



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
(ICAI)

GRADO EN INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
(ITINERARIO ELECTRÓNICO)

**Estudio de la estrategia de control df/dt para
convertidores conectados a la red eléctrica**

Autor: Lucas Ayuso Cortina

Director: Javier Roldán Pérez

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

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

El autor D. LUCAS AYUSO CORTINA DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra:

ESTUDIO DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL DF/DT PARA CONVERTIDORES CONECTADOS A LA RED ELÉCTRICA, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

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

3º. Condiciones de la cesión y acceso

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

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

4º. Derechos del autor.

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

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

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

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

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

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

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

- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 30 de agosto de 2018

ACEPTA

Fdo.....

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

--

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
ESTUDIO DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL DF/DT PARA CONVERTIDORES
CONECTADOS A LA RED ELÉCTRICA

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 4º es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni
total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Lucas Ayuso Cortina

Fecha: 30 / 08 / 2018



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Javier Roldán Pérez

Fecha: 30 / 08 / 2018



RESUMEN

Hoy en día las fuentes de generación renovables se conectan a la red a través de convertidores de electrónica de potencia, a diferencia de las fuentes de generación tradicionales que consisten en máquinas síncronas conectadas directamente a la red. Debido al aumento de la generación de energías renovables se ha incrementado el número de convertidores conectados a la red. Esto ha obligado a desarrollar estrategias de control para seguir referencias de corriente y también para dar apoyo a la red manteniendo unos valores de tensión y de frecuencia adecuados cuando se conectan cargas a dicha red. El control más habitual para dar apoyo a la red es el control droop, que inyecta valores de potencia activa y reactiva de forma proporcional a la variación de la frecuencia y tensión de red, respectivamente.

En este TFG se abordan dos estrategias de control para dar apoyo de frecuencia a la red, el control droop y el control df/dt . Para ello se diseña en primer lugar un control de corriente, y un modelo de red que sirva para tener en cuenta las imperfecciones de la red. También se diseña un sistema de bloqueo de fase que sirve para poder realimentar las variables medidas en la red al control. Los desarrollos teóricos se verifican utilizando Matlab y Simulink. Finalmente se analizan los resultados obtenidos y se elaboran unas conclusiones.

Palabras clave: Transformada de Park, control PI, frecuencia, desacoplo de ecuaciones, control droop.

ABSTRACT

Nowadays, renewable energy sources are connected to the grid through power electronics converters, unlike traditional generation sources that consist of synchronous machines directly connected to the grid. Due to the increase in the generation of renewable energies the number of converters connected to the grid has increased. Therefore control strategies have been developed to follow current references and also to support the grid maintaining voltage and frequency values suitable when loads are connected to the grid. The most common control to support the grid is the droop, which injects values of active and reactive power proportionally to the variation of the frequency and voltage of the grid, respectively.

In this TFG two control strategies are approached to give frequency support to the grid, the droop control and the df/dt control. For this, a current control is designed, and a grid model is used to take into account the imperfections of the grid. A phase locked loop is also designed to feed back the variables measured in the grid to the control. The theoretical developments are verified using Matlab and Simulink. Finally, the results obtained are analyzed and conclusion are drawn.

Keywords: Park's transform, PI controller, frequency, decoupling equations, droop control.

Índice de la memoria

Parte I Memoria.....	2
Capítulo 1 Introducción.....	3
1.1 Motivación.....	3
1.2 Objetivos	4
1.3 Metodología de trabajo	4
1.4 Recursos a emplear	5
Capítulo 2 Estado del arte.....	7
2.1 Importancia del control en los convertidores	7
2.2 Técnicas de control de droop.....	8
2.3 Impedancia de salida.....	9
2.4 Emulación de máquinas síncronas.....	9
Capítulo 3 Modelado y control de un convertidor CC-CA	11
3.1 Organización del control	11
3.2 Modelado usando la transformada de park.....	12
3.3 Control principal de corriente	17
3.4 Cálculo de referencias de corriente	21
3.5 Sistema de bloqueo de fase (PLL).....	22
Capítulo 4 Controles de tensión y frecuencia	25
4.1 Modelo de la red	25
4.1.1 Modelo inercial de la red.....	27
4.1.2 Control de tensión de la red	29
4.2 Impedancia de salida.....	30
4.3 Droop de P-Q	32

4.4	Control df/dt	34
Capítulo 5 Resultados		37
5.1	Diseño y pruebas del control de corriente.....	37
5.1.1	Parámetros de diseño y prueba del control principal PI.....	38
5.1.2	Parámetros de diseño y prueba del PLL.....	40
5.2	Diseño y pruebas del control de droop	40
5.2.1	Parámetros de diseño y prueba del control de droop de frecuencia.....	41
5.2.2	Parámetros de diseño y prueba del control de droop de tensión	42
5.3	Diseño y pruebas del control df/dt	43
5.4	Comparación del control de droop frente al control df/dt	44
Capítulo 6 Conclusiones		47
6.1	Estado del arte	47
6.2	Control principal de corriente	47
6.2.1	Control PI.....	47
6.2.2	PLL.....	48
6.3	Control de droop y df/dt	48
Bibliografía		49

Índice de figuras

Figura 2.1 Porcentaje de producción de energías renovables de los países de la UE y meta para 2020 [3].	8
Figura 3.1 Diagrama eléctrico y del control de un VSC conectado a la red mediante un filtro LCL.	12
Figura 3.2 Esquema eléctrico monofásico de un VSC conectado a la red mediante un filtro LCL.	13
Figura 3.3 Diagrama de bode de P_s	17
Figura 3.4 Aproximación de bajas frecuencias del esquema eléctrico monofásico de un VSC conectado a la red mediante un filtro LCL.	18
Figura 3.5 Diagrama de bloques del control de corriente con pre-alimentación y desacoplo entre ejes.	19
Figura 3.6 Diagrama eléctrico y del control de un VSC conectado a la red mediante un filtro LCL con bloque de generación de corriente de referencia.	22
Figura 3.7 Sistema de referencia en el lado de la red y en el lado del convertidor.	23
Figura 3.8 Control PI del PLL.	24
Figura 4.1 Diagrama eléctrico del modelo de la red.	26
Figura 4.2 Diagrama eléctrico del modelo de la red.	28
Figura 4.3 Diagrama de bloques del control de tensión de la red.	29
Figura 4.4 Funciones del droop de P-Q.	33
Figura 4.5 Configuración del control de droop de frecuencia.	34
Figura 4.6 Configuración del control de droop de tensión.	34
Figura 4.7 Configuración del control df/dt	35
Figura 5.1 Respuesta del control principal de corriente para una entrada de escalón unitario.	39
Figura 5.2 Respuesta de la intensidad trifásica del control principal de corriente a un escalón unitario en referencia.	39

Figura 5.3 Respuesta del PLL ante cambios en la frecuencia de la red.	40
Figura 5.4 Respuesta del control de droop para una variación en la potencia de carga de 10 kW.	42
Figura 5.5 Respuesta del control de droop de tensión para una variación en la potencia de carga de 10 Kvar.....	43
Figura 5.6 Respuesta del control df/dt para una variación de potencia de carga de 10 kW.....	44
Figura 5.7 Comparativa de la potencia aportada por el convertidores usando control de droop y control df/dt	45
Figura 5.8 Comparativa de la dinámica de la frecuencia para el control de droop y el control df/dt	45
Figura 5.9 Comparativa del diagrama de Black del control del droop y el control df/dt	46

Índice de tablas

Tabla 5.1 Parámetros del filtro LCL.	37
Tabla 5.2 Parámetros del modelo de la red.	38
Tabla 5.3 Parámetros del control PI del control principal de corriente.....	38
Tabla 5.4 Parámetros del PLL.....	40
Tabla 5.5 Parámetros del control PD del df/dt	43

Parte I MEMORIA

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Las fuentes de generación de energía renovable se conectan a la red eléctrica mediante convertidores electrónicos CC-CA. Este tipo de convertidores reciben el nombre de “Convertidores Fuente de Tensión” (en inglés “Voltage Source Converters” o VSCs). Los VSCs suelen incluir reguladores de corriente y tensión con el fin de limitar la corriente y potencia de salida del convertidor. Sin embargo, este tipo de controladores no dan apoyo a la red eléctrica, lo que supone un inconveniente.

En la actualidad, la generación de energía proveniente de fuentes renovables está incrementando considerablemente. Esto ha elevado el número de convertidores CC-CA trifásicos conectados a la red. Por ésta razón, es cada vez más importante que los convertidores lleven implementados controles que apoyen a la red eléctrica, como el control droop o el control df/dt [1]. En este trabajo se estudiarán y aplicarán controladores basados en la estrategia df/dt para dar soporte a la red eléctrica. Además, esta estrategia se comparará con el control droop, que es el que típicamente se aplica en convertidores electrónicos.

1.1 MOTIVACIÓN

La motivación de este trabajo se resume en los siguientes puntos:

- Las redes eléctricas tienen cada vez más fuentes de generación distribuida conectadas, muchas de ellas basadas en convertidores de electrónica de potencia.
- Estas fuentes de generación, en su formato más básico, no aportan soporte de frecuencia y tensión a la red.
- Un convertidor CC-CA con un control de corriente actúa como una fuente controlada de corriente (o potencia), pero no “ayuda” a la red si no dispone de un control tipo droop o df/dt .

-
- Cuando los convertidores operan en modo aislado (isla), es necesario un control tipo droop que distribuya la carga entre los convertidores.
 - Las técnicas de control df/dt apoyan a la red inyectando una corriente proporcional a la derivada temporal de la frecuencia de la red, lo cual puede mejorar la respuesta dinámica de la red. Esto se estudiará en detalle en este TFG.

1.2 OBJETIVOS

En este trabajo se diseñarán controles de convertidores que sirvan para dar apoyo a la red eléctrica. Éstos controles se utilizan para mejorar el margen de regulación de la tensión y la frecuencia. Para ello, en primer lugar, se realizará un modelado de la red. Este modelo incluirá tanto la parte eléctrica (inductiva y resistiva), como un modelo inercial, y un control de tensión. Este modelo se utilizará para probar las mejoras del control df/dt sobre el control droop. Los objetivos de este proyecto son los siguientes:

- Comparar la técnica de control de droop clásica con la técnica de control df/dt .
- Estudiar e implementar en simulación un control df/dt para mantener unos valores de tensión y de frecuencia deseados en la red.
- Diseñar un control robusto ante cambios instantáneos de demanda de potencia activa o reactiva, así como frente a cambios en los parámetros de la red.
- Modelar la red para incluir los efectos tales como la inductancia de los transformadores, las impedancias de las líneas, la inercia de la red y la regulación de tensión.

1.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para comenzar el trabajo se realizará un breve estudio sobre las herramientas matemáticas necesarias para modelar sistemas basados en convertidores de electrónica de potencia, así como diseñar controladores. Entre estas herramientas se encuentran la transformada de Laplace, la transformada de Clark y la transformada de Park. Se utilizará Matlab y Simulink para simular los desarrollos teóricos, modelar los sistemas de manera matemática y simular las respuestas obtenidas para cada control.

Se modelará el sistema eléctrico por partes. Se comenzará por los bloques más básicos. Posteriormente, se comprobará que cada bloque funciona introduciendo las entradas que se consideren razonables y obteniendo las respuestas que se hayan estimado previamente. Cuando éstos bloques funcionen correctamente de manera independiente, estos se añadirán al sistema eléctrico general para formar un sistema eléctrico más complejo. Esta forma de trabajo ayudará a detectar errores de manera prematura ya que se depuran los bloques de control uno por uno.

1.4 RECURSOS A EMPLEAR

Los recursos empleados para la realización de este trabajo son:

- **Matlab:** Se utilizará Matlab para realizar el análisis teórico de los distintos sistemas de control. Por ejemplo, se estudiará la dinámica de los reguladores utilizando herramientas de respuesta en frecuencia como los diagramas de Bode o Nyquist.
- **Simulink:** Se utilizará Simulink para simular la red eléctrica. Se podrá comprobar también que las distintas partes que conforman el sistema funcionan correctamente antes de incluirlas en el conjunto global.
- **Bibliografía:** Se hará uso de referencias bibliográficas y artículos del IEEE accesibles desde la biblioteca de ICAI.

Capítulo 2

ESTADO DEL ARTE

2.1 IMPORTANCIA DEL CONTROL EN LOS CONVERTIDORES

La capacidad instalada de energías renovables en sistemas eléctricos ha aumentado drásticamente en los últimos años. A diferencia de las fuentes de generación convencionales, que se conectan directamente a la red a través de generadores síncronos, la mayoría de las fuentes de generación renovables lo hacen a través de convertidores electrónicos. Debido a que cada vez son más los dispositivos conectados a la red por medio de estos convertidores, resulta muy importante la implementación de controles que garanticen una operación adecuada del sistema eléctrico. En este trabajo se verá que ante cambios en la frecuencia y tensión de la red, el convertidor inyectará potencia activa o reactiva que ayude a regular la tensión y frecuencia de la red.

Un buen ejemplo del incremento de penetración de energías renovable en la red es el de la Unión Europea, que ha fijado el objetivo de que en 2020 el 20 % de la generación de energía del conjunto de países miembros provenga de fuentes renovables. En España la cifra fue del 17,3 % en 2016, lo que supuso un 1,1 % más que en 2015. En países como Islandia y Noruega las fuentes de generación renovable acaparan el 72,6 % y el 69,4 % de la producción energética total, respectivamente [2]. En la **Figura 2.1** se muestra el porcentaje de producción de energía renovable de los países de la Unión Europea y el objetivo marcado para el año 2020 por cada país miembro.

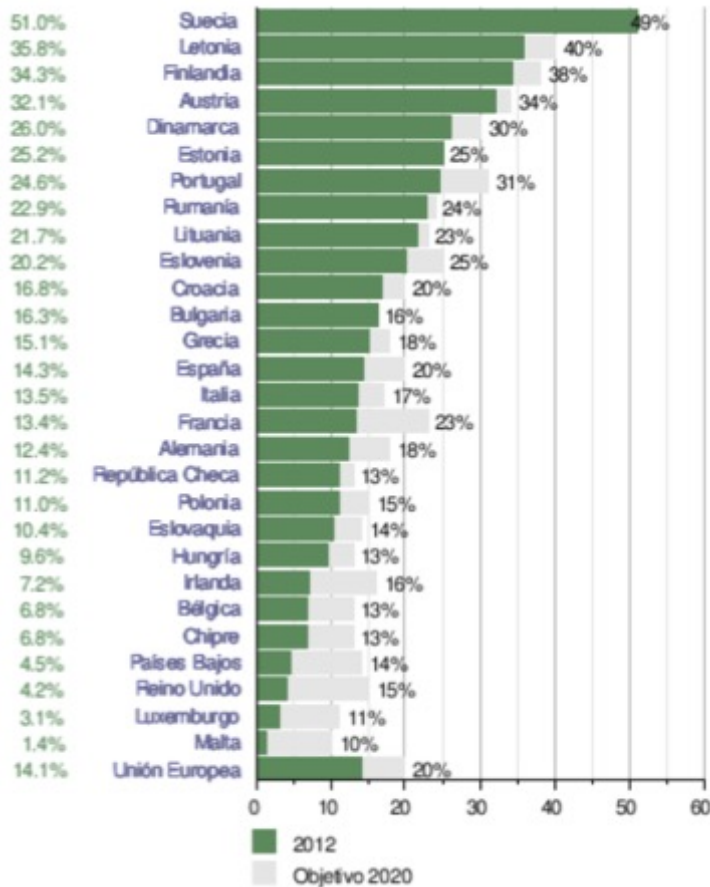


Figura 2.1 Porcentaje de producción de energías renovables de los países de la UE y meta para 2020 [3].

2.2 TÉCNICAS DE CONTROL DE DROOP

Actualmente, cuando se conectan cargas a la red eléctrica, la potencia instantánea que demandan se extrae de manera transitoria de la inercia de las máquinas eléctricas rotativas que generan la tensión de la red. Por tanto, su velocidad de giro disminuye, y el nivel de tensión de salida también.

Hoy en día, los controles aplicados a los convertidores conectados a la red consisten en acciones proporcionales (droop), que hacen variar la potencia activa y reactiva inyectada en función del nivel de tensión y de frecuencia de la red. Teniendo en cuenta las máximas desviaciones de tensión y de frecuencia que puede haber en la red, se pueden incorporar estos controles para permitir que los convertidores trabajen independientes unos de otros, sin estar comunicados entre ellos [4]. La principal razón por la que se elige éste tipo de control es

evitar cualquier tipo de comunicación cableada entre los convertidores conectados a la red en paralelo [5]. Aunque la posibilidad de poder operar sin ningún tipo de comunicación entre los convertidores presenta varias ventajas como por ejemplo una mayor fiabilidad o la posibilidad de poder ubicar los convertidores donde más convenga, también conlleva una serie de inconvenientes [6].

2.3 *IMPEDANCIA DE SALIDA*

La transmisión de potencia desde los convertidores a la red se ve influenciada por el carácter de la impedancia de salida de los convertidores, por ello hay que tener especial cuidado a la hora de diseñar ésta impedancia. Por lo general la impedancia de salida tiene carácter inductivo debido a la componente inductiva de la red y a la alta impedancia inductiva del filtro de salida, pero no siempre resulta ser así ya que la impedancia de salida depende en gran medida de la técnica de control empleada.

Cuando la impedancia de la red tiene carácter inductivo, la demanda de potencia activa afecta a la velocidad de giro de las máquinas (y por tanto a la frecuencia de la red). Si para esta misma impedancia de red hay un cambio de potencia reactiva demandada, la tensión de red disminuye. En el caso de que la impedancia de red tuviese carácter resistivo, la frecuencia de red se vería afectada por la demanda de potencia reactiva y la tensión por la demanda de potencia activa [5].

2.4 *EMULACIÓN DE MÁQUINAS SÍNCRONAS*

Una técnica de control alternativa interesante para la integración de convertidores de electrónica de potencia en redes débiles es la emulación de máquinas síncronas [7]. Éste método de control consiste en emular la dinámica de una máquina síncrona utilizando el sistema de control del convertidor. La emulación de máquinas síncronas es un método de control con mucho potencial pero al mismo tiempo el convertidor tiene que enfrentarse a problemas típicos de máquinas síncronas conectadas a redes eléctricas, como por ejemplo los cambios en los niveles de frecuencia o desequilibrios de tensión [8], o las corrientes de falta [9].

Capítulo 3

MODELADO Y CONTROL DE UN CONVERTIDOR CC-CA

En este capítulo se describe el modelado y el control de un convertidor que funciona como una fuente de corriente conectada a la red eléctrica mediante un filtro LCL. En la sección 3.1 se muestra la organización del control, en la sección 3.2 se explica el modelado del sistema usando la Transformada de Park, y en la sección 3.3 se describe el control principal de corriente. Finalmente en la sección 3.4 se muestra cómo se generan las referencias de corriente dadas unas consignas de potencia activa y reactiva.

3.1 ORGANIZACIÓN DEL CONTROL

En la **Figura 3.1** se muestra el diagrama eléctrico y el control de un VSC conectado a la red mediante un filtro LCL que se va a estudiar en este trabajo.

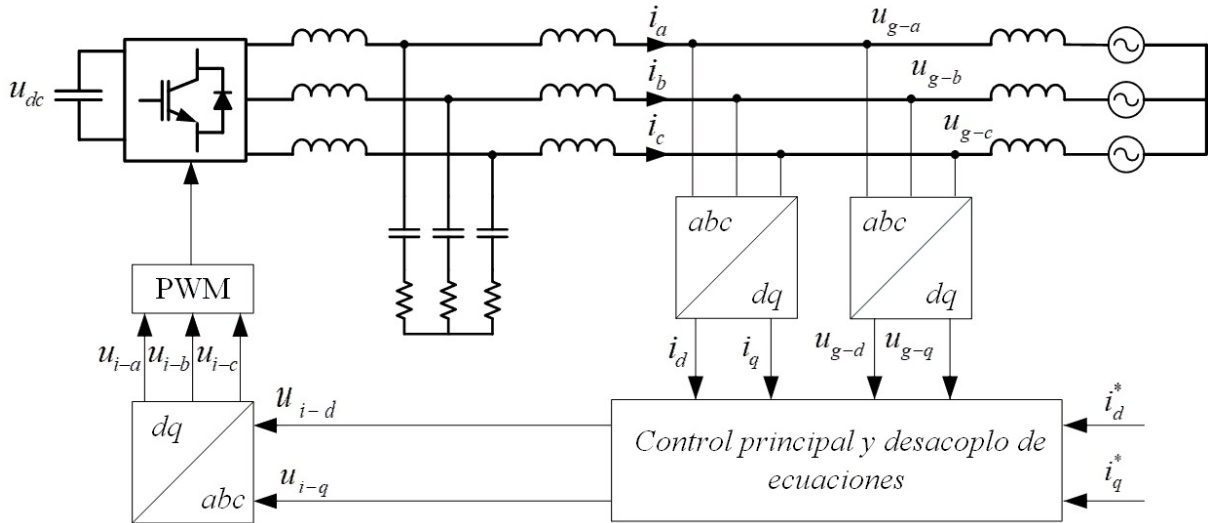


Figura 3.1 Diagrama eléctrico y del control de un VSC conectado a la red mediante un filtro LCL.

A este diagrama se le añadirán diferentes bloques adicionales a lo largo de este capítulo. Estos bloques adicionales realizan funciones específicas, como el cálculo de referencias , etc.

3.2 MODELADO USANDO LA TRANSFORMADA DE PARK

En esta sección se expone una adaptación del control de corriente expuesto en el trabajo de fin de máster (TFM) de Jorge Luis Ñique Padilla [10], y en las notas de control de convertidores facilitadas por el supervisor de este proyecto [11]. En el trabajo actual los conceptos de [10] y [11] se adaptan para trabajar en redes con frecuencia variable. Además, se propone un modelo de red para verificar el funcionamiento cuando la red no es ideal.

Para el modelado de los sistemas trifásicos se suele usar la Transformada de Park, ya que su uso reduce la complejidad de las ecuaciones. En este trabajo sólo se trabajará con las componentes d y q de los vectores espaciales, ya que se ha considerado un sistema eléctrico de tres hilos y, por tanto, la componente homopolar vale cero. En la **Figura 3.2** se muestra un convertidor fuente de tensión, modelado como una fuente ideal de tensión u_i que se conecta a la red a través de un filtro LCL.

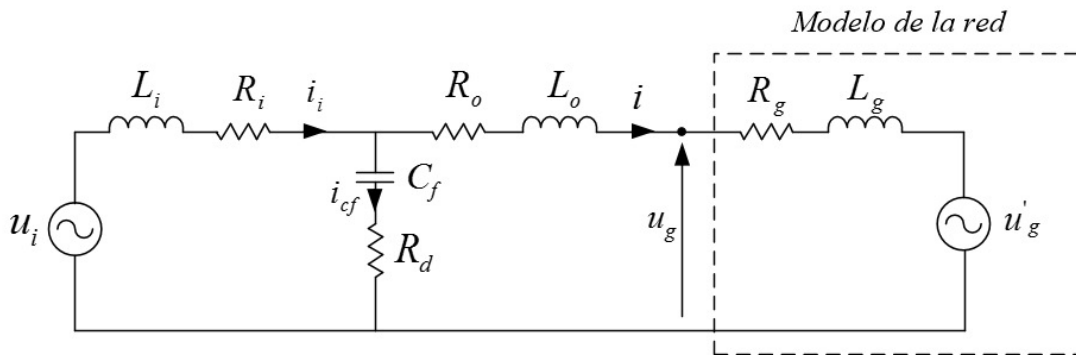


Figura 3.2 Esquema eléctrico monofásico de un VSC conectado a la red mediante un filtro LCL.

La notación utilizada en la **Figura 3.2** y que se utilizará a lo largo de este trabajo es:

u_i : tensión generada por el convertidor.

u_g : tensión en el punto de conexión del convertidor.

u'_g : tensión de la red.

u_{cf} : tensión del condensador.

i_i : corriente en el lado del convertidor.

i_{cf} : corriente del condensador.

i : corriente en el lado de la red.

L_i : inductancia en el lado del convertidor.

R_i : parte resistiva de L_i .

L_o : inductancia en el lado de la red.

R_o : parte resistiva de L_o .

C_f : capacitancia del filtro.

R_d : resistencia de amortiguamiento.

L_g : inductancia de la red.

R_g : parte resistiva de L_g .

Aplicando la ley de Kirchoff al nudo entre R_i y R_o se obtienen la siguiente relación:

$$i_i = i_{cf} + i \quad (3.1)$$

Despejando la i_{cf} de la ecuación (3.1) e introduciéndola en las ecuaciones dinámicas que se obtienen de la **Figura 3.2**, se obtienen las ecuaciones diferenciales que sirven para modelar el sistema (son iguales para cada fase):

$$L_i \frac{di_i}{dt} = u_i - u_{cf} - (R_i + R_d)i_i + R_d i \quad (3.2)$$

$$L_o \frac{di}{dt} = u_{cf} - u_g + R_d i_i - (R_o + R_d)i \quad (3.3)$$

$$C_f \frac{du_{cf}}{dt} = i_i - i \quad (3.4)$$

Aplicando la Transformada de Park sobre este sistema, se pueden obtener las ecuaciones diferenciales en un sistema de referencia $dq0$, aunque el proceso es tedioso. En su lugar, se va a utilizar el concepto de vector espacial para obtener las nuevas ecuaciones. Si se aplica la Transformada de Clark a la ecuación (3.2) se obtiene:

$$L_i \frac{di_{\alpha\beta}}{dt} = u_{i\alpha\beta} - u_{cf\alpha\beta} - (R_i + R_d)i_{i\alpha\beta} + R_d i_{\alpha\beta} \quad (3.5)$$

donde (3.5) está expresada en un sistema de referencia $\alpha\beta$.

Teniendo en cuenta la relación existente entre el sistema de referencia con ejes $\alpha\beta$ y con ejes dq :

$$f_{dq}^{\theta_p} = f_d^{\theta_p} + j f_q^{\theta_p} = f_{\alpha\beta} e^{-j\theta_p} \quad (3.6)$$

donde θ_p es el ángulo de la Transformada de Park que representa el desfase entre los sistemas de referencia $\alpha\beta$ y dq . Si se aplica (3.6) a la ecuación (3.5) se puede pasar de coordenadas $\alpha\beta$ a coordenadas dq resultando:

$$L_i \frac{d(e^{j\theta_p} i_{idq})}{dt} = e^{j\theta_p} u_{idq} - e^{j\theta_p} u_{cf dq} - (R_i + R_d) e^{j\theta_p} i_{idq} + R_d e^{j\theta_p} i_{dq} \quad (3.7)$$

Multiplicando (3.7) por $e^{-j\theta_p}$, y suponiendo que $d\theta_p/dt = \omega$ se tiene que:

$$L_i \frac{di_{dq}}{dt} = -(R_i + R_d) i_{dq} + R_d i_{dq} - j\omega L_i i_{dq} - u_{cf dq} + u_{idq} \quad (3.8)$$

Para terminar, si se escribe la ecuación (3.8) para eje d (parte real) y para el eje q (parte imaginaria), resulta:

$$L_i \frac{di_d}{dt} = -(R_i + R_d) i_d + R_d i_d + \omega L_i i_q - u_{cf d} + u_{id} \quad (3.9)$$

$$L_i \frac{di_q}{dt} = -(R_i + R_d) i_q + R_d i_q - \omega L_i i_d - u_{cf q} + u_{iq} \quad (3.10)$$

Siguiendo la misma filosofía se puede pasar a ejes dq la ecuación (3.3):

$$L_o \frac{di_d}{dt} = R_d i_{id} - (R_o + R_d) i_d + \omega L_o i_q + u_{cf d} - u_{gd} \quad (3.11)$$

$$L_o \frac{di_q}{dt} = R_d i_{iq} - (R_o + R_d) i_q - \omega L_o i_d + u_{cf q} - u_{gq} \quad (3.12)$$

Se puede proceder de la misma forma con la ecuación (3.4) obteniendo:

$$C_f \frac{du_{cf d}}{dt} = i_{id} - i_d + \omega C_f u_{cf q} \quad (3.13)$$

$$C_f \frac{du_{cf q}}{dt} = i_{iq} - i_q - \omega C_f u_{cf d} \quad (3.14)$$

De las ecuaciones (3.9), (3.10), (3.11), (3.12), (3.13), y (3.14) se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. Las ecuaciones transformadas tienen el mismo orden que las ecuaciones originales.
2. Aparece un término de acoplamiento entre los ejes d y q , que tiene que ver con la velocidad de rotación del sistema de referencia usado para la Transformada de Park (ω). Este término es muy relevante a la hora de realizar el control del VSC.

Para diseñar el control de corriente habrá que utilizar ecuaciones de desacoplo para desacoplar la dinámica de los ejes d y q . Por tanto, cada eje se podrá controlar de manera independiente. Para ello, se necesita una función de transferencia de la planta que relacione la entrada (u_i) con la salida (i). Esta función de transferencia recibe el nombre de $P(s)$, y viene dada por:

$$P(s) = \frac{I(s)}{U_i(s)} = \frac{b_1s + b_0}{a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0} \quad (3.15)$$

donde:

$$b_1 = C_f R_d$$

$$b_0 = 1$$

$$a_3 = L_i L_o C_f$$

$$a_2 = [L_i(R_o + R_d) + L_o(R_i + R_d)]C_f$$

$$a_1 = [(L_i + L_o) + C_f(R_i R_o + R_i R_d + R_o R_d)]$$

$$a_0 = (R_i + R_o)$$

Para este trabajo y en lo sucesivo, se considerarán los siguientes valores: $L_i = 2 \text{ mH}$, $L_o = 1 \text{ mH}$, $R_i = 62.8 \text{ m}\Omega$, $R_o = 31.4 \text{ m}\Omega$, $C_f = 9 \text{ }\mu\text{F}$, y $R_d = 2.87 \text{ }\Omega$. Se ha utilizado amortiguamiento pasivo para evitar problemas de estabilidad cuando se realimenta la corriente de salida del convertidor [12].

En la **Figura 3.3** se muestra el diagrama de bode de la fase y la magnitud de $P(s)$ obtenido con los parámetros definidos previamente.

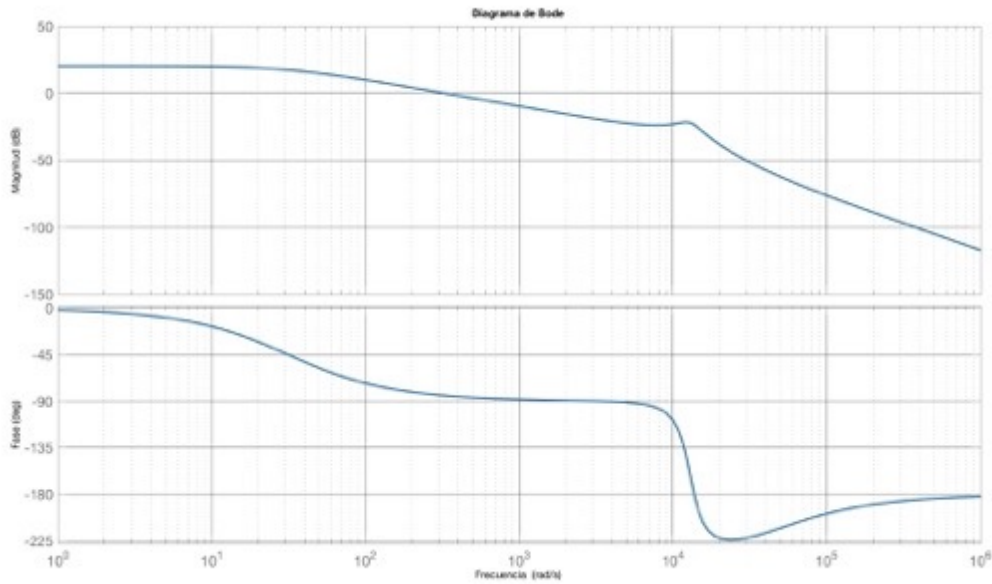


Figura 3.3 Diagrama de bode de $P(s)$.

3.3 CONTROL PRINCIPAL DE CORRIENTE

El cálculo de los parámetros del control puede resultar muy complicado ya que el denominador de $P(s)$ es de tercer orden (tiene tres polos). Para simplificar los cálculos, se utiliza una aproximación del filtro LCL en bajas frecuencias. Si se supone una frecuencia baja, la impedancia del condensador adquiere un valor muy grande, y el circuito equivalente queda como se muestra en la **Figura 3.4**. La impedancia de la resistencia de amortiguamiento en serie con el condensador se desprecia.

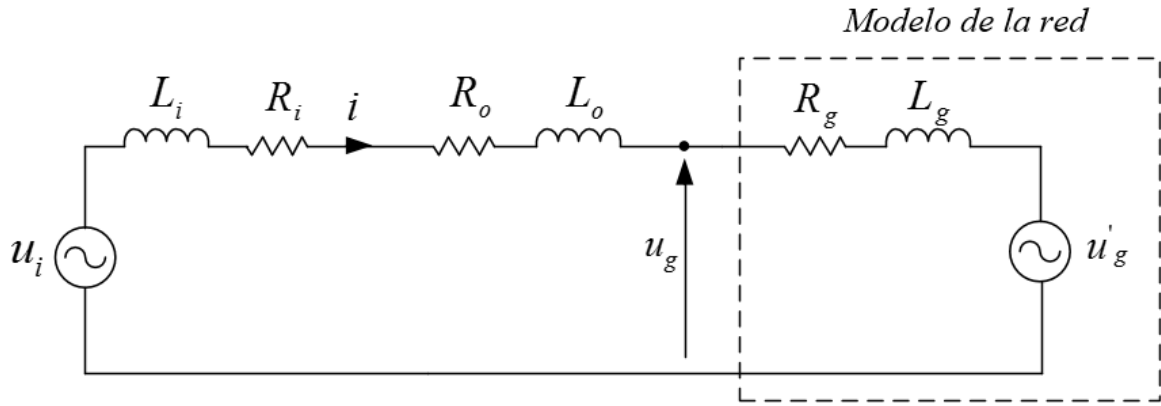


Figura 3.4 Aproximación de bajas frecuencias del esquema eléctrico monofásico de un VSC conectado a la red mediante un filtro LCL.

La función de transferencia simplificada $P_s(s)$ entre u_i e i viene dada por:

$$P_s(s) = \frac{I(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{(L_i + L_o)s + (R_i + R_o)} \quad (3.16)$$

La representación de estado en ejes dq del circuito mostrado en la **Figura 3.4** viene dada por las siguientes ecuaciones:

$$(L_i + L_o) \frac{di_d}{dt} = -(R_i + R_o)i_d + \omega(L_i + L_o)i_q + u_{i_d} - u_{g_d} \quad (3.17)$$

$$(L_i + L_o) \frac{di_q}{dt} = -\omega(L_i + L_o)i_d - (R_i + R_o)i_q + u_{i_q} - u_{g_q} \quad (3.18)$$

Ordenando las ecuaciones (3.17) y (3.18) de forma matricial:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_i + R_o}{L_i + L_o}\right) & \omega \\ -\omega & -\left(\frac{R_i + R_o}{L_i + L_o}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_i + L_o} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_i + L_o} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{i_d} - u_{g_d} \\ u_{i_q} - u_{g_q} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Para lograr un control independiente de la corriente del eje d (i_d), y de la corriente del eje q (i_q), se utilizan unos mandos virtuales (w_{i-d} para el eje d y w_{i-q} para el eje q), resultando:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_i + R_o}{L_i + L_o}\right) & \omega \\ -\omega & -\left(\frac{R_i + R_o}{L_i + L_o}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_i + L_o} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_i + L_o} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{id} \\ w_{iq} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Los mandos virtuales permiten manejar un modelo desacoplado entre ejes, y por tanto se puede diseñar el control de cada eje de forma independiente. La relación entre los mandos virtuales y los mandos reales se obtiene haciendo la diferencia entre las ecuaciones originales (3.19) y las ecuaciones desacopladas (3.20), resultando:

$$u_{id} = w_{id} + u_{gd} - \omega(L_i + L_o)i_q \quad (3.21)$$

$$u_{iq} = w_{iq} + u_{gq} + \omega(L_i + L_o)i_d \quad (3.22)$$

donde u_{idq} es la tensión generada por el convertidor y w_{idq} es la tensión virtual generada por el control. El control quedaría organizado como se muestra en la figura **Figura 3.5**.

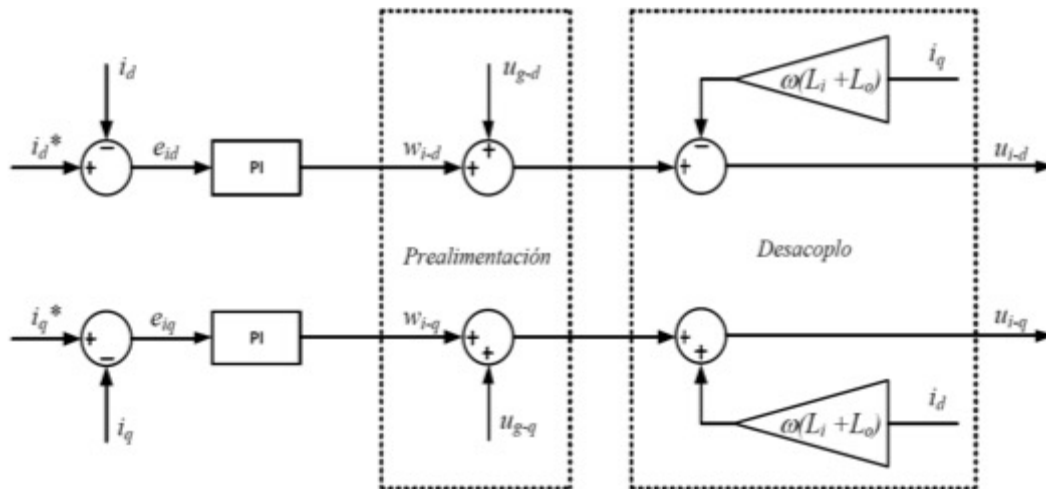


Figura 3.5 Diagrama de bloques del control de corriente con pre-alimentación y desacoplo entre ejes.

Los parámetros del control se obtendrán mediante la técnica de asignación de polos. La función de transferencia de la planta con la que se va a diseñar el control es la siguiente:

$$P_{sd}(s) = \frac{I_d(s)}{W_{id}(s)} \quad (3.23)$$

$$P_{sq}(s) = \frac{I_q(s)}{W_{iq}(s)} \quad (3.24)$$

El diseño del control de cada eje se puede hacer de forma independiente. Además, como la dinámica de ambos ejes es la misma, se puede realizar el diseño de forma común para ambos. Se hará por tanto el diseño para el eje d . Se quiere conseguir error nulo ante escalones en la referencia y la perturbación. Por tanto, se necesita acción integral. Se decide utilizar un control PI, que asegura error nulo en régimen estacionario. El control PI se puede formular como:

$$w_{id}(t) = K_p \left(e_{id}(t) + \frac{1}{T_i} \int e_{id}(t) dt \right) \quad (3.25)$$

donde:

$w_{id}(t)$: mando virtual generado por el control de corriente para el eje d .

$e_{id}(t)$: error del control de corriente para el eje d .

K_p : constante de la acción proporcional del control de corriente.

T_i : constante de la acción integral del control de corriente.

Aplicando la transformada de Laplace sobre (3.25) se obtiene la función de transferencia del control:

$$C(s) = \frac{W_{id}(s)}{E_{id}(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (3.26)$$

Para diseñar el control se define la función de transferencia de lazo abierto $G(s)$ como:

$$G(s) = C(s)P_{sd}(s) \quad (3.27)$$

La función de transferencia de lazo cerrado quedaría:

$$F(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)} \quad (3.28)$$

La ecuación (3.28) tiene un denominador de segundo orden y, por tanto, se pueden calcular las constantes K_p y T_i para obtener las especificaciones requeridas. Realizando la asignación de coeficientes y despejando se obtiene:

$$K_p = 2\zeta\omega_n(L_i + L_o) - R_1 - R_2 \quad (3.29)$$

$$T_i = \frac{K_p}{\omega_n^2(L_i + L_o)} \quad (3.30)$$

donde ζ es el factor de amortiguamiento y ω_n es la pulsación natural.

3.4 CÁLCULO DE REFERENCIAS DE CORRIENTE

Si se conocen la tensión de la red u_{gdq} y la corriente de salida del convertidor i_{dq} , se puede calcular la potencia instantánea de la siguiente manera:

$$p = u_{gd}i_d + u_{gq}i_q \quad (3.31)$$

$$q = -u_{gd}i_q + u_{gq}i_d \quad (3.32)$$

Suponiendo que el nivel de tensión de la red u_{gdq} se mantiene constante, se puede controlar la potencia activa p y reactiva q que el convertidor entrega a la red variando el valor de la corriente i_{dq} . Las referencias de potencia activa y reactiva son p^* y q^* , respectivamente, y las referencias de corriente en ejes dq se pueden calcular despejando su valor de la ecuación (3.32) :

$$\begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u_{gd}}{u_{gd}^2 + u_{gq}^2} & \frac{u_{gq}}{u_{gd}^2 + u_{gq}^2} \\ \frac{u_{gq}}{u_{gd}^2 + u_{gq}^2} & -\frac{u_{gd}}{u_{gd}^2 + u_{gq}^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^* \\ q^* \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

La **Figura 3.6** muestra el esquema de un VSC con control de corriente al que se le ha añadido el cálculo de las referencias de corriente que se calculan en función de la tensión de red en ejes dq y de las potencia de referencia activa p^* y reactiva q^* que se quiere inyectar.

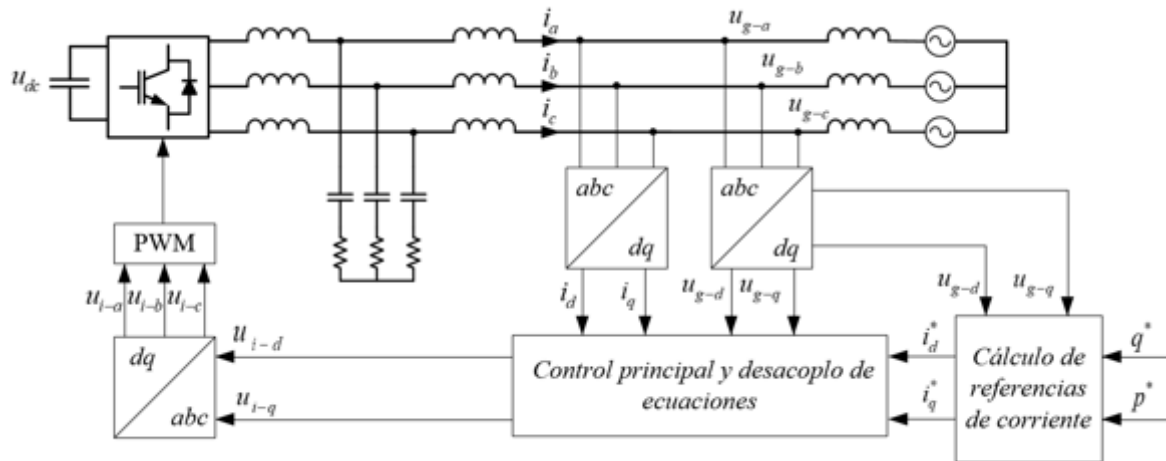


Figura 3.6 Diagrama eléctrico y del control de un VSC conectado a la red mediante un filtro LCL con bloque de generación de corriente de referencia.

3.5 SISTEMA DE BLOQUEO DE FASE (PLL)

La tensión de la red se encuentra en un sistema de referencia distinto de la tensión del convertidor. El sistema de referencia del convertidor se nota como dq , mientras que el de la red se nota como DQ . Ambos sistemas se encuentran desfasados un ángulo δ , como se muestra en la **Figura 3.7**. Éste ángulo resulta imprescindible para hacer una conversión de las variables que se realimentan al control [13] y operar con las variables en el sistema de referencia del lado del convertidor. Para ello, se utilizará un Sistema de Bloqueo de Fase (en inglés Phase Locked Loop, o PLL). Además, el PLL sirve para estimar la frecuencia de la red.

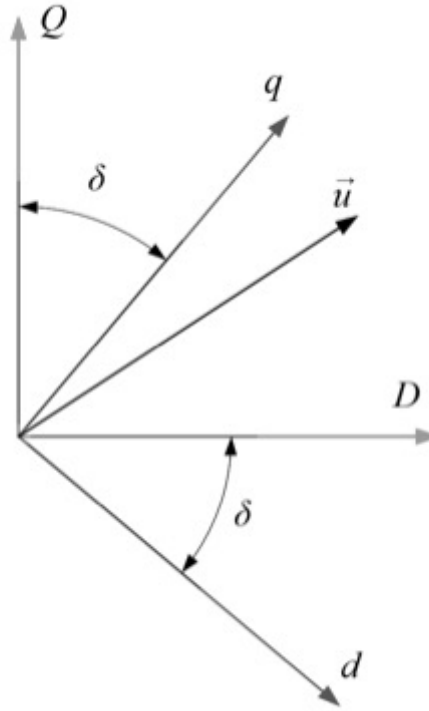


Figura 3.7 Sistema de referencia en el lado de la red y en el lado del convertidor.

En la **Figura 3.7** el sistema de referencia con ejes DQ es el del lado de la red y el de ejes dq es el del lado del convertidor. Para transformar variables entre ambos sistemas de referencia se utiliza la siguiente transformación (se puede deducir fácilmente proyectando sobre los ejes de ambos sistemas de referencia):

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_D \\ u_Q \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

donde u_d y u_q son las tensiones en ejes dq del lado del convertidor y u_D y u_Q son las tensiones en ejes DQ del lado de la red.

Mediante la implementación del control PI mostrado en la Figura 3.8 se obtiene la frecuencia del PLL, que se compara con la frecuencia de la red. La diferencia resultante se integra para obtener el ángulo de desfase entre los dos sistemas de referencia:

$$\delta = \int (\omega - \omega_{PLL}) dt \quad (3.35)$$

donde ω es la frecuencia de la red y ω_{PLL} es la frecuencia estimada por el PLL.

La ω_{PLL} se obtiene aplicando el control PI a la tensión u_{gq} . Los parámetros de este control se calculan como se indica en [14].

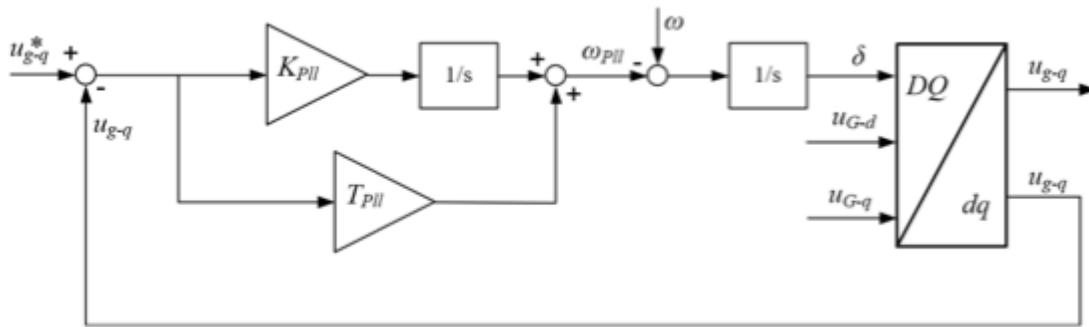


Figura 3.8 Control PI del PLL

El ángulo δ obtenido permitirá pasar de un sistema de referencia a otro de tal forma que todas las variables realimentadas al control estén en los ejes dq del lado del convertidor y las variables que se utilicen de entrada a la planta o al modelo de la red estén en los ejes DQ del lado de la red.

En este trabajo se supondrá que el vector de la tensión de la red u'_g coincide con el eje d del sistema de referencia. Esta suposición se hace para anular la componente del eje q de la tensión de red y de esta manera simplificar los cálculos (especialmente los relacionados con la potencia activa y reactiva).

Capítulo 4

CONTROLES DE TENSIÓN Y FRECUENCIA

En este capítulo se explican las estrategias de control que se van a utilizar para dar apoyo de frecuencia y tensión a la red. En la sección 4.1 se explica un modelo de red que se va a utilizar en este trabajo. En la sección 4.2 se explica la importancia de la impedancia de salida de los convertidores. En la sección 4.3 se explica el control de droop, y en la sección 4.4 se expone la versión mejorada del control de droop, el control df/dt .

4.1 MODELO DE LA RED

Hasta ahora se ha supuesto una red ideal, y no se ha tenido en cuenta la impedancia de la red. En este capítulo se modela la red de tal forma que se tenga en cuenta su impedancia. El carácter de ésta impedancia cobra una importancia vital a la hora de diseñar el control droop, tal como se explicará en la sección 4.2.

En el modelo de la red también se incluirá un control de tensión que corrija las desviaciones de la tensión de red y un modelo inercial que simule la presencia de una inercia para obtener la frecuencia de la red en función de la potencia de entrada. El modelo de la red utilizado se muestra en la **Figura 4.1**.

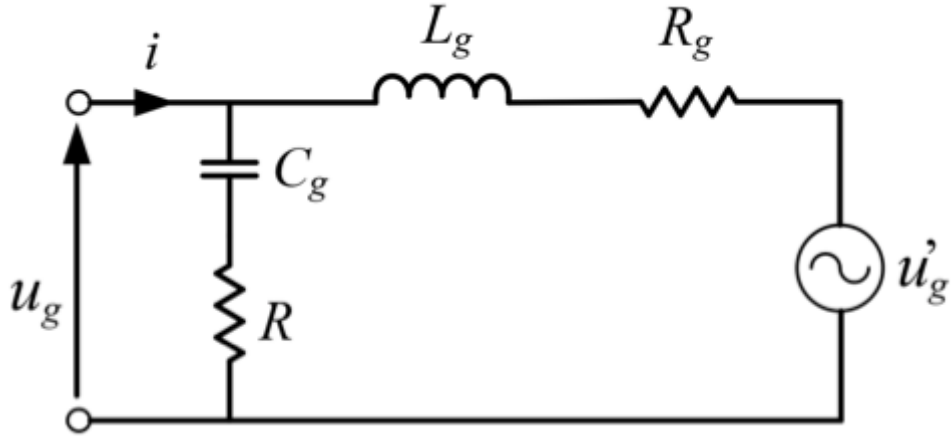


Figura 4.1 Diagrama eléctrico del modelo de la red.

La notación de la **Figura 4.1** es:

u_g : tensión en el punto de conexión del convertidor.

i : corriente de salida del filtro LCL.

u'_g : tensión de la red.

L_g : inductancia de la red.

R_g : parte resistiva de L_g .

El condensador C_g en serie con la resistencia R permiten utilizar la tensión u_g como salida. De esta manera, esta variable se puede realimentar fácilmente en el resto del sistema eléctrico (es una salida).

Las ecuaciones que definen la representación de estado del sistema de la **Figura 4.1** son:

$$C_g \frac{du_{cg}}{dt} = i - i_{Lg} \quad (4.1)$$

$$L_g \frac{di_{Lg}}{dt} = u_{cg} + Ri_{cg} - R_g i_{Lg} - u'_g \quad (4.2)$$

Aplicando la transformada de Park a las ecuaciones (4.1) y (4.2) como se explica en el Capítulo 3 se obtiene:

$$C_g \frac{du_{cgd}}{dt} = i_d - i_{Lgd} + \omega C_g v_{cgq} \quad (4.3)$$

$$C_g \frac{du_{cgq}}{dt} = i_q - i_{Lgq} - \omega C_g v_{cgd} \quad (4.4)$$

$$L_g \frac{di_{Lgd}}{dt} = u_{cgd} + R i_{cgd} - R_g i_{Lgd} - u'_g + \omega L_g i_{Lgq} \quad (4.5)$$

$$L_g \frac{di_{Lgq}}{dt} = v_{cgq} + R i_{cgq} - R_g i_{Lgq} - u'_g - \omega L_g i_{Lgd} \quad (4.6)$$

La variable de salida de este sistema es la tensión de red u_g se define como:

$$u_g = v_{cg} + R_{cg}(i - i_{Lg}) \quad (4.7)$$

Pasando la ecuación (4.7) a ejes dq resulta:

$$u_{gd} = v_{cgd} + R_{cg}(i_d - i_{Lgd} + \omega C_g v_{cgq}) \quad (4.8)$$

$$u_{gq} = v_{cgq} + R_{cg}(i_q - i_{Lgq} - \omega C_g v_{cgd}) \quad (4.9)$$

Las tensiones u_{gd} y u_{gq} se realimentan al filtro LCL y también al control de corriente. Es importante recordar que tanto éstas variables como la corriente de salida están referenciadas a las coordenadas de la red. Por tanto, es imprescindible referenciarlas al sistema de referencia del convertidor antes de utilizarlas en el control.

4.1.1 MODELO INERCIAL DE LA RED

En este apartado se explica cómo se emula la dinámica de un eje. Se modelará un sistema que sirva para obtener la dinámica del valor de la frecuencia de la red en función de la potencia demandada. El diagrama de bloques del sistema es el que se muestra en la **Figura 4.2**.

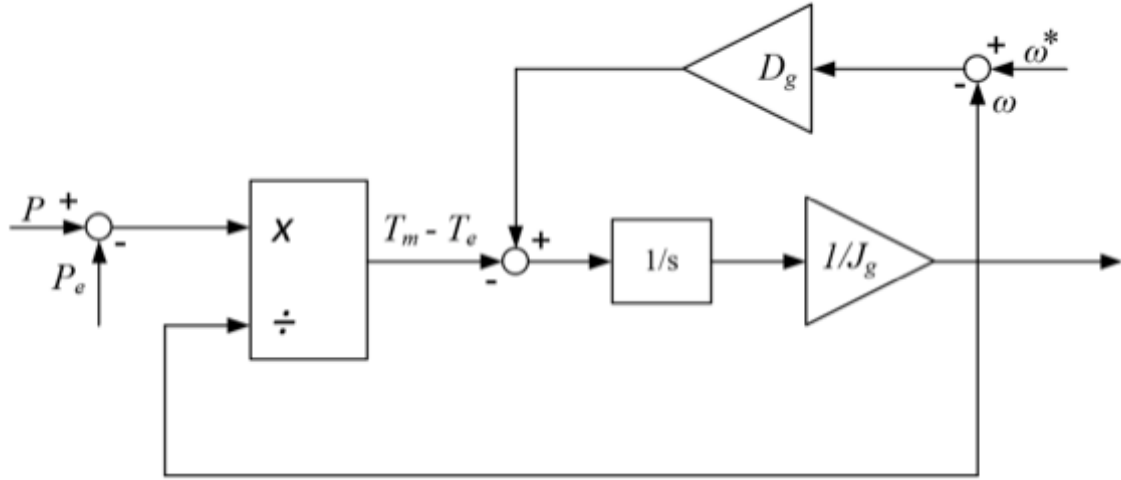


Figura 4.2 Diagrama eléctrico del modelo de la red.

La notación de la **Figura 4.2** es:

T_m : par mecánico.

T_e : par eléctrico.

P : potencia de la red.

P_e : potencia de carga.

J_g : inercia virtual.

D_g : factor de rozamiento.

ω : frecuencia de la red.

ω^* : frecuencia de referencia.

La ecuación que define la dinámica del eje virtual es [7]:

$$J_v \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e + D_p(\omega^* - \omega) \quad (4.10)$$

Como se puede observar las entradas al sistema son la potencia de la red, la de carga y la frecuencia de referencia. Los pares que se aplican al eje se calculan dividiendo ambas potencias entre la frecuencia de red, en ese instante. Cuando la potencia de carga incrementa

ésta se extrae del eje del rotor para abastecer a las cargas conectadas de manera transitoria. Por tanto, la frecuencia de la red disminuye.

4.1.2 CONTROL DE TENSIÓN DE LA RED

Para corregir las desviaciones de la tensión de red a la entrada del modelo de red se implementará un control de tensión. Se decide implementar un control proporcional. Éste control tiene la estructura que se muestra en la **Figura 4.3**.

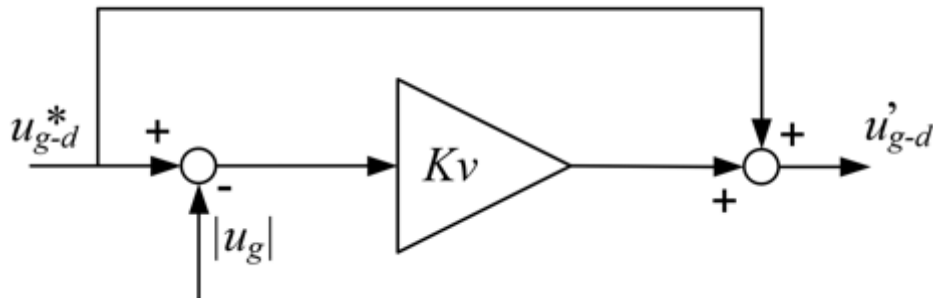


Figura 4.3 Diagrama de bloques del control de tensión de la red.

La notación de la **Figura 4.3** es:

u_{g-d}^* : tensión de referencia.

$|u_g|$: módulo de la tensión de la red.

u'_{g-d} : tensión de mando.

K_v : ganancia del control proporcional.

Este control mide la diferencia entre la tensión de red medida y la tensión de red ideal y esa diferencia se suma a la tensión de red ideal. Este control sólo se implementará para la componente d de la tensión de red ya que como se ha comentado antes este eje es el que soportará todo el valor de la tensión de la red mientras que la componente del eje q será nula.

4.2 IMPEDANCIA DE SALIDA

Las ideas expresadas en esta sección son un resumen de la teoría básica que se puede encontrar en [5].

La potencia de salida de un convertidor se puede expresar como:

$$S = P + jQ \quad (4.11)$$

donde P es la potencia activa, Q es la potencia reactiva y S es la potencia aparente. Las potencias activa y reactiva se definen mediante las siguientes expresiones:

$$P = \frac{EV}{Z} \cos(\theta - \phi) - \frac{V^2}{Z} \cos(\theta) \quad (4.12)$$

$$Q = \frac{EV}{Z} \sin(\theta - \phi) - \frac{V^2}{Z} \sin(\theta) \quad (4.13)$$

donde:

E : tensión de salida del convertidor.

V : tensión del bus común a todos los convertidores.

ϕ : ángulo del vector de potencia.

Z : magnitud de la impedancia de salida.

θ : ángulo de la impedancia de salida.

Se pueden distinguir dos casos en función del ángulo θ :

- Impedancia de salida de carácter resistivo ($\theta = 0^\circ$)

Si la impedancia de salida del convertidor tiene carácter resistivo las ecuaciones (4.12) y (4.13) quedarían:

$$P = \frac{EV \cos \phi - V^2}{R} \quad (4.14)$$

$$Q = \frac{EV}{R} \sin \phi \quad (4.15)$$

donde R es la resistencia de salida del convertidor.

Si se considera que el desfase entre E y V es prácticamente nulo ($\sin \phi \approx \phi$ y $\cos \phi \approx 1$) puede apreciarse como la potencia activa P depende principalmente de la diferencia de tensiones $E - V$ y la potencia reactiva Q depende principalmente del ángulo ϕ .

- Impedancia de salida de carácter inductivo ($\theta = 90^\circ$)

Se suele suponer que la impedancia de salida de los inversores tiene carácter inductivo debido al alto componente inductivo de la impedancia del filtro de salida [6]. En este caso las ecuaciones (4.12) y (4.13) quedarían:

$$P = \frac{EV}{X} \sin \phi \quad (4.16)$$

$$Q = \frac{EV \cos \phi - V^2}{X} \quad (4.17)$$

donde X es la reactancia de salida del inversor.

Haciendo las mismas suposiciones que en caso anterior resulta que la potencia activa depende principalmente del ángulo ϕ y la potencia reactiva depende principalmente de la diferencia de tensiones $E - V$.

En este trabajo se supondrá una impedancia de salida de carácter inductivo, ya que es lo más habitual. Por tanto, los controles de droop que habrá que implementar serán del tipo $P - \omega$ y $Q - V$.

4.3 DROOP DE P-Q

El control de droop da soporte a la red inyectando potencia activa y reactiva a la red de forma proporcional a la variación de frecuencia de red y a la variación del módulo de la tensión de red respectivamente de la siguiente manera:

$$P^* = G_P(s)(\omega^* - \omega) \quad (4.18)$$

$$Q^* = G_Q(s)(E^* - E) \quad (4.19)$$

donde la notación utilizada es la siguiente

ω : frecuencia de la red.

ω^* : frecuencia de referencia.

E : tensión de la red.

E^* : tensión de referencia.

P : potencia activa de referencia.

Q^* : potencia reactiva de referencia.

$G_P(s)$: función de transferencia entre la diferencia de frecuencia y la potencia activa.

$G_Q(s)$: función de transferencia entre la diferencia de tensión y la potencia reactiva.

Las funciones de transferencia $G_P(s)$ y $G_Q(s)$ son acciones proporcionales que representan las máximas desviaciones de frecuencia y de tensión respecto a los valores nominales de potencia activa y reactiva, respectivamente. En este trabajo se considerara que $G_P(s)$ y $G_Q(s)$ toman los valores de las pendientes de las gráficas de la **Figura 4.4**.

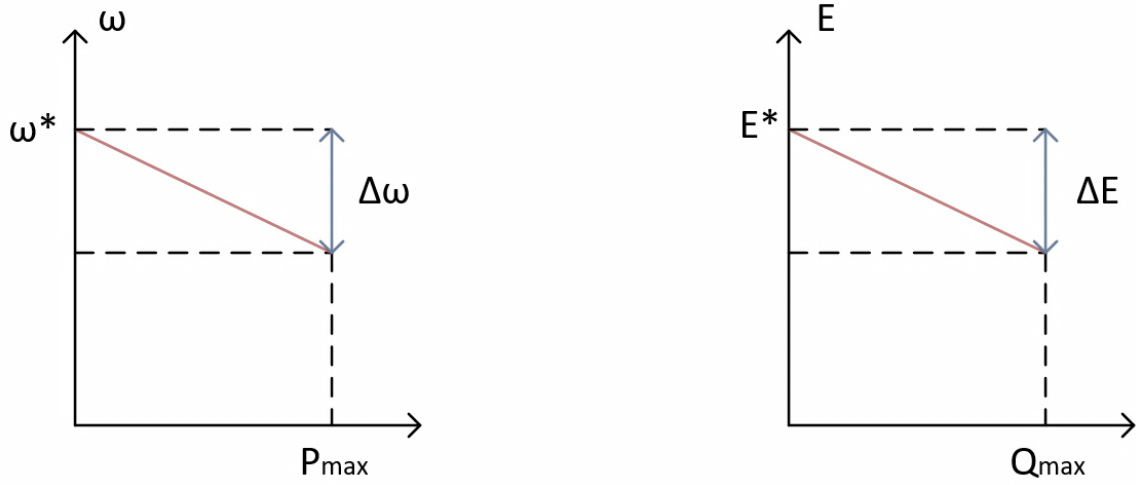


Figura 4.4 Funciones del droop de P-Q.

La configuración de los controles de droop de frecuencia y de tensión se muestra en la **Figura 4.5** y la **Figura 4.6**, respectivamente. Como se puede observar ambos controles de droop llevarán también implementado un filtro paso bajo a su salida para eliminar los ruidos de alta frecuencia. La función de transferencia del filtro paso bajo que se extrae del diagrama de bloques de la **Figura 4.5** y la **Figura 4.6** es:

$$LPF(s) = \frac{1}{\frac{s}{\omega_{c_droop}} + 1} \quad (4.20)$$

donde ω_{c_droop} es la pulsación de corte del filtro paso bajo del control de droop, y será la misma para el control de droop de frecuencia como para el de tensión.

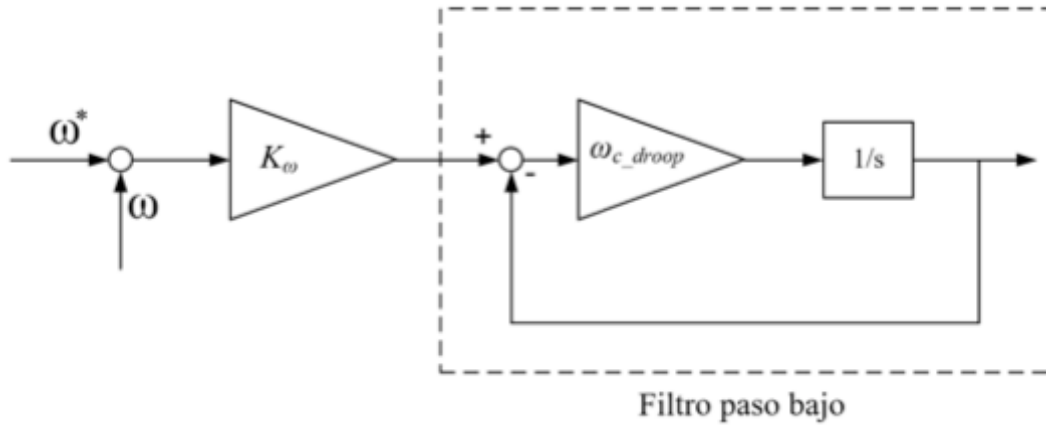


Figura 4.5 Configuración del control de droop de frecuencia.

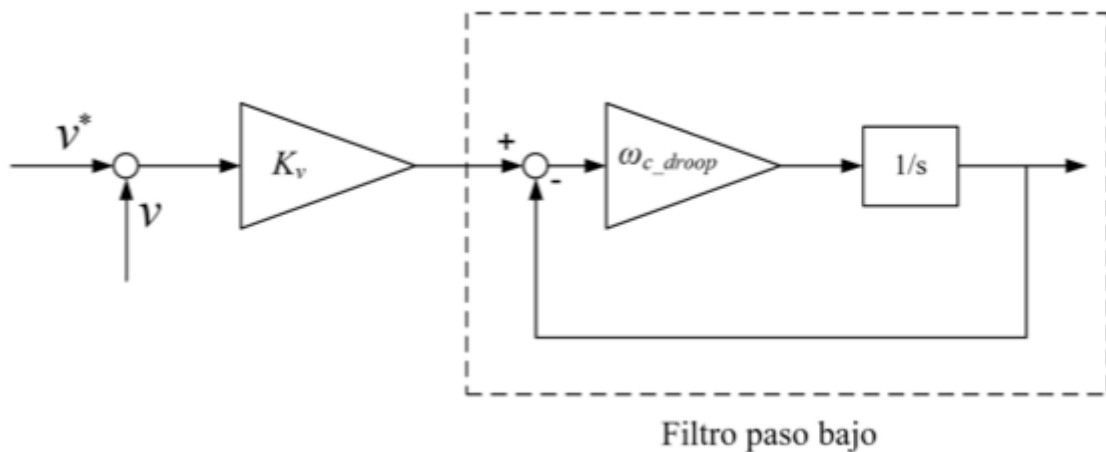


Figura 4.6 Configuración del control de droop de tensión.

La notación de la **Figura 4.5** y **Figura 4.6** es:

K_ω : ganancia del control de droop de frecuencia.

K_v : ganancia del control de droop de tensión.

4.4 CONTROL df/dt

Se quiere implementar un control df/dt para mejorar la respuesta transitoria del control de droop. La estrategia de control df/dt consiste en generar una potencia de referencia

proporcional a la derivada temporal de la frecuencia de la red, por tanto se necesita una acción derivativa y por ello hay que implementar un control PD, el cual será más rápido que el control proporcional (droop). Lo que hará el control PD será dar más potencia a la red durante los transitorios. Así la frecuencia se estabilizará antes. La estructura general del control utilizando únicamente ganancias e integradores es la que se muestra en la **Figura 4.7**.

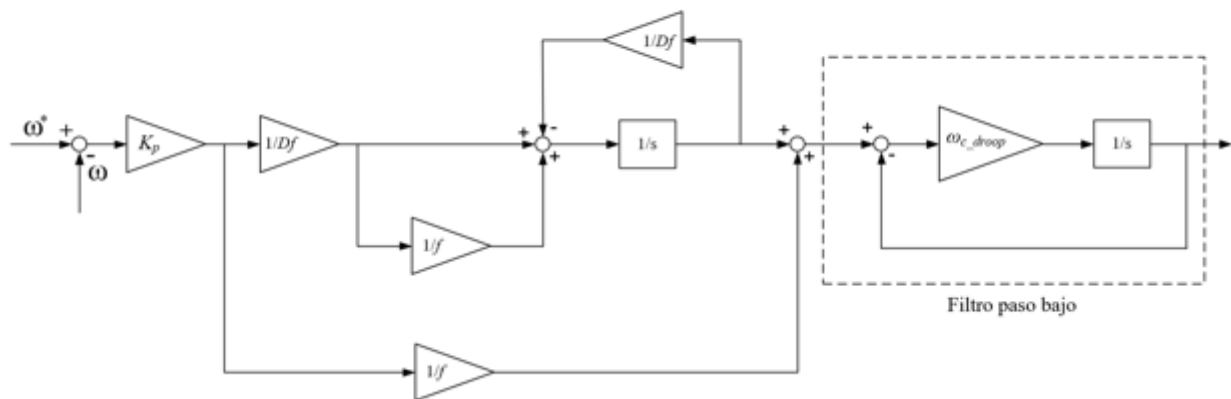


Figura 4.7 Configuración del control df/dt .

Como se puede observar la diferencia frente al control de droop es que se ha suplantado un control proporcional por un control PD.

Para diseñar el control habrá que analizar la planta, determinando que partes del sistema van a influenciar en la respuesta dinámica de la frecuencia de red. En primer lugar, habrá que tener en cuenta la función de transferencia del filtro paso bajo del control de droop, que será la misma que se implementará para el control df/dt , y a la cual se denomina como $P_1(s)$:

$$P_1(s) = \frac{1}{\frac{s}{\omega_{c \text{ droop}}} + 1} \quad (4.21)$$

donde ω_{c_droop} es la pulsación de corte del filtro.

La potencia que se extrae del control se puede aproximar con la potencia que entra en el modelo inercial de la red. De esta manera la siguiente función de transferencia que habrá que tener en cuenta será una simplificación del modelo inercial de la red la cual se denomina como $P_2(s)$:

$$P_2(s) = \frac{1}{\omega} \frac{1}{J_g s + D_g} \quad (4.22)$$

donde ω es la frecuencia de la red, J_g es la inercia virtual y D_g es el factor de rozamiento.

Por último, se tiene que hallar una función de transferencia para tener en cuenta el tiempo de estimación de la frecuencia calculada por el PLL. Al ser un modelo no lineal, se hace una aproximación de la función de transferencia que se denomina como $P_3(s)$ y se define como:

$$P_3(s) = \frac{1}{\frac{s}{\omega_{PLL}} + 1} \quad (4.23)$$

donde ω_{PLL} es la frecuencia natural obtenida por diseño para el PLL.

La planta para la cual habrá que diseñar el control será por tanto la combinación en serie de $P_1(s)$, $P_2(s)$, y $P_3(s)$ resultando:

$$F(s) = \frac{P(s)}{\omega(s)} = P_1(s)P_2(s)P_3(s) \quad (4.24)$$

donde notación utilizada es la siguiente:

$P(s)$: Transformada de Laplace de la potencia de salida.

$\omega(s)$: Transformada de Laplace de la frecuencia de la red.

$F(s)$: Función de transferencia de la planta.

Esta función de transferencia se utilizará en la siguiente sección para diseñar el control de potencia-frecuencia.

Capítulo 5

RESULTADOS

En esta sección se exponen los resultados obtenidos en el trabajo. En la sección 5.1 se comprueba que el control de corriente funciona correctamente con los parámetros calculados, en la sección 5.2 se dan los parámetros de los controles de droop y se comprueba su buen funcionamiento, en la sección 5.3 se dan los parámetros del control df/dt y se hace una comprobación del control. Por último en la sección 5.4 se hace una comparación entre el control de droop de frecuencia y el control df/dt .

5.1 DISEÑO Y PRUEBAS DEL CONTROL DE CORRIENTE

Los parámetros que se utilizará para el filtro LCL y para el modelo de la red se muestran en la **Tabla 5.1** y en la **Tabla 5.2**, respectivamente.

L_i	2 mH
L_o	1 mH
R_i	$62.8\text{ m}\Omega$
R_o	$31.4\text{ m}\Omega$
C_f	$9\text{ }\mu\text{F}$
R_D	$2.87\text{ m}\Omega$

Tabla 5.1 Parámetros del filtro LCL.

L_g	2 mH
R_g	$62.8\text{ m}\Omega$
C	1 nF
R	$1\ \Omega$
D_g	20 Nms
J_g	0.05 Kgm^2

Tabla 5.2 Parámetros del modelo de la red.

5.1.1 PARÁMETROS DE DISEÑO Y PRUEBA DEL CONTROL PRINCIPAL PI

Para el diseño del control se fijarán primero los valores del factor de amortiguamiento (ζ) y de la pulsación natural (ω_n). Los parámetros del control principal de corriente se calculan según las expresiones (3.29) y (3.30). Los valores que toman todas las variables del control se muestran en la **Tabla 5.3**.

ζ	0.7
ω_n	$2\pi 500\text{ rad/s}$
K_p	5.1836
T_i	11×10^{-4}

Tabla 5.3 Parámetros del control PI del control principal de corriente.

En la **Figura 5.1** se muestra la respuesta del sistema a un escalón unitario en referencia en $t = 50\text{ ms}$. Como se puede observar el tiempo de establecimiento es de 3.2 ms y el error de seguimiento a referencia es nulo ya que se está aplicando un control PI.

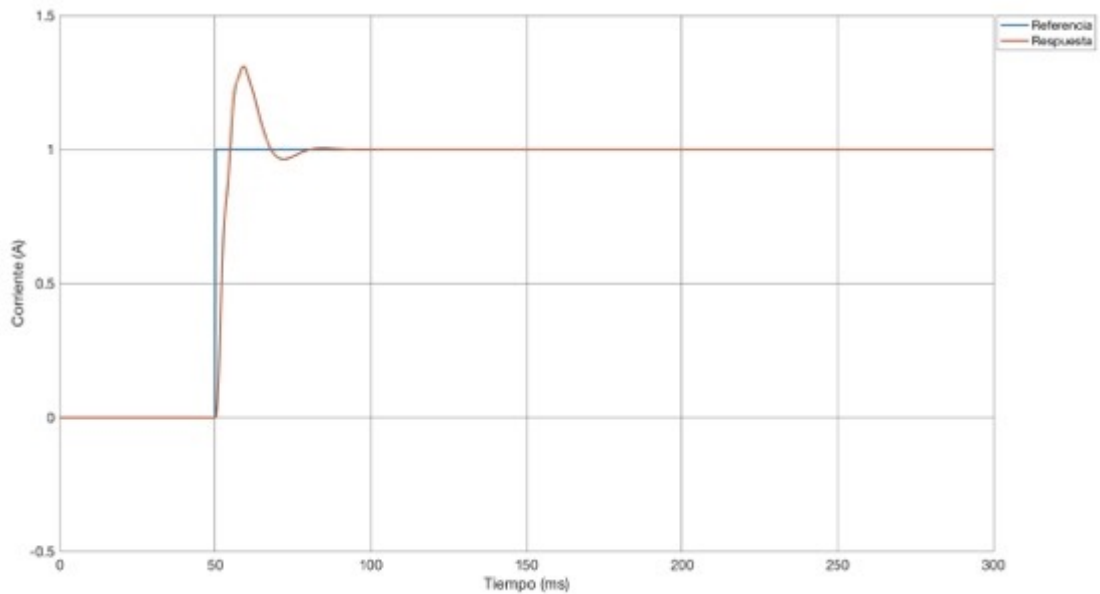


Figura 5.1 Respuesta del control principal de corriente para una entrada de escalón unitario.

Si se deshace la Transformada de Park se puede observar el valor que toma la intensidad en un sistema trifásico. Este resultado se muestra la **Figura 5.2**.

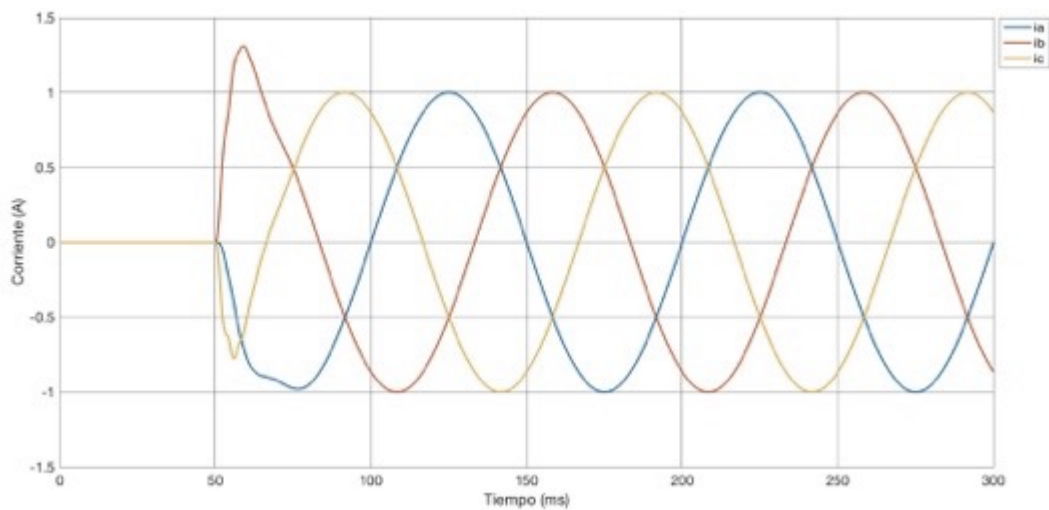


Figura 5.2 Respuesta de la intensidad trifásica del control principal de corriente a un escalón unitario en referencia.

5.1.2 PARÁMETROS DE DISEÑO Y PRUEBA DEL PLL

Para el diseño del control PI del PLL se utilizará el método de cálculo expuesto en [14]. En la **Tabla 5.4** se muestran los parámetros utilizados en el control.

K_{PLL}	0.1
T_{PLL}	0.05

Tabla 5.4 Parámetros del PLL.

Para probar el PLL se reducirá la frecuencia de la red en $t = 500\text{ ms}$ para observar como varía el ángulo δ . La **Figura 5.3** muestra la dinámica del ángulo δ del PLL ante cambios en la frecuencia de red.

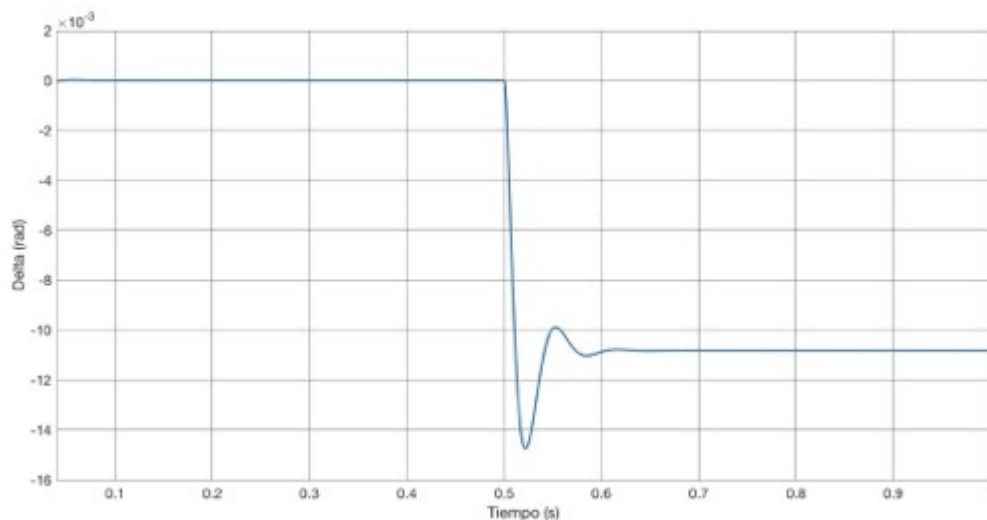


Figura 5.3 Respuesta del PLL ante cambios en la frecuencia de la red.

Como se puede observar el ángulo δ se estima bastante rápido ya que el tiempo de establecimiento es de 45.2 ms .

5.2 DISEÑO Y PRUEBAS DEL CONTROL DE DROOP

Como se ha explicado en la sección 4.3 las ganancias de los controles de droop y frecuencia son las pendientes de las gráficas de la **Figura 4.4**. En esta sección se fija el valor de los

parámetros del control de droop tensión y de frecuencia, y posteriormente se extraen los resultados de dichos controles.

5.2.1 PARÁMETROS DE DISEÑO Y PRUEBA DEL CONTROL DE DROOP DE FRECUENCIA

Para el control de droop de frecuencia se considera que la máxima desviación que puede sufrir la frecuencia de la red es de un 2% [1]. Se considerará también que la potencia máxima que puede gestionar el sistema es la potencia nominal del convertidor (15kW), y por tanto la ganancia del control de droop de frecuencia se calcula como:

$$K_{\omega} = \frac{15 \text{ kW}}{2\pi 50 \times 0.02 \text{ rad/s}} = 2387.3 \quad (5.1)$$

Para realizar la prueba del control se conecta en $t = 0.5 \text{ s}$ una carga que consume una potencia de 10 kW. En la **Figura 5.4** se muestra como varía la frecuencia de la red cuando se conecta dicha carga.

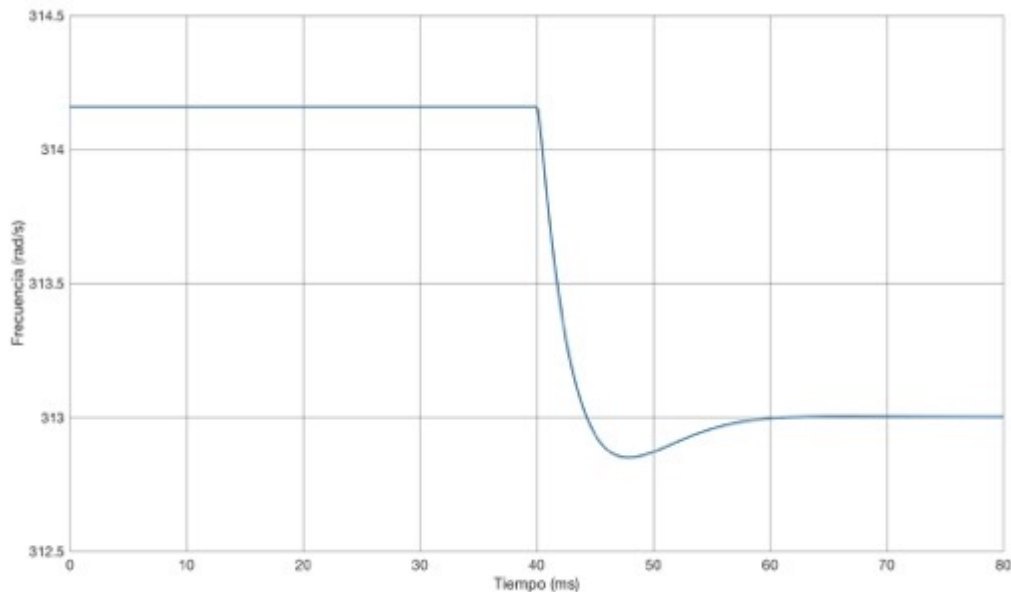


Figura 5.4 Respuesta del control de droop para una variación en la potencia de carga de 10 kW.

Como se puede observar en la gráfica, en el instante en el que se conecta la carga comienza un transitorio en la respuesta dinámica de la frecuencia de la red que hace que ésta baje para ceder potencia a la carga.

5.2.2 PARÁMETROS DE DISEÑO Y PRUEBA DEL CONTROL DE DROOP DE Tensión

Para el control de droop de frecuencia se considera que la máxima desviación que puede sufrir la tensión de la red es de un 20 %. Se considera también que la máxima potencia reactiva que puede dar el convertidor es de 15 Kvar, y por tanto la ganancia del control de droop de tensión se calcula como:

$$K_v = \frac{15 \text{ kvar}}{400 \times 0.2V} = 187.5 \quad (5.2)$$

En la figura se muestra la variación de la tensión de red cuando se conecta una carga que consume 10 Kvar en $t = 50 \text{ ms}$. Como se puede observar el nivel de tensión de red baja cuando las cargas demandan potencia reactiva como ya se había previsto antes.

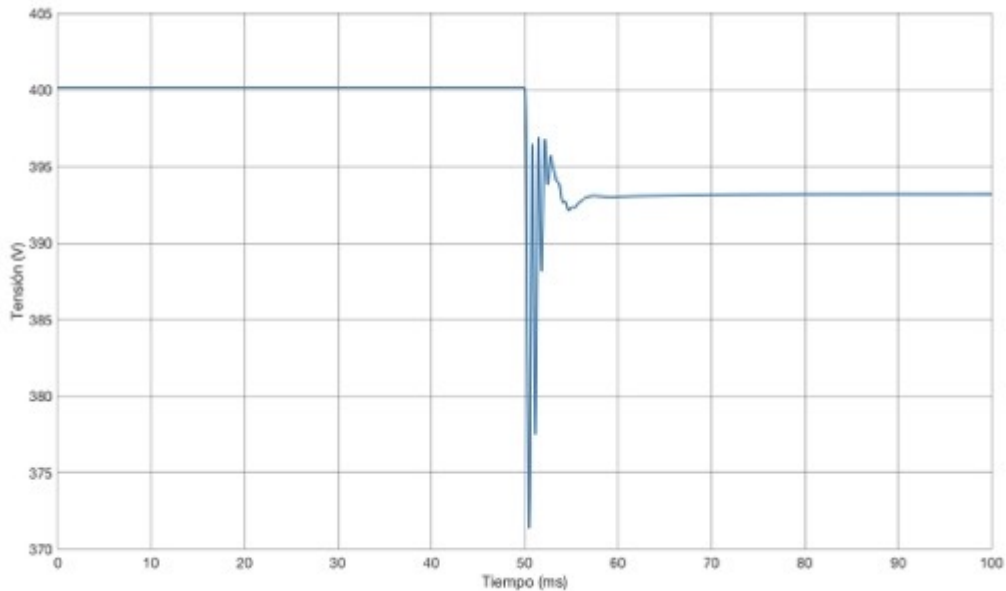


Figura 5.5 Respuesta del control de droop de tensión para una variación en la potencia de carga de 10 Kvar.

5.3 DISEÑO Y PRUEBAS DEL CONTROL df/dt

Los parámetros de diseño del control PD implantado en el control df/dt se muestran en la **Tabla 5.5**.

K_{pd}	7007
D	0.0496
f	0.1

Tabla 5.5 Parámetros del control PD del df/dt .

Para realizar la prueba del control se conecta en $t = 0.5 \text{ s}$ una carga que consume una potencia de 10 kW. En la **Figura 5.6** se muestra como varía la frecuencia de la red cuando se conecta dicha carga.

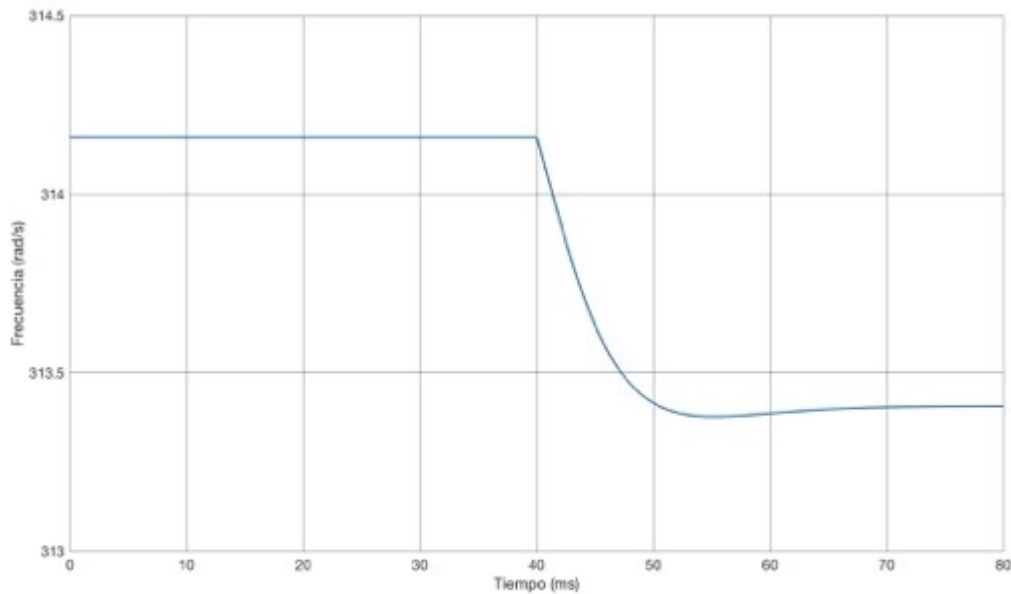


Figura 5.6 Respuesta del control df/dt para una variación de potencia de carga de 10 kW.

5.4 COMPARACIÓN DEL CONTROL DE DROOP FRENTE AL CONTROL DF/DT

En al **Figura 5.7** se muestra la potencia que aporta el convertidor cuando se conecta una carga de 10 kW en $t = 0.5 \text{ s}$. Como se puede observar el control df/dt aporta más potencia y de manera más rápida para evitar que la frecuencia de la red se aleje demasiado de su valor nominal ($2\pi 50$). En la **Figura 5.8** se puede observar cómo varía la frecuencia en ambos controles. Se aprecia claramente que en el caso del control df/dt la frecuencia se aleja menos del valor nominal gracias a que se aporta una mayor potencia para evitar que disminuya la frecuencia drásticamente.

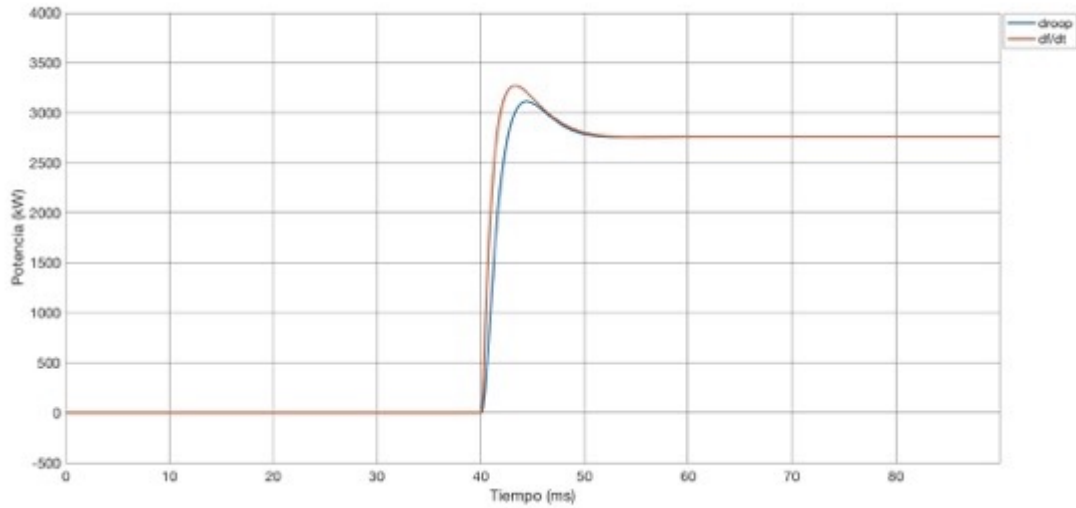


Figura 5.7 Comparativa de la potencia aportada por los convertidores usando control de droop y control df/dt .

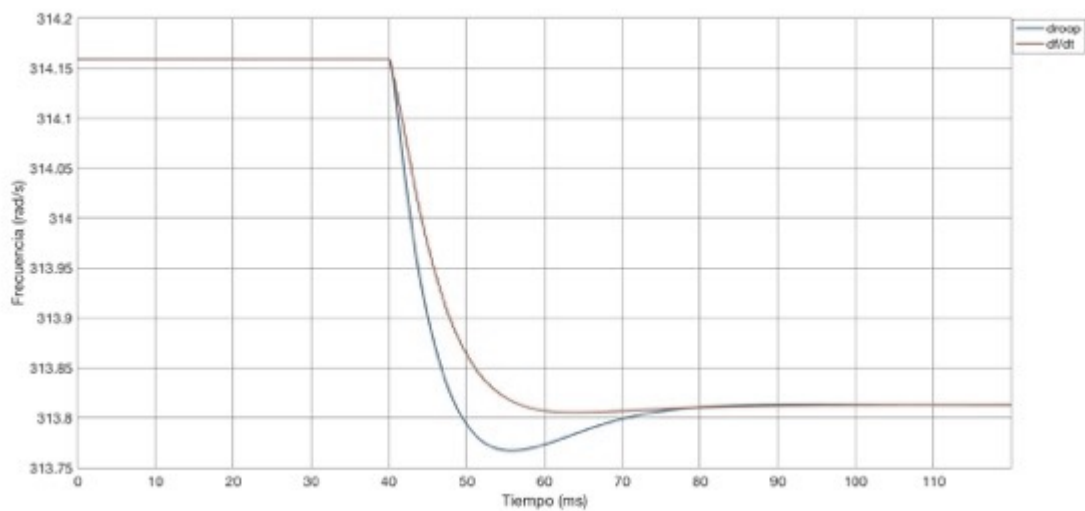


Figura 5.8 Comparativa de la dinámica de la frecuencia para el control de droop y el control df/dt .

Los diagramas de Black de lazo abierto de los controles de droop y df/dt se muestran en la **Figura 5.9**. Se puede apreciar que aunque presenta una mejora de la respuesta antes cambios en la potencia de carga, el control df/dt tiene unos peores márgenes de estabilidad. Mientras que el control de droop presenta un margen de ganancia de 32.8 dB el control df/dt tiene un margen de 12.6 dB, pero aun así el control df/dt presenta una mayor rapidez ya que su pulsación de oscilación es casi el doble que la del control de droop (420 rad/s frente a 277 rad/s del control de droop).

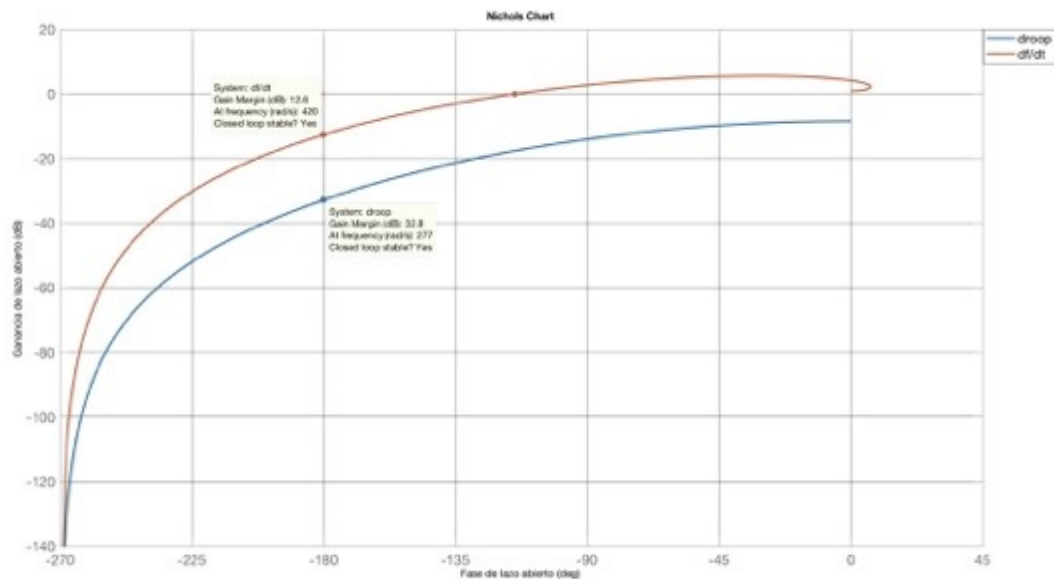


Figura 5.9 Comparativa del diagrama de Black del control del droop y el control df/dt .

Capítulo 6

CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo es estudiar las técnicas de control de droop y df/dt , y comparar la respuesta de ambos controles ante cambios en la potencia de carga conectada. Para poder probar estos controles se ha diseñado un control de corriente, un modelo de red que incluye la parte eléctrica, el modelo inercial y el control de tensión, y por último un PLL para poder realimentar las variables medidas en la parte de la red al control.

6.1 ESTADO DEL ARTE

El aumento de la penetración de energías renovables ha aumentado el número de convertidores conectados a la red, y por tanto, ha obligado a desarrollar controles para garantizar que tanto la frecuencia como el nivel de tensión de la red se mantengan en sus valores nominales. Los controles más habituales en estos convertidores son los controles de droop y los df/dt . Estos controles exigen que ante aumentos en la potencia de carga se inyecten valores de potencia activa o reactiva para evitar que la frecuencia y tensión de la red se alejen de sus valores nominales.

6.2 CONTROL PRINCIPAL DE CORRIENTE

6.2.1 CONTROL PI

En este trabajo queda reflejado que para seguir las referencias de corriente dadas es suficiente con la utilización de un control PI. Este control garantiza error nulo en régimen permanente y una respuesta lo suficientemente rápida. Se ha probado también que las referencias de corriente se pueden calcular dadas unas consignas de potencia, de tal forma que se puede trabajar inyectando las valores de potencias activa y reactiva que se quieren inyectar en vez de inyectar valores de corriente.

6.2.2 PLL

El Sistema de Bloqueo de Fase ha demostrado poder calcular el ángulo de desfase entre el sistema de referencia del lado de la red y el del lado del convertidor. Este ángulo ha resultado imprescindible para realimentar las variables medidas a los diferentes controles. Además, el PLL ha demostrado anular la componente q de la tensión de red para permitir que se trabaje únicamente en la componente d y de esta manera simplificar la complejidad del sistema.

6.3 CONTROL DE DROOP Y df/dt

Tanto el control de droop como el control df/dt han demostrado que ante un aumento en la potencia de carga, se estabiliza la frecuencia de red para evitar que se aleje de su valor nominal. El control df/dt presenta una mejora frente al control de droop, además de ser un control más rápido garantiza que la desviación del valor de la frecuencia de red es menor que con el control de droop. Esto se consigue inyectando una mayor cantidad de potencia en el momento del transitorio. Aunque el control df/dt sea un control con una respuesta más rápida, los márgenes de estabilidad se ven comprometidos frente a los del control de droop.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Duckwitz and B. Fischer, "Modeling and Design of df/dt -Based Inertia Control for Power Converters," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, no. 4, pp. 1553-1564, Dec. 2017
- [2] <http://www.expansion.com/empresas/energia/2018/01/28/5a6dd7e6268e3ee8458b45e0.html>
- [3] https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADas_renovables_en_la_Uni%C3%B3n_Europea
- [4] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuna and M. Castilla, "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158-172, Jan. 2011.
- [5] J. M. Guerrero, L. G. de Vicuna, J. Matas, J. Miret and M. Castilla, "Output impedance design of parallel-connected UPS inverters," *2004 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2004, pp. 1123-1128 vol. 2.
- [6] A. Tuladhar, H. Jin, T. Unger, and K. Mauch, "Parallel operation of single phase inverter modules with no control interconnections," in *Proc. IEEE APEC'97*, 1997, pp. 94 – 100.
- [7] Javier Roldán Pérez, Alberto Rodríguez-Cabrero, and Milan Prodanovic "Diseño del sistema de control de una máquina síncrona virtual conectada a una red débil" IMDEA Energy Institute, Madrid, Spain.
- [8] V. Natarajan and G. Weiss, "Synchronverters With Better Stability Due to Virtual Inductors, Virtual Capacitors, and Anti-Windup," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 7, pp. 5994-6004, July 2017.

-
- [9] Z. Shuai, W. Huang, C. Shen, J. Ge, and Z. J. Shen, "Characteristics and restraining method of fast transient inrush fault currents in synchronverters," *IEEE Trans. on Ind. Elec.*, vol. 64, no. 9, pp. 7487–7497, Sept 2017.
 - [10] Jorge Luis Nique Padilla, "Operación de convertidores electrónicos en redes débiles bajo condiciones de faltas y huecos de tensión"
 - [11] Javier Roldán Pérez, "Fundamentos de control de inversores", informe técnico, Madrid 2018.
 - [12] J. Roldán-Pérez, E. J. Bueno, R. Peña-Alzola and A. Rodríguez-Cabero, "All-Pass-Filter-Based Active Damping for VSCs With LCL Filters Connected to Weak Grids," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 11, pp. 9890-9901, Nov. 2018.
 - [13] V. Kaura and V. Blasko, "Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 1, pp. 58-63, Jan/Feb 1997.
 - [14] Remus Tordesco, Marco Liserre and Pedro Rodríguez "Grid converters for photovoltaic and wind power systems"