,5 | 0 |
| Generación Reactiva [pu] | 0,1 | 0 | 0 |
| Demanda Reactiva [pu] | 0 | 0,1 | 0 |

Tabla 1.1. Tipos de nudo, generación, demanda y valores iniciales de la red.

Los parámetros de línea de la red toman valores realistas, tal y como se puede ver en la siguiente tabla. Se intenta, por tanto, que representen con la máxima precisión el comportamiento del sistema monofásico al que irá conectado el STATCOM.

| Parámetros de Línea [pu] | |
|---------------------------------|------|
| Nudo Inicial | 1 |
| Nudo Final | 2 |
| Resistencia | 0,05 |
| Reactancia | 0,1 |
| Conductancia | 0 |
| Susceptancia | 0 |

Tabla 1.2. Parámetros de línea de la red monofásica.

En el caso de los parámetros del VSC sus valores se aproximan también a los reales, y cada uno representa un fenómeno que ocurre en el dispositivo. Como se había explicado en el apartado de formulación, la reactancia serie se emplea para simbolizar el magnetismo de la interfaz del VSC, mientras que la resistencia serie representa las pérdidas óhmicas que son proporcionales a la corriente del terminal de CA al cuadrado.

Por otra parte, en este primer caso de estudio se establece un control de voltaje y flujo de cargas desactivado, lo que se traduce en una operación del STATCOM nula. Los resultados obtenidos de esta simulación serán útiles para comparar con el siguiente caso de estudio, en el que el control aparece activado. De esta forma, se podrá verificar la eficacia del STATCOM y comprobar sus ventajas con datos empíricos.

| Parámetros de Línea de VSC [pu] | |
|--|---|
| Nudo Inicial | 2 |
| Nudo Final | 3 |
| Resistencia | 0,01 |
| Reactancia | 0,1 |
| Conductancia | 0,01 |
| Susceptancia | 0,5 |
| Tipo de Control | Control de Voltaje y Flujo de Cargas Desactivado |

Tabla 1.3. Parámetros de línea del VSC.

A continuación, se muestran en una tabla los resultados de tensión, ángulo y potencias finales en cada nudo, así como las pérdidas de potencia de las dos líneas de la red.

| Resumen de Resultados (Buses) | | | |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|
| Nudos | 1 | 2 | 3 |
| V_f [pu] | 1 | 0,7986 | 1,05 |
| θ_f [°] | 0 | 0,9668 | 1,958 |
| Potencia Activa [pu] | 0,6983 | -0,5 | 0 |
| Potencia Reactiva [pu] | 1,6661 | -0,1 | -1,2053 |
| Pérdidas Activa [pu] | 0,1632 | 0,0351 | |
| Pérdidas Reactiva [pu] | 0,3264 | 0,0345 | |

Tabla 1.4. Resumen de resultados por buses.

Como se veía en la tabla de valores iniciales, la tensión en el nudo PQ, que era de 1,2 pu, se encontraba por encima de los límites de regulación permitidos del $\pm 5\%$. Como en este caso la simulación no incluía control de tensión en dicho nudo, se observa que este voltaje cae hasta el punto de descender por debajo del límite inferior de regulación, a pesar de que la consigna indicaba que se mantuviese en el límite de 1,05 pu. Esto es debido, además de a la acción nula del STATCOM, a que la carga en el nudo PQ es inductiva, lo que hace que se consuma reactiva en dicho punto. El nudo PV, por su parte, puede considerarse como un sumidero de potencia reactiva que actúa de esta forma para mantener su consigna de tensión.

En cuanto a las pérdidas de las líneas, éstas parecen razonables si se tiene en cuenta la carga que existe en el nudo 2. Por otra parte, se observa también que las pérdidas de potencia reactiva son mayores que las de activa, ya que existe más flujo de la primera.

En el siguiente caso, se analizará lo que ocurre con el valor de la tensión del nudo PQ partiendo de las mismas consignas y valores iniciales de voltaje, y se comprobará la utilidad del STATCOM para mantener su valor dentro de los límites de regulación permitidos.

En la siguiente tabla, se muestran los resultados específicos obtenidos para el STATCOM, donde se incluyen el factor de modulación, ángulo Φ y susceptancia equivalente finales, así como el balance total de potencia activa y reactiva y sus pérdidas internas.

| Resumen de Resultados (VSC) | |
|------------------------------------|---------|
| m_{vsc} [-] | 1 |
| Φ_{vsc} [°] | 0 |
| B_{vsc} [pu] | 0,5 |
| Potencia Activa Enviada [pu] | 0,0351 |
| Potencia Reactiva Enviada [pu] | 1,2398 |
| Potencia Activa Recibida [pu] | 0 |
| Potencia Reactiva Recibida [pu] | -1,2053 |
| Pérdidas Activa [pu] | 0,0351 |
| Pérdidas Reactiva [pu] | 0,0345 |

Tabla 1.5. Resumen de resultados en el VSC.

Como era de esperar, tanto el factor de modulación como el ángulo Φ y la susceptancia equivalente mantienen sus valores iniciales, debido a que el control de voltaje permanece desactivado y por tanto no intervienen dichos parámetros.

3.2. MODELO SIMPLE CON CONTROL DE VOLTAJE

En este segundo caso, se emplea de nuevo una red monofásica de tres nudos que representan cada uno de los distintos tipos que existen.

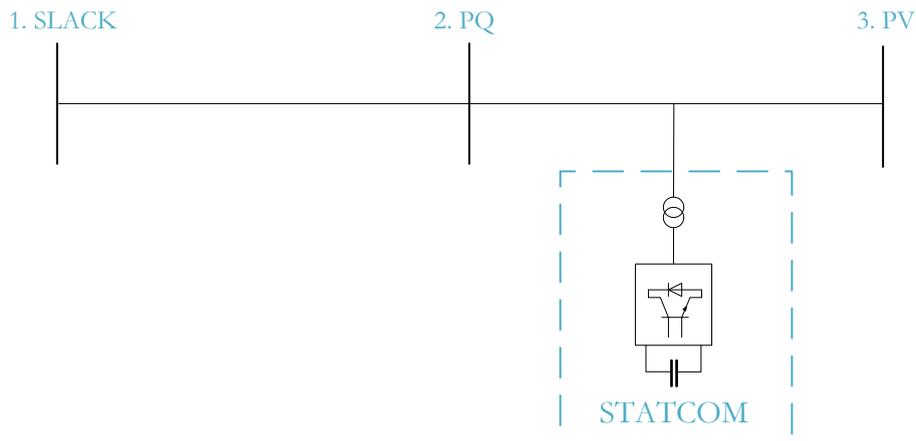


Figura 3.2. Red monofásica empleada para el caso de estudio de modelo simple con control de voltaje activado.

Los valores iniciales de magnitud y ángulo de las tensiones, así como los datos de generación y demanda se muestran en la siguiente tabla. Como se observa, únicamente existe generación en el nudo slack, mientras que la demanda se encuentra en el nudo PQ. Por otra parte, el valor inicial de la tensión en el nudo 2 sobrepasa el máximo permitido, y esto es lo que se tratará de corregir al incluir el control de voltaje que proporciona el STATCOM.

| Nudos | 1 | 2 | 3 |
|--------------------------|----------|----------|----------|
| Tipo de Nudo | Slack | PQ | PV |
| V_0 [pu] | 1 | 1,2 | 1,05 |
| θ_0 [°] | 0 | 0 | 0 |
| Generación Activa [pu] | 0,5 | 0 | 0 |
| Demanda Activa [pu] | 0 | 0,5 | 0 |
| Generación Reactiva [pu] | 0,1 | 0 | 0 |
| Demanda Reactiva [pu] | 0 | 0,1 | 0 |

Tabla 2.6. Tipos de nudo, generación, demanda y valores iniciales de la red.

Los parámetros de línea de la red toman los mismos valores realistas que en el caso anterior, tal y como se puede ver en la siguiente tabla. Se intenta, de nuevo, que representen con la máxima precisión el comportamiento del sistema monofásico al que irá conectado el STATCOM.

| Parámetros de Línea [pu] | |
|---------------------------------|---|
| Nudo Inicial | 1 |
| Nudo Final | 2 |

| | |
|--------------|------|
| Resistencia | 0,05 |
| Reactancia | 0,1 |
| Conductancia | 0 |
| Susceptancia | 0 |

Tabla 2.7. Parámetros de línea de la red monofásica.

En el caso de los parámetros del VSC sus valores se aproximan igual que antes a los reales, y cada uno representa un fenómeno que ocurre en el dispositivo. Como se había explicado anteriormente, la reactancia serie se emplea para simbolizar el magnetismo de la interfaz del VSC, mientras que la resistencia serie representa las pérdidas óhmicas.

Por otra parte, en este segundo caso de estudio se establece un control de voltaje y flujo de cargas activado, lo que se traduce en una operación del STATCOM completa en el nudo deseado. Los resultados obtenidos de esta simulación serán útiles para comparar con el caso de estudio anterior, en el que el control aparece desactivado. De esta forma, se podrá verificar la eficacia del STATCOM al comprobar que el voltaje problemático que sobrepasaba los límites adopta ahora el valor establecido dentro de los límites como consigna.

| Parámetros de Línea de VSC [pu] | |
|--|--|
| Nudo Inicial | 2 |
| Nudo Final | 3 |
| Resistencia | 0,01 |
| Reactancia | 0,1 |
| Conductancia | 0,01 |
| Susceptancia | 0,5 |
| Tipo de Control | Control de Voltaje y Flujo de Cargas Activado |

Tabla 2.8. Parámetros de línea del VSC.

A continuación, se muestran en una tabla los resultados de tensión, ángulo y potencias finales en cada nudo, así como las pérdidas de potencia de las dos líneas de la red.

| Resumen de Resultados (Buses) | | | |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|
| Nudos | 1 | 2 | 3 |
| V_f [pu] | 1 | 1,05 | 1,05 |
| θ_f [°] | 0 | -5 | 0 |
| Potencia Activa [pu] | 0,5619 | -0,5 | 0 |
| Potencia Reactiva [pu] | -0,7395 | -0,1 | 0 |

| | | |
|------------------------------|--------|--------|
| Pérdidas Activa Total [pu] | 0,0431 | 0,0188 |
| Pérdidas Reactiva Total [pu] | 0,0863 | 0,9258 |

Tabla 2.9. Resumen de resultados por buses.

Como se veía en la tabla de valores iniciales, la tensión en el nudo PQ, que era de 1,2 pu, se encontraba por encima de los límites de regulación permitidos del $\pm 5\%$. Como en este caso la simulación incluye control de tensión en dicho nudo, se observa que este voltaje alcanza el valor de 1,05 pu impuesto por la consigna, que ahora sí se encuentra dentro de los límites de regulación. Esto es debido a que la regulación de tensiones actúa correctamente. Por otra parte, el desfase de ángulos que existe entre el nudo 1 y el nudo 2 hace que el flujo de potencia vaya en este sentido, de ángulos mayores a ángulos menores. Esto se debe a que el nudo PQ es un nudo de carga. En este mismo bus PQ se recibe potencia activa por parte del nudo slack, y potencia reactiva por parte del STATCOM. Parte de esta última potencia que va al nudo 2 llega al 1, que como se ve en la tabla consume reactiva. Por otra parte, el nudo 3 no genera ni consume potencia.

Como se observa, en este caso se parte de las mismas consignas y valores iniciales de voltaje que en la simulación anterior, pero ahora gracias a la acción del STATCOM se consigue bajar el valor de tensión del nudo PQ hasta el límite deseado para mantenerlo dentro de la regulación permitida. De esta forma se constata la utilidad del dispositivo.

En la siguiente tabla, se muestran los resultados específicos obtenidos para el STATCOM, donde se incluyen el factor de modulación, ángulo Φ y susceptancia equivalente finales, así como el balance total de potencia activa y reactiva y sus pérdidas internas.

| Resumen de Resultados (VSC) | |
|------------------------------------|---------|
| m_{VSC} [-] | 1,0838 |
| Φ_{VSC} [°] | -5,6249 |
| B_{VSC} [pu] | 0,7749 |
| Potencia Activa Enviada [pu] | 0,0188 |
| Potencia Reactiva Enviada [pu] | -0,9258 |
| Potencia Activa Recibida [pu] | 0 |
| Potencia Reactiva Recibida [pu] | 0 |
| Pérdidas Activa [pu] | 0,0188 |
| Pérdidas Reactiva [pu] | -0,9258 |

Tabla 2.10. Resumen de resultados en el VSC.

Respecto a los resultados del VSC, cabe destacar el significado del signo de la susceptancia equivalente. Una B_{VSC} positiva como la obtenida implica que se consume potencia reactiva

en el STATCOM, consiguiendo de esta forma que baje el valor de la tensión en el nudo sometido al control. El factor de modulación obtenido es mayor de lo esperado, pues sería lógico que éste se encontrase por debajo de 1, dentro de la zona lineal.

A continuación, se presenta la estructura de la ecuación de flujo de cargas para el modelo simple, que por tanto es válida también para el caso anterior. Después, una captura extraída de los resultados del código de MATLAB, que muestra el Jacobiano de la última iteración y que ofrece una idea de su aspecto numérico final.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_3 \\ \Delta P_{2-3} \\ \Delta Q_{2-3} \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} * V_1 & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_1}{\partial V_2} * V_2 & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_1}{\partial V_3} * V_3 & \frac{\partial P_1}{\partial \Phi} & \frac{\partial P_1}{\partial B_{eq}} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} * V_1 & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_2} * V_2 & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_3} * V_3 & \frac{\partial Q_1}{\partial \Phi} & \frac{\partial Q_1}{\partial B_{eq}} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_2}{\partial V_1} * V_1 & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} * V_2 & \frac{\partial P_2}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial V_3} * V_3 & \frac{\partial P_2}{\partial \Phi} & \frac{\partial P_2}{\partial B_{eq}} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_1} * V_1 & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} * V_2 & \frac{\partial Q_2}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_3} * V_3 & \frac{\partial Q_2}{\partial \Phi} & \frac{\partial Q_2}{\partial B_{eq}} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_3}{\partial V_1} * V_1 & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial V_2} * V_2 & \frac{\partial P_3}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial V_3} * V_3 & \frac{\partial P_3}{\partial \Phi} & \frac{\partial P_3}{\partial B_{eq}} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_1} * V_1 & \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_2} * V_2 & \frac{\partial Q_3}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial V_3} * V_3 & \frac{\partial Q_3}{\partial \Phi} & \frac{\partial Q_3}{\partial B_{eq}} \\ \frac{\partial P_{2-3}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_{2-3}}{\partial V_1} * V_1 & \frac{\partial P_{2-3}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial P_{2-3}}{\partial V_2} * V_2 & \frac{\partial P_{2-3}}{\partial \theta_3} & \frac{\partial P_{2-3}}{\partial V_3} * V_3 & \frac{\partial P_{2-3}}{\partial \Phi} & \frac{\partial P_{2-3}}{\partial B_{eq}} \\ \frac{\partial Q_{2-3}}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_{2-3}}{\partial V_1} * V_1 & \frac{\partial Q_{2-3}}{\partial \theta_2} & \frac{\partial Q_{2-3}}{\partial V_2} * V_2 & \frac{\partial Q_{2-3}}{\partial \theta_3} & \frac{\partial Q_{2-3}}{\partial V_3} * V_3 & \frac{\partial Q_{2-3}}{\partial \Phi} & \frac{\partial Q_{2-3}}{\partial B_{eq}} \end{bmatrix}^k * \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta V_1 / V_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \Delta V_2 / V_2 \\ \Delta \theta_3 \\ \Delta V_3 / V_3 \\ \Delta \Phi \\ \Delta B_{eq} \end{bmatrix}^k$$

Ec. 3.1. Ecuación de flujo de cargas para la iteración k del modelo simple.

JAC =

| | | | | | | | | |
|--------|--------|----------|----------|----------|--------|----------|--------|---|
| 1.0000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1.0000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 19.8358 | -1.0728 | -11.8417 | 0 | -11.8417 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | -6.0016 | -11.8417 | 1.0728 | 0 | 1.0728 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | -11.8196 | 1.2713 | 11.8196 | 0 | 11.8196 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.0000 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 11.8196 | -1.2713 | -11.8196 | 0 | -11.8196 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1.3061 | -11.8196 | 1.2933 | 0 | 1.2933 | 1.2951 | 0 |

Figura 3.3. Jacobiano obtenido en la última iteración del flujo de cargas para el modelo simple con control de voltaje activado.

3.3. MODELO COMPLEJO CON CONTROL DE VOLTAJE Y RED EQUILIBRADA

En este tercer caso, se emplea de una red trifásica de tres nudos que representan cada uno de los distintos tipos que existen.

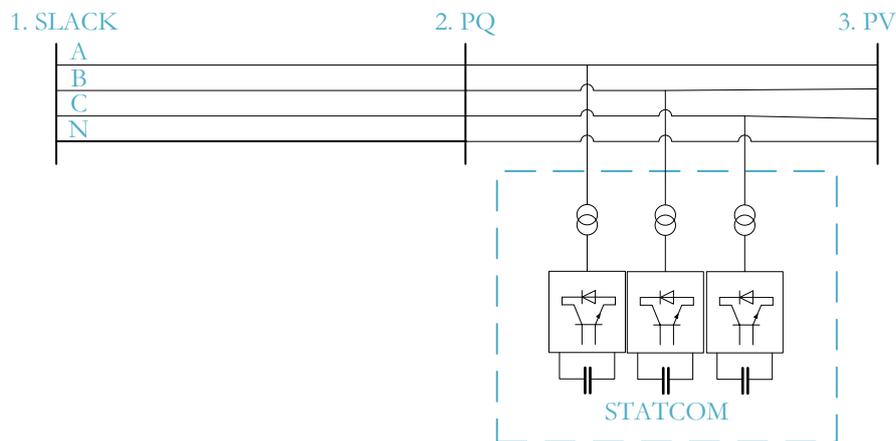


Figura 3.4. Red trifásica empleada para el caso de estudio de modelo complejo con control de voltaje y red equilibrada.

Los valores iniciales de magnitud y ángulo de las tensiones por cada fase se muestran en la siguiente tabla. Como se observa, el valor inicial de la tensión 2 se encuentra por debajo de los límites de regulación permitidos del $\pm 5\%$, y esto es lo que se tratará de corregir al incluir el control de voltaje que proporciona el STATCOM.

| Nudos | 1 | 2 | 3 |
|----------------|-------|-----|------|
| Tipo de Nudo | Slack | PQ | PV |
| $V_{0,A}$ [pu] | 1 | 0,9 | 1,05 |
| $V_{0,B}$ [pu] | 1 | 0,9 | 1,05 |

| | | | |
|--------------------|-----|-----|------|
| $V_{0,C}$ [pu] | 1 | 0,9 | 1,05 |
| $V_{0,N}$ [pu] | 0 | 0 | 0 |
| $\theta_{0,A}$ [°] | 0 | 0 | 0 |
| $\theta_{0,B}$ [°] | 120 | 120 | 120 |
| $\theta_{0,C}$ [°] | 240 | 240 | 240 |
| $\theta_{0,N}$ [°] | 0 | 0 | 0 |

Tabla 3.11. Tipo de nudo y valores iniciales de tensión y ángulo de la red.

A continuación, se presentan los datos de generación y demanda de cada nudo. Puede verse que la generación únicamente está presente en el nudo slack, mientras que la demanda se encuentra en el nudo PQ.

| Nudos | 1 | 2 | 3 |
|------------------------------|----------|----------|----------|
| Generación Activa A [pu] | 0,15 | 0 | 0 |
| Generación Activa B [pu] | 0,15 | 0 | 0 |
| Generación Activa C [pu] | 0,15 | 0 | 0 |
| Generación Activa N [pu] | 0 | 0 | 0 |
| Demanda Activa A [pu] | 0 | 0,15 | 0 |
| Demanda Activa B [pu] | 0 | 0,15 | 0 |
| Demanda Activa C [pu] | 0 | 0,15 | 0 |
| Demanda Activa N [pu] | 0 | 0 | 0 |
| Generación Reactiva A [pu] | 0,1 | 0 | 0 |
| Generación Reactiva B [pu] | 0,1 | 0 | 0 |
| Generación Reactiva C [pu] | 0,1 | 0 | 0 |
| Generación Reactiva N [pu] | 0 | 0 | 0 |
| Demanda Reactiva A [pu] | 0 | 0,1 | 0 |
| Demanda Reactiva B [pu] | 0 | 0,1 | 0 |
| Demanda Reactiva C [pu] | 0 | 0,1 | 0 |
| Demanda Reactiva N [pu] | 0 | 0 | 0 |

Tabla 3.12. Generación y demanda de potencia por nudos.

La línea que une el nudo slack con el nudo PQ está modelada como una línea real, es decir, que en ella se tiene en cuenta la influencia mutua que ejercen los distintos cables que componen las fases entre ellos. Para este caso de estudio se emplea una línea aérea de 11kV y 250kVA, y se incluye un cable de neutro para el supuesto de que existan descargas o desequilibrios. La obtención de las impedancias y admitancias se hace siguiendo una

estructura en π con parámetros distribuidos. Se intenta, de esta forma, que el modelo represente con la máxima precisión el comportamiento del sistema trifásico al que irá conectado el STATCOM.

En el caso de los parámetros del VSC sus valores se aproximan igual que antes a los reales, y cada uno representa un fenómeno que ocurre en el dispositivo. Como se había explicado en anteriores apartados, la reactancia serie se emplea para simbolizar el magnetismo de la interfaz del VSC, mientras que la resistencia serie representa las pérdidas óhmicas.

Por otra parte, en este tercer caso de estudio se establece un control de voltaje y flujo de cargas activado, lo que se traduce en una operación del STATCOM completa en el nudo deseado. Los resultados obtenidos de esta simulación serán útiles para comparar con el siguiente caso de estudio, en el que el control aparece de nuevo activado, pero actuando sobre una red desequilibrada. De esta forma, se podrá verificar la eficacia del STATCOM al comprobar que el voltaje problemático que se encontraba por debajo de los límites adopta ahora el valor establecido dentro de los límites como consigna. Por otra parte, se comprobará también la utilidad del cable de neutro para actuar en caso de descarga o desequilibrio.

| Parámetros de Línea de VSC [pu] | |
|--|--|
| Nudo Inicial | 2 |
| Nudo Final | 3 |
| Resistencia | 0,1 |
| Reactancia | 0,6 |
| Conductancia | 0,3 |
| Susceptancia | 1 |
| Tipo de Control | Control de Voltaje y Flujo de Cargas Activado |

Figura 3.5. Parámetros de línea del VSC.

A continuación, se muestran en una tabla los resultados de tensión y ángulo finales en cada nudo.

| Resumen de Resultados (Buses) | | | |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|
| Nudos | 1 | 2 | 3 |
| $V_{f,A}$ [pu] | 1 | 1 | 1,05 |
| $V_{f,B}$ [pu] | 1 | 1 | 1,05 |
| $V_{f,C}$ [pu] | 1 | 1 | 1,05 |

| | | | |
|--------------------|-----|----------|----------|
| $V_{f,N}$ [pu] | 0 | 0 | 0 |
| $\theta_{f,A}$ [°] | 0 | -2,6927 | -4,4018 |
| $\theta_{f,B}$ [°] | 120 | 117,1433 | 115,0611 |
| $\theta_{f,C}$ [°] | 240 | 236,7627 | 234,3625 |
| $\theta_{f,N}$ [°] | 0 | 0 | 0 |

Tabla 3.13. Tensión y ángulo final por buses.

En la siguiente tabla aparecen las potencias finales en cada nudo, así como las pérdidas de potencia de las dos líneas de la red.

| Resumen de Resultados (Buses) | | | |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|
| Nudos | 1 | 2 | 3 |
| Potencia Activa A [pu] | 0,2568 | -0,2304 | 0,4069 |
| Potencia Activa B [pu] | 0,3064 | -0,3407 | 0,4848 |
| Potencia Activa C [pu] | 0,269 | -0,2503 | 0,4247 |
| Potencia Activa N [pu] | 0,0002 | 0,0006 | 0,0004 |
| Potencia Reactiva A [pu] | 0,3658 | -0,5592 | 0,576 |
| Potencia Reactiva B [pu] | 0,3493 | -0,5023 | 0,5331 |
| Potencia Reactiva C [pu] | 0,3162 | -0,3558 | 0,4241 |
| Potencia Reactiva N [pu] | 0,0002 | 0,0005 | 0,0004 |
| Pérdidas Activa Total A [pu] | 0,0257 | 0,3498 | |
| Pérdidas Activa Total B [pu] | 0,0306 | 0,351 | |
| Pérdidas Activa Total C [pu] | 0,0269 | 0,356 | |
| Pérdidas Activa Total N [pu] | 0,0004 | 0,0008 | |
| Pérdidas Reactiva Total A [pu] | 0,0366 | 0,2638 | |
| Pérdidas Reactiva Total B [pu] | 0,0349 | 0,2666 | |
| Pérdidas Reactiva Total C [pu] | 0,0316 | 0,2817 | |
| Pérdidas Reactiva Total N [pu] | 0,0003 | 0,0007 | |

Tabla 3.14. Potencia por buses y pérdidas por las líneas.

Como se veía en la tabla de valores iniciales, la tensión en el nudo PQ, que era de 0,9 pu, se encontraba por debajo de los límites de regulación permitidos del $\pm 5\%$. Como en este caso la simulación incluye control de tensión en dicho nudo, se observa que este voltaje alcanza el valor de 1 pu impuesto por la consigna, que ahora sí se encuentra dentro de los límites de regulación. Esto es debido a que la regulación de tensiones actúa correctamente. Para subir la tensión en el nudo 2, los flujos de potencia reactiva tanto del nudo slack como del nudo

PV y del STATCOM se dirigen hacia él. Además, la consigna de demanda de potencia reactiva se cumple, y como se esperaba el nudo 2 absorbe 0,1 pu de reactiva por fase. Por otra parte, cabe destacar que tanto el nudo 1 como el nudo 3 son totalmente generadores, tanto de potencia activa como reactiva.

En el siguiente caso, se analizará lo que ocurre con el valor de la tensión del nudo PQ partiendo de las mismas consignas y valores iniciales de voltaje, pero esta vez en el caso de una red desequilibrada, y se comprobará la utilidad del STATCOM para mantener su valor dentro de los límites de regulación permitidos en este supuesto más complejo.

En las dos siguientes tablas, se muestran los resultados específicos obtenidos para el STATCOM, donde se incluyen el factor de modulación, ángulo Φ y susceptancia equivalente finales, así como el balance total de potencia activa y reactiva y sus pérdidas internas.

| Resumen de Resultados (VSC) | |
|------------------------------------|----------|
| $m_{VSC, A}$ [-] | 0,7878 |
| $m_{VSC, B}$ [-] | 0,7764 |
| $m_{VSC, C}$ [-] | 0,7350 |
| $\Phi_{VSC, A}$ [°] | -11,0021 |
| $\Phi_{VSC, B}$ [°] | -10,7376 |
| $\Phi_{VSC, C}$ [°] | -10,8886 |
| $B_{VSC, A}$ [pu] | -0,2186 |
| $B_{VSC, B}$ [pu] | -0,5531 |
| $B_{VSC, C}$ [pu] | -1,5381 |

Tabla 3.15. Factor de modulación, ángulo y susceptancia del VSC.

| Resumen de Resultados (VSC) | |
|------------------------------------|--------|
| Potencia Activa Enviada A [pu] | 0,3473 |
| Potencia Activa Enviada B [pu] | 0,3488 |
| Potencia Activa Enviada C [pu] | 0,3549 |
| Potencia Reactiva Enviada A [pu] | 0,2638 |
| Potencia Reactiva Enviada B [pu] | 0,2837 |
| Potencia Reactiva Enviada C [pu] | 0,3557 |
| Potencia Activa Recibida A [pu] | 0,0024 |
| Potencia Activa Recibida B [pu] | 0,0022 |
| Potencia Activa Recibida C [pu] | 0,0011 |

| | |
|--------------------------------------|---------|
| Potencia Reactiva Recibida $_A$ [pu] | -0,0001 |
| Potencia Reactiva Recibida $_B$ [pu] | -0,0171 |
| Potencia Reactiva Recibida $_C$ [pu] | -0,074 |
| Pérdidas Activa $_A$ [pu] | 0,3498 |
| Pérdidas Activa $_B$ [pu] | 0,351 |
| Pérdidas Activa $_C$ [pu] | 0,356 |
| Pérdidas Reactiva $_A$ [pu] | 0,2638 |
| Pérdidas Reactiva $_B$ [pu] | 0,2666 |
| Pérdidas Reactiva $_C$ [pu] | 0,2817 |

Tabla 3.16. Potencia enviada, recibida y pérdidas en el VSC.

Respecto a los resultados del VSC, cabe destacar el significado del signo de la susceptancia equivalente. Como ya se había explicado anteriormente, una B_{VSC} negativa como la obtenida implica que se genera potencia reactiva en el STATCOM, consiguiendo de esta forma que suba el valor de la tensión en el nudo sometido al control. El factor de modulación obtenido es lógico, pues su valor se encuentra por debajo de 1, dentro de la zona lineal.

A continuación, se muestra una captura extraída de los resultados del código de MATLAB que muestra el Jacobiano de la última iteración del flujo de cargas para el modelo trifásico, y que ofrece una idea de su aspecto numérico final y de su complejidad.

3.4. MODELO COMPLEJO CON CONTROL DE VOLTAJE Y RED DESEQUILIBRADA

Para el cuarto caso, se emplea de nuevo una red trifásica de tres nudos que representan cada uno de los distintos tipos que existen.

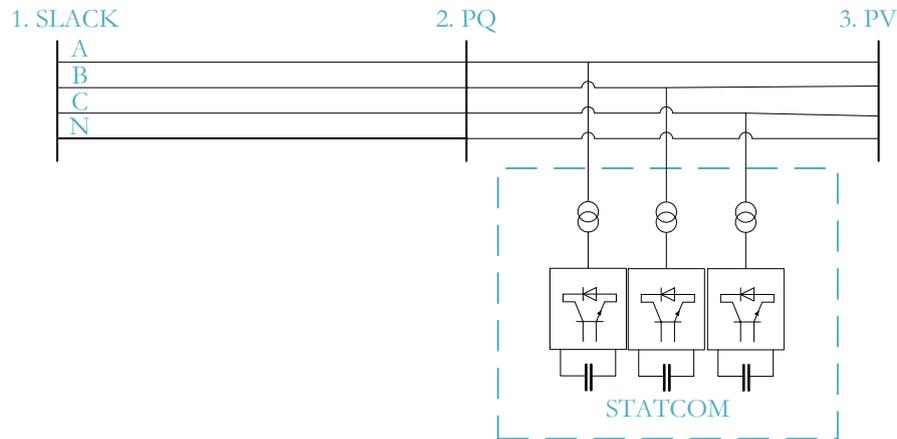


Figura 3.7. Red trifásica empleada para el caso de estudio de modelo complejo con control de voltaje y red desequilibrada.

Los valores iniciales de magnitud y ángulo de las tensiones por cada fase se muestran en la siguiente tabla. Como se observa, el valor inicial de la tensión 2 se encuentra por debajo de los límites de regulación permitidos del $\pm 5\%$, y esto es lo que se tratará de corregir al incluir el control de voltaje que proporciona el STATCOM. Por otra parte, se observa que existe un pequeño desequilibrio en magnitud en la tercera fase del nudo 2, y un desequilibrio en ángulo en la primera fase del nudo 3.

| Nudos | 1 | 2 | 3 |
|--------------------|-------|------|------|
| Tipo de Nudo | Slack | PQ | PV |
| $V_{0,A}$ [pu] | 1 | 0,9 | 1,05 |
| $V_{0,B}$ [pu] | 1 | 0,9 | 1,05 |
| $V_{0,C}$ [pu] | 1 | 0,85 | 1,05 |
| $V_{0,N}$ [pu] | 0 | 0 | 0 |
| $\theta_{0,A}$ [°] | 0 | 0 | 10 |
| $\theta_{0,B}$ [°] | 120 | 120 | 120 |
| $\theta_{0,C}$ [°] | 240 | 240 | 240 |
| $\theta_{0,N}$ [°] | 0 | 0 | 0 |

Tabla 4.17. Tipo de nudo y valores iniciales de tensión y ángulo de la red.

A continuación, se presentan los datos de generación y demanda de cada nudo. Puede verse que la generación únicamente está presente en el nudo slack, mientras que la demanda se encuentra en el nudo PQ.

| Nudos | 1 | 2 | 3 |
|---------------------------------------|----------|----------|----------|
| Generación Activa _A [pu] | 0,15 | 0 | 0 |
| Generación Activa _B [pu] | 0,15 | 0 | 0 |
| Generación Activa _C [pu] | 0,15 | 0 | 0 |
| Generación Activa _N [pu] | 0 | 0 | 0 |
| Demanda Activa _A [pu] | 0 | 0,15 | 0 |
| Demanda Activa _B [pu] | 0 | 0,15 | 0 |
| Demanda Activa _C [pu] | 0 | 0,15 | 0 |
| Demanda Activa _N [pu] | 0 | 0 | 0 |
| Generación Reactiva _A [pu] | 0,1 | 0 | 0 |
| Generación Reactiva _B [pu] | 0,1 | 0 | 0 |
| Generación Reactiva _C [pu] | 0,1 | 0 | 0 |
| Generación Reactiva _N [pu] | 0 | 0 | 0 |
| Demanda Reactiva _A [pu] | 0 | 0,1 | 0 |
| Demanda Reactiva _B [pu] | 0 | 0,1 | 0 |
| Demanda Reactiva _C [pu] | 0 | 0,1 | 0 |
| Demanda Reactiva _N [pu] | 0 | 0 | 0 |

Tabla 4.18. Generación y demanda de potencia por nudos.

La línea que une el nudo slack con el nudo PQ está modelada como una línea real, es decir, que en ella se tiene en cuenta la influencia mutua que ejercen los distintos cables que componen las fases entre ellos. Para este caso de estudio, igual que para el anterior, se emplea una línea aérea de 11kV y 250kVA, y se incluye un cable de neutro para el supuesto de que existan descargas o desequilibrios. La obtención de las impedancias y admitancias se hace siguiendo una estructura en π con parámetros distribuidos. Se intenta, de esta forma, que el modelo represente con la máxima precisión el comportamiento del sistema trifásico al que irá conectado el STATCOM.

En el caso de los parámetros del VSC sus valores se aproximan igual que antes a los reales, y cada uno representa un fenómeno que ocurre en el dispositivo. Como ya se había explicado,

la reactancia serie se emplea para simbolizar el magnetismo de la interfaz del VSC, mientras que la resistencia serie representa las pérdidas óhmicas.

Por otra parte, en este cuarto caso de estudio se establece un control de voltaje y flujo de cargas activado, lo que se traduce en una operación del STATCOM completa en el nudo deseado. Además, el control aparece actuando ahora sobre una red desequilibrada, a diferencia de lo que ocurría en la simulación anterior. De esta forma, se puede verificar la eficacia del STATCOM al comprobar que el voltaje problemático que se encontraba por debajo de los límites adopta ahora el valor establecido dentro de los límites como consigna. Por otra parte, se comprueba también la utilidad del cable de neutro para actuar en caso de descarga o desequilibrio.

| Parámetros de Línea de VSC [pu] | |
|--|--|
| Nudo Inicial | 2 |
| Nudo Final | 3 |
| Resistencia | 0,1 |
| Reactancia | 0,6 |
| Conductancia | 0,3 |
| Susceptancia | 1 |
| Tipo de Control | Control de Voltaje y Flujo de Cargas Activado |

Tabla 4.19. Parámetros de línea del VSC.

A continuación, se muestran en una tabla los resultados de tensión y ángulo finales en cada nudo.

| Resumen de Resultados (Buses) | | | |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|
| Nudos | 1 | 2 | 3 |
| $V_{f,A}$ [pu] | 1 | 1 | 1,05 |
| $V_{f,B}$ [pu] | 1 | 1 | 1,05 |
| $V_{f,C}$ [pu] | 1 | 1 | 1,05 |
| $V_{f,N}$ [pu] | 0 | 0 | 0 |
| $\theta_{f,A}$ [°] | 0 | -2,7 | -4,4 |
| $\theta_{f,B}$ [°] | 120 | 117,1 | 115,1 |
| $\theta_{f,C}$ [°] | 240 | 236,8 | 234,4 |

| | | | |
|-------------------------|---|---|---|
| $\theta_{f,N} [^\circ]$ | 0 | 0 | 0 |
|-------------------------|---|---|---|

Tabla 4.20. Tensión y ángulo final por buses.

En la siguiente tabla aparecen las potencias finales en cada nudo, así como las pérdidas de potencia de las dos líneas de la red.

| Resumen de Resultados (Buses) | | | |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|
| Nudos | 1 | 2 | 3 |
| Potencia Activa A [pu] | 0,2901 | -0,7317 | 0,9193 |
| Potencia Activa B [pu] | 0,2999 | -0,2555 | 0,396 |
| Potencia Activa C [pu] | 0,3706 | -0,5029 | 0,659 |
| Potencia Activa N [pu] | 0,0021 | -0,0803 | -0,0689 |
| Potencia Reactiva A [pu] | 0,3588 | -0,173 | 0,2954 |
| Potencia Reactiva B [pu] | 0,3958 | -0,4007 | 0,3817 |
| Potencia Reactiva C [pu] | 0,4596 | -0,76 | 0,7569 |
| Potencia Reactiva N [pu] | 0,0178 | 0,0943 | 0,0562 |
| Pérdidas Activa Total A [pu] | 0,029 | 0,3497 | |
| Pérdidas Activa Total B [pu] | 0,03 | 0,3541 | |
| Pérdidas Activa Total C [pu] | 0,0556 | 0,3459 | |
| Pérdidas Activa Total N [pu] | 0,0056 | -0,1528 | |
| Pérdidas Reactiva Total A [pu] | 0,0359 | 0,2628 | |
| Pérdidas Reactiva Total B [pu] | 0,0396 | 0,2747 | |
| Pérdidas Reactiva Total C [pu] | 0,0689 | 0,2583 | |
| Pérdidas Reactiva Total N [pu] | 0,0245 | 0,1438 | |

Tabla 4.21. Potencia por buses y pérdidas por las líneas.

Como se veía en la tabla de valores iniciales, la tensión en el nudo PQ, que era de 0,9 pu, se encontraba por debajo de los límites de regulación permitidos del $\pm 5\%$. Como en este caso la simulación incluye control de tensión en dicho nudo, se observa que este voltaje alcanza el valor de 1 pu impuesto por la consigna, que ahora sí se encuentra dentro de los límites de regulación. Esto es debido a que la regulación de tensiones actúa correctamente. Además, se comprueba que la corrección de voltaje ocurre tanto para las fases equilibradas como para la desequilibrada. Para subir la tensión en el nudo 2, los flujos de potencia reactiva tanto del nudo slack como del nudo PV y del STATCOM se dirigen hacia él. Además, la consigna de demanda de potencia reactiva se cumple, y como se esperaba el nudo 2 absorbe 0,1 pu de

reactiva por fase. Por otra parte, cabe destacar que tanto el nudo 1 como el nudo 3 son totalmente generadores, tanto de potencia activa como reactiva.

En el caso desequilibrado, como era de esperar, la potencia que pasa por el neutro es mucho mayor que en los otros casos, lo que indica que el neutro está modelado de forma correcta.

En las dos siguientes tablas, se muestran los resultados específicos obtenidos para el STATCOM, donde se incluyen el factor de modulación, ángulo Φ y susceptancia equivalente finales, así como el balance total de potencia activa y reactiva y sus pérdidas internas.

| Resumen de Resultados (VSC) | |
|------------------------------------|----------|
| $m_{VSC, A}$ [-] | 0,7883 |
| $m_{VSC, B}$ [-] | 0,7490 |
| $m_{VSC, C}$ [-] | 0,8383 |
| $\Phi_{VSC, A}$ [°] | -10,9993 |
| $\Phi_{VSC, B}$ [°] | -11,0026 |
| $\Phi_{VSC, C}$ [°] | -10,013 |
| $B_{VSC, A}$ [pu] | -0,2174 |
| $B_{VSC, B}$ [pu] | -1,8616 |
| $B_{VSC, C}$ [pu] | 2,3978 |

Tabla 4.22. Factor de modulación, ángulo y susceptancia del VSC.

| Resumen de Resultados (VSC) | |
|--------------------------------------|---------|
| Potencia Activa Enviada $_A$ [pu] | 0,3473 |
| Potencia Activa Enviada $_B$ [pu] | 0,352 |
| Potencia Activa Enviada $_C$ [pu] | 0,3445 |
| Potencia Reactiva Enviada $_A$ [pu] | 0,2629 |
| Potencia Reactiva Enviada $_B$ [pu] | 0,3312 |
| Potencia Reactiva Enviada $_C$ [pu] | 0,1799 |
| Potencia Activa Recibida $_A$ [pu] | 0,0024 |
| Potencia Activa Recibida $_B$ [pu] | 0,0021 |
| Potencia Activa Recibida $_C$ [pu] | 0,0013 |
| Potencia Reactiva Recibida $_A$ [pu] | -0,0001 |
| Potencia Reactiva Recibida $_B$ [pu] | -0,0565 |
| Potencia Reactiva Recibida $_C$ [pu] | 0,0784 |

| | |
|----------------------------|--------|
| Pérdidas Activa A [pu] | 0,3497 |
| Pérdidas Activa B [pu] | 0,3541 |
| Pérdidas Activa C [pu] | 0,3459 |
| Pérdidas Reactiva A [pu] | 0,2628 |
| Pérdidas Reactiva B [pu] | 0,2747 |
| Pérdidas Reactiva C [pu] | 0,2583 |

Tabla 4.23. Potencia enviada, recibida y pérdidas en el VSC.

Respecto a los resultados del VSC, cabe destacar el significado del signo de la susceptancia equivalente. Como ya se había explicado anteriormente, una B_{VSC} negativa como la obtenida implica que se genera potencia reactiva en el STATCOM, consiguiendo de esta forma que suba el valor de la tensión en el nudo sometido al control. El factor de modulación obtenido es lógico, pues su valor se encuentra por debajo de 1, dentro de la zona lineal.

El desequilibrio en este caso de estudio es tanto en fase como en módulo. Cuando se desfasa el ángulo, es decir, cambia el flujo de activa, el STATCOM varía la B de forma distinta en una de las fases. De esta forma se re direcciona el flujo.

3.5. CONCLUSIONES

Como era de esperar, uno de los beneficios de la compensación shunt es reducir las pérdidas del sistema gracias a un perfil de tensiones mejorado, que se hace posible gracias a la regulación del voltaje. La compensación proporcionada por el STATCOM introduce un tipo adicional de pérdidas de potencia que está asociada con la conmutación de alta frecuencia del control PWM empleado por la tecnología del VSC, así como pérdidas óhmicas. Sin embargo, las pérdidas del STATCOM son relativamente bajas, y tanto unas como otras están explícitamente representadas en su modelo equivalente.

Respecto al ángulo Φ del transformador de tomas complejo del VSC, se concluye que éste representa el cambio de fase que existiría en un inversor de PWM y que coincide con la fase del modelo de fuente de tensión convencional de VSC. Más específicamente, sería el ángulo requerido por el VSC para permitir tanto la generación como la absorción de potencia reactiva únicamente por el procesamiento electrónico de las ondas de tensión y corriente del VSC.

La B equivalente actúa de distinta forma según los distintos casos de estudio. Si no existe control de tensiones por parte del STATCOM, la variable mantiene su valor inicial dado en el modelado, ya que no interviene en el flujo de cargas. En el caso de que el control de tensiones se encuentre activo, la B se comportará de distinta forma dependiendo de si la

consigna del control ordena un aumento o una disminución de la tensión. De esta forma, toma signo positivo actuando como inductancia cuando lo que se desea es bajar el voltaje, mientras que se hace negativa actuando como condensador cuando lo que se quiere es aumentar el valor de tensión. En el caso de que haya desequilibrio de ángulo, adicionalmente sirve para re dirigir el flujo de potencia.

Se comprueba que el neutro, por su parte, ha sido modelado correctamente tal y como se observa en los resultados. En el último caso, en el que se incluye un desequilibrio en la línea tanto en módulo como en ángulo, se ve cómo la descarga se produce a través del neutro. En el caso 3, donde no existe desequilibrio de ningún tipo, este cable también está presente y por él circulan únicamente las pérdidas remanentes.

4.1. CONCLUSIONES

El STATCOM es un dispositivo shunt usado para mejorar el perfil de tensión en un nudo [16]. Se utiliza comúnmente para mantener un voltaje constante a lo largo de las líneas de transmisión de CA y también sirve como controlador automático de potencia reactiva. En este documento se utilizó el entorno de MATLAB para simular un modelo de sistema eléctrico con un STATCOM conectado, y se presentaron sus características de control destinadas a mejorar los niveles de tensión y la calidad de potencia. La respuesta dinámica STATCOM es muy rápida (de tan sólo milisegundos) y capaz de pasar del modo de operación capacitivo al inductivo en unos pocos ciclos. Cuando la tensión de la fuente disminuye, el STATCOM reacciona mediante la generación de potencia reactiva, por lo que aumenta la tensión de corriente continua; este es el modo capacitivo. Por otro lado, cuando aumenta la tensión de CA, el STATCOM reacciona mediante la absorción de potencia reactiva, por lo que la tensión de DC disminuye; este es el modo inductivo. Los resultados de simulación muestran la efectividad de STATCOM para la regulación de la tensión del nudo que se desea y el control de flujo de potencia reactiva a través de la línea.

El método de Newton-Raphson es un método diseñado especialmente para ser aplicado en sistemas eléctricos de potencia, aunque también se usa en sistemas de distribución, y es el que se emplea para resolver el caso de flujo de cargas que nos ocupa [17]. Es un método muy confiable, rápido desde el punto de vista computacional y económico en cuanto a requisitos de almacenamiento de información. Una de las principales ventajas del método de Newton es su mayor velocidad de convergencia respecto a otros métodos, pero, sin embargo, existen situaciones donde este método se comporta en forma ineficiente. Esto sucede, por ejemplo, cuando la aproximación inicial x^0 está demasiado lejos de la raíz deseada y la sucesión $\{x^n\}$ diverge debido a que la pendiente $f'(x^0)$ es pequeña y la recta tangente a la curva $y = f(x)$ es casi horizontal [18]. También, cuando el cero se halla en la vecindad de un punto de inflexión, un mínimo o un máximo local. Otra de las desventajas que presenta este método es el cálculo de la derivada primera de $f(x)$. Por esa razón, es importante disponer también de otros métodos que no requieran el cálculo de $f'(x)$ pero que tengan algunas de las propiedades favorables de convergencia del método de Newton-Raphson.

En este capítulo se ha introducido un nuevo modelo de STATCOM destinado a soluciones de flujo de potencia utilizando el método de Newton-Raphson [12]. El modelo representa un cambio de paradigma en la forma en que se representan los controladores VSC-FACTS de secuencia positiva y frecuencia fundamental. En él no se trata al controlador como una fuente de tensión controlable ideal, sino más bien como un dispositivo transformador compuesto al que están vinculadas ciertas propiedades de control de los convertidores

basados en PWM [19]. El ángulo del cambiador de tomas complejo representa el desplazamiento de fase que existiría en un inversor de PWM, y coincide con el ángulo del modelo de fuente de tensión convencional del VSC. De manera más específica, éste sería el ángulo requerido por el VSC para permitir bien la generación o la absorción de potencia reactiva puramente gracias al procesamiento electrónico de la tensión y la corriente dentro del VSC. Tanto las pérdidas de conmutación como las pérdidas óhmicas y el transformador LTC de conexión están representados de forma explícita en este modelo STATCOM. El cambiador de tomas complejo en el modelo del VSC y el cambiador de tomas real en el modelo del LTC permiten una regulación efectiva de la tensión en el punto de conexión con la red y en el nudo de CA del VSC.

Tomando como base este modelo simple de STATCOM, se trató de ampliar su funcionalidad desarrollando un modelo similar pero más complejo. De esta manera, se consiguió obtener un regulador con las mismas ventajas que el anterior, pero aplicable a sistemas trifásicos. No sólo esto, sino que se ampliaron sus capacidades de control, haciendo que fuese muy útil también para tratar casos desequilibrados, en los que resulta muy beneficioso mantener el voltaje de ciertos nudos en un valor deseado. Para ello, se emplearon los mismos principios de funcionamiento que regían al modelo simple, pero en este caso lo que se hizo fue triplicar todas las variables del sistema simulando así sus tres fases, y se añadió además en el resto de la red un cuarto cable que cumpliera las funciones de neutro. Se buscaron las relaciones de tensión e intensidad existentes en este tipo de conductor, para que así llevase a cabo su función de intervenir en los casos desequilibrados ayudando a la regulación del voltaje. Para ello, se definió tanto el Teorema de Fortesque como la conexión de Hollgreen, que hace posible relacionar la intensidad de las tres fases de la red con la corriente homopolar y, por tanto, también con la del neutro ($3I_0 = I_N$). Como resultado, se obtuvieron matrices y ecuaciones bastante más complejas que en el caso del modelo simple, pero también un campo de aplicación más amplio, tal y como se muestra en el análisis de resultados donde se emplean redes trifásicas reales.

Como era de esperar, uno de los beneficios de la compensación shunt es reducir las pérdidas del sistema gracias a un perfil de tensiones mejorado, que se hace posible gracias a la regulación del voltaje. La compensación proporcionada por el STATCOM introduce un tipo adicional de pérdidas de potencia que está asociada con la conmutación de alta frecuencia del control PWM empleado por la tecnología del VSC, así como pérdidas óhmicas. Sin embargo, las pérdidas del STATCOM son relativamente bajas, y tanto unas como otras están explícitamente representadas en su modelo equivalente.

Respecto al ángulo Φ del transformador de tomas complejo del VSC, se concluye que éste representa el cambio de fase que existiría en un inversor de PWM y que coincide con la fase del modelo de fuente de tensión convencional de VSC. Más específicamente, sería el ángulo requerido por el VSC para permitir tanto la generación como la absorción de potencia

reactiva únicamente por el procesamiento electrónico de las ondas de tensión y corriente del VSC.

La B equivalente actúa de distinta forma según los distintos casos de estudio. Si no existe control de tensiones por parte del STATCOM, la variable mantiene su valor inicial dado en el modelado, ya que no interviene en el flujo de cargas. En el caso de que el control de tensiones se encuentre activo, la B se comportará de distinta forma dependiendo de si la consigna del control ordena un aumento o una disminución de la tensión. De esta forma, toma signo positivo actuando como inductancia cuando lo que se desea es bajar el voltaje, mientras que se hace negativa actuando como condensador cuando lo que se quiere es aumentar el valor de tensión. En el caso de que haya desequilibrio de ángulo, adicionalmente sirve para re dirigir el flujo de potencia.

Se comprueba que el neutro, por su parte, ha sido modelado correctamente tal y como se observa en los resultados. En el último caso, en el que se incluye un desequilibrio en la línea tanto en módulo como en ángulo, se ve cómo la descarga se produce a través del neutro. En el caso 3, donde no existe desequilibrio de ningún tipo, este cable también está presente y por él circulan únicamente las pérdidas remanentes.

4.2. FUTURO DESARROLLO

Durante la realización del proyecto, se han identificado una serie de campos de estudio que podrían ser interesantes para continuar la investigación sobre el STATCOM y su operación. Los más relevantes se exponen a continuación:

- Cambiar la topología de la línea en los casos de estudio, consiguiendo una representación más realista de los resultados. Se podría incluso modelar la red de transporte y distribución de España para identificar los nudos en los que sea necesaria una regulación de potencia reactiva. Mediante la inclusión de un STATCOM en los sitios más desfavorables en el control de tensiones, se aumentaría la calidad y fiabilidad del sistema.
- Una localización óptima del STATCOM mediante el uso de algoritmos genéticos u otros métodos de optimización podrían ser utilizados con el fin de mejorar el perfil de tensiones de la red, así como para reducir al máximo las pérdidas del sistema y maximizar su capacidad de carga. Los algoritmos genéticos son métodos adaptativos que se usan para resolver problemas de optimización y búsqueda en aquellos casos en los que es difícil de derivar la función o funciones, como en nuestro caso de estudio. Estos algoritmos replican la evolución de la naturaleza y los principios de la selección natural para dar valores óptimos a problemas del mundo real [20].
- Una simulación dinámica, mediante el uso de programas como Simulink, podría ser interesante para comprobar si el STATCOM modelado puede resolver problemas

como el hueco de tensión, o al menos suavizarlo. El hueco de tensión consiste en un descenso brusco de la tensión de alimentación. Se trata de un problema muy típico con el aumento de la penetración de las energías renovables y el alto precio de los sistemas de almacenaje.

- Incluir un Smart Meter o sensores PMU para monitorear el perfil de tensión a lo largo de toda la línea y así asegurar la calidad de suministro, podría ser un camino de investigación interesante para completar el modelado del STATCOM. De esta forma, se conseguiría una capacidad de actuación rápida ante la detección de problemas y un mayor grado de automatización de la red.

Capítulo 5. REFERENCIAS

- [1] Wadhwa, C. (2012). *Electrical power systems*. Tunbridge Wells: New Academic Science.
- [2] Song, Y. and Johns, A. (2008). *Flexible ac transmission systems (FACTS)*. London: Institution of Electrical Engineers.
- [3] Shuaib, M. (2014). *Reactive Power Compensation using STATCOM*. Mehran University of Engineering & Technology.
- [4] ESI-Africa.com. (2012). STATCOM (Static Synchronous Compensator, also known as SVG). [online] Available at: <http://www.esi-africa.com/statcom-static-synchronous-compensator-also-known-as-svg/>
- [5] Acha, E. (2004). *FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks*. Chichester: Wiley.
- [6] Hingorani, N. and Gyugyi, L. (2000). *Understanding FACTS*. New York: IEEE Press.
- [7] Chacko, F. (2013). Statcom (Static Synchronous Compensator). [online] Es.slideshare.net. Available at: <http://es.slideshare.net/flamin/statcom>
- [8] Miller, T. (1982). *Reactive power control in electric systems*. New York: Wiley.
- [9] Gómez Expósito, A., Conejo, A. and Canizares, C. (2009). *Electric Energy Systems*. Boca Raton: CRC Press.
- [10] Gonzalez-Longatt, F. and Rueda, J. (n.d.). *PowerFactory Applications for Power System Analysis*.
- [11] Kundur, P., Balu, N. and Lauby, M. (1994). *Power system stability and control*. New York: McGraw-Hill.
- [12] Acha, E. and Kazemtabrizi, B. (2013). A New STATCOM Model for Power Flows Using the Newton-Raphson Method. *IEEE Trans. Power Syst.*, 28(3), pp.2455-2465.
- [13] Shea, J. (2002). *Understanding FACTS-concepts and technology of flexible AC transmission systems* [Book Review]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*.
- [14] Gyugyi, L. (1994). Dynamic compensation of AC transmission lines by solid-state synchronous voltage sources. *IEEE Transactions on Power Delivery*.
- [15] Verhoeven, C. (2003). *Structured electronic design*. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- [16] Musa, M. (2015). Modelling and Simulation of STATCOM for Reactive Power and Voltage Control. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*, Vol. 2 Issue 2.
- [17] Gutiérrez Monsalve, G. (2008). *Estudio Comparativo sobre Metodologías de Flujo de Potencia en Sistemas de Distribución*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [18] Frsn.utn.edu.ar. (2016). El método de Newton. [online] Available at: http://www.frsn.utn.edu.ar/GIE/AN/ENL/Metodo_Newton.html

- [19] Mohan, N., Undeland, T. and Robbins, W. (1995). Power electronics. New York: Wiley.
- [20] sc.ehu.es. (2016). Algoritmos Genéticos. [online] Available at: <http://www.sc.ehu.es/ccwbayes/docencia/mmcc/docs/temageneticos.pdf>
- [21] rtrenergia.es. (2012). Compensación de Energía Reactiva. [online] Available at: http://www.rtrenergia.es/downloads/reactiva_2012.pdf
- [22] library.e.abb.com. (2016). Dynamic Reactive Power Compensation Technical Catalogue (PCS100 ABB). [online] Available at: https://library.e.abb.com/public/c67b725f0863e97048257dce0003cad8/2UCD180000E002_c%20STATCOM%20Technical%20Catalogue.pdf

Capítulo 6. ANEXO: ANÁLISIS ECONÓMICO DEL STATCOM

En este capítulo se analizará la viabilidad económica de la inclusión de un STATCOM en un punto de carga superior a 15 kW. Estos puntos de carga incluyen cualquier tipo de negocio, desde grandes industrias hasta comercios locales, que al incluir compensación de reactiva pretenden conseguir una mayor eficiencia en su factura eléctrica.

Esta compensación de potencia reactiva se realizará empleando el STATCOM descrito en anteriores apartados, tomando sus resultados del flujo de cargas. El empleo de este dispositivo no sólo reportará beneficios económicos, sino también beneficios técnicos para el negocio.

6.1. LEGISLACIÓN SOBRE COMPENSACIÓN DE REACTIVA

En diciembre de 2009 se incluyó en el BOE la ITC 1723/2009 que aplican todas las compañías distribuidoras [21]. Se trata de una instrucción técnica mediante la cual se penaliza en la factura eléctrica a aquellas empresas que no hacen un uso responsable de la energía haciendo que aquellos consumidores que antes no pagaban por la energía reactiva ahora pasen a hacerlo. La siguiente tabla muestra los precios establecidos de esta energía según la ITC mencionada.

| Precio de la Energía Reactiva | | | |
|--------------------------------|--------------|--------------|----------------------|
| $\cos\varphi$ | €/kVArh 2009 | €/kVArh 2010 | Incremento 2009-2010 |
| $\cos\varphi \geq 0,95$ | 0 | 0 | - |
| $0,90 \leq \cos\varphi < 0,95$ | 0,000013 | 0,041554 | 319,55% |
| $0,85 \leq \cos\varphi < 0,90$ | 0,017018 | 0,041554 | 144,18% |
| $0,80 \leq \cos\varphi < 0,85$ | 0,034037 | 0,041554 | 22,08% |
| $\cos\varphi < 0,80$ | 0,051056 | 0,062332 | 22,08% |

Tabla 1.1. Régimen económico de la energía reactiva según ITC 1723/2009.

El procedimiento a seguir para determinar en qué medida sería necesario corregir el factor de potencia, es decir, compensar la reactiva, es el siguiente:

- Cálculo de la potencia reactiva de la instalación.
- Cálculo de la potencia necesaria para la compensación.
- Variabilidad del factor de potencia.

6.2. MODELO DE STATCOM

Para el análisis económico que se propone en este capítulo, se emplea el modelo de STATCOM PCS100 de ABB [22]. Este dispositivo, basado en una plataforma convertidora

de baja tensión, ofrece un rendimiento de gran ancho de banda con una configuración electrónica modular redundante flexible y altamente fiable, corrección de factor de potencia y de otras perturbaciones de generación de energía renovable, como la eólica, la solar y aplicaciones industriales tradicionales. El STATCOM PCS100 está disponible en capacidades de carga de 100kVAr a 10MVAR.



Figura 6.1. STATCOM PCS100 de ABB.

En caso de falta, el STATCOM ayudará al sistema a recuperarse mediante la inyección de corriente reactiva. Durante la operación normal, puede corregir fluctuaciones de voltaje y el factor de potencia. El STATCOM PCS100 utiliza un control avanzado que le permite amortiguar las perturbaciones de tensión en la red eléctrica. Esto es muy importante cuando se recupera de una falta, de un imprevisto o para mantener la estabilidad del sistema de potencia.

A continuación, se muestran algunos beneficios del STATCOM PCS100 de manera esquemática:

- Mejora la calidad de la energía y la confiabilidad de la planta.
- Aumenta la estabilidad de la red y la capacidad de transmisión.
- Ofrece conformidad con la red para energías renovables en caso de necesidad.

Y algunas de sus prestaciones, de manera esquemática también:

- Control del factor de potencia.
- Regulación de voltaje.
- Compensación de secuencia inversa/desequilibrada de corriente o tensión.
- Compensación del parpadeo o flicker.
- Amortiguamiento activo de la resonancia.
- Control paralelo de sistemas múltiples.

Asimismo, en la siguiente tabla se muestra el dimensionamiento del modelo de STATCOM elegido:

| STATCOM | |
|----------------|-----------|
| Modelo | PCS100 |
| Suministrador | ABB |
| Potencia | 200 kVAr |
| Tensión | MT |
| Coste | 50 €/kVAr |
| Mantenimiento | 10 % Inv. |
| Vida Útil | 20 años |

Tabla 2.2. Resumen de características STATCOM PCS100 de ABB.

6.3. VIABILIDAD ECONÓMICA Y RETRIBUCIÓN

Para el análisis de viabilidad económico del modelo de STATCOM presentado anteriormente, se emplean la línea y resultados que ya se utilizaron para el tercer caso de estudio del capítulo 3. En esta simulación del modelo complejo con control de voltaje y red de media tensión equilibrada, se tiene el nudo de carga por debajo de los límites de la regulación y es necesario corregirlo. Para dar veracidad a los resultados se emplea como interés de la inversión el WACC típico de una empresa de ingeniería.

El WACC o Coste Medio Ponderado de Capital se trata de una tasa de descuento que sirve para descontar los flujos de fondos operativos, en proyectos de ingeniería se suele utilizar una tasa del 7,5%.

| Datos Económicos | |
|--------------------------------|----------|
| Inversión | -9090,91 |
| Mantenimiento | -909,09 |
| WACC | 7,5% |
| $\cos\varphi_{\text{Actual}}$ | 0,83 |
| $\cos\varphi_{\text{STATCOM}}$ | 0,99 |

Tabla 3.3. Datos económicos del caso de estudio.

Cumpliendo con la legislación vigente anteriormente descrita, se calcula el beneficio anual que produce la presencia del STATCOM en la factura de la empresa de estudio según la siguiente fórmula:

$$\text{Beneficio [€]} = \text{Potencia Reactiva [kVArh]} * \text{Coste Reactiva [€/kVArh]} \quad \text{Ec. 6.1.}$$

El flujo de caja a lo largo de toda la vida útil del STATCOM según distintos factores de utilización viene representado por la siguiente tabla:

| Flujo de Caja [€] | | | | |
|--------------------------|-----------------------|--------|---------|---------|
| Periodo [año] | Factor de Utilización | | | |
| | 0,5% | 1,0% | 5,0% | 10,0% |
| 0 | -10000 | -10000 | -10000 | -10000 |
| 1 | 163,81 | 327,61 | 1638,06 | 3276,12 |
| 2 | 163,81 | 327,61 | 1638,06 | 3276,12 |
| 3 | 163,81 | 327,61 | 1638,06 | 3276,12 |
| 4 | 163,81 | 327,61 | 1638,06 | 3276,12 |
| 5 | 163,81 | 327,61 | 1638,06 | 3276,12 |
| 6 | 163,81 | 327,61 | 1638,06 | 3276,12 |
| 7 | 163,81 | 327,61 | 1638,06 | 3276,12 |
| 8 | 163,81 | 327,61 | 1638,06 | 3276,12 |
| 9 | 163,81 | 327,61 | 1638,06 | 3276,12 |
| 10 | 163,81 | 327,61 | 1638,06 | 3276,12 |
| 11 | 163,81 | 327,61 | 1638,06 | 3276,12 |
| 12 | 163,81 | 327,61 | 1638,06 | 3276,12 |
| 13 | 163,81 | 327,61 | 1638,06 | 3276,12 |
| 14 | 163,81 | 327,61 | 1638,06 | 3276,12 |
| 15 | 163,81 | 327,61 | 1638,06 | 3276,12 |
| 16 | 163,81 | 327,61 | 1638,06 | 3276,12 |
| 17 | 163,81 | 327,61 | 1638,06 | 3276,12 |
| 18 | 163,81 | 327,61 | 1638,06 | 3276,12 |
| 19 | 163,81 | 327,61 | 1638,06 | 3276,12 |
| 20 | 163,81 | 327,61 | 1638,06 | 3276,12 |

Tabla 3.4. Flujo de caja a lo largo de la vida útil del STATCOM para distintos factores de utilización.

Para valorar si la inversión es acertada se van a utilizar tres métodos de estudio diferentes, que se presentan a continuación:

- El VAN o Valor Actual Neto es un procedimiento para calcular la viabilidad de un proyecto de ingeniería, mediante la determinación del valor presente de flujos de caja consecutivos futuros.

$$VAN = \sum_{j=1}^N \frac{FC_j}{(1 + WACC)^j} - INV \quad \text{Ec. 6.2.}$$

- El TIR o Tasa Interna de Retorno es la media geométrica de los rendimientos futuros esperados en una inversión. También sirve para valorar la viabilidad de un proyecto, siendo menos restrictivo que el VAN.

$$\sum_{j=1}^N \frac{FC_j}{(1 + TIR)^j} - INV = 0 \quad \text{Ec. 6.3.}$$

- El Pay-Back o Periodo Medio de Maduración es una técnica utilizada por las empresas para determinar en cuántos años se va a recuperar la inversión inicial.

$$\sum_{j=1}^{PayBack} \frac{FC_j}{(1 + WACC)^j} - INV = 0 \quad \text{Ec. 6.4.}$$

Los resultados para los distintos métodos y según diferentes factores de utilización se muestran en las siguientes gráficas:

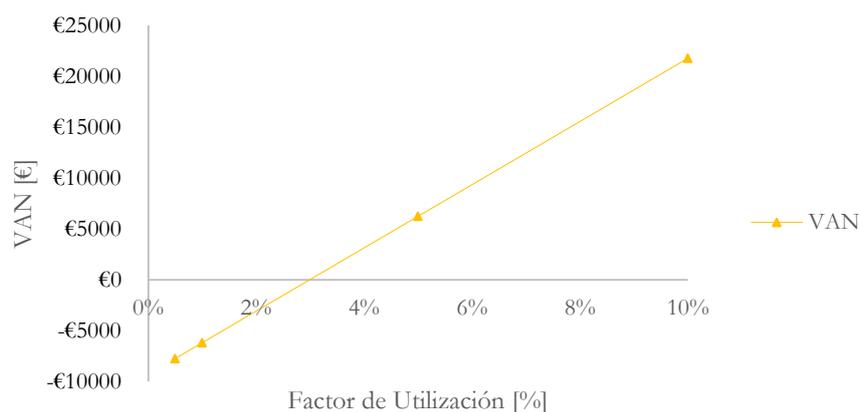


Figura 6.2. Evolución del Valor Actual Neto según los distintos factores de utilización.

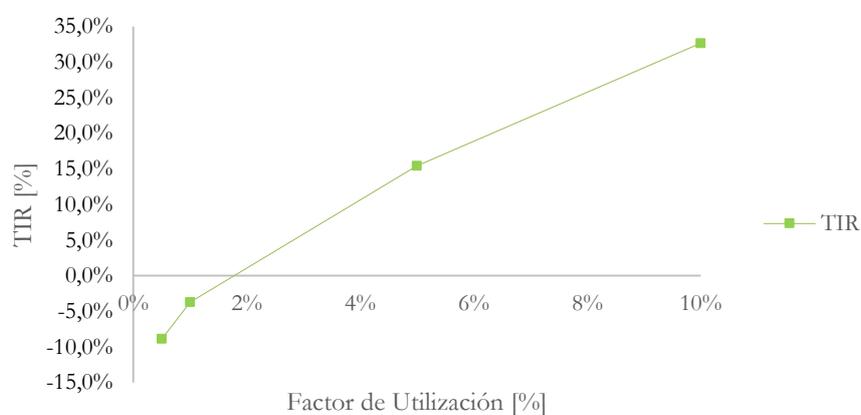


Figura 6.3. Evolución de la Tasa Interna de Retorno según los distintos factores de utilización.

| Factor de Utilización | 0,5% | 1,0% | 3,0% | 5,0% | 10,0% |
|-----------------------|------|------|------|------|-------|
| PayBack [año] | Inf. | Inf. | 20 | 8,47 | 3,59 |

Tabla 3.5. Evolución del Periodo de Retorno según los distintos factores de utilización.

Según estos resultados se concluye que el factor de utilización que hace que sea económicamente viable la instalación del STATCOM es aproximadamente del 3%, debido a que el método del Valor Actual Neto es el más restrictivo de los tres.