



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y  
DISEÑO INDUSTRIAL

Grado en Ingeniería electrónica industrial y automática

TRABAJO FIN DE GRADO

**Control de potencia en el punto conexión a red de  
parques eólicos**

Autor: Emilio Liaño de la Fuente

Cotutor:  
Manuel García Plaza

Tutor:  
Ricardo Granizo Arrabé

Madrid, Julio 2018



# Agradecimientos



# Resumen

Debido a la importancia de la energía eólica en la producción eléctrica actual, los códigos de red han adaptado su normativa para permitir la introducción de la potencia instalada a la red de forma estable y segura. Esto significa para los parques eólicos la necesidad de implementar un control que cumpla con dicha normativa.

En este trabajo se presentan controles de diferentes plantas centrandose en garantizar el cumplimiento del procedimiento de operación 7.4 sobre el control de tensión y reactiva de la red [1]. Para ello, se crearan modelos de la conexión a red de parques eólicos en el entorno de Simulink.

Se implementaran y analizaran casos de estudios para diferentes plantas, diferentes tipos de red y desvíos de tensión en el punto de conexión. En el segundo capítulo se describirá el funcionamiento de los parques eólicos y su conexión a red como introducción a los posibles escenarios que se pueden plantear para su estudio.

Se diseñaran y aplicaran diferentes tipos de algoritmos de control de la potencia activa y reactiva de los generadores modelados. Se compararan las respuestas obtenidas por diferentes tipos de control para el cumplimiento del código de red de España. Las diferentes técnicas utilizadas actualmente y las posibilidades de teoría de control son descritas en el tercer capítulo.

Para el modelado del sistema eléctrico se utilizaran las herramientas de la librería SimPowerSystem de Simulink. El modelo consta de los elementos típicos de una conexión a red como las líneas de transmisión, transformadores, generadores y la propia red. En el cuarto capítulo se describen las herramientas usadas de esta librería y otras de Matlab/Simulink que fueron usadas en este trabajo.

Los objetivos por tanto de este trabajo de fin de grado son la simulación de un parque eólico y presentar diferentes escenarios posibles de conexión a red y la comparación de diferentes estrategias de control para cumplir los requisitos impuestos por el código de red en los diferentes casos anteriormente propuestos.



# Índice

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>7</b>
1.1	Objetivos . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Parques eólicos y conexión a red</b>	<b>9</b>
2.1	Elementos del parque . . . . .	9
2.2	Elementos de la conexión a red . . . . .	11
2.3	Parámetros de la red trifásica . . . . .	12
2.4	Códigos de red . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Control de plantas eléctricas</b>	<b>19</b>
3.1	Introducción al control de plantas eléctricas . . . . .	19
3.2	Estrategias de control utilizadas . . . . .	20
3.2.1	Control clásico . . . . .	21
3.2.2	Control moderno . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Herramientas de diseño</b>	<b>27</b>
4.1	Desarrollo en Simulink de un modelo matemático del parque . . . . .	27
4.1.1	Librería Simscape Power Systems . . . . .	28
4.1.2	Tratamiento de señal por buses . . . . .	31
<b>5</b>	<b>Modelado y simulación del control</b>	<b>33</b>
5.1	Modelado del parque y la conexión a red en Simulink . . . . .	33
5.2	Diseño del control de la conexión a red . . . . .	34
5.3	Casos de estudio . . . . .	37
<b>6</b>	<b>Análisis de resultados</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>Conclusiones y estudios futuros</b>	<b>41</b>





# Capítulo 1

## Introducción

La importancia de aportar la potencia demandada por la red garantizando una calidad que apoye a la estabilidad de esta es reflejado en los códigos de red que los países han elaborado para garantizarlo. Las centrales electricas deben cumplir los requisitos impuestos en los códigos de red para poder conectarse a la red.

Esta necesidad de cumplir con los criterios impuestos por los códigos de red convierte a los controladores en un elemento imprescindible para el funcionamiento de cualquier planta. En general las condiciones impuestas por los códigos de red son relativas a la potencia activa y reactiva que genera la instalación por eso los controladores se centran en estas dos factores.

La compensación de reactiva esta asociada a los desfases de tensión que se produce en la red. Los elementos de la red, tanto en el transporte como en el consumo, son principalmente de caracter inductivo. Esto genera un aumento en la tensión de la red y de la ocupación eléctrica de las líneas y transformadores.

Las plantas generadores son las responsables de evitar esta situación corrigiendo este desfase desde sus instalaciones. Para ello deben consumir o generar la energía reactiva como se indica en los códigos de red. Los parques eólicos como cualquier otra planta generadora deben colaborar en la compensación de reactiva.

Normalmente este control se aplicaba a nivel individual en cada aerogenerador. En España, este planteamiento era válido para cumplir el RD 2818, que solo tomaba en cuenta el alejamiento del factor de potencia unitario con los datos mensuales. Sin embargo la normativa actual requiere un ajuste fino que solo se puede conseguir añadiendo una capa de control global regulando el parque al completo.

Estos controladores de planta, conocidos como *Power Plant Controller* o PPC, cumple otras funciones a parte de cumplir con las restricciones de las normativas. Son los encargados de maximizar la producción, seguir las instrucciones del operador de red o cumplir ciertas pautas que indique el gestor del parque.

En el caso de los parques eólicos esto suele ser un problema complejo de abordar. El reparto de consignas para un número variable de generadores, las restricciones de potencia disponible por el viento o las condiciones mediambientales como la parada de máquinas durante las horas de actividad de ciertas especies, son problemas que las plantas eléctricas clásicas no tenían que tener en cuenta. Por eso en los parques eólicos o fotovoltaicos el PPC es una herramienta importante a desarrollar y es la que se ha diseñado en este trabajo.

Como se ha mencionado antes los elementos de la red son de caracter inductivo normalmente, esta generalización se puede aplicar tambien a los elementos de una planta generadora y en concreto a los de un parque eólico. Tanto las máquinas eléctricas usadas para la generación, normalmente máquinas asíncronas o síncronas, como los elementos de transporte, las líneas y los transformadores, son de caracter inductivo cuando la planta se encuentra en funcionamiento.

Los códigos de red estan escritos teniendo en cuenta esta presunción del caracter inductivo en las plantas. Por eso, en ciertos casos, una planta de caracter capacitivo podría compensar más las subidas de tensión dejando a la capacitancia de la planta compensar que siguiendo el código de red.

## 1.1 Objetivos

El objetivo global del trabajo es el de diseñar y desarrollar un PCC en el entorno de Matlab/Simulink para controlar la potencia activa y reactiva suministrada a la red. Para la consecución de este objetivo general se han establecido unos objetivos especificos que dicho PCC debe cumplir para poder realizar el estudio de los casos de plantas capacitivas anteriormente mencionados.

Como primer objetivo en este trabajo se simulará el circuito de conexión a red de un parque eólico. En esta fase se debe diseñar un modelo físico de la conexión a red utilizando las herramientas de la librería *Simscape Power Systems*. Debe incluir como elementos imprescindibles la red, el parque y las lineas de transmisión.

De este sistema se deben poder extraer medidas de tensión, intensidad y potencia. Con ellas se verificará el comportamiento de la red y el criterio de signos utilizado en el cálculo de la reactiva. Esto es base fundamental para implementar el PPC al ser la realimentación del control.

El segundo objetivo es el diseño de un controlador que sea capaz de cumplir el código de red de España. En concreto cumplir con lo establecido en el procedimiento de operación 7.4 referente a compensación de reactiva ante variaciones de tensión.

Para considerar cumplido este objetivo la planta tendra que seguir la consigna de reactiva sin salirse de los margenes establecidos por la normativa española ante diferentes tipos de variaciones de tensión en la red como el escalón, la rampa o la sinusoidal. Además el control debe actuar siguiendo estas entradas en todos los casos de estudio propuestos, tanto para las difernetes potencias nominales como para las plantas inductivas y capacitivas.

Por último los efectos de aplicar o no la compensación de reactiva que se establece en el código de red para los diferentes casos de estudio del caracter de la planta. Teniendo en cuenta que el código de red esta escrito suponiendo que las plantas generadoras son de caracter inductivo, las plantas que son de caracter capacitivo podrían compensar mejor las subidas de tensión con las propias características de la planta que siguiendo la normativa.

se comparará como actuan diferentes plantas propuestas en los casos de estudio ante la subida de tensión provocada la inyección de potencia activa en la red. Dependiendo de la cantidad de potencia activa que se genere tambien habra diferentes casos de estudio puesto que la tensión variara en función de la intensidad que entregue la planta a la red.

## Capítulo 2

# Parques eólicos y conexión a red

Un parque eólico es una agrupación de aerogeneradores que transforman la energía eólica en energía eléctrica. En este capítulo se hará una introducción a los elementos de un parque eólico prestando especial atención a los elementos eléctricos y de control. Primero se expondrán los elementos en general de un parque eólico y de la conexión a la red, después se hablara de los parámetros eléctricos del circuito de conexión y de su comportamiento, y por último se hablara de los códigos de red y de las limitaciones que estos imponen sobre el funcionamiento de los parques eólicos.

### 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 [2].

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’ [3]. 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 [4]. 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 [5].

**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 [6].

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. Los controladores de los aerogeneradores mandan toda la información al controlador central y asignan las consignas que manda este a los módulos dentro del aerogenerador [5].

Además de los módulos instalados en cada turbina, la red de control cuenta con diferentes módulos 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[5].

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 [7].

## 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.

**Líneas de transmisión** 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 [8].

**Subestación** 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* [9].

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 [10].

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  $120^\circ$  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  $120^\circ$ . 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.

Cuando la carga es puramente capacitiva o inductiva se produce un desfase entre la intensidad y la tensión de  $90^\circ$ . 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:

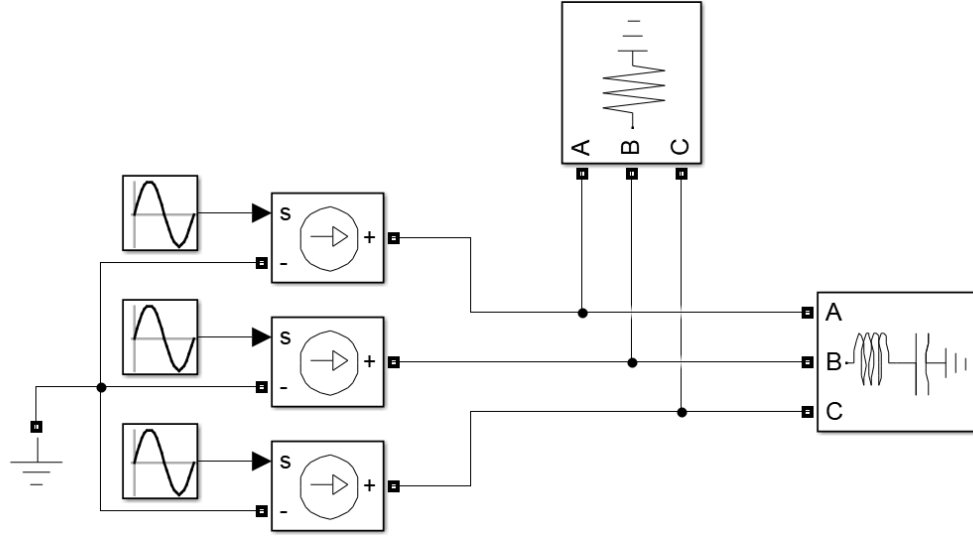


Figure 2.1: Modelo de una carga alimentada por una fuente de intensidad trifásica en Simulink

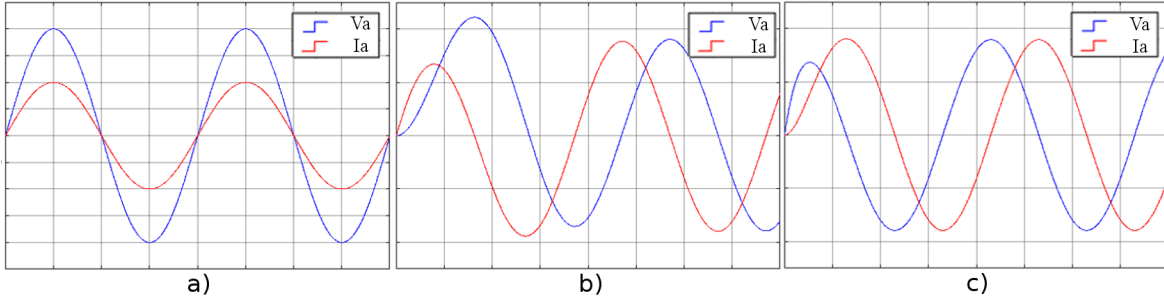


Figure 2.2: Respuesta del circuito ante carga resistiva a), capacitiva b) e inductiva c).

$$\bar{S} = \sqrt{3} \bar{V}_L \bar{I}_L^* \quad (2.2)$$

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:

$$\bar{S} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \varphi + j \sqrt{3} V_L I_L \sin \varphi = P + jQ \quad (2.3)$$

Donde  $\varphi = \alpha_V - \alpha_I$ . 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.

Analizando la diferencia de tensión entre dos puntos de un circuito que esta descrita por la ecuación (2.1), donde la tensión antes de la carga es  $E$  y la tensión despues de la carga es  $V$  tenemos que:

$$\Delta V = E - V = ZI \quad (2.4)$$

Introduciendo la ecuación (2.3) en la ecuación (2.4) obtenemos el siguiente desarrollo:

$$\Delta V = (R + jX) \frac{P - jQ}{E} = \frac{RP + XQ}{E} + j \frac{XP - RQ}{E} \quad (2.5)$$

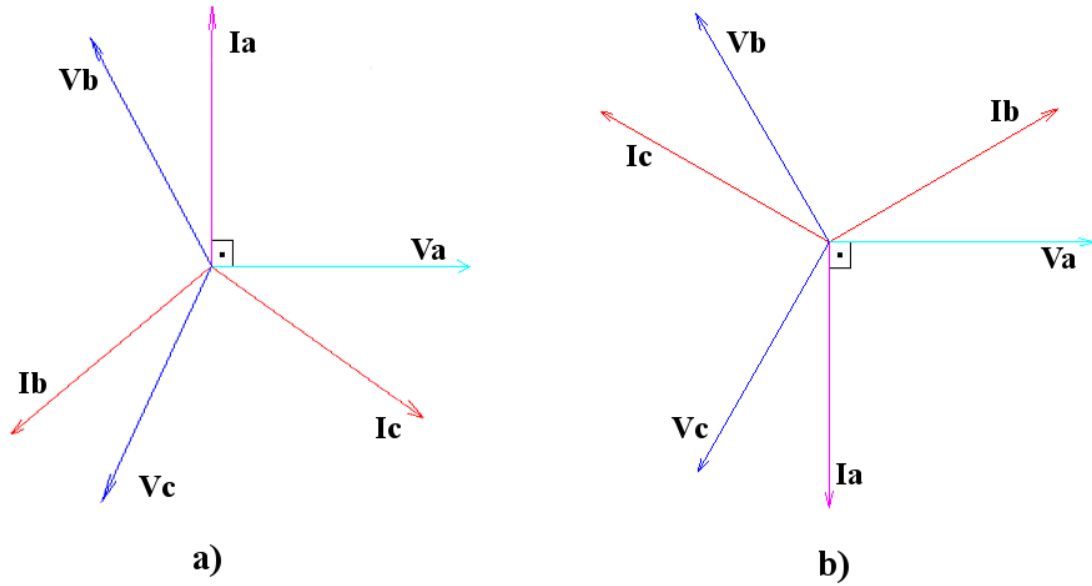


Figure 2.3: Fasores de una carga puramente capacitiva a) e inductiva b).

Cuando hablamos de una linea de transmisión, como son las que conectan el parque con al subestación y esta con la red, consideramos que  $X \gg R$  [11]. Considerando entonces despreciable el valor de  $R$  en la formula (2.5) queda lo siguiente:

$$\Delta V = Q \frac{X}{E} + jP \frac{X}{E} \quad (2.6)$$

Esto significa que los cambios en la magnitud de de la tensión son controlados por la potencia reactiva y la diferencia de fase entre emisor y receptor viene dada por la potencia activa [11]. Por eso se utiliza el control de la potencia activa y reactiva para controlar frecuencia de la red y la tensión respectivamente.

Normalmente la frecuencia es más estable que la tensión en la red eléctrica por lo que los parques eólicos tratan de producir la potencia eléctrica máxima que permita la instalación y la demanda de la red, y así obtener los mayores beneficios posibles. Es por eso la reactiva la que suele variar más para mejorar la calidad de la potencia entregada.

## 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 [12]. 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 códigos 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. También se cubren los casos de 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 alrededor del punto nominal, operación por tiempo limitado con una posible reducción de la salida en unos márgenes extendidos y por último la desconexión inmediata [13].

**Tensión** Respecto al control de tensión, en la sección anterior se ha visto que la magnitud de la tensión está controlada por la potencia reactiva. Por lo tanto el control de la tensión se expone en los códigos de red como un control de la potencia reactiva en función de la tensión de red [11].

En los PO, procedimientos de operación que forman el código de red de España, el control de la potencia reactiva está definido por la potencia activa neta instalada del parque. En el PO 7.4 [1] se establece que todos los generadores deben funcionar dentro de el margen de generación/absorción que aparecen en la figura 2.4.

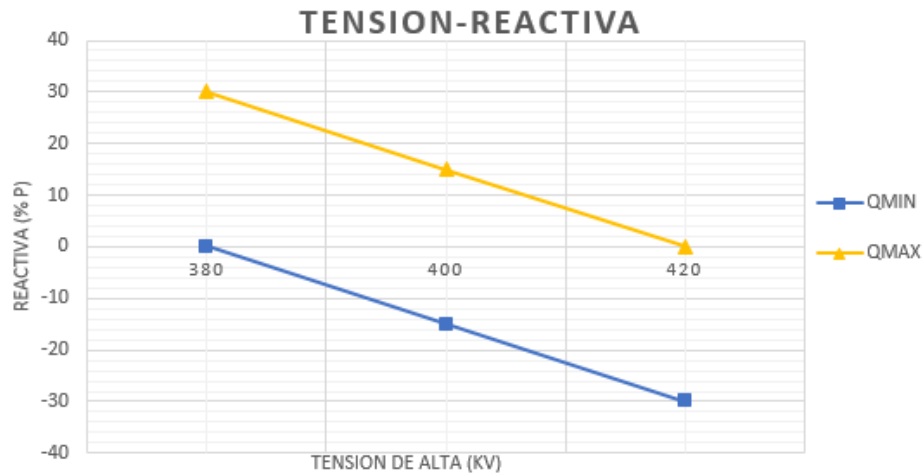


Figure 2.4: Límites de potencia reactiva en función de la tensión de la línea

Para comprobar que se cumplen los requisitos de tensión y potencia reactiva se hacen controles de estos valores cada cinco minutos por parte del operador del sistema. Se establece una banda admisible de  $\pm 2.5 kV$  entorno al valor de consigna. Se considera un servicio adecuado cuando se cumple al menos un 75% de los valores muestreados cada hora. Para cumplir con los valores la tensión se debe mantener dentro de los márgenes admisibles de variación o la central debe haber alcanzado el límite de potencia reactiva obligatorio [1].

**Frecuencia** Como consecuencia de un desajuste entre la potencia activa aportada y la demanda se produce un cambio en la energía almacenada en la masa rotativa del generador que provoca un desvío de la frecuencia del sistema. Un aumento en la potencia entregada se convertiría en un aumento de la velocidad angular del generador y por tanto un aumento de frecuencia, pasando lo contrario al entregar potencia por debajo de la demanda [11], [14].

Normalmente el control de la frecuencia esta compuesto por tres funciones distintas. El control primario de frecuencia, usado ante los desequilibrios repentinos en la red. Actua a nivel local en la turbina en un rango de 15 a 30 segundos. El control secundario o de carga permite reestablecer la frecuencia y la potencia a los valores programados. Se realiza en las unidades de control central del parque y actua en un rango de 15 minutos. Este es el tipo de función que se implementara en este trabajo. Finalmente esta el control terciario que consiste en la gestión de la potencia generada por cada aerogenerador para ayudar al control secundario [11].

En el PO 1.5 se trata el establecimiento de la reserva para la regulacion de frecuencia y potencia. Respecto al control primario, se especifica que debe completar un reestablecimiento total antes de 15 segundos desde el instante de desequilibrio si el valor de esre es menor o igual a 1500 MW. En caso de que el desequilibrio sea superior a 1500 MW el 50% la reserva de regulación primaria debe actuar antes de 15 segundos y se be alcanzar el 100% de actuación antes de 30 segundos. La regulación primaria debe actuar durante un tiempo de 15 minutos hasta que la regulación secundaria recupere las consignas iniciales y reestablezca la reserva primaria utilizada [15].

La actuación de la reserva secundaria no debe retardarse más de 30 segundos y debe mantenerse durante un tiempo de 15 minutos hasta que su uso neto sea sustituido por la regulación terciaria. Se deben garantizar unos valores minimos de reserva de 500 MW a subir y 400 MW a bajar. Sobre la reserva terciaria se dice que se ha de mantener unos márgenes de subida y bajada de potencia para prevenir las diferencias de demanda real con respecto a la esperada y de la producción de las centrales eólicas respecto a la esperada [15].

Por otra parte, en el PO 1.2 se especifican los limites de frecuencia admisibles del sistemas y las correcciones que se deben aplicar de potencia activa. Estando los limites de subfrecuencia entre  $49,8Hz$  y  $49,5Hz$ , y de sobrefrecuencia en  $50,2Hz$  y  $50,5Hz$ . Para estos limites la corrección de potencia activa se rige por la ecuación (2.7) que devuelve difrenecia de potencia,  $\Delta P$ , a imponer respecto a la referencia,  $P_{ref}$  [16].

$$\frac{\Delta P}{P_{ref}} = 100 \frac{\frac{|\Delta f| - |\Delta f_1|}{f_n}}{s_2} \quad (2.7)$$

Donde  $\Delta f_1$  es la difrenecia de frecuencia entre la tensión nominal,  $f_n$ , de  $50Hz$  y los limites fijados por el código de red más cercanos a  $f_n$  segun el caso sea de sobrefrecuencia o subfrecuencia. Además  $s_2$  es el estatismo en porcentaje que debera ajustar a un rango entre 2% y 12% [16].

En la figura 2.5 se muestran los limites de  $\Delta P$  que se pueden imponer en función de los valores limites para  $s_2$ . Los valores validos son aquellos que se encuentran en el area comprendida entre las dos rectas.

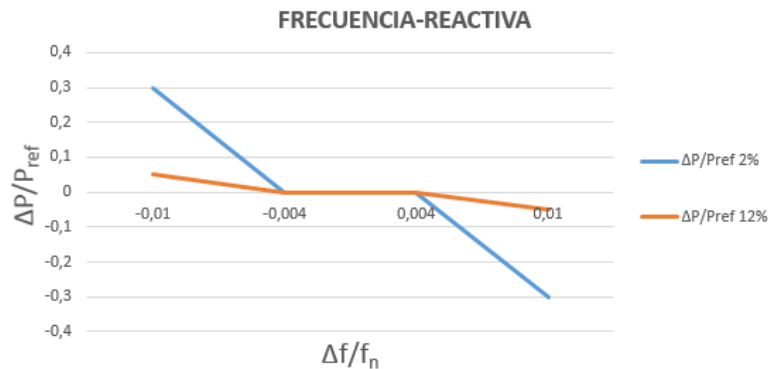


Figure 2.5: Límites de variación de potencia activa en función de la desviación de frecuencia

En este mismo documento se especifica que las tecnologías cuya energía primaria sea renovable y se conecten a la red mediante convertidores electrónicos, como es el caso de los aerogeneradores modernos y por extensión de la mayoría de parques eólicos, se contribuya a la maximización de producción y se minimizara la necesidad de aplicar limitaciones a su producción. Esto significa que este control estara podrá desactivarse siempre que el operador del sistema considere que existen otros medios para evitar poner en riesgo la calidad del suministro, pero es necesario que se pueda activar en tiempo real si así se solicitase [16].



## Capítulo 3

# Control de plantas eléctricas

La teoría de control es un campo de la ingeniería y las matemáticas que trata el comportamiento de los sistemas dinámicos. El problema de control consiste en, dada una entrada o referencia a un actuador en un sistema físico o planta, obtener la respuesta deseada de dicha planta.

Esto se puede conseguir en lazo abierto o en lazo cerrado. La solución en lazo abierto es, conociendo las condiciones de la planta y su función de transferencia, introducir una referencia con la que se obtenga la salida deseada. En lazo cerrado se realimenta comparandola con la entrada para medir el error del sistema, este error generalmente entra a un controlador que da finalmente la entrada a la planta con la que se obtiene la salida deseada. Este esquema de realimentación se muestra en la figura 3.1 y es en los que se basan normalmente los controladores usados en la industria.

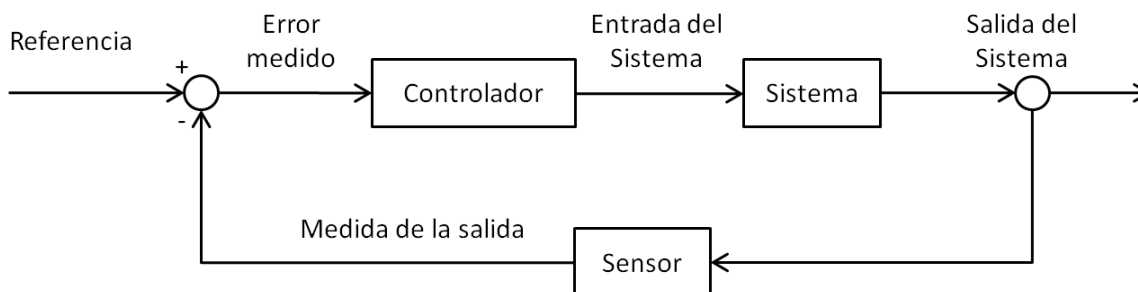


Figure 3.1: Esquema de control en lazo cerrado.

Por la complejidad del sistema de conexión a red de una planta eléctrica y la posibilidad de variaciones en sus parámetros a lo largo del tiempo en este capítulo se hablara de la solución de lazo cerrado.

Primero se hablara del control en general de plantas eléctricas y se definirá el concepto de los niveles de control, en la siguiente sección se establecerá el estado del arte en el control de parques eólicos pasando tanto por el uso de las técnicas de control clásicas como las modernas.

### 3.1 Introducción al control de plantas eléctricas

Para poder cumplir los requisitos del código de red y alcanzar el máximo de potencia entregable de forma óptima las centrales eléctricas disponen de un sistema de control. En el caso de los parques

eólicos se tiene la problemática añadida de tener que controlar varios generadores diferentes con una potencia máxima disponible variable en el tiempo.

En un principio, los aerogeneradores de un parque se controlaban solamente de forma local. Aplicando un control individual a cada máquina se consigue una regulación de reactiva en torno al cero [17]. Desde que se impone una normativa más estricta sobre los parques eólicos el control ha evolucionado en complejidad.

Para poder cumplir los requisitos del código de red acerca de los distintos niveles se establecen tres niveles de control diferentes. El control primario a nivel local de cada generador y con los tiempos de reacción especificados en el capítulo anterior. El control secundario actúa en un área atendiendo a la frecuencia y el intercambio de potencia con áreas vecinas y el control terciario que actúa en el sistema eléctrico en su totalidad [18]. En el caso de un parque eólico este último nivel de control sería el parque como conjunto.

Respecto al control de tensión, el control primario se encargaría de mantener la tensión de salida de cada generador igual al valor de referencia,  $V_{ref}$ . El control secundario se encarga de imponer el valor de referencia a todos los aerogeneradores de un área manteniendo la tensión en los nudos pilotos. El control terciario determina el valor de consigna para los nudos y la tensión en la subestación, el PCC [19].

Al nivel del control terciario, el controlador del parque, este se comporta como una sola unidad. Tiene como entradas las demandas del operador del sistema, las medidas en el PCC y la potencia disponible en los aerogeneradores. La potencia disponible de cada aerogenerador es establecido en el nivel primario de cada una de las unidades. El sistema de control tiene normalmente un bloque de establecimiento de las referencias de potencia, el propio controlador y un bloque de reparto de consignas [20].

## 3.2 Estrategias de control utilizadas

En el control de tensión y reactiva en concreto existen diferentes estrategias. En la actualidad se pueden encontrar diferentes formas de establecer la consigna para el PCC. Las magnitudes usadas como consigna para el control son el factor de potencia o  $fdp$ , la tensión y la potencia reactiva.

El  $fdp$  se utiliza como consigna en muchos casos por proporcionar un incremento en la contribución de reactiva a la par con el incremento de aporte de potencia activa a la red. Una desventaja en parques eólicos es que los cambios de potencia activa en los aerogeneradores resultarían en un cambio del  $fdp$  en el PCC por la inductancia de las líneas. Esto resultaría en una serie de cambios bruscos en la referencia de reactiva que llegaría a las turbinas que necesitarían un control más rápido y un hardware que elimine los retardos lo más posible para asegurarse que el sistema no oscila [21].

El control de tensión ofrece la posibilidad de reducir los efectos que provocan los cambios en la potencia activa sin la necesidad de rápidos cambios en la consigna por parte del operador del sistema. Pero debido a los retardos de comunicación dentro del parque es inevitable cierta variación en la tensión del PCC [21].

Utilizar la potencia reactiva como consigna es la estrategia más utilizada con grandes generadores síncronos. La desventaja es la misma que cuando se usa el  $fdp$  ante los cambios de potencia activa. Requiere también un control rápido para eliminar un impacto indeseado en la tensión [21].

En el control de potencia activa también existen diferentes estrategias de control para las posibles situaciones de funcionamiento. Durante los periodos en los que la capacidad de transmisión de la red es reducida se establece un límite máximo de potencia activa generada, esto se llama en inglés *Absolute Production Limiter*. La capacidad de participar en el control secundario o de áreas es llamado *Balance Control*. Ante cambios bruscos en la potencia máxima disponible provocados por el tiempo, tormentas u otros eventos con rápidas variaciones de la velocidad del viento, se puede imponer una limitación en la velocidad de cambio de la potencia producida, esto se llama *Power Rate Limitation*. En momentos en los que necesite mantener una reserva de potencia activa en el parque se puede

establecer la potencia entregada a un limite por debajo de la disponible, esto se llama *Delta Control* [22].

En la figura 3.2 se pueden observar los efectos de estas diferentes funciones que se pueden aplicar en un parque eólico. Donde la curva en rojo es la potencia suministrada y la verde es la potencia disponible.

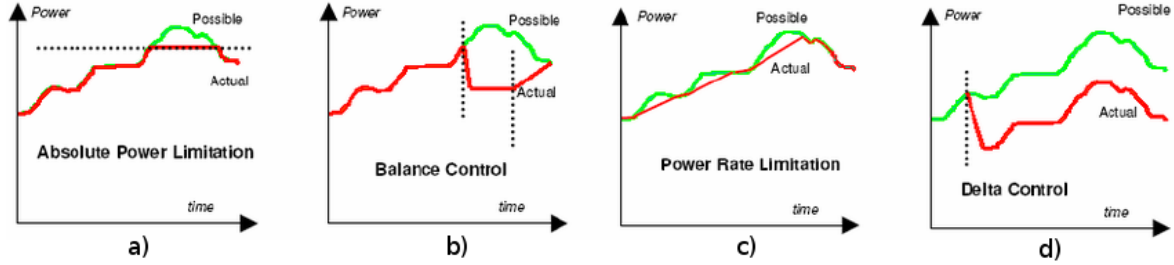


Figure 3.2: Estrategias de control de potencia activa en función del tiempo

Referente a los algoritmos de los controladores de parques eólicos existen dos areas diferentes, la implementación industrial y las líneas de investigación. En la industria es común encontrar técnicas de control clásico mientras que la investigación actual esta más orientada al control moderno.

### 3.2.1 Control clásico

El algoritmo predominante en la teoría de control clásica es el PID, *Proporcional Integrativo Derivativo*, y sus variantes. El controlador PID es el caso extremo de un compensador de atraso-adelanto de fase, con un polo en el origen y el otro en el infinito. Es similar a las versiones reducidas, el PD y el PI, que son el caso extremo de compensadores de adelanto de fase y retraso de fase respectivamente [23].

El PID consta de tres acciones como se ha mencionado antes. La acción proporcional que devuelve una salida proporcional a la entrada con una ganancia variable, la acción integral que representa la acumulación del error y la acción derivativa, que representa la pendiente del error. Estas tres acciones se suman como se muestra en la figura 3.3.

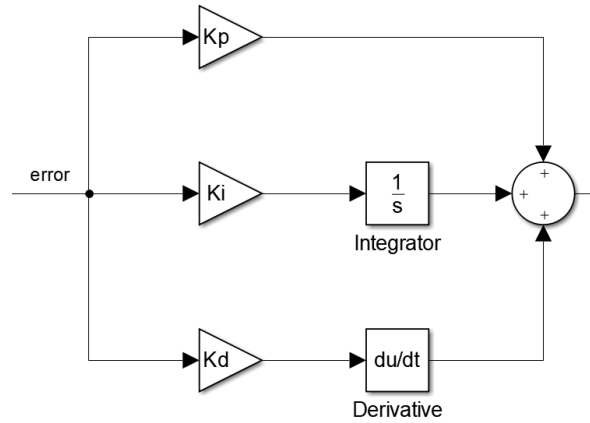


Figure 3.3: Esquema de controlador PID más sencillo

Dentro de la familia de los controladores PID los más usados en la industria, además del mismo,

serían el PD y el PI. En este trabajo se prestara más atención al control PI, por ser el que se usa mayoritariamente en los parques eólicos como se puede ver en diferentes publicaciones [6, 17, 21, 24, 25].

El controlador PD elimina la rama integradora del PID. Este tipo de controlador se suele usar para controles de posición en sistemas de torsión o movimientos acelerados. Sin embargo en sistemas más rígidos a menudo este control hace al sistema inestable. La ganancia del lazo cerrado es demasiado grande y no existe suficiente amortiguamiento por lo que las oscilaciones se vuelven demasiado grandes.[26]. Por esta razón este tipo de control no suele ser usado en centrales eléctricas.

El controlador PI es lento pero preciso. La acción integradora elimina el error en el régimen permamnete y garantiza la estabilidad al cumplir el criterio de Liapunov (3.1). Esto significa que cuando el error sea positivo forzara una pendiente negativa y cuando el error sea negativo el integrador forzara una pendiente positiva.

$$S\dot{S} < 0 \quad \text{Donde } S \equiv \text{error} \quad (3.1)$$

Para que el PID, o cualquiera de sus variaciones, devuelva la respuesta que se desea tanto en el régimen transitorio como el permanente, hay que ajustar los parámetros utilizados en lo que se conoce como sintonización o *tuning*. Por tanto, esta parte del diseño del controlador tiene mucha importancia y existen variadas técnicas tanto apra el cálculo teórico como la obtención empírica.

Cuando se conoce la planta o se ha calculado un modelo aproximado de ella es posible calcular el PID de forma teórica. Se establece un polo dominante que se correponde a la respuesta deseada, y luego se aplica la asignación directa de polos. Esta consiste en multiplicar a la planta por la función de transferencia genérica del controlador y calcular los coeficientes apra los cuales la funcion de transferencia final equivale al polo dominante elegido con anterioridad.

Como Ziegler y Nichols describen en [27]: "Un acercamiento puramente matemático al estudio del control automático es, ciertamente, la forma más deseable desde un punto de vista de precisión y brevedad. Sin embargo, desafortunadamente, las matemáticas de control implican una desconcertante variedad de funciones exponenciales y trigonometricas que el ingeniero medio no puede permitirse el tiempo en abrirse paso a traves de ellas para llegar a la solución del problema actual."

Es por eso que en la industria para ahorrar costes y tiempo se utilizan los métodos de ajuste y sintonización empíricos. Estos métodos se conocen así por utilizar la respuesta real de la planta sin control para poder aplicarse. Dentro de estos métodos encontramos entre los más usados el Ziegler-Nichols, Chien-Hrones-Reswick y el Cohen-Coon.

**Ziegler-Nichols** Dos métodos fueron presentados por Ziegler y Nichols en 1942. Estos métodos todavia son ampliamente en su forma original o alguna de las variaciones. El primer método es el de la respuesta al escalón y el segundo es el de la respuesta en frecuencia.

En la respuesta al escalón en lazo abierto se deben medir los parámetros  $a$  y  $L$ . Para ello hay que dibujar una tangente en el punto de máxima pendiente y coger las coordenadas de los puntos de corte con los ejes. Como se ve en la figura 3.4,  $L$  se corresponde a la coordenada del punto de corte con el eje  $x$  y  $a$  se corresponde con el punto de corte con el eje  $y$ .

Con los valores de  $a$  y  $L$  se pueden calcular los parametros del controlador PID o cualquiera de sus variantes como se especifica en la tabla 3.1. Además se puede calcular tambien una estimación del tiempo de pico que tendría el sistema con cada controlador.

Table 3.1: Parámetros del PID obtenidos a traves de Ziegler-Nichols [28]

Controller	K	$T_i$	$T_d$	$T_p$
P	$1/a$	-	-	$4L$
PI	$0.9/a$	$3L$	-	$5.7L$
PID	$1.2/a$	$2L$	$L/2$	$3.4L$



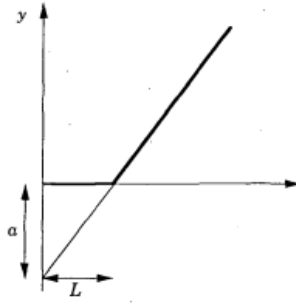


Figure 3.4: Parámetros del método de Ziegler-Nichols para el escalón [28]

Este método solo se puede aplicar a plantas en las que la respuesta al escalón en lazo abierto no es inestable o si la respuesta es muy oscilatoria. Por eso Ziegler y Nichols propusieron un segundo método que se puede aplicar a cualquier tipo de planta, usando la respuesta en frecuencia.

Para el método de la respuesta en frecuencia se utiliza la curva de Nyquist del proceso en cadena abierta. Se calcula el punto de intersección con el eje real negativo que está definido por  $K_u$  y  $T_u$ . Estos dos valores se introducen en la tabla 3.2 y se hallan los valores del controlador como en el método anterior.

Table 3.2: Parámetros obtenidos en el método de la frecuencia [28]

Controller	K	$T_i$	$T_d$	$T_p$
P	$0.5K_u$	-	-	$T_u$
PI	$0.4K_u$	$0.8T_u$	-	$1.4T_u$
PID	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.125T_u$	$0.85T_u$

Como se necesita conocer la planta para poder dibujar la curva de Nyquist los parámetros  $K_u$  y  $T_u$  se suelen medir de otra manera. Se aplica un controlador P a la planta con un  $K$  nulo. Luego se va aumentando su valor lentamente hasta que el sistema oscile. La ganancia cuando el sistema empieza a oscilar es  $K_u$  y el período de las oscilaciones es  $T_u$ .

El método de Ziegler-Nichols es ampliamente utilizado por su simpleza y el poco esfuerzo que requiere. Sin embargo, el criterio de diseño que utiliza de obtener un sistema con un factor de reducción de la oscilación entre el primer pico y el segundo a un cuarto tiene beneficios e inconvenientes. Aporta un buen rechazo a las perturbaciones de carga, pero también crea un sistema con una amortiguación muy pobre y poco margen de estabilidad [28].

**Chien-Hrones-Reswick** Existen múltiples sugerencias para modificar el método de Ziegler-Nichols. Chien, Hrones y Reswick, *CHR*, propusieron un cambio para el método del escalón para conseguir un mejor amortiguamiento en lazo cerrado.

El cambio propuesto es utilizar "la respuesta más rápida sin sobreoscilación" o "la respuesta más rápida con un 20% de sobreoscilación" como nuevo criterio de diseño. Además observaron que el ajuste del PID para cambios en la consigna o para la respuesta ante perturbaciones de carga eran diferentes.

Para el método CHR se utilizan los parámetros anteriormente mencionados  $a$  y  $L$ . Con estos valores se pueden calcular los parámetros del controlador utilizando la tabla 3.3. El PID con 20% de sobreoscilación es muy parecido a los valores dados por Ziegler-Nichols, sin embargo se puede observar que para el 0% se reduce el efecto del proporcional y el integrativo para hacer más lento el sistema.

Table 3.3: Valores de CHR para perturbaciones de carga [28]

Overshoot Controller	0%			20%		
	K	$T_i$	$T_d$	K	$T_i$	$T_d$
P	$0.3/a$	-	-	$0.7/a$	-	-
PI	$0.6/a$	$4L$	-	$0.7/a$	$2.3L$	-
PID	$0.95/a$	$2.4L$	$0.42L$	$1.2/a$	$2L$	$0.42L$

Table 3.4: Valores de CHR para seguimiento de consigna [28]

Overshoot Controller	0%			20%		
	K	$T_i$	$T_d$	K	$T_i$	$T_d$
P	$0.3/a$	-	-	$0.7/a$	-	-
PI	$0.35/a$	$1.2T$	-	$0.7/a$	$T$	-
PID	$0.6/a$	$T$	$0.5L$	$0.95/a$	$1.4T$	$0.47L$

Para obtener un controlador que responda ante cambios en la consigna de forma deseada se debe aplicar la tabla 3.4. Para estos calculos ya no solo se necesita  $a$  y  $L$  si no que hay que usar el tiempo de establecimiento,  $T$ , del sistema [28].

**Ajuste del PID** Una vez que se ha obtenido unos valores del controlador usando los métodos anteriores es posible que la planta no responda exactamente como se quería en un principio. Para lograr la respuesta deseada es neceserio ajustar los parámetros del controlador. Este proceso no se hace de forma arbitraria si no que existen ciertas pautas de actuación para llevarlo a cabo.

La acción proporcional multiplica el error por una constante,  $K_p$ . Lo cual hace llegar al sistema físico un valor mayor o menor que el error real dependiendo de si  $K_p$  es mayor o menor que 1 respectivamente. Esto afecta directamente a la velocidad de la respuesta de la planta de forma proporcional, a medida que se aumenta  $K_p$  la planta es más rápida.

En un controlador, si solo variamos el valor de  $K_p$ , se obtendra un tiempo de subida,  $T_r$ , más corto, una sobreoscilación,  $M_p$  más amplia y un ligero aumento en el tiempo de establecimiento,  $T_s$  aumentando la acción proporcional. No tiene efecto directo sobre el error del sistema pero si no hay acción integradora lo aumentara o lo disminuira por afectar a la ganancia del sistema.

La acción integradora tambien aumenta la velocidad del sistema en forma de inercia. Al principio la integral no tendra mucho efecto por lo que el tiempo de subida disminuira pero ligeramente. La inercia tambien tendra el efecto de aumentar la sobreoscilación y la oscilación, incrementando el tiempo de establecimiento.

Analizando el efecto sobre la respuesta en frecuencia, el aumento de  $K_i$  disminuye el margen de ganancia y el margen de fase. Lo que hace el lazo cerrado más oscilatorio y potencialmente inestable. Por eso, aunque la parte integral elimina el error en el regimen permanente, elevar demasiado  $K_i$  perjudica a la estabilidad del sistema [29].

La acción derivativa trata de igualar la pendiente de la respuesta y la pendiente de la consigna. En cierto modo esto incumple la ley de estabilidad de Liapunov (3.1). Si hay un error negativo la pendiente de la respuesta tiene que ser mayor a la pendiente de la consigna, lo cual da un error en las pendientes positivo que la acción derivativa corregira de forma negativa.

Esto puede verse como que la acción derivativa hace inestable los sistemas, sin embargo en los sistemas oscilatorios sirve para contrarrestar el efecto de  $K_p$  y  $K_i$ . Aumentar el  $K_d$  ofrece por tanto amortiguamiento al sistema que resulta en una reducción en la sobreoscilación y el tiempo de establecimiento.

En lo relativo a la frecuencia, proporciona adelanto de fase lo cual contrarresta el retardo provocado

por la acción integral. En principio aumentar el termino  $K_d$  estaría aumentando la estabilidad al aumentar el margen de fase. Sin embargo, tambien se aumenta la ganancia del sistema pudiendo llegar a incumplir el criterio de estabilidad de Nyquist [29].

En la tabla 3.5 se encuentra un resumen de lo que varia la respuesta si se incrementa una de las tres ganancias de un PID sin variar las otras dos.

Table 3.5: Efectos independientes de P, I y D [29]

	$T_r$	$M_p$	$T_s$
$K_p$	Reducción	Incremento	Pequeño incremento
$K_i$	Pequeña reducción	Incremento	Incremento
$K_d$	Pequeña reducción	Reducción	Reducción

### 3.2.2 Control moderno

Los controladores clásicos funcionan bajo la premisa de que el sistema físico en el que se han implementado es lineal. Aunque la mayoría de sistemas no son lineales se pueden linealizar en torno a un punto de trabajo para procedimientos industriales controlados. Sin embargo para los casos en los que el sistema es altamente no lineal o las condiciones varían en un rango demasiado amplio para linealizarlo, se han diseñado una serie de técnicas de control que intentan evitar este problema.

Entre estas técnicas encontramos el control progresivo, el control robusto, la lógica difusa, el control de estructura variable y todas las tecnologías basadas en IA. En este trabajo se hablara más de las que se han estudiado su uso en la energía eólica.

**Lógica difusa** Los controladores de lógica difusa no trabajan con los modelos matemáticos obtenidos de las ecuaciones diferenciales como los controladores clásicos, en su lugar resuelve el problema a través de heurística y los modelos matemáticos de la lógica difusa. Esto es útil para los sistemas físicos con modelos no lineales o aquellos para los que no se pueden expresar por modelos matemáticos convencionales.

El control difuso se rige por leyes de control parecidas a las que impondría un ser humano. Se asigna una calificación verbal a los diferentes valores que puede tomar una medida y esta calificación verbal va asociada a un subconjunto difuso. La elección de las funciones de pertenencia asociadas a estos subconjuntos es en principio arbitraria. Ajustar estas funciones es parte del proceso de diseño del controlador.



## Capítulo 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.

El modelo de Simulink se compondrá de tres partes. El modelo eléctrico de la red, que se montará usando la librería Simscape Power Systems de Simulink como se explicará más adelante. El lazo de realimentación y control que se compondrá de todas las herramientas matemáticas para manejar los datos leídos de la red y controlarla. Por último, esta la parte de visualización y análisis de los datos con la que se estudiará el modelo y el control que se diseñen.

**Control** Con el control se trata de que el modelo alcance unos valores de potencia activa y reactiva establecidos como consignas,  $P^*$  y  $Q^*$ . Con estas dos consignas se calcula la consigna de potencia aparente,  $S^*$ , como número complejo que sirva de consigna única. Para eso se realimentarán las medidas de tensión e intensidad de las tres fases,  $V_{abc}$  e  $I_{abc}$ .

Con las medidas tomadas de  $V_{abc}$  e  $I_{abc}$  en el lado de alta tensión se calcula la potencia activa y reactiva del circuito en ese punto. Las medidas de tensión e intensidad se pueden tomar tanto en el lado de alta como de media tensión del transformador, la situación del medidor depende del parque en concreto.

Las medidas de potencia activa y reactiva en el lado de alta tensión se utilizan para calcular la potencia aparente en forma de complejo. Esta potencia aparente se resta a la consigna cerrando el lazo de realimentación. Esta diferencia es el error en potencia aparente del sistema que entra en el bloque de control, en el caso del control clásico un PID. A la salida del control se opera la señal de potencia aparente para que vuelva a dar una intensidad que se introduce a las fuentes de intensidad del modelo eléctrico.

**Observación** Para poder analizar el comportamiento del modelo eléctrico Simulink tiene herramientas de observación y seguimiento de las variables. Dentro de la librería básica de Simulink podemos encontrar en el apartado de *Sinks* algunas de estas herramientas. Existe tanto la opción de guardar los valores de la simulación como la visualización de las gráficas.

El bloque *Scope* nos permite visualizar en una gráfica la evolución de una variable en el tiempo. Este bloque permite la entrada de variables reales o complejas y vectores de diferentes dimensiones. Si la variable entrante de un puerto es compleja o de varias dimensiones se dibujaran todos los valores en la misma gráfica, en cambio si se utilizan diferentes puertos, las señales de cada puerto se podran dibujar en diferentes gráficas.

Con el bloque *XY Graph* se dibujara una gráfica de una señal contra otra. El bloque tiene dos entradas, La primera se representara en el eje *X* y la segunda en el eje *Y*.

Usando el bloque *To Workspace* podemos guardar la evolución de una variable a lo largo de una simulación como vector o como estructura con tiempo.

#### 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 esta realizado con elementos de esta librería. La propia librería tiene tambien las herramientas para simular y calcular el modelo ofreciendo diferentes opciones al usuario según que tipo de resultados necesite.

**Simulación** El blóque *Powergui* permite elegir entre tres métodos de resolver el modelo del circuito. Estos son continua, discreto y fasorial. Además este bloque te permite establecer ciertos parámetros globales para la simulación como el tiempo de muestreo o la frecuencia.

La simulación por el metodo de continua resuelve el modelo con el tiempo discreto más pequeño que le permitan los recursos del ordenador. Al no tener un tiempo de muestreo fijo los resultados pueden cambiar de una simulación a otra. Con este método de resolución se puede observar el valor instantaneo de las medidas. Además tambien calcula los transitorios de elementos como bobinas o condensadores que tienen una inercia.

El modo discreto fija un tiempo de muestre que el usuario elige. Las propiedades son las mismas que en el modo continuo pero los resultados son siempre los mismos independientemente de lo que se tarde en hacer los cálculos. Ambos métodos se utilizan para simulaciones de periodos de tiempo cortos en las que es necesario analizar la forma de onda o en aquellos modelos que sea necesario estudiar sus etapas transitorias.

El método fasorial calcula todos los valores de tensión e intensidad como vectores, ya sean fasores o complejos. Este modo se usa para simulaciones de larga duración, por eso ignora los estados transitorios y solo se miden los valores del estacionario. En este modo de simulación es necesario especificar la frecuencia a la que trabaja el circuito. Es el que se utiliza principalmente en este trabajo por tratarse de un control terciario.

**Fuentes eléctricas** En los modelos eléctricos hay dos formas de diferenciar las fuentes electricas, por la magnitud que establecen en fuentes de tensión e intensidad, o por la variabilidad de su valor en fijas o variables. La libreria de Simscape cuenta con fuentes de tensión de alterna fijas y variables, además de fuentes de tensión diseñadas específicamente para circuitos trifásicos, por otro lado tambien hay fuentes de intensidad de alterna variables y fijas.

En este trabajo las fuentes de tensión se utilizan para representar a la red. Al tratarse de un circuito trifásico me centrare en el análisis de los bloques diseñados para este tipo de circuitos. Ambas fuentes de tensión estan configuradas en estrella como se puede ver en la figura 4.1. La fuente de

tensión fija se puede configurar para que tenga conexión a neutro, para que este conectada a tierra o para que no haya conexión a este punto mientras que la variable siempre incluye una conexión a neutro.

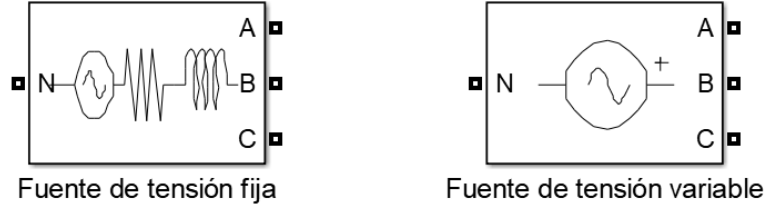


Figure 4.1: Fuentes de tensión de trifásica en Simulink.

Además la fuente de tensión fija incluye una impedancia de caracter inductivo con la que se puede emular la red, en la variable hay que añadir esta impedancia a continuación para obtener el mismo circuito equivalente. La fuente fija se puede usar para simular una red estable mientras que la variable modela las inestabilidades posibles en la red. Las variaciones en la tensión de salida pueden ser de amplitud, fase o frecuencia. La variación se puede modelar además como un escalón, una rampa, una senoide o una tabla de amplitudes en función del tiempo.

Las fuentes de intensidad variables imponen una intensidad en una rama en función de una entrada. Como solo hay fuentes de intensidad monofásicas se deben utilizar tres para modelar una fuente de intensidad trifásica equilibrada. Si la simulación es continua o discreta se debe introducir un número real que da el valor instantáneo, normalmente la señal de entrada tiene forma sinusoidal para las corrientes alternas, si se hacen una simulación fasorial se debe introducir un número complejo que establece el fasor de intensidad de la rama.

**Medidores** Los medidores transforman los valores físicos de los circuitos modelados en señales de Simulink compatibles con los bloques de fuera del modelo. Dependiendo del tipo de simulación los medidores devolverán diferentes señales, en modo continuo o discreto el valor de los medidores es siempre el instantáneo de la magnitud, mientras que en la simulación fasorial los medidores pueden devolver el valor del complejo o del argumento y el ángulo.

Conectados al circuito se pueden utilizar voltímetros, amperímetros y medidores de impedancia. Para circuitos trifásicos existe un medidor de las tres fases para intensidad y tensión. Este bloque devuelve la tensión y la intensidad de las tres fases en forma de complejo, real-imaginario, módulo o módulo y argumento. Además permite leer la tensión como tensión de fase o de línea, la intensidad siempre es de línea.

Sin conectar al circuito hay bloques para obtener la potencia activa, en vatios, y reactiva, en voltiamperios reactivos, con la entrada de la tensión e intensidad de un punto del circuito. En el bloque de trifásica deben entrar los valores de pico de cada magnitud en forma de complejos de las tres fases.

**Líneas de transmisión** 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  $\pi$  [30]. En este trabajo voy a centrarme en el modelo  $\pi$  que es el que usare en el modelo de Simulink.

El circuito equivalente en  $\pi$  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 4.2.

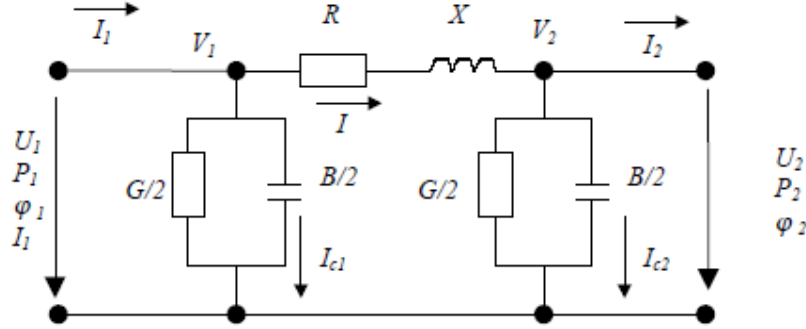


Figure 4.2: Circuito equivalente de circuito  $\pi$  [30].

En el modelo de Simulink para definir la línea con el circuito equivalente  $\pi$  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 4.3.

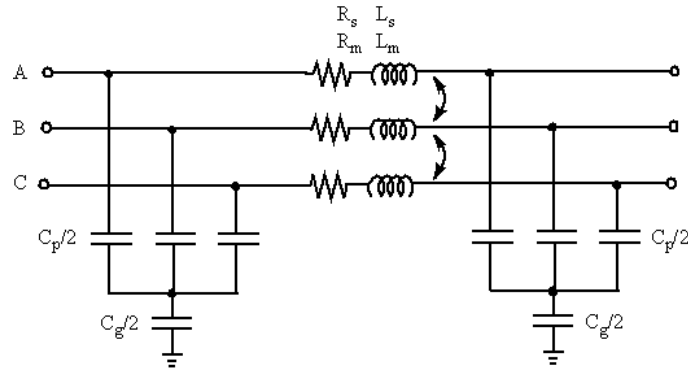


Figure 4.3: Circuito equivalente de circuito  $\pi$  utilizado por Simulink.

En una representación simplificada de una línea se puede utilizar simplemente una impedancia de caracter inductivo en la línea. Esto elimina los efectos capacitivos que existen en una línea y por tanto las derivacones de corriente a tierra.

**Transformador** En la librería de *Simscape* existen varios bloques de transformadores trifásicos, en esta sección se describirá el bloque del transformador de dos devanados. Este bloque implementa un transformador trifásico usando tres transformadores monofásicos.

La conexión de los devanados se puede establecer como estrella, estrella con el neutro accesible, estrella con conexión a tierra, triángulo con  $30^\circ$  de retraso frente a la estrella y triángulo con  $30^\circ$  de adelanto, tanto en el primario como en el secundario. En este trabajo los transformadores usados tienen ambos lados conectados con la topología de estrella sin conexión a neutro para evitar el desfase y para eliminar las corrientes que fuguen al neutro.



Entre los parámetros configurables de los transformadores estan la potencia y frecuencia nominales, estos valores no tienen impacto en la simulación cuando se establece que las unidades son del sistema internacional, pero se utilizan para calcular el resto de parametros cuando se usa *pu*, *por unidad*. Tambien se puede configurar la tensión de linea, la resistencia interna, y la inductancia del primario y el secundario.

#### 4.1.2 Tratamiento de señal por buses

Simulink trabaja usando señales para comunicar los bloques. El tratamiento de estas señales es importante por ser precisamente estas a las que se las hara el seguimiento en las simulaciones. Para el tratamiento de multiples señales existe la herramienta de los buses. Los buses son estructuras formadas por varias señales o incluso otros buses.

Para gestionar los buses simulink tiene la herramienta de *Bus Editor*. Aqui se pueden visualizar y editar los buses que hay declarados en el workspace además de crear nuevos buses.



## Capítulo 5

# Modelado y simulación del control

Para analizar el comportamiento del parque eólico y el controlador se modelara y analizara en Simulink los casos de estudio propuestos. En los casos de estudio propuestos se analizará el comportamiento de la planta para diferentes referencias de potencia activa y variaciones en el carácter reactivo de la red de conexión. En este capítulo se presentara el método usado para desarrollar el modelo del circuito eléctrico, el diseño del algoritmo de control y los diferentes casos que se han estudiado.

### 5.1 Modelado del parque y la conexión a red en Simulink

Para realizar un modelo eléctrico del sistema de conexión se debe definir cuales son las diferentes partes del circuito. En el caso del circuito de conexión a red de un parque eólico podemos diferenciar tres partes. El conjunto de generadores, las líneas de transmisión y la red.

**Generadores** Los aerogeneradores son representados como una fuente de intensidad trifásica. Para que sea simulable se debe añadir una resistencia en paralelo a las fuentes de intensidad porque no se pueden colocar fuentes de intensidad en serie. Esta resistencia es de un valor muy alto para que no fluya intensidad por esa rama en la práctica. El modelo más simple sería el de la figura 5.1.

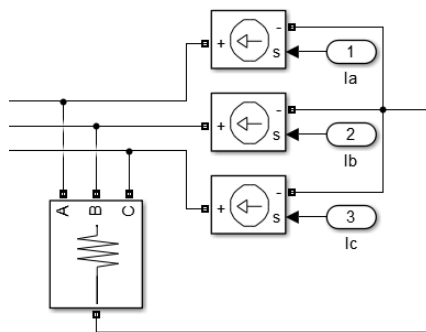


Figure 5.1: Modelo simplificado de generador.

Este modelo se puede usar para representar la totalidad del parque. En el primer modelo estudiado todo el parque es representado como un solo generador para simplificar el algoritmo de control

utilizado. En este caso se está tratando la potencia generada por los aerogeneradores como una sola como se vería en el bus principal de alimentación una vez que se han unido todas las ramas de cada generador.

Además se eliminan detalles como el carácter inductivo del motor trifásico de cada aerogenerador o el transformador que conecta el bus de alimentación del parque con cada unidad. Cuando se hace una representación individual de cada aerogenerador se pueden ir incluyendo estos elementos según hasta donde se modele el circuito. Como se puede ver en la figura ?? se pueden diferenciar tres partes en el circuito de conexión de un aerogenerador.

Como este trabajo está centrado en el control a nivel alto de la planta el convertidor y la máquina eléctrica no van a ser representados en los modelos.

**Líneas de transmisión** Según se vio en las topologías de conexión de un parque eólico la disposición de las líneas de conexión dentro del parque puede variar en función de la topología escogida. Pero en general se puede dividir en tres grupos las líneas que hay en el modelo del circuito. La línea que conecta con la red, la línea del bus principal del parque y las ramas que unen la alimentación principal con los aerogeneradores.

En el modelo en el que se trata el parque como una sola unidad este último tipo no aparece en la simulación.

En los parámetros de las líneas es donde se establece si la planta tiene más o menos elemento inductivo, o incluso si llega a ser de carácter capacitivo.

**Red** La red está representada como una fuente de tensión y una impedancia de carácter inductivo. Se ha utilizado el bloque de fuente de tensión variable para representar las inestabilidades en la red. Es la parte más simple del modelo eléctrico en cuanto a número de elementos, solo se necesitan dos bloques para representarla como se ve en la figura 5.2.

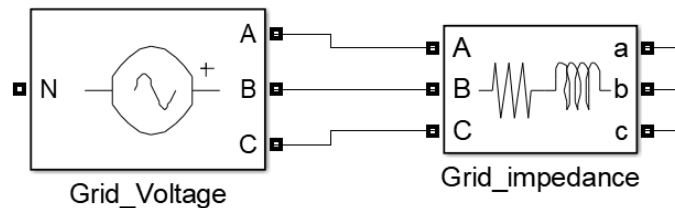


Figure 5.2: Modelo de la Red.

Es la red la que determina la consigna del control de reactiva, porque esta depende de la tensión de red como se vio en la sección de los códigos de red.

## 5.2 Diseño del control de la conexión a red

En el diseño de un controlador hay tres elementos importantes. La consigna, la realimentación y el propio controlador. Estos elementos se deben diseñar para las dos señales que se están controlando, potencia activa y reactiva.

**consigna** La consigna de potencia,  $P_{SP}$ , fija es una constante que no varía durante la prueba pero que se variara para los diferentes casos de estudio. Por otro lado la consigna de reactiva,  $Q_{SP}$ , viene dada por el código de red.

El código de red establece unos márgenes dentro de los cuales debe trabajar la planta, pero para obtener una consigna en concreto se establece la consigna de la planta como el punto medio entre el límite superior y el inferior. Siendo los límites superior e inferior dos rectas de igual pendiente, el punto medio entre los dos pertenecerá a otra recta de la misma pendiente y un origen de coordenadas media de ambas rectas.

La recta que establece  $Q_{SP}$  descrita en (5.1) devuelve el porcentaje de reactiva necesaria respecto a la potencia activa. Para este cálculo la tensión introducida, que será la tensión medida en el PCC, debe estar en valor eficaz y medida en  $kV$ .

$$Q_{SP}(\%P) = -0.75V + 300 \quad (5.1)$$

Para el cálculo de esta operación en el modelo de Simulink se usan la media de las tensiones de las tres fases medidas en el medidor de red y la potencia calculada con ello. Como se puede ver en la figura 5.3 la potencia medida en la red es cambiada de signo por que el medidor devuelve la potencia consumida por la red, por lo que hay que cambiarle el signo para obtener la potencia generada por la planta.

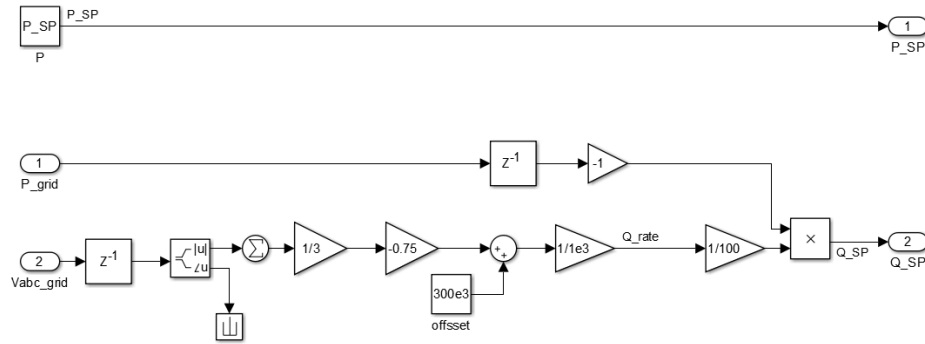


Figure 5.3: Generación de la consigna.

En el caso de que la planta no está aplicando la compensación de reactiva la consigna de esta misma será 0. La consigna también se establece como cero cuando se quiere que la planta aporte la reactiva natural provocada por su propio carácter.

**realimentación** Para la realimentación del controlador se mide en dos puntos del circuito diferentes, el PCC y la salida de intensidad del parque. La salida de estos medidores son la tensión de las tres fases y la intensidad de las tres líneas en valor de pico y expresado en complejo.

Se necesita convertir ambos valores de pico a valores eficaces, a parte se convierte el valor de tensión de fase a línea para tener ambos valores como línea. Para esto se utiliza un bloque como el que se ve en la figura 5.4, en el que se divide ambas señales entre raíz de dos y se multiplica la tensión por raíz de tres.

Aunque la tensión e intensidad obtenidos en los medidores se convierten a valor eficaz para la realimentación y su análisis, se necesita utilizar el valor de pico para calcular la potencia activa y reactiva. Estos son los otros dos elementos que se realimentan en el controlador.

En la realimentación de las potencias y las consignas asociadas tiene que pasar por un bloque de control de signo antes de entrar al controlador. Este bloque cambia el signo de tanto las consignas

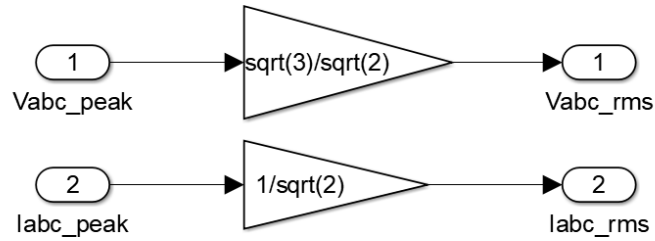


Figure 5.4: Conversión de valores obtenidos por los medidores.

como los realimentaciones en función del signo de la reactiva de la planta. Esta reactiva se mide en el instante inicial y se guarda su valor durante toda la simulación.

Esta estructura se puede ver en la figura 5.5. Gracias a este bloque se evitan las realimentaciones postivas cuando la reactiva producida naturalmente por la planta tuviese el mismo signo que la consigna, lo cual haría al sistema inestable.

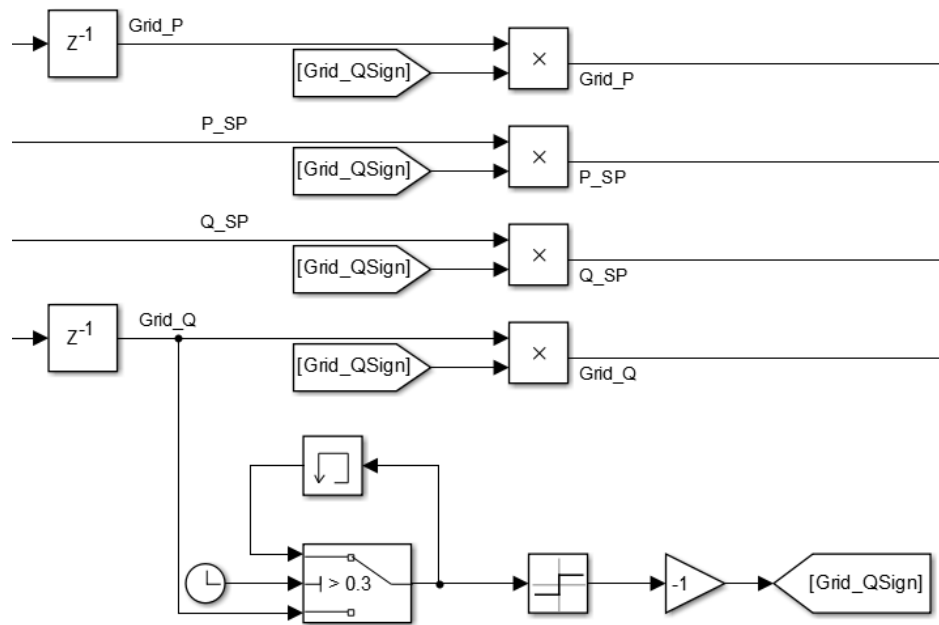


Figure 5.5: Bloque de control del signo.

En el caso de que se este aplicando la compensación indicada en el código de red la realimentación se hace desde el PCC porque la norma especifica que se debe asegurar los valores de reactiva indicados en el punto de conexión. Sin embargo, cuando se evita compensar el caracter reactivo de la planta la realimetnación se hace desde la salida del parque.

**Controlador** El controlador esta integrado en un bloque que se encarga de generar las consignas de intensidad para los generadores de alterna del sistema trifásico. Recibe como entradas las consignas



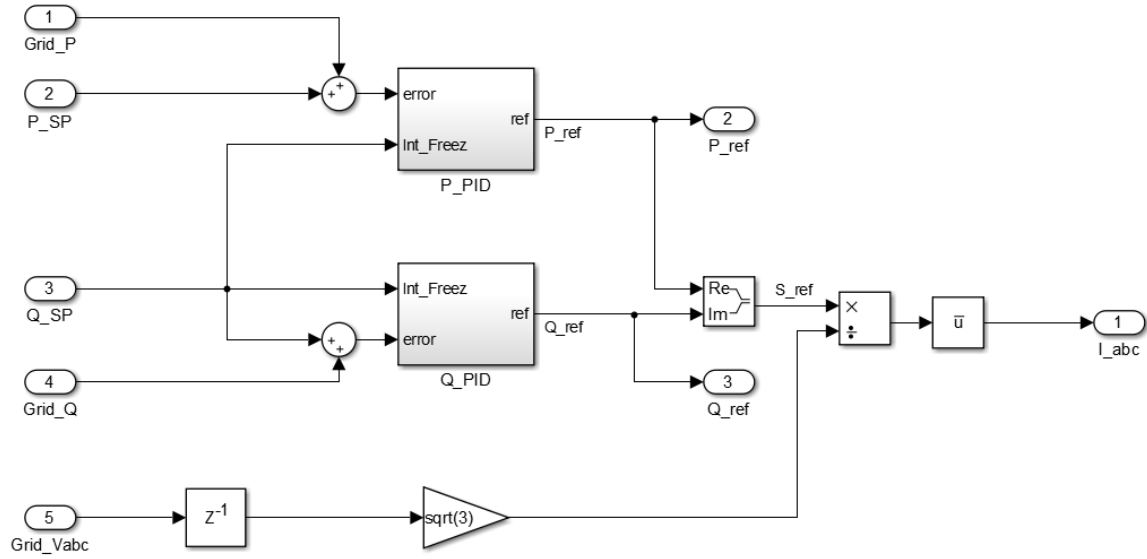


Figure 5.7: Bloque completo del controlador.

**Reactancia de la planta** El caracter inductivo o capacitivo de la planta lo determinan en gran manera las lineas de esta. Los cambios de los parámetros de las inductancias y capacitancias de las lineas es lo que se variara para hacer la planta variar su caracter.

Definiendo los valores de las inductancias y capacitancias de secuencia positiva y secuencia cero de la linea de la planta se puede definir el caracter reactivo de la planta. En el caso de la planta inductiva se dan estos valores:

$$\begin{aligned}
 l1 &= 0.0013 \\
 l0 &= l1 \\
 c1 &= 0.922 * 10^{-9} \\
 c0 &= c1/1000
 \end{aligned}
 \tag{5.3}$$

Los valores en el caso capacitivo son:

$$\begin{aligned}
 l1 &= 0.0013 * 10^7 \\
 l0 &= l1 \\
 c1 &= 0.922 * 10^{-5} \\
 c0 &= c1/1000
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

Cuando la planta esta conectada a la red pero no genera intensidad consume cierta reactiva. En el caso inductivo son  $48.4kVAR$  y en el caso capacitivo son  $-3.06MVAR$ . Por lo que la planta capacitiva tiene una componente reactiva más importante que la planta inductiva.



## Capítulo 6

# Análisis de resultados



## Capítulo 7

# Conclusiones y estudios futuros



# Referencias

- [1] Red Eléctrica, *Resolución-P.O.7.4 - Servicio complementario de control de tensión de la red de transporte*, Marzo 2000.
- [2] J. Á. Álvarez Echarri, “Estudio de diferentes topologías de generación eólica,” 2011.
- [3] A. C. García, “Simulación del funcionamiento de una turbina eólica con generador de inducción doblemente alimentado,” 2015.
- [4] TheSwitch, “Pmg vs dfig – the big generator technology debate,” *PennEnergy*, 2014.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] I. M. de Alegría, J. Andreu, J. L. Martín, P. Ibanez, J. L. Villate, and H. Camblong, “Connection requirements for wind farms: A survey on technical requirements and regulation,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, no. 8, pp. 1858–1872, 2007.
- [12] “Grid Code | National Grid UK.” <https://www.nationalgrid.com/uk/electricity/codes/grid-code>. Accessed: 2018-01-10.
- [13] 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.

- [14] Y. G. Rebours, D. S. Kirschen, M. Trotignon, and S. Rossignol, "A survey of frequency and voltage control ancillary services—part i: Technical features," *IEEE Transactions on power systems*, vol. 22, no. 1, pp. 350–357, 2007.
- [15] Red Eléctrica, *Resolución-P.O.1.5 - Establecimiento de la reserva para la regulación frecuencia-potencia*, Julio 2006.
- [16] Red Eléctrica, *Resolución-P.O.1.2 - Niveles admisibles carga red*, Julio 1998.
- [17] G. Tapia, A. Tapia, and J. X. Ostolaza, "Proportional–integral regulator-based approach to wind farm reactive power management for secondary voltage control," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 488–498, 2007.
- [18] P. Ledesma, "Regulación de frecuencia y potencia," *Universidad Carlos III de Madrid*, vol. 21, pp. 4–6, 2008.
- [19] IEEC, "Centrales eléctricas. el alternador," *Universidad Nacional de Educación a Distancia*, 2011.
- [20] P. Sørensen, A. D. Hansen, K. Thomsen, T. Buhl, P. E. Morthorst, L. H. Nielsen, F. Iov, F. Blaabjerg, H. A. Nielsen, H. Madsen, *et al.*, "Operation and control of large wind turbines and wind farms-final report," *Risø National Laboratory, DK-4000 Roskilde, Denmark, Risø*, 2005.
- [21] J. Fortmann, M. Wilch, F. W. Koch, and I. Erlich, "A novel centralised wind farm controller utilising voltage control capability of wind turbines," *16th PSCC, Glasgow, Scotland*, 2008.
- [22] J. R. Kristoffersen, "The horns rev wind farm and the operational experience with the wind farm main controller," *Revue E-Société Royale Belge des électriciens*, vol. 122, no. 2, p. 26, 2006.
- [23] K. H. Ang, G. Chong, and Y. Li, "Pid control system analysis, design, and technology," *IEEE transactions on control systems technology*, vol. 13, no. 4, pp. 559–576, 2005.
- [24] J. D. Grunnet, M. Soltani, T. Knudsen, M. Kragelund, and T. Bak, "Aeolus toolbox for dynamics wind farm model, simulation and control," in *European Wind Energy Conference and Exhibition, The European Academy of Wind Energy, EWEC*, pp. 3119–3129, 2010.
- [25] J. B. Ekanayake, L. Holdsworth, X. Wu, and N. Jenkins, "Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines," *IEEE transactions on power systems*, vol. 18, no. 2, pp. 803–809, 2003.
- [26] Y. Xu, J. M. Hollerbach, and D. Ma, "A nonlinear pd controller for force and contact transient control," *IEEE Control Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 15–21, 1995.
- [27] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers," *trans. ASME*, vol. 64, no. 11, 1942.
- [28] K. J. Åström and T. Hägglund, *PID controllers: theory, design, and tuning*, vol. 2. Instrument society of America Research Triangle Park, NC, 1995.
- [29] Y. Li, K. H. Ang, and G. C. Chong, "Pid control system analysis and design," *IEEE Control Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 32–41, 2006.
- [30] R. M. M. Rosas, *Cálculo de líneas y redes eléctricas*, vol. 75. Univ. Politèc. de Catalunya, 2002.