

Control de conexión a red de parques eólicos

Emilio Liaño

Índice

1	Introducción	3
1.1	Objetivos	3
2	Plantas eléctricas y conexión a red	5
2.1	Elementos del parque	5
2.2	Elementos de la conexión a red	7
2.3	Parámetros de la red trifásica	8
2.4	Códigos de red	10
3	Control de plantas eléctricas	13
3.1	Introducción al control de plantas eléctricas	13
3.2	Estrategias de control utilizadas	13
3.3	Control clásico	13
3.4	Control moderno	13
4	Herramientas de diseño	15
4.1	Desarrollo en Simulink de un modelo matemático del parque	15
4.1.1	Liberería Simscape Power Systems	15
4.1.2	Tratamiento de señal por buses	16
4.1.3	Diseño encapsulado mediante modelos referenciados	17
5	Modelado y simulación del control	19
5.1	Desarrollo de un modelo de parque y red de conexión	19
5.2	Modelado del parque y la conexión a red en Simulink	19
5.3	Diseño del control de la conexión a red	19
5.4	Casos de estudio	19
6	Análisis de resultados	21
7	Conclusiones y estudios futuros	23

Chapter 1

Introducción

1.1 Objetivos

Chapter 2

Plantas eléctricas y conexión a red

Un parque eólico es una agrupación de aerogeneradores que transforman la energía eólica en energía eléctrica.

2.1 Elementos del parque

Los parques eólicos necesitan para su funcionamiento los aerogeneradores para transformar la energía eólica en energía eléctrica, un sistema de control central y una red interna para la conexión eléctrica. A su vez estos están compuestos por diferentes elementos.

Aerogenerador Los aerogeneradores funcionan convirtiendo la energía cinética del viento en energía mecánica rotatoria y esta, en energía eléctrica en una máquina trifásica. Hay dos tipos según la disposición de sus aspas, los de eje horizontal y los de eje vertical. A nivel industrial la impuesta es el eje horizontal por su rendimiento, fiabilidad y la capacidad de adaptarse a diferentes potencias. Este tipo de aerogenerador consta de un rotor, una multiplicadora, un generador trifásico, la conexión a la red y un sistema de control.

El rotor tiene las aspas que normalmente son tres, se puede variar la orientación de las palas en función de la velocidad del viento o de la potencia deseada. La multiplicadora transforma la baja velocidad y alto par del eje del rotor en alta velocidad y un par bajo en el eje del generador eléctrico, no todos los modelos lo incluyen necesariamente pero su uso está muy extendido. El generador trifásico puede ser síncrono o asíncrono, esto depende de la topología de conexión que se utilice.

La conexión a red se puede hacer de forma directa, para lo que se utiliza un generador asíncrono de jaula de ardilla. Este tipo de conexión se conoce también como conexión de velocidad fija porque la velocidad del rotor depende directamente de la frecuencia de la red, que normalmente es fija. En este sistema, a pesar de robusto por su sencillez se necesitan resistencias rotóricas para aumentar el rango de velocidades del viento con las que se puede trabajar, adicionalmente hay que incluir un banco de condensadores para compensar la potencia reactiva, ocasionando posibles resonancias en la red [1].

Otro tipo de conexión es la doblemente alimentada, para esta configuración también se usan máquinas asíncronas. En esta topología el estator se encuentra conectado de forma directa a la red como encontrábamos antes, pero el rotor está conectado también a la red por medio de un circuito de electrónica de potencia, consistente de un convertidor AC-DC-AC ‘back to back’ [2]. Este tipo de

topología aumenta el rango de velocidades para generar potencia activa, la velocidad máxima estará limitada a la potencia del convertidor, además permite tener un control sobre el factor de potencia de la máquina, requisito necesario para poder conectarse a la red eléctrica.

Por último, la tercera topología de conexión normalmente utilizada es la '*Full Converter*'. Con este tipo de conexión a la red se suelen utilizar máquinas síncronas. En esta conexión el estator está conectado a la red a través de un convertidor 'back to back', sin ninguna conexión adicional. En cuanto al rango de velocidades y el control de reactiva ofrece características parecidas al doblemente alimentado, pero existen diferencias en coste. El doblemente alimentado es más barato que el '*Full Converter*' inicialmente pero necesita un mantenimiento más caro y ofrece menos potencia de salida anual [3]. Ambos dos requieren un controlador de los transistores IGBT para su funcionamiento que los hace más sofisticados.

Además del control de la salida eléctrica hay un controlador en cada torre para asegurar la seguridad y eficiencia del aerogenerador a nivel mecánico y aerodinámico. Por medio de módulos para el control de equipos de potencia, el controlador de la turbina recibe la información de los parámetros monitorizados y manipula los interruptores, bombas hidráulicas, válvulas y motores para controlar dichos parámetros. Estos controladores a su vez se comunican con un controlador central de todo el parque [4].

Controlador El sistema de control de la planta incluye el propio controlador, la comunicación interna del parque y el SCADA, *Supervisory Control And Data Acquisition* en español Supervisión, Control y Adquisición de Datos, para operar el sistema. Debido al aumento de los parques eólicos con una gran potencia y su penetración en la red, es necesario que estos se comporten como componentes activos controlables de la red apoyando su estabilidad. Para eso es necesario instalar un sistema de control central del parque. Este control es responsable de que el parque funcione de forma segura, óptima y cumpliendo los reglamentos impuestos por la red eléctrica a la que este alimentando.

Uno de los principales requerimientos que se especifican en la normativa del parque está referido a los huecos de tensión en la red. El objetivo es evitar la pérdida significativa de producción de los aerogeneradores a lo largo de la duración de la falta. Los requerimientos de control se refieren a diferentes aspectos de la potencia del sistema y la estabilidad.

Dependiendo del estado de la red, el operador del sistema realiza demandas específicas al control central del parque, el cual prepara las señales de consigna a cada aerogenerador en concreto. El controlador central se encarga de cumplir los requerimientos del operador de red mandando las referencias de potencia activa y reactiva que se necesita de cada aerogenerador. Estas consignas se calculan con las medidas obtenidas en el PCC, *Point of common coupling* en español punto de acoplamiento común, y con la potencia disponible que ofrece cada rotor [5].

La red de comunicación del parque está formada por los controladores de los aerogeneradores, que están instalados en la torre de cada turbina, que se comunican con el controlador central. A su vez los controladores de cada torre recogen toda la información necesaria de los módulos, que están conectados con los instrumentos de medida a través de un sistema de sensores. Así la red está estructurada de forma jerárquica análoga a los diferentes niveles de control como se ve en la figura ???. Los controladores de los aerogeneradores mandan toda la información al controlador central y asignan las consignas que manda este dentro del aerogenerador [4].

Además de los módulos instalados en cada turbina, la red de control cuenta con diferentes módulos de control conectados al controlador central. Entre otros el módulo de la línea, el del transformador, los de los buses de comunicación y los conectados a las redes de alimentación de los aerogeneradores.

Estos módulos monitorizan las condiciones de operación como los desequilibrios de tensión, el sobrecalentamiento, fases inversas, sincronización pobre y los límites de tensión y frecuencia[4].

La red típica de un sistema de comunicaciones consiste de una conexión principal de amplio ancho de banda y redes de bajo ancho de banda conectadas individualmente a la principal. La fibra óptica y las microondas de radio suelen ser las tecnologías usadas para la comunicación principal. En las redes secundarias se suele utilizar cable de par trenzado de cobre, aunque se pueden usar también sistemas inalámbricos. Generalmente en el caso de los parques eólicos se suelen utilizar PLCs, *Power Line Communications* en español comunicación por línea de potencia. Las tecnologías de PLCs disponibles permiten una gran velocidad transmisión llegando a los 200 Mb/s. La principal ventaja de este tipo de comunicación es que las señales viajan a través de los mismos cables de la línea eléctrica. Por otro lado estos cables suelen estar desprotegidos contra interferencias electromagnéticas y los módulos que utilizan son más caros que los de la comunicación inalámbrica [6].

2.2 Elementos de la conexión a red

La red del parque está formada por línea de media tensión que conecta con todos los aerogeneradores, la línea de alta tensión que sería la red eléctrica general a la que se le aporta la potencia y una subestación que contiene varios elementos. El PCC está a un lado del transformador, dependiendo de si las medidas se toman del lado de baja o de alta tensión es el criterio utilizado para dictaminar donde está el PCC.

Las líneas de media tensión generalmente en los parques conectan todos los aerogeneradores con el transformador con diferentes topologías. Las formas de conectar las líneas de alimentación de los aerogeneradores son numerosas pero generalmente se utiliza la radial, la radial bifurcada, la de alimentación-subalimentación y en bucle.

La conexión radial consiste de un solo cable de alimentación que se conecta secuencialmente a todos los aerogeneradores del parque, es la más simple y por tanto la más barata, es la que mejor se adapta para parques con los aerogeneradores en línea. La radial bifurcada es parecida a la radial pero la línea se divide para poder alimentar a dos series de aerogeneradores en paralelo, es la más barata pero un fallo en la línea supone una pérdida de todos los aerogeneradores. La alimentación-subalimentación junta varios cables de alimentación en radial en uno principal manteniendo los elementos de seguridad de cada cable de alimentación secundario, generalmente se usan para parques de gran tamaño que están distribuidos en una gran área. La topología en bucle conecta todos los cables secundarios de alimentación secundarios para evitar que un fallo en una de las líneas la deje inoperante, es la más segura de todas las topologías [7].

El cable de alimentación general llega a la subestación donde se transforma la media tensión en alta con un transformador. Dentro de la subestación, además de los componentes de los lados de media y alta tensión, podemos encontrar los sistemas de medida y control, sistemas de protección contra incendios u otras incidencias y un sistema para ajustar la potencia reactiva. Tradicionalmente este sistema consistía de un sistema mecánico de bajo coste que conectaba un banco de condensadores. A pesar de que estos dispositivos ayudan a mejorar el factor de potencia y la regulación de tensión en estado estacionario, no se puede resolver satisfactoriamente problemas como las fluctuaciones de potencia o tensión y la eliminación de armónicos.

La integración de los parques eólicos a la red requiere una compensación de la potencia reactiva dinámica para apoyar a la estabilidad, sobre todo durante perturbaciones en la red. Para conseguir un alto rendimiento en el control de la tensión tanto en transitorio como estacionario en el PCC se

utilizan FACTS, *flexible ac transmission system* en español sistema flexible de transmisión en corriente continua. Los dos más comunes usados en parques eólicos son el SVC, *static var compensator*, y el STATCOM, *static synchronous compensator* [8].

El STATCOM suele ser la opción considerada para esta solución por las ventajas que presenta frente al SVC. Entre estas ventajas se encuentra un tiempo de respuesta más rápido y una capacidad de aporte de tensión auxiliar mayor por su naturaleza de fuente de tensión [9].

En el lado de media tensión se suele encontrar el barraje que conecta la red al cuadro eléctrico, el seccionador para abrir el circuito cuando no hay corriente y un interruptor automático para abrir el circuito ante corrientes eléctricas elevadas. En el lado de alta tensión suele haber reactancia a tierra en los transformadores, una toma a tierra general, descargadores de sobretensión, otro seccionador y otro disyuntor.

2.3 Parámetros de la red trifásica

Todas las líneas eléctricas descritas en la sección anterior son trifásicas por las ventajas que este tipo de redes presentan frente a las monofásicas. En esta sección se cubrirán todos los parámetros que hay que controlar de una red trifásica, su sentido físico y las operaciones que los relacionan.

El circuito que se va a analizar se puede reducir a una fuente de intensidad que sería al conjunto de aerogeneradores, una línea que une esta fuente con el primario del transformador y otra línea que une el secundario con la red, que estaría representada por una fuente de tensión. En los parques eólicos reales las medidas de los parámetros de la red solo se realizan a un lado del transformador, pero para analizar el circuito en esta sección colocare medidores a ambos lados. Los parámetros de la red que se observan y controlan en un parque eólico son la tensión, la intensidad, la potencia, tanto activa, reactiva y aparente y la frecuencia.

Para la medición de estos valores se considera que los circuitos de la red de conexión son equilibrados, por lo que las tensiones de cada fase y las intensidades tendrán el mismo valor eficaz y un desfase de 120° entre sí. Para expresar esta diferencia de fase se suele utilizar la notación fasorial, pero por la simplicidad a la hora de hacer ciertos cálculos como la suma o la resta se usan números complejos para definir los vectores también. Para poner una referencia a la fase se le da a un valor de tensión o corriente el valor 0 o 90 de fase. En este caso, para tomar el mismo criterio que los resultados de Simulink, se dará fase 0 a la intensidad de la primera fase, I_a .

Las fuentes de intensidad generan tres ondas sinusoidales de igual amplitud y desfasadas entre ellas 120° . Conectada a una carga se pueden observar también tres ondas sinusoidales de voltage que también son equilibradas. Entre las ondas de tensión e intensidad existe una relación dada por la impedancia de la carga representada en la ley de Ohm.

$$\bar{I} = \bar{V}/\bar{Z} \quad (2.1)$$

Si los parámetros de la ecuación son introducidos como fasores y teniendo en cuenta que la fase de la intensidad se considera 0, podemos concluir que el desfase entre la intensidad y la tensión viene dado por la fase de la carga y la relación entre los módulos es el módulo de la impedancia. Si la impedancia es puramente resistiva el desfase es nulo entre ambas, si es de carácter capacitivo la intensidad va adelantada y si es de carácter inductivo la intensidad va retrasada respecto a la tensión.

Para observar este efecto de la carga sobre la relación entre tensión e intensidad se simula el circuito de la figura 2.1 y cambiando los valores de la impedancia se obtienen las gráficas de la figura 2.2, en

las que se puede ver en el transitorio como la intensidad de la primera fase, I_a , se adelanta o se retrasa respecto a la tensión, V_a , dependiendo del tipo de carga.

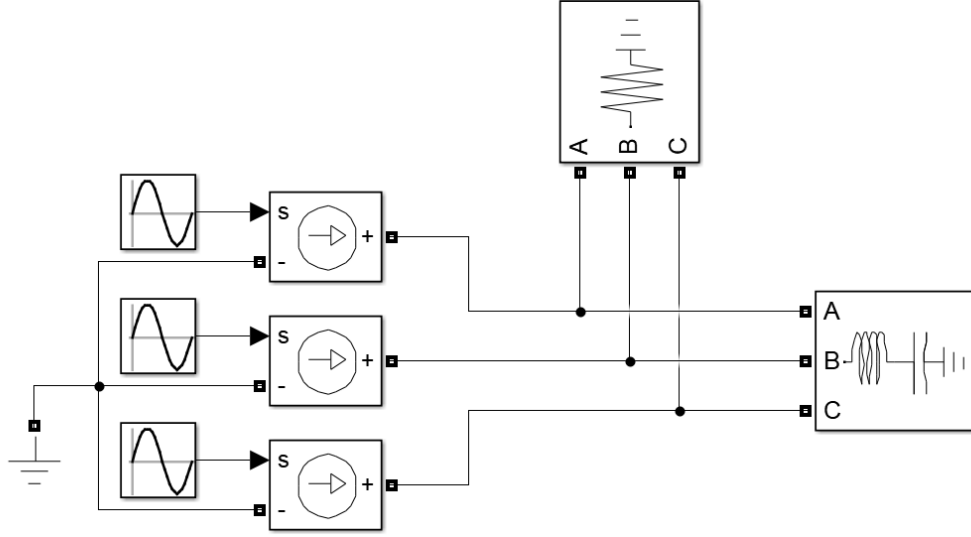


Figure 2.1: Modelo de una carga alimentada por una fuente de intensidad trifásica en Simulink

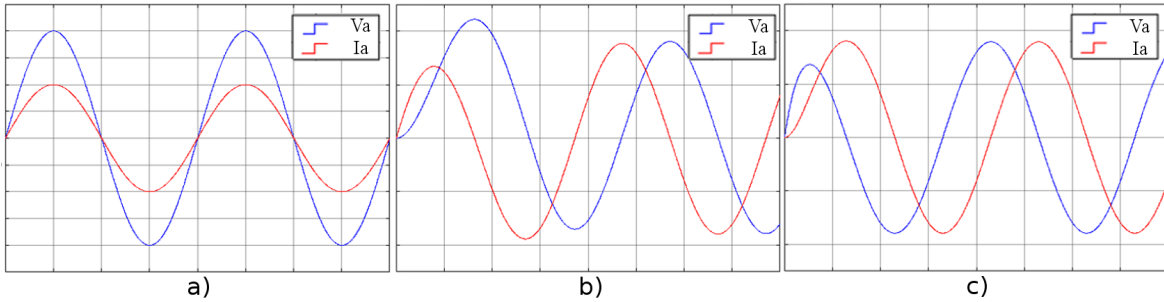


Figure 2.2: Respuesta del circuito ante carga resistiva a), capacitiva b) e inductiva c).

Cuando la carga es puramente capacitiva o inductiva se produce un desfase entre la intensidad y la tensión de 90° . Si la carga es capacitiva, al estar la intensidad adelantada respecto a la tensión el ángulo visto desde la tensión será positivo y si la carga es inductiva el ángulo será negativo visto desde la tensión como se puede ver en la figura 2.3. Para todos los cálculos de potencias el ángulo se ve desde la tensión a la intensidad, por eso se utiliza ese criterio de signos.

En el análisis de la conexión a red es importante la potencia, esta debe cumplir con los requisitos que marcan el operario de red y el código de red. Para el cálculo de la potencia de una red trifásica se utiliza la siguiente fórmula:

$$\overline{S} = 3\overline{V}_F\overline{I}_F^* \quad (2.2)$$

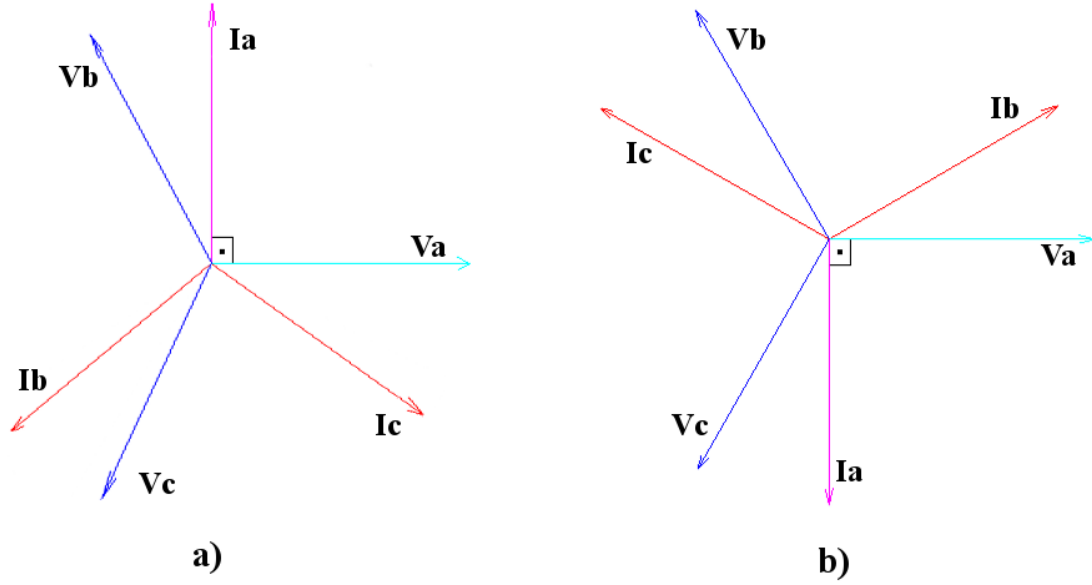


Figure 2.3: Fasores de una carga puramente capacitiva a) e inductiva b).

Podemos observar que la potencia consumida o suministrada por un elemento del circuito tiene una componente real y una componente imaginaria que se llaman potencia activa, P y reactiva, Q respectivamente. Desarrollando la formula anterior usando complejos llegamos a lo siguiente:

$$\bar{S} = 3V_F I_F \cos \varphi + j3V_F I_F \sin \varphi = P + jQ \quad (2.3)$$

Donde φ es el ángulo de desfase entre la tensión y la intensidad. Por lo tanto basandose en el criterio de signos anteriormente mencionado para los ángulos trataremos la Q negativa como capacitiva y con signo positiva como inductiva.

2.4 Códigos de red

Un código de red es un conjunto de especificaciones técnicas que definen los parámetros que debe cumplir una instalación para asegurar la seguridad y estabilidad de la red pública a la que está conectada [10]. Dichas instalaciones pueden ser plantas eléctricas generadoras, consumidores u otra red. En este apartado se prestara especial atención a los códigos de red referidos a plantas eléctricas y al código de red de España en concreto.

Los códigos de red varían según la red para la que se han diseñado. Es por eso cada país tiene un código de red propio, pero no solo varía de un país a otro si no que incluso dentro de España las condiciones que se imponen en la red peninsular o no peninsulares son distintas por las diferencias en las redes y las condiciones en las que operan. A pesar de las diferentes restricciones, los casos que se abordan en los codigos de red suelen ser comunes para la mayoría de ellos.

En el caso de la conexión y operación de plantas generadoras los requerimientos más importantes para el control son los rangos de frecuencia y tensión, el control de la potencia activa y el control de la reactiva en operación normal, ante perturbaciones en la red como los huecos de tensión o la inyección de corriente reactiva. Normalmente estos requerimientos pueden ser descritos como las siguientes zonas de operación para frecuencia y voltaje. Operación continua en un rango limitado al rededor del punto nominal, operación por tiempo limitado con una posible reducción de la salida en unos márgenes extendidos y por último la desconexión inmediata [11].

Antes no se esperaba que los aerogeneradores contribuyeran al control de voltage o frecuencia y se les obligaba a desconectarse de la red bajo condiciones anormales de operación. Sin embargo el crecimiento de la potencia eléctrica instalada proveniente de los parques eólicos en ciertos países como Dinamarca, Alemania o España ha cambiado la situación.

Chapter 3

Control de plantas eléctricas

- 3.1 Introducción al control de plantas eléctricas
- 3.2 Estrategias de control utilizadas
- 3.3 Control clásico
- 3.4 Control moderno

Chapter 4

Herramientas de diseño

4.1 Desarrollo en Simulink de un modelo matemático del parque

Para el desarrollo del modelo su simulación se utilizará la herramienta de programación Simulink. Simulink es un entorno de programación de diagramas de bloques para el diseño basado en modelos. Es parte del entorno de programación de Matlab pero a un nivel de abstracción más alto que el lenguaje interpretado usado en los scripts.

Simulink permite diseñar y simular modelos de sistemas físicos y sistemas de control por medio de diagramas de bloques. El comportamiento de dichos sistemas se define mediante operaciones matemáticas, señales predefinidas y funciones de Matlab. Además de las múltiples herramientas de desarrollo Simulink cuenta con una serie de utilidades para la visualización, análisis y guardado de los resultados de cada simulación.

Con estas características Simulink es una herramienta ampliamente usada en modelado de sistemas eléctricos y electrónicos, tanto como para ingeniería de control.

4.1.1 Librería Simscape Power Systems

La librería Simscape Power Systems contiene elementos y herramientas de análisis para el modelado y simulación de sistemas eléctricos. Entre otros incluye elementos de redes trifásicas y sistemas de energías renovables. Todo el modelo del circuito eléctrico está realizado con elementos de esta librería.

Lo

Las líneas de transmisión son elementos pasivos del circuito que presentan una impedancia. Para definir una línea de media distancia, que son las que se utilizan en un parque eólico, hay dos tipos de parámetros. Existen los parámetros transversales, la conductancia y la capacidad, y están los parámetros longitudinales, resistencia e inductancia. Existen dos formas de agrupar estos parámetros, el circuito equivalente en T y el circuito equivalente en π [12]. En este trabajo voy a centrarme en el modelo π que es el que usare en el modelo de Simulink.

El circuito equivalente en π mantiene unidos los parámetros longitudinales y divide los parámetros transversales. En el tramo central se sitúan la resistencia y la reactancia mientras que la conductancia

y capacitancia quedan divididas en los extremos con sus valores a la mitad, $G/2$ y $B/2$. El circuito está representado en la figura 4.1.

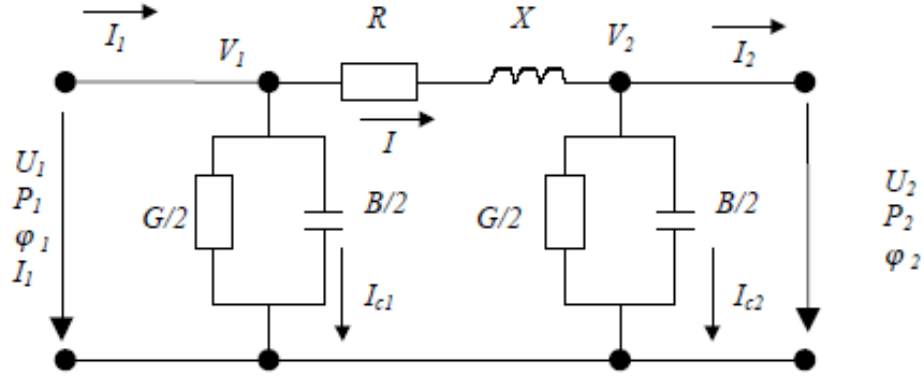


Figure 4.1: Circuito equivalente de circuito π [12].

En el modelo de Simulink para definir la línea con el circuito equivalente π se deben introducir los valores con los que simulink calcula las resistencias, inductancias y capacitancias formando el circuito equivalente que se muestra en la figura 4.2.

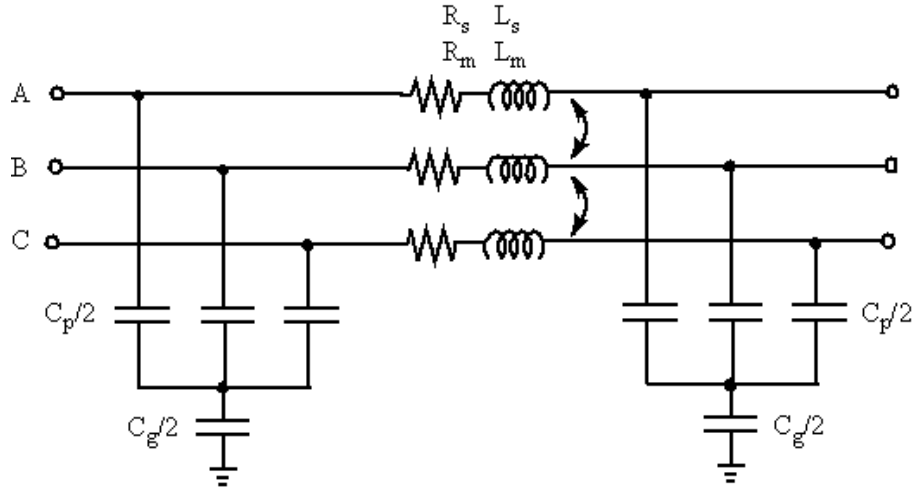


Figure 4.2: Circuito equivalente de circuito π utilizado por Simulink.

4.1.2 Tratamiento de señal por buses

los buses molan

4.1.3 Diseño encapsulado mediante modelos referenciados

Chapter 5

Modelado y simulación del control

- 5.1 Desarrollo de un modelo de parque y red de conexión
- 5.2 Modelado del parque y la conexión a red en Simulink
- 5.3 Diseño del control de la conexión a red
- 5.4 Casos de estudio

Chapter 6

Análisis de resultados

Chapter 7

Conclusiones y estudios futuros

Referencias

- [1] J. Á. Álvarez Echarri, “Estudio de diferentes topologías de generación eólica,” 2011.
- [2] A. C. García, “Simulación del funcionamiento de una turbina eólica con generador de inducción doblemente alimentado,” 2015.
- [3] TheSwitch, “Pmg vs dfig – the big generator technology debate,” *PennEnergy*, 2014.
- [4] M. Wei and Z. Chen, “Intelligent control on wind farm,” in *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010 IEEE PES*, pp. 1–6, IEEE, 2010.
- [5] A. D. Hansen, P. Sørensen, F. Iov, and F. Blaabjerg, “Centralised power control of wind farm with doubly fed induction generators,” *Renewable Energy*, vol. 31, no. 7, pp. 935–951, 2006.
- [6] F. R. Yu, P. Zhang, W. Xiao, and P. Choudhury, “Communication systems for grid integration of renewable energy resources,” *IEEE network*, vol. 25, no. 5, 2011.
- [7] M. Reichard, D. Finney, and J. Garrity, “Windfarm system protection using peer-to-peer communications,” in *Protective Relay Engineers, 2007. 60th Annual Conference for*, pp. 511–521, IEEE, 2007.
- [8] W. Qiao, G. K. Venayagamoorthy, and R. G. Harley, “Real-time implementation of a statcom on a wind farm equipped with doubly fed induction generators,” *IEEE transactions on industry applications*, vol. 45, no. 1, pp. 98–107, 2009.
- [9] C. Han, A. Q. Huang, M. E. Baran, S. Bhattacharya, W. Litzenberger, L. Anderson, A. L. Johnson, and A.-A. Edris, “Statcom impact study on the integration of a large wind farm into a weak loop power system,” *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 23, no. 1, pp. 226–233, 2008.
- [10] “Grid Code | National Grid UK.” <https://www.nationalgrid.com/uk/electricity/codes/grid-code>. Accessed: 2018-01-10.
- [11] M. Altin, Ö. Göksu, R. Teodorescu, P. Rodriguez, B.-B. Jensen, and L. Helle, “Overview of recent grid codes for wind power integration,” in *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2010 12th International Conference on*, pp. 1152–1160, IEEE, 2010.
- [12] R. M. M. Rosas, *Cálculo de líneas y redes eléctricas*, vol. 75. Univ. Politèc. de Catalunya, 2002.