Resumen

Este trabajo presenta el estudio de viabilidad, diseño, modelado y simulación de un prototipo de emulador de cargas resonantes.

En la primera parte, se procede a introducir el contexto, materia y contenido de la memoria. Se comentan las ambiciones y limitaciones del trabajo y se diseña un guión que ayude al lector seguir los puntos que se desarrollan a lo largo del documento.

Seguidamente, el núcleo del documento se divide en los Capítulos 2 y 3, los cuales contienen la memoria de las investigaciones y simulaciones llevadas a cabo. En el Capítulo 2, se presenta el modelado físico y matemático de diferentes sistemas eléctricos y de control con los cuales se construye un modelo capaz de emular cargas eléctricas equilibradas. Con este modelo se pretenden asentar y entender las bases de funcionamiento de los emuladores electrónicos y se abre un camino para la viabilidad de un diseño de emuladores de cargas resonantes.

Posteriormente, en el Capítulo 3, se estudia el comportamiento físico de las cargas resonantes y su impacto en sistemas de generación distribuida con posibilidad de isla, así como la normativa vigente sobre detección de isla en inversores fotovoltaicos. Con esto, y apoyándose en los conocimientos y modelos de los puntos anteriores, se construye un modelo de emulador de cargas resonantes y se realizan diversas simulaciones con las cuales se valida su funcionamiento.

Finalmente, se recogen en un último capítulo los resultados obtenidos y se derivan las conclusiones del trabajo, valorando los objetivos alcanzados y comentando posibles líneas futuras de trabajo.

Índice general

Resumen **1**

Índice **4**

Índice de figuras **7**

Índice de tablas **9**

Glosario **12**

1. Introducción y alcance del trabajo **13**

1.1. Electrónica de potencia y emuladores electrónicos 13

1.1.1. Introducción 13

1.1.2. Emuladores electrónicos de cargas 13

1.1.3. Estado del arte de los emuladores electrónicos de cargas . . . 15

1.2. Alcance y metas del trabajo 15

1.2.1. Objetivo 15

1.2.2. Guión de trabajo 15

2. Diseño y simulación de un emulador de cargas equilibradas **17**

2.1. Modelado del sistema 17

2.1.1. Visión general 17

2.1.2. Convertidor 18

2.1.3. Filtro de acoplamiento 19

2.2. Sistema de control 20

2.2.1. Estudio de las alternativas de control 21

2.2.2. Sistema de sincronización con la red 22

2.3. Emulador de cargas equilibradas 27

2.3.1. Modelo y funcionamiento 27

2.3.2. Sistema de control 28

2.3.3. Simulación y resultados 32

3. Diseño y simulación de un emulador de cargas resonantes 35

3.1. Estudio de cargas resonantes en situación de isla 35

3.1.1. Fenómeno de isla 35

3.1.2. Análisis del punto de conexión común 38

3.1.3. Efecto de la carga local resonante 38

3.2. Modelo inicial de fuentes de corriente 41

3.2.1. Modelo y funcionamiento 42

3.2.2. Resultados teóricos, simulaciones y resultados 43

3.2.3. Conclusiones 45

3.3. Emulador de Cargas Resonantes 46

3.3.1. Creación del modelo y funcionamiento 46

3.3.2. Primeras simulaciones 47

3.3.3. Cambios en el modelo 48

3.3.4. Simulaciones a diferentes potencias 52

3.3.5. Conclusiones 52

4. Planificación temporal y costes 55

4.1. Planificación temporal del trabajo 55

4.2. Análisis económico 56

4.2.1. Recursos humanos 56

4.2.2. Recursos de I+D 57

4.2.3. Coste total 57

5. Impacto medioambiental 59

6. Conclusiones 61

6.1. Actividades desarrolladas 61

6.2. Conclusiones obtenidas 61

6.3. Futuras líneas de trabajo 62

Agradecimientos 63

Bibliografia 66

Índice de figuras

1.1. Esquema general de funcionamiento de un emulador de cargas y sus ventajas frente a cargas pasivas 14

1.2. Esquema de la evolución de los modelos siguiendo el guión de trabajo 16

2.1. EMR (*Energetic Macroscopic Representation*) del sistema emulador de cargas. Fuente: [1] 17

2.2. Ejemplo de diferencia entre la corrientes promediada y conmutada producidas (abajo) a partir de los voltajes reales y promediados y el estado lógico de los interruptores (arriba). Fuente: [2] 18

2.3. Modelado promediado del convertidor trifásico 19

2.4. Esquema simple del filtro 20

2.5. Diagrama de Bode del filtro con L = 1 mH y R = 0,25 Ω 20

2.6. Modelo de bloques para una inductancia 21

2.7. Transformación de Clarke en un sistema de tensiones trifásico 23

2.8. Sincronización de los vectores α y β con el vector espacial de tensión de red 24

2.9. Esquema general de la implementación de la PLL 24

2.10. Lazo de control de la PLL implementada 25

2.11. Diagrama de Bode del controlador PI con las constantes escogidas . 26

2.12. Ángulo de red y ángulo cedido por la PLL 26

2.13. Esquema general del emulador de cargas equilibradas 27

2.14. Representación de las corrientes sintetizadas 28

2.15. Representación de la planta RL 29

2.16. Diagrama del lazo de control con compensación del acoplamiento . . 30

2.17. Diagrama del lazo de control para la corriente directa con compensación y *feedforward* 30

2.18. Respuesta de la corriente directa a una entrada escalón de 5 A . . . 31

2.19. Esquema de bloques del emulador de cargas equilibras en Simulink . 32

2.20. Resultados de la simulación de carga puramente resistiva 33

2.21. Resultados de las simulaciones de carga puramente inductiva y capacitiva 34

2.22. Tensiones y corrientes trifásicas (Carga mixta) 34

3.1. Configuración esquemática del sistema 36

3.2. Esquema de la carga local manteniendo la tensión en el PCC 37

3.3. Esquema de la carga local resonante manteniendo la tensión y la frecuencia en el PCC 37

3.4. Diagrama conceptual de la conexión de la carga resonante RLC . . . 39

3.5. Potencia activa de la carga resonante en función de la tensión del PCC para una carga de 1 kW a 230 V 39

3.6. Potencia reactiva de la carga resonante en función de la tensión del PCC para una carga de 1 kW con factor de calidad 1 40

3.7. Comportamiento del módulo y la fase de la carga resonante en función del factor de calidad q 41

3.8. Diagrama conceptual del modelo ideal basado en fuentes de corriente 42

3.9. Corrientes de la rama de red, de la rama del inversor y de la rama de las fuentes controladas para una simulación de 1 kW, 230 V y factor de calidad 1 44

3.10. Tensión y frecuencia en el PCC antes y después de la desconexión de la red para una simulación de 1 kW, 230 V y factor de calidad 1 . . 44

3.11. Resultados de la simulación alterando los valores de tensión y frecuencia en el PCC 45

3.12. Esquema general de bloques del modelo final de emulador de cargas resonantes 46

3.13. Esquema del montaje del modelo final a partir de los modelos anteriores 47

3.14. Simulación de la tensión RMS y la frecuencia en el PCC 48

3.15. Fase de la corriente de consigna y de la carga resonante para un factor de calidad de 1 50

3.16. Simulaciones de la carga RLC y diversas dinámicas del emulador con diferentes constantes de control 50

3.17. Modelo linealizado de la PLL trifásica 51

3.18. Resultados de las simulaciones con la resintonización de la PLL . . . 52

3.19. Simulación de la carga RLC y el emulador de cargas resonantes a 300 W (izquierda) y valores filtrados de la simulación (derecha) . . . 53

3.20. Simulación de la carga RLC y el emulador de cargas resonantes a 600 W (izquierda) y valores filtrados de la simulación (derecha) . . . 53

3.21. Simulación de la carga RLC y el emulador de cargas resonantes a 2,65 kW (izquierda) y valores filtrados de la simulación (derecha) . . 53

3.22. Simulación de la carga RLC y el emulador de cargas resonantes a 3 kW (izquierda) y valores filtrados de la simulación (derecha) 54

4.1. Diagrama de Gantt de la planificación del trabajo 55

Índice de tablas

3.1. Parámetros de simulación 47
3.2. Normativa sobre límites de frecuencia para la desconexión 49
3.3. Normativa sobre tiempos máximos de desconexión después de que ocurra la isla en caso de presencia de cargas resonantes 49

4.1. Presupuesto de recursos humanos 56
4.2. Presupuesto de I+D 57
4.3. Presupuesto total 57

Glosario

Acrónimos

AC *Alternating current* (Corriente Alterna)

CITCEA Centre d' Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments

DC *Direct current* (Corriente Continua)

EMR *Energetic Macroscopic Representation* (Representación energética macroscópica)

NDZ *Non Detection Zone*

PCC Punto de Conexión Común

PI Controlador Proporcional Integral

PI-MRI *Proportional-Integral Multiple Rotating Integrators*

PI-SRF *Proportional-Integral Synchronous Reference Frame*

PLL *Phase-Locked Loop* (Lazo de Seguimiento de Fase)

PWM *Pulse Width Modulation*

RLC Carga eléctrica que contiene resistencias, condensadores y bobinas

RMS *Root Mean Square*

SMS *Shift-Mode frequency Shift*

SVPWM *Space Vector Pulse Width Modulation*

SVS *Sandia Voltage Shift*

Símbolos

$cos(\phi)$ Factor de potencia

$d, q, 0$ Ejes directo, de cuadratura y homopolar

f_r Frecuencia de resonancia

i_d Componente directa de la corriente

i_q Componente en cuadratura de la corriente

I_{abc} Corrientes trifásicas

i_{abc} Corrientes trifásicas instantáneas

i_{DC} Corriente instantánea del bus DC

q Factor de calidad de la carga resonante

v_a, v_b, v_c Tensiones instantáneas de las fases a, b y c del lado del convertidor

v_d Componente directa de la tensión del lado del convertidor

v_q Componente en cuadratura de la tensión del lado del convertidor

V_{con} Tensiones trifásicas del lado del convertidor

v_{con} Tensiones trifásicas instantáneas del lado del convertidor

v_{DC} Tensión instantánea del bus DC

V_{red} Tensiones trifásicas de red

v_{red} Tensiones trifásicas instantáneas de red

L Inductancia de las bobinas del filtro de acoplamiento

P Potencia activa

Q Potencia reactiva

R Resistencia parásita de las bobinas del filtro de acoplamiento

S Potencia aparente

Símbolos griegos

α, β, γ Ejes de la transformación de Clarke

$\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c$ Ciclos de trabajo del convertidor para las ramas a,b y c

ωn Velocidad angular del sistema

ω Velocidad angular de red

θ Ángulo de red

ξ Factor de amortiguamiento

1. Introducción y alcance del trabajo

1.1. Electrónica de potencia y emuladores electrónicos

1.1.1. Introducción

En las últimas décadas, el crecimiento de la electrónica de potencia ha permitido a la industria y a la sociedad llegar a unos altos niveles de automatización y eficiencia energética. Los proyectos de generación alternativa de electricidad, redes inteligentes, microrredes, control de sistemas y muchos más están cada vez más presentes en la ingeniería, haciendo evidente la necesidad de equipos electrónicos de ensayos y bancadas de pruebas para asegurar el correcto y eficiente funcionamiento de las nuevas tecnologías antes de su lanzamiento comercial.

Para investigar el funcionamiento de equipos electrónicos en un amplio rango de potencias son necesarias cargas pasivas ajustables, las cuales disipan en forma de calor una gran cantidad de la energía substraída además de presentar poca flexibilidad en lo referente a la caracterización de cargas. De esta problemática nace la voluntad de innovar para mejorar la eficiencia energética de este tipo de ensayos.

Se ha considerado en los últimos años el diseño y aplicación de los llamados emuladores electrónicos. Éstos consisten en equipos de electrónica de potencia que permiten imitar el comportamiento de diferentes tipos de sistemas eléctricos y electrónicos para estudiar su impacto en otros sistemas sin necesidad de crear equipos pasivos, los cuales resultan altamente limitados por el hecho de no poder ofrecer más de un comportamiento y potencia determinados escogidos a la hora de su diseño. Actualmente existen varios diseños de equipos electrónicos capaces de emular otros sistemas eléctricos para su utilización en pruebas de funcionamiento o rendimiento: emuladores de redes con perturbaciones programables [3], emuladores de paneles fotovoltaicos para probar el rendimiento de inversores solares [4, 5], generadores de huecos de tensión para comprobar el impacto en equipos de potencia [6], entre otros. Dentro de este grupo de equipos, algunos de ellos actualmente en investigación, encontramos los emuladores de cargas.

1.1.2. Emuladores electrónicos de cargas

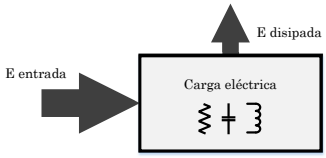
La emulación de cargas propone una plataforma donde el comportamiento de una carga eléctrica puede ser emulado en equipos de *hardware*, a niveles de potencia reales, dirigidos por uno o más controladores digitales. De esta manera, el emulador de cargas puede proveer, de manera muy flexible, diferentes características de carga con las cuales diferentes sistemas electricos o electrónicos pueden ser puestos

a prueba en diferentes escenarios. Dicho de otra manera, la emulación de cargas se basa en el control de uno o más convertidores de potencia de tal manera que su comportamiento imite sistemas eléctricos como máquinas de inducción, sistemas de alumbrado, equipos de potencia, conjuntos aglomerados de cargas en una microred, y muchos más, para poder visualizar, de manera totalmente controlada, flexible y eficiente, las perturbaciones que dichos sistemas introducen al equipo o sistema a estudiar.

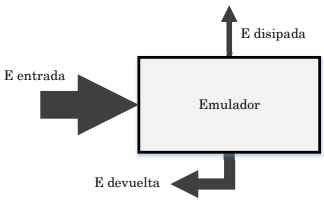
El mayor beneficio de los emuladores de cargas reside en su habilidad para emular una gran variedad de escenarios diferentes con el mismo *hardware*, de manera que es posible realizar ensayos a múltiples potencias (dentro de un rango de diseño) y con cargas ajustables, todo con el mismo equipo emulador (Figuras 1.1a y 1.1b). Además, permiten contemplar un tipo de estructura denominada *Back to back* [7] en la cual se enfrentan dos convertidores conectados por un bus de contínua, con lo cual se permite reducir significativamente las pérdidas gracias a la posibilidad de devolver la energía no disipada a la alimentación (Figuras 1.1c y 1.1d).

(a) Carga eléctrica pasiva

(b) Emulador de cargas eléctricas



(c) Flujo de energía en una carga pasiva



(d) Flujo de energía en un emulador de cargas eléctricas con estructura *Back to back*

Figura 1.1: Esquema general de funcionamiento de un emulador de cargas y sus ventajas frente a cargas pasivas

En conclusión, el objetivo primario de un emulador de cargas es el diseño de un equipo electrónico de potencia controlado para la emulación de una carga eléctrica. Así pues, el comportamiento de este tipo de emuladores debe acercarse al de la carga que se quiere representar, generando o consumiendo las corrientes deseadas una vez sea conectado a una fuente de tensión. Esto se consigue dirigiendo el convertidor con un sistema de control para lograr que el equipo sintetice las mismas corrientes que consumiría la carga eléctrica a simular, tanto en amplitud como en fase.

1.1.3. Estado del arte de los emuladores electrónicos de cargas

En primer lugar, en el ámbito científico se pueden encontrar algunas publicaciones en el campo de los emuladores de cargas tales como [8], [9], [10], [11] y [12]. Éstas consisten en diferentes estudios de diseño, modelado y control de equipos electrónicos basados en convertidores con el fin de emular diferentes tipos de cargas eléctricas.

Por otra parte, aunque los emuladores electrónicos de cargas aún son motivo de investigación, es posible encontrar diversas compañías que comercializan equipos de esta familia. Un ejemplo es la empresa E&M Power la cual ofrece emuladores de diferentes tipos de cargas, entre los cuales destacan los emuladores de motores industriales, ya que suponen un impacto importante para la red eléctrica de una fábrica. Por otra parte, CITCEA UPC comercializa un equipo capaz de emular el comportamiento las curvas de tensión-corriente de un panel fotovoltaico, así como diferentes situaciones de irradiación y temperatura.

Cabe destacar que no existen actualmente emuladores electrónicos concebidos directamente para el fin que se quiere conseguir con este trabajo: emular cargas resonantes para poner a prueba diferentes sistemas de detección de isla en inversores fotovoltaicos.

1.2. Alcance y metas del trabajo

1.2.1. Objetivo

Este trabajo está motivado por la intención de diseñar un emulador electrónico que imite el comportamiento de cargas resonantes, las cuales introducen una problemática en la detección de isla de los equipos suministradores de energía.

1.2.2. Guión de trabajo

Se pretende, pues, modelar, diseñar y simular un emulador electrónico capaz de actuar como una carga eléctrica en resonancia a la frecuencia de la red, con el cual sea posible poner a prueba diferentes sistemas de detección de isla en inversores solares. Para conseguir tal meta se seguirán los siguientes pasos:

En el Capítulo 2 se diseñará un emulador de cargas equilibradas, cuyo proceso ayudará a entender la base y el funcionamiento de los emuladores electrónicos de cargas.

- Se diseñará un modelo ideal que emule el comportamiento del sistema con fuentes de corriente controladas (Figura 1.2b).
- Se aprenderá a modelar y controlar un convertidor de potencia para que sintetice las corrientes deseadas.
- Se combinarán los conceptos de los dos puntos anteriores para diseñar un equipo que emule el comportamiento físico de una carga eléctrica deseada basándose en el consumo específico de las corrientes (Figura 1.2c).

Posteriormente, en el Capítulo 3, se diseñará un emulador de cargas resonantes apoyándose en los conceptos y modelos desarrollados anteriormente.

- Se realizará un estudio sobre las cargas resonantes en isla para entender el funcionamiento del sistema.
- Se creará un modelo ideal basado en fuentes de corriente controladas que imite el comportamiento de una carga RLC de potencia y factor de calidad deseados (Figura 1.2e).
- Se modificará el modelo del Capítulo 2 para conseguir un emulador de cargas resonantes basado en el control del convertidor (Figura 1.2f).

Finalmente, en el capítulo de conclusiones, se presentarán los resultados obtenidos, se valorarán los objetivos alcanzados y se propondrán posibles líneas futuras de trabajo.

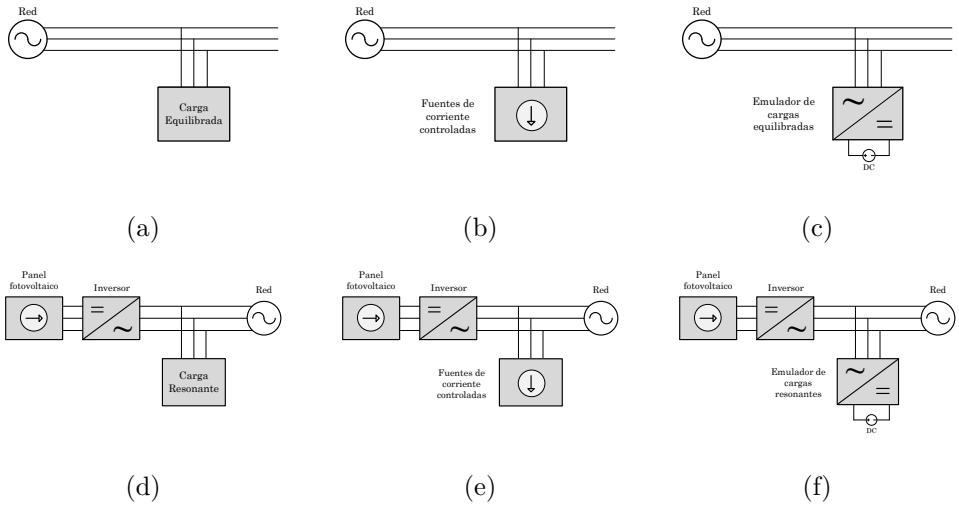


Figura 1.2: Esquema de la evolución de los modelos siguiendo el guión de trabajo

2. Diseño y simulación de un emulador de cargas equilibradas

2.1. Modelado del sistema

2.1.1. Visión general

Para comenzar el diseño, es necesario dividir el equipo en sus módulos generales con la finalidad de entender bien el sistema y su funcionamiento:

- Para la emulación de cargas se usará un convertidor de potencia controlado para sintetizar las tensiones y corrientes deseadas en cada instante.
- Para conectar el convertidor a la red, será necesario un filtro de acoplamiento que permita controlar las corrientes, limitarlas pasivamente y filtrar los posibles armónicos que puedan nacer en las conmutaciones.
- Para alimentar el convertidor, se usará una fuente de tensión continua que entregará la energía necesaria al equipo para que este pueda sintetizar las tensiones deseadas en el bus de alterna.
- Finalmente, un sistema de control recogerá muestras del circuito y las usará para calcular y enviar las señales de mando necesarias al convertidor para la obtención de las corrientes a emular.

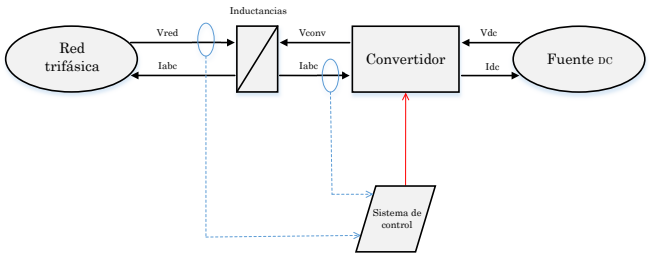


Figura 2.1: EMR (*Energetic Macroscopic Representation*) del sistema emulador de cargas. Fuente: [1]

2.1.2. Convertidor

El convertidor es la parte central del modelo. Consiste en un puente trifásico que nos permite sintetizar las tensiones alternas de cada fase en función de la tensión del bus de continua y los ciclos de trabajo otorgados por el sistema de control. Su funcionamiento se basa en la modulación por ancho de pulsos (PWM o *Pulse Width Modulation*), con la cual se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica para controlar la cantidad de energía que se transmite [7].

Para modelar el funcionamiento del convertidor se puede recurrir a dos técnicas: el modelo promediado y el modelo conmutado [13].

- El modelo promediado consiste en considerar la media ponderada de la energía transformada. Es de fácil modelado y rápido de analizar pero pierde información de rizado, a menudo importante para el estudio de las pérdidas en conmutación.
- Por otra parte, el modelo conmutado se rige por un conjunto más fiable de ecuaciones, las cuales modelan de manera más rigurosa el funcionamiento real del convertidor. Contiene mucha más información, haciéndolo más preciso que el modelo promediado, pero a la vez, al ser de más difícil modelado y cálculo, esta técnica acaba siendo mucho más lenta de simular y, a la vez, más compleja de analizar.

La Figura 2.2 muestra un ejemplo de la diferencia entre las corrientes sintetizadas por un modelo promediado y un modelo conmutado.

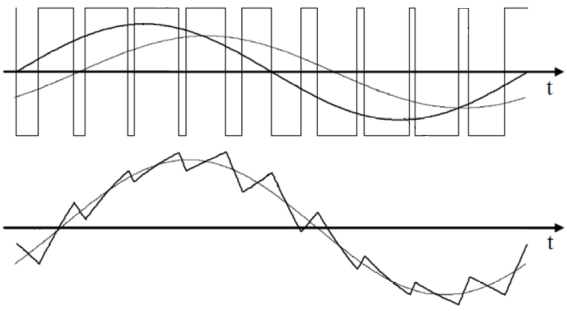


Figura 2.2: Ejemplo de diferencia entre la corrientes promediada y conmutada producidas (abajo) a partir de los voltajes reales y promediados y el estado lógico de los interruptores (arriba). Fuente: [2]

Como las magnitudes a estudiar son las características fundamentales de las corrientes y el consumo medio de potencia, se usará el modelo promediado, puesto que nos ofrece un modelado y una simulación relativamente rápida al no tener que darle importancia a las pérdidas por conmutación.

Como se muestra en la Figura 2.3, el modelado del convertidor esta compuesto por una fuente de corriente controlada en la parte DC y tres fuentes de tensión controladas en la parte AC. La fuente de corriente del lado DC permite la representación del comportamiento medio de la corriente en el bus de continua siguiendo la Ecuación 2.1, siendo $\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c$ los ciclos de trabajo PWM de las ramas a, b y c del convertidor, respectivamente, y i_a, i_b, i_c las correspondientes corrientes trifásicas. Por otro lado, las tres fuentes de tensión AC representan los valores medios de tensión de las tres fases v_a, v_b, v_c siguiendo las ecuaciones

$$i_{dc} = \alpha_a i_a + \alpha_b i_b + \alpha_c i_c \tag{2.1}$$

$$v_a = \alpha_a \ v_{DC} \tag{2.2}$$

$$v_b = \alpha_b \ v_{DC} \tag{2.3}$$

$$v_c = \alpha_c \ v_{DC} \tag{2.4}$$

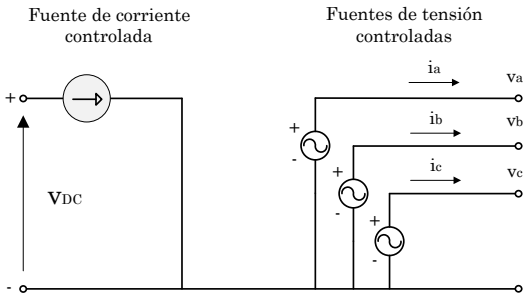


Figura 2.3: Modelado promediado del convertidor trifásico

Haciendo uso de las ecuaciones anteriores se modela el bloque del convertidor que se utilizará para la construcción de los emuladores de cargas.

2.1.3. Filtro de acoplamiento

Para el control de las corrientes será necesaria la utilización de filtros compuestos por elementos pasivos, con los cuales, además, se limitarán las intensidades y se filtrarán los armónicos de gran orden, fruto de las conmutaciones en los convertidores reales. Estos filtros se clasifican principalmente en filtros inductivos de primer orden, filtros de segundo orden (LC) y filtros de tercer orden (LCL) [3].

Como el principal objetivo para la emulación de cargas es el control de las corrientes, se modelará un filtro basado únicamente en inductancias (Filtro L), con las cuales se conseguirá controlar las corrientes de cada fase dependiendo de la caída de tensión provocada por el convertidor (Figura 2.4; V_{red}: Tensiones de red, V_{con}: Tensiones en bornes del convertidor, I_{abc}: Corrientes de fase).

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación que describe el funcionamiento físico del sistema y teniendo en cuenta la resistencia parásita que ofrece el conductor se obtiene su función de transferencia, la cual consiste en un filtro pasa bajos de primer orden

$$v_{red}(t) - v_{con}(t) = L\,\frac{di_{abc}(t)}{dt} \tag{2.5}$$

$$\frac{V_{red}(s) - V_{con}(s)}{I_{abc}(s)} = \frac{1}{Ls + R} \tag{2.6}$$

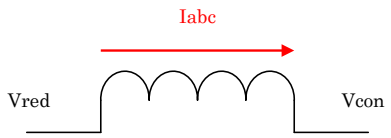


Figura 2.4: Esquema simple del filtro

De esta manera, el dimensionamiento de las bobinas consistirá en escoger los parámetros de la inductancia y la resistencia parásita para mantener el filtrado, rizado y control de las corrientes en unos margenes deseados. Puesto que al usar el modelo de convertidor promediado no nos afectará el rizado, para este estudio se escoge L = 1 mH y R = 0,25 Ω, con lo cual se obtiene una atenuación de las señales de alta frecuencia, como la escogida para la frecuencia de conmutación (20 kHz). Como se puede observar en la Figura 2.6, para el modelado del bloque filtro se representa su dinámica (Figura 2.5) con la función de transferencia antes mencionada (Ecuación 2.6).

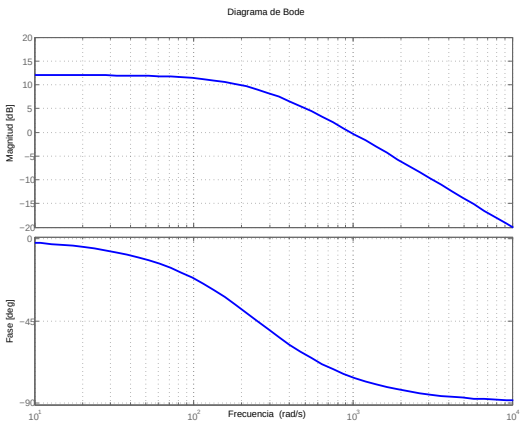


Figura 2.5: Diagrama de Bode del filtro con L = 1 mH y R = 0,25 Ω

2.2. Sistema de control

Para que el equipo responda de manera deseada será necesario establecer un lazo de control que recoja muestras del sistema y regule los ciclos de trabajo del convertidor

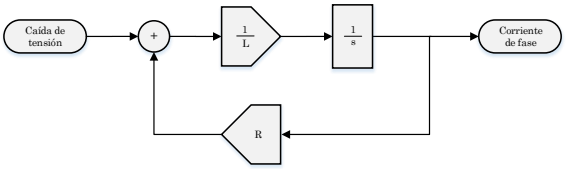


Figura 2.6: Modelo de bloques para una inductancia

para alcanzar y mantener las consignas introducidas por el usuario.

Existen diferentes tipologías de control para dirigir el accionamiento de un convertidor, cada una con sus ventajas y desventajas que dependen, en gran parte, del diseño del sistema.

2.2.1. Estudio de las alternativas de control

Control PI-SRF

Los controladores PI son de fácil implementación y funcionamiento, además de estar ampliamente extendidos en la industria. Sin embargo, tienen una gran restricción: sólo pueden llegar a controlar magnitudes de referencia constante con error nulo. De esta problemática nace el control en sistemas de referencia síncronos (PI-SRF) [14]. El control PI-SRF consiste en la utilización de controladores PI en un sistema de referencia síncrono (*Synchronous Reference Frame*) adaptado a la velocidad de oscilación de la red, en el cual las magnitudes variables de tensión y corriente permanecen constantes para el controlador, permitiendo obtener un error estacionario nulo. En el caso de sistemas trifásicos, esto se consigue con las transformadas matemáticas de Clarke y Park (ver Apartado 2.2.2).

Para la utilización de este tipo de controlador es necesaria la implementación de un lazo de seguimiento de fase o PLL (*Phase Locked Loop*), puesto que el lazo de control principal necesita conocer la fase (ángulos de rotación) y la frecuencia (velocidad a la que cambian los ángulos de rotación) de la red para sobreponerse a cualquier cambio en ésta y poder inyectar o consumir corriente a una determinada fase respecto la misma.

Por otra parte, aunque el control PI-SRF es una buena opción para sistemas trifásicos, tiene algunas desventajas:

- Necesitan un segundo SRF rotando en sentido contrario si se quiere estudiar sistemas desequilibrados, de manera que la componente de secuencia inversa pueda ser seguida también con un error permanente nulo.
- Si se tiene que tratar con un número elevado de armónicos, es necesario disponer de diversos sistemas de referencia síncronos (PI-MRI, *proportional-integral multiple rotating integrators*).

- No son aplicables directamente a sistemas monofásicos, ya que necesitan una adaptación que consiste en generar un sistema virtual desacoplado al real que permita simular un sistema de dos ejes.

Controlador resonante

Los controladores resonantes [14] se basan en el desplazamiento de la ganancia infinita de 0 Hz a la frecuencia de diseño deseada. Esto permite seguir señales sinusoidales con un error permanente nulo, una carga computacional menor (gracias a evitar las transformadas mencionadas anteriormente) y con una aplicabilidad directa en sistemas monofásicos.

En nuestro caso, un controlador resonante equivale a un PI implementado en SRF con un desplazamiento de frecuencia de $-hw_1$ en todas las frecuencias (siendo $hw_1 = w_0$ la velocidad de rotación de la referencia). Ésto permite controlar una señal alterna con un error permanente nulo y una dinámica equivalente a la del método PI-SRF, pero sin necesidad de adaptar la señal a la entrada del controlador.

Por otro lado, los controladores resonantes ofrecen un control muy selectivo, de manera que si se desea gestionar más de una componente es necesario añadir más controladores resonantes en paralelo, con lo cual se necesitaría un tiempo mayor de cómputo [14].

Elección

Dado que se quiere trabajar con cargas equilibradas y se desea simplificar la realización del modelo, se utilizarán controladores PI-SRF para la construcción de todos los sistemas de control del trabajo.

2.2.2. Sistema de sincronización con la red

Introducción de la PLL

Como se ha comentado anteriormente, es necesaria la utilización de un sistema de referencia síncrono (SRF) para ceder al controlador PI un marco donde las magnitudes a controlar tengan una referencia constante.

Para que el sistema de control funcione correctamente es preciso saber a cada instante la frecuencia y la velocidad angular de la red ya que, aunque ésta sea más o menos estable, el control tiene que poder detectar posibles cambios y actuar a tiempo para hacer las modificaciones pertinentes en las variables del sistema.

De esta manera, el sistema PLL permitirá al sistema consumir o inyectar corrientes en fase o con un desfase controlado.

Transformadas de Clarke y Park

Para la construcción del sistema PLL se utilizan dos cambios de base conocidos como las transformadas de Clarke y Park [15]. El entendimiento de las transformaciones de las variables trifásicas en constantes dentro del marco de referencia síncrono es crucial para el sistema de control.

De primera mano, dado un sistema trifásico cualquiera (tensión, corriente, flujo, etc.), sus magnitudes pueden ser representadas en un plano compuesto por tres ejes a, b y c, los cuales están separados 120º entre sí. La transformada de Clarke permite un cambio de base con el cual es posible representar las magnitudes trifásicas en un plano definido por dos ejes α, β, separados ortogonalmente, y un tercer eje γ perpendicular a estos (Figura 2.7). Como las magnitudes a controlar en el diseño de la PLL son las tensiones de red, se lleva a cabo la transformación

$$\begin{pmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_\gamma \end{pmatrix} = K \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} \tag{2.7}$$

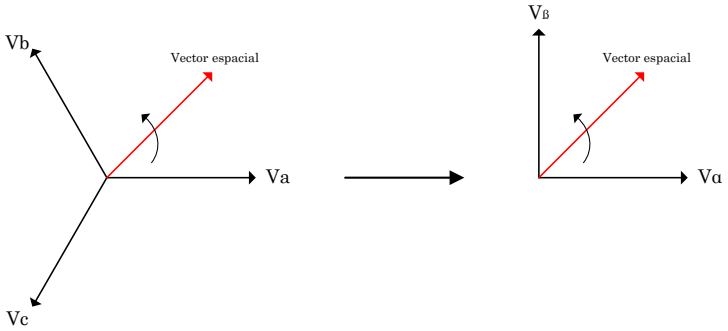


Figura 2.7: Transformación de Clarke en un sistema de tensiones trifásico

No obstante, es habitual prescindir de la componente perpendicular v_γ, ya que ésta representa la tensión del hilo neutro, la cual es nula en un sistema equilibrado o de tres hilos. Cabe destacar, también, que la constante K que multiplica la matriz puede variar entre $\frac{2}{3}$ o $\sqrt{\frac{2}{3}}$ dependiendo de si se quiere conservar el módulo del vector o la potencia en la transformación, respectivamente [16].

Cómo los ejes α, β siguen siendo referencias estacionarias, el siguiente paso consiste en dotar de movimiento a los ejes para giren en sincronía con el vector espacial de la tensión de red [15]. Para conseguirlo, se aplica un giro respecto el eje γ transformando los ejes estacionarios α, β en ejes de referencia rotatorios síncronos denominados directo (d) y de cuadratura (q), los cuales se desplazan a la misma velocidad que las tensiones generadas por la red (Figura 2.8)

$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} cos(\theta) & sin(\theta) & 0 \\ -sin(\theta) & cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_\gamma \end{pmatrix} \tag{2.8}$$

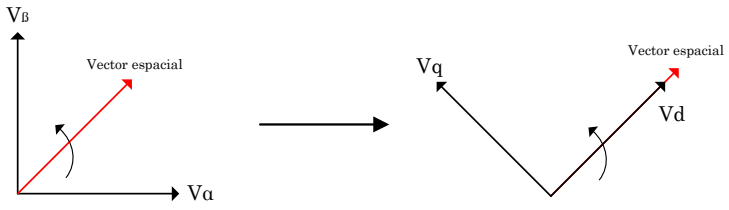


Figura 2.8: Sincronización de los vectores α y β con el vector espacial de tensión de red

La concatenación de la transformada de Clarke y el giro mencionado se denomina transformada de Park

$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} cos(\theta) & cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -sin(\theta) & -sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} \tag{2.9}$$

Al tratar con sistemas equibrados de tres hilos, puede prescindirse de la variable v_0 correspondiente a la componente homopolar de la tensión. De esta manera, la magnitudes alternas de la red se vuelven constantes dentro del marco del SRF, haciendo posible trabajar con controladores PI.

Implementación de la PLL

El bloque PLL se implementa en dos subsistemas. El primero, se encarga de aplicar la transformada de Park para convertir las tensiones trifásicas de la red en los vectores directo (d) y de cuadratura (q) y, el segundo, consiste en un sistema de control que proporciona el ángulo de la red, realimentando el primer bloque para cerrar el sistema (Figura 2.9).

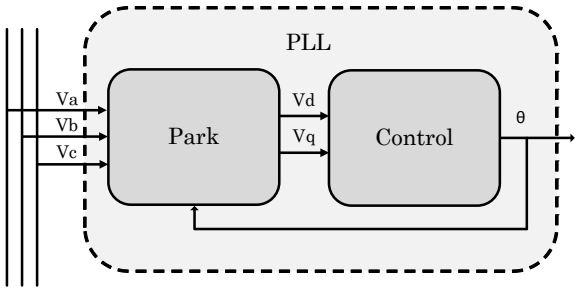


Figura 2.9: Esquema general de la implementación de la PLL

Así pues, es necesario imponer una condición al sistema de control para que calcule correctamente el ángulo: se elige forzar que la componente en cuadratura del vector tensión sea nula, de esta manera se consigue el posicionamiento del eje directo d sobre el vector espacial de la tensión de red, haciendo que la referencia móvil gire en sincronía con la misma.

Para completar el sistema de control se impone, como segunda condición, que el ángulo de rotación inicial sea nulo. Con esto, existirá una desincronización inicial con la red cuando ésta empiece a rotar, pero el sistema de control conseguirá alcanzarla en un tiempo límite establecido en su sintonización.

En la Figura 2.10 se puede apreciar el lazo de control del sistema PLL, el cual mantiene, gracias a un controlador PI, la componente V_q a cero, además de proveer el valor de la tensión, frecuencia y ángulo actuales de la red.

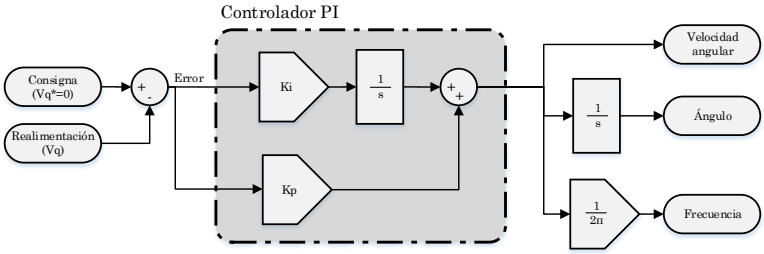


Figura 2.10: Lazo de control de la PLL implementada

Sintonización de la PLL

El controlador PI se comporta de forma parecida a un filtro pasa-bajos, de manera que actuará como un controlador por avance de fase (Figura 2.11). En relación a la dinámica de su respuesta, podemos destacar que existe una confrontación en las características que se desean del controlador. Por una parte cuanto mayor sea el ancho de banda del controlador de la PLL, mayor será el margen de frecuencias sobre el cual se tendrá control, lo que significará una respuesta más rápida, pero con posibles apariciones de armónicos en el ángulo calculado (si la red también presenta armónicos) sobre los cuales el controlador no tendrá control y degradarán la señal. Sin embargo, disminuir el ancho de banda permitirá filtrar más armónicos, pero también derivará en una señal más lenta, provocando en la PLL un retardo al sincronizarse con el ángulo de red.

A partir de la ecuación en variables de Laplace se obtiene la ecuación en el dominio frecuencial del controlador, de la cual se obtiene la relación entre la frecuencia de corte y sus constantes Kp y Ki

$$G_{c,\,PLL}(s) = \frac{K_i}{s} + K_p = \frac{K_i + K_p \cdot s}{s} \tag{2.10}$$

$$G_{c,\,PLL}(j\omega) = \frac{K_i + K_p \cdot j\omega}{\omega} = K_i \frac{1 + \frac{K_p}{K_i} j\omega}{j\omega} \tag{2.11}$$

$$G_{c,\,PLL}(j\omega_{corte}) = 0 \rightarrow f_{corte} = \frac{K_i}{K_p \cdot 2\pi} \tag{2.12}$$

Al tratar con una red que puede poseer distorsiones, es importante tener en cuenta posibles apariciones de armónicos. De esta manera, se sintoniza la PLL con un ancho de banda de 30 Hz para conseguir una respuesta rápida excluyendo los posibles armónicos. Así pues, escogiendo una frecuencia de corte de 30 Hz y una $K_p = 5$, se obtiene $K_i = 300\pi$. Se sintoniza el controlador con estas constantes y se realizan simulaciones para visualizar el comportamiento de la PLL. Se pueden ver gráficamente en la Figura 2.12 que se obtiene un comportamiento deseado, ya que se obtiene un ángulo correcto de la red así como una respuesta rápida (estable antes de 10 ms).

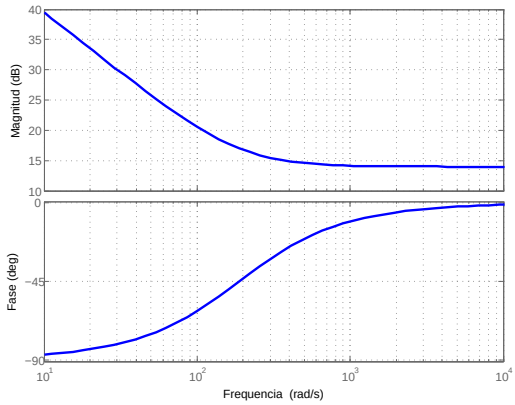


Figura 2.11: Diagrama de Bode del controlador PI con las constantes escogidas

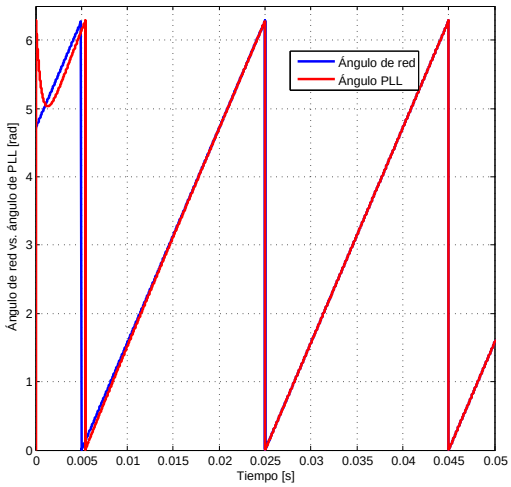


Figura 2.12: Ángulo de red y ángulo cedido por la PLL

Cabe destacar que se realiza una sintonización simple de la PLL con la cual se consigue el principal objetivo, que es hacer funcionar el modelo. En la sección 3.3.3 se realizará un estudio más exhaustivo del sistema PLL con el fin de obtener una sintonización óptima.

2.3. Emulador de cargas equilibradas

2.3.1. Modelo y funcionamiento

Para poder diseñar un emulador que imite el comportamiento de cargas equilibradas es necesario definir el comportamiento de las mismas [17].

Se definen como cargas lineales el conjunto de cargas eléctricas que mantienen una relación lineal entre la tensión y la corriente cuando éstas son conectadas a una tensión sinusoidal. Están constituidas por resistencias, inductancias y/o condensadores. Si, además, estas cargas consumen la misma corriente media en cada una de las tres fases, se denominan cargas equilibradas, dado que las corrientes se anulan y es posible prescindir de un neutro. De esta manera, el emulador se implementará en un sistema trifásico de tres hilos que utilizará el convertidor para controlar las tensiones del lado AC induciendo indirectamente, por medio de las inductancias, las corrientes trifásicas, lineales y equilibradas, que provocarían la carga a emular.

Cabe destacar que el convertidor se abastecerá de un bus de continua que dispondrá de una fuente de tensión ideal de 650 V para poder inyectar sobre una red trifásica de 400 V. Más adelante se comentarán diferentes tipologías para un posible circuito de regeneración. Para los bloques del filtro, del convertidor y de la PLL se utilizarán los descritos en capítulos anteriores (Figura 2.13).

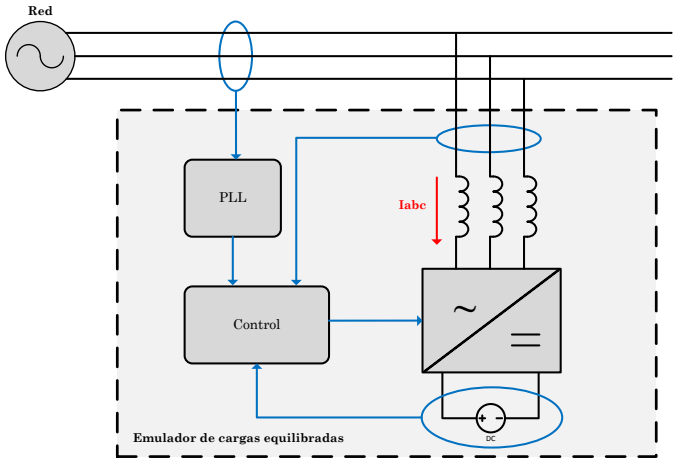


Figura 2.13: Esquema general del emulador de cargas equilibradas

Para imitar una carga equilibrada, el emulador sintetizará las corrientes trifásicas en función de la red controlando la magnitud de los vectores de corriente directa (i_d) y corriente en cuadratura (i_q) derivados de la transformación de Park (Ver Apartado 2.2.2).

Por una parte, el signo determinará si las corrientes son consumidas por la carga (+) o inyectadas a la red (-) en el caso de i_d, y si la carga es inductiva (+) o capacitiva (-) en el caso de i_q.

Por otra parte, el módulo de la magnitud de los vectores determinará el valor pico de las corrientes trifásicas

$$Mod = \sqrt{i_q^2 + i_d^2} \tag{2.13}$$

Finalmente, se podrá controlar el ángulo de desfase entre corriente y tensión con

$$\alpha = arctg\left(\frac{iq}{id}\right) \tag{2.14}$$

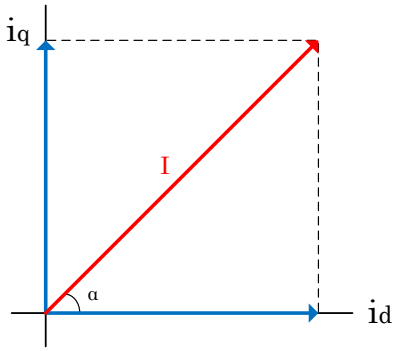


Figura 2.14: Representación de las corrientes sintetizadas

2.3.2. Sistema de control

Modelado de la planta

El primer paso para diseñar el sistema de control es describir matemáticamente el funcionamiento de la planta, que en este caso estará compuesta por el filtro y el convertidor. Asimilando que el convertidor trabaja como una ganancia unitaria, la planta del sistema se reduce al comportamiento de las inductancias. De esta manera, extrapolando la Ecuación 2.5 al sistema trifásico y teniendo en cuenta el sentido de las corrientes impuesto en el apartado anterior, podemos sintetizar el modelo al sistema de ecuaciones

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} \frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R}{L} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} v_{con_A} - v_{red_A} \\ v_{con_B} - v_{red_B} \\ v_{con_C} - v_{red_C} \end{pmatrix} \tag{2.15}$$

Aplicando la transformación de Park al sistema, desarrollando la relación y teniendo en cuenta que podemos menospreciar la componente homopolar por tratar con cargas equilibradas, obtenemos las ecuaciones dinámicas de la planta en referencia síncrona. Cabe destacar que, a diferencia del sistema *abc*, el sistema *dq* está acoplado

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} \frac{R}{L} & -w \\ w & \frac{R}{L} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} v_{con_d} - v_{red_d} \\ v_{con_q} - v_{red_q} \end{pmatrix} \tag{2.16}$$

Finalmente, si describimos el sistema en variables de Laplace, obtenemos las ecuaciones con las cuales podemos construir el modelo de la planta (ver Figura 2.15) para diseñar su sistema de control

$$i_d = \frac{1}{Ls + R}\left(\omega L i_q + (v_{con_d} - v_{red_d})\right) \tag{2.17}$$

$$i_q = \frac{1}{Ls + R}\left(-\omega L i_d + (v_{con_q} - v_{red_q})\right) \tag{2.18}$$

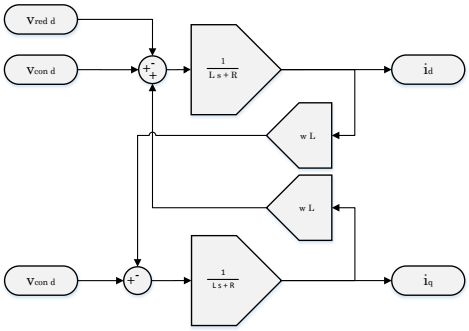


Figura 2.15: Representación de la planta RL

Como se puede observar, al usar controladores PI las variables i_d e i_q dependen la una de la otra. Éste fenómeno se denomina acoplamiento y resulta perjudicial para el correcto funcionamiento del control de la planta. Más adelante, en el diseño del sistema de control, tendrá que barajarse la opción de desacoplar el sistema o asumir el error. Cabe destacar también que no se ha tenido en cuenta v_{red_q} puesto que como se ha comentado en el Apartado 2.2.2, tendrá un valor nulo gracias a la PLL.

Lazo de control

El primer paso a realizar es resolver el problema del acoplamiento de la planta RL en componentes dq. Para tratar con este punto se pueden adoptar dos alternativas:

- Estudiar el impacto del acoplamiento en el sistema de control y aceptarlo si se mantiene en unos márgenes establecidos.
- Compensar el acoplamiento de manera forzada aplicando las señales acopladas a la salida del controlador para poder sintonizarlo con la planta sin acoplamiento [18].

Para evitar posibles problemas en el sistema de control, se decide actuar con la segunda alternativa y se procede a compensar el acoplamiento. La Figura 2.16 muestra el diagrama de bloques seguido para compensar el acoplamiento en las dos componentes.

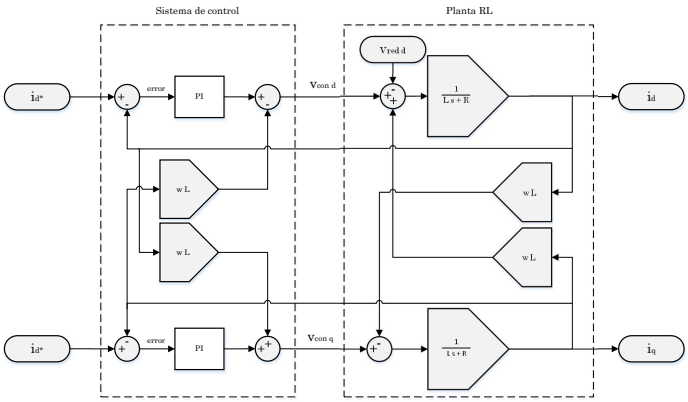


Figura 2.16: Diagrama del lazo de control con compensación del acoplamiento

Es importante destacar también que al otro lado de las inductancias está la tensión de red. Para aligerar la carga computacional del controlador, se procede a la técnica del *feedforward*, la cual consiste en sumar esta perturbación en el lazo de control para hacer trabajar al controlador en valores diferenciales (Figura 2.17).

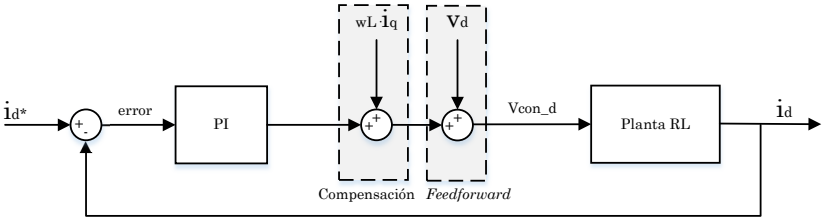


Figura 2.17: Diagrama del lazo de control para la corriente directa con compensación y *feedforward*

Se sintonizarán los dos lazos de control con las mismas constantes proporcionales e integradoras para que el sistema en lazo cerrado presente el mismo comportamiento dinámico en los dos ejes. Así pues, la sintonización se realizará con el lazo de la corriente directa y se aplicará el mismo PI al lazo de corriente en cuadratura.

Una vez resuelto el problema del acoplamiento, la planta del sistema puede ser tratada como la ecuación en variables de Laplace de las inductancias (Ecuación 2.6). Así pues, la función de transferencia del sistema realimentado (PI y planta) queda representada en

$$G(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} = \frac{\frac{K_p s + K_i}{s}\frac{1}{Ls+R}}{1 + \frac{K_p s + K_i}{s}\frac{1}{Ls+R}} \tag{2.19}$$

Desarrollando la ecuación podemos obtener el denominador del sistema, el cual comparamos a un denominador de un sistema general de segundo orden para conseguir la relación entre la constante de amortiguamiento ξ y la velocidad angular del sistema ω_n deseadas y las constantes de las inductancias (L, R)

$$\begin{cases} s^2 + (\frac{K_p+R}{L})s + \frac{K_i}{L} \\ s^2 + 2\xi\omega ns + \omega n^2 \end{cases} \tag{2.20}$$

$$\begin{cases} K_p = 2\xi\omega nL - R \\ K_i = \omega n^2 L \end{cases} \tag{2.21}$$

Finalmente, se escogen el sobrepico y el tiempo de establecimiento deseados para la respuesta y se calculan las constantes del controlador con el sistema de ecuaciones

$$\begin{cases} t_e(2\,\%) = \frac{4}{\xi\omega n} \\ Sp = exp(-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}) \end{cases} \tag{2.22}$$

Imponiendo un sobrepico del 25 % y un tiempo de establecimiento de 1 ms se obtiene $K_p = 7{,}75$ y $K_i = 98169$.

En la Figura 2.18 se muestra la simulación de la corriente directa para una entrada escalón de 5 A y un tiempo de simulación de 10 ms. Se puede observar que la respuesta tiene un sobrepico del 38 % y un tiempo de establecimiento de 1,5 ms, aproximadamente. La diferencia entre los valores deseados y obtenidos se puede otorgar al cero del sistema en lazo cerrado, el cual afecta a la dinámica de la respuesta. Esto no sugiere un problema para el control ya que los parámetros de la respuesta se mantienen en unos límites aceptables.

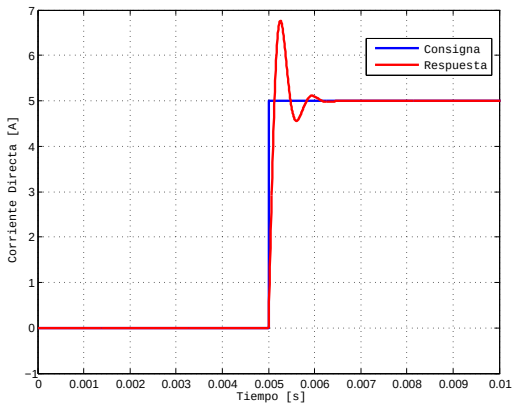


Figura 2.18: Respuesta de la corriente directa a una entrada escalón de 5 A

Finalmente, para cerrar el lazo de control, se ha hecho uso de un modulador por SVPWM (*Space Vector Pulse Width Modulation*) el cual convierte las consignas de las componentes directa y en cuadratura de las tensiones calculadas por el sistema de control en los ciclos de trabajo que tiene que aplicar el convertidor para sintetizar las tensiones alternas, y forzar así que el sistema produzca las corrientes trifásicas deseadas. Se escoge un modulador SVPWM dado que permite maximizar el aprovechamiento de la tensión del bus DC [2].

2.3.3. Simulación y resultados

Modelo de bloques utilizado

El esquema conceptual del emulador de cargas equilibradas simulado en Matlab® es el de la Figura 2.19.

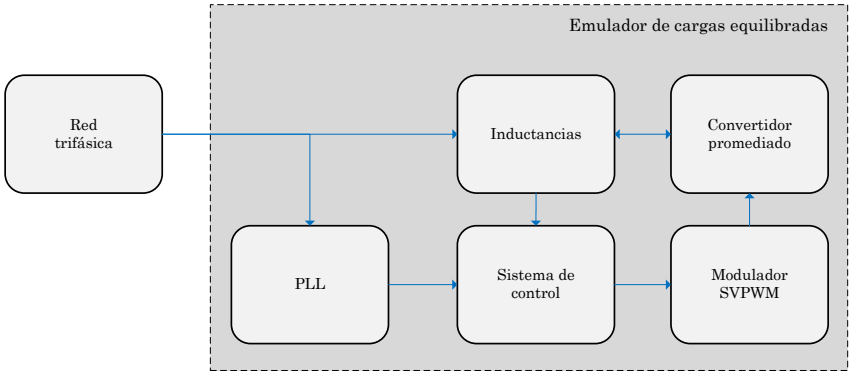


Figura 2.19: Esquema de bloques del emulador de cargas equilibras en Simulink

Dado que no es habitual caracterizar una carga eléctrica por las corrientes que consume, se le ha implementado al modelo un bloque con el cual, introduciendo los valores de potencia S y factor de potencia $cos(\phi)$ que se desean para la carga, se generan las consignas de las componentes directa y en cuadratura de las corrientes trifásicas a emular [19] siguiendo las ecuaciones

$$I_d = \frac{S \cdot cos(\phi)}{V_{d_{red}}} \tag{2.23}$$

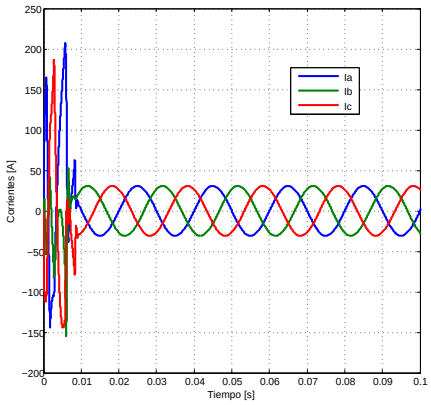
$$I_q = \frac{S \cdot \sqrt{1 - cos(\phi)^2}}{V_{d_{red}}} \tag{2.24}$$

Simulación de carga resistiva

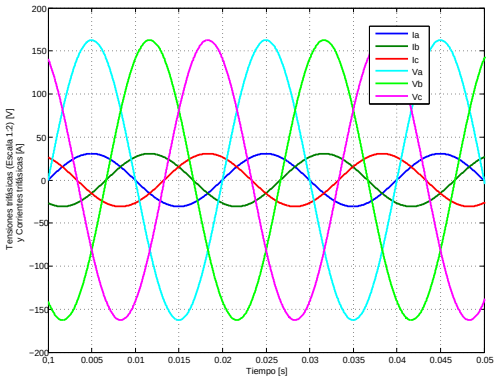
Para el ejemplo resistivo se simulará una carga de 15 kW (factor de potencia = 1). Se conectará la carga a una red trifásica de 230 V (valor RMS) y frecuencia de 50 Hz y se simularán 0,3 segundos.

En primer lugar, en la Figura 2.20a se puede observar que las corrientes trifásicas se sintetizan correctamente, estabilizándose alrededor de los 10 ms. También se demuestra que se alcanzan los valores de potencia deseados, consiguiendo en la simulación unos valores de 15 kW de potencia activa y 7,28 $\cdot 10^{-5}$ kvar de potencia reactiva.

Finalmente, si comparamos las corrientes con las tensiones (Figura 2.20b), vemos que están en fase, simulando el comportamiento de una carga puramente resistiva.



(a) Evolución temporal de las corrientes trifásicas



(b) Evolución temporal de las corrientes y las tensiones trifásicas

Figura 2.20: Resultados de la simulación de carga puramente resistiva

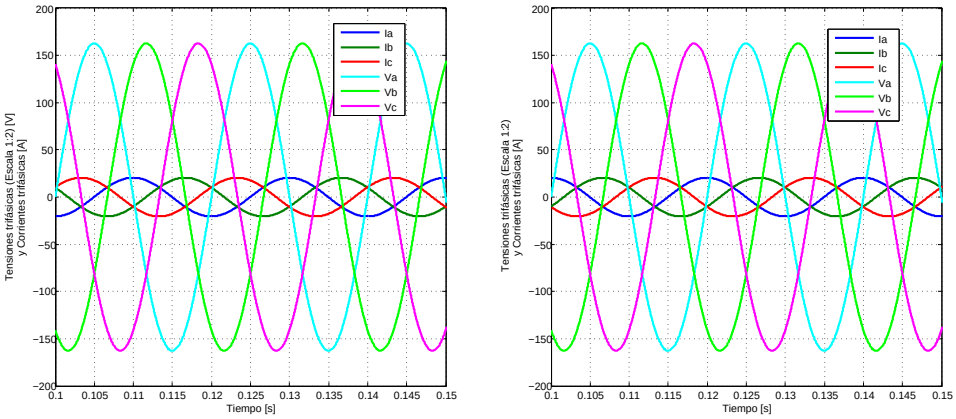
Simulación de carga inductiva/capacitiva

Para este ejemplo se simularán dos cargas de 10 kvar, una puramente inductiva y otra puramente capacitiva (factor de potencia = 0). Se conectará la carga a la misma red trifásica y se usarán los parámetros de simulación antes mencionados. Podemos observar en las Figuras 2.21a y 2.21b que se sintetizan las corrientes trifásicas con el desfase correspondiente de cada carga: retraso de $\frac{\pi}{2}$ radianes con la carga inductiva y adelanto de $\frac{\pi}{2}$ radianes para la carga capacitiva. Análogamente al punto anterior, se demuestra con los valores de la simulación que toda la potencia consumida es reactiva (-4.59$\cdot 10^{-5}$ kW de potencia activa y 10 kvar de potencia reactiva para la simulación de la carga inductiva y 3.59$\cdot 10^{-5}$ kW de potencia activa y -10 kvar de potencia reactiva para la simulación de la carga capacitiva).

Simulación de carga mixta

Para finalizar las simulaciones con el emulador de cargas equilibradas, se simulará una carga que consuma 12 kVA y factor de potencia de 0,8 (i). De esta manera, se espera obtener 9,6 kW de potencia activa y 7,2 kvar de potencia reactiva, así como un retraso de las corrientes respecto a las tensiones de 36,87 °.

En la Figura 2.22 se puede observar que la carga es emulada correctamente. Como en los puntos anteriores, los valores de simulación concuerdan con los valores teóricos



(a) Tensiones y corrientes trifásicas (Carga puramente inductiva)

(b) Tensiones y corrientes trifásicas (Carga puramente capacitiva)

Figura 2.21: Resultados de las simulaciones de carga puramente inductiva y capacitiva

(9,59 kW de potencia reactiva y 7,19 kvar de potencia reactiva) y el desfase obtenido encaja con el desfase teórico previsto.

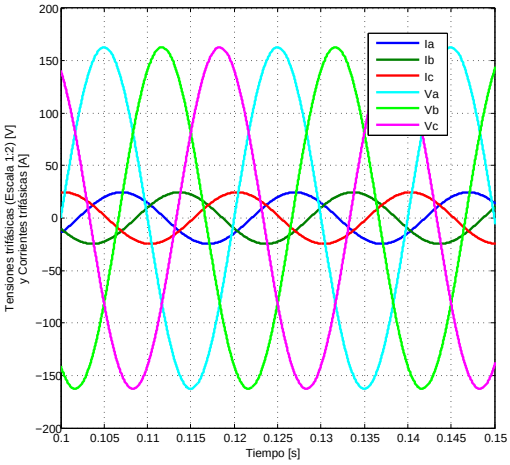


Figura 2.22: Tensiones y corrientes trifásicas (Carga mixta)

3. Diseño y simulación de un emulador de cargas resonantes

3.1. Estudio de cargas resonantes en situación de isla

El fenómeno isla está altamente relacionado con la generación distribuida. Es una situación no deseada por motivos de seguridad y control de la red, por lo tanto, la normativa que regula la conexión de equipos generadores a la red [20, 21, 22, 23] obliga la instalación de dispositivos capaces de detectarla y actuar en consecuencia, desconectando el equipo o aislándolo del punto de conexión común (PCC por su acrónimo inglés de *Point of Common Coupling*).

3.1.1. Fenómeno de isla

Se denomina condición de isla al evento en el cual un equipo de distribución de energía, tal como un inversor, continua suministrando potencia a las cargas locales una vez la red esté desconectada, energizando, así, el sistema local al que se encuentra conectado. A parte de la problemática introducida en el restablecimiento de la red y en la protección de los equipos eléctricos, este hecho puede ser muy peligroso para los trabajadores de la red, en quienes pueden tener consecuencias graves si no son conscientes de que el circuito está aún alimentado.

Métodos de detección de isla

De acuerdo a los estándares citados anteriormente, por razones de seguridad, los sistemas de aportación de energía conectados a la red, tales como los inversores, tienen que ser capaces de identificar una situación de fallo de red y desconectarse de la misma en un intervalo de tiempo fijo, en un rango entre los 0,1 y 2 segundos, dependiendo de la norma y el tipo de fallo. Para cumplir con los requisitos, existen diversos métodos de detección de isla [24] divididos en:

- Métodos pasivos, los cuales analizan los cambios temporales en las magnitudes de la red y usan tal información para determinar si la red ha caído o no en función de unos límites de cambio preestablecidos, denominados ventana de no detección (NDZ por las siglas del término inglés *Non Detection Zone*). Son ejemplos la detección de variaciones bruscas de tensión y frecuencia y la no concordancia de las mismas con los parámetros estándares de red.

- Métodos activos, los cuales intentan detectar un fallo de red creando una perturbación y monitorizando su respuesta. Algunos tipos de métodos activos son la inyección de corriente en secuencia negativa, la medición de impedancia y el seguimiento de la tendencia de la frecuencia.

Los métodos más corrientes son los pasivos, dado su bajo coste y simplicidad, dotando a los equipos de un interruptor para la desconexión-conexión automática de la instalación en caso de pérdida de tensión y/o frecuencia de la red. De esta manera, si se produjera una interrupción en el suministro de electricidad, el sistema de detección de isla debería detectar un cambio en la tensión y/o frecuencia en el punto de conexión común e interrumpir el suministro de energía. En este punto entran en juego las cargas resonantes, las cuales dificultan el correcto funcionamiento de los mecanismos de detección de isla.

Cargas resonantes en isla

El sistema descrito en la Figura 3.1 consiste en un generador fotovoltaico y un inversor con sistema pasivo de detección de isla energizando un punto de conexión común abastecido por una red suministradora de energía. Al PCC también se haya conectada una carga alimentable local.

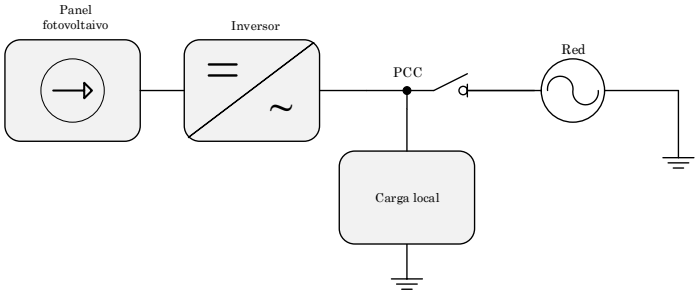


Figura 3.1: Configuración esquemática del sistema

Si se produce un fallo en la red y se interrumpe el suministro de energía, durante un corto período de tiempo el inversor continuará inyectando corriente en el circuito. De esta manera, la impedancia de la carga mantendrá una tensión en el PCC, en función de la Ley de Ohm

$$V = R \cdot I \tag{3.1}$$

Si se da el caso de que la parte resistiva de la carga es tal que induce una tensión en el PCC equivalente a la tensión de referencia de la red, el detector de isla del inversor puede ser falseado. En este instante será la monitorización de la frecuencia la que detectará la caída de la red y procederá a cortar el suministro de energía por parte del inversor (Figura 3.2).

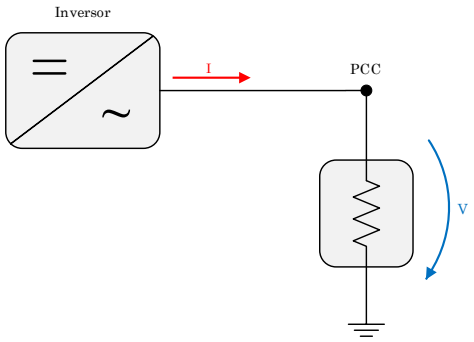


Figura 3.2: Esquema de la carga local manteniendo la tensión en el PCC

Si, además, se da la casuística de que la carga (representada por un agregado de múltiples equipos eléctricos) contiene un circuito resonante inductivo-capacitivo, ésta será capaz de mantener una frecuencia que coincidirá con la frecuencia de resonancia de dicho circuito LC

$$F_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{3.2}$$

De este modo, se da la posibilidad de que ésta frecuencia de resonancia coincida con la frecuencia de red, haciendo que la carga mantenga en el PCC una tensión y una frecuencia con las cuales el sistema de detección de isla será falseado y el inversor seguirá energizando el circuito indefinidamente (Figura 3.3).

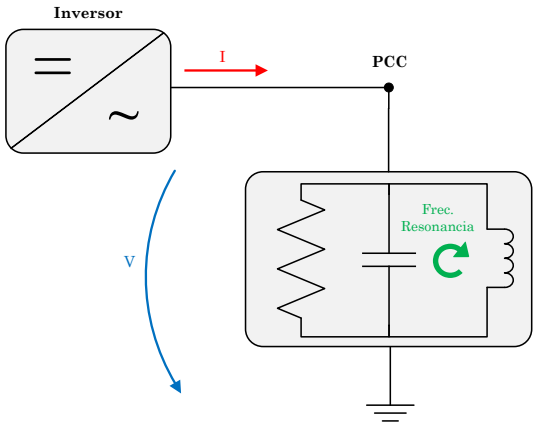


Figura 3.3: Esquema de la carga local resonante manteniendo la tensión y la frecuencia en el PCC

Ésta es la problemática que presentan las cargas resonantes en situación de isla, que, aunque aparece con una baja probabilidad, está contemplada por la normativa dada la gran importancia que supone la protección humana y de equipos. A continuación, se procede a realizar un estudio físico de las reacciones provocadas por las cargas resonantes para entender su comportamiento.

3.1.2. Análisis del punto de conexión común

En primer lugar es necesario tener en cuenta que, delante de una interrupción de la red, se producirá una variación en las variables eléctricas del punto de conexión común (PCC). De este modo, bajo una variación brusca de la potencia que fluye a través del mismo, la tensión y/o la frecuencia se verán afectadas [24]. Así pues, partiendo de la potencia que fluye a través del PCC (Figura 3.4), se cumple

$$\vec{S}_{GEN} - \vec{S}_{RED} = \vec{S}_{CL} = \vec{V}_{PCC} \cdot \vec{I}^*_{CL} = \vec{V}_{PCC} \cdot \frac{\vec{V}^*_{PCC}}{\vec{Z}^*_{CL}} = \frac{|V_{PCC}|^2}{\vec{Z}^*_{CL}} \tag{3.3}$$

$$|V_{PCC}|^2 = (R_{CL} - j \cdot X_{CL}) \cdot [P_{GEN} - P_{RED} + j \cdot (Q_{GEN} - Q_{RED})] \tag{3.4}$$

Donde:

V_{PCC} es la tensión del punto de conexión común.
R_{CL} es la resistencia equivalente de la carga local.
P_{GEN} es la potencia activa que aporta el inversor.
P_{RED} es la potencia activa que aporta la red.
X_{CL} es la reactancia equivalente de la carga local.
Q_{GEN} es la potencia reactiva aportada por el inversor.
Q_{RED} es la potencia reactiva aportada por la red.

Teniendo en cuenta que X_{CL} es función de la frecuencia, la Ecuacion 3.4 determina el equilibrio entre el módulo y la frecuencia de la tensión del PCC con la potencia activa y reactiva en la carga local ($P_{CL} = P_{GEN} - P_{RED}$ y $Q_{CL} = Q_{GEN} - Q_{RED}$).

De esta manera, mientras la red esté presente, esta mantendrá las variables de tensión y frecuencia cercanas a los valores de referencia. Pero si la presencia de la red desaparece ($P_{RED} = 0$ y $Q_{RED} = 0$), la tensión y la frecuencia cambiarán sus valores para restablecer el equilibrio en la Ecuación 3.4.

Como se ha comentado en el Apartado 3.1.1, esta situación es el marco de actuación de los métodos pasivos de detección de isla, los cuales permiten detectar la caída de la red validando si los valores de tensión y frecuencia se encuentran dentro de una ventana de límites establecidos.

3.1.3. Efecto de la carga local resonante

Para comprender el comportamiento de una carga local resonante, se diseña una carga RLC en paralelo en resonancia con la frecuencia fundamental de la red (Figura 3.4). Ésta es la topologia de carga que se exige a la hora de evaluar la efectividad de los métodos activos [23].

Así pues, este será el modelo de carga local resonante considerado para todo el trabajo. Por lo tanto, a continuación se presentan las características más importantes del mismo.

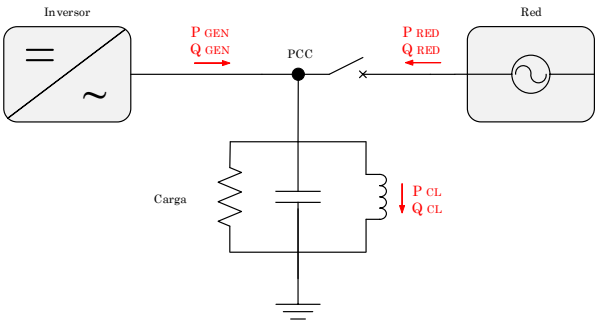


Figura 3.4: Diagrama conceptual de la conexión de la carga resonante RLC

Tensión en el PCC en función de la potencia activa

Al absorber la carga resonante toda la potencia que genera el inversor, la tensión en el PCC es función de la potencia activa consumida (Figura 3.5).

$$P_{CL} = \mathbb{R}e\left\{\frac{\left|V_{PCC}\right|^2}{\vec{Z}^*_{CL}}\right\} = \frac{V^2_{PCC}}{R_{CL}} \tag{3.5}$$

$$V_{PCC} = \sqrt{R_{CL} \cdot P_{CL}} \tag{3.6}$$

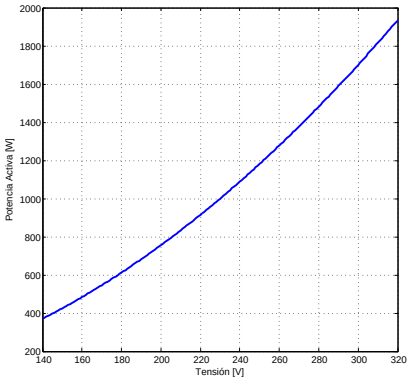


Figura 3.5: Potencia activa de la carga resonante en función de la tensión del PCC para una carga de 1 kW a 230 V

Con esto se deduce que, si la red estaba consumiendo potencia activa al ser desconectada, la carga local tendrá que consumir ese excedente fijando una nueva tensión en PCC.

Frecuencia en el PCC en función de la potencia reactiva

La frecuencia, por otra parte, dependerá de la potencia reactiva y de la tensión del PCC.

$$Q_{CL} = \mathbb{I}m\left\{\frac{|V_{PCC}|^2}{\vec{Z}^*_{CL}}\right\} \tag{3.7}$$

$$Q_{CL} = V^2_{PCC} \cdot \left(\frac{1}{w \cdot L_{CL}} - w \cdot C_{CL}\right) \tag{3.8}$$

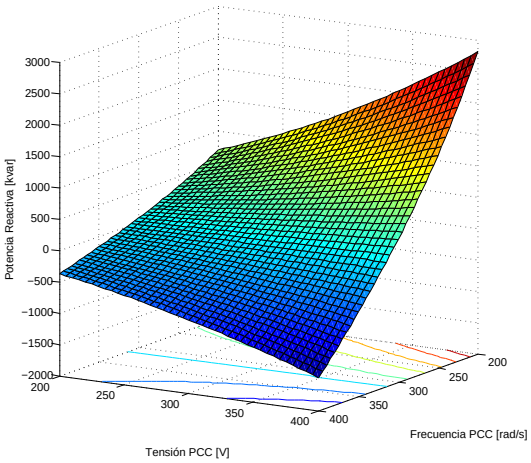


Figura 3.6: Potencia reactiva de la carga resonante en función de la tensión del PCC para una carga de 1 kW con factor de calidad 1

Entonces, si la red consumía potencia reactiva justo antes de su caída, la frecuencia del PCC disminuirá para que la carga resonante pueda equilibrar la potencia reactiva, y viceversa.

Cabe tener en cuenta que si en el momento de desconexión de la red, ésta no aportaba flujo de potencia ($P_{RED} = 0$ y $Q_{RED} = 0$), la tensión y la frecuencia se mantendrán en los valores de referencia por la actuación de la carga resonante. Si eso ocurre, los métodos pasivos de detección de isla serán insuficientes y será necesario considerar métodos de detección más avanzados, como los métodos activos.

Factor de calidad

El factor de calidad, también denominado factor de selectividad o factor q, es un parámetro que mide la relación entre la energía reactiva que se almacena y la energía que se disipa durante un ciclo completo de la señal de red. Un alto factor q indica una baja tasa de pérdida de energía en relación a la energía almacenada por el resonador. De esta manera, el factor de calidad condiciona el carácter de la carga resonante.

Desarrollando la expresión de la impedancia de la carga Z_{CL} en función del factor de calidad q, la resistencia de la carga R_{CL}, la frecuencia w y la frecuencia de resonancia w_r, se obtiene

$$\vec{Z}_{CL} = R_{CL} \cdot \frac{1 - j \cdot q \cdot (\frac{w}{w_r} - \frac{w_r}{w})}{1 + q^2 \cdot (\frac{w}{w_r} - \frac{w_r}{w})^2} = R_{CL} \cdot \frac{1}{1 + j \cdot q \cdot (\frac{w}{w_r} - \frac{w_r}{w})} \tag{3.9}$$

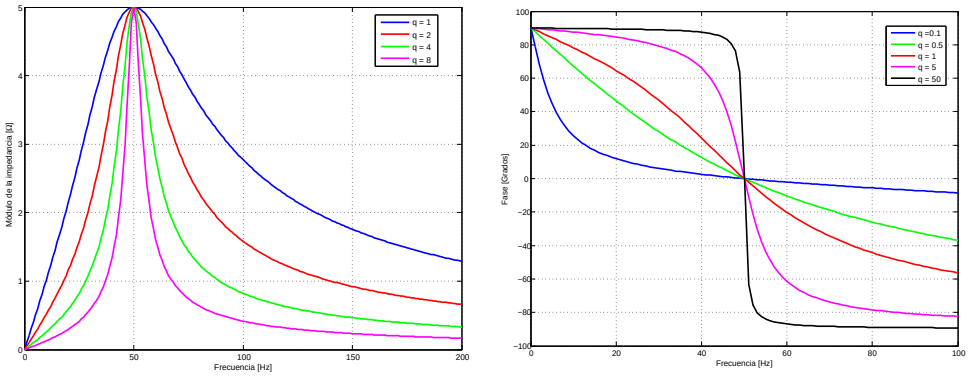
$$|\vec{Z}_{CL}| = \frac{R_{CL}}{\sqrt{1 + q^2 \cdot (\frac{w}{w_r} - \frac{w_r}{w})^2}} \tag{3.10}$$

$$\theta_{CL} = arctan\left[-q \cdot (\frac{w}{w_r} - \frac{w_r}{w})\right] \tag{3.11}$$

Siguiendo estas ecuaciones, en las Figuras 3.7a y 3.7b se muestra como el factor de calidad afecta al comportamiento de la carga para diferentes frecuencias.

En primer lugar, en la Figura 3.7a se aprecia como, en la frecuencia de resonancia, el módulo de la carga se encuentra en su valor máximo. Cuanto más grande sea el factor de calidad q, más rápido caerá el módulo de la impedancia a medida que la frecuencia se aleje del valor de resonancia.

Por otra parte, en la Figura 3.7b se aprecia que para factores de calidad grandes, pequeños desplazamientos de la frecuencia respecto el valor de resonancia aumentarán notablemente el consumo de potencia reactiva (inductiva o capacitiva dependendiendo de si la frecuencia aumenta o disminuye) de la carga. Así pues, el factor de calidad q también determina la pendiente con la cual la fase se aleja de la resonancia.



(a) Efecto del factor de calidad q en el módulo de la impedancia de una carga resonante (50 Hz y R = 5 Ω) en función de la frecuencia

(b) Efecto del factor de calidad q en la fase de la impedancia de una carga resonante (50 Hz y R = 5 Ω) en función de la frecuencia

Figura 3.7: Comportamiento del módulo y la fase de la carga resonante en función del factor de calidad q

3.2. Modelo inicial de fuentes de corriente

Teniendo en cuenta la base teórica de los puntos anteriores, se procede a construir un modelo inicial que constituirá los cimientos del emulador de cargas resonantes. Este modelo se basa en el uso de fuentes de corriente controladas para gestionar el consumo de potencia activa y reactiva en una representación monofásica de un punto de conexión común (PCC).

Con este modelo se espera demostrar la viabilidad de la emulación del comportamiento de cargas resonantes controlando las corrientes consumidas por el equipo

siguiendo las ecuaciones descritas en los puntos anteriores. Así pues, se acreditaría la posibilidad de un emulador de cargas resonantes basado en el control de un convertidor que sintetice las corrientes deseadas en función de las variables eléctricas del PCC.

3.2.1. Modelo y funcionamiento

El modelo está enfocado a representar la situación descrita en la Figura 3.8, en la cual se enfrenta la red eléctrica a un convertidor simulando un caso de generación distribuida monofásica. En el punto de conexión común se conectan en paralelo las fuentes de corriente, las cuales, apoyadas por la información que cede una PLL monofásica sobre el estado del PCC, modelan el funcionamiento de la carga local del sistema consumiendo la potencia aportada por el inversor.

Se simulan la red y el convertidor con fuentes de tensión controladas para generar una situación en la cual el convertidor aporte toda la potencia consumida por la carga, mientras que la red mantiene la tensión y la frecuencia del PCC a valores de referencia, sin consumir ni aportar potencia al mismo. Por la parte de la red, el modelo está dotado de un interruptor que simula la caída de la red, interrumpiendo la conexión entre el PCC y la misma. En el otro lado, la fuente de tensión del convertidor cuenta con un bloque capaz de alterar progresivamente y de manera controlada la frecuencia o la tensión para comparar la respuesta del modelo a la de una carga resonante teórica.

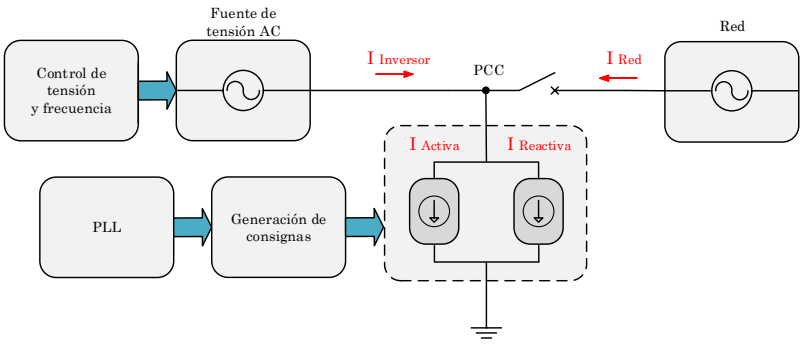


Figura 3.8: Diagrama conceptual del modelo ideal basado en fuentes de corriente

Para la simulación de la carga resonante, dos fuentes de corriente controladas consumen corriente activa y reactiva, respectivamente, para equilibrar el flujo de potencia del PCC. Siguiendo las Ecuaciones 3.6 y 3.8 se crea una generación de consignas para las fuentes de corriente que imitan el comportamiento teórico de una carga RLC en la situación planteada.

Para calcular las consignas, se siguen tres pasos:

- Antes de empezar la simulación, el modelo calcula las constantes R, L y C de la carga resonante en función de la potencia de la prueba y el factor de calidad

deseado para la carga, los cuales son parámetros introducidos por el usuario

$$R = \frac{V_{PCC}^2}{P} \tag{3.12}$$

Cabe destacar que para que la carga resuene es necesario que, visto desde fuera, no consuma potencia reactiva, puesto que los condensadores y las inductancias se intercambian la energía mutuamente. Esto supone que la reactancia inductiva y capacitiva se anulan al consumir los dos bloques la misma potencia reactiva

$$Q = P \cdot q \begin{cases} Q = Q_L = \frac{V_{PCC}^2}{X_L} \rightarrow L = \frac{V_{PCC}^2}{Q \cdot 2\pi f} \\ Q = Q_C = \frac{V_{PCC}^2}{X_C} \rightarrow C = \frac{Q}{V_{PCC}^2 \cdot 2\pi f} \end{cases} \tag{3.13}$$

- Una vez calculadas las constantes $R,\ L,\ y\ C$, el modelo calcula en cada ciclo de simulación la potencia activa y reactiva que debe consumir la carga siguiendo las Ecuaciones 3.6 y 3.8 en función de las variables del sistema (tensión y frecuencia del PCC), proporcionadas por la PLL.

- Finalmente, para consumir las potencias de referencia, se calculan las corrientes activa y reactiva que las fuentes controladas tienen que consumir para imitar el comportamiento teórico de la carga resonante. Es importante mencionar que hay que diferenciar entre valores RMS y de pico, ya que las fuentes controladas usan los valores de pico para sintetizar las corrientes sinusoidales

$$I_{ACT,\ RMS} = \sqrt{\frac{P}{R}} \rightarrow I_{ACT,\ PICO} = \sqrt{2} \cdot I_{ACT,\ RMS} \tag{3.14}$$

$$I_{REACT,\ RMS} = \frac{Q}{V_{PCC}} \rightarrow I_{REACT,\ PICO} = \sqrt{2} \cdot I_{REACT,\ RMS} \tag{3.15}$$

3.2.2. Resultados teóricos, simulaciones y resultados

Dada la situación descrita en el Apartado 3.2.1, se espera que la carga consuma toda la potencia generada por el inversor, de manera que la corriente entregada por el inversor y la consumida por el modelo coincidan en magnitud y se encuentren en contrafase, forzando un flujo de potencia nulo en la red.

Para comprobar el funcionamiento del modelo se lleva a cabo la simulación de 1 kW, a una tensión de 230 V y con un factor de calidad de 1 para la carga resonante. Se fuerza la desconexión de la red a los 0,5 segundos y se comprueba que el modelo aguanta los valores de referencia de tensión y frecuencia en el PCC en ausencia de la misma.

Como se puede observar en la Figura 3.9, el sistema se estabiliza rápidamente (cerca de los 50 ms) y representa adecuadamente el flujo de potencia del inversor hacia

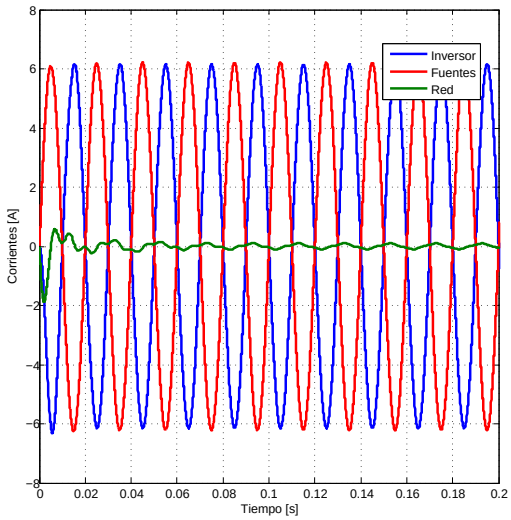


Figura 3.9: Corrientes de la rama de red, de la rama del inversor y de la rama de las fuentes controladas para una simulación de 1 kW, 230 V y factor de calidad 1

la carga (fuente), haciendo que la corriente que circula por la rama de red sea prácticamente despreciable.

Por otra parte, si se monotorizan los valores de tensión y frecuencia en el PCC se demuestra que el modelo se comporta como una carga resonante, ya que al desconectar la red del sistema, ésta consigue mantener dichos valores en 230 V y 50 Hz (Figura 3.10).

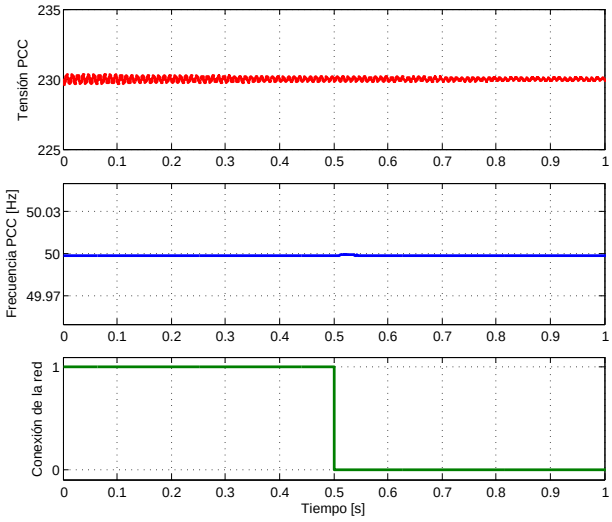
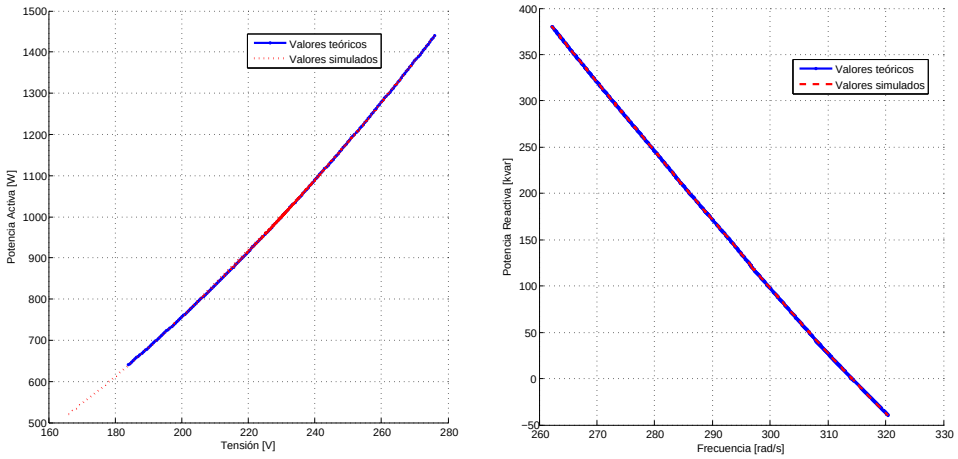


Figura 3.10: Tensión y frecuencia en el PCC antes y después de la desconexión de la red para una simulación de 1 kW, 230 V y factor de calidad 1

Dando un paso adelante, se hace uso del bloque del inversor mencionado en el Apartado 3.2.1 para manipular los valores de tensión y frecuencia en el PCC y ver como reacciona el modelo ante los cambios. Siguiendo las Ecuaciones 3.6 y 3.8, se espera

que el modelo modifique el consumo de potencia activa y reactiva del modo en el cual se comportaría una carga resonante. Así pues, se realizan dos simulaciones diferentes donde, después de desconectar la red, se realiza un barrido de valores de tensión y frecuencia, respectivamente, y se comparan los valores obtenidos con los valores teóricos obtenidos de las ecuaciones del Apartado 3.1.3. El resultado se plasma en las Figuras 3.11a y 3.11b.



(a) Valores teóricos y de simulación de potencia activa en un barrido de tensión para una simulación de 1 kW, 230 V de referencia y factor de calidad 1

(b) Valores teóricos y de simulación de potencia reactiva en un barrido de frecuencia para una simulación de 1 kW, 230 V de referencia y factor de calidad 1

Figura 3.11: Resultados de la simulación alterando los valores de tensión y frecuencia en el PCC

3.2.3. Conclusiones

Con las simulaciones llevadas a cabo se demuestra que el modelo funciona correctamente y representa el comportamiento de una carga resonante en todas las situaciones a las cuales se ha puesto a prueba.

De esta manera, se ha validado que el comportamiento de cargas resonantes imitado a partir de fuentes de corriente controladas, regidas por las Ecuaciones 3.14 y 3.15, es un concepto totalmente funcional, aunque imposible de implementar dada la inviabilidad de concebir un modelo de control de respuesta infinitamente rápida.

Por otra parte, este modelo abre un camino hacia el diseño de un emulador de cargas resonantes basado en el control de un convertidor de potencia que trabaje bajo el mismo principio, el cual resultaría un modelo totalmente implementable al ser un equipo electrónico controlable

Una vez verificada esta base y siguiendo con el guión de trabajo, se procede a diseñar un modelo de emulador de cargas resonantes con el fin de obtener un modelo capaz de ser implementado por un equipo electrónico que gestione el funcionamiento de un convertidor.

3.3. Emulador de Cargas Resonantes

Combinando el modelo de control del emulador de cargas equilibradas y el principio de funcionamiento del modelo ideal de fuentes de corriente explicado en los puntos anteriores, se procede a unificar conceptos para desarrollar un modelo final de emulador de cargas resonantes eficiente e implementable.

3.3.1. Creación del modelo y funcionamiento

El modelo sigue la estructura definida en la Figura 3.12, en la cual el emulador se conectará a un punto de conexión común donde se enfrentan una red trifásica y un modelo de inversor fotovoltaico.

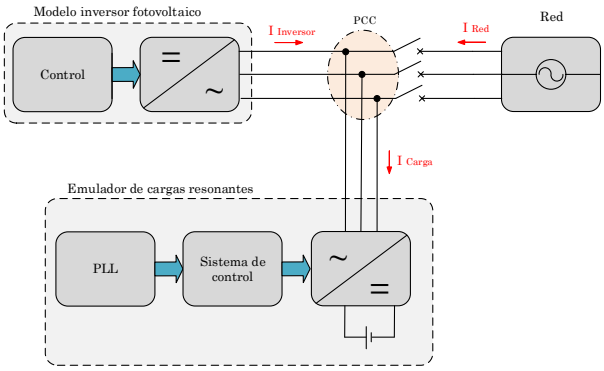


Figura 3.12: Esquema general de bloques del modelo final de emulador de cargas resonantes

El modelo de inversor consiste en un modelo promediado de convertidor trifásico regido por un sistema de control que le permite imitar el comportamiento de un inversor fotovoltaico. Siguiendo los datos de tensión-corriente cedidos por curvas experimentales de paneles fotovoltaicos, el sistema de control genera los ciclos de trabajo del convertidor para que este inyecte la potencia de referencia de la curva. El modelo posee cuatro curvas diferentes que corresponden a las potencias de 300 W, 600 W, 2,65 kW y 3 kW.

De esta manera, se modifica el modelo de fuentes de corriente del Apartado 3.2 substituyendo la fuente de tensión que actuaba como convertidor por el modelo de inversor y el bloque de fuentes controladas por un modelo de convertidor promediado (Apartado 2.1.2) y un sistema de control que gestiona su funcionamiento.

Para construir el sistema de control, se conecta el lazo de control del modelo de emulador de cargas equilibradas (Apartado 2.3.2) al sistema de generación de consignas del modelo de fuentes (Apartado 3.2.1) de corriente (ver Figura 3.13), de manera que las corrientes activa y reactiva se convierten en las corrientes *directa* y de *cuadratura*. Este sistema de control gestionará las tensiones que sintetiza un

modelo promediado de convertidor de potencia para conseguir las corrientes que emularán el comportamiento de la carga resonante.

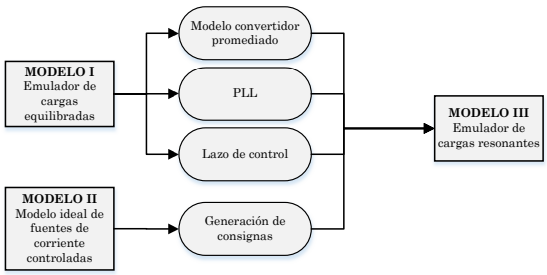


Figura 3.13: Esquema del montaje del modelo final a partir de los modelos anteriores

3.3.2. Primeras simulaciones

Para comprobar el funcionamiento del modelo, se prepara una primera simulación con los parámetros plasmados en la Tabla 3.1. Se escoge la curva de 2,65 kW del inversor fotovoltaico y se proponen 100 V de tensión fase-fase para la red. Por otro lado, la tensión del bus DC corresponde a la utilizada para el emulador de cargas equilibradas, pero como la tensión de red es menor, no es necesario optar por otra magnitud.

Parámetro	**Valor**
Potencia de la prueba	2,262 kW
Tensión de referencia de la red (fase-fase)	100 V
Factor de calidad de la carga resonante	1
Tensión del bus DC	350 V
Desconexión de la red	0,8 s
Conexión sistema anti-isla (SVS)	1,6 s
Duración de la simulación	2 s

Tabla 3.1: Parámetros de simulación

Con esta simulación se pretende que el emulador actúe como una carga resonante conectada al PCC, manteniendo la tensión y frecuencia de referencia después de la desconexión de la red.

Finalmente, se añade al modelo del inversor un sistema de detección de isla activo SVS (*Sandia Voltage Shift*) para desequilibrar el sistema y hacer que traspase la ventana de no detección. El sistema SVS se basa en la realimentación positiva de tensión, de manera que una vez el sistema sea conectado, desviará progresivamente

la tensión del PCC al momento que esta se distancie de la tensión de referencia de red [24]. Así pues, se espera que el emulador mantenga los valores de tensión y frecuencia una vez se produzca la desconexión de la red, pero que en el momento de la conexión del sistema SVS, este provoque una modificación brusca de la tensión en el PCC para inestabilizar el sistema.

La Figura 3.14 ilustra la evolución del sistema en la simulación. Se puede observar como, a la desconexión de la red, el emulador mantiene los valores de referencia de tensión y frecuencia en el PCC, haciendo casi imposible la detección de la situación de isla. Más adelante, la conexión del sistema SVS inestabiliza el sistema llevando los valores de las variables eléctricas fuera de la ventana de no detección.

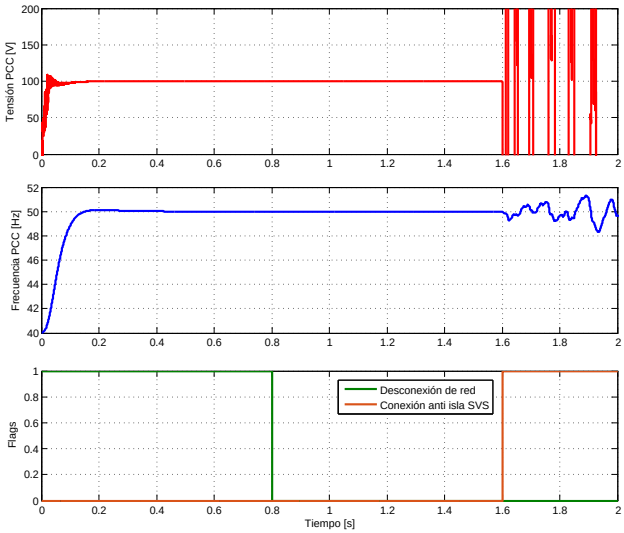


Figura 3.14: Simulación de la tensión RMS y la frecuencia en el PCC

Una vez se ha comprobado que el sistema imita correctamente el comportamiento de una carga resonante a la desconexión de la red, se procede a evaluar su dinámica. Para ello, es necesario un sistema de detección de isla diferente al SVS, ya que dada su inestabilidad no es posible comparar la respuesta del emulador con la de una carga teórica RLC. Para este fin se hará uso de otro método de detección de isla.

3.3.3. Cambios en el modelo

Implementación del sistema anti isla SMS

El SMS (*Slip-Mode frequency Shift*) [24] es un sistema activo de detección de isla basado en la realimentación positiva de frecuencia que busca provocar una desviación controlada en el valor de la misma, llevándola hasta punto de equilibrio estable fuera de la ventana de no detección.

Partiendo de la fase de la carga local resonante descrita en la Ecuación 3.11, la fase $\theta_{i_{isla}}$ de la corriente en condición de isla es

$$\theta_{i_{isla}} = \theta_{CL} = arctan\left[-q \cdot (\frac{w}{w_r} - \frac{w_r}{w})\right] \tag{3.16}$$

De esta manera, para provocar la inestabilidad se fuerza a el inversor a inyectar corriente con la consigna de fase θ_{i^*}

$$\theta_{i^*} = \theta_m \cdot sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f - f_r}{f_m - f_r}\right) \tag{3.17}$$

Donde:

θ_m es la fase máxima.
f_r es la frecuencia de resonancia.
f_m es la frecuencia donde la fase es máxima.

De esta manera se crea un punto de equilibrio inestable en 50 Hz, mantenido por la presencia de la red. En el momento que esta cae, la frecuencia será impulsada hacia uno de los dos puntos de equilibrio estables, dependiendo del valor de la frecuencia en el momento de la desconexión, haciendo activar la detección de isla por sobrefrecuencia o subfrecuencia (ver Figura 3.15).

Para poder hacer útil este método es necesario establecer los puntos de equilibrio en relación con lo que dicta la normativa de desconexión en condiciones de isla. La principal normativa aplicable sobre límites de frecuencia para la desconexión de equipos inversores [20, 21, 22, 23] queda resumida en las Tablas 3.2 y 3.3.

	IEEE 1547	**IEC61727**	**VDE0126-1-1**
Rango de frecuencia (Hz)	59,3 <f <60,5	49 <f <51	47,5 <f <50,2
Tiempo de desconexión (s)	0,16	0,2	0,2

Tabla 3.2: Normativa sobre límites de frecuencia para la desconexión

IEEE 1547	**IEC61727**	**VDE0126-1-1**
2s	2s	5s

Tabla 3.3: Normativa sobre tiempos máximos de desconexión después de que ocurra la isla en caso de presencia de cargas resonantes

De esta manera, aplicando los valores más restrictivos de la normativa se escogen como valores límite de frecuencia 49 y 50,2 Hz. El equipo inversor tendrá que ser capaz de detectar si se sobrepasan los valores y desconectarse del PCC en 2 segundos o menos. Teniendo en cuenta que en el sistema SMS los dos puntos de equilibrio son simétricos, se escoge como valor límite de frecuencia el más restrictivo (50,2 Hz) y su simétrico (49,8 Hz).

Finalmente, se realizan varias simulaciones para comprobar el funcionamiento del sistema SMS y para comparar la dinámica del emulador y la de carga teórica RLC.

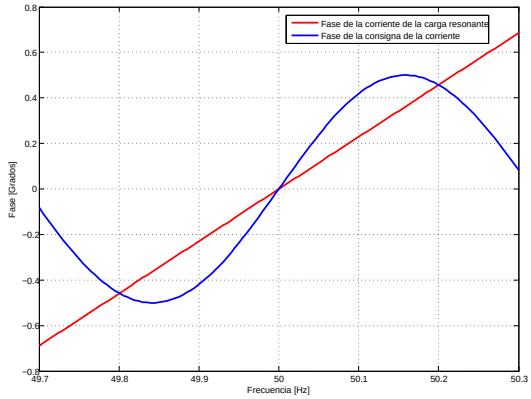


Figura 3.15: Fase de la corriente de consigna y de la carga resonante para un factor de calidad de 1

De esta manera, se llevan a cabo diferentes simulaciones con diferentes constantes de control del emulador para determinar la importancia de estas, pero como se puede ver en la Figura 3.16, la dinámica es la misma para cualquier par de constantes estables.

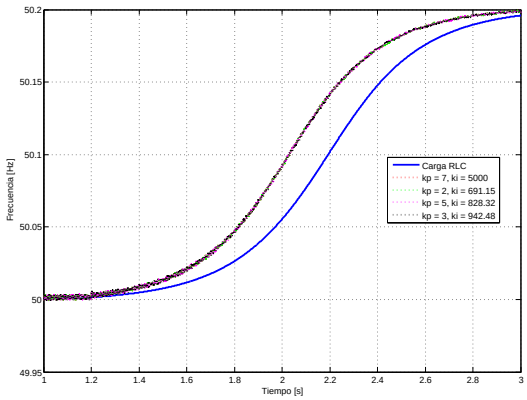


Figura 3.16: Simulaciones de la carga RLC y diversas dinámicas del emulador con diferentes constantes de control

Resintonización de la PLL

Dado que la prueba de diferentes constantes de control para el sistema no ha desembocado en ningún cambio en la dinámica, se llega a la conclusión de que el control de la PLL es crucial para que el emulador imite la dinámica teórica de la carga resonante. Esto no es extraño, ya que los cálculos de las consignas se realizan con valores RMS obtenidos por la PLL y estos valores deben asemejarse lo máximo posible a los valores instantáneos con los cuales se rige la dinámica de la carga RLC teórica, dominada por las ecuaciones diferenciales de los condensadores y las bobinas. De esta manera, se procede a encontrar una pareja de constantes óptima para el control

de la PLL, puesto que ayudará al sistema a mejorar su dinámica en el momento de actuación del sistema anti isla.

Como las transformadas de Clarke y Park utilizadas en la PLL (ver Apartado 2.2.2 son transformaciones no lineales y dependientes del ángulo, para la resintonización se procede a linealizar el sistema como se describe en [25]. De esta manera, la Figura 3.17 muestra el modelo linealizado propuesto para la PLL trifásica. La función de transferencia del lazo cerrado puede ser representada como

$$H(s) = \frac{\hat{\theta}(s)}{\theta(s)} = \frac{K_f(s)(-V_f)}{s + K_f(s)(-V_f)} \tag{3.18}$$

Donde $\frac{\hat{\theta}(s)}{\theta(s)}$ representa la relación entre el ángulo de entrada y el ángulo de salida, $K_f(s)$ la función de transferencia del controlador PI y V_f la tensión de pico de la red.

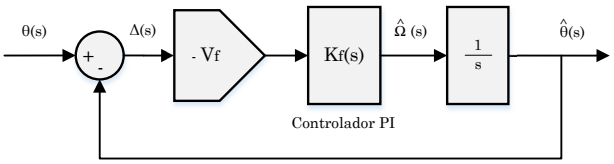


Figura 3.17: Modelo linealizado de la PLL trifásica

Para la correcta sintonización del lazo cerrado se tiene que asegurar que la dinámica del sistema satisface el rápido seguimiento del ángulo, así como unas buenas características de filtrado. De esta manera, se llega a un compromiso en el diseño del comportamiento dinámico de la PLL.

Para ello, una de las técnicas más usadas es el método Wiener [26], el cual se considera el mejor método de optimización. Ésta técnica escoge un factor de amortiguamiento ξ de $\sqrt{2}$, derivando en la función de transferencia siguiente para el lazo de segundo orden

$$H_w(s) = \frac{\sqrt{2}\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + \sqrt{2}\omega_n + \omega_n^2} \tag{3.19}$$

Así pues, igualando las Ecuaciones 3.18 y 3.19, y teniendo el cuenta que la función de transferencia del controlador PI es

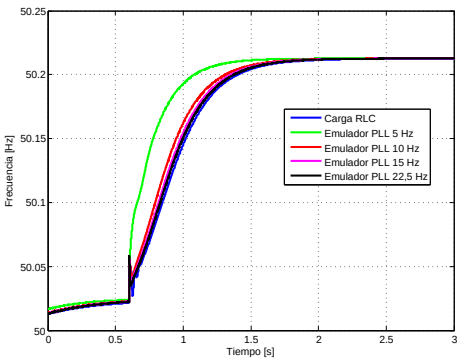
$$K_f(s) = Kp' \left(\frac{1 + \tau s}{\tau s} \right) \tag{3.20}$$

Se desarrollan las expresiones que, fijando la tensión de alimentación RMS (fase-neutro) V_f y la frecuencia de corte ω_n deseadas, definirán las nuevas constantes de control de la PLL

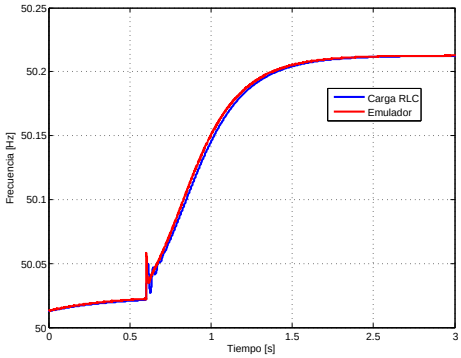
$$K_p = \sqrt{2} \cdot \frac{\omega_n}{V_f} \tag{3.21}$$

$$K_i = \frac{K_p^2 \cdot v_f}{2} \tag{3.22}$$

Finalmente, se llevan a cabo varias simulaciones para encontrar una pareja de constantes óptima. En la Figura 3.18a se muestran los resultados, con los cuales se concluye con que el mejor valor para la frecuencia de corte de la PLL es de $22,5$ Hz. Con lo cual, juntamente con la tensión de referencia de 100 V (fase-fase), se deriva a unas constantes de $K_p = 2,45$ y $K_i = 244,78$. Finalmente, en la Figura 3.18b se muestra la dinámica del emulador con las nuevas constantes de la PLL.



(a) Simulaciones de la carga RLC y diversas dinámicas del emulador con diferentes frecuencias de corte para la PLL



(b) Simulaciones de la carga RLC y de la dinámica del emulador con una PLL con frecuencia de corte de 22,5 Hz

Figura 3.18: Resultados de las simulaciones con la resintonización de la PLL

3.3.4. Simulaciones a diferentes potencias

Finalmente, con la intención de comprobar el funcionamiento del emulador en un sistema real, se introduce ruido en las señales de tensión y corriente y se realizan simulaciones a diferentes potencias.

En las Figuras 3.19, 3.20, 3.21 y 3.22 se muestran los valores reales de la simulación con ruido y los valores filtrados de la simulación para cada potencia, con los cuales se puede observar como el emulador imita casi a la perfección la conducta de la carga RLC teórica, validando así el correcto funcionamiento del modelo.

3.3.5. Conclusiones

Se ha demostrado, pues, que el modelo de emulador de cargas resonantes imita casi a la perfección el comportamiento de una carga resonante en situación de isla.

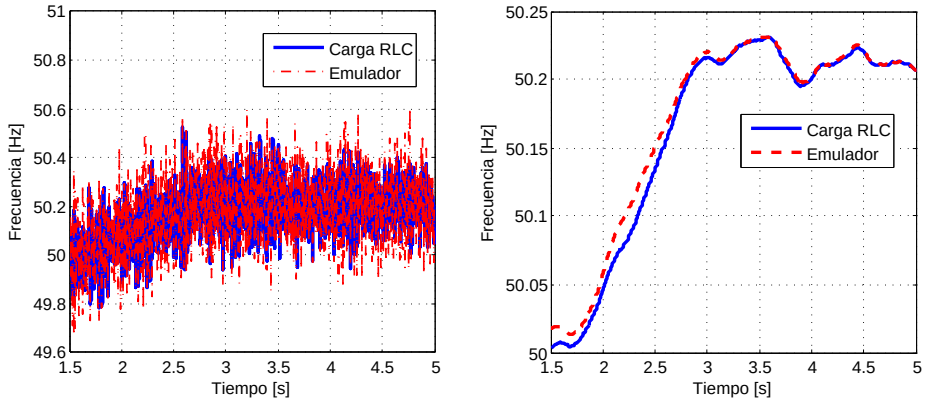


Figura 3.19: Simulación de la carga RLC y el emulador de cargas resonantes a 300 W (izquierda) y valores filtrados de la simulación (derecha)

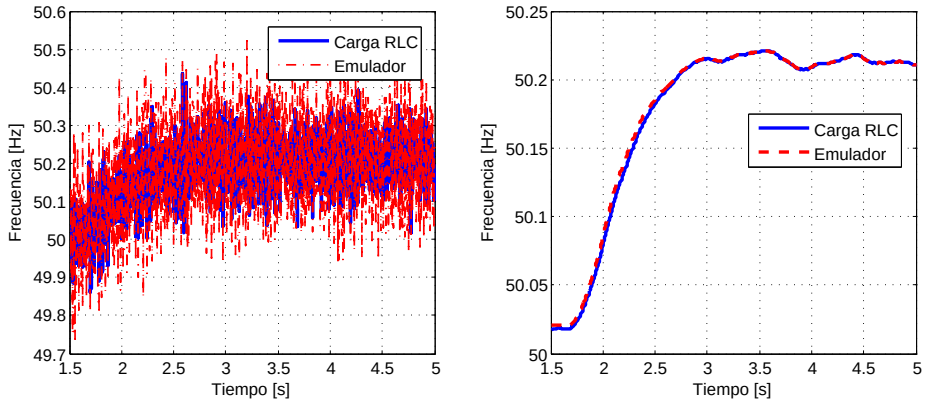


Figura 3.20: Simulación de la carga RLC y el emulador de cargas resonantes a 600 W (izquierda) y valores filtrados de la simulación (derecha)

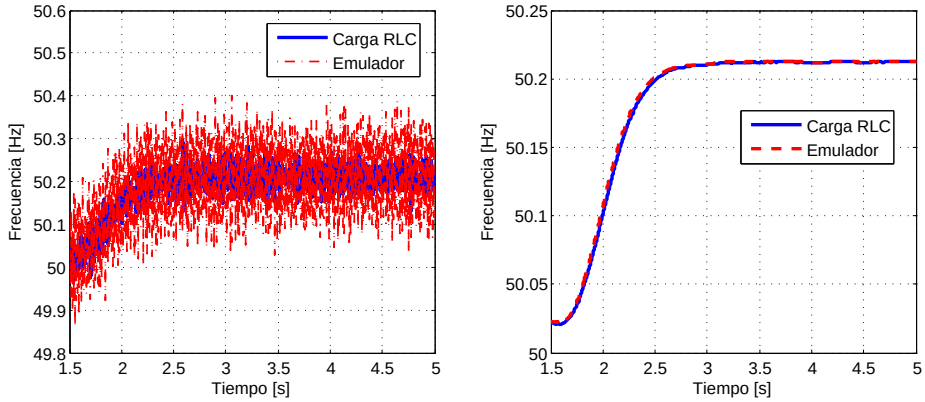


Figura 3.21: Simulación de la carga RLC y el emulador de cargas resonantes a 2,65 kW (izquierda) y valores filtrados de la simulación (derecha)

De primera mano, el modelo mantiene correctamente los valores de tensión y fre-

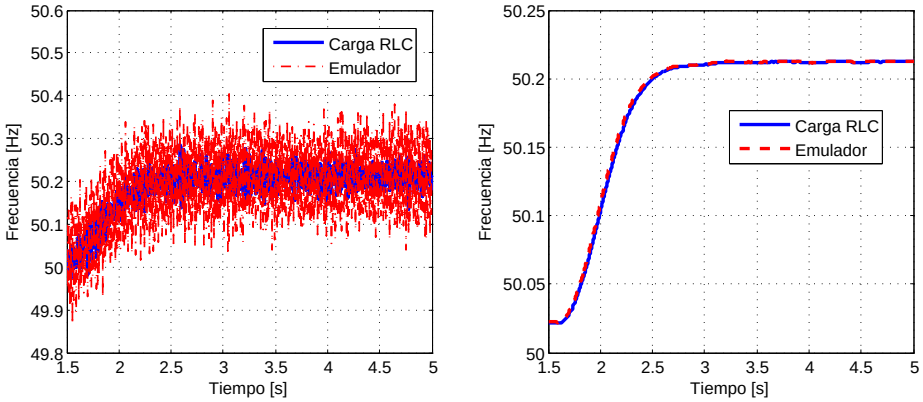


Figura 3.22: Simulación de la carga RLC y el emulador de cargas resonantes a 3 kW (izquierda) y valores filtrados de la simulación (derecha)

cuencia de red en el PCC después de la desconexión o caída de la red, de igual manera que lo haría una carga RLC en resonancia a la frecuencia de red. Por otro lado, también se ha demostrado que el emulador actúa de manera muy similar a una carga resonante con la actuación de sistemas de detección de isla, inestabilizándose con el sistema SVS y siguiendo la misma dinámica que una carga RLC teórica con la actuación del sistema SMS.

Así pues, se ha construido un modelo que, aunque puede ser objeto de muchas mejoras, funciona correctamente para la emulación de cargas resonantes. Con esto se abre un camino para la optimización e implementación del modelo con el fin de crear un producto comercializable, el cual permita realizar ensayos a inversores solares para poner a prueba sus sistemas de detección de isla y su consiguiente cumplimiento de la normativa frente a la aparición de cargas resonantes, desbancando así a las simples cargas pasivas utilizadas hasta ahora para este fin.

4. Planificación temporal y costes

4.1. Planificación temporal del trabajo

Para la buena ejecución del trabajo ha sido importante crear y seguir una estricta planificación para definir las etapas a seguir y el tiempo dedicado a cada una de ellas. La planificación seguida se muestra en la Figura 4.1 en forma de diagrama de Gantt, exponiendo las semanas planificadas para cada fase (en naranja) y el tiempo real que se le ha dedicado (en azul) una vez llegado ese punto. Como se puede observar, se ha ido siguiendo la planificación hasta las últimas etapas del trabajo, donde se tuvo algunas dificultades para hacer funcionar correctamente el modelo final, alargando así el tiempo dedicado al trabajo. Cabe destacar que la redacción de la memoria se ha decidido realizar paralelamente a las otras fases para poder expresar los resultados mejor debido a tener reciente la información adquirida.

La primera etapa contiene las horas dedicadas al estudio de los conceptos fundamentales, teóricos y de modelado, de sistemas eléctricos y electrónica de potencia. De la misma manera, la segunda etapa de estudio e investigación ha consistido en la búsqueda y adquisición de conocimientos relacionados con las cargas resonantes, sistemas de generación distribuida y el fenómeno de isla. Seguidamente, las dos fases de diseño de modelos exponen las horas dedicadas al diseño, creación y mejora de los modelos creados a lo largo del trabajo (modelos ideales, emulador de cargas equilibradas y emulador de cargas resonantes), así como las simulaciones realizadas para la exposición de resultados en la memoria.

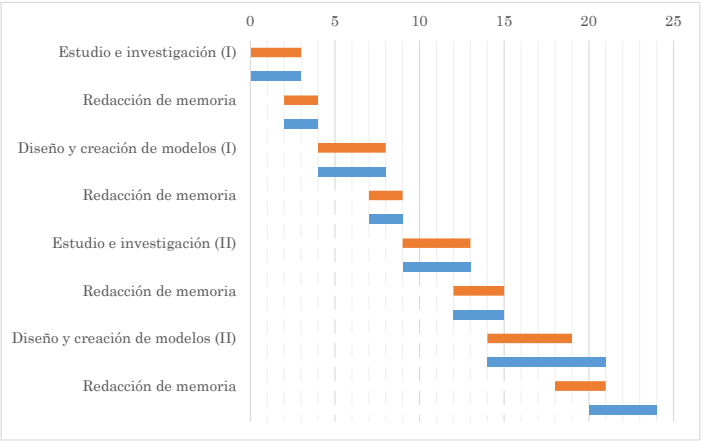


Figura 4.1: Diagrama de Gantt de la planificación del trabajo

4.2. Análisis económico

Al tratarse de un trabajo dedicado totalmente a la investigación y simulación, no ha sido necesaria la adquisición de ningún tipo de equipo material para la realización de pruebas físicas. De esta manera, el presupuesto del trabajo está en su totalidad dedicado a los recursos humanos así como a los costes de I+D (investigación y desarrollo), basados éstos últimos en las herramientas necesarias para la realización del trabajo, tales como el equipo informático y software utilizado.

4.2.1. Recursos humanos

Los recursos humanos contienen la partida más importante. Consiste en las horas dedicadas a la realización de cada fase que ha integrado la resolución de este trabajo, desde la etapa de investigación hasta las simulaciones del último modelo diseñado. Se han contabilizado las horas dedicadas a cada actividad considerando un precio por hora de referencia. Todo ello queda expuesto en la Tabla 4.1.

Cabe destacar que como el trabajo ha sido realizado por un ingeniero en prácticas, el precio por hora es ligeramente inferior al precio habitual de un ingeniero profesional. De esta manera, al tener en cuenta que un ingeniero con experiencia hubiera necesitado dedicarle un número inferior de horas, el coste total obtenido queda compensado.

Concepto	**Precio unitario** (€/h)	**Tiempo dedicado** (h)	**Coste total** (€)
Estudio e investigación	30	130	3900
Diseño y creación de modelos	30	205	6150
Redacción de la memoria	20	125	2500
Subtotal		460	12550
IVA (21 %)			2635,5
Total			**15185,5**

Tabla 4.1: Presupuesto de recursos humanos

4.2.2. Recursos de I+D

Para el coste de los recursos de I+D (Tabla 4.2) se contemplan los equipos y herramientas principales necesarias para llevar a cabo todas las fases implicadas en el trabajo, desde el coste de las licencias del software utilizado hasta el equipo informático utilizado para llevar a cabo las simulaciones y la redacción de la memoria.

Concepto	**Precio unitario (€/u)**	**Unidades**	**Ciclo de vida (años)**	**Amortización (€)**
Ordenador personal	650	1	3	200
Matlab® 2014 (Versió educacional)	0	1	-	0
Subtotal				200
IVA (21 %)				42
Total				**242**

Tabla 4.2: Presupuesto de I+D

4.2.3. Coste total

En resumen, en la Tabla 4.3 se presenta el coste total del trabajo desglosado en las partidas expuestas en los puntos anteriores.

Partida	**Coste (€)**
Recursos Humanos	15185,5
Recursos I+D	242
Total (IVA incluido)	**15427,5**

Tabla 4.3: Presupuesto total

5. Impacto medioambiental

Tal y como se ha descrito anteriormente, el trabajo presentado está basado en investigación y simulación. De esta manera, se evita cualquier tipo de modificación o efecto (ambiental o social) en el entorno, todo esto gracias a realizar el trabajo completamente desde el ordenador y sin necesidad de utilizar ningún material ni equipo físico.

No obstante, si se desea llevar el modelo estudiado a la realidad, será necesaria la utilización de sistemas eléctricos y equipos electrónicos para realizar las pruebas convenientes. Llegado ese punto, se requerirá actuar con la máxima atención a los componentes utilizados para asegurar que sea posible su completo reciclaje o reutilización, con el fin de modificar lo mínimo posible el ambiente y conseguir un proyecto sostenible. La Directiva de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (*Waste Electrical and Electronic Equipment*) y la Directiva de Restricción de Substancias Peligrosas (*Restriction of Hazardous Substances*) pueden servir de guía para dicha tarea.

6. Conclusiones

6.1. Actividades desarrolladas

Dividiendo el trabajo en sus dos núcleos, los cuales consisten en el diseño de un emulador de cargas equilibradas y el diseño de un emulador de cargas resonantes, se ha seguido un esquema similar de trabajo para las dos secciones: estudio de la base teórica y posterior modelado del sistema.

En primer lugar, se ha llevado a cabo una etapa de estudio con la cual se han adquirido los conocimientos necesarios para iniciar la creación del modelo, tanto de sistemas eléctricos, electrónica de potencia y control como de modelado y simulación. Seguidamente, se ha propuesto un modelo de emulador de cargas equilibradas basado en el control de un convertidor trifásico y se han descrito detalladamente el funcionamiento y modelado de cada uno de los subsistemas involucrados, de entre los cuales destaca el estudio teórico y las decisiones tomadas en él para el correcto control del sistema. Posteriormente, se ha creado un modelo ideal basado en el control de fuentes de corriente, con el cual se ha verificado la funcionalidad del modelo. Todo ello ha permitido concluir la primera parte del documento con un modelo de emulador de cargas equilibradas funcional e implementable.

En la segunda parte del trabajo, se ha realizado un segundo estudio con el fin de entender los conceptos de carga resonante y fenómeno de isla, comprendiendo así como éstas pueden afectar negativamente en sistemas de generación distribuida. Se ha descrito físicamente el comportamiento del punto de conexión común y, contemplando la normativa, se ha propuesto un modelo de emulador de cargas resonantes basado en el mismo concepto que el emulador de cargas equilibradas. Después de verificar la funcionalidad del modelo propuesto con un modelo ideal basado en fuentes de corriente controladas, se ha construido el modelo final y se le han concebido unas cuantas mejoras, tales como la incorporación de un sistema anti isla y la introducción de ruido en las señales de tensión y corriente para aproximar las simulaciones a la realidad.

6.2. Conclusiones obtenidas

Referente a la construcción de los subsistemas, cabe destacar que siempre existe una manera más compleja de modelar un sistema físico la cual se aproxima más a la realidad. Es importante tener claro el objetivo a conseguir y llegar a un compromiso en las decisiones con el fin de obtener los resultados deseados sin perjudicar en gran manera la complejidad del modelo. Con esta premisa se han justificado decisiones tales como el modelado promediado, y no conmutado, del convertidor trifásico y la

elección de controladores PI para el sistema de control en lugar de los controladores resonantes.

Para la construcción del sistema de control, se ha comprendido la importancia de las transformaciones de Clarke y Park, con las cuales se hace posible el control de las variables eléctricas con controladores PI en un sistema trifásico. De la misma manera, tanto en el Capítulo 2 como en el Capítulo 3, se ha demostrado la importancia del lazo de seguimiento de fase (PLL), con el cual ha sido posible acoplar el sistema de control a la velocidad angular de la red de alimentación para consumir corrientes a una determinada fase de la misma, así como para mejorar la dinámica del emulador con una generación de consignas más rápida.

Respecto a la base funcional de los modelos, se ha demostrado que es posible imitar el comportamiento de cargas eléctricas equilibradas ejerciendo control sobre un único equipo trifásico, del cual se modifican sus ciclos de trabajo para sintetizar las corrientes a emular. De esta manera se ha creado un modelo de emulador de cargas resonantes funcional, el cual puede servir como base para un futuro producto comercial con el cual sea posible probar los sistemas de detección anti isla de inversores fotovoltaicos a diferentes potencias, relevando así las cargas pasivas ajustables.

6.3. Futuras líneas de trabajo

Dado que se trata de un modelo, y no de un producto final, el emulador debe ser objeto de mejoras y desarrollo con el fin de obtener un modelo físico, funcional y comercializable. De esta manera, se presentan a continuación las posibles líneas de trabajo a seguir:

- Substitución de la fuente de tensión que alimenta el convertidor por la implementación de un segundo convertidor AC/DC para conseguir una estructura *Back to Back* que permita la recirculación de la energía no disipada a la red.
- Modificación del modelo de tres hilos a uno de cuatro hilos con el fin de poder emular cargas desequilibradas con secuencia homopolar.
- Estudio más exhaustivo del control para mejorar la robustez del sistema.
- Análisis del comportamiento del emulador para la simulación de cargas con diferentes factores de calidad.
- Implementación del modelo en un equipo electrónico para la realización de pruebas físicas y la validación de los resultados de las simulaciones.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Daniel Heredero la tutoría de este trabajo. Toda su ayuda y guía, así como todos sus consejos y el tiempo que me ha dedicado han sido para mí imprescindibles para la realización de este trabajo, además de presentarme toda una línea de investigación a la cual he comprendido que quiero dedicarme. Doy también las gracias a Daniel Montesinos por hacerse cargo de la dirección del proyecto y por animarme a tomar este camino en mis estudios.

Agradezco también a todo el resto de compañeros de Mecatrónica de CITCEA-UPC por el compañerismo y buen ambiente de trabajo día a día, el cual me anima a quedarme por un tiempo mucho más largo.

Finalmente, pero para nada menos importante, quiero dar las gracias a mi familia y amigos por estar a mi lado y apoyarme siempre. Sobre todo a mis padres y a mi hermana, que me han hecho la vida tan fácil y sin los cuales yo no habría llegado a ningún sitio.

Para acabar, quiero dedicar este trabajo a mi sobrina Elena, que sé que va a ser la niña de mis ojos y a la cual se me ha hecho un duro no poder ver día a día durante sus primeros meses.

Bibliografía

[1] A. Bouscayrol and E. Delarue, P; Semail, *Modélisation et commande des systèmes énergétiques par représentation énergétique macroscopique (REM)*, ser. Polycopiés de lÉPFL. Laboratoire d′Electrotechnique et d′ Electronique de Puissance, 2004.

[2] S. Buso and P. Mattavelli, *Digital Control in Power Electronics*, ser. Lectures on power electronics. Morgan & Claypool Publishers, 2006.

[3] E. Sánchez-Sánchez, "Disseny i implementació d′un emulador de xarxa elèctrica," Master's thesis, ETSEIB (UPC), 2014.

[4] D. Heredero-Peris, "Desenvolupament i implementació d′un emulador fotovoltaic amb interfície hmi per a inversors de gran potència en el seu rang de funcionament habitual," Master's thesis, ETSEIB (UPC, 2010.

[5] M. Capó-Lliteras, "Emulador fotovoltaic amb interficíe hmi basada en pc pel testeig d′inversors solars," Master's thesis, ETSEIB (UPC), 2014.

[6] Q. Mestre-López, "Generador de sots de tensió programable d′estructura back to back per l′assaig de convertidors de freqüència," Master's thesis, ETSEIB (UPC), 2005.

[7] M. D. Erickson, R. W., *Fundamentals of Power Electronics*. Springer US, 2001.

[8] H. Kanaan, M. Caron, and K. Al-Haddad, "Design, modeling, control and simulation of a two-stage grid-connected power load emulator," in *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Oct 2012, pp. 3774–3779.

[9] M. Kesler, E. Ozdemir, M. Kisacikoglu, and L. Tolbert, "Power converter-based three-phase nonlinear load emulator for a hardware testbed system," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 29, no. 11, pp. 5806–5812, Nov 2014.

[10] Y. Rao and M. Chandorkar, "Real-time electrical load emulator using optimal feedback control technique," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, no. 4, pp. 1217–1225, April 2010.

[11] Y. Srinivasa Rao and M. Chandorkar, "Electrical load emulator for unbalanced loads and with power regeneration," in *Industrial Electronics (ISIE), 2012 IEEE International Symposium on*, May 2012, pp. 320–327.

[12] H. Kanaan, M. Caron, and K. Al-Haddad, "Design and implementation of a two-stage grid-connected high efficiency power load emulator," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 29, no. 8, pp. 3997–4006, Aug 2014.

[13] K. G, *Principles Of Power Electronics.* Pearson Education, 2010.

[14] A. Gómez-Yepes, "Digital resonant current contcontrol for voltage source converters," Ph.D. dissertation, University of Vigo - Department of Electronics Technology, 2011.

[15] E. J. Bueno-Peña, "Optimización del comportamiento de un convertidor de tres niveles npc conecta a la red eléctrica," Ph.D. dissertation, Universidad de Alcalá - Departamento de electrónica, 2005.

[16] *Integració d'energies renovables en xarxes de potència*, Master en energies renovables i mobilitat elèctrica, CITCEA (UPC) Std.

[17] R. M. I. Barcón, S; Cepeda, *Calidad de la energía: factor de potencia y filtrado de armónicos*, ser. McGraw-Hill Educación. McGraw-Hill, 2012.

[18] H.-P. D., C.-L. M., M.-E. C., L.-P. T., and M.-M. D., "Development and implementation of a dynamic pv emulator with hmi interface for high power inverters."

[19] P. Roncero-Sánchez, V. Feliu, and A. García-Cerrada, "Predictive-integral current controller for active- and reactive-power control of wind generators," in *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ)*, 2008.

[20] *IEEE 929-2000 - Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems*, 929WG - Photovoltaic Working Group Std.

[21] *IEEE 1547.1 - Draft Standard for Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*, National Renewable Energy Laboratory Std.

[22] *IEC 62116 - Inversores fotovoltaicos conectados a la red de las compañías eléctricas. Procedimiento de ensayo para las medidas de prevención de formación de islas en la red.*, AEN/CTN 206 - SISTEMAS DE ENERGíA SOLAR FOTOVOLTAICA Std.

[23] *DIN V VDE V 0126-1-1 - Automatic disconnection device between a generator and the public low-voltage grid*, DKE German Comission for Electrical, Electronic and Information Technologies of DIN and VDE Std.

[24] M. Llonch-Massachs, "Anti-islanding. detecció d'illa per a inversors controlats per tensió connectats a xarxa," Master's thesis, ETSEIB (UPC), 2014.

[25] S.-K. Chung, "A phase tracking system for three phase utility interface inverters," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 15, no. 3, pp. 431–438, May 2000.

[26] F. Gardner, *Phaselock Techniques.* Wiley, 2005.