



Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE FI DE CARRERA

TÍTOL: Inversor trifásico con capacidad de inyección de potencia reactiva a la red eléctrica durante fallos.

AUTORS: DANIEL SÁNCHEZ GÓMEZ y JAVIER MORALES LÓPEZ

TITULACIÓ: INGENIERIA TÉCNICA INDUSTRIAL, ESPECIALIDAD
ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

DIRECTOR: MIGUEL CASTILLA FERNÁNDEZ

DEPARTAMENT: 710 – ENGENIERIA ELECTRÓNICA

DATA: Enero 2012



TÍTOL: Inversor trifásico con capacidad de inyección de potencia reactiva a la red eléctrica durante fallos.

COGNOMS:	MORALES LÓPEZ	NOM:	JAVIER
TITULACIÓ:	I.T.I. ESPECIALIDAD ELECTRÓNICA INDUSTRIAL		
ESPECIALITAT:	ELECTRÓNICA INDUSTRIAL	PLA:	1995

DIRECTOR: MIGUEL CASTILLA FERNÁNDEZ
DEPARTAMENT: 710, ELECTRÒNICA

QUALIFICACIÓ DEL PFC

TRIBUNAL

PRESIDENT

SECRETARI

VOCAL

DATA DE LECTURA:

Aquest Projecte té en compte aspectes mediambientals: Sí No

PROJECTE FI DE CARRERA



RESUM (màxim 50 línies)

Se presenta el funcionamiento de un inversor trifásico fotovoltaico con capacidad de inyección de potencia reactiva a la red eléctrica cuando esta se encuentra en fallo.

Las redes de distribución eléctrica presentan unos códigos y normas que describen el comportamiento de la fuente de energía ante los fallos de red, con referencia a la inyección de potencia reactiva para permanecer conectado a la misma.

Se propone un novedoso algoritmo de control que pueda tratar distintos tipos de fallos en la red, aportando a esta un apoyo de voltaje flexible. De esta forma el algoritmo se encarga de detectar, caracterizar y solventar los huecos de tensión que se dan en la red, empleando diferentes estrategias de inyección de potencia reactiva dependiendo de las características del fallo.

Una vez expuestas detalladamente las distintas estrategias se realiza una comparación de sus funcionalidades mediante los resultados obtenidos de diferentes pruebas realizadas en el entorno de programación Matlab Simulink.

Paraules clau (màxim 10):

Inversor	Control	Potencia	Secuencias
Activa	Reactiva	Red	Sag
Algoritmo			



Índice

1. Introducción	9
1.1. Descripción del problema.....	9
1.2. Justificación del problema.....	10
1.3. Especificaciones básicas	11
2. Objetivos	13
3. Inversor trifásico con conexión a red	15
3.1. Introducción	15
3.2. Funcionamiento.....	15
3.2.1. Principio básico.....	15
3.2.2. Ondulación	16
3.2.3. Filtrado e inyección a la red	17
3.3. Conclusiones	17
4. Control del inversor trifásico.....	19
4.1. Introducción	19
4.2. Generación de referencias de corriente	19
4.2.1. Introducción	19
4.2.2. Transformación α - β	20
4.2.3. Transformación α - β a componentes positivas y negativas.....	21
4.3. Lazo de corriente.....	23
4.3.1. Introducción	23
4.3.2. Lazo de compensación	24
4.4. Modulación vectorial.....	26
4.5. Conclusiones	27
5. Fallos de red	29
5.1. Introducción	29
5.2. Tipos de fallos de red	29
5.3. Huecos de tensión.....	31
5.3.1. Tipos de huecos de tensión estudiados.....	32
5.3.2. Efectos provocados por los huecos de tensión	33
5.4. Conclusiones	34
6. Estrategias de inyección durante fallos de red	35
6.1. Introducción	35
6.2. Efectos de la potencia.....	35

6.2.1.	Inyección de potencia activa	36
6.2.2.	Inyección de potencia reactiva por secuencia negativa	37
6.2.3.	Inyección de potencia reactiva por secuencia positiva	38
6.3.	Como levantar la red en fallo	38
6.4.	Conclusiones	39
7.	Algoritmo propuesto	41
7.1.	Introducción	41
7.2.	Detección del fallo de red.....	42
7.3.	Caracterización del fallo de red.....	43
7.4.	Actuar sobre el control	46
7.5.	Determinación de desaparición de incidencia	46
7.6.	Conclusiones	47
8.	Resultados	49
8.1.	Introducción	49
8.2.	Huecos de tensión del tipo B.....	49
8.2.1.	Caída del 17%	49
8.2.2.	Caída del 22%	51
8.2.3.	Caída del 25%	52
8.3.	Huecos de tensión del tipo E.....	54
8.3.1.	Caída del 17% líneas juntas.....	54
8.3.2.	Caída del 25% líneas juntas.....	55
8.3.3.	Caída del 25% líneas separadas.....	57
8.4.	Huecos de tensión del tipo A y D.....	59
8.4.1.	Hueco de tensión del tipo A con profundidad del 25%	59
8.4.2.	Hueco de tensión del tipo D con profundidad del 25%	60
8.5.	Conclusiones	62
9.	Conclusiones y perspectivas de trabajo.....	63
9.1.	Conclusiones	63
9.2.	Perspectivas de trabajo	66
10.	Referencias.....	67

1. Introducción

1.1. Descripción del problema

En las últimas décadas ha incrementado el problema de las energías no renovables, consecuencia del agotamiento de recursos naturales y el desgaste del planeta por la contaminación que estas crean. Por esta razón se han desarrollado sistemas que transforman la energía obtenida de fuentes renovables en energía útil para la red.

Este proyecto se centra en la energía solar, que se basa en la captación de luz y calor emitidos por el sol, mediante placas de semiconductores que se alteran con la radiación solar, los paneles fotovoltaicos.

Cada panel se comporta como una fuente de potencia y esta aparece en sus terminales de salida como un valor continuo de tensión y de corriente. Esta potencia que se pretende inyectar en la red deberá transformarse mediante un inversor trifásico (Fig. 1.1) el cual consigue tratar las señales obteniendo las características necesarias para poder ser inyectadas en la red eléctrica.



Figura 1.1. Proceso de transformación de la energía solar fotovoltaica.

En condiciones normales, la energía obtenida es inyectada mediante un inversor trifásico en forma de potencia activa. Esta, es la que compra la compañía eléctrica ya que es la que consume la carga o es transformada.

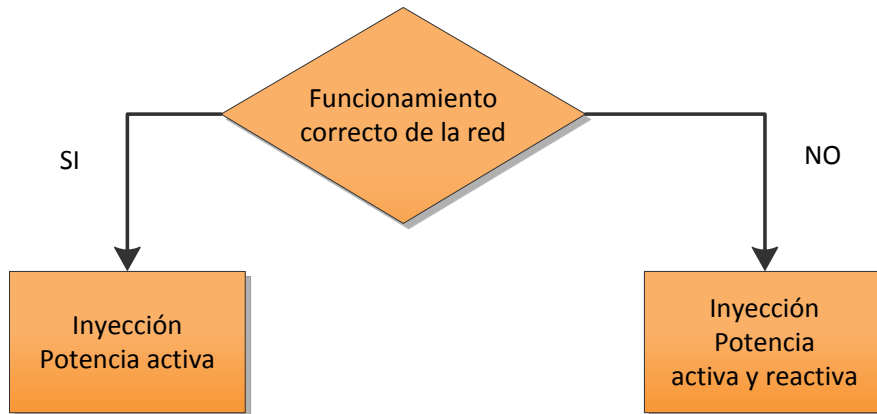


Figura 1.2. Inyección de potencia según el estado de la red.

Pueden darse distintas anomalías en la red a lo largo de su distribución que provocan severos problemas tanto en el ámbito industrial como el doméstico. Los fallos de red, entre ellos los huecos de tensión en los que se centra el proyecto, pueden ser solventados mediante la inyección de energía en forma de potencia reactiva (Fig. 1.2) siguiendo diferentes estrategias de control dependiendo de la gravedad de estos.

1.2. Justificación del problema

La motivación principal de la realización de este proyecto se centra en investigar nuevas técnicas para obtener un máximo rendimiento de las energías renovables y a su vez encontrar de estas, nuevas utilidades.

Hoy en día se hace imprescindible centrar esfuerzos en esta dirección a causa del desgaste del planeta producido por los gases de efecto invernadero. Como consecuencia de ello, está demostrado que la energía solar fotovoltaica es una forma limpia de obtener energía. Dada la situación geográfica de nuestro país es la forma de energía limpia con más proyección de futuro y con más impacto y crecimiento.

Por otro lado, el trabajo realizado no se ocupará de todos los aspectos de esta situación, sino que se ocupará de la propia transformación de la energía producida para inyectarla con diferentes métodos dependiendo del estado de la red eléctrica.

1.3. Especificaciones básicas

La realización práctica de este proyecto se ha llevado a cabo en el entorno de simulación Matlab-Simulink.

Por concordancia con la mayor parte de la bibliografía consultada y una correcta comparación con los resultados obtenidos en las simulaciones, se ha decidido trabajar con los parámetros de la red eléctrica Europea. Estos son: 325V de pico (230V eficaces), una frecuencia de red de 50Hz y tres fases desfasadas 120° entre ellas (véase figura 1.3).

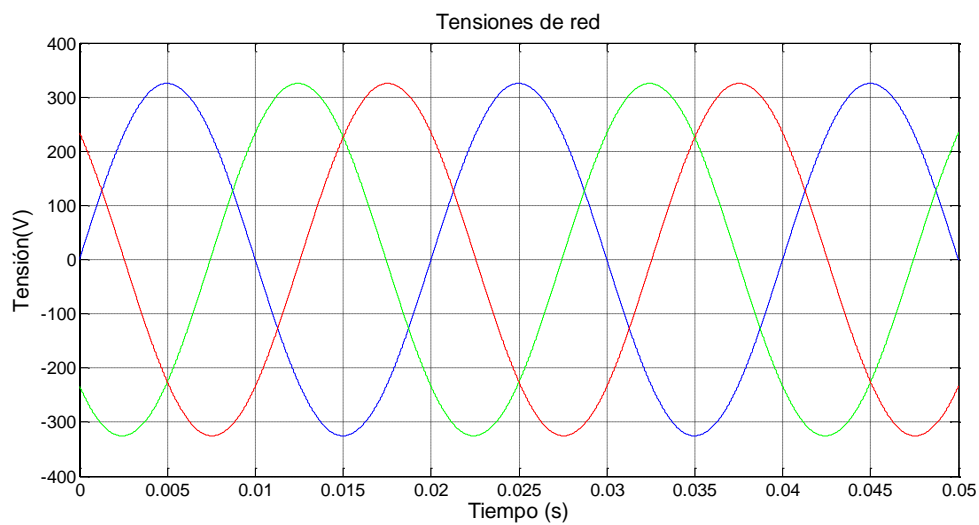


Figura 1.3. Red Trifásica Europea.



2. Objetivos

El objetivo del proyecto es crear un algoritmo para que el sistema de control sea capaz de inyectar energía a la red mediante un inversor trifásico, tanto en condiciones normales como en una situación de fallo. Para esto es básico estudiar el control aplicado al inversor trifásico de dos niveles, así como las características de los fallos de red y el sistema de inyección de energía cuando la red está en fallo para poder corregir la incidencia.

En condiciones normales el sistema debe tratar de entregar la máxima potencia activa y bajo fallos de red, el algoritmo creado debe detectar el hueco de tensión, caracterizarlo y solventarlo inyectando tan sólo la potencia reactiva necesaria para que el sistema no se desconecte de la red eléctrica y de esta manera seguir entregando energía. Una vez desaparecida la incidencia, el algoritmo propuesto debe devolver el inversor a su funcionamiento normal entregando la máxima potencia activa a la red.

Por último, se estudiarán diferentes estrategias de inyección de potencia reactiva, para solventar las incidencias de la red eléctrica siendo estas contrastadas según los diversos tipos de huecos de tensión estudiados.



3. Inversor trifásico con conexión a red

3.1. Introducción

Para la inyección de energía a la red eléctrica se emplea un inversor trifásico de potencia con el cual se transforma la energía continua proveniente de los paneles fotovoltaicos a alterna que se entrega a la red. Este hecho se consigue gracias al uso del inversor trifásico, que está compuesto por interruptores de potencia (IGBT) que ondulan la señal, además de una serie de componentes pasivos y un sistema de control que a través señales de conmutación actúan sobre los interruptores, haciéndolos actuar.

3.2. Funcionamiento

3.2.1. Principio básico

Un inversor de potencia es un convertidor electrónico, su principal función es la de facilitar el intercambio de energía entre dos o más subsistemas y esto lo consigue mediante la transformación de señales continuas (DC) a alternas (AC).

En el sistema estudiado se ha empleado un inversor trifásico de dos niveles, compuesto por seis interruptores de potencia. Estos se reparten de tal manera que se encuentran dos por cada fase (Fig. 3.1) y controlados por unas señales que provienen del sistema de control.

La energía que debe transformar el inversor proviene de paneles fotovoltaicos, modelados como dos fuentes de tensión de igual valor (325V) y poseen un punto neutro entre ambas. Esto permite que a la salida de los dos interruptores de cada fase puedan darse tensiones de salida $V_{DC}/2$, cuando está activado el interruptor superior, así como $-V_{DC}/2$ cuando está activado el interruptor inferior.

Con el fin de inyectar a la red energía con una calidad adecuada, a la salida del inversor se encuentra un filtro de tercer orden (LCL), encargado de eliminar los ruidos de conmutación del inversor y las señales parásitas que se puedan encontrar acopladas.

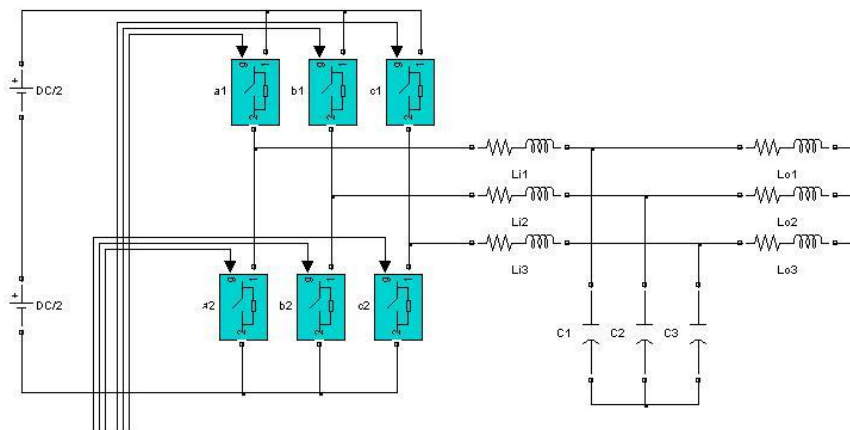


Figura 3.1. Inversor de dos niveles.

3.2.2. Ondulación

El inversor trifásico es el encargado de transformar la señal continua proveniente de los paneles fotovoltaicos, a la señal alterna que será inyectada a la red. Esto se consigue ondulando las señales mediante la conmutación de los interruptores de potencia. Obteniendo a la salida una señal cuadrada por cada fase (observar figura 3.2) con valores de tensiones positivas $V_{DC}/2$ y negativas $-V_{DC}/2$.

La señal cuadrada generada no tiene un ciclo de trabajo (*duty cycle*) constante, sino que este va variando a lo largo del tiempo. Esta variación se produce debido a que la tensión de red, que nos viene dada, varía de forma senoidal periódicamente. Cuando esta tensión se encuentra en su pico positivo, el *duty cycle* de la señal cuadrada es el mayor y cuando la tensión se encuentra en su pico negativo, el *duty cycle* de la señal cuadrada es el menor.

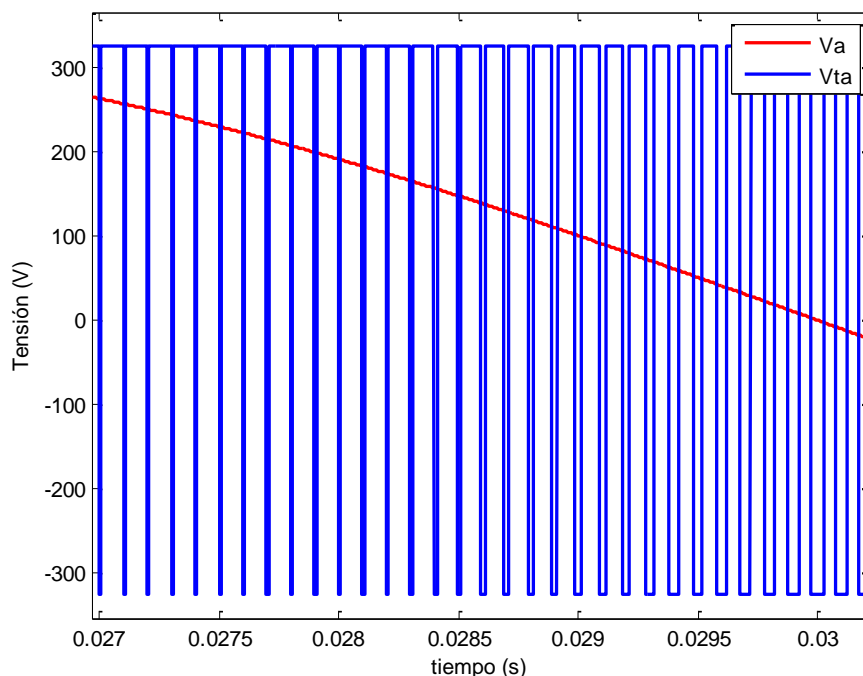


Figura 3.2. En azul, señal de la tensión tras pasar por los interruptores de potencia. En rojo, señal de tensión de red de su fase correspondiente.

Las ecuaciones (3.1) – (3.3) expresan la función de salida de los interruptores $Vt_{abc}(t)$, correspondiente cada una con cada fase observamos que lo causa la forma de onda cuadrada de la figura 3.2, en la que depende del valor de la señal de control ($u_{abc}(t)$). Este valor es el correspondiente a la señal de conmutación que actúa sobre los interruptores, que debe su origen al control, y que tiene como valores 1 (cuando está activo el interruptor superior) o -1 (cuando lo está el inferior).

$$Vt_a(t) = ua \cdot \frac{VDC}{2} \quad (3.1)$$

$$Vt_b(t) = ub \cdot \frac{VDC}{2} \quad (3.2)$$

$$Vt_c(t) = uc \cdot \frac{VDC}{2} \quad (3.3)$$

3.2.3. Filtrado e inyección a la red

Dado que la conmutación del inversor de dos niveles es bastante brusca, produce en la señal modulada de la salida ruidos de conmutación y señales parásitas, que mediante el uso de un filtro serán eliminados para obtener una señal lo más limpia posible.

El filtro empleado en el sistema es de tercer orden (LCL), su uso permite reducir de una manera muy significativa el rizado de la tensión de salida del inversor.

Tras haber filtrado las señales a la salida del inversor se procede a la inyección de la energía en forma de corriente a la red eléctrica trifásica.

3.3. Conclusiones

En este capítulo se han presentado las especificaciones básicas del inversor trifásico de dos niveles (VSC) así como la actuación de éste para la transformación e inyección de la energía. El inversor electrónico de potencia se puede controlar con dos métodos distintos: por tensión o por corriente. En este proyecto se trabajará con el método de inyección de corriente, en el que tanto la potencia activa y reactiva son controladas por el ángulo de fase y la amplitud de la corriente de línea del VSC con respecto a la tensión del punto de acoplamiento común. Este método tiene la ventaja que gracias a su esquema el inversor está protegido contra condiciones de sobrecarga.



4. Control del inversor trifásico

4.1. Introducción

Es importante la elección de una metodología adecuada de control a la hora de optimizar el funcionamiento del inversor. El sistema de control permite estabilizar el inversor entorno a su punto de operación, garantizando una tensión estable de entrada y unas formas de onda adecuadas en la salida.

El inversor empleado, funciona con el control en modo corriente, que permite controlar las potencias activa y reactiva entregadas a la red eléctrica. Este tipo de control toma una muestra de las corrientes de línea $I_{abc}(t)$ y también toma una muestra de las tensiones de red $V_{abc}(t)$. Con el sensado de las tensiones se obtienen las corrientes de referencia, para así, realizar una comparación de corrientes (Fig. 4.1), entre la corriente existente en la salida y la corriente que debería haber. Este tipo de control, es mucho más seguro que un control en modo tensión, ya que generar corrientes de referencia obliga a la salida a seguirlas y actúa como método de protección contra sobre-corrientes.

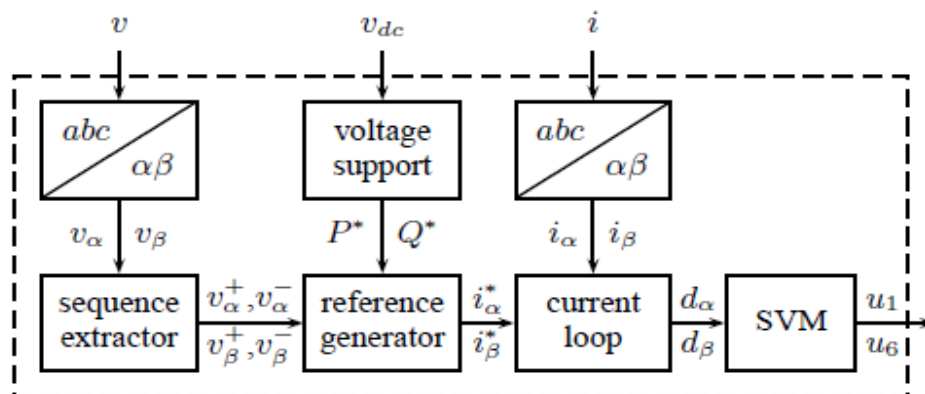


Figura 4.1. Diagrama del sistema completo de control.

4.2. Generación de referencias de corriente

4.2.1. Introducción

Para obtener estas corrientes de referencias (Fig. 4.2.) deben ser sensadas las tensiones de red $V_{abc}(t)$, seguidamente transformarlas en sus componentes α - β y a su vez descompuestas en las secuencias positivas y negativas $V_{\alpha^-}(t)$, $V_{\alpha^+}(t)$, $V_{\beta^-}(t)$ y $V_{\beta^+}(t)$. En la realización de las simulaciones mediante *Matlab Simulink* se ha empleado un sistema externo que es el encargado de extraer las componentes secuenciales (*SOGI* [1]).

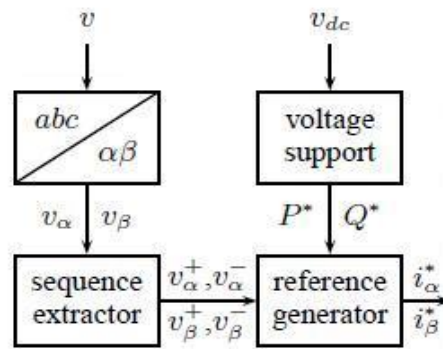


Figura 4.2. Diagrama del sistema creación de referencias.

4.2.2. Transformación α - β

La razón por la cual es realizada la transformación de variables abc a $\alpha\beta$ es que estas últimas contienen la misma información que las tres primeras. Al ser una componente menos se simplifica el control teniendo siempre la misma información. Este proceso se realiza mediante la transformada de Clarke [2], que mediante la matriz de transformación siguiente es posible obtenerlas (4.1).

$$\begin{bmatrix} X_\alpha(t) \\ X_\beta(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a(t) \\ X_b(t) \\ X_c(t) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$X_\alpha(t) = \frac{2}{3} \left(X_a(t) - \frac{X_b(t) + X_c(t)}{2} \right) \quad (4.2)$$

$$X_\beta(t) = \frac{\sqrt{3}}{3} (X_b(t) - X_c(t)) \quad (4.3)$$

En las siguientes figuras 4.3 – 4.4 se muestra el resultado de la transformación, pudiéndose observar que están relacionadas ambas señales, de esta forma si una de ellas se ve alterada en la otra se refleja. Se observa que a partir de 0.1 segundos suceden cambios a causa de una caída de tensión. Descienden la amplitud de dos fases de las tensiones de red y se ve reflejado en las tensiones $V_\alpha(t)$ y $V_\beta(t)$.

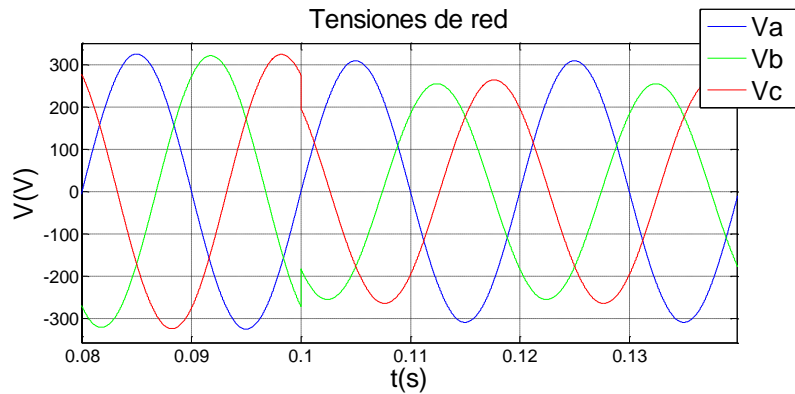


Figura 4.3. Tensiones de red $V_{abc}(t)$.

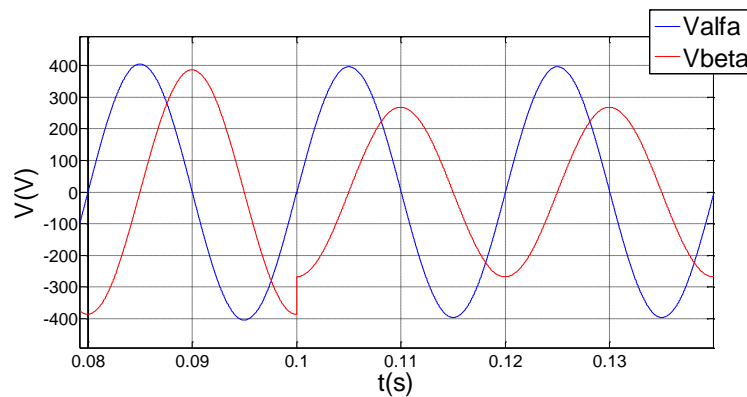


Figura 4.4. Tensiones de red en componentes $V_\alpha(t), V_\beta(t)$.

4.2.3. Transformación α - β a componentes positivas y negativas

Dado que la red es un sistema desbalanceado, es decir que el módulo y el desfase entre las tres líneas no son iguales, existe un cierto desbalanceamiento. Para que esta información esté presente en el control se debe trabajar con las secuencias positivas y negativas de las señales (Fig. 4.5), cumpliéndose las ecuaciones 4.4 – 4.5.

De esta forma son transformadas las variables $V_\alpha(t)$ y $V_\beta(t)$ a sus componentes secuenciales. La secuencia positiva representa el flujo de potencia que proviene de la red hacia la carga. La negativa, es una indicación de la medida de desbalance existente en el sistema, es decir si la red fuera balanceada esta secuencia sería nula. La secuencia homopolar (también llamada cero) se vincula a la conexión respecto de tierra, en este proyecto no se tiene en cuenta, ya que en los sistemas de tres hilos tanto la tensión en secuencia cero como la corriente no están presentes.

$$V_\alpha = V_{\alpha^+} + V_{\alpha^-} + V_{\alpha^0} \quad (4.4)$$

$$V_\beta = V_{\beta^+} + V_{\beta^-} + V_{\beta^0} \quad (4.5)$$

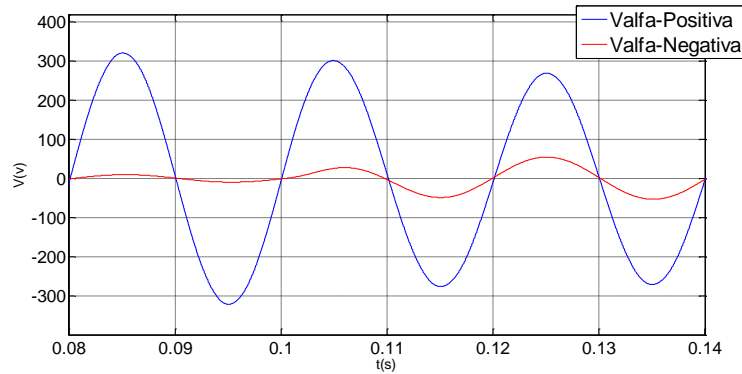


Figura 4.5. Tensiones de red $V_{\alpha}(t)$ en sus componentes positiva y negativa.

Los cambios en las tensiones de red se ven reflejados en las componentes secuenciales $V_{\alpha-}(t)$, $V_{\alpha+}(t)$, $V_{\beta-}(t)$ y $V_{\beta+}(t)$. La existencia de componente de secuencia negativa indica que existe un desbalanceamiento en las tensiones de red.

Para realizar el control se precisa de unas corrientes de referencia que sigan a las corrientes que inyectará el sistema a la red. Estas corrientes de referencia se generan a partir de las tensiones $V_{\alpha}(t)$ y $V_{\beta}(t)$ (en sus componentes positivas y negativas) y utilizando también las potencias de referencia P_{sref} y Q_{sref} [3].

La energía aportada por los paneles fotovoltaicos varía en función del grado de incidencia del sol, así que las potencias de referencia utilizadas son una estimación del valor de potencia que están aportando los paneles fotovoltaicos al inversor en todo momento.

Las ecuaciones 4.6 y 4.7 permiten calcular las potencias activa y reactiva de salida del inversor dentro del marco α - β .

$$P(s) = \frac{3}{2}(V_{\alpha}(t) \cdot i_{\alpha}(t) + V_{\beta}(t) \cdot i_{\beta}(t)) \quad (4.6)$$

$$Q(s) = \frac{3}{2}(-V_{\alpha}(t) \cdot i_{\beta}(t) + V_{\beta}(t) \cdot i_{\alpha}(t)) \quad (4.7)$$

Tomando las potencias creadas con las ecuaciones anteriores como de referencia y aislando las variables de las corrientes obtenemos las corrientes de referencia de la potencia activa y reactiva (4.8-4.11).

$$i_{\alpha}^*(p) = \frac{2}{3}P^* \frac{V_{\alpha}}{(V_{\alpha})^2 + (V_{\beta})^2} \quad (4.8)$$

$$i_{\beta}^*(p) = \frac{2}{3}P^* \frac{V_{\beta}}{(V_{\alpha})^2 + (V_{\beta})^2} \quad (4.9)$$

$$i_{\alpha}^*(q) = \frac{2}{3} Q^* \frac{V_{\beta}^+ + V_{\alpha}^-}{(V_{\alpha}^+)^2 + (V_{\beta}^+)^2 + (V_{\alpha}^-)^2 + (V_{\beta}^-)^2} \quad (4.10)$$

$$i_{\beta}^*(q) = \frac{2}{3} Q^* \frac{-V_{\beta}^+ - V_{\alpha}^-}{(V_{\alpha}^+)^2 + (V_{\beta}^+)^2 + (V_{\alpha}^-)^2 + (V_{\beta}^-)^2} \quad (4.11)$$

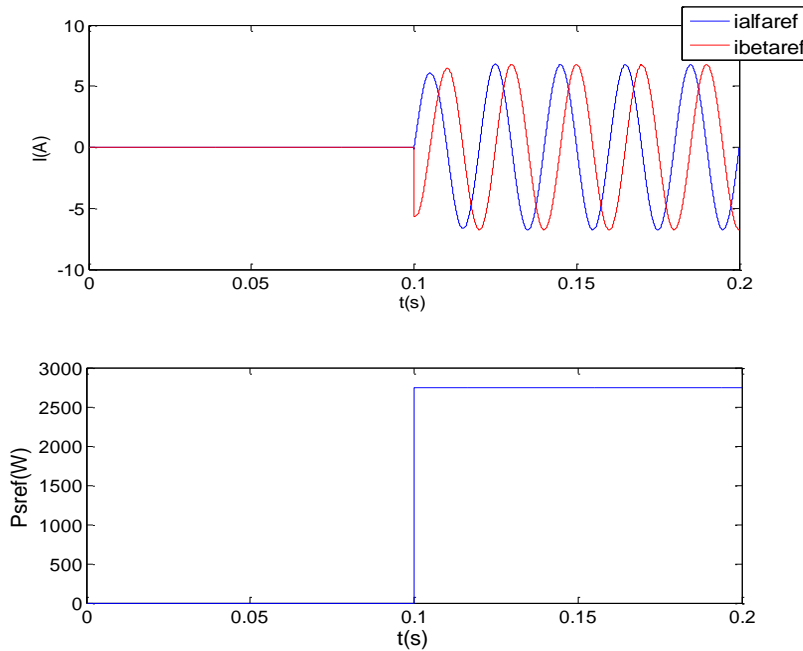


Figura 4.6. Ejemplo de variaciones de corrientes de referencia ante un cambio en la potencia activa de referencia.

En la figura 4.6 se puede observar el comportamiento de estas corrientes de referencia. En la gráfica inferior se observa cómo se ha aplicado un incremento de potencia activa de referencia (P_{sref}) a los 0. Este incremento realiza un salto de la potencia activa de referencia de 0 W a 2750W, en ese mismo instante se produce un aumento en la amplitud de las corrientes de referencia.

4.3. Lazo de corriente

4.3.1. Introducción

Las corrientes existentes en la salida del inversor también son sensadas y transformadas al modo α - β , para ser comparadas con las corrientes de referencia creadas y realizar una compensación de la señal resultante.

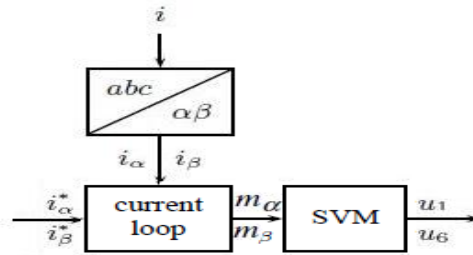


Figura 4.7. Diagrama del lazo de corriente y modulación vectorial.

4.3.2. Lazo de compensación

Se deben utilizar dos lazos de control idénticos para obtener las señales de modulación que controlarán los interruptores, uno para obtener la señal $m_\beta(t)$ y otro para obtener $m_\alpha(t)$. En la figura 4.7 se muestra el diagrama de bloques de este lazo del control de la corriente, donde la señal compensada tras la comparación entre $i(t)$ e $i_{ref}(t)$ es la que se utilizará como señal moduladora y que actuará sobre el inversor. Se debe tener en cuenta que el objetivo de esta comparación y compensación es obtener un error cero en estado estacionario, es decir, que en el propio estado estacionario se puedan conseguir que las corrientes que inyectamos sean iguales a las de referencia (Fig. 4.8.).

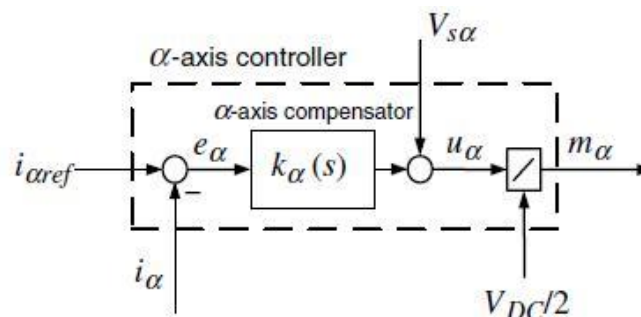


Figura 4.8. Sistema del lazo de corriente.

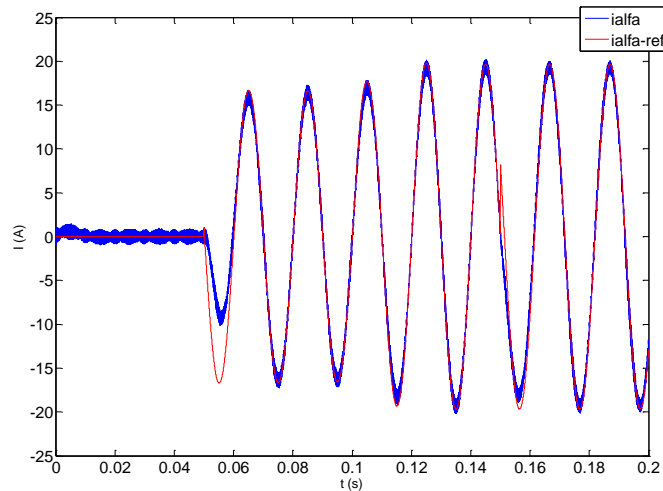


Figura 4.9. Corriente $i_\alpha(t)$ y corriente $i_{\alpha-ref}(t)$.

Esta igualdad (Fig. 4.9.) tanto en la práctica como en la simulación no se puede llevar a cabo a causa del rizado de alta frecuencia debido a las conmutaciones realizadas en el inversor.

La señal resultante se ha de pasar por el compensador para obtener una ganancia elevada del sistema, cancelar el efecto provocado por los componentes (LCL) a la salida del inversor y también estabilizar el sistema.

Para diseñar el compensador se han de tener en cuenta los siguientes puntos [1]:

Se ha de realizar un filtrado paso-banda en la frecuencia (50Hz) de la señal de error, para obtener ganancia muy elevada, ya que el compensador tiene la misión de conseguir una ganancia que tienda a infinito en dicha frecuencia, forma que multiplicada por un error prácticamente de cero, el compensador sea capaz de generar una señal de compensación mediante un par de polos complejos conjugados a la frecuencia $2 \cdot \pi \cdot 50$, que provocará una resonancia en dicha frecuencia.

En la salida del inversor con el filtro LCL del sistema aparecen en lazo abierto, unos polos. Estos, provocan una bajada de la ganancia. Esto se soluciona, mediante la cancelación del polo provocado por los componentes pasivos, añadiendo ceros en el mismo valor de los polos.

Si el margen del sistema es marginalmente estable, de fase ($> -180^\circ$). Se ha de añadir un filtro para “levantar” todo el bode (ganancia y fase) para que coincida la frecuencia de corte con 0dB, para que en esta misma frecuencia tengamos una fase suficiente para que el sistema sea estable.

Finalmente para asegurar que al compensador no le afectan las perturbaciones externas, se debe añadir otro filtro que levante la ganancia a bajas frecuencias de tal modo que la ganancia de lazo aumente, haciendo disminuir a su vez los efectos producidos por las perturbaciones en la salida.

La señal de error $e(t)$ se introduce en el compensador proporcional resonante seguidamente se emplea un control *feed-forward* con el fin de mejorar el control [1], obteniendo de esta manera las señales de modulación $m_{\alpha-\beta}(t)$ a la salida del lazo de corriente (véase la figura 4.10).

Las señales de modulación se encuentran comprendidas entre 1 y -1, con un ciclo de trabajo adecuado para el correcto funcionamiento de los interruptores de potencia. A la puerta de los interruptores debe llegar una señal digital cuadrada de valores 0 ó 1, por esta razón con las señal de modulación $m_{\alpha-\beta}(t)$ tienen que pasar por el SVM (*space vector modulation*) [4], para adecuar las señales.

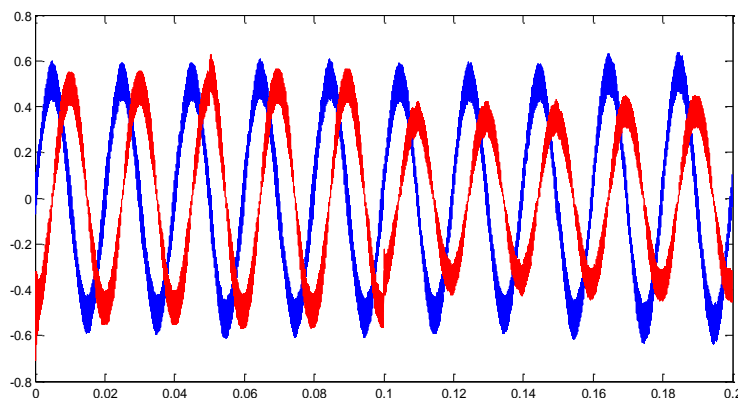


Figura 4.10. Señales de modulación $m_{\alpha-\beta}(t)$.

4.4. Modulación vectorial

Como se ha anotado anteriormente, a la puerta de los interruptores deberá llegar una señal cuadrada con valores de 0 ó 1.

Las señales de modulación $m_{\alpha\beta}(t)$ (Fig. 4.10) se entregan al SVM [4] el cual generará seis señales cuadradas ($U_{a1}, U_{a2}, U_{b1}, U_{b2}, U_{c1}, U_{c2}$), dos por cada fase. Estas señales serán las que se entreguen a la puerta de los interruptores de potencia, para que estos actúen. Las señales $U_{abc1}(t)$ (Fig. 4.11) activarán los interruptores superiores, y las señales $U_{abc2}(t)$ serán la inversa de las señales anteriores y las encargadas de activar los interruptores inferiores. De esta manera garantizando que los interruptores de cada fase no se encuentran en el mismo estado (conducción o corte) simultáneamente.

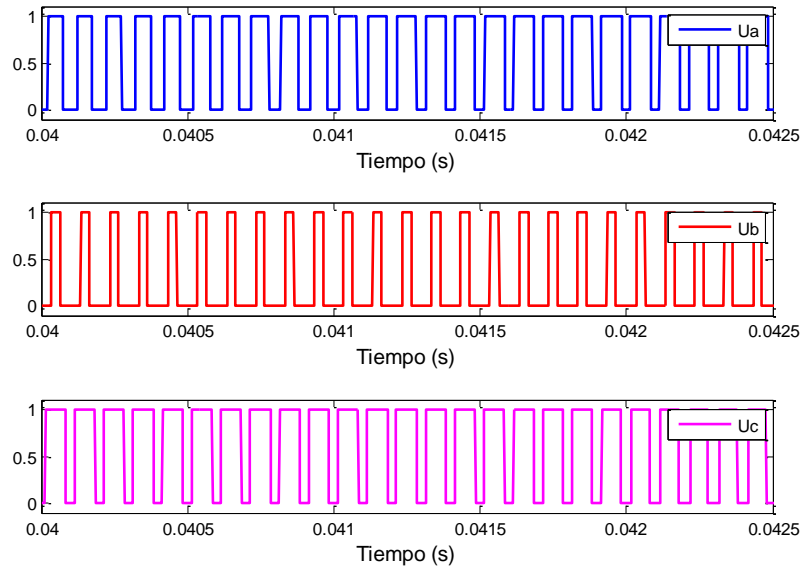


Figura 4.11. Señales de salida al Space Vector Modulation de la rama superior.

4.5. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado el control correspondiente del inversor trifásico de dos niveles (VSC). El lazo de control se consigue mediante el método de transformación de las variables abc al marco $\alpha\beta$ (transformada de Clarke), así como la extracción de las secuencias positivas y negativas mediante el *SOGI*. Con esto se pueden generar corrientes de referencia y hacer un lazo de corriente para conseguir la compensación de la señal de error, dando lugar a unas señales moduladoras que regirán el comportamiento de los interruptores de potencia.



5. Fallos de red

5.1. Introducción

En las primeras instalaciones de distribución de energía eléctrica tan sólo era importante la continuidad del suministro eléctrico. Actualmente, no sólo es necesaria la continuidad del suministro eléctrico sino que también es necesaria la calidad, es decir que la tensión y la frecuencia se mantengan dentro de unos márgenes.

La red eléctrica europea determina unas características de las tensiones de red que deben ser de una tensión eficaz de 230V a una frecuencia de 50 Hz (Fig. 5.1). Debido a fallos en el sistema en ocasiones no es posible garantizar que las características de la red se encuentren en estado óptimo y esta casuística es la que debe corregirse.

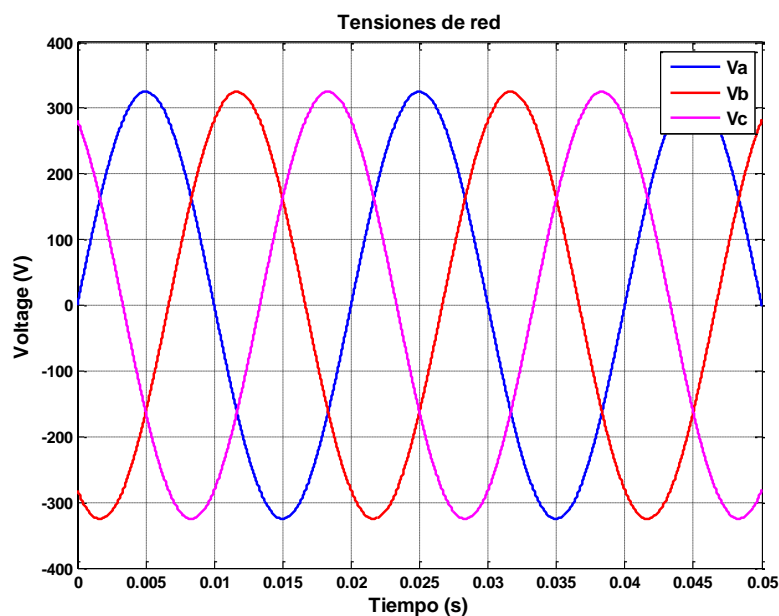


Figura 5.1. Señales de red.

5.2. Tipos de fallos de red

Un fallo de red propiamente dicho es cuando alguna de las características no se encuentra dentro de los márgenes normalizados, pueden producirse huecos de tensión (Sag's), sub-tensiones o sobre-tensiones, entre otros.

Los incidentes más comunes suelen ser provocados por fallos en los aislamientos, por causas meteorológicas (Fig. 5.2) o incluso por animales, así como accidentes en las líneas de transmisión.



Figura 5.2. Una causa meteorológica de fallo en la red.

De los fallos nombrados anteriormente, se pueden observar las características siguientes que los determinan en la tabla 5.1.

Los huecos de tensión (*Sag's*) son caídas de tensión bruscas entre el 90 y el 1% de la señal, de una, dos o tres de las fases. Con una duración que puede oscilar entre los 10 ms hasta 1min. Si la caída de tensión es inferior al 1% se considera un corte de tensión, por el contrario si la caída no es inferior al 90% se considera como una sub-tensión. En el caso de que la tensión supere el 110% de la señal entonces esto sería una sobretensión.

Nombre	Definición	
Hueco de tensión	$90\% U_n > U > 1\% U_n$ $10 \text{ ms} < \Delta t \leq 1 \text{ min}$	
Corte de tensión (interrupción)	Corte breve: $U < 1\% U_n$ $\Delta t \leq 1 \text{ min}$ Corte largo: $U < 1\% U_n$ $\Delta t > 1 \text{ min}$	
Subtensión	$U < 90\% U_n$ $\Delta t > 1 \text{ min}$	
Sobretensión	$U > 110\% U_n$	

Tabla 5.1. Hueco de tensión, interrupción, sub-tensión y sobretensión.

5.3. Huecos de tensión

En este apartado el estudio se centra en los huecos de tensión (*Sag's*), que son los fallos de red que se tratan de solucionar (Fig. 5.3). Los huecos de tensión representan actualmente una de las perturbaciones más importantes desde el punto de vista económico en redes de transporte y distribución.

Como ya hemos mencionado anteriormente los huecos de tensión se caracterizan por una disminución brusca de la tensión de la red que puede oscilar entre el 90% y el 1% (Fig. 4.3), con una duración de 10 ms a 1 min.

La profundidad de un hueco de tensión está definida como la diferencia entre la tensión eficaz durante el hueco de tensión y la tensión declarada.

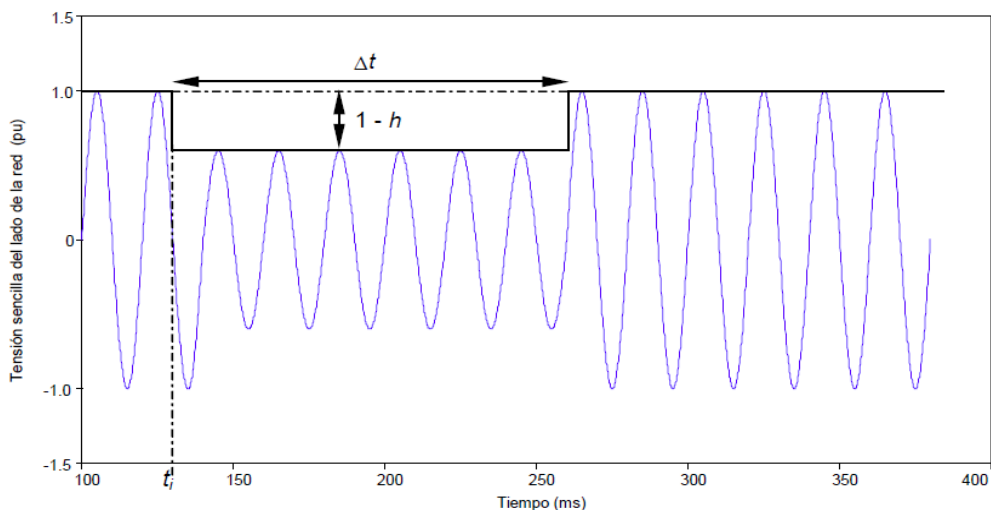


Figura 5.3. Hueco de tensión.

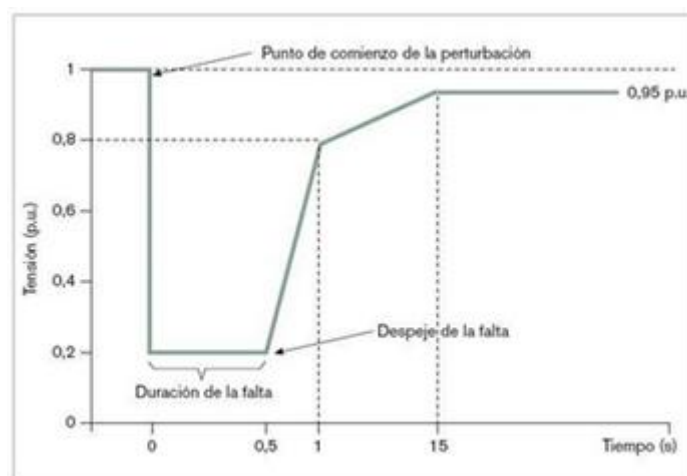


Figura 5.4. Límites normalizados de los huecos de tensión.

A medida que las redes se han ido mejorando para reducir la frecuencia y la duración de las interrupciones, los huecos de tensión han tomado una mayor relevancia, ya que pueden provocar el mal funcionamiento o la parada de equipos sensibles.

Existen muchas normas internacionales concernientes a la calidad del suministro eléctrico que definen un hueco de tensión. A nivel nacional se define en la norma EN 50160 [5], de aplicación a redes de hasta 35 kV, cuyas características ya hemos comentado anteriormente (Fig. 5.4).

En la elaboración del sistema que se ha diseñado, se ha establecido un marco que limita la actuación del sistema, de esta forma se asegura que las tensiones de red cumplen los marcos legales que establece la norma nacional EN 50160 [5]. De esta forma el marco que se ha impuesto en el sistema es el que se puede observar en la figura 5.5. Las tensiones de red deberán estar comprendidas dentro de este marco para evitar desconexiones de la red eléctrica, el sistema propuesto deberá conseguir situarlas dentro de los márgenes del mismo.

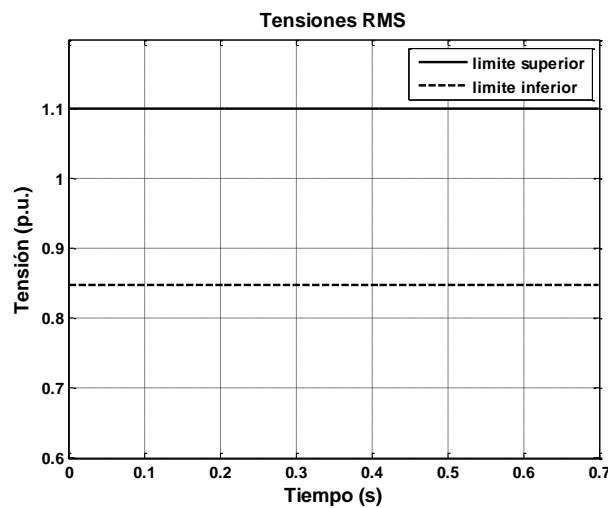


Figura 5.5. Límites impuestos al sistema.

5.3.1. Tipos de huecos de tensión estudiados

Existen diferentes tipos de huecos de tensión dependiendo de las fases caídas y del desfase entre estas. En la realización del proyecto se han tenido en cuenta los huecos de tensión (*Sag's*) equilibrados, es decir aquellos que no están desfasadas las tensiones de red.

En la tabla 5.2 se muestran los tipos de huecos de tensión en los que se ha experimentado para obtener resultados sobre la actuación del sistema de control avanzado.

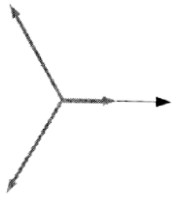
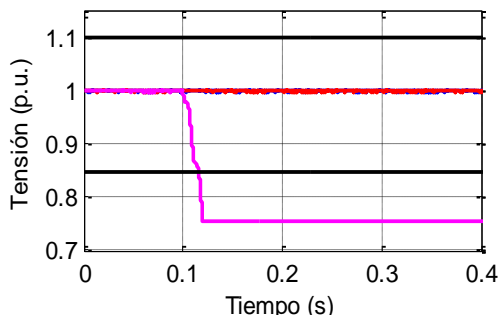

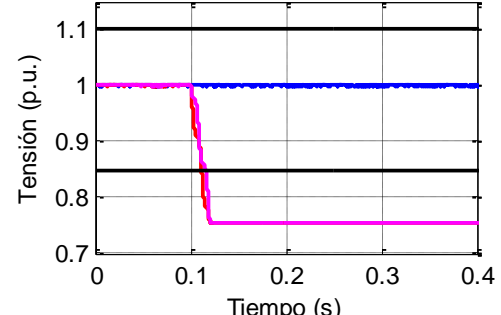

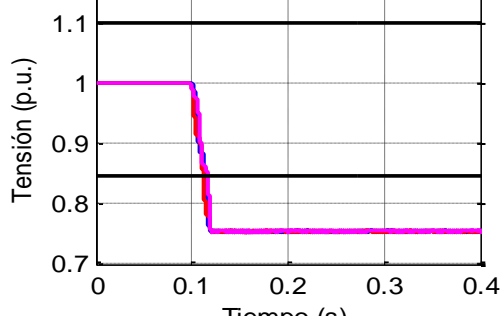
Tipo de hueco	Características	Ejemplo
B	 <p>Caída de una fase.</p>	
E	 <p>Caída de dos fases</p>	
A	 <p>Caída de tres fases.</p>	

Tabla 5.2. Tipos de huecos estudiados.

5.3.2. Efectos provocados por los huecos de tensión

La aparición de huecos de tensión en la red implica severos problemas tanto en el ámbito industrial como el doméstico, dado que afectan negativamente a los sistemas. No son tan perjudiciales como las interrupciones pero debido a que ocurren con mayor frecuencia, las pérdidas económicas pueden ser mayores que las causadas por las interrupciones.

La presencia de un fallo de red puede representar la parada de equipos sensibles, el disparo de relés de tensión mínima así como el reinicio anormal de procesos automatizados, la desaceleración de motores y la parada de computadoras o pérdida de información de estas.

5.4. Conclusiones

En el capítulo se han presentado los fallos de red, explicando que son, como pueden producirse y los tipos de fallos más comunes que hay.

Se concreta en los huecos de tensión, que son los que se tratan en el estudio, especificando las propiedades de los diferentes tipos tratados así como los efectos que provocan en los sistemas electrónicos.

6. Estrategias de inyección durante fallos de red

6.1. Introducción

En este apartado se muestran diferentes estrategias para solventar los fallos de red basadas en la inyección de energía reactiva.

En condiciones normales de la red, los inversores trifásicos regulan la potencia activa que inyectan a la red. Cuando la red falla, el sistema de control puede mitigar los efectos del *Sag* inyectado potencia reactiva en forma de corriente para dar soporte a la tensión de la red.

6.2. Efectos de la potencia

El hecho de inyectar energía a la red eléctrica mediante energía activa o reactiva afecta a la red distintamente.

La potencia activa inyectada representa para el sistema la energía útil, la que consumen las cargas, o es transformada y la que la compañía de distribución de energía compra.

Un dato importante a tener en cuenta es la potencia aparente, se trata de la suma vectorial de la potencia activa y la reactiva (6.1). Es importante dado que esta es la que limita la actuación del sistema relacionando las potencias que la componen (véase la figura 6.1).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (6.1)$$

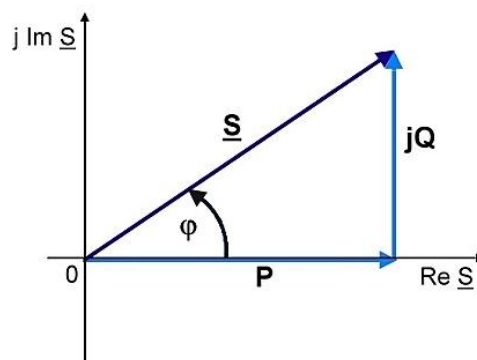


Figura 6.1. Relación entre potencia activa, aparente y reactiva.

6.2.1. Inyección de potencia activa

Cuando la red tiene un comportamiento inductivo (Fig. 6.2), como el caso que se trata en el proyecto, la inyección de potencia activa no tiene un efecto notorio. Al inyectar esta energía a la red en forma de corriente y ésta comportarse como una inductancia, la tensión que se genera al recorrer la corriente por el inductor está desfasada 90° respecto de la tensión de la red. Como se puede observar en las figuras 6.3-6.4, no aumenta la tensión de la red de forma notoria.

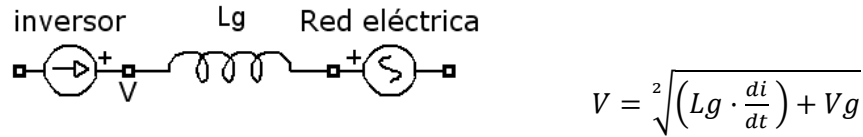


Figura 6.2. Comportamiento inductivo de la red.

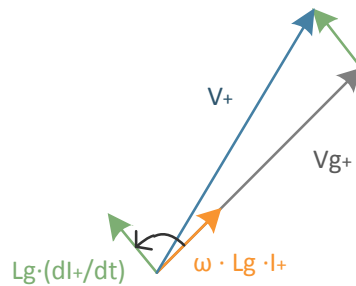


Figura 6.3. Comportamiento de la inyección de potencia activa.

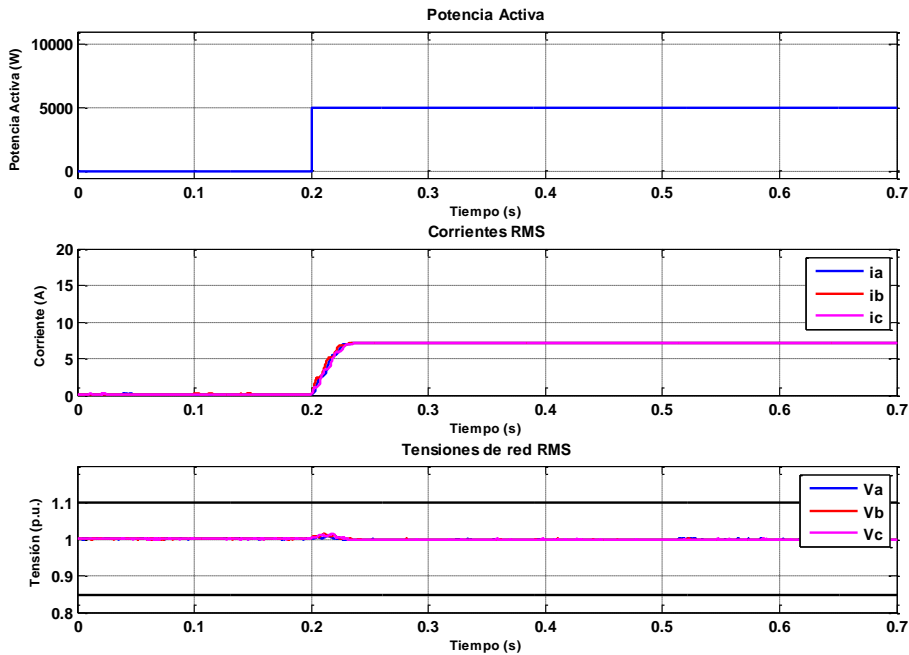


Figura 6.4. Ejemplo del efecto de la inyección de potencia activa.

En el caso de la inyección de potencia reactiva sí que hay un efecto notorio respecto a las tensiones de red que se consiguen. La inyección de potencia reactiva se puede hacer de dos formas igual que la activa pero en este caso al tratarse de una red con un comportamiento inductivo sí que tiene efectos notorios con referencia a las tensiones de la red.

6.2.2. Inyección de potencia reactiva por secuencia negativa

En la inyección de potencia reactiva por secuencia negativa en forma de corriente a la red se observa que la tensión que se genera en la inductancia de red está en contrafase de la tensión de red y por tanto se consiguen juntar las líneas como podemos observar en las figuras 6.5-6.6. De esta forma cuando sea necesario equalizar (juntar) las tensiones de red se procede a inyectar potencia reactiva de este modo.

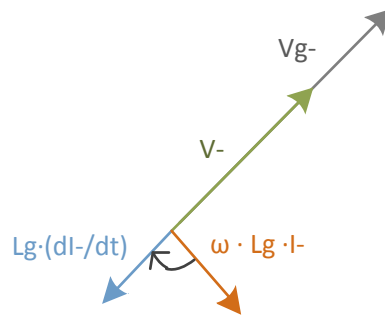


Figura 6.5. Comportamiento de la inyección de potencia reactiva por secuencia negativa.

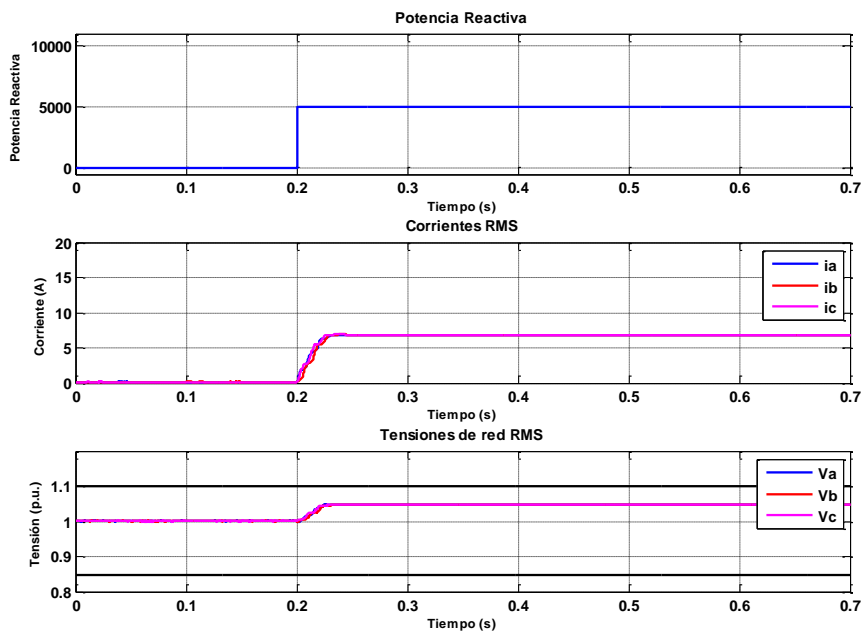


Figura 6.6. Ejemplo del efecto de la inyección de potencia reactiva por secuencia negativa.

6.2.3. Inyección de potencia reactiva por secuencia positiva

En la inyección de potencia reactiva por secuencia positiva a la red, se consigue levantar la tensión de la red. Dado que la tensión que proporciona la inductancia está en fase con la tensión de red provoca que la tensión aumente. En las figura 6.7 se puede observar este hecho.

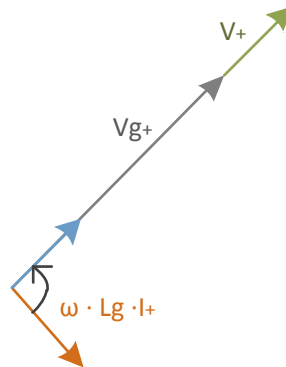


Figura 6.7. Comportamiento de la inyección de potencia reactiva por secuencia positiva.

6.3. Como levantar la red en fallo

El objetivo planteado es conseguir solventar los huecos de tensión siguiendo los métodos de levantar y equalizar las tensiones de red. Para este fin como hemos explicado anteriormente, al tratarse de una red inductiva necesitamos inyectar potencia reactiva a la red en forma de corriente.

Sin embargo para la inyección de potencia reactiva en forma de corriente el convertidor tiene en cuenta las corrientes de referencia generadas y estas contienen información de la secuencia positiva y negativa de la tensión de la red como se muestra en las ecuaciones 4.10 - 4.11. Se obtienen resultados diferenciados inyectando potencia reactiva por las diferentes secuencias obteniendo así un apoyo de tensión flexible [2]. De esta manera se han diseñado distintas estrategias para la inyección de la potencia reactiva a la red con el fin de solventar el fallo dependiendo de las características de este.

Para obtener una tensión de apoyo flexible, es necesario realizar un balance entre las secuencias positiva y negativa [3]. Esto es obtenido con las corrientes de referencia de la potencia reactiva (ecuaciones 6.2 – 6.3) donde los valores k^+ y k^- son los parámetros de control para obtener este balance. Estos parámetros están definidos de la siguiente forma. $k^- = 1 - k^+ \mid k^+ \in [0,1]$

$$i_{\alpha}^*(q) = \frac{2}{3} Q^* \frac{k^+ V_{\beta}^+ + k^- V_{\alpha}^-}{k^+ [(V_{\alpha}^+)^2 + (V_{\beta}^+)^2] + k^- [(V_{\alpha}^-)^2 + (V_{\beta}^-)^2]} \quad (6.2)$$

$$i_{\beta}^*(q) = \frac{2}{3} Q^* \frac{-k^+ V_{\beta}^+ - k^- V_{\alpha}^-}{k^+ [(V_{\alpha}^+)^2 + (V_{\beta}^+)^2] + k^- [(V_{\alpha}^-)^2 + (V_{\beta}^-)^2]} \quad (6.3)$$

Diferentes configuraciones del parámetro de control k^+ causan diferentes efectos en la inyección de potencia reactiva y por consiguiente diferencias notorias en la tensión de apoyo que se entrega a la red.

En la figura 6.8 se muestran los efectos producidos por la variable de control k^+ en las tensiones de la red cuando se inyecta potencia. En la imagen, las líneas discontinuas simbolizan la tensión de red cuando no se está entregando potencia reactiva; y las líneas continuas, cuando se está inyectando una cierta cantidad de potencia reactiva. Como se observa en la figura 6.8, si $k^+ = 1$ las tensiones de la red se levantan, y por el contrario cuando la variable $k^+ = 0$ estos se ecualizan. Cuando $k^+ = 1$ la corriente de referencia sigue a la secuencias positivas V_{α}^+ y V_{β}^+ de las señales de red y cuando $k^+ = 0$ la corriente de referencia sigue la secuencias negativas V_{α}^- y V_{β}^- .

Si se encuentra en el caso de que $0 < k^+ < 1$ se da una combinación de las secuencias positivas y negativas, de esta manera obtenemos un apoyo de voltaje flexible.

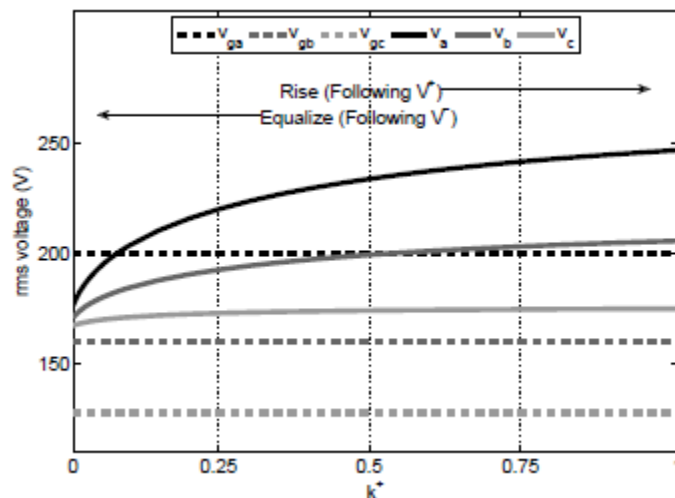


Figura 6.8. Variación de las tensiones de red rms en función de k^+ .

6.4. Conclusiones

En esta sección se han mostrado los diferentes efectos de la inyección de potencia activa y reactiva a la red cuando esta tiene un comportamiento inductivo. Posteriormente se analizan varias estrategias para la solucionar los huecos de tensión mediante la inyección de energía reactiva en forma de corriente realizando un balance de las secuencias positiva y negativa en función de la variable de control k .



7. Algoritmo propuesto

7.1. Introducción

Con las diferentes estrategias que se proponen, se ha diseñado un nuevo algoritmo para la inyección de energía a la red cuando está en fallo. El algoritmo se basa en una inyección flexible de potencia, solo entrega a la red la energía necesaria para solventar el hueco (si es posible) y poder seguir conectado a la misma. El algoritmo creado actúa sobre el sistema de control, haciendo que este actúe para solventar el problema, en la figura 7.1 se muestra la situación del sistema de control avanzado dentro del proceso del sistema.

El algoritmo propuesto identifica la existencia de un problema en la red. Una vez determinado que se ha producido un fallo, lo caracteriza con el fin de determinar cómo actuar. Caracterizado el fallo procede a realizar la inyección de energía con la estrategia adecuada para realizar la equalización correcta de la tensión de red. Por último se encarga de determinar cuando desaparece el fallo de red y volver al modo de funcionamiento normal del inversor e inyectar potencia activa.

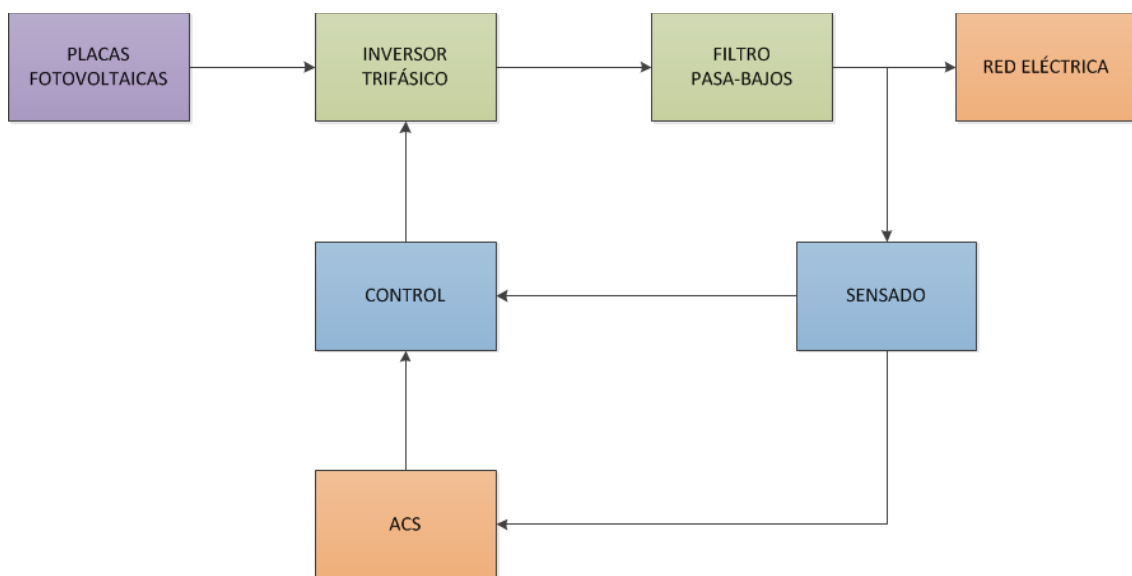


Figura 7.1. Diagrama con el sistema de control propuesto.

Para el funcionamiento del sistema creado, se precisa la información del estado de las tensiones de red en todo momento, con el fin de apreciar la existencia de un hueco de tensión. De este modo han de ser sensadas constantemente las tensiones de la red $V_{abc}(t)$.

Otra variable que requiere es la potencia total de la que dispone el sistema, para realizar la corrección del fallo acorde a esta. Con esta información el sistema de control avanzado actúa internamente y entrega al sistema de control convencional las variables necesarias (Fig. 7.2) de potencia activa, reactiva y la variable de control k para actuar y solventar el fallo.

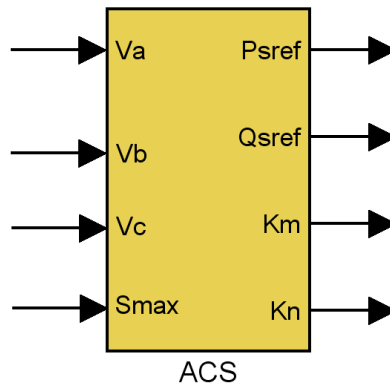


Figura 7.2. Entradas y salidas del sistema de control avanzado.

7.2. Detección del fallo de red

El algoritmo propuesto, como se ha comentado anteriormente, se encarga de identificar que la red eléctrica se encuentra en fallo, sensa continuamente el estado de las tensiones de red $V_{abc}(t)$ y las procesa para determinar la situación de estas.

Con la información de la tensión de cada fase se realiza una comparación para determinar en cada momento cuál de las fases posee la tensión más baja y cuál tiene la tensión más elevada. En el esquema de la figura 7.3 son mostradas las comparaciones realizadas de las tensiones para determinar la fase de mayor tensión V_g y la de menor tensión V_p .

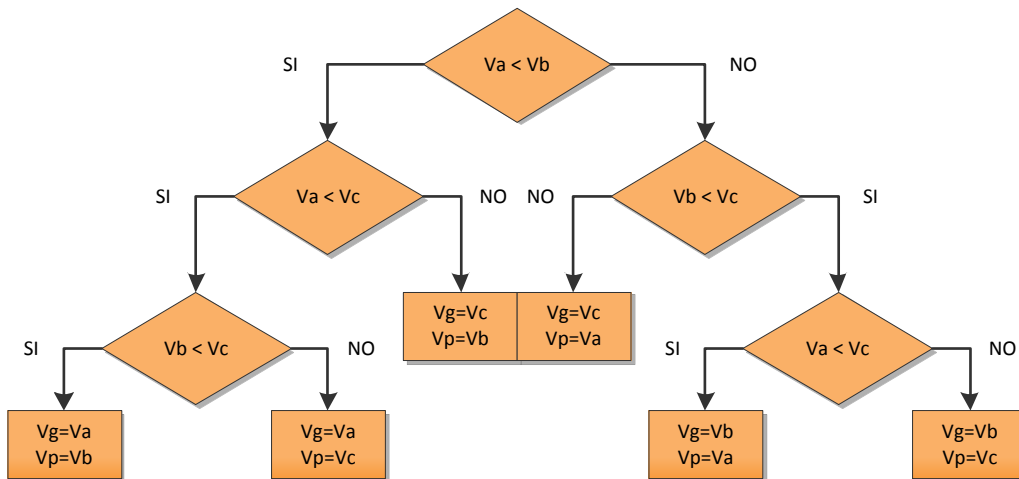


Figura 7.3. Esquema del extractor de las fases de mayor y menor tensión.

Posteriormente una vez determinada las fases de menor y mayor tensión, compara la tensión menor con el límite inferior del marco para localizar un hueco de tensión, y la tensión mayor con el límite superior para determinar si se encuentra en situación de sobretensión (Fig. 7.4). De esta forma es posible determinar si la red se encuentra en fallo y así actuar en consecuencia.

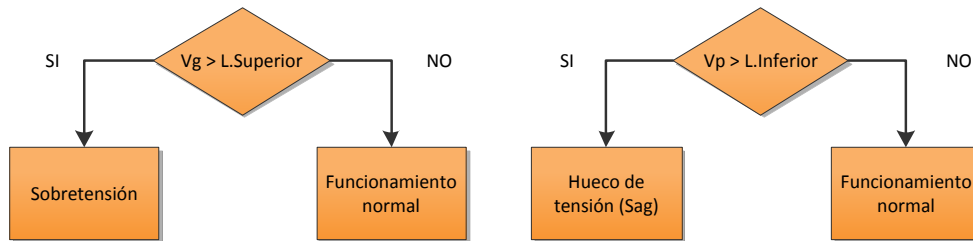


Figura 7.4. Determinación de la situación de red.

7.3. Caracterización del fallo de red.

Una vez diagnosticado el fallo de red, se procede a caracterización de este y determinar cómo actuar ante la situación de este. Siguiendo una serie de pasos caracteriza el hueco de tensión, como podemos observar en el esquema de la figura 7.5. Comprueba constantemente si las señales cabrán en el marco, y si están dentro o no para saber si el problema está resuelto.

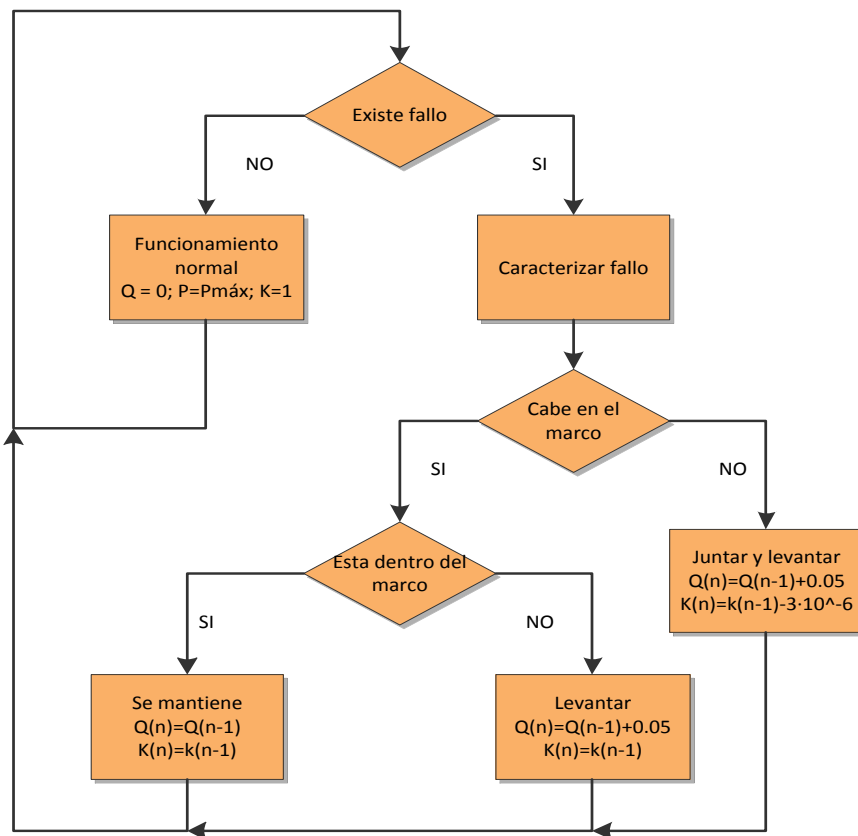


Figura 7.5. Esquema de la caracterización del fallo.

Como se observa en el esquema sigue un orden cíclico en el que constantemente está determinando el estado en el que se encuentra la red y corregir *online* el fallo de red.

Antes de actuar el algoritmo caracteriza el hueco de tensión comprobando si las tres fases caben en el marco de tensiones impuesto. Compara sucesivamente la diferencia entre las fases de mayor tensión y la de menor con los límites superior e inferior del marco.

Otra característica a definir de la caída de tensión es la profundidad del hueco, en función de esta se inyecta una cantidad de energía determinada como primer paso para acercar las fases dentro de los límites establecidos del marco.

En la figura 7.5 se observa el esquema de la caracterización de los huecos de tensión para un mayor entendimiento, en el que se observan las distinciones que hace el algoritmo en función de la profundidad del hueco de tensión al ser detectado, haciendo que el sistema actúe entregando más o menos potencia, así como indicando por qué secuencia se entrega.

En el esquema mostrado se indica la cantidad en p.u de potencia que entrega el inversor a la red en forma de potencia reactiva en el primer instante, así como que cantidad de la potencia se entrega por secuencia positiva y negativa, determinada por la variable de control k. Esto solo lo aplica el algoritmo al detectar el hueco de tensión, tras esta actuación equaliza de forma progresiva las tensiones de red para que las señales se encuentren dentro de los límites establecidos, aumentando la potencia reactiva siguiendo la ecuación (7.1) y en el caso que sea necesario variar la variable de control k para juntar o levantar las líneas inyectando dicha potencia por la secuencia positiva o negativa siguiendo la ecuación (7.2).

$$Q(n) = Q(n - 1) + 0.05 \quad (7.1)$$

$$k(n) = k(n - 1) - 3 \cdot 10^{-6} \quad (7.2)$$

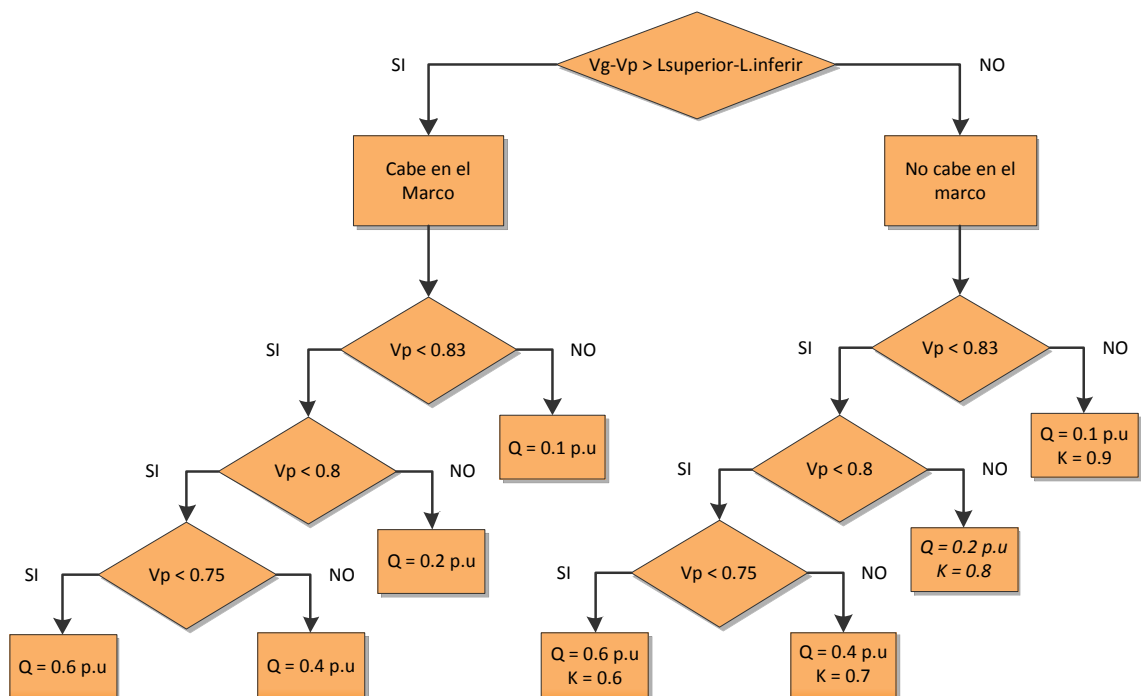


Figura 7.5. Caracterización del fallo.

En el caso de que las fases quepan en el marco se inyecta en el sistema una potencia reactiva como primera medida en función de la profundidad del hueco de tensión con un valor de $k+=1$, implicando inyectar toda la potencia reactiva por secuencia positiva y levantar las tensiones de red para poder situarlas en el marco.

La potencia reactiva inyectada consigue acercar las fases al marco y a partir del momento es incrementada progresivamente hasta que las fases se encuentren dentro del marco, siguiendo la ecuación (7.1).

La figura 7.6 (gráficas de la izquierda) ilustra como en el momento en el que hay un hueco de tensión se inyecta una gran cantidad de potencia reactiva y después sigue incrementado esta de forma gradual hasta conseguir solventar el problema.

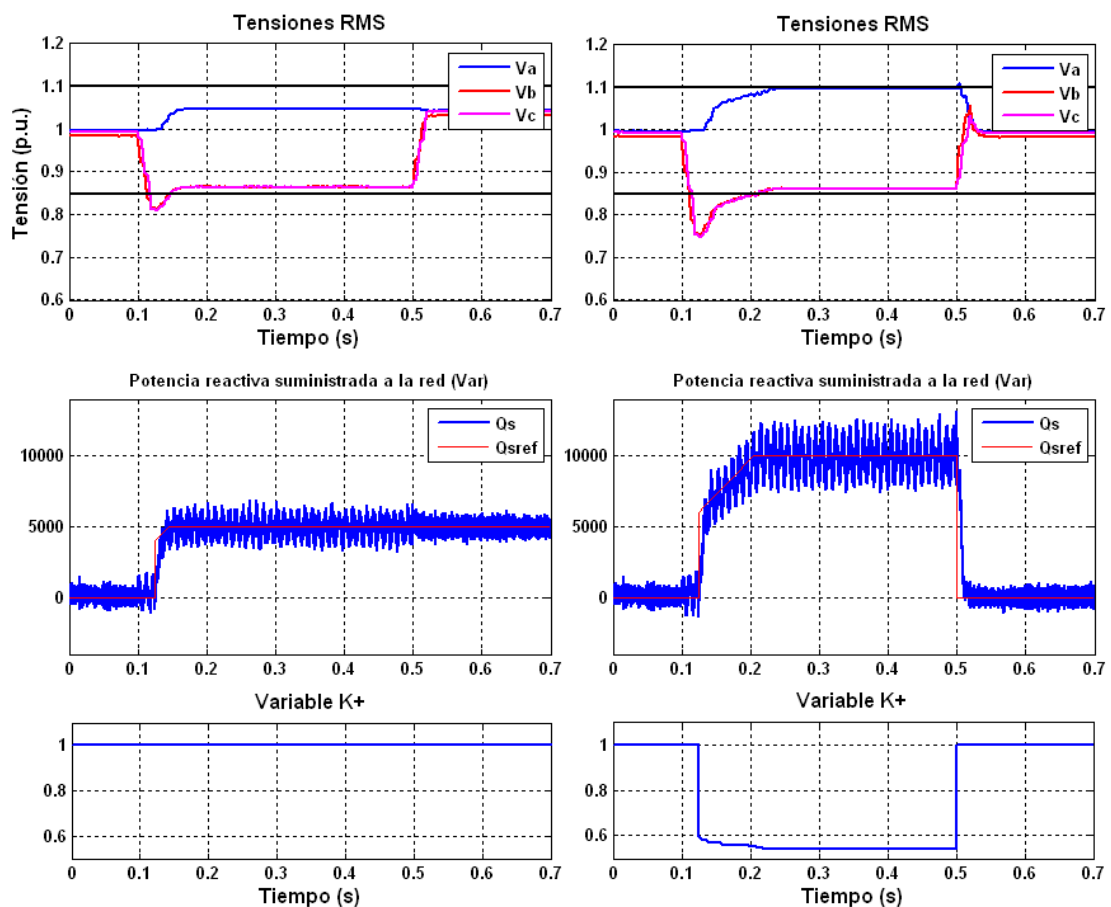


Figura 7.6. Ejemplos de la caracterización (izquierda) cabe en el marco. (derecha) no cabe en el marco.

Por otro lado, si las tensiones de las fases no caben dentro del marco (véase la figura 7.6, gráfica de la derecha) del mismo modo es inyectado al sistema una potencia reactiva que depende de la profundidad del hueco de tensión, pero además se varía el valor de la variable de control $k+$ dependiendo de la misma profundidad siguiendo el esquema de la figura 7.5.

7.4. Actuar sobre el control

Una vez caracterizada la caída de tensión y el sistema de control avanzado ha determinado como actuar, esta información debe traspasarse al sistema de control convencional para que actúe a consecuencia y corrija el problema.

Al sistema de control se le envían las potencias de referencia activa y reactiva así como las variables de control $k+$ y $k-$, que se encargan de controlar la inyección por secuencia negativa y positiva, y de esta forma solventar el hueco de tensión, manteniendo una tensión estable dentro del marco establecido.

7.5. Determinación de desaparición de incidencia

Un punto importante en la corrección de fallos de red es detección de la desaparición de estos. Si el sistema sigue actuando ante la inexistencia de una caída de tensión pueden darse fallos, provocando que las tensiones de red no se encuentren en sus valores nominales.

En la figura 7.7 se observa la reacción del sistema si no detecta que la red es restablecida, el sistema estaría generando una sobretensión innecesaria. Por esta razón se ha diseñado un sistema que localiza la desaparición del *Sag*. Emplea las tensiones de red sensadas y detecta cuando estas vuelven a encontrarse en los parámetros normales, llevando el sistema de control al modo de funcionamiento normal y entregando toda la potencia activa disponible a la red eléctrica.

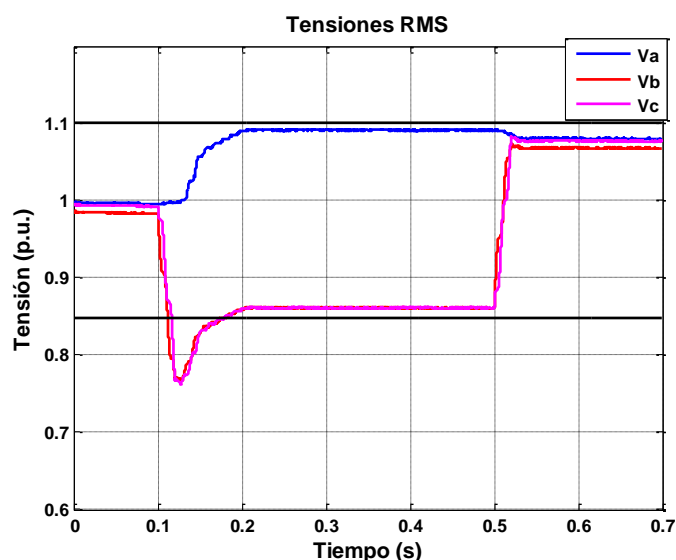


Figura 7.7 Tensiones de red sin tener en cuenta la desaparición de la incidencia.

7.6. Conclusiones

El algoritmo de control diseñado consigue detectar, caracterizar y corregir fallos en la red eléctrica de una forma rápida y eficiente. Consiguiendo en la mayor parte de las ocasiones recuperar las tensiones de red en una décima parte del tiempo que establece la normativa, procurando no desconectarse de la red eléctrica así como entregando potencia activa si es posible. Esto se logrado mediante una serie de estrategias de inyección de energía a la red, que combinan la entrega de potencia reactiva por secuencia positiva y negativa. El sistema al poder combinar la inyección de potencia activa y reactiva simultáneamente, optimiza la entrega de potencia reactiva de forma que solo proporciona la necesaria para solventar el fallo, y de esta forma poder seguir entregando potencia activa.

Por último el algoritmo propuesto ofrece la posibilidad de adaptarse a otros sistemas de mayor o menor potencia dado que un dato que precisa es la potencia de la que dispone el sistema, y que internamente actúa en función de la misma.



8. Resultados

8.1. Introducción

Para comprobar el funcionamiento del algoritmo propuesto, se han realizado una serie de pruebas mediante simulaciones en el entorno *Matlab Simulink* con el fin de demostrar la gran utilidad que introduce en la solución de fallos de red.

En las gráficas que se presentan a continuación se muestran las tensiones de red, las corrientes inyectadas por el inversor a la red, las potencias activa y reactiva y la variable de control k , que indica por que secuencia se entrega la potencia reactiva. Con estas gráficas se podrá ejemplificar y demostrar cómo responde el sistema ante fallos de la red eléctrica, viendo que sucede y cómo actúa el algoritmo de control propuesto.

En cada una de las pruebas realizadas el hueco de tensión tiene una duración de 0.4s y este aparece a los 0.1s y desaparece a los 0.5s. Aunque para la ejemplificación del algoritmo los huecos tienen una duración determinada el sistema es el encargado de detectar cuando aparece y se marcha el hueco de tensión.

El sistema parte de la situación en la que se está entregando la potencia activa máxima que entregan los paneles a la red hasta detectar que hay un hueco de tensión. El inversor usado en las pruebas tiene una potencia máxima de 10KVA_r, por tanto se parte de que se está inyectando esa energía en forma de potencia activa a la red. El hecho de estar inyectando esta potencia es debido a que lo que interesa económicamente es vender la mayor cantidad de potencia activa a la red eléctrica.

Una vez llega el hueco de tensión el algoritmo lo detecta y empieza a actuar. Cuando se restablece la red el inversor volverá al funcionamiento normal actuando con normalidad inyectando la potencia máxima de los paneles como potencia activa.

8.2. Huecos de tensión del tipo B

En este apartado se muestra la actuación del sistema ante un hueco del tipo B (caída de tensión de una de las tres fases). Se proponen tres huecos de tensión en los que varía la profundidad del hueco.

8.2.1. Caída del 17%

Sometiendo el sistema a una caída de tensión de una de las fases, con una caída del 17% respecto a la tensión nominal, se puede observar en la figura 8.1 que el sistema responde inyectando potencia reactiva, tal como se ha comentado en el apartado 7.3 (caracterización del fallo de red). Al tratarse de una caída de tensión pequeña el sistema responde inyectando energía

reactiva en forma de corriente con una cantidad limitada (2 kVAr) y posteriormente la aumenta gradualmente hasta conseguir que las tensiones de la red se encuentren dentro del marco establecido siguiendo el esquema de la figura 7.5.

Observando la gráfica de las corrientes inyectadas a la red, en el instante en que se produce el fallo de la red, se muestra que el sistema se procede a inyectar potencia reactiva, las corrientes aumentan sin llegar a acercarse siquiera a la corriente máxima que puede entregar el inversor.

Con la figura que muestra la variable de control k se puede determinar por qué secuencia (positiva o negativa) se inyecta la corriente. En este caso dado que la variable de control $k = 1$, representa una inyección por secuencia positiva y por consiguiente se están levantando las líneas. El resultado de este hecho lo observamos en la figura que muestra las tensiones rms de la red.

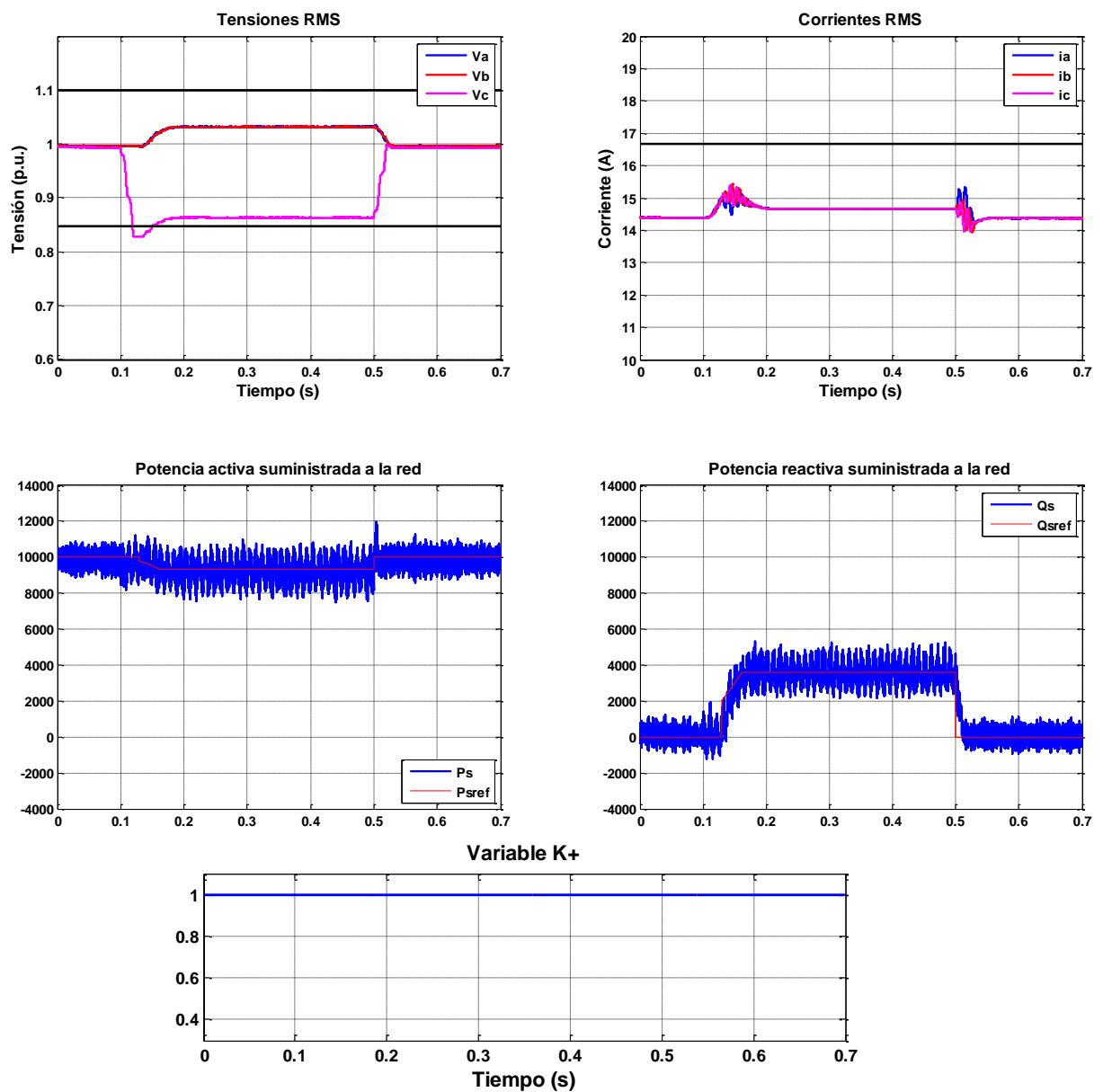


Figura 8.1 Tensiones, Corrientes, Potencias Activa y reactiva, y variable k de un hueco de tensión del 17%.

8.2.2. Caída del 22%

En este otro ejemplo se somete el sistema también a una la caída de tensión de una de las fases, pero en este caso con una caída del 22% respecto a la tensión nominal, se observa en la figura 8.2 que el sistema, como en el caso anterior, responde inyectando potencia reactiva. Al tratarse de una caída de tensión en este caso más grande (del 22%) el sistema responde inyectando energía reactiva en forma de corriente con una cantidad mayor al caso anterior (4 kVAr) y posteriormente la aumenta gradualmente hasta conseguir que las tensiones de la red se encuentren dentro del marco siguiendo el esquema de la figura 7.5.

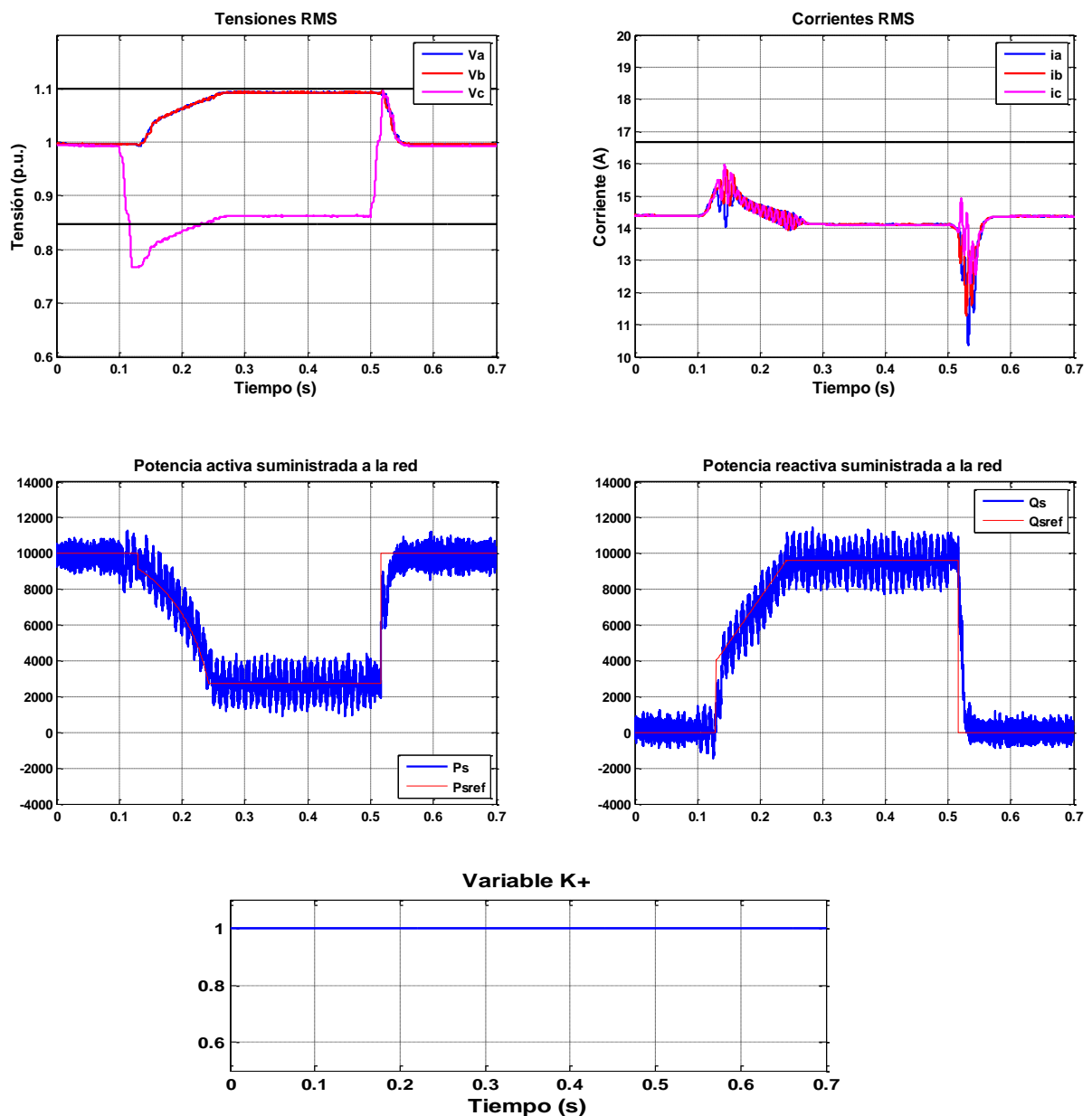


Figura 8.2 Tensiones, Corrientes, Potencias Activa y reactiva, y variable k de un hueco de tensión del 22%.

La gráfica de las corrientes inyectadas a la red (Fig. 8.2) muestra que en el instante en que se produce el fallo de la red, las corrientes aumentan sin llegar a sobrepasar el límite de la corriente máxima que puede entregar el inversor (16.6 A).

Por otro lado la gráficas de las potencias indican una gran cantidad de inyección de potencia reactiva para solventar el hueco (de mayor profundidad). Así mismo la potencia activa disminuye seriamente, dado que el inversor solo puede proporcionar una potencia aparente de 10 kVAr y sigue la ecuación (6.1) que relaciona ambas potencias.

El comportamiento de la variable de control k ($k = 1$) concluye que el sistema no precisa de juntar las líneas, de este modo inyecta toda la potencia reactiva por secuencia positiva.

8.2.3. Caída del 25%

Para finalizar la ejemplificación de los huecos de tensión con caída de una de las fases, el ejemplo que se vislumbra en la figura 8.3 es un hueco de una profundidad considerable, el cual no cabe en el marco y será necesario ecualizar las tensiones de las líneas. Se trata de una caída de tensión del 25% respecto a la tensión nominal.

El sistema responde inyectando energía reactiva con una cantidad notoria (6 kVAr) y posteriormente la aumenta gradualmente hasta llegar al límite del inversor (10 kVAr). El inversor precisa entregar toda la potencia de la que dispone por energía reactiva, y por tanto no podrá seguir entregando nada de potencia activa.

Las corrientes estas aumentan considerablemente respecto a las de los casos anteriores pero estas siguen manteniéndose por debajo de la corriente máxima que puede proporcionar el inversor.

Con este ejemplo se puede demostrar el funcionamiento correcto del algoritmo. Dado que observando las gráficas de la variable de control k y las de las de las potencias atentamente, se comprende que en el instante de tiempo 0.2 s, la potencia reactiva adquiere su punto máximo, así como la activa su mínimo, pero el detalle importante está en que la variable de control k sigue disminuyendo después de este punto hasta 0.23 s. No es un hecho insólito, ni mucho menos, sino que el sistema de control avanzado determina que las tensiones aún no se encuentran dentro de los límites cuando se ha entregado la potencia máxima reactiva en el instante 0.2 y determina que ecualizando más las líneas podrá introducirlas dentro del marco. Por esta razón continúa disminuyendo la variable de control k provocando que las líneas se sigan juntando. En este momento, en el que la variable k no varía en 0.47 s (fases dentro del marco) se está entregando energía a la red mediante la inyección de corriente por combinación de la secuencia la positiva y negativa simultáneamente, con una presencia respectivamente del 53% y 47%.

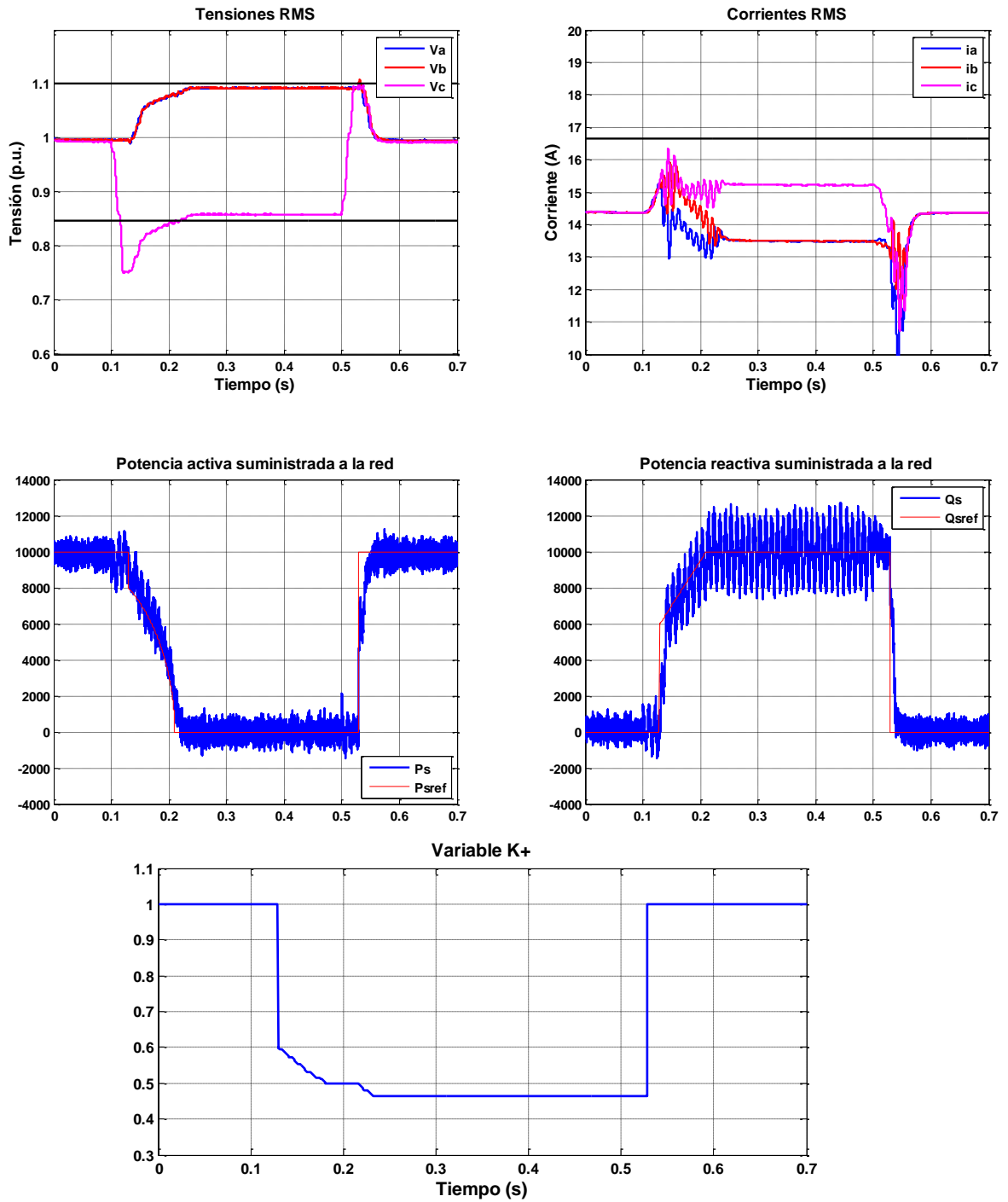


Figura 8.3 Tensiones, Corrientes, Potencias Activa y reactiva, y variable k de un hueco de tensión del 25%.

8.3. Huecos de tensión del tipo E

A continuación se presentan ejemplos de huecos de tensión del tipo E (caída de tensión en dos de las tres fases). Se proponen tres ensayos para demostrar la actuación del sistema, en los que varía la profundidad del hueco de tensión, así como la variación de líneas cuando caen juntas o separadas.

8.3.1. Caída del 17% líneas juntas

Se expone una caída relativamente de poca profundidad (del 17%) en el que las líneas que sufren la caída de tensión permanecen juntas (Fig. 8.4).

La actuación del algoritmo de control no varía en función de las fases caídas, sin embargo el comportamiento del sistema sí que se ve alterado ligeramente. Inicialmente, el sistema inyecta 2 kVAr de potencia reactiva como primera medida y aumenta progresivamente, como en el caso homólogo de caída de una sola línea, hasta conseguir situar las tensiones de red dentro del marco.

Observando la gráfica de las corrientes inyectadas a la red, en el instante en que se produce el fallo de la red, las corrientes aumentan de forma notoria (comparando con el caso de caída de una fase en la figura 8.1). En este caso tampoco se llega a superar la corriente máxima que puede entregar el inversor, dado que una exposición prolongada a una corriente elevada provocaría la destrucción del mismo.

La gráfica de la variable de control k indica que el sistema tan solo está levantando las tensiones de red. Por tanto esta inyectado toda la potencia en forma de corriente a la red por componente positiva.

La potencia reactiva necesaria para solventar esta incidencia de la red es relativamente pequeña y esto permite al inversor seguir entregando potencia activa simultáneamente.

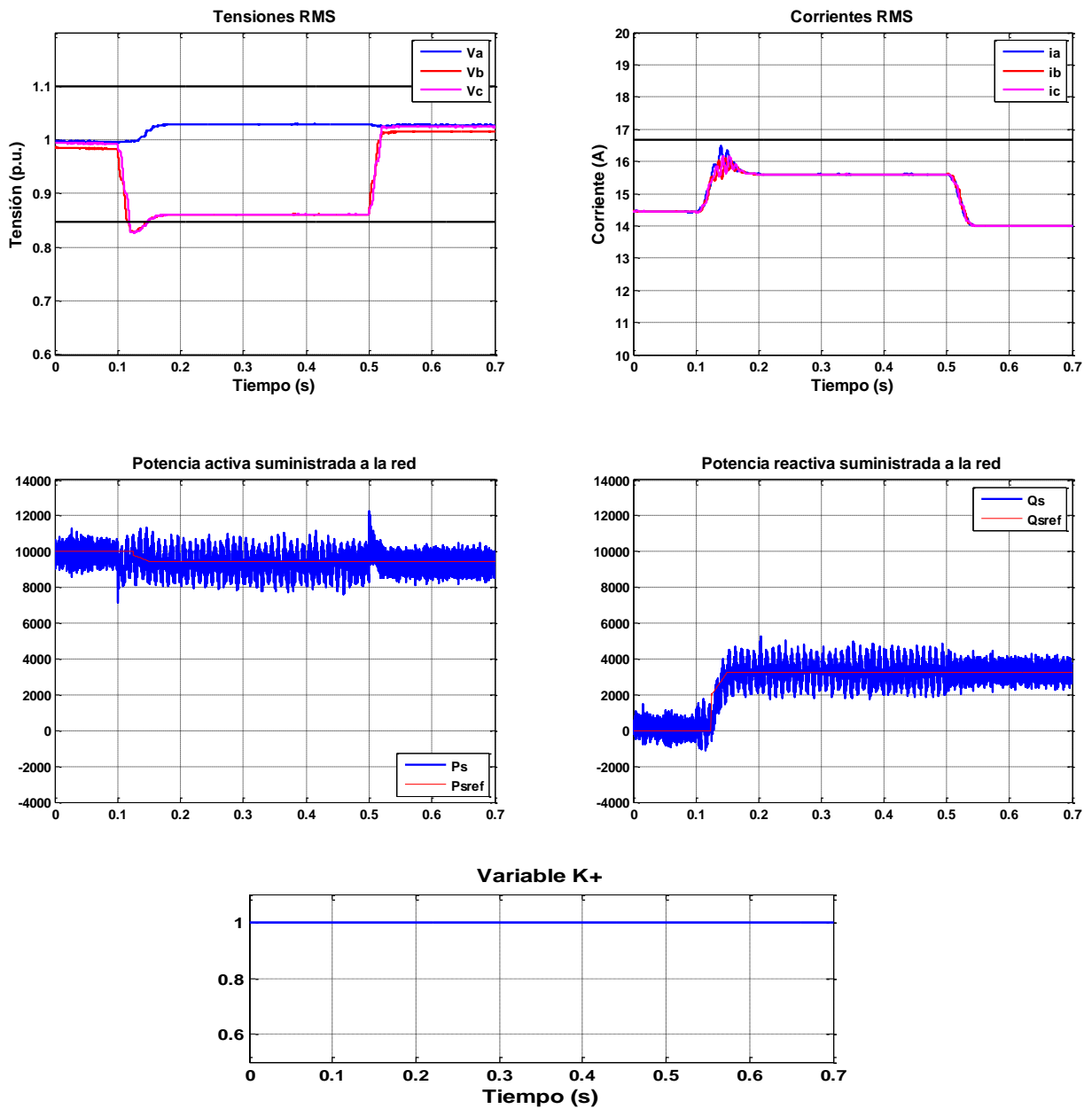


Figura 8.4. Tensiones, Corrientes, Potencias Activa y reactiva, y variable k de un hueco de tensión del 17% de dos líneas juntas.

8.3.2. Caída del 25% líneas juntas

En este otro ejemplo se somete el sistema a una caída de tensión en dos de las fases con una caída del 25% respecto a la tensión nominal (Fig. 8.5). El sistema responde inyectando potencia reactiva, al tratarse de una caída de tensión en este caso más brusca (25%) el sistema responde inyectando energía reactiva en forma de corriente con una cantidad mayor (6 kVAr) y

posteriormente la aumenta gradualmente hasta conseguir que las tensiones de la red se encuentren dentro del marco.

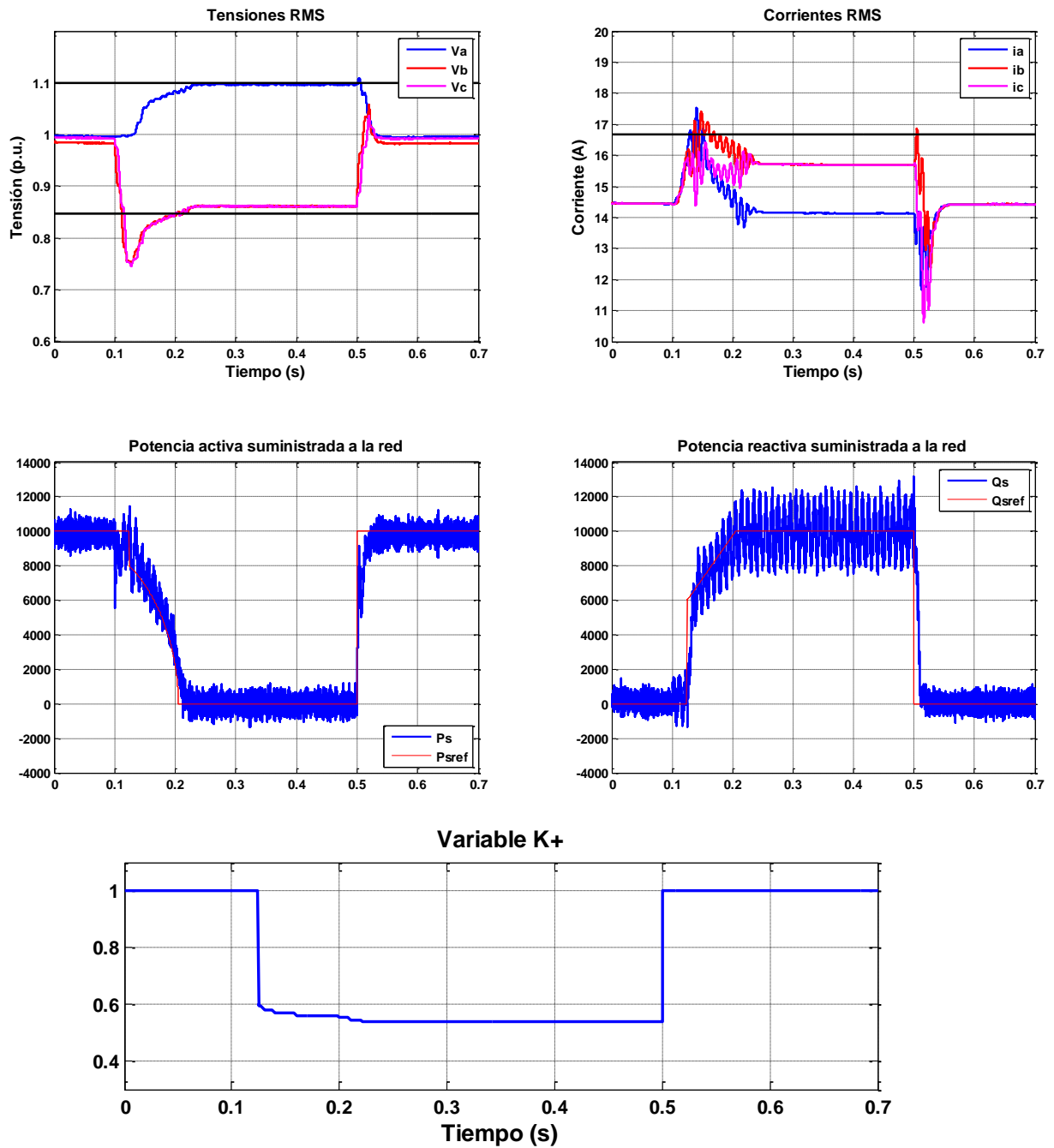


Figura 8.5. Tensiones, Corrientes, Potencias Activa y reactiva, y variable k de un hueco de tensión del 25% de dos líneas juntas.

Al contemplar la gráfica de las corrientes inyectadas a la red, en el instante en que se produce el fallo de la red, las corrientes aumentan de forma elevada llegando a superar la corriente límite que puede proporcionar el inversor. El período de tiempo que estas corrientes supera el límite es reducido, por tanto no es preocupante dado que una exposición tan corta a unas corrientes que superan escasamente el valor de la corriente límite no provocan la rotura del sistema.

En este caso es necesario ecualizar las fases para llevarlas dentro del marco (reflejado en la variable de control k) siendo necesaria la inyección de corriente a la red por secuencia positiva y negativa, con el efecto consecuente de levantar y juntar las líneas.

8.3.3. Caída del 25% líneas separadas

Como culminación de los ensayos de los huecos de tensión del tipo E se expone (véase figura 8.6) el siguiente ejemplo, en el que las fases caídas se establecen separadas con una profundidad del 25%.

Como en todos las ocasiones anteriores el sistema parte inyectando una cantidad determinada, de potencia reactiva (6 kVAr) y la aumenta progresivamente hasta conseguir que las tensiones de red se encuentren en el marco o hasta que se alcanzar la potencia máxima del inversor como sucede en este caso.

El sistema entrega la máxima potencia reactiva disponible y sigue disminuyendo la variable k con el fin de colocar las fases dentro de los límites del marco.

Las corrientes aumentan rápidamente hasta sobrepasar los límites del inversor durante un breve lapso de tiempo, pero en una cantidad diferente para cada una de las fases, dado que estas tienen valores diferentes de tensión entre ellas.

Como una pequeña conclusión extraída de los ejemplos que se han presentado hasta el momento, está que la diferencia que existe entre que caiga una fase o dos está en la cantidad de corriente que tendrá que entregar el inversor para poder solventar el hueco de tensión dado que al caer más fases este tiene que inyectar más corriente para poder solventar el fallo.

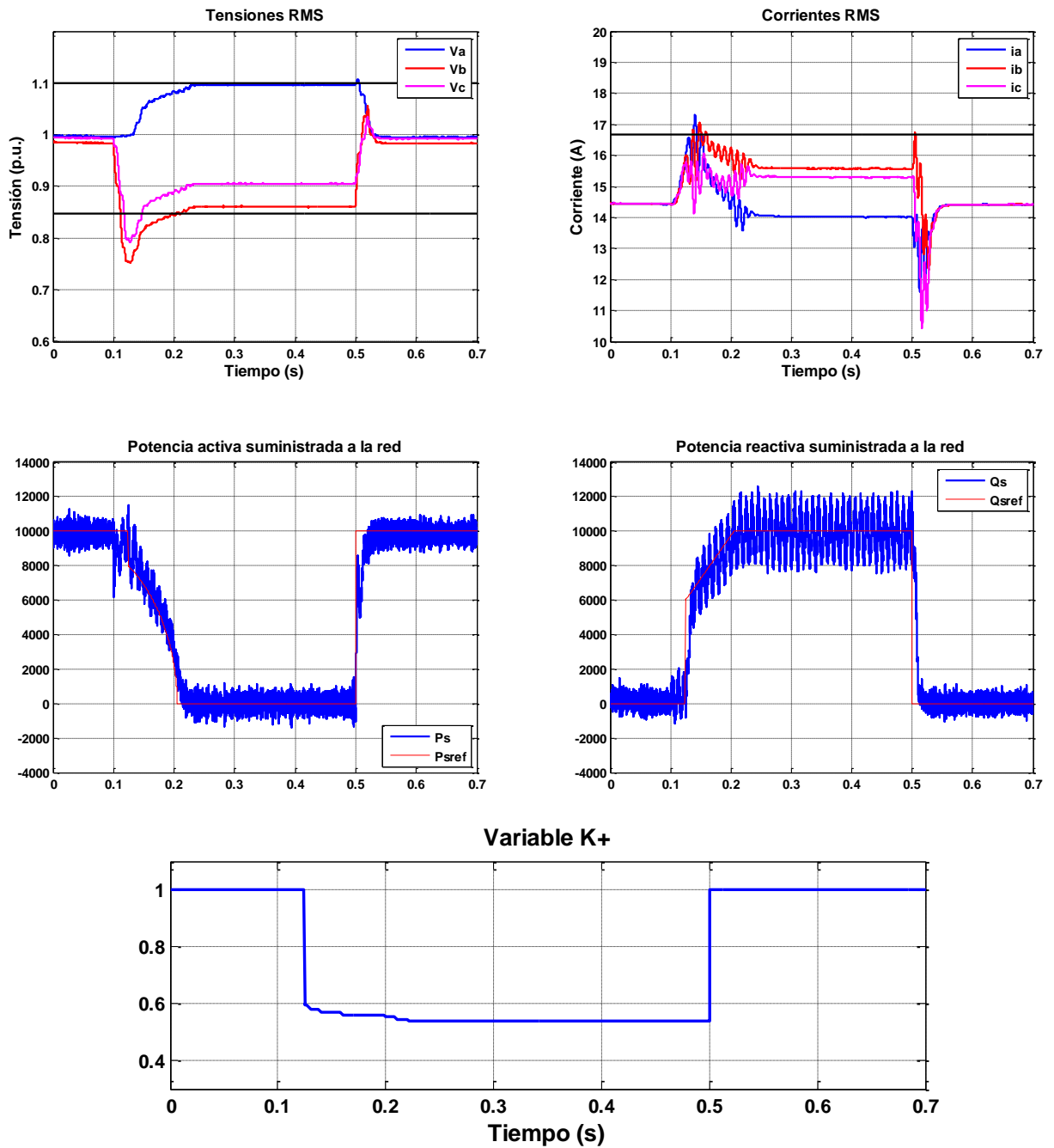


Figura 8.6. Tensiones, Corrientes, Potencias Activa y reactiva, y variable k de un hueco de tensión del 25% de dos líneas separadas.

8.4. Huecos de tensión del tipo A y D

Para finalizar, se muestran los resultados de la actuación del algoritmo del sistema de control propuesto ante dos ejemplos de huecos de tensión tipo A y D con caídas de las tres fases, pero de diferentes características.

8.4.1. Hueco de tensión del tipo A con profundidad del 25%

En la figura 8.7 se vislumbra el efecto provocado por un hueco de una profundidad considerable, en el que cae la tensión de las tres fases con una profundidad del 25% respecto a la tensión nominal. El sistema responde inyectando energía reactiva en forma de corriente (6 kVAr) y posteriormente aumentada de manera gradual hasta llegar prácticamente al límite del inversor (10 kVAr), dado que precisa en este caso 9.8 kVAr para poder adecuar las tensiones de la red y colocarlas dentro de los márgenes establecidos.

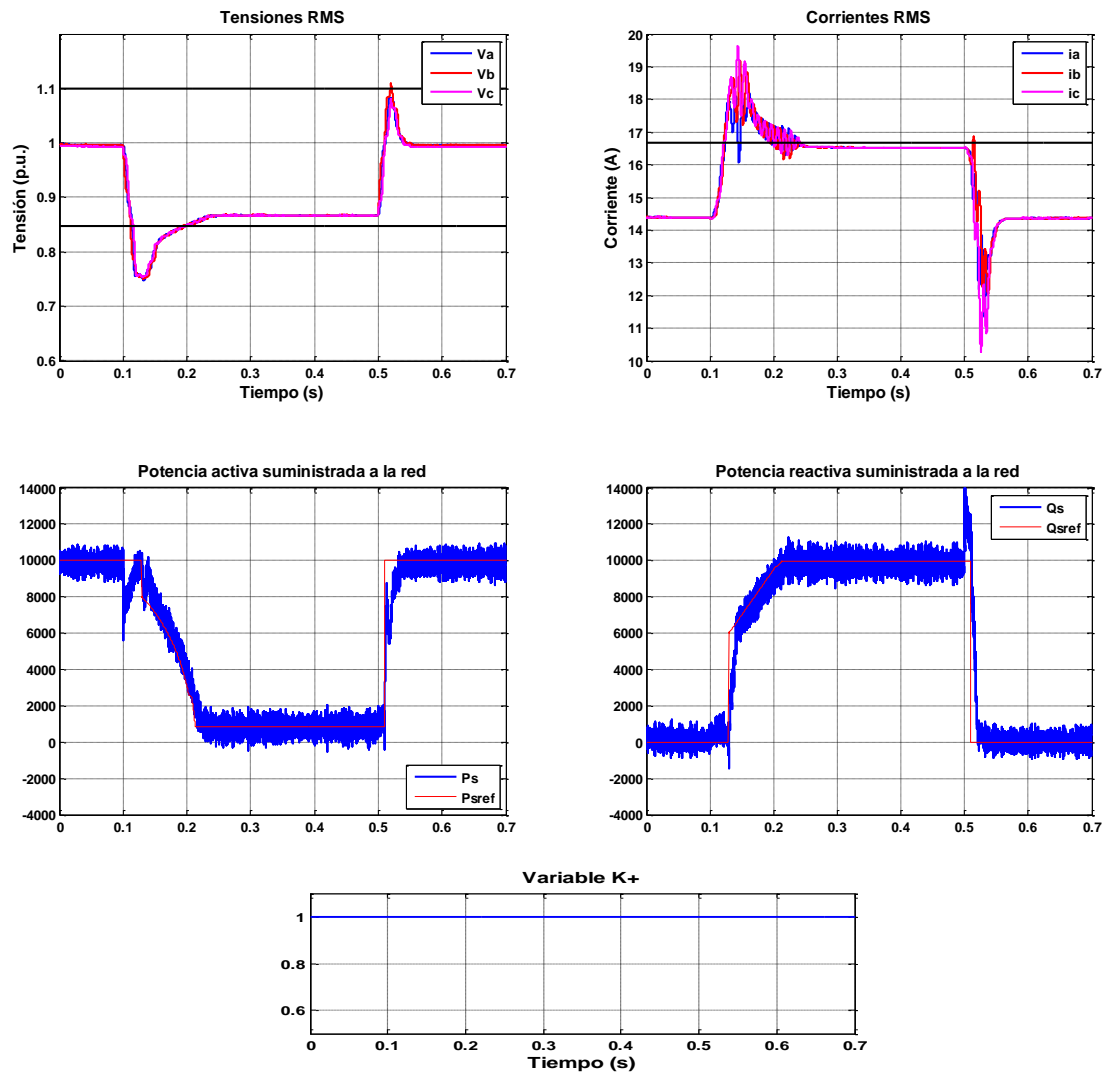


Figura 8.7. Tensiones, Corrientes, Potencias Activa y reactiva, y variable k de un hueco de tensión del 25% de tres líneas juntas.

Las corrientes aumentan drásticamente cuando se produce el fallo de red, llegando a superar el límite del inversor, que aun siendo por un breve periodo de tiempo empiezan a hacerse notorias pero no suficientes para averiar el sistema. Una vez estabilizado el sistema estas vuelven a estar dentro de los parámetros normales de funcionamiento del inversor.

Dado que caen las tres fases conjuntamente en este caso no es necesario ecualizar las tensiones de red, y tan sólo es necesario levantarlas. Por lo tanto a lo largo del ensayo la variable de control k es igual a 1.

8.4.2. Hueco de tensión del tipo D con profundidad del 25%

Como ejemplo final, se presenta la reacción del algoritmo propuesto ante un hueco de tensión del tipo D asimétrico (las tres fases caen con distinta profundidad) en el que la profundidad del hueco de la fase más baja es del 25% (Fig. 8.8).

Dada esta casuística el sistema procede de la forma habitual inyectando potencia reactiva, para de esta forma solventar el problema. Al estar las tres fases no excesivamente separadas tan sólo es necesario levantar las tensiones de red ($k=1$) y entregar toda la energía por secuencia positiva.

En este caso las corrientes que proporciona el inversor para solventar el fallo de la red también son bastante altas, superan el límite del inversor (como casos anteriores), al ser en un corto intervalo de tiempo no representa un inconveniente.

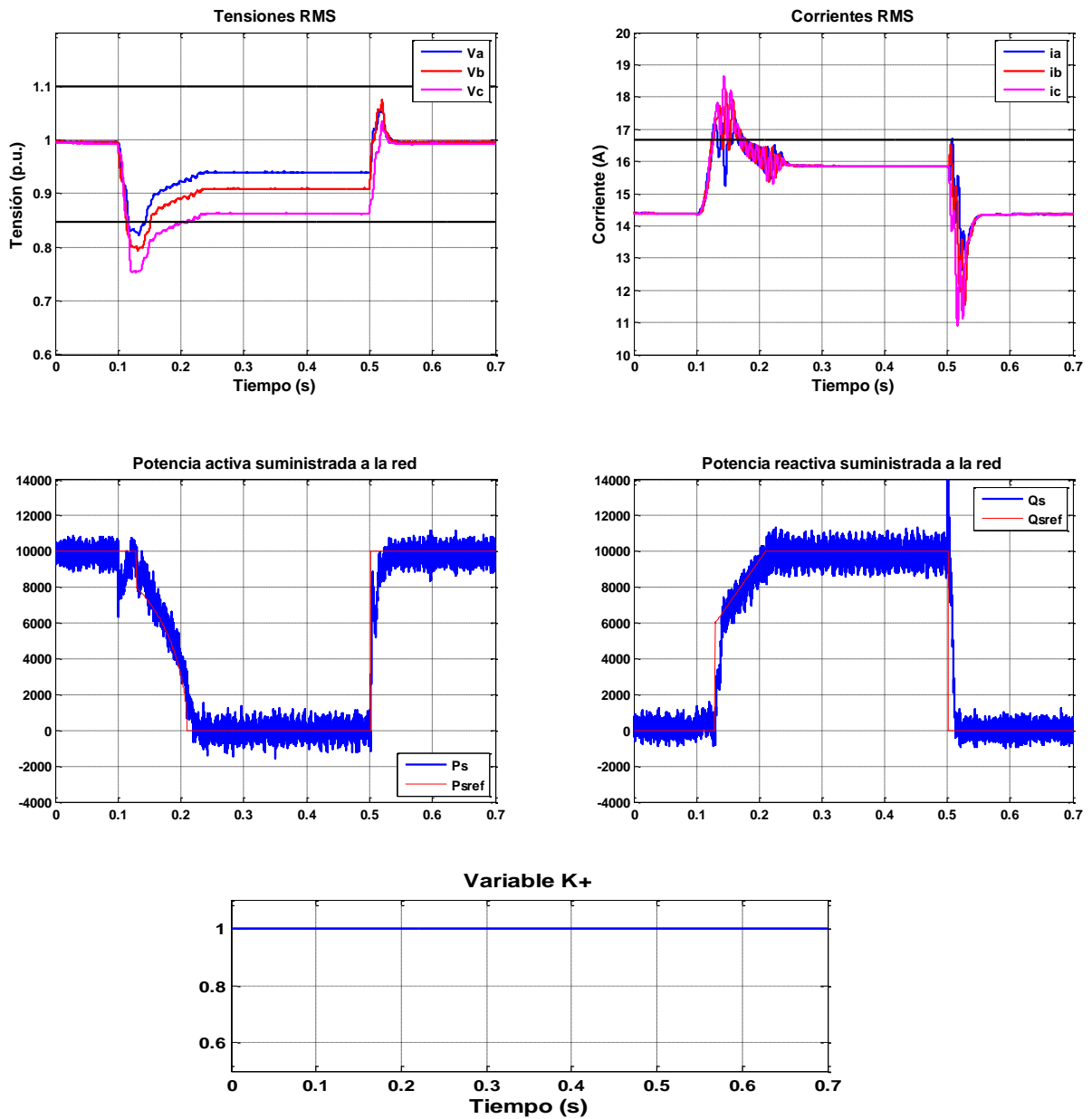


Figura 8.8. Tensiones, Corrientes, Potencias Activa y reactiva, y variable k de un hueco de tensión del 25% de tres líneas separadas

8.5. Conclusiones

En las pruebas que se han realizado se puede contemplar el potencial del algoritmo que se propone para resolver fallos en la red eléctrica.

Como se ha podido observar el algoritmo detecta y caracteriza el fallo de red y procede a corregirlo de forma rápida y eficiente entregando solo la potencia reactiva necesaria para mantenerse el sistema conectado a la red y seguir inyectando si es posible potencia activa.

A lo largo de las pruebas realizadas se pueden observar las diferentes estrategias de inyección de energía a la red, que combinan la entrega de potencia reactiva por secuencia positiva y negativa y como con esta combinación el sistema es capaz de recuperar las tensiones de red.

9. Conclusiones y perspectivas de trabajo

En este capítulo se muestran las conclusiones obtenidas por la realización de este proyecto y las posibles expectativas a seguir para ampliar este trabajo.

9.1. Conclusiones

El objetivo principal de este proyecto es crear un sistema de control avanzado el cual permita resolver fallos de red, en concreto los huecos de tensión, inyectando potencia reactiva.

Este sistema de control sensa las tensiones de red en cada instante siendo capaz de detectar, caracterizar y solventar este fallo de red siguiendo dos estrategias de inyección de potencia reactiva. Mediante la variable de control k el sistema puede inyectar potencia reactiva por secuencia positiva o negativa.

Una vez detectado el hueco de tensión determina si cabe o no en el marco de tensiones en las que deben estar las tres fases para evitar la desconexión a la red. En función de la profundidad del hueco inyecta una cantidad determinada de potencia reactiva y después sigue incrementado esta de forma gradual hasta conseguir entrar en el marco.

Si las fases caben en el marco (Fig. 9.1) el sistema inyecta potencia reactiva por secuencia positiva ($k=1$), para de esta manera elevar la tensión de las tres fases por igual hasta que entra en el marco permitido.

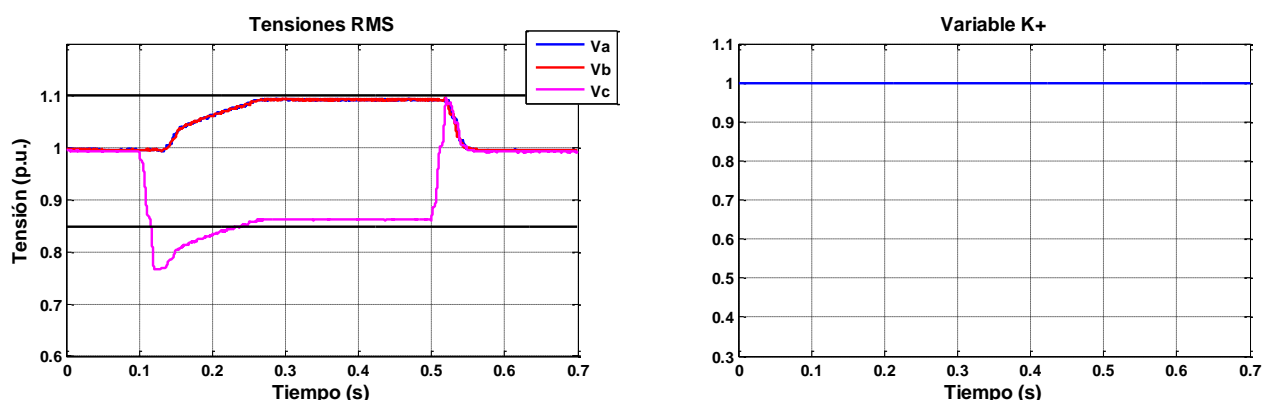


Figura 9.1. Tensiones de red y variable de control k en ejemplo de inyección de potencia reactiva por secuencia positiva.

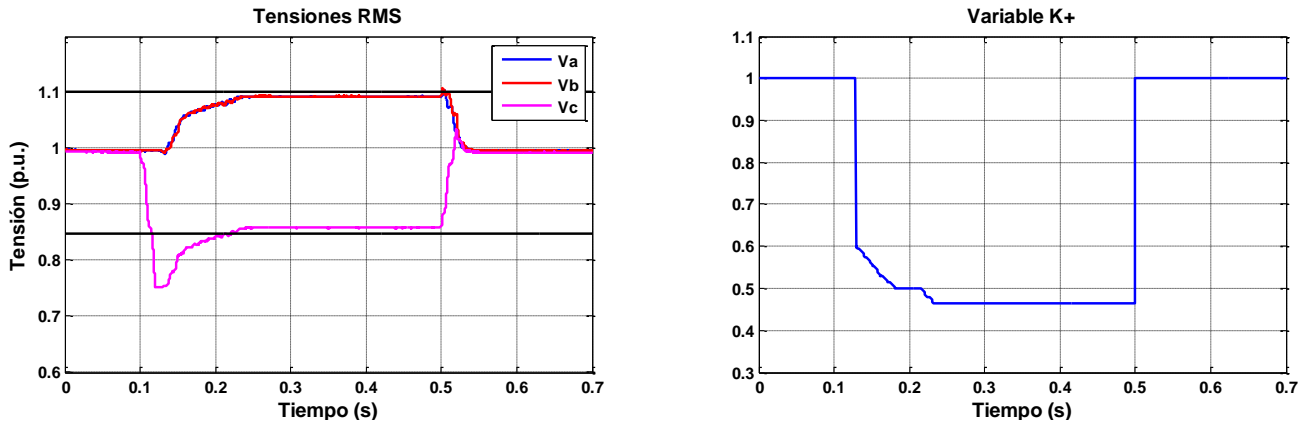


Figura 9.2. Tensiones de red y variable de control k en ejemplo de inyección de potencia reactiva por combinación de secuencia positiva y negativa.

En cambio, si las fases no caben en el marco (véase figura 9.2) el sistema inyecta potencia reactiva combinando la secuencia positiva y la negativa (k inferior a 1). En este caso a la vez que incrementa la potencia reactiva disminuye progresivamente el valor de control k . Las fases a la vez que se elevan se juntan. Para que de esta manera quepan en el marco y estén dentro de este.

El sistema optimiza inyección de potencia, ya que cuando no hay hueco de tensión entrega potencia activa que es lo que interesa (apartado 6.2). Cuando aparece un hueco en la red deja de inyectar potencia activa para inyectar reactiva, pero sólo la necesaria (Fig. 9.3.) dependiendo del hueco de tensión y de esta manera poder seguir inyectando potencia activa. El sistema empleado con una potencia máxima de 10 kVAr permite solventar huecos de tensión con caídas de hasta el 30% de la tensión nominal, si se dispusiese de un inversor de mayor potencia se podrían solventar huecos de mayor envergadura.

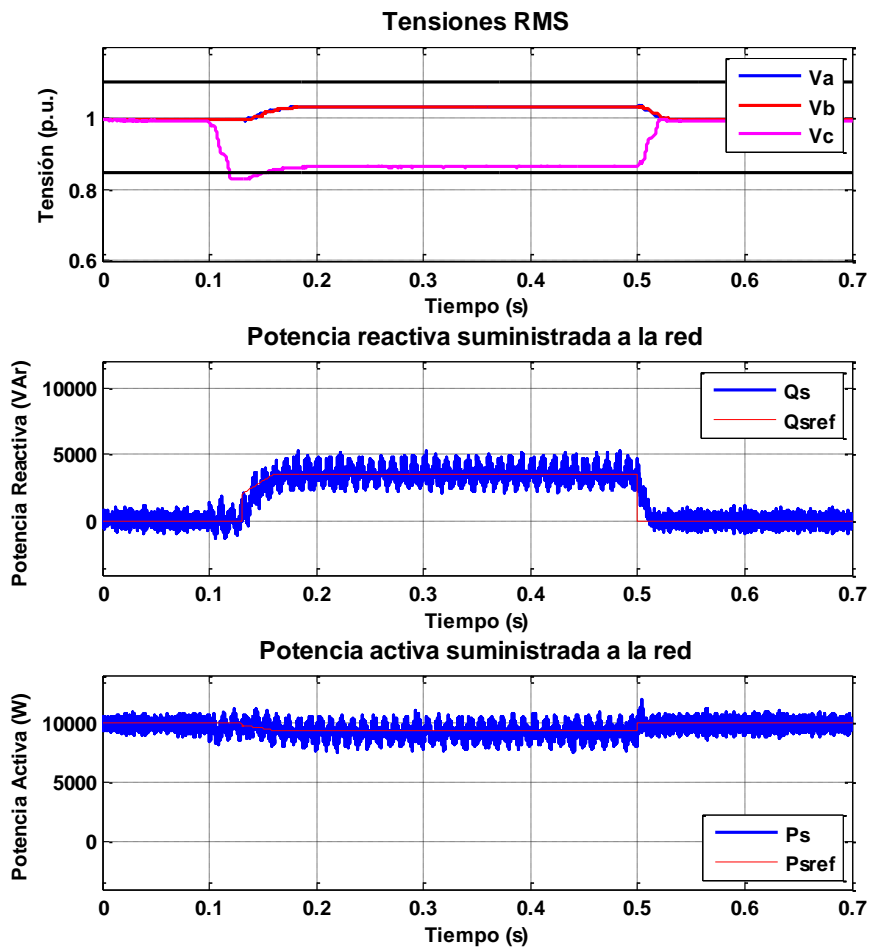


Figura 9.3. Tensiones de red y potencias activa y reactiva.

Una característica del sistema de control es su rapidez de actuación, ya que en la mayoría de casos resuelve el hueco de tensión en tan sólo una décima parte del tiempo permitido para evitar la desconexión de la red.

Otra facilidad que ofrece el algoritmo creado es la adaptación a otros sistemas de mayor o menor potencia, ya que introduciéndole diferentes datos de la potencia es capaz de resolver los fallos de red.

En definitiva, la utilización del algoritmo creado es una solución eficiente a la recuperación de la red cuando el comportamiento de esta se toma solamente de manera inductiva.

9.2. Perspectivas de trabajo

Son varias las perspectivas de trabajo que ofrece el campo investigado en este proyecto. Como punto más destacado sería poder realizar la comprobación del funcionamiento del algoritmo de control en un laboratorio. Además resultaría interesante a la vez que útil implementar un sistema en el algoritmo que limite las corrientes de salida del inversor de tal forma que estas no superen el máximo que puede entregar.

En la realización del proyecto se ha tendido en cuenta una red con un comportamiento puramente inductivo. Una rama a investigar sería cómo se comporta el sistema ante distintos tipos de red eléctrica, ya sea de carácter resistivo o resistivo-inductivo.

Otro punto a investigar es la posibilidad de la inyección de potencia justa mediante ecuaciones matemáticas, que lleven el sistema instantáneamente a las condiciones óptimas de funcionamiento.

10.Referencias

- [1] P. Rodríguez, A. Luna, I. Candela, R. Mujal, and F. Blaabjerg. “*Multiresonant Frequency-Locked Loop for Grid Synchronization of Power Converters Under Distorted Grid Conditions*” IEEE Trans. On industrial electronics, vol. 58. No. 1, January 2011.
- [2] Amirnaser Yazdani and Reza Iravani. “*Voltage-Sourced Converters in Power Systems*”. New Jersey, John Wiley & Sons, 2010.
- [3] A. Camacho, M. Castilla, J. Miret, *Member, IEEE*, J. C. Vasquez, and E. Alarcón-Gallo “*Flexible Voltage Support Control for Three Phase Distributed Generation Inverters Under Grid Fault*” In press, 2012.
- [4] S. Seguí , F. J. Gimeno, R. Masot, S. Orts “*Control Vectorial de inversores trifásicos/1 y2*” Revista española de electrónica, ISSN 0482-6396, no 582, March 2003.
- [5] UNE EN 50160, *Características de la Tensión Suministrada por las Redes de Distribución*. AENOR. Octubre 1996.
- [6] Muhammad H. Rashid. “*Electrónica de potencia; circuitos, dispositivos y aplicaciones*”. México, Pearson Education, 2004.

