



Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE FI DE CARRERA

TÍTOL: Control de un inversor de potencia para el soporte de tensión durante fallos de red

AUTORS: Marco Iván Perdomo Mercado y Pau Bisbal Castaño

TITULACIÓ: E.T.I. Electrònica industrial

DIRECTOR: Miguel Castilla Fernández

DEPARTAMENT: 710 - Engenieria electronica

DATA: 25 de junio del 2012

TÍTOL: Control de un inversor de potencia para el soporte de tensión durante fallos de red

COGNOMS: Bisbal Castaño

NOM: Pau

TITULACIÓ: Enginyeria Tècnica Industrial

ESPECIALITAT: Electrònica Industrial

PLA: 95

DIRECTOR: Miguel Castilla Fernández

DEPARTAMENT: 710 - Ingeniería Electrónica

QUALIFICACIÓ DEL PFC

TRIBUNAL

PRESIDENT

SECRETARI

VOCAL

DATA DE LECTURA: 03 – 07 - 2012

Aquest Projecte té en compte aspectes mediambientals: Sí No

PROYECTE FI DE CARRERA

RESUM (màxim 50 línies)

El siguiente trabajo muestra el funcionamiento del control de un inversor trifásico fotovoltaico conectado a la red eléctrica, con la capacidad de poder solventar fallos en la red eléctrica mediante la variación de inyección tanto de potencia activa como reactiva.

Para poder caracterizar los diferentes tipos de huecos de tensión, hemos realizado un estudio teórico para poder observar el efecto de las tensiones mediante un control en lazo abierto. Para llevar a cabo este estudio tenemos que tener en cuenta cuatro parámetros (Potencia activa, Potencia reactiva y dos variables de control).

Basándonos en el estudio anterior proponemos un algoritmo de control en lazo cerrado que sea capaz de detectar, caracterizar y solventar los diferentes tipos de huecos de tensión, utilizando para ello diversos ajustes de inyección tanto de potencia activa como reactiva. La capacidad de solventar los huecos está limitada por la potencia de la huerta fotovoltaica.

Una vez detallado el funcionamiento del algoritmo de control comprobaremos su funcionalidad con los resultados obtenidos mediante diferentes pruebas realizadas en el entorno Matlab Simulink.

Paraules clau (màxim 10):

Potencia	Algoritmo	Control	Huecos
Trifásico	Red	Activa	Reactiva
Fotovoltaico	Secuencias		

ÍNDIX

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL.....	1
1.2. MOTIVO DEL TRABAJO	2
1.3. ESPECIFICACIONES BÁSICAS.....	2
1.4. OBJETIVOS	3
2. GENERADOR FOTOVOLTAICO.....	5
2.1. CÁLCULO PARA UN GENERADOR DE 10KW	5
2.1.1. Descripción general.	5
2.1.2. Ubicación.....	5
2.1.3. Número máximo de paneles por rama.....	5
2.1.4. Número mínimo de paneles conectados en serie en una rama.....	6
2.1.5. Número de ramas en paralelo.....	6
3. INVERSOR TRIFÁSICO CON CONEXIÓN A RED.....	7
3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL.....	7
3.2. FUNCIONAMIENTO.....	7
3.2.1. Principio básico	7
3.2.2. Ondulación.....	8
3.2.3. Filtrado e inyección a la red	9
3.3. CONCLUSIONES.....	9
4. CONTROL DEL INVERSOR TRIFÁSICO.....	11
4.1. DESCRIPCIÓN GENERAL.....	11
4.2. PROCESO DE FUNCIONAMIENTO DEL CONTROL	11
4.3. LECTURA Y TRANSFORMACIÓN DE LAS TENSIONES V_{ABC} A PARÁMETROS DE α Y β	11
4.4. EXTRACTOR DE SECUENCIA POSITIVA Y NEGATIVA.	12
4.4.1. Generador de referencia.	13
4.4.2. Bucle de corriente	14
4.4.3. Modulación vectorial	15
5. FALLOS DE TENSIÓN EN LA RED	17
5.1. DESCRIPCIÓN GENERAL.....	17
5.1.1. Calidad de suministro eléctrico en una red eléctrica	17
5.1.1.1. Causas internas	17
5.1.1.2. Causas externas.....	18
5.1.2. Clasificación de las perturbaciones en la red.....	18
5.2. VARIEDAD DE FALLOS EN LA RED	18
5.2.1. Transitorios.....	19
5.2.2. Micro-cortes – huecos de tensión.....	19

5.2.3.	Sobre-tensiones.....	20
5.2.4.	Sub-tensiones.....	20
5.2.5.	Sub-tensión gradual	21
5.2.6.	Fallo de suministro.....	21
5.2.7.	Armónicos	21
5.2.8.	Interferencias de alta frecuencia.....	22
5.2.9.	Variaciones de frecuencia	22
5.3.	HUECO DE TENSIÓN.....	22
5.4.	TIPOS DE HUECOS DE TENSIÓN	24
5.4.1.	Hueco tipo A.....	24
5.4.2.	Hueco tipo C y D	25
5.5.	EFFECTOS DE LOS HUECOS DE TENSIÓN (SAG'S).....	26
6.	ESTUDIO TEÓRICO.....	27
6.1.	INTRODUCCIÓN DE LOS PARÁMETROS A CONTROLAR	27
6.2.	RESULTADOS DEL ESTUDIO TEÓRICO	28
6.2.1.	Parámetros con una impedancia de red de 0° con inyección de potencia activa	29
6.2.2.	Parámetros con una impedancia de red de 90° con inyección de potencia reactiva.....	30
6.2.3.	Parámetros con una impedancia de red de 60°	32
6.2.3.1.	Con inyección de potencia activa.....	32
6.2.3.2.	Con inyección de potencia reactiva.....	33
6.3.	CONCLUSIONES	35
7.	ESTRATEGIAS DE INYECCIÓN.....	37
7.1.	EFFECTOS DE LA POTENCIA.....	37
7.2.	REPRESENTACIÓN FASORIAL.....	37
7.2.1.	Efecto de la potencia activa en una impedancia de red de 60°.....	37
7.2.1.1.	Inyección de <i>Potenciaactiva</i> por secuencia positiva	38
7.2.1.2.	Inyección de <i>Potenciaactiva</i> por secuencia negativa	38
7.2.1.3.	Absorción de <i>Potenciaactiva</i> por secuencia negativa	40
7.2.2.	Efecto de la potencia reactiva en una impedancia de red de 60°.....	41
7.2.2.1.	Inyección de <i>Potenciareactiva</i> por secuencia positiva	41
7.2.2.2.	Inyección de <i>Potenciareactiva</i> por secuencia negativa	42
7.2.3.	Efecto de la potencia activa y reactiva en una impedancia de red de 60°	43
7.2.3.1.	Inyección de <i>Potenciaactiva</i> y <i>Potenciareactiva</i> por secuencia positiva.....	43
7.2.3.2.	<i>Absorción de Potenciaactiva e Inyección de Potenciareactiva</i> por secuencia negativa. 44	
7.3.	RELACIÓN φ IMPEDANCIA DE RED- φ INYECCIÓN.....	45
7.4.	CONCLUSIONES	47
8.	ALGORITMO DE CONTROL.....	49

8.1.	INTRODUCCION	49
8.2.	DETECCIÓN TANTO DE INICIO COMO FINALIZACIÓN DEL FALLO EN LA RED.	49
8.3.	CORRECCIÓN DEL FALLO DE LA RED	50
8.3.1.	Primer ajuste en la corrección del hueco de tensión	52
8.3.2.	Segundo ajuste para entrar tensiones en márgenes	53
8.3.3.	Tercer ajuste: búsqueda de la mínima corriente posible	54
8.4.	ACTUACION DEL CONTROL.....	56
8.5.	CONCLUSIONES	56
9.	RESULTADOS.....	59
9.3.	HUECO TIPO A	59
9.3.1.	Profundidades	59
9.3.1.1.	Caída del 21%	59
9.3.1.2.	Caída del 27%	60
9.4.	HUECO TIPO C	61
9.4.1.	Profundidades	61
9.4.1.1.	Caída del 21% fases separadas.....	61
9.4.1.2.	Caída del 24% fases separadas.....	62
9.4.1.3.	Caída del 27% fases separadas.....	62
9.5.	HUECO TIPO D	63
9.5.1.	Profundidades	64
9.5.1.1.	Caída del 21%	64
9.5.1.2.	Caída del 24%	65
9.5.1.3.	Caída del 27%	66
9.6.	CONCLUSIONES	67
10.	CONCLUSIONES	69
10.3.	CONCLUSIONES DEL TRABAJO.....	69
10.4.	PERSPECTIVAS DE TRABAJO	69
11.	REFERENCIAS	71

1. Introducción y objetivos

1.1. Descripción general

En los últimos años hemos visto el gran crecimiento de la energía fotovoltaica en España. Estamos en un mundo de recursos finitos y tenemos que encontrar otras formas de abastecer nuestras necesidades sin afectar de forma negativa al globo terráqueo.

Últimamente se han descubierto varias formas de aprovechar los recursos naturales, energía eólica, fotovoltaica, biomasa, hidráulica, etc. La energía fotovoltaica está en auge de crecimiento en España motivo que nos lleva a utilizarla como generador (huerta solar).

Los paneles fotovoltaicos generan una tensión en DC por lo que se tendrá que utilizar un inversor trifásico para que transforme la señal en AC y con unas características necesarias para poderla inyectar a la red eléctrica, según la normativa (Fig. 1.1).



Fig.1.1. Esquema del proceso de transformación de la energía fotovoltaica a la red eléctrica

La red eléctrica puede padecer “anomalías” (ver capítulo 6) entre los cuales están los huecos de tensión. Este tipo de anomalía (Fig. 1.2) trataremos de solventarla con el algoritmo diseñado. Nuestro generador solar aparte de estar proporcionando potencia activa a la red también pueda ayudar a levantar la tensión cuando sea necesario mediante la inyección de potencia reactiva.

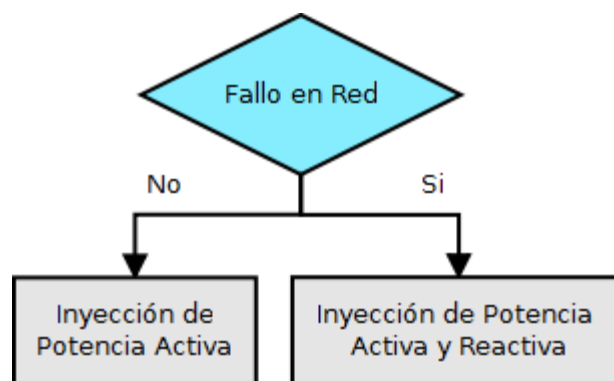


Fig. 1.2. Inyección de potencia según el estado de la red

1.2. Motivo del trabajo

Este proyecto se centra en investigar nuevas técnicas o procedimientos para mejorar notablemente el rendimiento de las energías renovables y también la calidad de la energía eléctrica que éstas proporcionan a la red de distribución. Ahora bien, ¿Qué entendemos por calidad de la energía eléctrica?

La calidad de la red eléctrica se mide por la calidad de la onda de tensión según la normativa [1], es decir, que los valores de tensión de la onda permanezcan dentro de unos márgenes [1] y que el suministro de dicha energía sea continuo.

Cuando la red eléctrica padece una perturbación, peligra tanto la calidad de la tensión como la continuidad de ésta, provocando fallos funcionales en equipos con funciones de memoria o lógica. Los equipos informáticos en general son muy sensibles a estas perturbaciones, que pueden provocar pérdidas de información de valor incalculable, motivo el cual nos lleva a realizar este trabajo y poder evitar este tipo de circunstancias implementando un control en lazo cerrado en un inversor fotovoltaico que proporciona un apoyo de voltaje flexible a la red eléctrica.

El trabajo realizado no se ocupará de todos los aspectos de esta aplicación, 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

Los procedimientos prácticos de nuestro proyecto se han realizado con el entorno de simulación Matlab-simulink.

Hemos utilizado los parámetros de la red eléctrica europea, para que los resultados obtenidos tengan la mayor similitud consultando en la bibliografía. Los parámetros son: 325 V de pico (230 V eficaces), una frecuencia de 50Hz y tres fases desfasadas 120° entre ellas (Fig.1.3).

Como generador de potencia, disponemos de una huerta fotovoltaica con una capacidad de 10 kVA que proporciona una tensión en DC, el Inversor trifásico de dos niveles transformará la tensión en AC para poder inyectarla a la red eléctrica y dispone de una capacidad de 15 kVA y una corriente máxima de salida de 18 A.

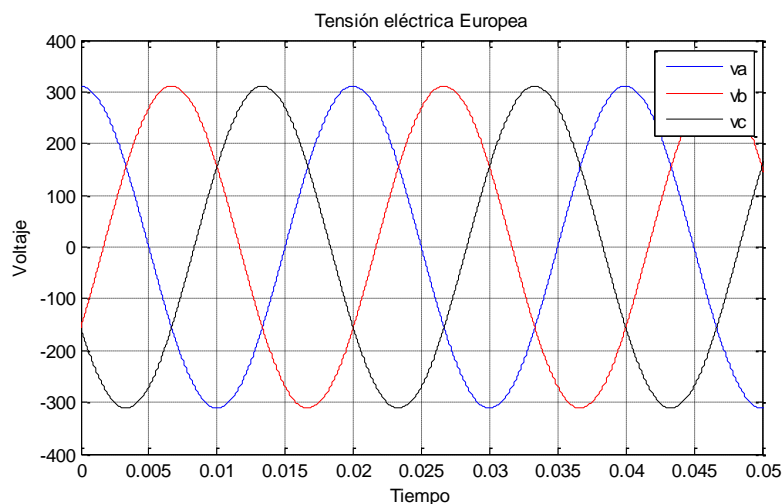


Fig. 1.3. Red eléctrica Europea

1.4. **Objetivos**

Como objetivo principal se pretende crear un algoritmo de control que sea inteligente y tenga la capacidad de controlar un inversor fotovoltaico conectado a la red eléctrica. Además de estar conectado a la red vendiendo energía útil, el sistema debe de tener la capacidad de poder actuar sobre los huecos de tensión que pueda padecer la red, utilizando la inyección de potencia activa y reactiva para solventarlos.

En condiciones normales el algoritmo estará configurado para poder suministrar la máxima potencia activa a la red. Cuando el algoritmo detecte algún fallo en la red elegirá la mejor estrategia de inyección de potencias. Una vez desaparezca el hueco este debe volver a trabajar en condiciones normales suministrando la máxima potencia activa a la red. No obstante el algoritmo está limitado por la cantidad de energía que la huerta solar es capaz de producir.

Finalmente, aparte de solventar el fallo de red, trataremos que la corriente sea la óptima, es decir, que de todas las soluciones posibles, encontrar la que genere la menor corriente posible.

2. Generador fotovoltaico.

En este capítulo se presenta un pequeño estudio sobre la cantidad de paneles fotovoltaicos que deberá de tener la huerta solar dependiendo de la potencia que queramos obtener, en nuestro caso serán 10 kVA y de la corriente de salida del inversor.

2.1. Cálculo para un generador de 10kW

2.1.1. Descripción general.

Se pretende abastecer una potencia para solventar los diferentes huecos de tensión que pueda tener la red eléctrica. Partimos de que nuestro generador tendrá una potencia máxima para suministrar a la red de 10kW. Detallaremos datos como la ubicación, cantidad de paneles fotovoltaicos requeridos para suministrar dicha potencia, inclinación, tipo de paneles fotovoltaicos inversor, dimensionado, etc.

Para realizar el estudio escogemos el siguiente panel fotovoltaico [1].

2.1.2. Ubicación

La ubicación de la huerta solar que pretendemos implementar es una parte fundamental para que el rendimiento de esta sea el máximo, en recepción de la radiación solar. El sector que hemos elegido por su recepción de energía en un día medio de cada mes es Valencia con un índice de 3.13 kWh/m² día.

Los datos que nos proporciona esta localidad son: La latitud es de 39,5° una altitud de 10° y una temperatura mínima histórica de -8°C.

Para tener una percepción de energía óptima en la instalación recomiendan que cumpla la siguiente condición (1).

$$\text{Inclinación óptimas} = \text{latitud} - 10^\circ \quad (1)$$

Por lo que la inclinación óptima de la instalación es 29,5°.

2.1.3. Número máximo de paneles por rama.

El valor máximo de tensión de entrada al inversor será la correspondiente a la tensión en circuito abierto del generador fotovoltaico cuando la temperatura del panel sea la mínima. La temperatura mínima corresponderá con una temperatura ambiente mínima. La tensión de circuito abierto del generador fotovoltaico siempre debe de ser menor que la tensión máxima de entrada en el inversor, ya que de lo contrario el inversor, además de no funcionar, podría averiarse.

El número máximo de paneles conectados en serie por rama vendrá determinado por el cociente entre la tensión máxima de entrada del inversor a circuito abierto y la tensión a circuito abierto del panel a su temperatura mínima (2), en España podemos considerar de -1,5°C.

$$N_{max} = \frac{U_{OC,INV}}{V_{OC,panel}} \quad (2)$$

$$N_{max} = \frac{800 V}{37.74 V} = 21.2 \cong 22 \text{ paneles}$$

Nmax= Número máximo de paneles por rama conectados en serie.

Uoc,INV= Tensión máxima de entrada a circuito abierto en el inversor.

Voc,panel= Tensión a circuito abierto del panel a su temperatura mínima.

2.1.4. Número mínimo de paneles conectados en serie en una rama.

$$N_{min} = \frac{U_{min PMP,INV}}{V_{max,panel}} \quad (3)$$

$$N_{min} = \frac{300 V}{31.5 V} = 9.5 \cong 10 \text{ paneles}$$

Nmin= Número mínimo de paneles por rama conectados en serie.

Umin PMP, INV= Tensión mínima de entrada en el punto de máxima potencia en el inversor (V).

Vmax,panel= tensión en el punto de máxima potencia del panel a su temperatura máxima (V).

2.1.5. Número de ramas en paralelo.

Para calcular cuantas ramas en paralelo debe de tener la huerta fotovoltaica se calcula dividiendo la potencia que te va a proporcionar el inversor entre potencia por rama.

$$N_{ramas paralelo} = \frac{10 kW}{21 * 245W} = 1.94 \cong 2 \text{ ramas en paralelo} \quad (4)$$

$$N_{ramas paralelo} \times I_{cc,rama} \leq I_{max,inv} \quad (5)$$

Icc=Corriente de corto-circuito de un panel fotovoltaico.

$$2 \times 8.68A \leq 26,1A$$

$$17.36A \leq 26,1A$$

Para saber el número total de paneles se debe de multiplicar los 2 resultados antes calculados:

$$ntp = N^{\circ} \text{ paneles en serie} * N^{\circ} \text{ de ramas} \quad (6)$$

$$npt = 21 * 2 = 42 \text{ paneles}$$

3. Inversor Trifásico con conexión a red.

En este capítulo se presenta el funcionamiento básico de un inversor de dos niveles.

3.1. Descripción general.

La huerta solar detallada (capítulo 2) proporciona una tensión de salida en continua, por lo que tendremos que disponer de un inversor trifásico para que pueda ondular la señal y así poderla inyectar a la red eléctrica. El inversor trifásico está compuesto por IGBT's, estos son interruptores de potencia que por medio de "señales de control" los activan y desactivan generando la señal en alterna, el inversor tiene una capacidad de 18 A.

3.2. Funcionamiento

3.2.1. Principio básico

El inversor trifásico convierte unas señales de control en unas señales de potencia las cuales se utilizarán para inyectar a la red eléctrica. Esta parte del circuito facilita la transferencia de energía entre 2 subsistemas (huerta solar – red eléctrica) cambiando la señal de DC a una señal AC.

El inversor trifásico es de 2 niveles el cual lo componen 6 IGBT's [2] (interruptores de potencia). Estos vienen controlados por una señal de control que proviene del algoritmo y están repartidos 2 IGBT's por fase. La energía que entregan al inversor trifásico proviene de los módulos paneles fotovoltaicos modelados por 2 fuentes en serie de igual valor (325V) las cuales tiene un punto neutro que permite que a la salida de los dos interruptores de cada fase puedan tener tensiones positivas y tensiones negativas ($V_{DC}/2$ y $-V_{DC}/2$ respectivamente), cuando el interruptor superior esté activado dará la lectura de $V_{DC}/2$ y si está activado el interruptor inferior dará la lectura de $-V_{DC}/2$.

Para que a la red eléctrica le llegue una señal con muy bajo contenido armónico se dispone de un filtro del orden LCL a la salida del inversor trifásico para poder eliminar los ruidos de conmutación y señales parásitas que estos puedan crear (Fig.4.1.).

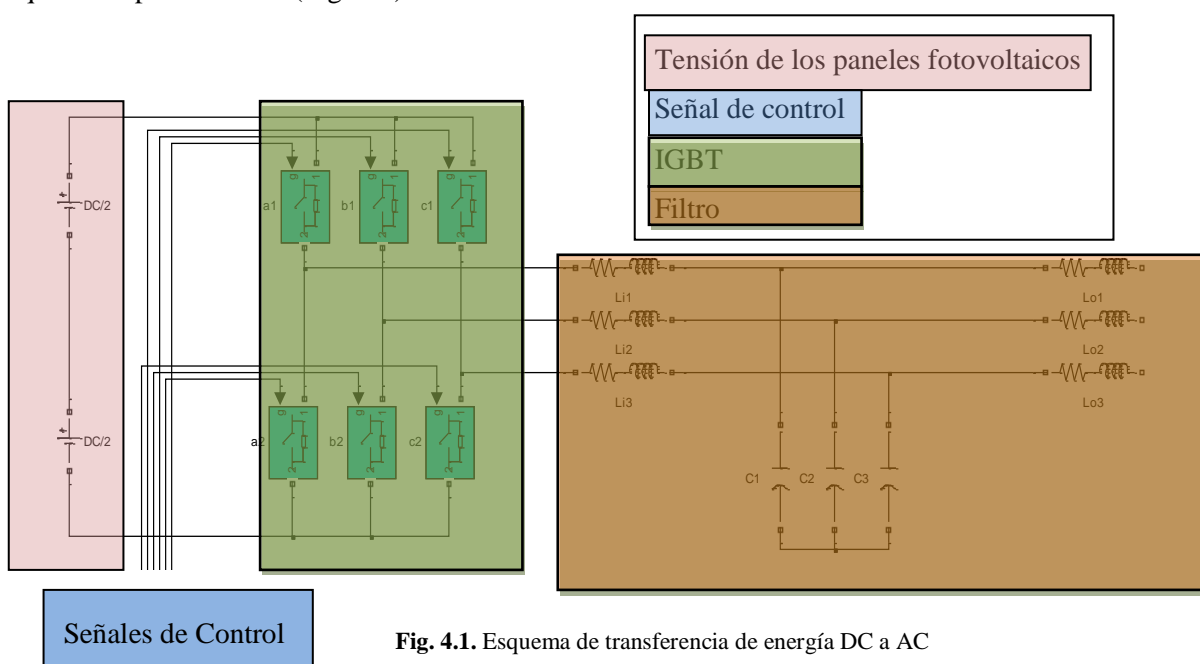


Fig. 4.1. Esquema de transferencia de energía DC a AC

3.2.2. Ondulación

El generador fotovoltaico da como salida una tensión en corriente directa (VDC) por lo que tendremos que convertir esta señal DC en una señal AC, el inversor trifásico se encarga de este proceso ondulando las señales mediante una conmutación de los interruptores de potencia (IGBT's), el resultado es una onda cuadrada donde el máximo será $V_{dc}/2$ y el mínimo $-V_{dc}/2$.

La conmutación no tiene un *ciclo de trabajo* constante, sino que va variando. Esta variación se produce debido que la tensión en la red varía de forma senoidal periódicamente. Cuando esta tensión se encuentra en pico positivo, el *ciclo de trabajo* de la señal cuadrada permanece más tiempo en la parte positiva de la señal y cuando la tensión se encuentra en su pico negativo, la señal cuadrada se encontrará en la parte negativa de la señal.

La señal que sale de los interruptores de potencia es una señal cuadrada (Fig.4.2) pero dependiendo del ciclo de la senoide, el tiempo de tensión positiva y negativa serán distintos (Fig.4.3).

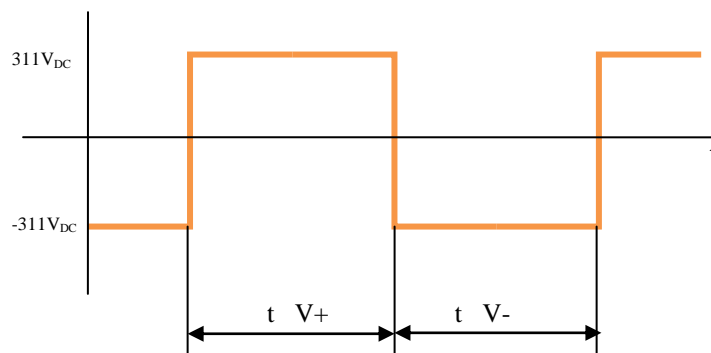


Fig.4.2. Señal cuadrada

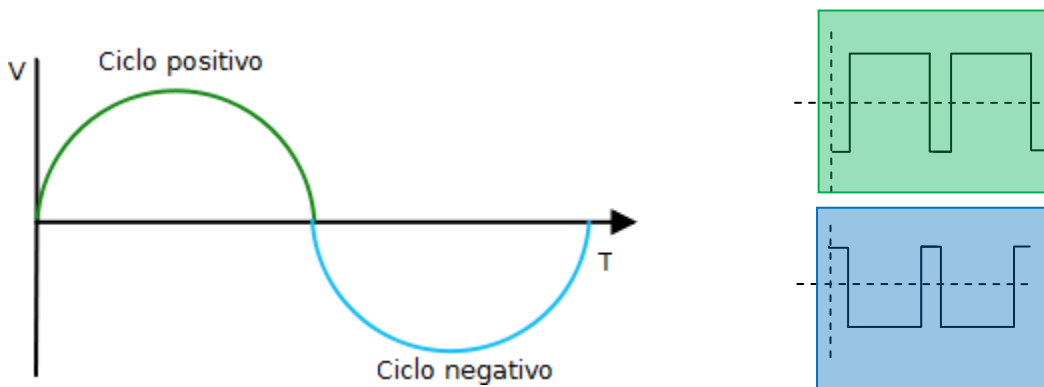


Fig.4.3. Variación del duty cycle en función de la señal AC

La salida de la señal de los interruptores está representada en las ecuaciones (7), (8) y (9) donde se observa que estas dependen del tiempo. Cada ecuación corresponde a una fase donde se observa que depende del tiempo de duración del ciclo positivo o negativo de la señal AC (Fig.4.3). Las señales de control del IGBT (Fig.4.1) tienen un valor de 1 o -1 que determinará el tipo de señal cuadrada que proporcionará la huerta solar al inversor.

$$V_{ta}(t) = u_a \cdot \frac{VDC}{2} \quad (7)$$

$$V_{tb}(t) = u_b \cdot \frac{VDC}{2} \quad (8)$$

$$V_{tc}(t) = u_c \cdot \frac{VDC}{2} \quad (9)$$

3.2.3. Filtrado e inyección a la red

En la simulación se utiliza una conmutación de dos niveles un poco brusca, esto provoca que la señal modulada de salida pueda producir ciertos ruidos o señales parásitas, pero estas se ven tratadas mediante un filtro y así obtener las señales con el menor contenido armónico posible.

El tipo de filtro que se emplea en el sistema es de tercer orden (LCL). Su uso permite reducir de una manera muy significativa el rizado de la corriente de salida.

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

3.3. Conclusiones.

En este apartado se ha explicado el funcionamiento y la necesidad de un inversor trifásico y un filtro. El inversor trifásico es de 2 niveles.

La energía recibida de los módulos fotovoltaicos en DC se debe de convertir en potencia AC. La inyección del inversor la haremos por el método de inyección por corriente porque así controlamos de mejor manera la cantidad de potencia activa y reactiva que estamos entregando a la red eléctrica por medio del ángulo de fase y la amplitud de la corriente de la línea. La ventaja que cuenta este sistema es que el inversor está protegido contra condiciones de sobrecarga que pueda sufrir la red eléctrica.

4. Control del inversor trifásico

En este capítulo se presenta brevemente el funcionamiento del control de un inversor trifásico de dos niveles.

4.1. Descripción general

El algoritmo controlará el inversor trifásico y elegirá la mejor estrategia para inyectar potencia activa y reactiva para poder solventar el hueco de tensión mediante una fuente de una potencia determinada (en nuestro caso una fuente de 10kW).

4.2. Proceso de funcionamiento del control

Como se puede observar en la (Fig.5.1) el algoritmo se divide en varios bloques.

El control tiene 3 entradas que son :

- Las tensiones V_{abc} .
- Las corrientes I_{abc} .
- La tensión que proviene de nuestra huerta solar V_{dc} .

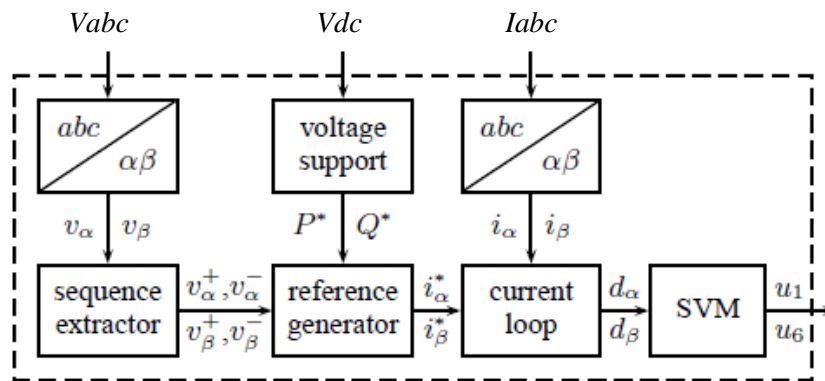


Fig.5.1. Esquema del control del inversor

4.3. Lectura y transformación de las tensiones V_{abc} a parámetros de α y β .

Este bloque lee de forma continua el valor de las tensiones que llegan directamente de la red eléctrica y comprueba que las tensiones estén comprendidas dentro del margen establecido según la normativa [2]. Si las tensiones no se encuentran dentro del margen el algoritmo hace una inyección de potencia reactiva.

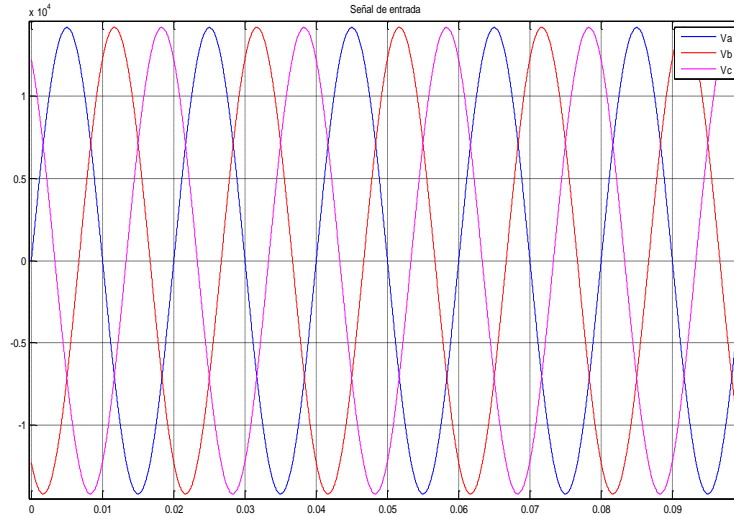


Fig.5.2. Lectura de Vabc en condiciones normales

En la (Fig.5.2) se detalla la señal que se lee de la red eléctrica. Estas señales Vabc se convierten en $V\alpha$ y $V\beta$ utilizando la transformada de *CLARKE* [3], mediante la siguiente Matriz (10)

$$V_{\alpha\beta} = TV_{abc} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

Esta transformación se realiza para poder trabajar con una variable menos a la hora de hacer el análisis, pero la información de Vabc es la misma que la que se dispone en $V\alpha\beta$.

4.4. Extractor de secuencia positiva y negativa.

Una vez tenemos las tensiones en términos de $V\alpha\beta$, estas se separan en secuencia positiva y negativa $V\alpha^+$, $V\alpha^-$, $V\beta^+$ y $V\beta^-$. Con las partes positivas de $\alpha\beta$ obtendremos la tensión positiva (V+) y de las partes negativas la tensión negativa (V-).

Las secuencia positiva y negativa se utilizan para detectar desbalances de tensión en la red eléctrica. Cuando las tensiones Vabc están desbalanceadas, la secuencia negativa crece y esto es lo que nuestro algoritmo tiene que evitar. El objetivo que se persigue es conseguir que la secuencia negativa sea 0.

Para obtener la secuencia positiva y negativa utilizamos un bloque llamado *SOGI* [4].

En la (Fig.5.3) se observa un desbalance en la red eléctrica.

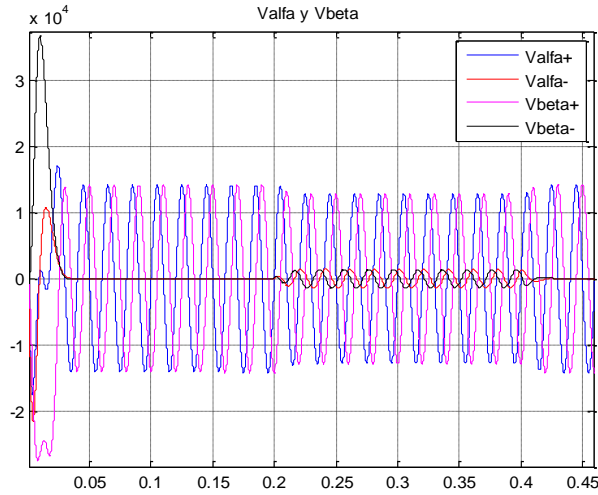


Fig.5.3. Secuencia positiva y negativa

4.4.1. Generador de referencia.

En esta parte del algoritmo una vez recibidas las tensiones $V_{\alpha\beta}$ elige la mejor combinación de inyección de potencia activa y reactiva para poder solventar el hueco que hay en la red eléctrica y genera unas corrientes de referencia mediante las ecuaciones (11-14) y véase el resultado en la Fig.5.4.

$$i_{\alpha,act} = \frac{2}{3} \cdot \frac{k_p v_{\alpha}^+ + (1 - k_p) v_{\alpha}^-}{k_p ((v_{\alpha}^+)^2 + (v_{\beta}^+)^2) + (1 - k_p) ((v_{\alpha}^-)^2 + (v_{\beta}^-)^2)} \cdot P \quad (11)$$

$$i_{\beta,act} = \frac{2}{3} \cdot \frac{k_p v_{\beta}^+ + (1 - k_p) v_{\beta}^-}{k_p ((v_{\alpha}^+)^2 + (v_{\beta}^+)^2) + (1 - k_p) ((v_{\alpha}^-)^2 + (v_{\beta}^-)^2)} \cdot P \quad (12)$$

$$i_{\alpha,react} = \frac{2}{3} \cdot \frac{k_q v_{\beta}^+ + (1 - k_q) v_{\beta}^-}{k_q ((v_{\alpha}^+)^2 + (v_{\beta}^+)^2) + (1 - k_q) ((v_{\alpha}^-)^2 + (v_{\beta}^-)^2)} \cdot Q \quad (13)$$

$$i_{\beta,react} = -\frac{2}{3} \cdot \frac{k_q v_{\alpha}^+ + (1 - k_q) v_{\alpha}^-}{k_q ((v_{\alpha}^+)^2 + (v_{\beta}^+)^2) + (1 - k_q) ((v_{\alpha}^-)^2 + (v_{\beta}^-)^2)} \cdot Q \quad (14)$$

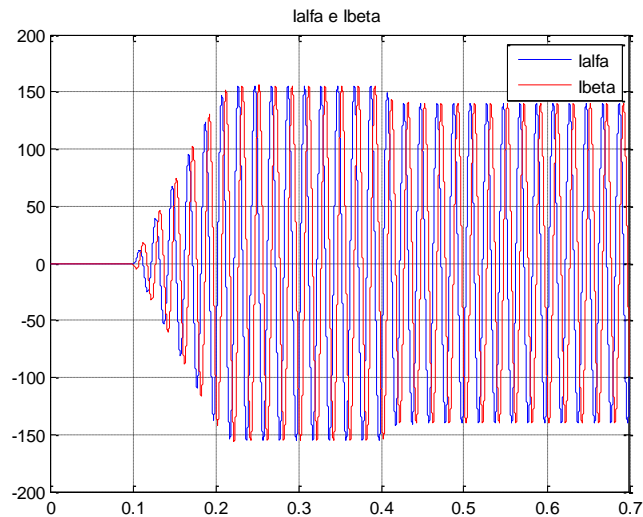


Fig.5.4. Corrientes de referencia

4.4.2. Bucle de corriente

Inyectaremos potencia por medio de las fuentes de corriente controladas, a la hora de que la red sufra alguna caída de tensión.

En la figura 5.5 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[4], en la figura 5.6 observamos como va corrigiendo el error que existe entre la corriente de referencia y la corriente del inversor y por ultimo obteniendo las señales de modulación $m\alpha-\beta(t)$ a la salida del lazo de corriente (véase la figura 5.7).

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 señales de modulación $m\alpha-\beta(t)$ tienen que pasar por el SVM (space vector modulation)[4], para adecuar las señales.

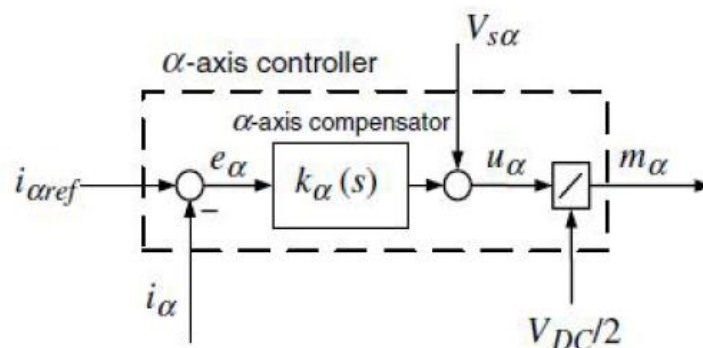


Fig.5.5. Bucle de corriente

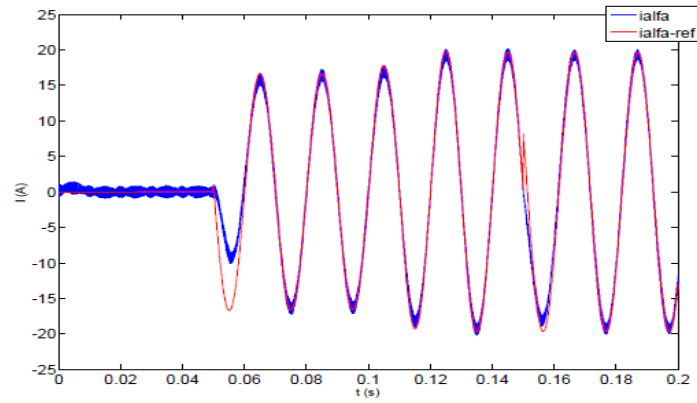


Fig.5.6. Corrientes ialfa y ialfa de referencia

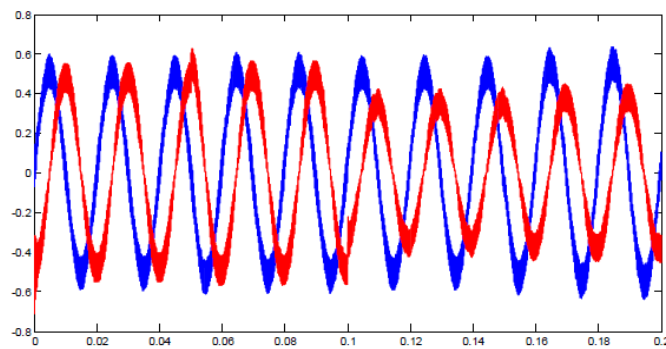


Fig.5.7. Señales de modulación $m\alpha\text{-}\beta(t)$

4.4.3. Modulación vectorial

Como se ha comentado en el apartado (4.2.2), a la puerta de los interruptores deberá de llegar una señal cuadrada con valores de 0 ó 1 (Fig.5.5-5.6).

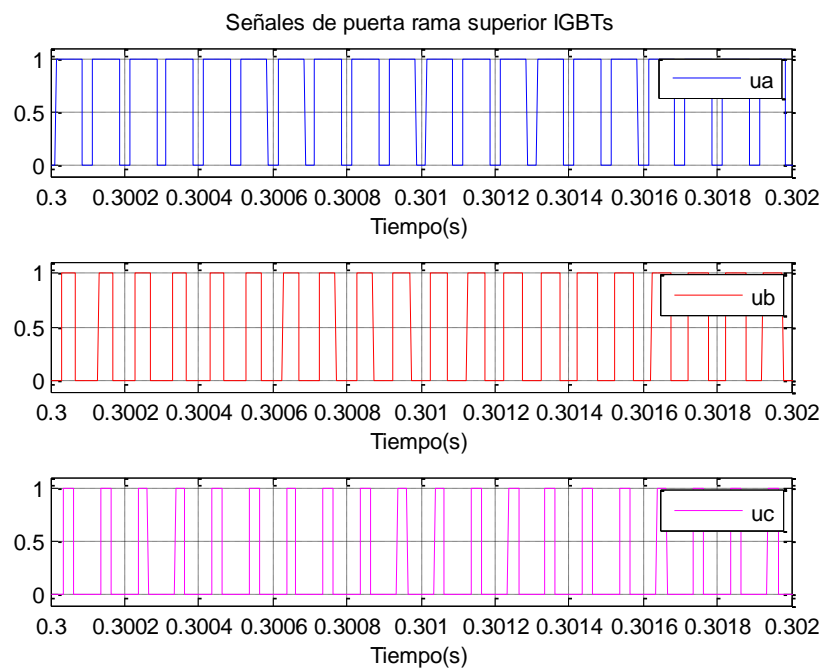


Fig.5.8. Señales de salida de la modulación vectorial rama superior

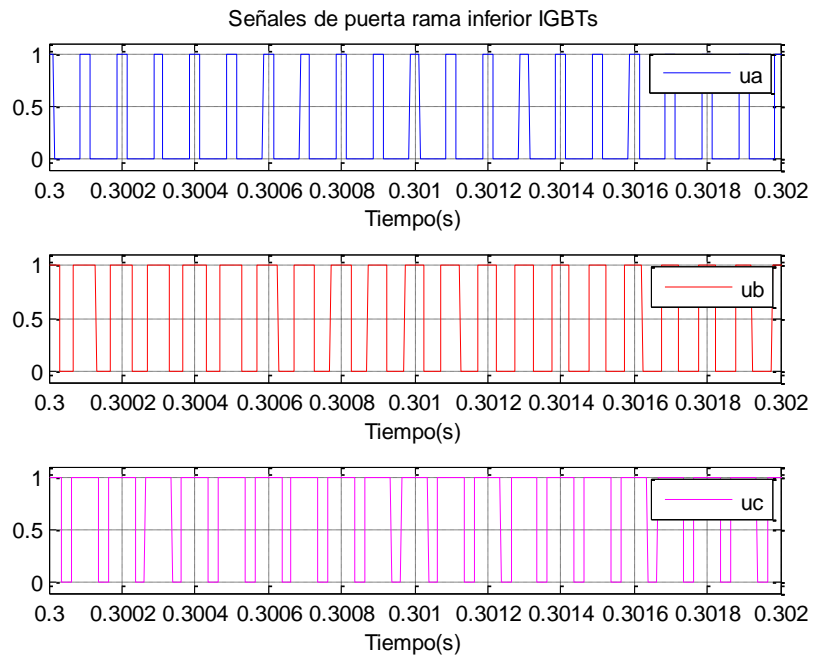


Fig.5.9. Señales de salida de la modulación vectorial rama inferior

5. Fallos de tensión en la red

5.1. Descripción general

Actualmente, aparte de una continuidad ininterrumpida del suministro de energía a la red de distribución eléctrica, también es necesaria la calidad de ésta energía, es decir que tanto la tensión como la frecuencia deben permanecer dentro de unos márgenes.

Siguiendo con la armonización de los voltajes, coordinados con los países del CENELEC (Comité Europeo de Normalización Electrotécnica.), toda la electricidad doméstica en la Unión Europea es de $230\text{ V} \pm 10\%$ (con algunos países con especificaciones más estrictas) a una frecuencia de 50 Hz (Fig.6.1). Tanto la continuidad como la calidad del suministro a veces se ve interrumpida por fallos en el sistema, por lo tanto el suministro de red no es óptimo, y se debe de intentar corregir.

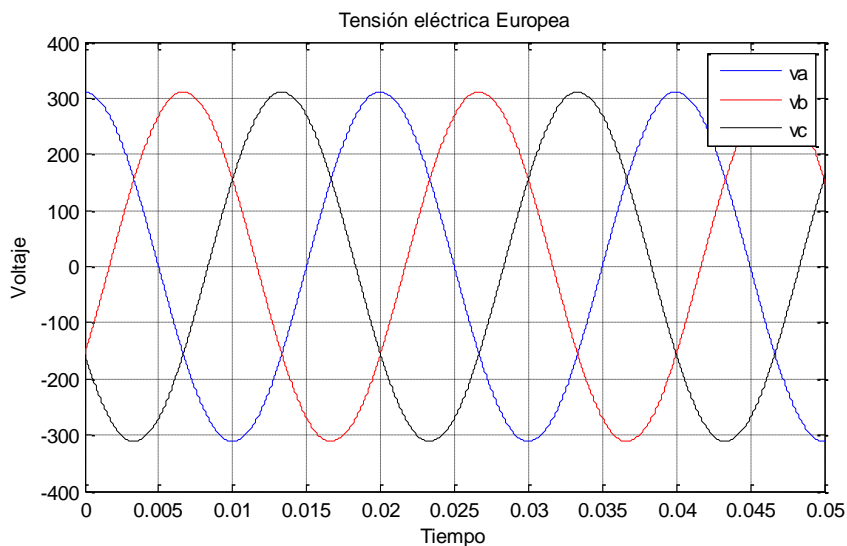


Fig.6.1. Tensión eléctrica Europea.

5.1.1. Calidad de suministro eléctrico en una red eléctrica

La red eléctrica debería comportarse como una fuente de tensión ideal sin impedancia interna, con salida senoidal y tensión eficaz constante en todos los puntos de suministro.

En la práctica veremos que estas condiciones no siempre se cumplen, básicamente debido a dos tipos de causas:

5.1.1.1. Causas internas

Los generadores y el sistema de distribución tienen una cierta impedancia interna, esto origina caídas de tensión y pérdidas en el sistema de distribución.

Las cargas absorben:

- corrientes transitorias (arranques)
- corrientes no senoidales (cargas no lineales)

5.1.1.2. Causas externas

Las causadas por perturbaciones atmosféricas, todas ellas contribuyen negativamente a la calidad del suministro.

Este tipo de perturbaciones provoca:

- Un aumento de pérdidas provocando una bajada del rendimiento.
- Problemas de compatibilidad electromagnética (EMC): mal funcionamiento o paradas del sistema y ocasionan importantes pérdidas de eficacia en los sistemas de producción.

5.1.2. Clasificación de las perturbaciones en la red

Los principales parámetros que pueden verse alterados por algún tipo de perturbación son (según se define en la norma EN 50.160) [5]:

- Frecuencia
- Amplitud: transitorios, sobre-tensiones, sub-tensiones, caídas de tensión (Sag's), cortes de tensión...
- Forma de Onda: armónicos
- Simetría del sistema trifásico

En los últimos años se ha avanzado mucho en la minimización de los efectos de las perturbaciones de red sobre los equipos alimentados por ella.

Especialmente en Europa, el obligado cumplimiento de las Directivas (Leyes) de Compatibilidad Electromagnética de la Comunidad Europea, han supuesto una mejora importante en los dos aspectos de las perturbaciones:

- Por una parte, la limitación de las emisiones conducidas y radiadas de los aparatos perturbadores, aunque subsisten las debidas a Emisores de Telecomunicación, Descargas Atmosféricas y a la Explotación de las Redes Comerciales.
- Por otra, la disminución de la susceptibilidad de los equipos a las perturbaciones.

A pesar de las mejoras, siempre habrá perturbaciones que provoquen mal funcionamiento o averías en los equipos. A continuación se da una relación de los efectos más corrientes.

5.2. Variedad de fallos en la red

Un fallo de red es cuando el suministro de red eléctrica no se encuentra en estado óptimo, por lo tanto no permanece dentro de los márgenes normalizados.

Los incidentes más comunes son provocados por fallos en aislamientos, causados por condiciones meteorológicas adversas (Fig.6.2.), mal mantenimiento de las instalaciones o incluso por algún animal.



Fig.6.2. Condiciones meteorológicas.

5.2.1. Transitorios



Fig.6.3.Picos(Spike) y Muecas (Notch).

Dos tipos:

- Los producidos por inducción de descargas atmosféricas (rayos) a las líneas aéreas.
- Los producidos por variaciones bruscas de corrientes de carga, conexiones-desconexiones de cargas inductivas o capacitivas.

Efecto: Cuando sobrepasan los límites previstos, producen averías en los aislamientos o en los semiconductores.

5.2.2. Micro-cortes – huecos de tensión

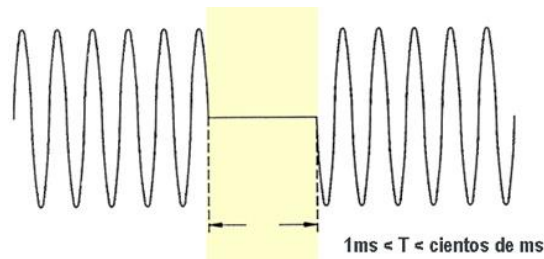


Fig.6.4.Microcortes (Dropout).

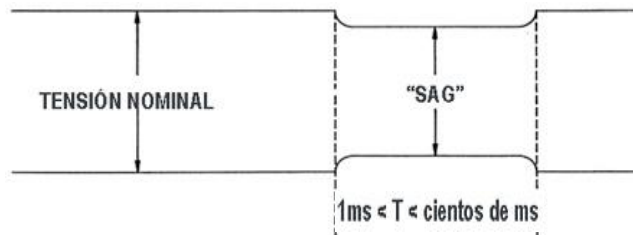


Fig.6.5.Hueco de tensión (Sag's).

Son caídas de tensiones profundas o totales, de una duración de unos pocos milisegundos. Tienen por origen dos causas distintas:

- Cortocircuitos cercanos al punto de consumo, liberados posteriormente por la protección correspondiente.
- Interrupciones en el suministro producidas por la conmutación de líneas y disparo de protecciones con reenganche automático.

Efecto: En equipos con funciones de memoria o lógica, un corte en la alimentación (aunque sea de corta duración) suele provocar fallos funcionales. Los equipos informáticos en general son muy sensibles a estas perturbaciones, que pueden provocar pérdidas de información de valor incalculable.

5.2.3. Sobre-tensiones

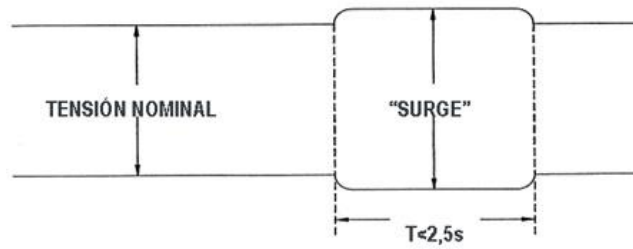


Fig.6.6. Sobretensiones: transitorias corta duración.

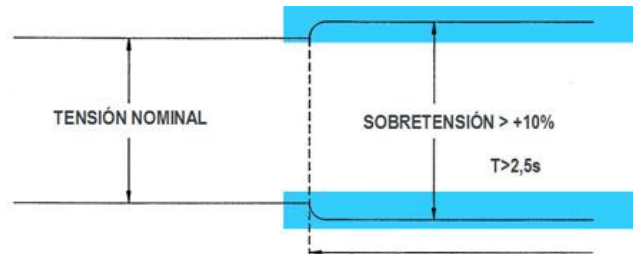


Fig.6.7. Sobretensiones: transitorias larga duración.

Sobretensiones de corta/larga duración debidas a disminuciones de carga en redes con regulación mediocre (alta impedancia).

Efecto:

- Son el origen de múltiples problemas en toda clase de equipos e instalaciones:
- En instalaciones de iluminación se acorta la vida de las luminarias.
 - En los equipos de informática, se producen fallos en las alimentaciones y monitores.

5.2.4. Sub-tensiones

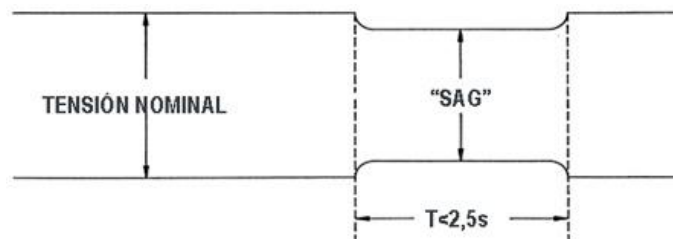


Fig.6.8. Sub-tensiones (Sag's) de corta duración.

Son caídas de tensión de corta duración debidas a sobrecargas momentáneas o permanentes en la red.

Efecto:

- Motores de inducción disminuyen la velocidad y aumentan el consumo.
- Las instalaciones de iluminación con lámparas de descarga presentan puntos oscuros.
- Paros de sistemas por entrar en la zona de trabajo de mínima tensión.

5.2.5. Sub-tensión gradual

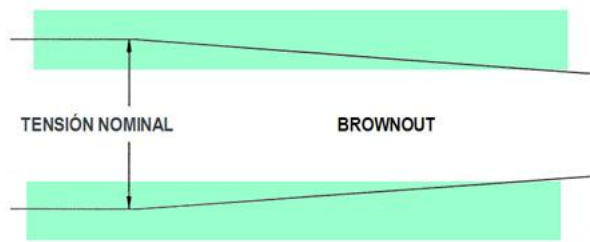


Fig.6.9. Sub-tensiones gradual y prolongada (Brownout).

Caída progresiva durante varios segundos, que suele terminar con un fallo total del suministro. Se producen cuando existen fuertes perturbaciones en la explotación de las redes y centrales productoras de energía.

(Falta de potencia, pérdida de sincronismo, etc...).

Efecto: iguales consecuencias que un corte o micro-corte.

5.2.6. Fallo de suministro

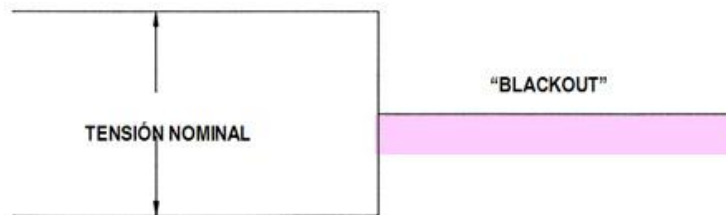


Fig.6.10. Fallo de suministro (Blackout).

Fallo total debido generalmente al accionamiento intempestivo de una protección de la red de distribución.

Efecto: Los cortes de suministro dejan inevitablemente parados los equipos a no ser que posean un sistema de energía propio independiente del exterior.

Pero cuando el paro se produce de forma intempestiva, pueden producirse situaciones de peligro en cuanto a la seguridad de las personas y cosas, o también pérdidas muy valiosas de información (caso de los equipos de Informática).

5.2.7. Armónicos

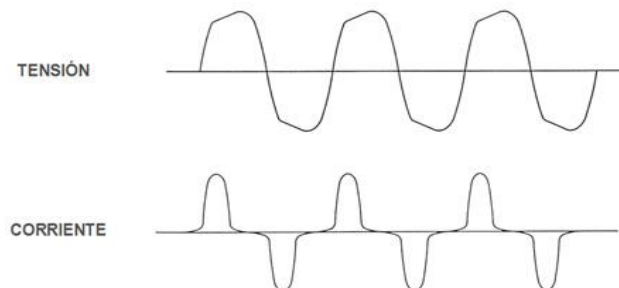


Fig.6.11. Armónicos de corriente y/o tensión.

Ciertos receptores consumen cargas no lineales, es decir, corrientes armónicas. Estas corrientes producen caídas de tensión armónicas que modifican la onda de tensión senoidal producida en origen (en los alternadores de las centrales).

5.2.8. Interferencias de alta frecuencia

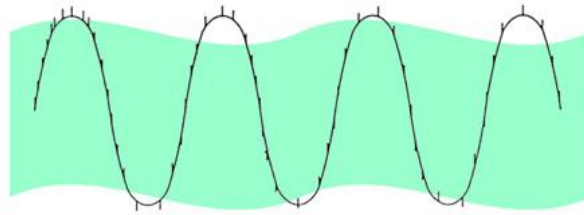


Fig.6.12.Perturbaciones de alta frecuencia.

Son señales de alta frecuencia superpuestas a la tensión de alimentación. Pueden consistir en señales de cualquier frecuencia definida o de banda ancha; estacionaria, a ráfagas o a impulsos repetitivos.

Son el resultado de acoples indeseados de las líneas de la red comercial con aparatos que emplean tecnologías de alta frecuencia o de conmutación. Según el tipo de acoplo pueden presentarse en forma de modo común o de modo diferencial.

Efecto: Estas perturbaciones pueden provocar toda clase de fallos en los equipos: desde fallos funcionales hasta averías permanentes.

5.2.9. Variaciones de frecuencia

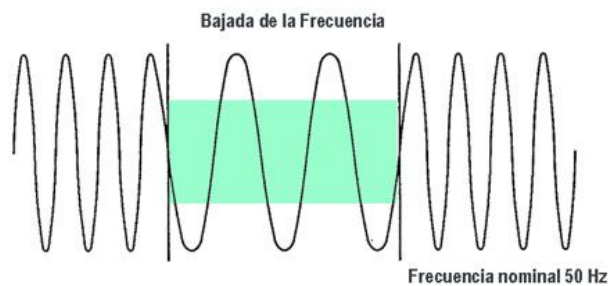


Fig.6.13.Variaciones de frecuencia.

Las redes comerciales continentales interconectadas (como lo son la mayoría de las de Europa) suministran una frecuencia prácticamente invariable y muy próxima a la nominal. Ello es así porque se controla en un mega-sistema que incluye un número elevadísimo de máquinas síncronas, con una potencia global enorme y una inercia que tiende al infinito.

Por el contrario, en muchas islas y otras zonas aisladas, o en instalaciones independientes provistas de pequeñas centrales eléctricas (o grupos electrógenos) se producen a menudo importantes variaciones de frecuencia. Las variaciones son prácticamente inevitables cuando hay conexiones o desconexiones de potencia comparable a la potencia total del sistema.

5.3. Hueco de tensión

Se dice que ha tenido lugar un hueco de tensión (Fig.6.14) en un punto de la red eléctrica cuando la tensión de una o más fases cae repentinamente por debajo de un límite establecido, generalmente el 90%, pudiendo llegar hasta un 1% según la norma UNE-EN 50160 [5] (Fig.6.15), y se recupera después de un corto periodo de tiempo que oscila entre medio ciclo y algunos segundos. El límite máximo de este periodo resulta el punto más controvertido en la definición de hueco de tensión. Algunas definiciones consideran que existe hueco

cuando la duración es de hasta 1 min. Otras elevan este límite hasta los 3 min. En condiciones normales de explotación, el número esperado de huecos de tensión en un año puede ir de algunas decenas a unos miles.

El corte breve supone la desaparición total de la tensión de las tres fases durante un tiempo superior a 10 ms e inferior a un minuto, si bien se considera como interrupción de la alimentación aquella situación en la que la tensión en los puntos de suministro no supere el 10% de la tensión declarada. Es, por tanto, equivalente a un hueco de tensión que afecte a las tres fases y tenga una profundidad del 90%. En condiciones normales de explotación, el número anual de cortes breves puede variar de algunas decenas a varias centenas.

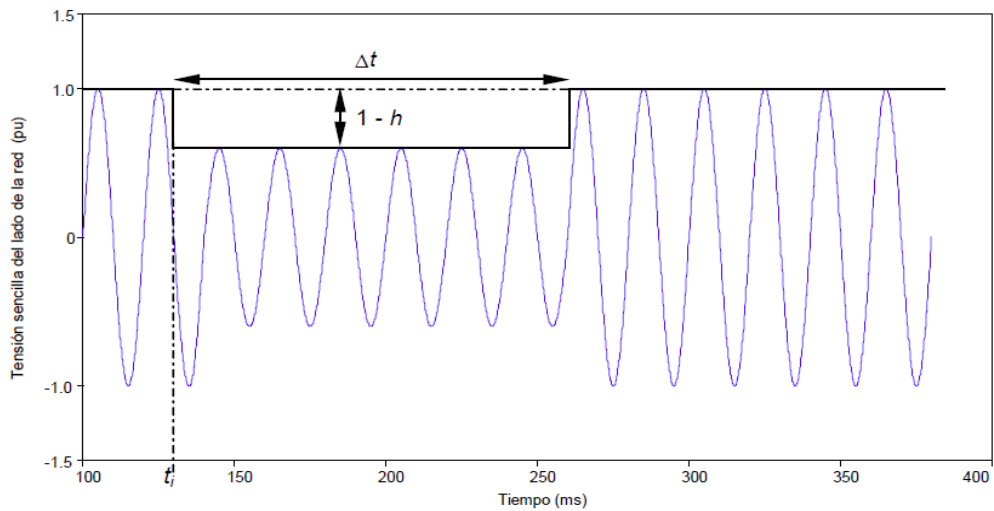


Fig.6.14.Hueco de tensión.

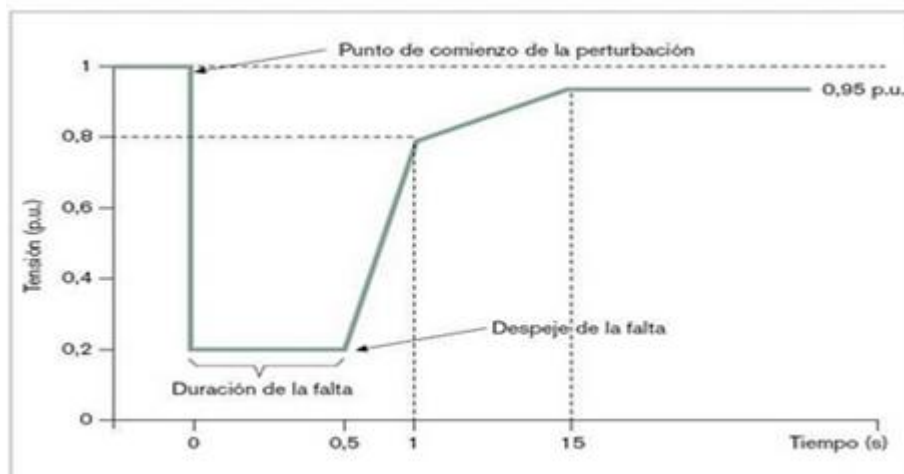


Fig.6.15. Límites normalizados de los huecos de tensión.

Con el transcurso de los años las redes han ido mejorando para reducir la duración de los cortes de tensión, esto ha provocado un aumento notable de huecos de tensión.

En España la norma nacional EN 50160 [5] (fig.6.15), para redes no superiores a 35 kW establece unos márgenes de tensión (Fig.6.16), con los cuales deberemos de actuar en conveniencia con nuestro sistema para conseguir situarlas dentro de los márgenes.

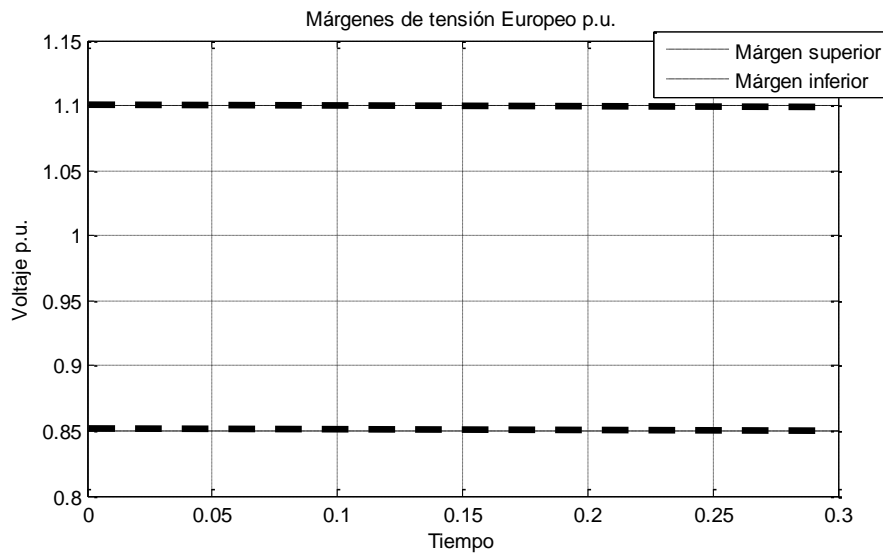


Fig.6.16.Márgenes superior y inferior

5.4. Tipos de huecos de tensión

Los huecos de tensión dependen de dos factores, de la profundidad de una o más fases y del desfase de estas. En nuestro proyecto contemplamos los huecos de tensión (Sag's) equilibrados, aquellos que no tienen las tensiones de red desfasadas entre sí.

5.4.1. Hueco tipo A

En este tipo de hueco caen las tres fases de tensión de la red eléctrica.

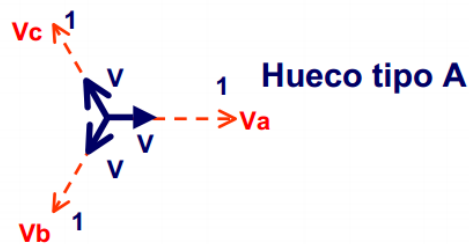
Falla trifásica

Tensiones de fase:

$$V_a = V$$

$$V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V$$

$$V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$$



Tensiones en RMS Sag tipo A

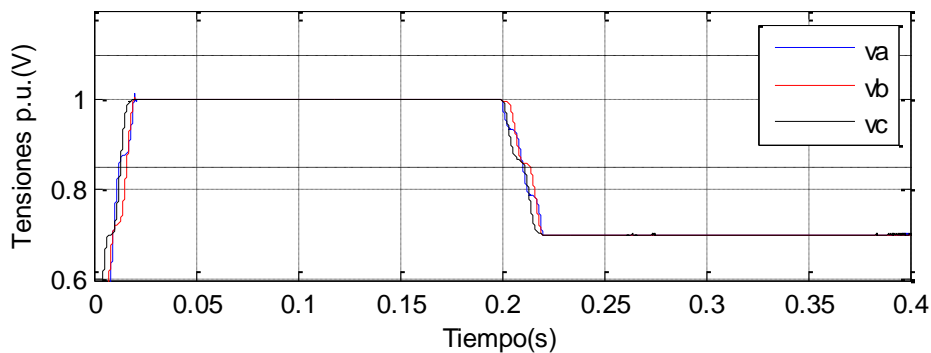
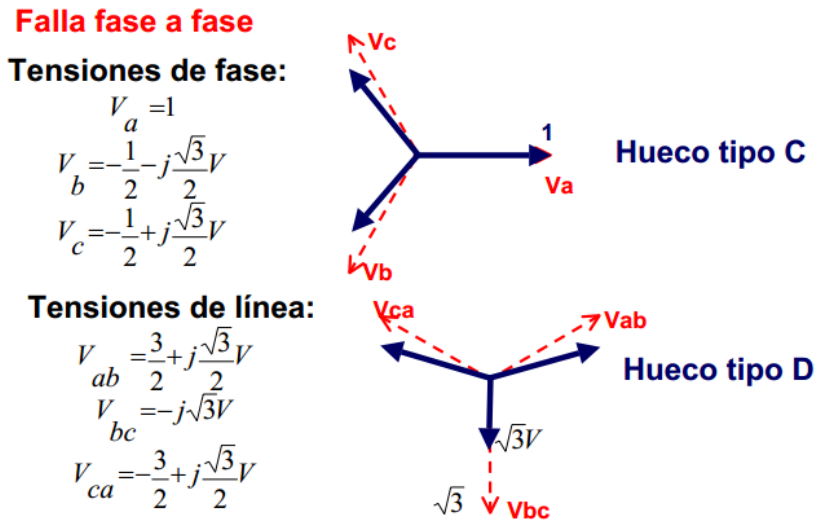


Fig.6.17.Ejemplo de un hueco tipo A

5.4.2. Hueco tipo C y D

En el hueco tipo C caen dos de las tres fases de la red eléctrica y en el hueco tipo D solo cae una fase.



Tensiones en RMS Sag tipo C

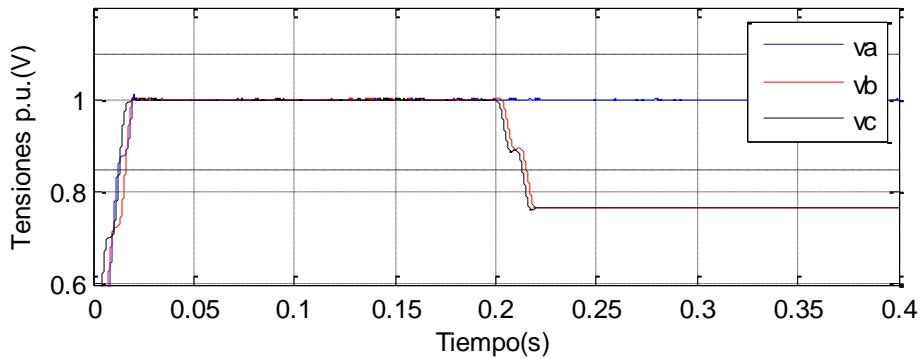


Fig.6.18. Ejemplo de un hueco tipo C

Tensiones en RMS Sag tipo D

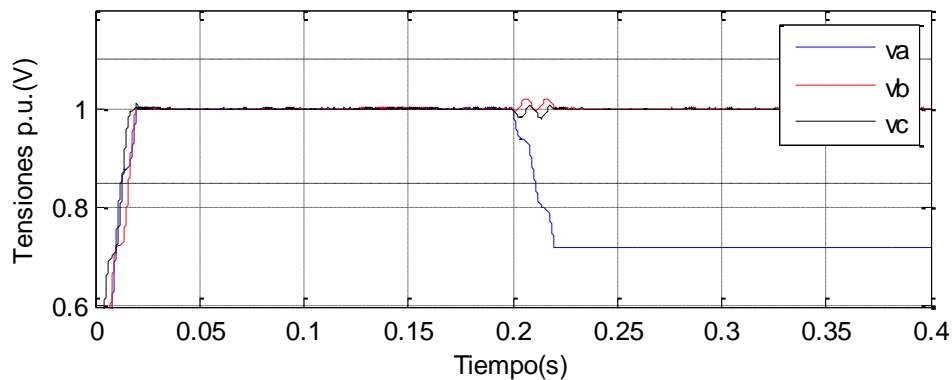


Fig.6.19. Ejemplo de un hueco tipo D

5.5. Efectos de los huecos de tensión (Sag's)

Los huecos de tensión no son tan perjudiciales para la industria como las interrupciones; pero debido a que ocurren con mayor frecuencia, las pérdidas económicas debidas a ellos pueden ser mayores que las causadas por las interrupciones.

La existencia de un hueco en la red puede provocar la parada de equipos sensibles, y si estos no están protegidos los daños pueden ser irreparables.

6. Estudio teórico

En este capítulo se procede a efectuar un estudio teórico en lazo abierto con diferentes inyecciones tanto de potencia activa como reactiva en diferentes valores de la secuencia positiva y negativa y así poder observar el comportamiento que tienen las tensiones de red en diferentes impedancias de red. En la Fig.6.1. podemos ver el módulo del inversor que actuará como una fuente de corriente y la impedancia de red, representada con dos elementos pasivos, una resistencia y una inductancia. Para encontrar los valores de los elementos pasivos (R y L) fijamos el ángulo (15) para ver el comportamiento de tres impedancias diferentes: $\varphi = 0^\circ$ (totalmente resistiva), $\varphi = 60^\circ$ (más inductiva que resistiva) y por último $\varphi = 90^\circ$ (totalmente inductiva). Véase (Fig.6.2).

$$\varphi_z = \text{tg}^{-1} \cdot \frac{\omega L}{R} \quad (15)$$



Fig.6.1. módulo del inversor y de la impedancia de red

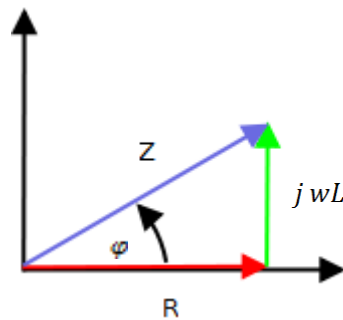


Fig.6.2. φ de la impedancia

6.1. Introducción de los parámetros a controlar

El control para poder actuar necesita leer constantemente cuatro parámetros, estos son: *Potencia_{activa}*, *Potencia_{reactiva}*, *K_p* y *K_q*.

Primero de todo la potencia aparente (*S*) viene determinada por la capacidad de la huerta solar (en nuestro caso 10 Kw) y se desglosa en *Potencia_{activa}*, *Potencia_{reactiva}*, que deben cumplir el triángulo de potencias (16) y (Fig.6.3).

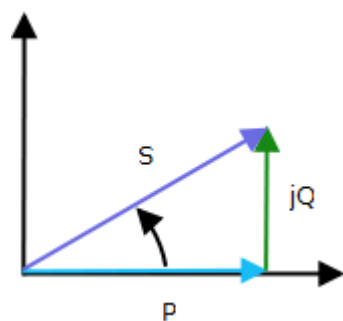


Fig.6.3. Triángulo de potencias

$$S = \sqrt{P^2 + j \cdot Q^2} \quad (16)$$

La *Potencia_{activa}* actuará de una forma u otra dependiendo del valor de Kp del mismo modo que la *Potencia_{reactiva}* lo hará con el valor Kq .

Estos dos parámetros comprenden estos valores: $0 \leq Kp \text{ o } Kq \leq 1$. Ahora bien, Kp y Kq se desglosan en dos parámetros mas: Kp^+ , Kp^- , Kq^+ y Kq^- (17) y (18).

$$Kp^+ = Kp \quad Kp^- = (1 - Kp) \quad (17)$$

$$Kq^+ = Kq \quad Kq^- = (1 - Kq) \quad (18)$$

Las cuatro variables determinarán por que secuencia inyectaremos la potencia:

- Si Kp y $Kq = 1 \rightarrow Kp^+$ y $Kq^+ = 1$; Kp^- y $Kq^- = 0$, toda la potencia será inyectada por secuencia positiva.
- Si Kp y $Kq = 0 \rightarrow Kp^+$ y $Kq^+ = 0$; Kp^- y $Kq^- = 1$, toda la potencia será inyectada por secuencia negativa.
- Si Kp y $Kq = 0.6 \rightarrow Kp^+$ y $Kq^+ = 0.6$; Kp^- y $Kq^- = 0.4$, la potencia será inyectada un 60% por secuencia positiva y un 40% por secuencia negativa.

Kp y Kq no tienen por qué tener el mismo valor, cada una actúa por su cuenta.

Hemos realizado diversos ensayos con diferentes tipos de impedancia de red e inyecciones de potencia, para poder ver las tendencias tanto de la tensión positiva ($V+$) como la tensión negativa ($V-$) y asimismo la acción que estas provocan a las tensiones de red.

6.2. Resultados del estudio teórico

En el siguiente apartado veremos los resultados que hemos obtenido a partir del estudio teórico, este estudio consiste en inyectar potencia activa o reactiva (solamente) en diferentes impedancias a diferentes valores de P , Q , kp y kq . Véase (Fig.6.4.)

Una vez realizado el proceso de simulación obtendremos unas matrices de 11x11. Los valores de inyección de P y Q irán de $0 \rightarrow 1$ en intervalos de 0.1 en valor *p.u.*. Y como ya sabemos que $0 \leq Kp \text{ o } Kq \leq 1$ realizaremos el mismo intervalo para el barrido.

Ejemplo: Trabajaremos con la potencia activa y en una impedancia de 0° , si estamos inyectamos 5 kW de potencia activa (que corresponde a 0.5 W en valor *p.u.*) veremos cómo actúan la $V(+)$ y la $V(-)$ a la variación de valores de Kp y asimismo como afecta a las tensiones de red.

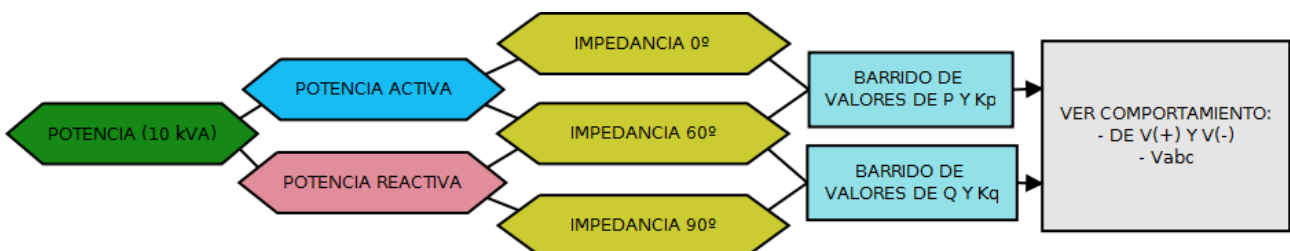


Fig.6.4. Esquema del estudio teórico

Procedemos a ver los resultados del estudio teórico.

6.2.1. Parámetros con una impedancia de red de 0° con inyección de potencia activa

Observando los resultados en la Fig.6.5 veremos las tendencias de $V(+)$ y $V(-)$ al inyectar solamente potencia activa en una impedancia de 0° .

Cuando $Kp = 1$, inyectamos toda la potencia activa por secuencia positiva, $V(+)$ aumenta y $V(-)$ se mantiene, proyectando esta tendencia a las tensiones de red notamos que aumentan considerablemente. Véase en (Fig.6.6.).

Ahora bien, cuando $Kp = 0$ inyectamos toda la potencia activa por secuencia negativa, $V(-)$ aumenta considerablemente y $V(+)$ consideramos que se mantiene, ya que su aumento es menos apreciable. Viendo las tendencias de las tensiones de red estas se separan. Véase en (Fig.6.6.).

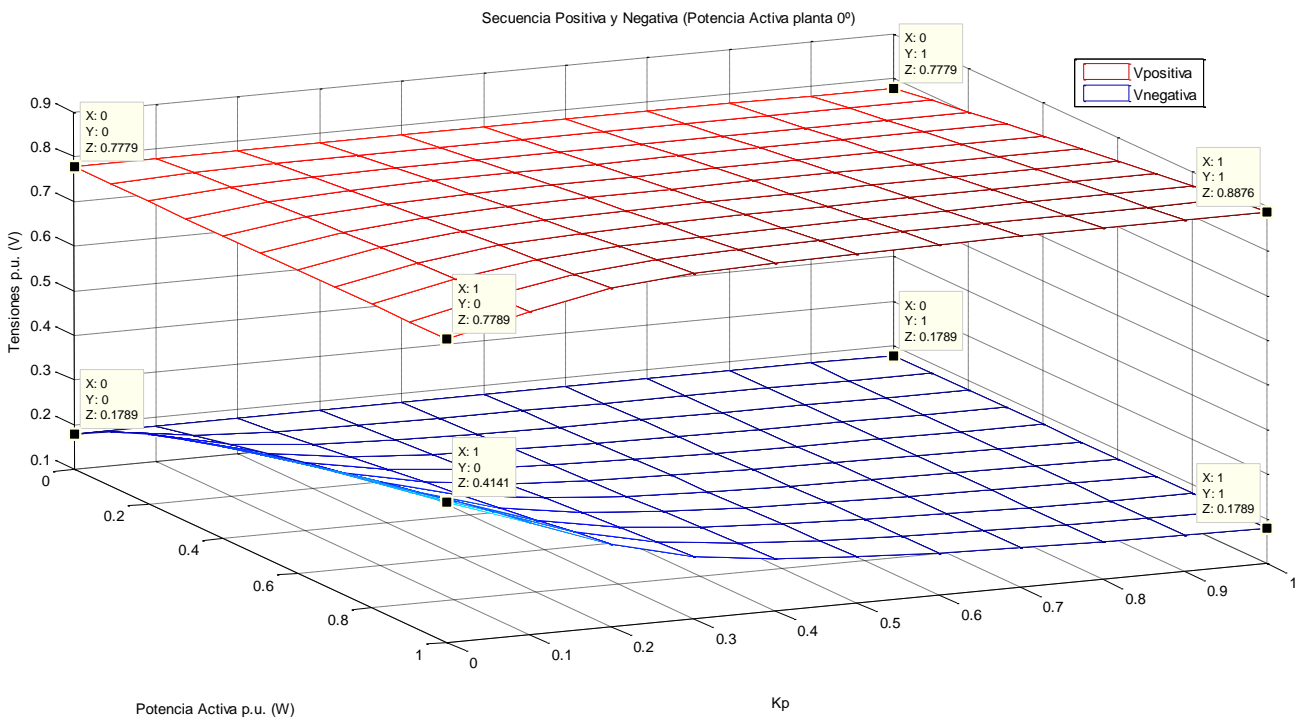


Fig.6.5. Efecto de la inyección de potencia activa por secuencia positiva y negativa en $V+$ y $V-$

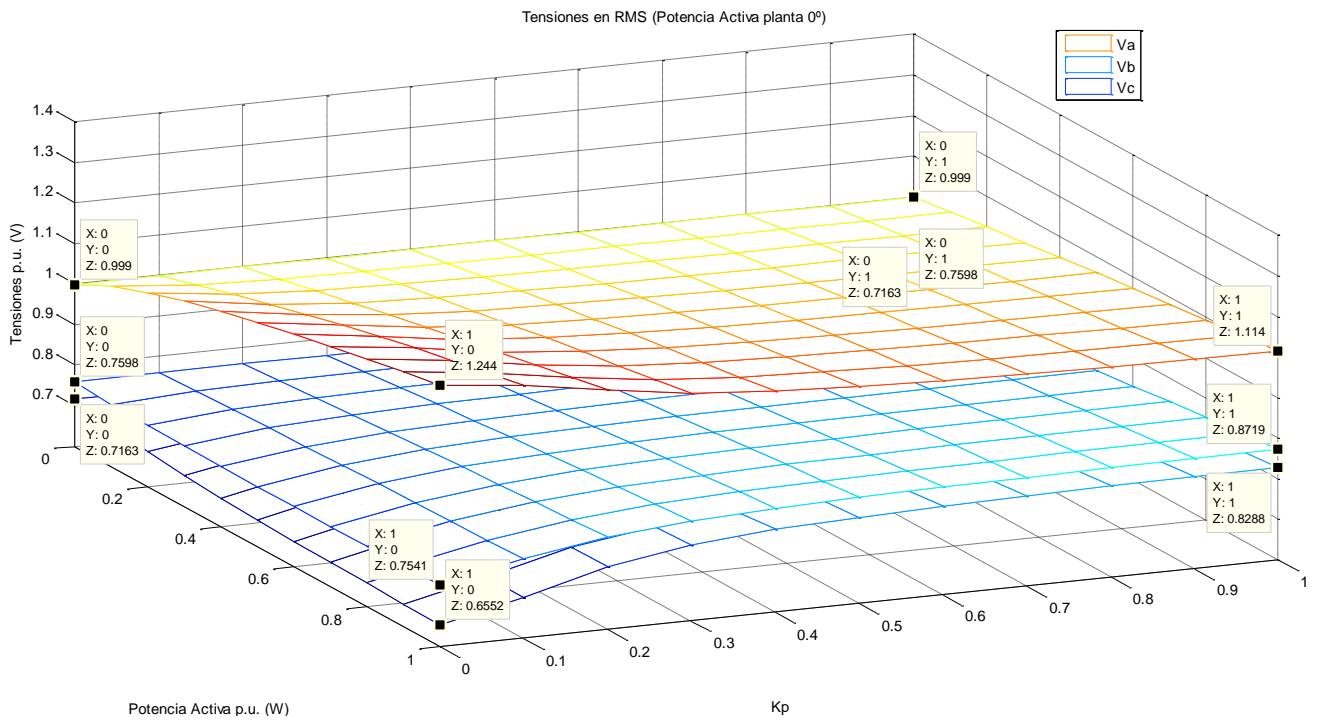


Fig.6.6. Efecto de la inyección de potencia activa en las tensiones

6.2.2. Parámetros con una impedancia de red de 90° con inyección de potencia reactiva

Observando los resultados en la Fig.6.7 veremos las tendencias de $V(+)$ y $V(-)$ al inyectar solamente potencia reactiva en una impedancia de 90° .

Cuando $Kq = 1$, inyectamos toda la potencia reactiva por secuencia positiva, $V(+)$ aumenta y $V(-)$ se mantiene, proyectando esta tendencia a las tensiones de red notamos que aumentan considerablemente. Véase en (Fig.6.8.)

Ahora bien, cuando $Kq = 0$ inyectamos toda la potencia reactiva por secuencia negativa, esta disminuye y la positiva se mantiene, viendo las tendencias de las tensiones estas se juntan. Véase en (Fig.6.8.).

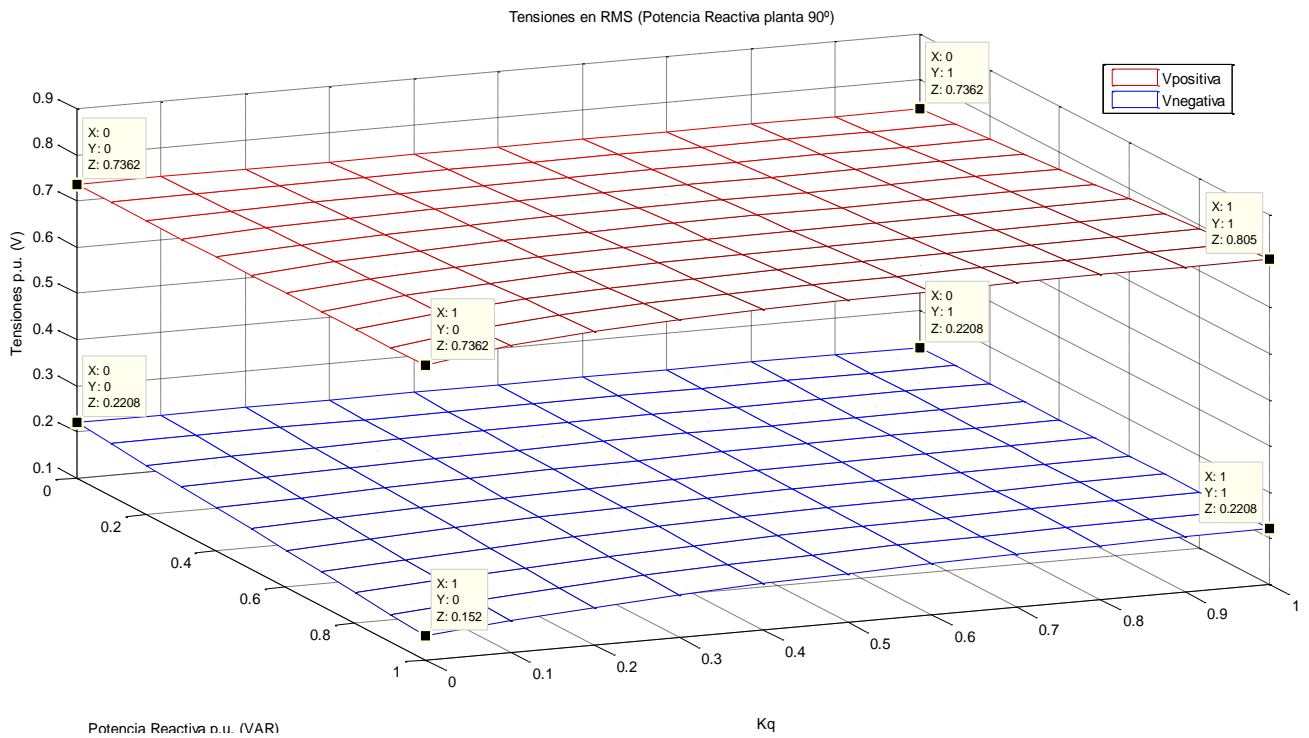


Fig.6.7. Efecto de la inyección de potencia reactiva por secuencia positiva y negativa en V+ y V-

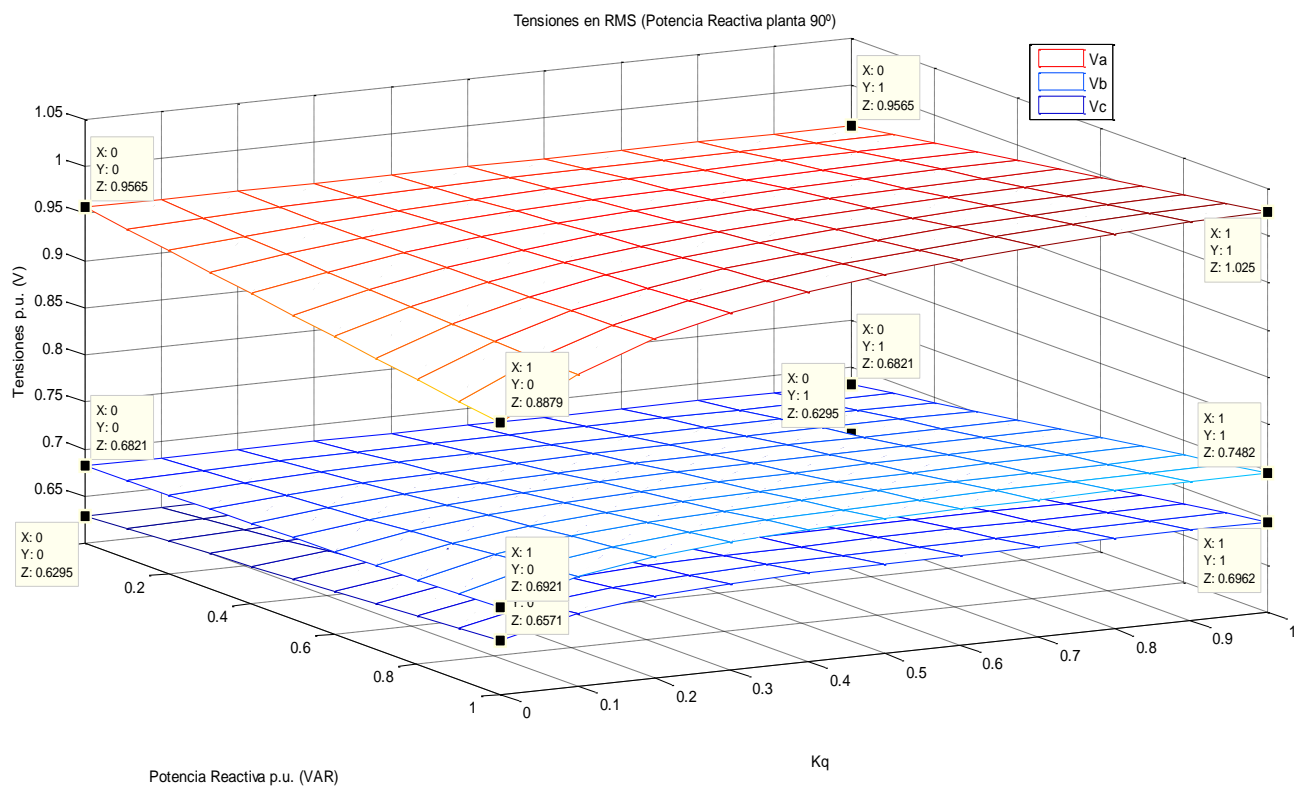


Fig.6.8. Efecto de la inyección de potencia reactiva en las tensiones

6.2.3. Parámetros con una impedancia de red de 60°

6.2.3.1. Con inyección de potencia activa

Observando los resultados en la Fig.6.9 veremos las tendencias de $V(+)$ y $V(-)$ al inyectar solamente potencia activa en una impedancia de 60° , altamente inductiva.

Cuando $Kp = 1$, inyectamos toda la potencia activa por secuencia positiva, $V(+)$ aumenta y $V(-)$ se mantiene, proyectando esta tendencia a las tensiones de red notamos que aumentan considerablemente. Véase en (Fig.6.10.).

Ahora bien, cuando $Kp = 0$ inyectamos toda la potencia activa por secuencia negativa, $V(-)$ aumenta considerablemente y $V(+)$ consideramos que se mantiene, ya que su aumento es menos apreciable. Viendo las tendencias de las tensiones de red estas se separan. Véase en (Fig.6.10.).

Hay que manifestar que si comparamos las Fig.6.5-6.9, al tener una impedancia altamente inductiva el efecto de inyectar potencia activa es menor que en una impedancia de totalmente resistiva.

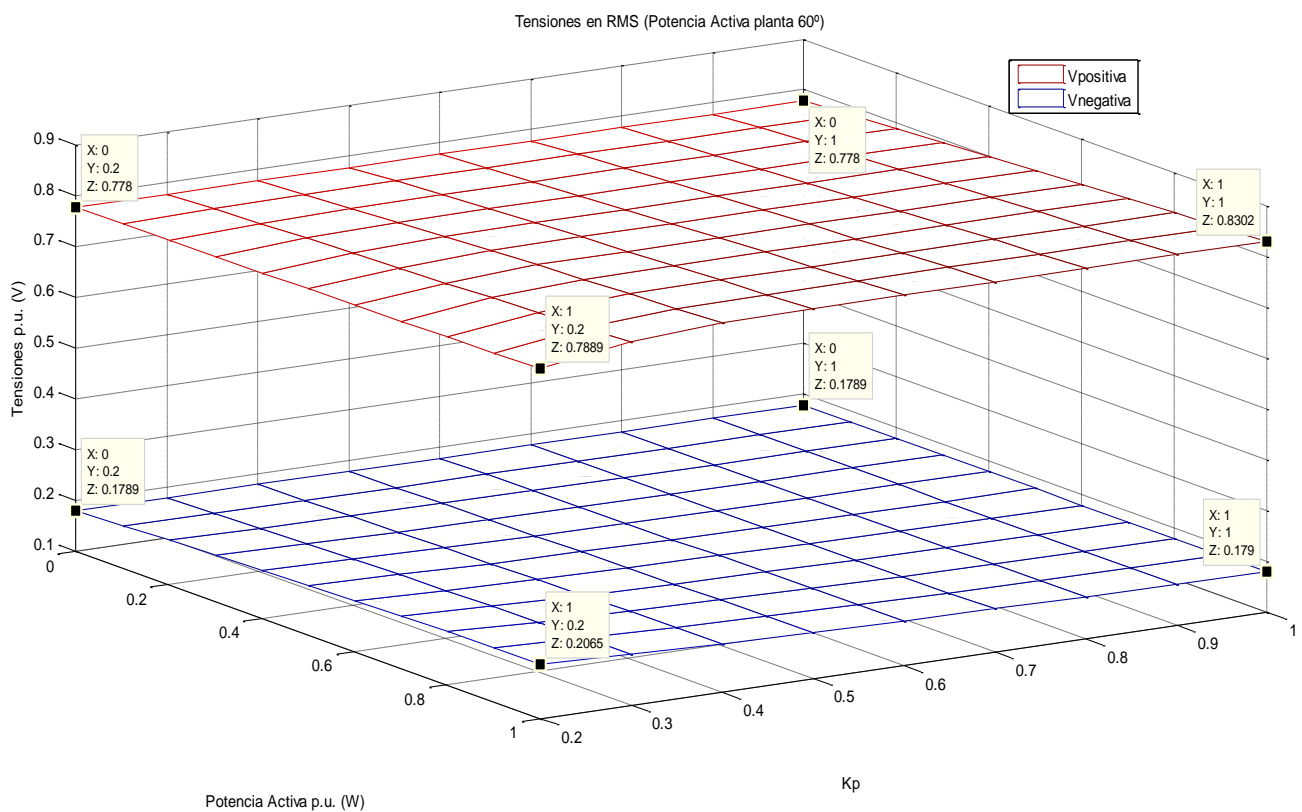


Fig.6.9. Efecto de la inyección de potencia activa por secuencia positiva y negativa en $V+$ y $V-$

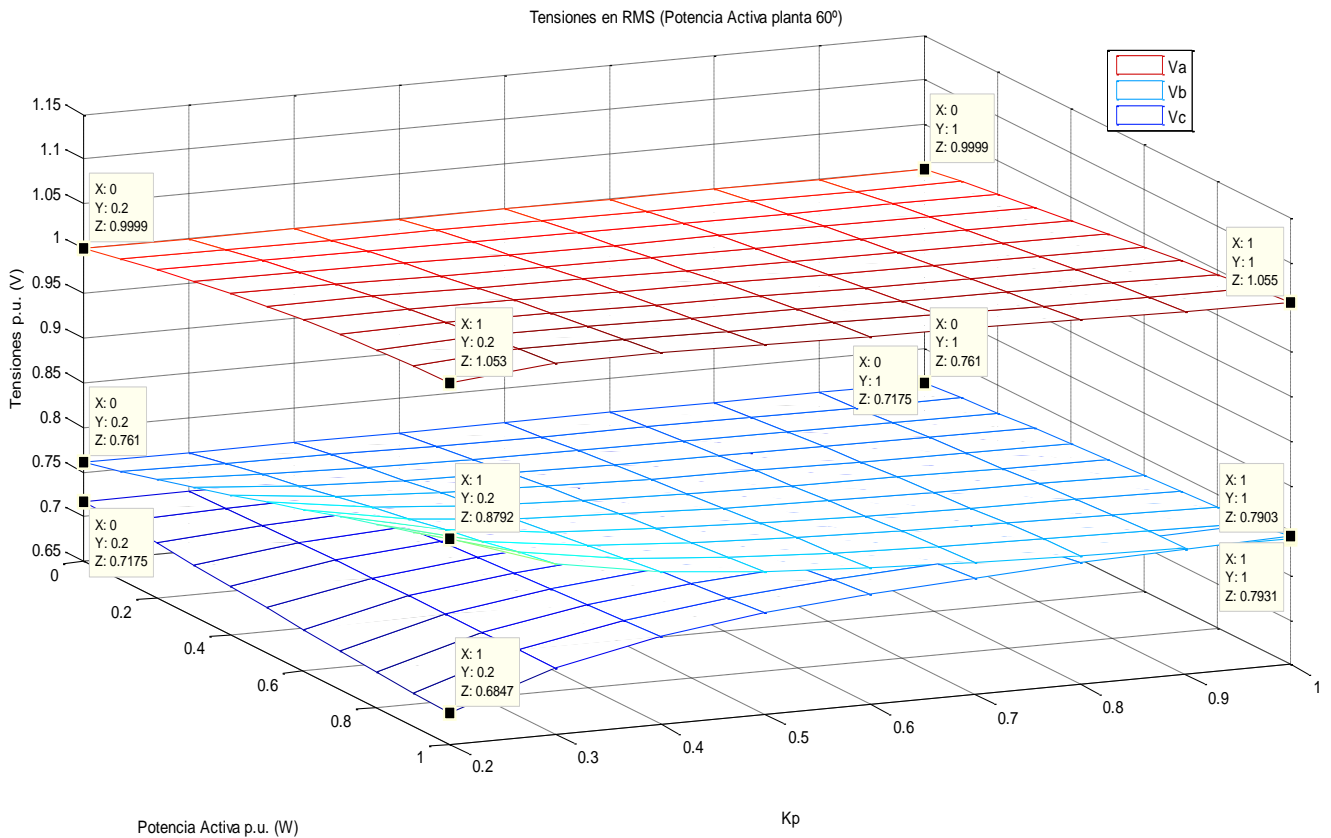


Fig.6.10. Efecto de la inyección de potencia activa en las tensiones

6.2.3.2. Con inyección de potencia reactiva

Observando los resultados en la Fig.6.11 veremos las tendencias de $V(+)$ y $V(-)$ al inyectar solamente potencia reactiva en una impedancia de 60° , altamente inductiva.

Cuando $Kq = 1$, inyectamos toda la potencia reactiva por secuencia positiva, $V(+)$ aumenta y $V(-)$ se mantiene, proyectando esta tendencia a las tensiones de red notamos que aumentan considerablemente. Véase en (Fig.6.12.)

Ahora bien, cuando $Kq = 0$ inyectamos toda la potencia reactiva por secuencia negativa, esta disminuye y la positiva se mantiene, viendo las tendencias de las tensiones estas se juntan. Véase en (Fig.6.12.).

Antes hemos comentado que el efecto de la inyección de potencia activa en una impedancia altamente inductiva era menor. Ahora bien, inyectar potencia reactiva en una impedancia inductiva el efecto sobre las tensiones será mayor.

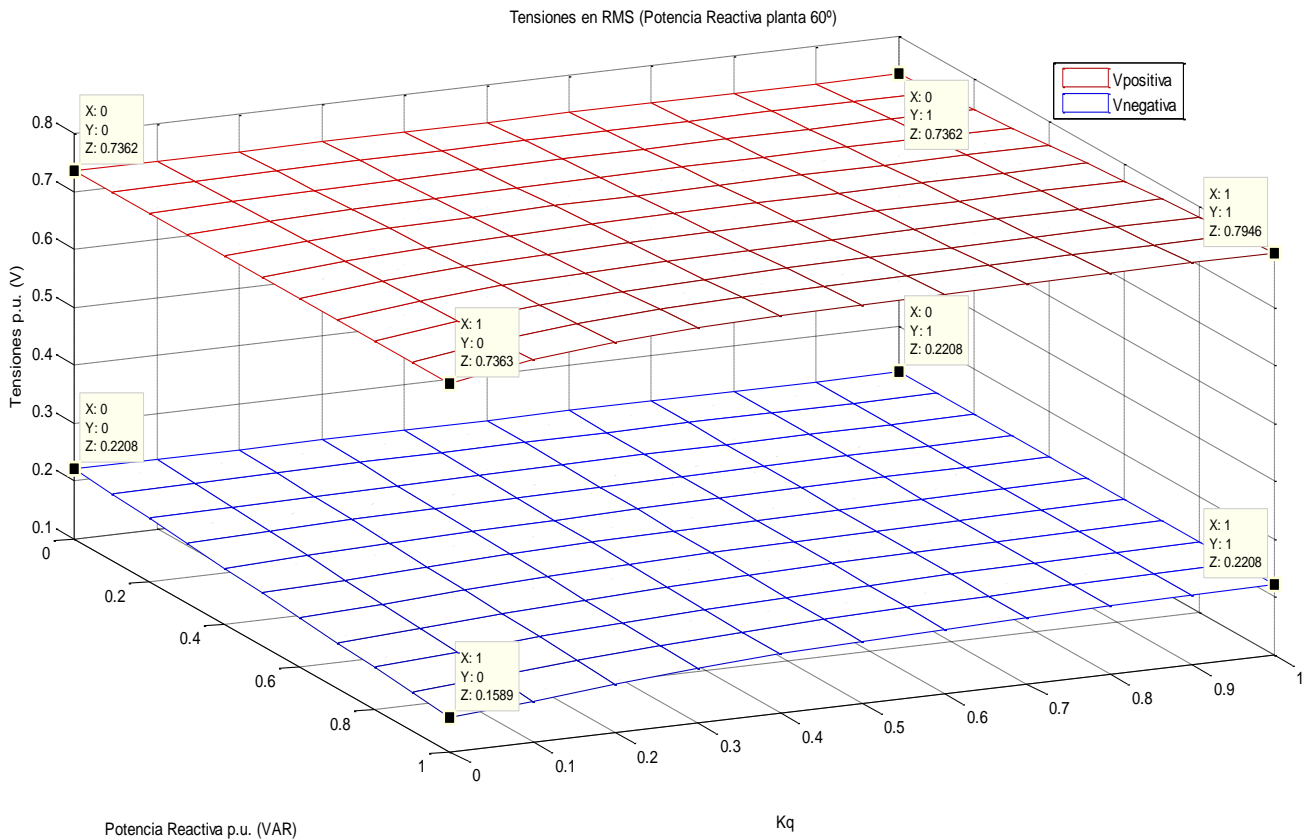


Fig.6.11. Efecto de la inyección de potencia reactiva por secuencia positiva y negativa en V+ y V-

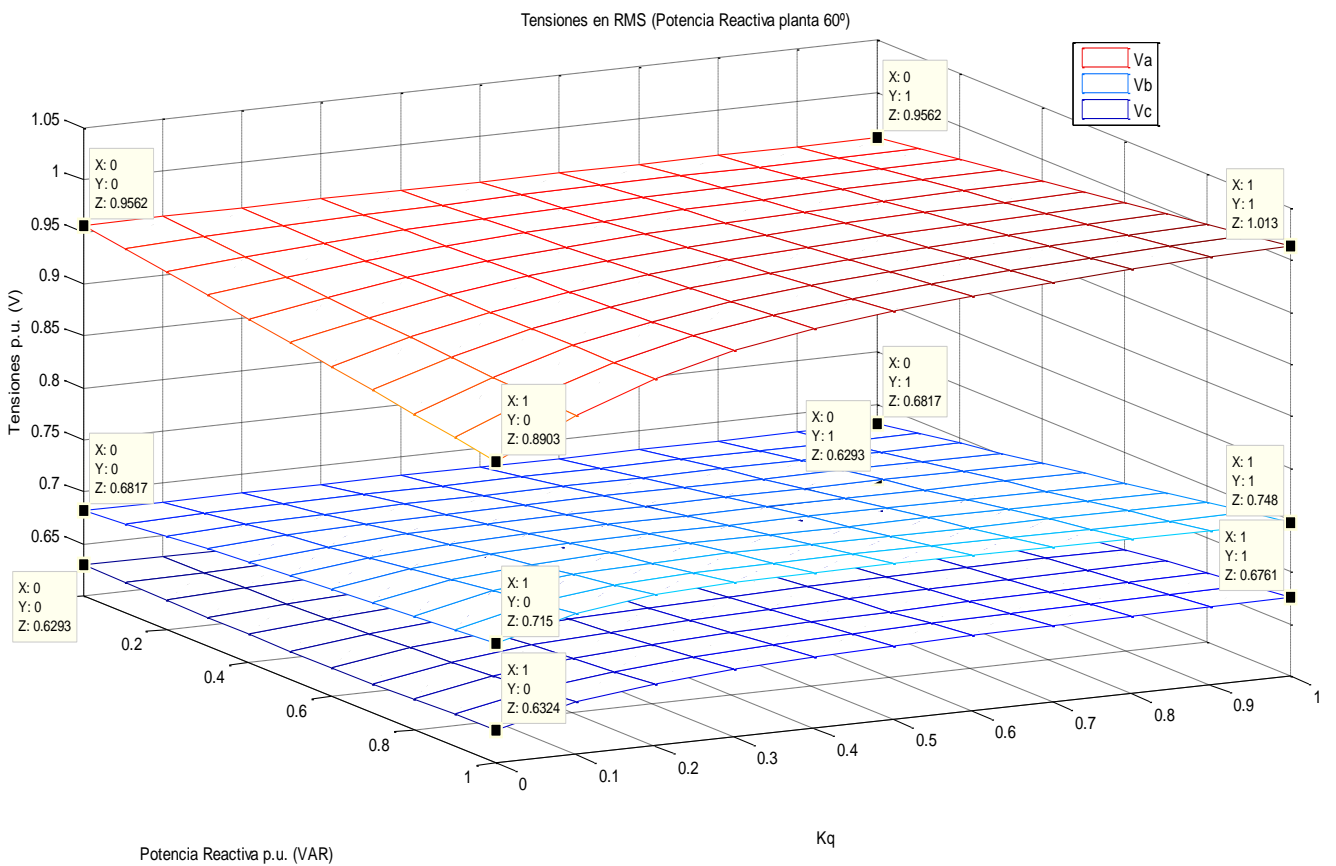


Fig.6.12. Efecto de la inyección de potencia reactiva en las tensiones

6.3. Conclusiones

Como habíamos dicho al principio del capítulo, el estudio teórico es para ver las tendencias que hay en V_+ y V_- al inyectar diferentes cantidades de potencia activa y reactiva haciendo barridos de k_p y k_q . Una vez tenemos los resultados de las gráficas anteriores procedemos a elaborar una tabla la cual deja plasmada que estrategia nos conviene más a la hora de levantar o de juntar las tensiones (Tabla.1.).

- Efecto de la potencia activa:

Observando las gráficas de inyección de potencia activa sobre las diferentes impedancias de red (0° y 60°) a medida que la inductancia predomina más en la impedancia el efecto de inyectar potencia activa va minimizando progresivamente, es decir, que si pretendemos inyectar solamente potencia activa interesa que la impedancia de red sea más resistiva, lo más cercano a una impedancia de 0° . Dicho esto observamos las tendencias sobre las tensiones (V_+ , V_- y V_{abc}).

Las tendencias que tienen las tensiones en las dos impedancias de red estudiadas (0° y 60°) para la potencia activa es el mismo. Cuando $Kp^+ = 1$ y $Kp^- = 0$ (levantar), es decir toda la potencia irá por secuencia positiva, $V(+)$ aumentará y $V(-)$ se mantiene, véase en Fig.6.5 y 6.9. Proyectando esta tendencia a las tensiones de red V_{abc} , estas aumentan a medida que la inyección va aumentando, véase en Fig.6.6 y 6.10. Ahora bien, cuando $Kp^+ = 0$ y $Kp^- = 1$ (juntar), toda la potencia por secuencia negativa, $V(-)$ aumenta y $V(+)$ se mantiene, véase en Fig.6.5 y 6.9. Esto afecta del siguiente modo en las tensiones V_{abc} , a medida que la inyección de potencia activa aumenta las tensiones van separándose, véase en Fig.6.6 y 6.10. Este segundo caso no nos interesa para nada, ya que no conseguimos el objetivo que es juntar en el siguiente capítulo tendremos que ver cómo actuar para conseguir que las tensiones se junten.

- Efecto de la potencia reactiva:

Observando las gráficas de inyección de potencia reactiva sobre las diferentes impedancias de red (60° y 90°) se puede observar que en la impedancia de 90° la inductancia predominará totalmente y en 60° seguirá imponiéndose la parte inductiva a la parte resistiva de la impedancia. Por lo tanto en nuestra impedancia de red (60°) concluimos que la potencia reactiva tendrá un papel más importante que la potencia activa. Dicho esto observamos las tendencias sobre las tensiones (V_+ , V_- y V_{abc}).

Las tendencias que tienen las tensiones en las dos impedancias de red estudiadas (90° y 60°) para la potencia reactiva es el mismo. Cuando $Kq^+ = 1$ y $Kq^- = 0$ (levantar), es decir toda la potencia irá por secuencia positiva, $V(+)$ aumentará y $V(-)$ se mantiene, véase en Fig.6.7 y 6.11. Proyectando esta tendencia a las tensiones de red V_{abc} , estas aumentan a medida que la inyección va aumentando, véase en Fig.6.8 y 6.12. Ahora bien, cuando $Kq^+ = 0$ y $Kq^- = 1$ (juntar), toda la potencia por secuencia negativa, $V(-)$ aumenta y $V(+)$ se mantiene, véase en Fig.6.7 y 6.11. Esto afecta del siguiente modo en las tensiones V_{abc} , a medida que la inyección de potencia activa aumenta las tensiones van juntándose, véase en Fig.6.8 y 6.12.

Al querer juntar observamos que si lo hacemos por medio de la potencia activa no lo conseguimos pero si es por medio de potencia reactiva el efecto de juntar se efectúa correctamente.

Por otro lado al querer levantar las tensiones tanto si lo hacemos por potencia activa como reactiva lo conseguimos, pero en nuestra impedancia que es de 60° , altamente inductiva el efecto que produce la potencia reactiva es mucho más notorio que el efecto que tiene la potencia activa.

Inyección <i>Potencia</i> _{activa}			inyección <i>Potencia</i> _{reactiva}		
Impedancia 0°	$Kp = 1$	$Kp = 0$	Impedancia 90°	$Kq = 1$	$Kq = 0$
V(+)	↑	=	V(+)	↑	=
V(-)	=	↑	V(-)	=	↓

Impedancia 60°	$Kp = 1$	$Kp = 0$	Impedancia 60°	$Kq = 1$	$Kq = 0$
V(+)	↑	=	V(+)	↑	=
V(-)	=	↑	V(-)	=	↓

Tabla.1. Efectos sobre las tensiones de secuencia positiva y negativa

Por último hay que destacar que si la impedancia de red es totalmente resistiva tendremos que inyectar potencia reactiva por otro lado si la impedancia es totalmente inductiva la potencia a inyectar será reactiva, véase en la Fig.6.13.

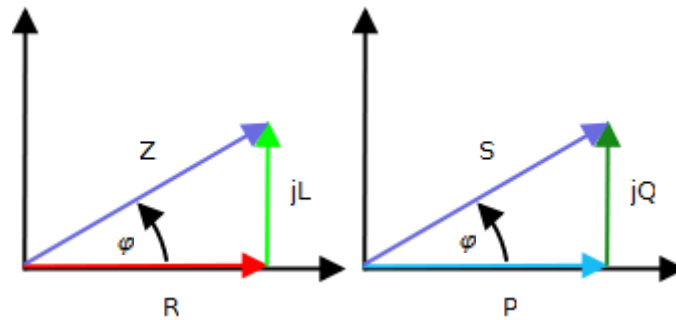


Fig.6.13. φ impedancia de red - φ inyección de potencia

7. Estrategias de inyección

En este capítulo se presenta realizar una demostración de los efectos de la potencia y de los parámetros de control en lazo cerrado y ver cómo reacciona el sistema, basado con los resultados del capítulo anterior.

7.1. Efectos de la potencia

En este apartado detallaremos diferentes estrategias para corregir los fallos de red basados en la inyección de potencia tanto activa como reactiva.

En condiciones normales de la red, el inversor inyecta toda la potencia activa a ésta. Cuando la red sufre alguna anomalía, el sistema de control puede reducir los efectos del fallo inyectando una cierta cantidad de potencia activa y potencia reactiva.

Estamos trabajando con una impedancia de red de 60° , de tal forma que influirán tanto la inyección de potencia activa y potencia reactiva, (Fig.6.13-7.1). Cuando la inductancia tiene mayor influencia que la resistencia, observando los resultados del apartado anterior para solventar los fallos, la potencia reactiva tendrá mayor efecto que la potencia activa.



Fig.7.1. módulo del inversor y de la impedancia de red

Por otro lado pretendemos demostrar que el ángulo de inyección de potencias (14) tiene que ser muy semejante al ángulo de la impedancia de red (15), es decir, que si nuestra impedancia es de 60° , el balance de inyección de potencia deberá de estar alrededor de los 60° también para conseguir un comportamiento óptimo del sistema de inyección (es decir minimizar la corriente de pico).

$$\varphi_z = \operatorname{tg}^{-1} \cdot \frac{wL}{R} \quad (14)$$

$$\varphi_s = \operatorname{tg}^{-1} \cdot \frac{Q}{P} \quad (15)$$

7.2. Representación fasorial

En los siguientes sub-apartados se muestra el efecto de la inyección de potencia activa, reactiva y ambas juntas tanto por la secuencia positiva como la negativa, representado con fasores [6] y [4]. Hay que destacar que en nuestra impedancia de red, predomina la inductancia por encima de la parte resistiva, en concreto, $\varphi = 60^\circ$.

7.2.1. Efecto de la potencia activa en una impedancia de red de 60°

La inyección de potencia activa tendrá un mayor efecto en la parte resistiva que no en la inductiva en la impedancia de la red, sin tener en cuenta si la secuencia es positiva o negativa.

7.2.1.1. *Inyección de Potencia_{activa} por secuencia positiva*

Al tener un predominio de inductancia el efecto de inyectar potencia activa por secuencia positiva el aumento de $V+$ será menor (Fig.7.2), asimismo vemos el efecto sobre las tensiones inyectando la máxima potencia activa en la (Fig.7.3).

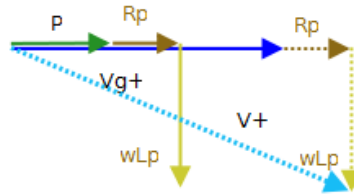


Fig.7.2. Representación fasorial Inyección de **Potencia_{activa}** por secuencia positiva

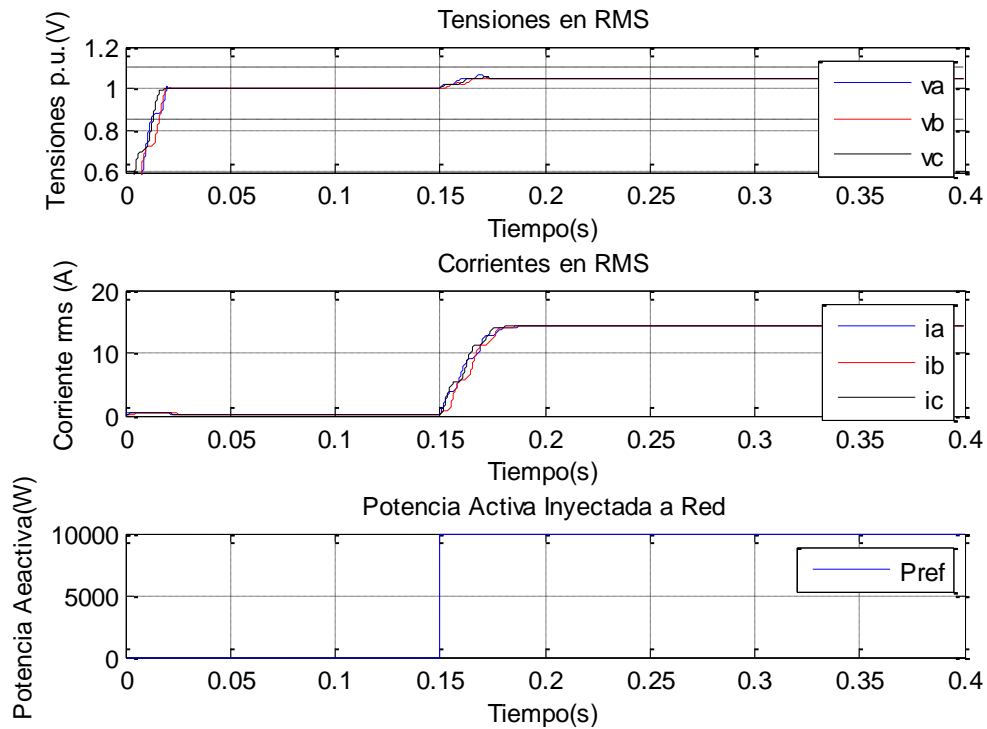


Fig.7.3. Efecto de la inyección de potencia activa en las tensiones con $k_p^+=1$ y $k_p^-=0$

7.2.1.2. *Inyección de Potencia_{activa} por secuencia negativa*

Inyectando potencia activa por secuencia negativa $V-$ aumenta de valor (Fig.7.4), provocando un distanciamiento entre las tensiones de red (Fig.7.5).

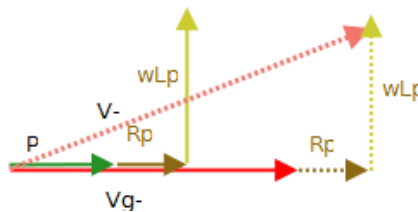


Fig.7.4. Representación fasorial Inyección de **Potencia_{activa}** por secuencia negativa

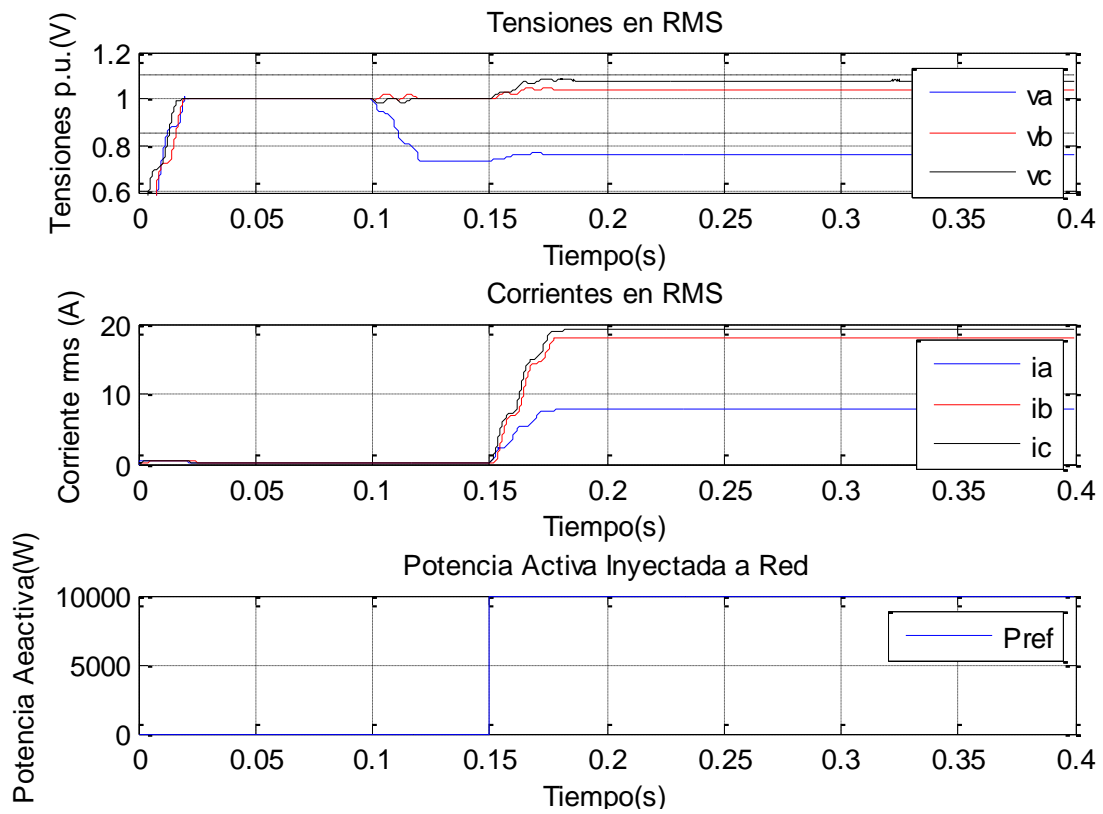


Fig.7.5. Efecto de la inyección de potencia activa en las tensiones con $k_p^+=0$ y $k_p^-=1$

Inyectar potencia activa por secuencia negativa no nos conviene ya que su efecto sobre las tensiones de red es de distanciarlas, perjudicando aún más el hueco de tensión.

7.2.1.3. Absorción de $Potencia_{activa}$ por secuencia negativa

Una vez comprobado que inyectar potencia activa por secuencia negativa no tiene efectos satisfactorios, hemos probado de absorberla. Esto supone que V^- será de menor valor, comparado (Fig.7.4-7.6), plasmando este efecto sobre las tensiones no perjudica el hueco de tensión, pero tampoco lo mejora, comparado (Fig.7.5-7.7).

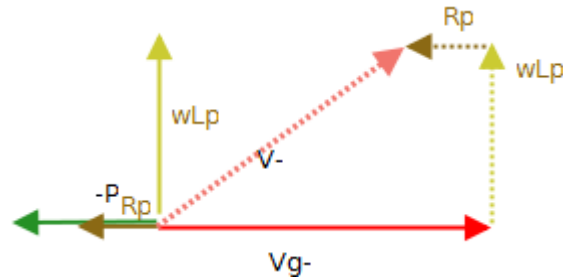


Fig.7.6. Representación fasorial Absorción de $Potencia_{activa}$ por secuencia negativa

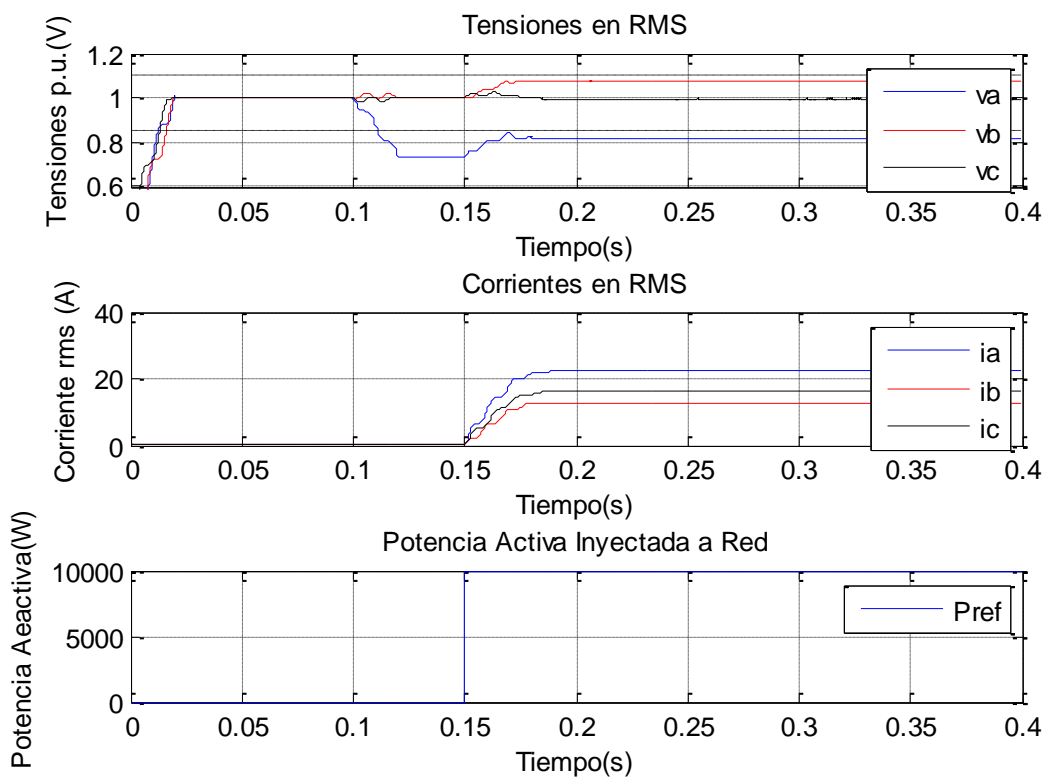


Fig.7.7. Efecto de la inyección de potencia activa en las tensiones con $k_p^+=0$ y $k_p^-=-1$

7.2.2. Efecto de la potencia reactiva en una impedancia de red de 60°

En el apartado 7.2.1 hemos observado que la inyección de la potencia activa ya sea por secuencia positiva o negativa no tiene un efecto significativo sobre las fases de la red eléctrica, por lo que ahora inyectaremos la potencia reactiva por estas secuencias.

7.2.2.1. Inyección de Potencia_{reactiva} por secuencia positiva

Como ya hemos comentado anteriormente, este tipo de inyección influirá más sobre las fases de la red, ya que en nuestra impedancia predomina más la inductancia y como consecuencia el vector de V^+ aumenta más que en el apartado 7.2.1.2 (Fig.7.4 y Fig.7.8). El vector de V^+ al ser más grande quiere decir que la capacidad de levantar las tensiones en la red será mayor. (Fig.7.9)

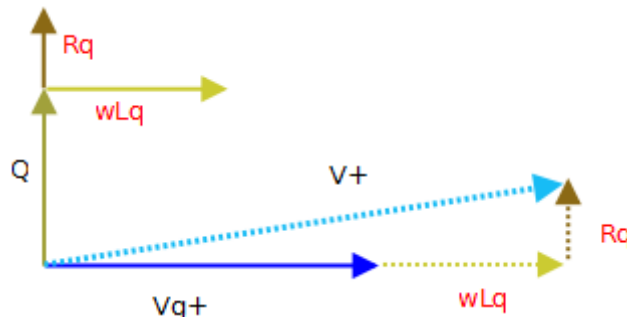


Fig.7.8. Representación fasorial inyección de **Potencia_{Reactiva}** por secuencia positiva

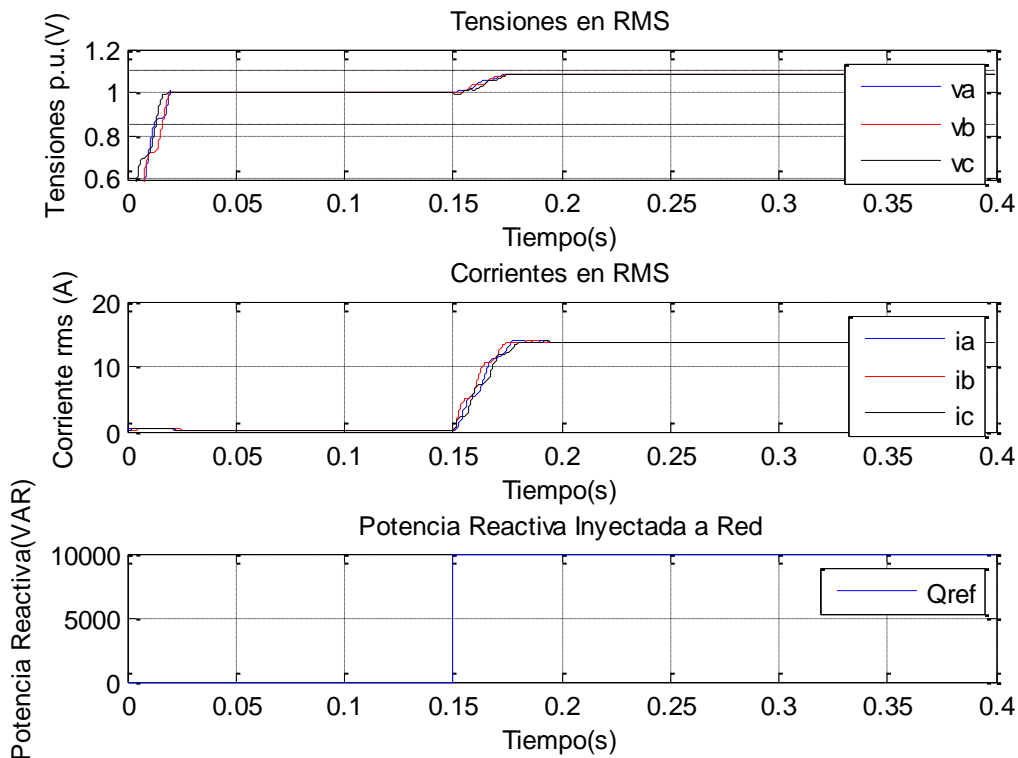


Fig.7.9. Efecto de la inyección de potencia reactiva en las tensiones con $kq^+=1$ y $kq^-=0$

7.2.2.2. Inyección de Potencia reactiva por secuencia negativa

Al inyectar potencia reactiva por esta secuencia observamos que la V_- tiende a disminuir mucho más, teniendo así un efecto muy positivo sobre las fases de red.(Fig.7.10). Al comparar este vector con la absorción de potencia activa en el apartado 7.2.1.3 observamos que el vector V_- es más pequeño en esta última (comparar Fig.7.6 y Fig.7.10) y conseguimos que las tensiones se junten más (comparar Fig.7.11).

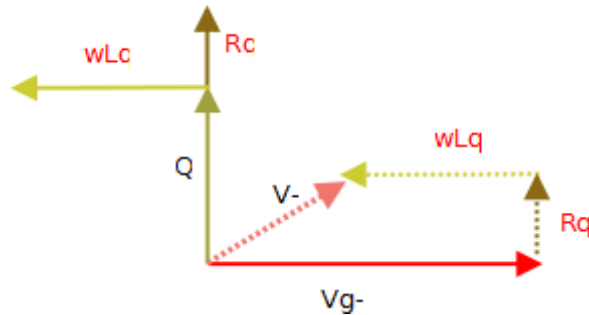


Fig.7.10. Representación fasorial inyección de **Potencia Reactiva** por secuencia negativa.

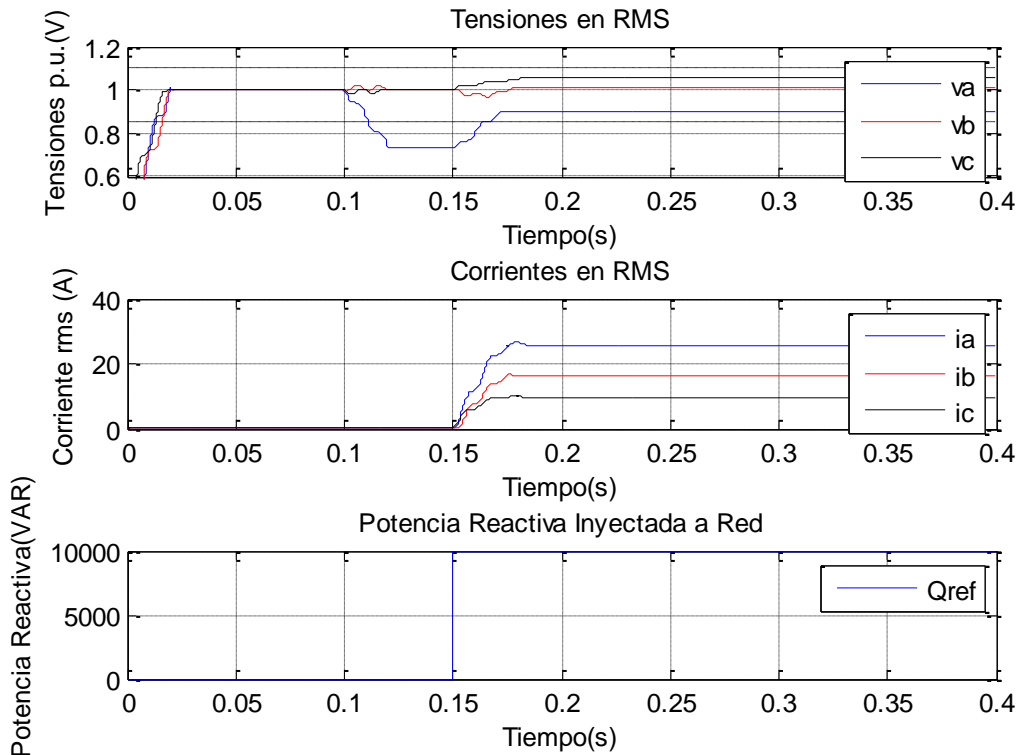


Fig.7.11. Efecto de la inyección de potencia reactiva en las tensiones $kq^+=0$ y $kq^-=1$

7.2.3. Efecto de la potencia activa y reactiva en una impedancia de red de 60°

Una vez conocido el efecto que tiene la potencia activa y reactiva por separado sobre las tensiones, ahora queremos observar el efecto que estas tienen al combinarlas.

7.2.3.1. Inyección de Potencia activa y Potencia reactiva por secuencia positiva

Al inyectar ambas potencias al mismo tiempo, observamos que el efecto que tiene las potencias por separado se suman y conseguimos un mayor aumento de la V^+ (Fig.7.12) y esto provoca en las tensiones de red un mayor aumento. (Comparar Fig.7.3-7.9-7.13)

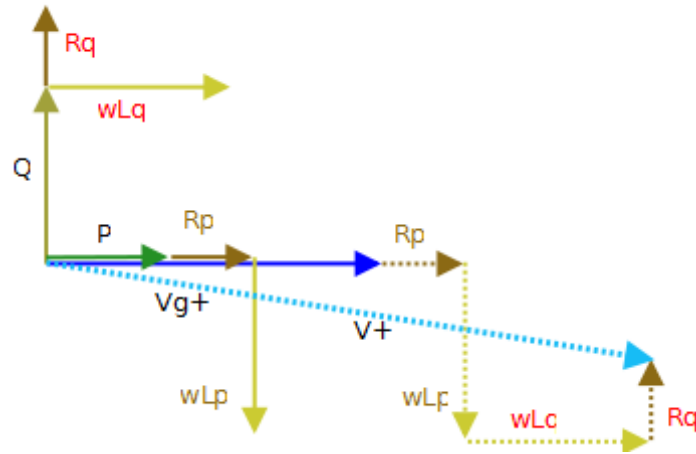


Fig.7.12. Efecto de la inyección de potencia activa-reactiva en las tensiones

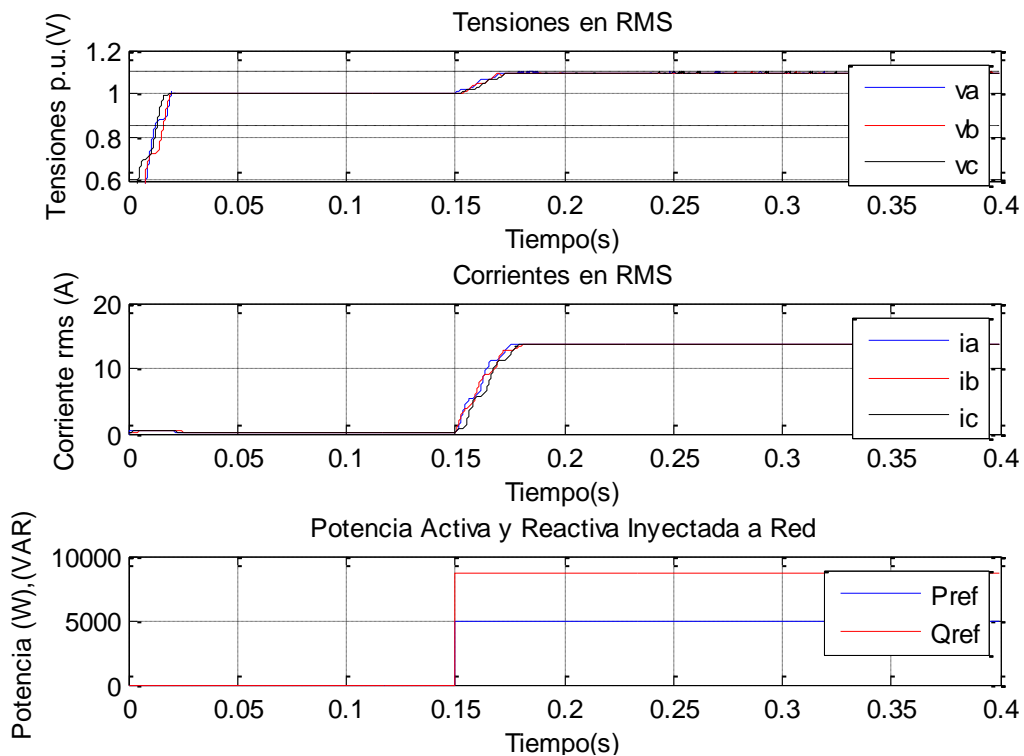


Fig.7.13. Efecto de la inyección de potencia activa-reactiva en las tensiones $k_p^+=1$, $k_p^-=0$ y $k_q^+=1$, $k_q^-=0$

7.2.3.2. Absorción de Potencia_{activa} e Inyección de Potencia_{reactiva} por secuencia negativa.

Juntando el efecto de absorber la potencia activa e inyectando la potencia reactiva la capacidad de disminuir la V- es mayor que si actúan por separado (Fig.7.14) y el efecto de juntar las tensiones es mayor que las anteriores. (Comparar Fig.7.7-7.11-7.15).

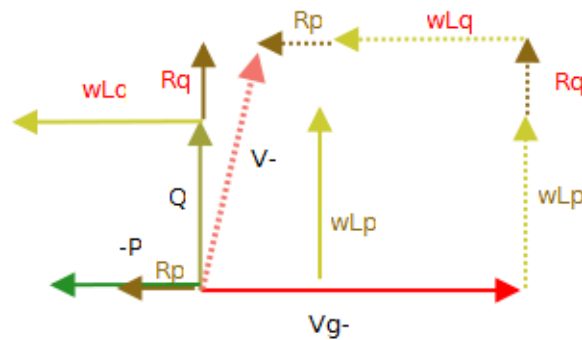


Fig.7.14. Absorción de Potencia_{activa} e Inyección de Potencia_{reactiva} por secuencia negativa.

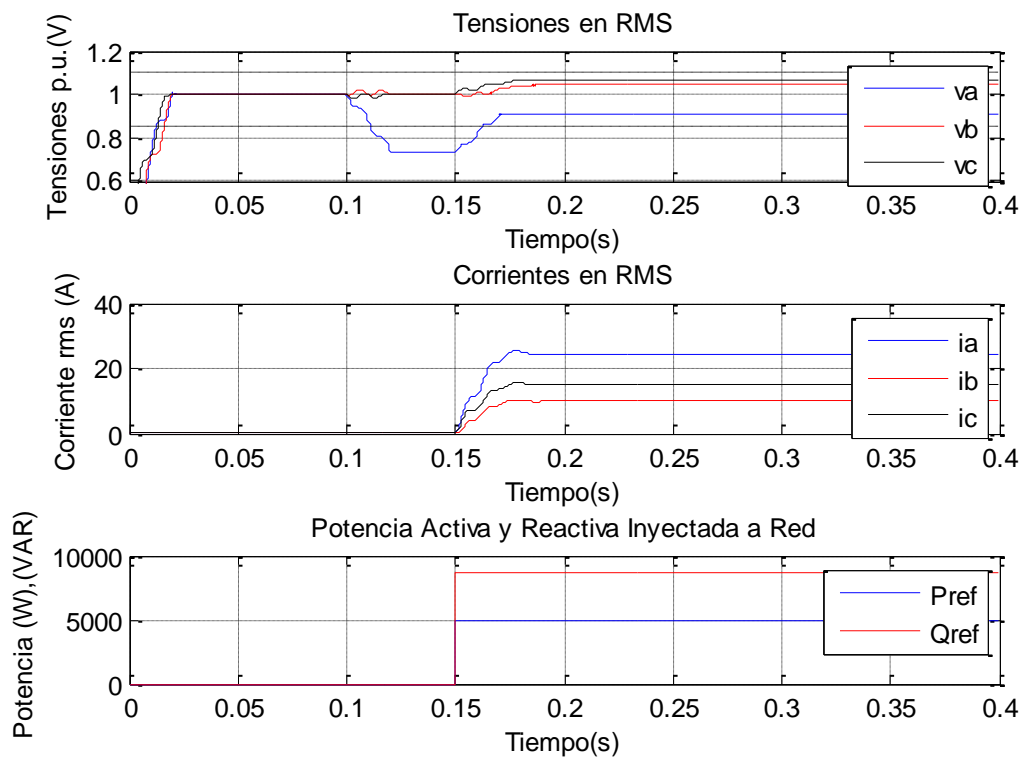


Fig.7.15. Efecto de la Absorción de Potencia_{activa} e Inyección de Potencia_{reactiva} por secuencia negativa $k_p^+=0$, $k_p^-=1$ y $k_q^+=0$, $k_q^-=1$

7.3. Relación φ impedancia de red- φ inyección

En el presente apartado trataremos de demostrar que existe una relación entre φ impedancia de red - φ inyección de potencia, para obtener corriente mínima. De este modo, si estamos trabajando con un ángulo de la impedancia de 60° , la inyección de potencia para que la corriente sea mínima deberá de ser también 60° .

El módulo de la impedancia de red viene determinado por los valores de la resistencia y la inductancia (16). A partir del módulo obtendremos el ángulo de la impedancia de red (14). Véase (Fig.7.16)

$$Z = \sqrt{R^2 + j \cdot \omega L^2} \quad (15)$$

$$\varphi_Z = \text{tg}^{-1} \cdot \frac{\omega L}{R} \quad (14)$$

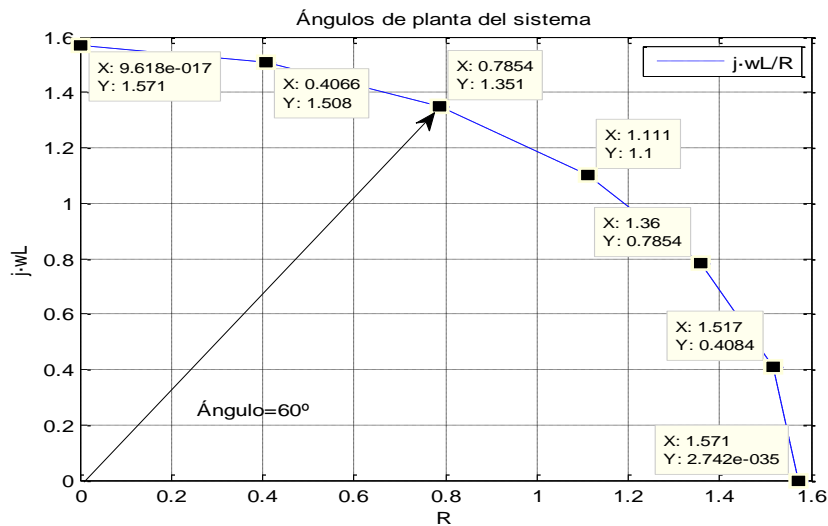


Fig.7.16. Ángulo y módulo de la impedancia de la red

Con la potencia sucede lo mismo (17) y (15). Véase (Fig.7.17)

$$S = \sqrt{P^2 + j \cdot Q^2} \quad (17)$$

$$\varphi_S = \text{tg}^{-1} \cdot \frac{Q}{P} \quad (15)$$

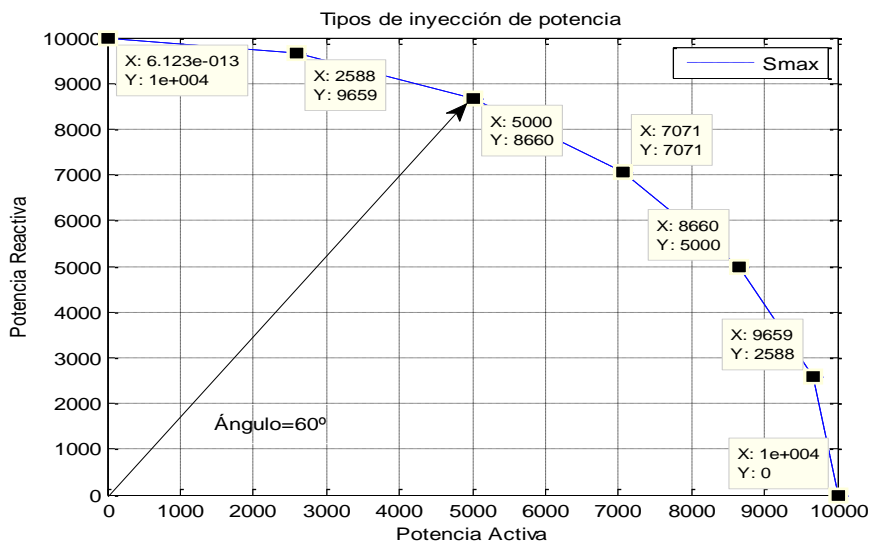


Fig.7.17. Ángulo y módulo de la potencia inyectada

Basándonos en esta suposición, igualaremos los ángulos de la impedancia de red y de la potencia (18) y así podremos determinar el módulo de inyección de potencias más óptimo.

$$\varphi_Z = \varphi_S \quad (18)$$

Para visualizar la suposición anterior hemos realizado un barrido de ángulos de potencia para nuestra impedancia de red (60°). Y así comprobar que ángulo de inyección es óptimo.

Para cada ángulo de inyección de potencia guardamos el valor medio comprendido en el recuadro rojo de la (Fig.7.18) de las tensiones de red y sus respectivas corrientes, cuando el Sag se encuentra en periodo estacionario.

En la Fig.7.19 tenemos un barrido de ángulos de inyección de potencia de $0^\circ \rightarrow 90^\circ$. Observamos que en el margen de $0^\circ \rightarrow 30^\circ$ y $75^\circ \rightarrow 90^\circ$ no conseguimos solventar el Sag. Es decir las tensiones están fuera del rango permitido, ahora bien en la región de $30^\circ \rightarrow 75^\circ$ si que solventamos el Sag y para comprobar con que ángulo de inyección de potencia obtenemos la menor corriente, se ha representado la Fig.7.20. Hay que considerar que de la Fig.7.20 tenemos 3 corrientes y estamos interesados únicamente con la corriente de mayor valor en cada punto de simulación, y nuestro objetivo es encontrar la combinación donde la corriente sea mínima.

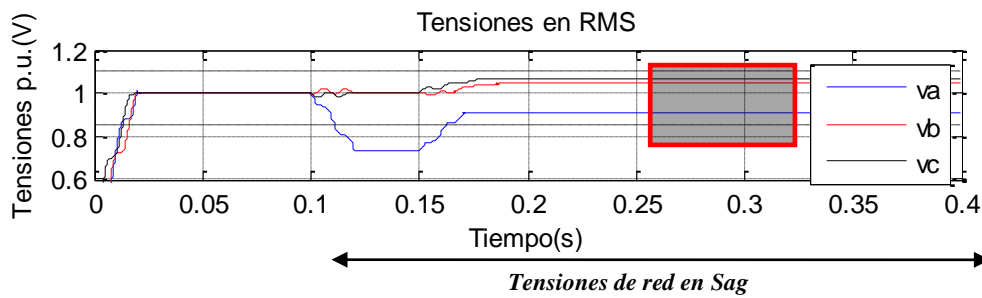


Fig.7.18. Lectura del rango de valores del barrido

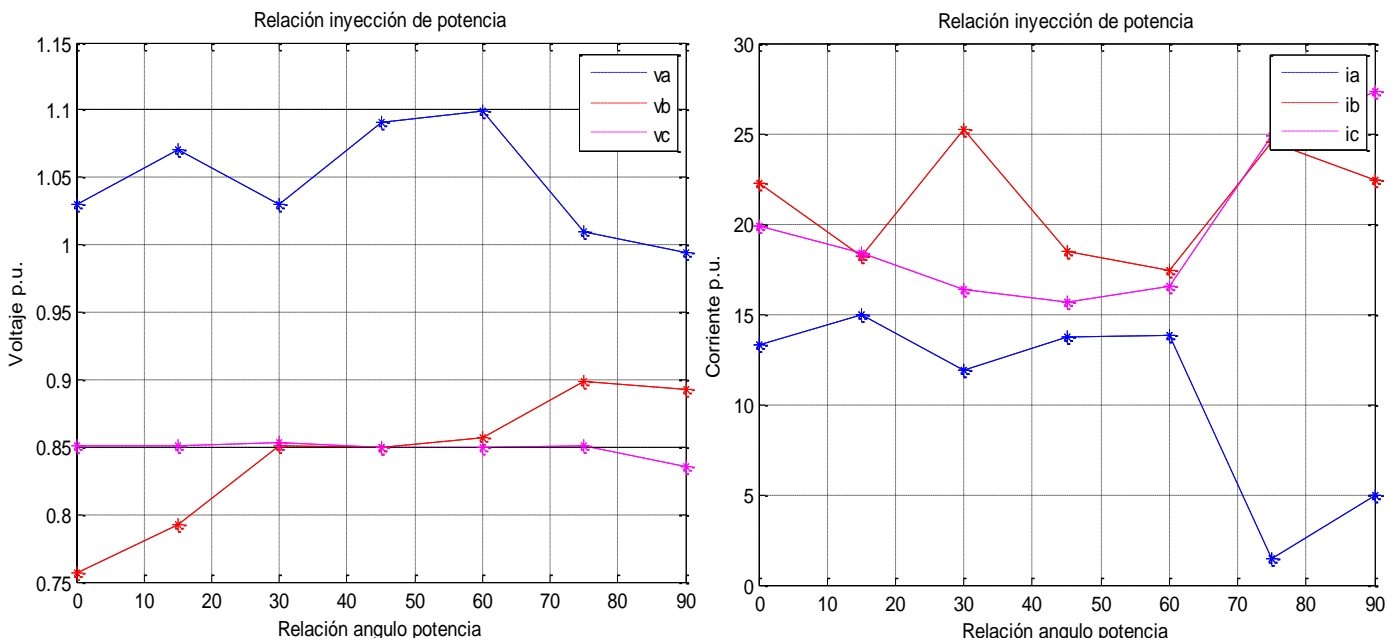


Fig.7.19-7.20. Barrido de ángulos de inyección de potencia de $0^\circ \rightarrow 90^\circ$ y Lectura de corrientes de cada ángulo de inyección de potencia

7.4. Conclusiones

Al finalizar este apartado prácticamente conocemos los diferentes efectos que producen las inyecciones de potencia activa y reactiva tanto por la secuencia positiva como negativa en la impedancia de la red.

Con nuestra impedancia altamente inductiva el efecto sobre las tensiones de red cuando inyectamos potencia activa es insignificante, por otro lado si solo inyectamos potencia reactiva observamos que el efecto es más notorio. Ahora bien combinado la potencia activa y reactiva a la vez conseguimos el mayor efecto sobre las tensiones tanto al querer levantarlas como al juntarlas. Levantar conlleva a inyectar la combinación de potencias por secuencia positiva $k_p^+ = 1$, $k_q^+ = 1$ y $k_p^- = 0$, $k_q^- = 0$, pero al querer juntar las tensiones de red llegamos a la conclusión que inyectar potencia activa por secuencia negativa tiene un efecto negativo sobre las tensiones de red, ya que las separa véase en (Fig.7.5), entonces concluimos que la potencia activa no la tenemos que inyectar sino que absorber, esto lo conseguimos del siguiente modo $k_p^+ = 0$, $k_p^- = -1$, por otro lado con la potencia reactiva inyectada por secuencia negativa el efecto de juntar las fases lo realiza satisfactoriamente. Al combinar las dos estrategias conjuntas $k_p^+ = 0$, $k_q^+ = 0$ y $k_p^- = -1$, $k_q^- = 1$ conseguimos juntar las fases véase en (Fig.7.15).

Para finalizar con el apartado de estrategias de inyección, hemos realizado un barrido de inyecciones de potencia con las diferentes estrategias (levantar y juntar), para poder encontrar la cantidad exacta de inyección de potencia tanto activa como reactiva para poder solventar el hueco de tensión, pero que además para que la inyección de potencias sea óptima, ésta deberá de producir la mínima corriente para solventar el hueco.

Al observar los resultados a partir de nuestra suposición (18) con las Fig.7.19-7.20 la podemos corroborar, es decir, que dependiendo del φ de la inductancia de la red, para conseguir una inyección de potencia óptima, es decir conseguir la mínima corriente, ésta deberá de ser el mismo φ .

8. Algoritmo de control

En este capítulo pretendemos realizar un algoritmo en lazo cerrado que sea capaz de actuar para solventar los diferentes tipos de huecos de tensión mediante las estrategias de inyección detalladas en el capítulo anterior.

8.1. Introducción

En el apartado anterior hemos visto las diferentes estrategias de inyección que podemos contemplar cuando tenemos la red en fallo. El algoritmo creado se puede adaptar fácilmente a las diversas condiciones de hueco, predeterminadas en el apartado 5. Es totalmente flexible y, en cada situación, se adapta para entregar la potencia necesaria para solventar el fallo de red, y seguir conectado a la red eléctrica. Además el algoritmo también proporcionará a las ecuaciones de control dos parámetros que determinan porque secuencia inyectaremos la potencia. Por lo tanto nuestro algoritmo busca la mejor combinación de las ecuaciones (19), (20) y (21), para solventar el fallo de red.

$$S = \sqrt{P^2 + j \cdot Q^2} \quad (19)$$

$$Kp^+ = Kp \quad Kp^- = -(1 - Kp) \quad (20)$$

$$Kq^+ = Kq \quad Kq^- = (1 - Kq) \quad (21)$$

En la Fig.8.1 tenemos el esquema que representa nuestro sistema.

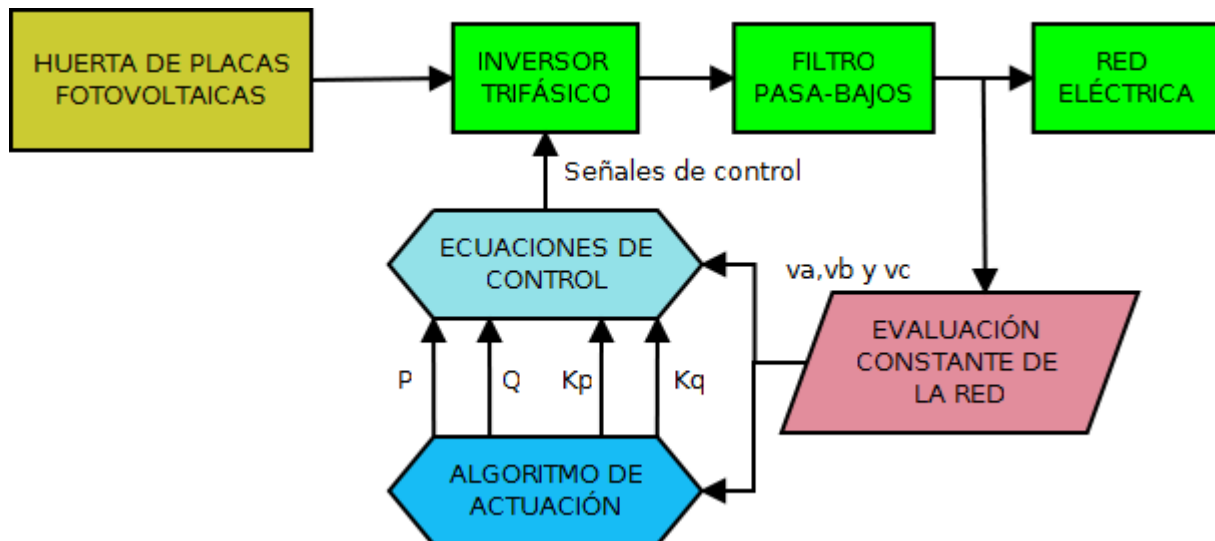


Fig.8.1. Esquema de bloques del sistema

Básicamente, nuestro algoritmo está constantemente evaluando las tensiones y comprobando su estado. Si están en condiciones normales no actuará; pero si están hueco, buscará la mejor solución posible.

8.2. Detección tanto de inicio como finalización del fallo en la red.

En el apartado anterior, comentamos que el algoritmo está constantemente evaluando las tensiones de red. De estas tensiones mediante la transformada de Clarke [3] conocemos la secuencia positiva y negativa. Hablando en valores *p.u.* interesa que la secuencia positiva sea igual a 1 y la secuencia negativa igual a 0. Si las secuencias se encuentran en estos valores el algoritmo no detecta fallo en la red, pero si la secuencia

positiva es inferior a 0.85 p.u. y la secuencia negativa es superior a 0.05 p.u. el algoritmo actúa porque detecta fallo en la red.

Los valores límites para determinar si existe hueco de tensión son los establecidos en la normativa [5]. Al conocer la existencia del hueco de tensión evaluaremos las tensiones, la máxima con el límite superior, y la mínima con el límite inferior para detectar que tipo de fallo padecemos.

Cuando detectamos un fallo en la red necesitamos que el algoritmo actúe. Cuando el fallo desaparece, el sistema debe volver a las condiciones normales de trabajo (Fig.8.2).

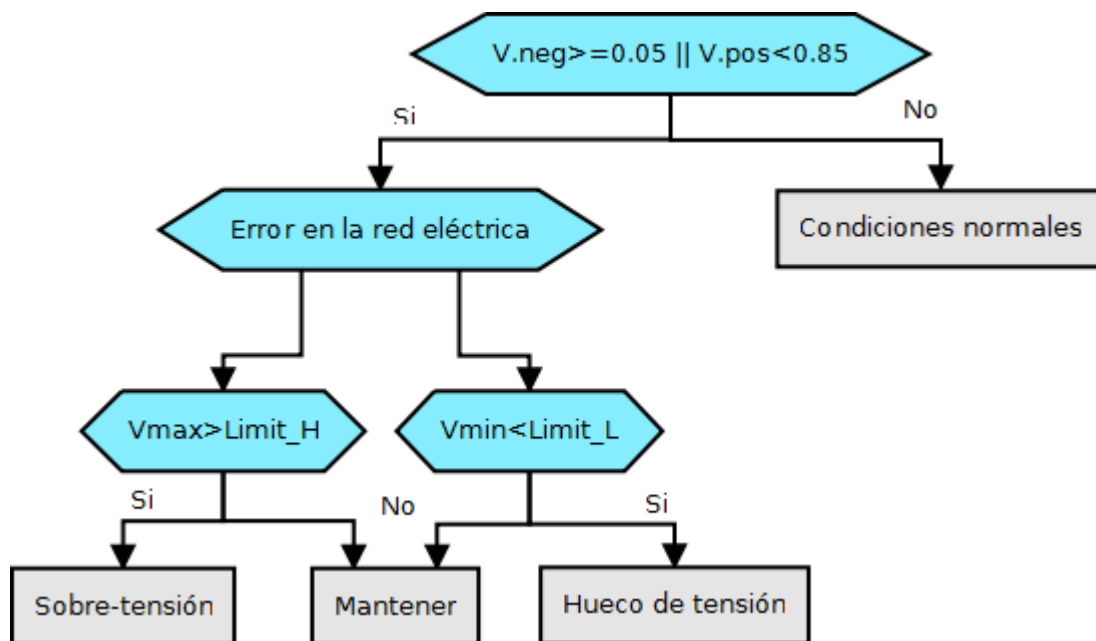


Fig.8.2. Detección tanto de inicio como finalización del fallo en la red

8.3. Corrección del fallo de la red

Una vez detectado el fallo en la red, el algoritmo actuará conforme las circunstancias del fallo. Deberá de caracterizarlo para poderlo tratar adecuadamente, ya que dependiendo del tipo de fallo el algoritmo deberá de actuar de un modo u otro.

El algoritmo tiene un proceso cíclico, constantemente está trabajando on-line para conocer el estado de la red, y si esta sufre una anomalía actuar al respecto para que el sistema pueda volver a las condiciones normales lo más rápido posible.

El algoritmo cuenta con tres ajustes, empezando desde un primer ajuste más genérico, hasta un tercer ajuste que busca conseguir el comportamiento óptimo del sistema (Fig.8.3).

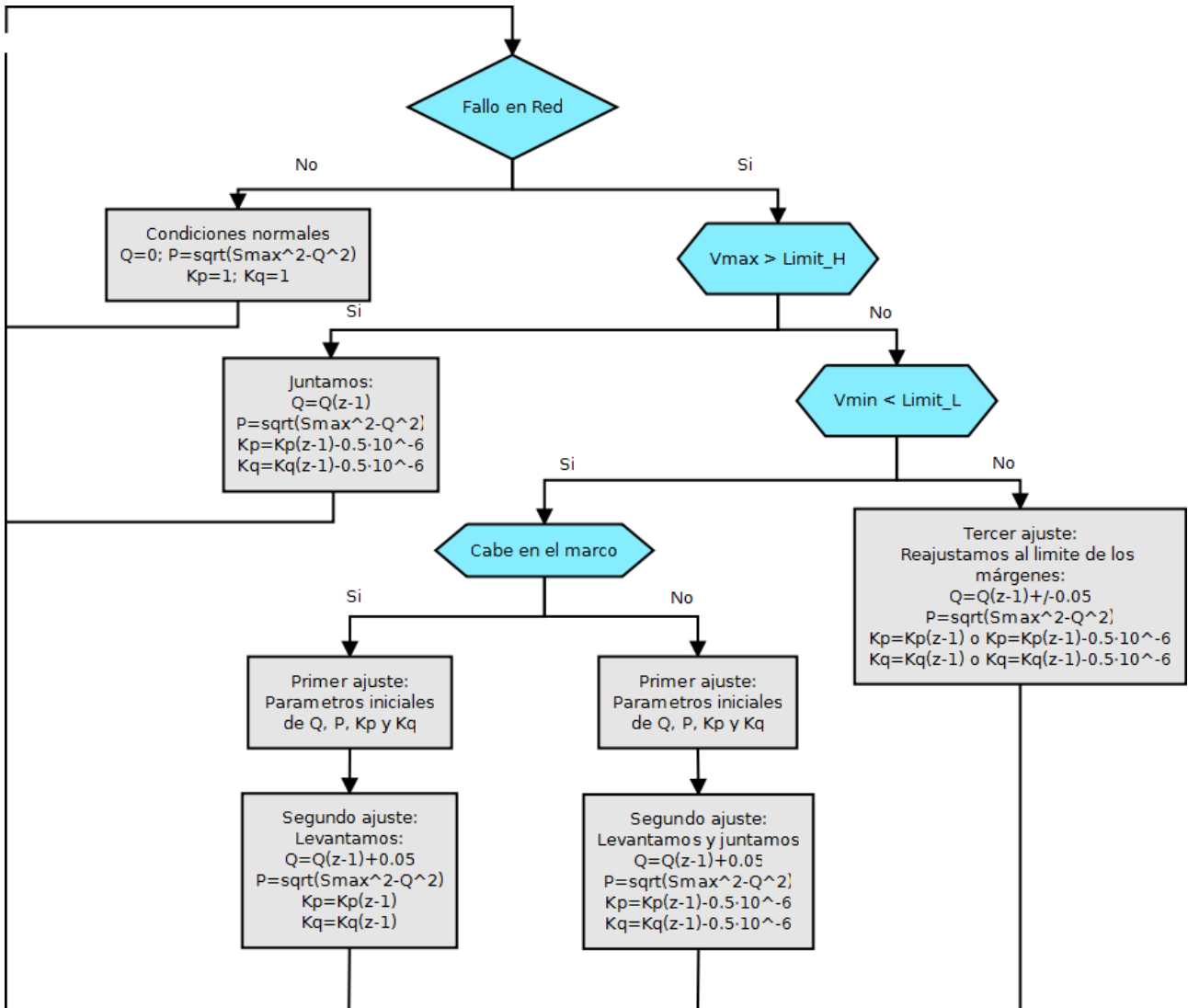


Fig.8.3. Algoritmo propuesto

El sistema cuando está en condiciones normales, sin fallos en la red, proporciona toda la potencia activa que puede generar a la red, pero cuando existe el fallo en la red, el algoritmo debe de conocer constantemente los valores de dos de las tres tensiones, la máxima y la mínima. Las dos son muy importantes, ya que si solo considerásemos la fase con el valor mínimo, muy probablemente corregiríamos el hueco de tensión, pero ocasionaríamos una sobre-tensión, es decir solucionaríamos un fallo de red, pero crearíamos otro.

Por lo tanto cuando la tensión máxima empieza a sobrepasar el margen superior, el algoritmo actúa del siguiente modo; primero de todo mantiene los valores tanto de la potencia activa como la reactiva, siguiendo la ecuación (22) y (23). Además Kp y Kq , van decrementando su valor siguiendo las ecuaciones (24) y (25).

$$Q = Q(z - 1) \quad (22)$$

$$P = \sqrt{S_{max}^2 - Q^2} \quad (23)$$

$$Kp = Kp(z - 1) - 0.5 \cdot 10^{-6} \quad (24)$$

$$Kq = Kq(z - 1) - 0.5 \cdot 10^{-6} \quad (25)$$

Primero evalúa la separación que hay entre la tensión máxima y la mínima. Si esta diferencia es más pequeña que la distancia entre los márgenes superior e inferior, consideramos que levantado las tensiones solucionamos el fallo de red. Por otro lado, si la diferencia es superior, no bastará el simple hecho de levantar las tensiones, sino que también deberemos de ir juntándolas hasta que la diferencia entre la tensión máxima y la mínima sea igual o inferior a la distancia entre los márgenes.

Explicado el problema de la sobre-tensión ahora procederemos a detallar cada uno de los tres sistemas de ajuste que posee el algoritmo.

8.3.1. Primer ajuste en la corrección del hueco de tensión

En la Fig.8.4, tenemos el primero de los tres ajustes que realiza el algoritmo.

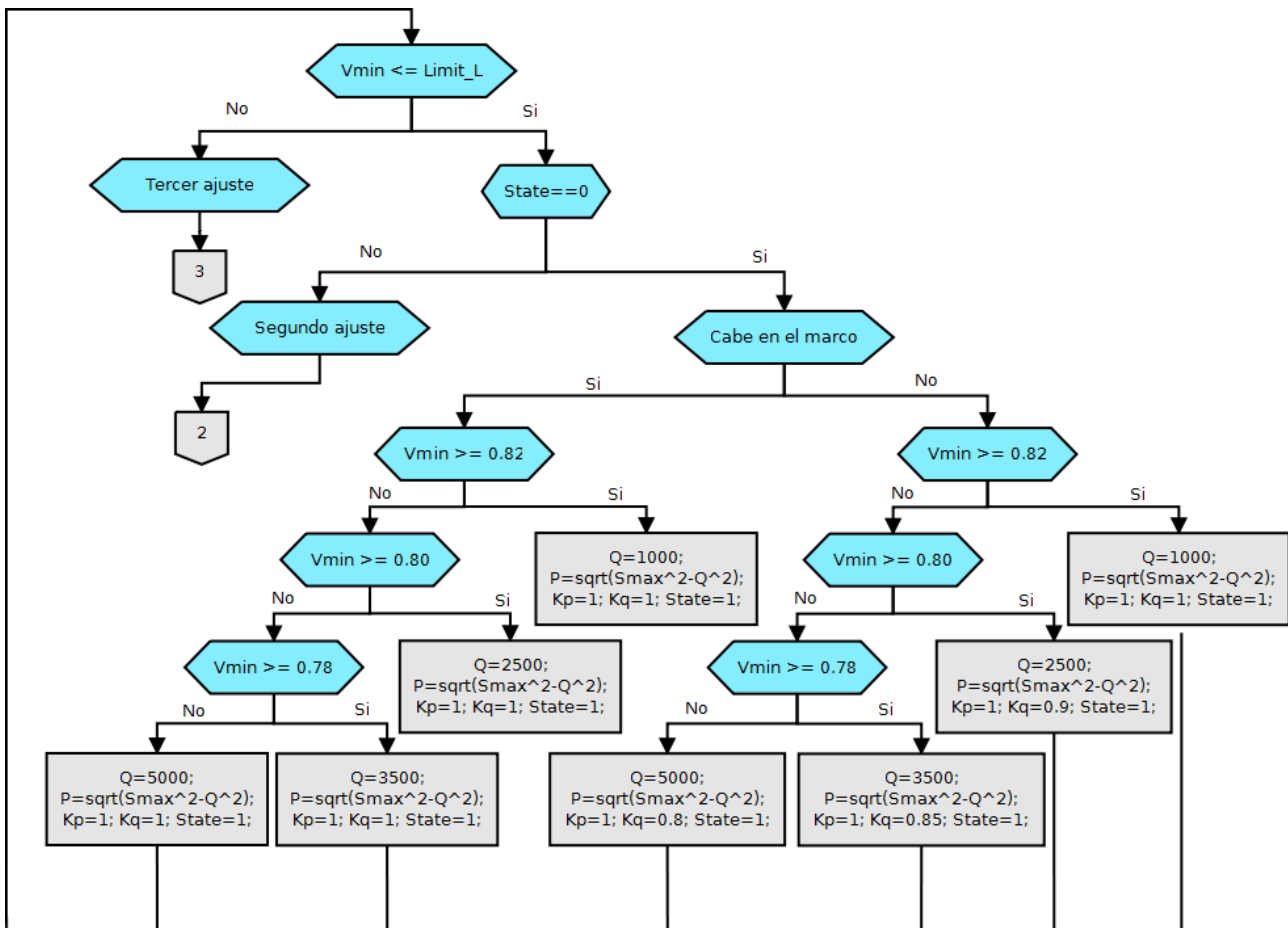


Fig.8.4. Primer ajuste del algoritmo

El algoritmo cuando detecta que una o más tensiones están por debajo del margen inferior, procede a evaluar el estado de estas tensiones.

La función del primer ajuste es caracterizar el tipo de fallo, dependiendo de la profundidad y de la separación de las tensiones.

El primer paso es comprobar si las tensiones caben o no dentro del marco. Para evaluar ésta cuestión, requiere conocer los valores de la tensión máxima y de la mínima, y concretar si la diferencia de estas es inferior o superior al marco.

Una vez determinado el primer paso, dependiendo de la profundidad del fallo, implantará unos parámetros iniciales para poder acelerar el procedimiento de actuación del algoritmo.

Hay que tener en cuenta que en el primer ajuste, solo se ejecutará una vez para caracterizar el tipo de fallo que padecemos en la impedancia de la red. Para ello se ha definido la variable *state* en el algoritmo de la Fig.8.4. Una vez se ejecuta el primer ajuste, *state* se pone a 1 y no vuelve a ejecutarse.

8.3.2. Segundo ajuste para entrar tensiones en márgenes

En la Fig.8.5, tenemos el segundo de los tres ajustes que realiza el algoritmo.

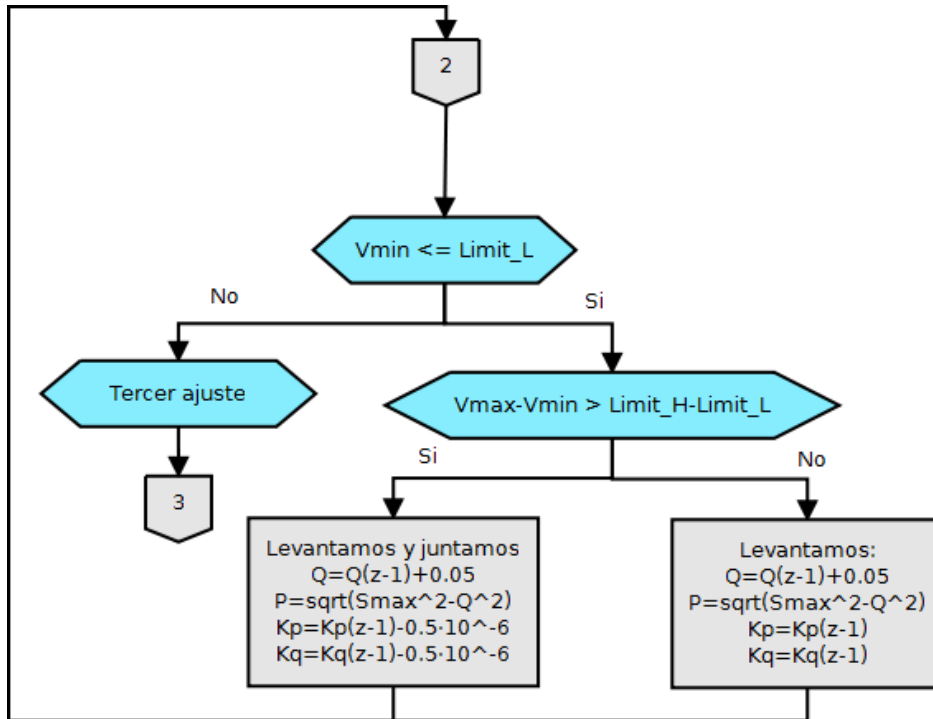


Fig.8.5. Segundo ajuste del algoritmo

Una vez realizado el primer ajuste procederemos con el segundo ajuste.

En esta fase el algoritmo ya conoce las características del fallo con lo que reducimos las formas de actuar.

Si las tensiones caben en el marco, el sistema solo tiene que levantarlas. Esto lo hace del siguiente modo, para empezar los parámetros de control Kp y Kq , los realimentamos con el valor escogido en el primer ajuste ecuación (26) y (27). Por otro lado, la potencia reactiva aumentará según (28), hasta que consigamos superar o igualar la tensión mínima con el margen inferior.

$$Kp = Kp(z - 1) \quad [26]$$

$$Kq = Kq(z - 1) \quad [27]$$

$$Q = Q(z - 1) + 0.05 \quad [28]$$

Si en su defecto las tensiones no caben en el marco el sistema no solo debe levantar si no que también las debe de ir juntando para que las tensiones no superen el margen superior. Los parámetros Kp y Kq irán decrementando lentamente según (24) y (25). La actuación de las potencias será la misma que si las tensiones caben en el marco (28) y (23).

8.3.3. Tercer ajuste: búsqueda de la mínima corriente posible

Una vez tengamos las tensiones dentro del marco, efectuaremos un tercer ajuste definitivo. En este apartado el algoritmo buscará la mejor combinación posible tanto de la potencia como los parámetros de control Kp y Kq (Fig.8.6).

Su objetivo principal es encontrar la mejor combinación, es decir, la menor corriente.

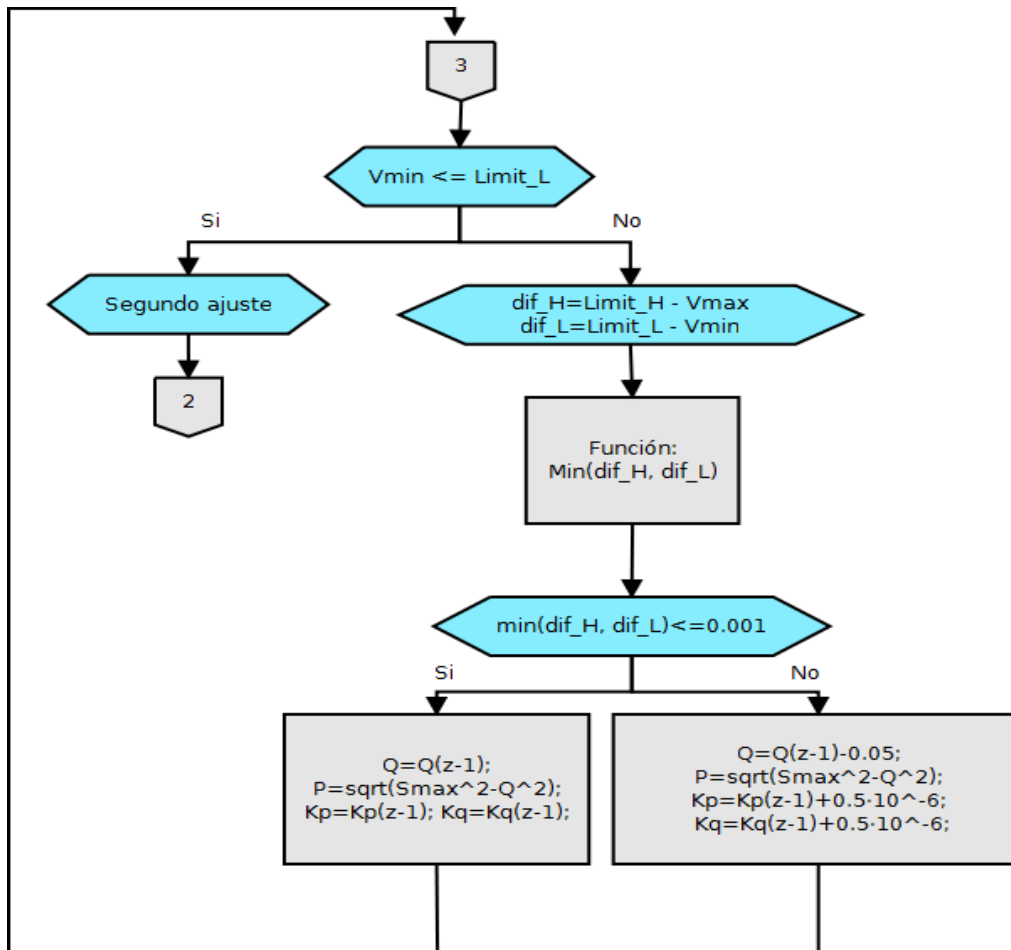


Fig.8.6. Tercer ajuste del algoritmo

Finalmente en el tercer ajuste realizaremos una optimización del segundo ajuste. Ya que el algoritmo tiene un retardo en su actuación, a causa del retardo normalmente los valores de los parámetros no son del todo óptimos. Conseguimos solucionar el fallo de red, pero la corriente no es la óptima.

Para que la corriente sea mínima dependeremos de dos factores:

- La potencia reactiva .
- Los parámetros Kp y Kq .

Una vez conocidos los factores procedemos a evaluar y actuar.

Primero de todo el algoritmo tiene que conocer la diferencia entre la tensión máxima con el margen superior y la que hay entre la tensión mínima con el margen inferior. Una vez conocidas las diferencias

compararemos cual de las dos es más pequeña, esta diferencia será el margen que tenemos para poder separar las tensiones.

Lo conseguimos decrementando la cantidad de potencia reactiva y aumentando los valores de los parámetros de control (Solo si levantamos y juntamos) ecuaciones (29), (30), (31) y (23).

$$Kp = Kp(z - 1) + 0.5 \cdot 10^{-6} \quad (29)$$

$$Kq = Kq(z - 1) + 0.5 \cdot 10^{-6} \quad (30)$$

$$Q = Q(z - 1) - 0.05 \quad (31)$$

De este modo conseguimos que las tensiones estén lo mas separadas posibles, si eran mayores que el marco y si cabían en él, inyectamos la menor cantidad de potencia reactiva.

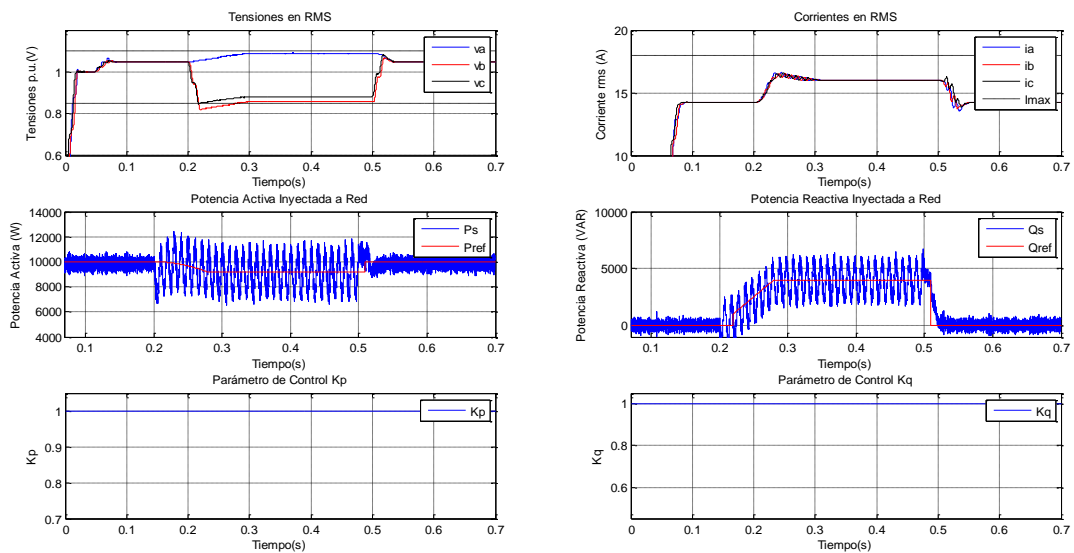


Fig.8.7. Funcionamiento del control cuando las tensiones caben dentro de los márgenes

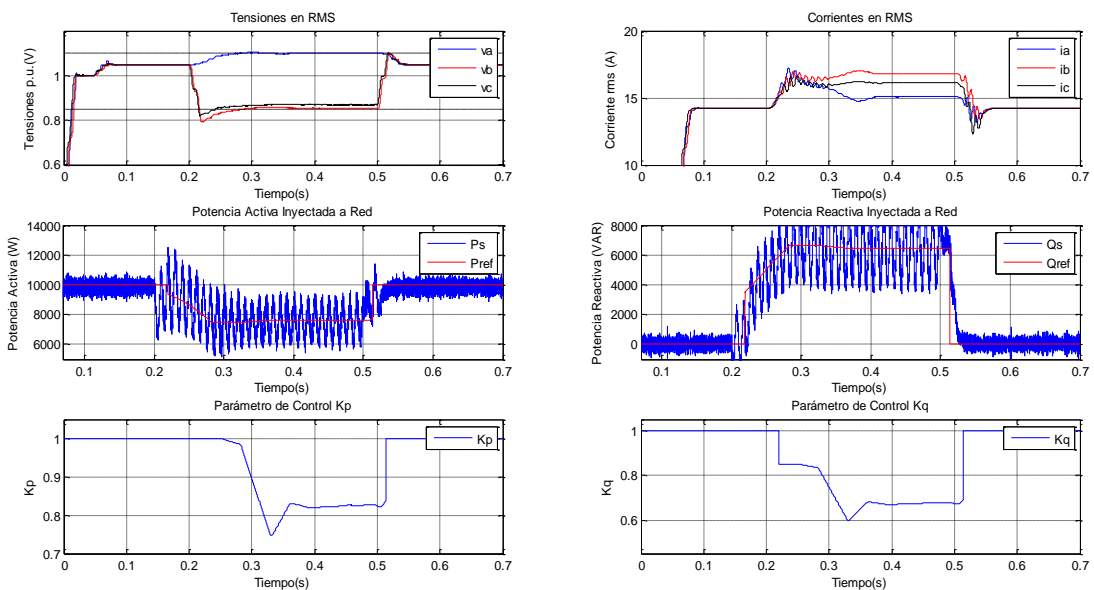


Fig.8.8. Funcionamiento del control cuando las tensiones no caben dentro de los márgenes

En las Fig.8.7-8.8 mostramos las formas de onda que ponen en manifiesto el correcto funcionamiento del algoritmo. En el capítulo 9, lo explicaremos detalladamente.

8.4. Actuación del control

Una vez caracterizado el fallo en la red, y el algoritmo ha determinado como actuar, este envía la información de cada uno de los cuatro parámetros a actuar al control convencional para que este actúe y corrija el problema.

El algoritmo envía la potencia activa y reactiva de referencia conjuntamente con los parámetros de control K_p y K_q , que se encargan de controlar la inyección por secuencia positiva y negativa, y así poder solventar el fallo de red, manteniendo las tensiones dentro de los márgenes establecidos.

8.5. Conclusiones

Una vez realizado el estudio teórico y conociendo que estrategias de inyección implementar en diferentes tipos de huecos de tensión para nuestra impedancia de red de 60° , se ha diseñado un algoritmo de control en lazo cerrado capaz de solventar la anomalía.

El algoritmo de control está constantemente evaluando el estado de las tensiones de la red eléctrica. Primero de todo detecta cuando aparece el hueco de tensión, esto lo hace fijándose en $V(+)$ y $V(-)$, existen dos posibilidades diferentes para detectar el hueco, una es que la $V(+)$ disminuya por debajo de 0.85 p.u. cuando el tipo de hueco es A y otra que la $V(-)$ aumente por encima de 0.05 cuando estos son C y D. Lo mismo pasa para detectar la desaparición del hueco.

El algoritmo cuenta con tres ajustes para actuar.

El primer ajuste solo se empleará una vez ya que su función es caracterizarlo dependiendo de la distancia entre la tensión máxima y mínima y dependiendo de la profundidad del hueco. Con este ajuste conseguimos acelerar la actuación del algoritmo inyectando una cierta cantidad de potencia reactiva, dependiendo de la profundidad, esta cantidad irá siendo mayor. La potencia activa tendrá el valor consecuente a la formula (23). Por otro lado los parámetros de control K_p y K_q también cogerán un valor inicial, si la diferencia entre la tensión máxima y la mínima es inferior al marco estos tendrán valor 1, estrategia para levantar las tensiones y si la diferencia entre las tensiones es mayor al marco, deberemos de utilizar la estrategia de levantar y juntar a la vez y los parámetros de control K_p y K_q tendrán un valor inferior a la unidad dependiendo de la distancia que estas tengan.

El segundo ajuste, actuará partiendo de la información que ha proporcionado el primero, es decir, dependiendo de la estrategia escogida: levantar o levantar y juntar. Si la estrategia es de levantar las tensiones, los parámetros de control K_p y K_q recibirán el valor proporcionado por el primer ajuste y lo mantendrán, por otro lado, la cantidad de potencia reactiva irá aumentando (como máximo hasta llegar a la potencia total de la huerta solar) hasta conseguir solventar el hueco de tensión. Y si la estrategia es levantar y juntar el algoritmo actuará de igual modo con la diferencia de que los parámetros de control K_p y K_q irán decrementando (como máximo hasta llegar a 0), hasta conseguir situar las tensiones dentro del marco.

Una vez solventado el hueco de tensión, entrará en funcionamiento el tercer ajuste, este ajuste buscará la mejor combinación de las cuatro variables a controlar (potencia activa, potencia reactiva, K_p y K_q) para conseguir la combinación que proporcione la menor corriente posible. Este ajuste lo hemos implementado porque el sistema tiene un retardo en la actuación y a veces los valores no son los adecuados, es decir, puede que estemos inyectando más cantidad de potencia reactiva o que las tensiones estén más juntas de lo necesario.

Podríamos decir que igualmente solventamos el hueco de tensión, pero no lo logramos con la mínima corriente posible. Entonces el algoritmo mediante el tercer ajuste actúa del siguiente modo, si ha utilizado la estrategia de levantar, el ajuste no entrará en acción ya que la corriente será mínima porque estamos

solventando el hueco con la cantidad justa de potencia reactiva, pero si la estrategia es levantar y juntar, y el algoritmo ha juntado demasiado las tensiones provocando un aumento innecesario de la corriente, la potencia reactiva irá decrementando lentamente y los parámetros de control K_p y K_q se reajustarán automáticamente para conseguir separar la tensión máxima y la mínima hasta que se encuentren justo en los límites del marco. Así logramos que la cantidad de inyección tanto de potencia activa como reactiva por secuencia negativa sea la justa y conseguir la solución con la mínima corriente posible. Hay que tener en cuenta que cuanto mayor sea el valor de inyección de potencias por secuencia negativa, la corriente será mayor. Por esto reajustamos los parámetros de control hasta que encuentre el valor justo y necesario de inyección de potencia por secuencia negativa.

Gracias a este último ajuste conseguimos alcanzar el objetivo más dificultoso de nuestro trabajo que era que nuestro algoritmo de control sea capaz de encontrar la combinación de los cuatro parámetros ya mencionados anteriormente para tener la mínima corriente posible.

9. Resultados

En este capítulo se demuestra el correcto funcionamiento de nuestro algoritmo, mediante un conjunto de simulaciones con diferentes circunstancias de hueco y la capacidad que tiene nuestro algoritmo para solventarlos.

En las siguientes gráficas, queremos demostrar el correcto funcionamiento del algoritmo. Para ello deberemos de observar cómo evolucionan las tensiones de red, las corrientes, las inyecciones de potencia activa y reactiva y los parámetros de control K_p y K_q en condiciones normales y cuando la red sufre un hueco de tensión.

En condiciones normales inyectaremos toda la potencia activa que nos proporciona la huerta solar ya que es la que facturamos. En condiciones de hueco intentaremos inyectar la menor cantidad de potencia reactiva para solventar el hueco y poder seguir vendiendo la máxima cantidad de potencia activa posible. La potencia máxima es de 10 KVA.

En todos los resultados hablaremos de la cantidad de inyección de potencia reactiva, la potencia activa vendrá dada por la relación de la ecuación (23).

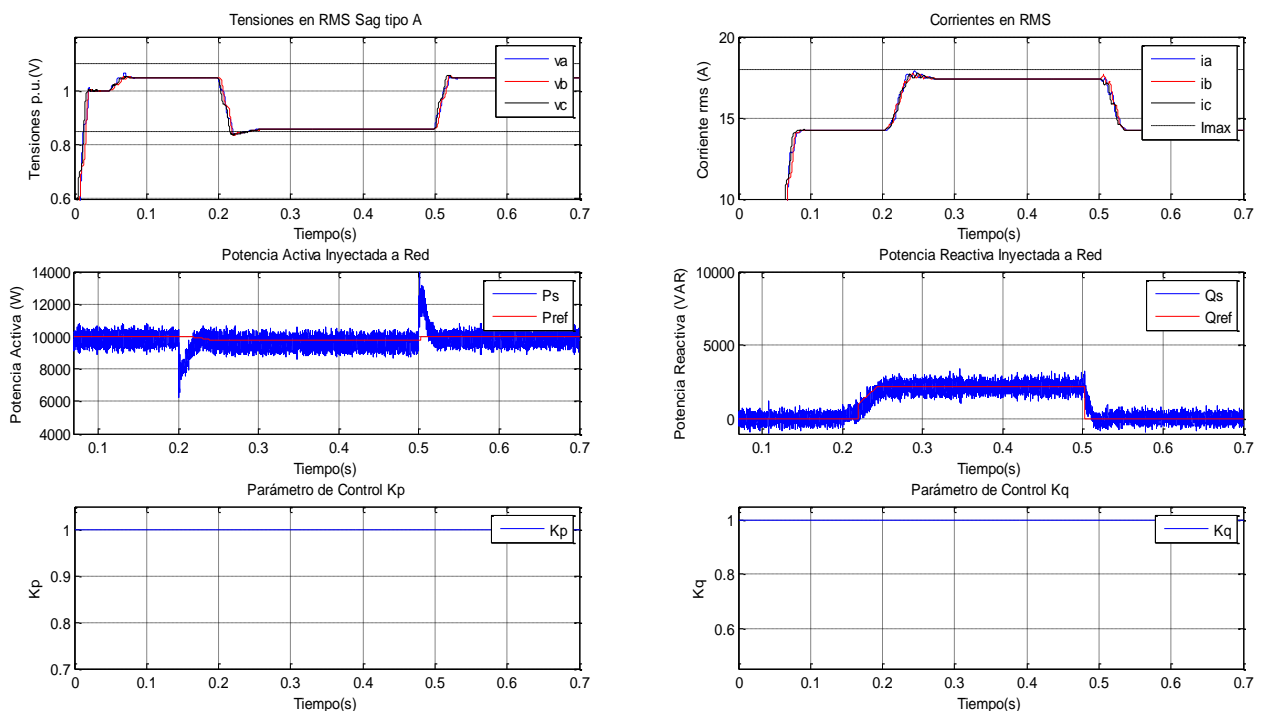
9.3. Hueco tipo A

Primero de todo, evaluaremos un hueco tipo A (caída de las tres fases juntas) a diferentes profundidades

9.3.1. Profundidades

9.3.1.1. Caída del 21%

En la figura 9.1 se aprecia una caída de las tres fases a una profundidad del 21%. Primero de todo tenemos de destacar que trabajando con una impedancia de red de 60° el simple hecho de vender potencia activa a la red ya provoca un incremento de las tensiones, tal y como demostramos en el capítulo 7, este incremento no nos provoca ningún inconveniente ya que las tensiones siguen permaneciendo dentro de los márgenes establecidos por la normativa [5].



Cuando el algoritmo detecta el hueco entrará en el primer ajuste y lo caracterizará. Dependiendo de la diferencia de tensión entre las fases y la profundidad actuará. Este tipo de hueco tiene las fases juntas por lo tanto solo tendremos que levantar las tensiones dejando las variables de control $Kp = 1$ y $Kq = 1$ y como la profundidad del hueco es leve inyectaremos una pequeña cantidad de potencia reactiva (1KVAR). Una vez realizado el primer ajuste, procederá a actuar el segundo ajuste incrementando la inyección de potencia reactiva hasta que las tensiones consigan entrar en el límite inferior del marco, una vez alcanzado o superado el límite inferior mantiene la inyección de las potencias hasta que el hueco desaparezca. Cuando los parámetros de control permanecen en su valor máximo ($Kp = 1$ y $Kq = 1$), el tercer ajuste no actuará, ya que la corriente será la óptima sin superar el límite del inversor, al inyectar las potencias por secuencia positiva.

9.3.1.2. Caída del 27%

En la figura 9.2 se aprecia una caída de las tres fases a una profundidad del 27%, la profundidad máxima que nuestro control puede solucionar con la capacidad de la huerta solar (10KVA).

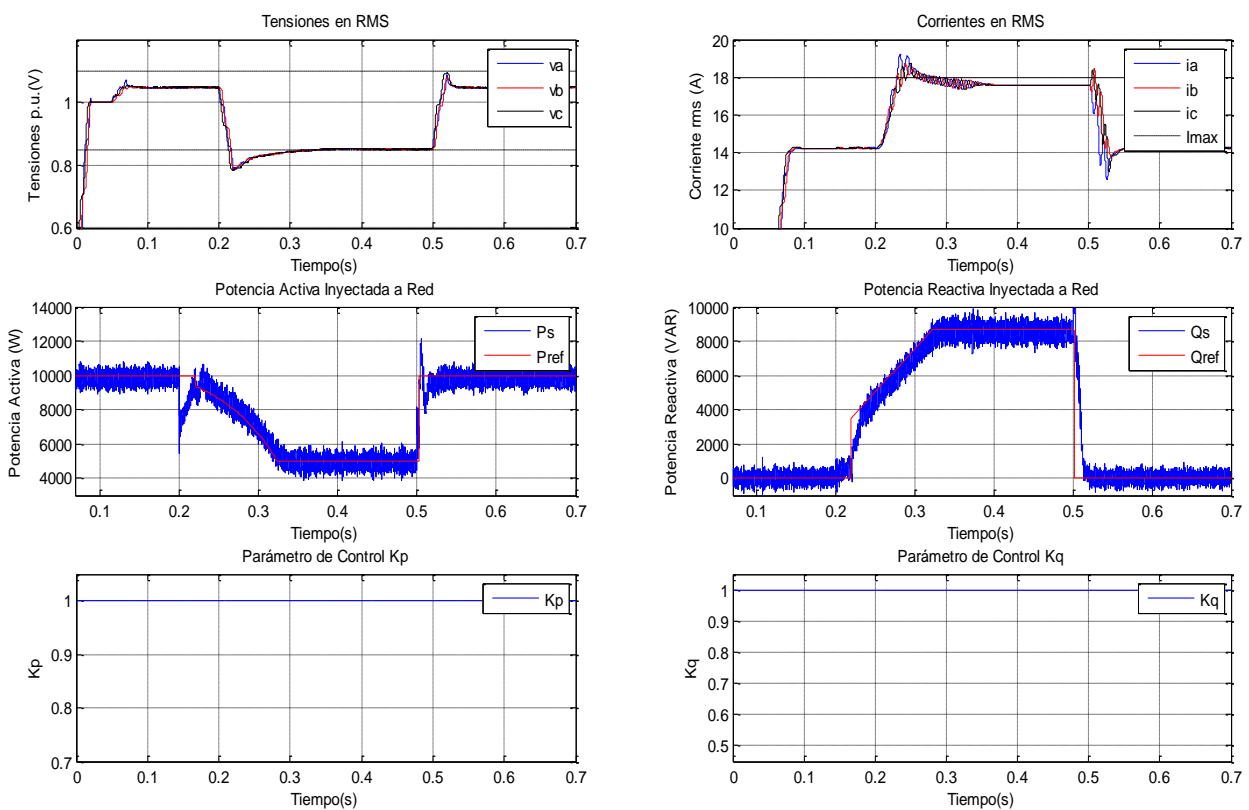


Fig.9.2. Hueco de tensión tipo A con caída del 27%

Observamos que presenta el mismo comportamiento que la Fig.9.1. La diferencia es que debido a la profundidad del hueco en el primer ajuste el algoritmo inyectará una mayor cantidad inicial de potencia reactiva (3.5KVAR), las variables de control seguirán siendo las mismas $Kp = 1$ y $Kq = 1$.

Una vez dentro del segundo ajuste el incremento de la cantidad de potencia reactiva llega a unos valores muy cercanos a los 60° de inyección de potencia que concuerda con el ángulo de la inductancia de red de 60° .

Un detalle importante a observar es que la corriente en un instante supera el límite del inversor. El inversor tiene una capacidad de aguantar picos de corriente durante pequeños intervalos de tiempo, por lo tanto no es preocupante.

9.4. Hueco tipo C

A continuación analizaremos huecos de tensión del tipo C (caída de dos de las tres fases), a diferentes profundidades.

9.4.1. Profundidades

9.4.1.1. Caída del 21% fases separadas

En la Fig.9.3. mostramos una caída de dos de las tres fases de poca profundidad, donde la diferencia entre la tensión máxima y la mínima es inferior a la diferencia del marco por lo tanto actuaremos del mismo modo que en un hueco del tipo A. El algoritmo en el primer ajuste determinará que las variables de control $Kp = 1$ y $Kq = 1$, ya que solo queremos levantar las tensiones, por otro lado la primera cantidad de inyección de potencia reactiva será de (1KVAR).

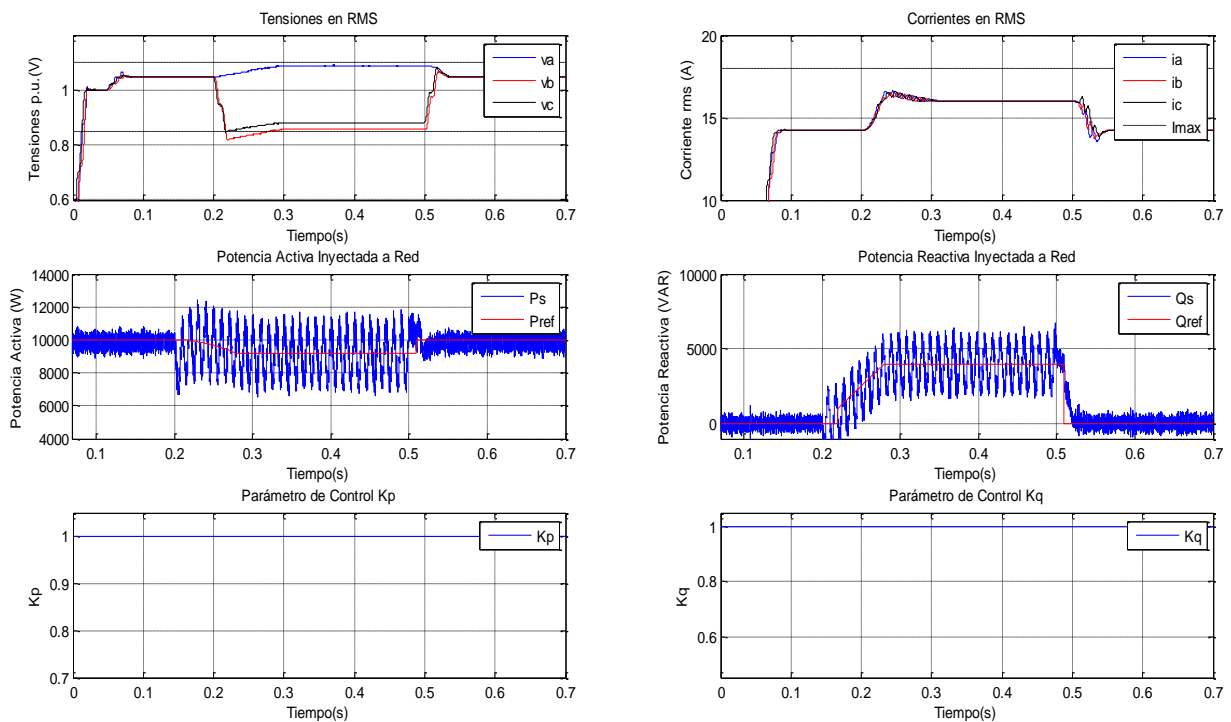


Fig.9.3. Hueco de tensión tipo C con caída del 21%

Actuando el segundo ajuste, el algoritmo simplemente tendrá que ir aumentando la cantidad de potencia reactiva inyectada a la red hasta que consigamos solventar el hueco. La cantidad mínima para solventarlo es de (4KVAR).

9.4.1.2. Caída del 24% fases separadas

Ahora evaluaremos un hueco de tensión con una profundidad del 24%. Con esta profundidad la diferencia entre la tensión máxima y la mínima es superior a la del marco por lo que el algoritmo en el primer ajuste deberá de actuar diferente a las anteriores situaciones. En lugar de levantar simplemente, deberá de levantar y juntar al mismo tiempo.

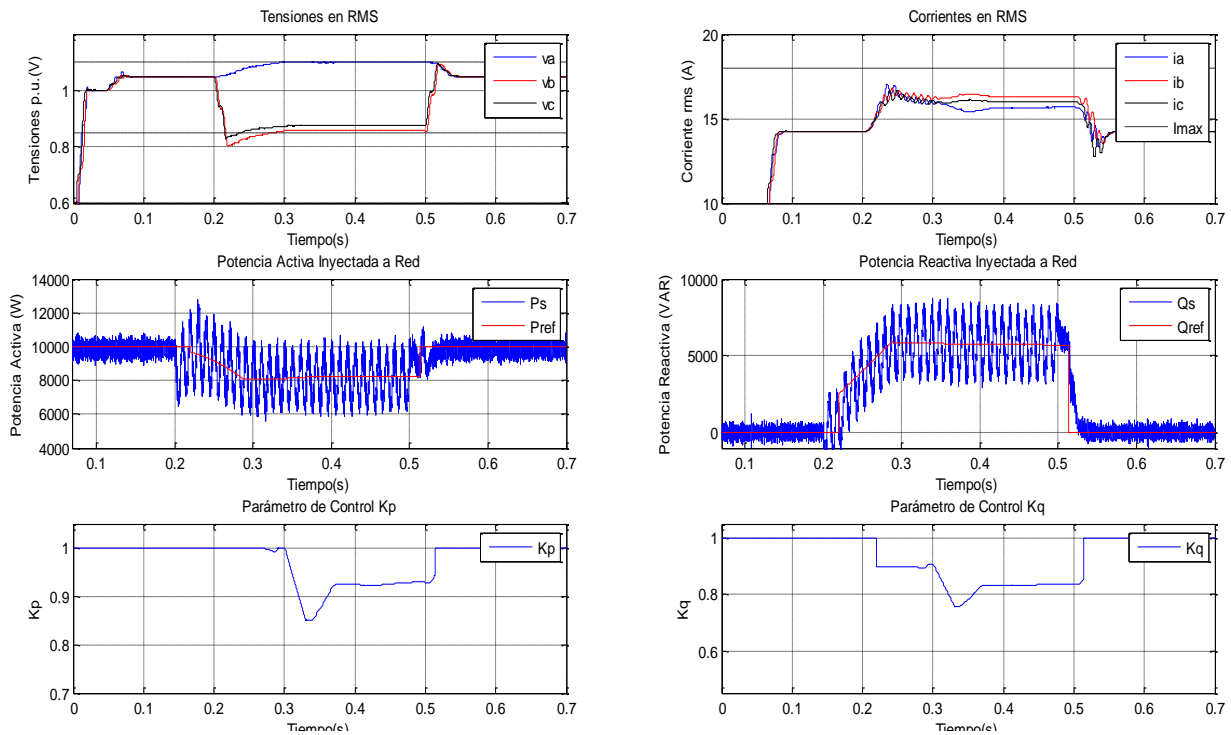


Fig.9.4. Hueco de tensión tipo C con caída del 24%

En la Fig.9.4 se observa perfectamente la forma de actuar. En el primer ajuste impone que $Kp = 1$ y $Kq = 0.9$ y una potencia reactiva de (2.5KVAR). De esta potencia un 10% la empezaremos a inyectar por secuencia negativa y el resto por la positiva. De momento la potencia activa se inyectará el 100% por la secuencia positiva. Ahora bien una vez esté actuando el segundo ajuste mediante vayamos incrementando la inyección de potencia reactiva los parámetros de control Kp y Kq se irán ajustando hasta conseguir situar las fases dentro del marco llegando a unos valores de $Kp = 0.86$ y $Kq = 0.78$ con una potencia reactiva de (6KVAR), inyectando un 22% de potencia reactiva por secuencia negativa y absorbiendo un 14% de potencia activa por secuencia negativa. Una vez solventado el hueco entraremos en el tercer ajuste para poder optimizar al máximo y así reducir la corriente, esto lo conseguimos reajustando periódicamente los parámetros de control Kp y Kq y la cantidad de potencia reactiva y así conseguir separar las tensiones a los límites del marco. Una vez conseguido podemos observar que a partir de 0.39(s) la corriente máxima disminuye de valor y así obtenemos un resultado óptimo.

9.4.1.3. Caída del 27% fases separadas

Como última prueba con este tipo de hueco la realizaremos con una profundidad del 27%. Por lo tanto la diferencia entre la tensión superior y la inferior será mucho mayor que el marco. De esta manera, las variables de control tendrán un papel fundamental para corregir la incidencia.

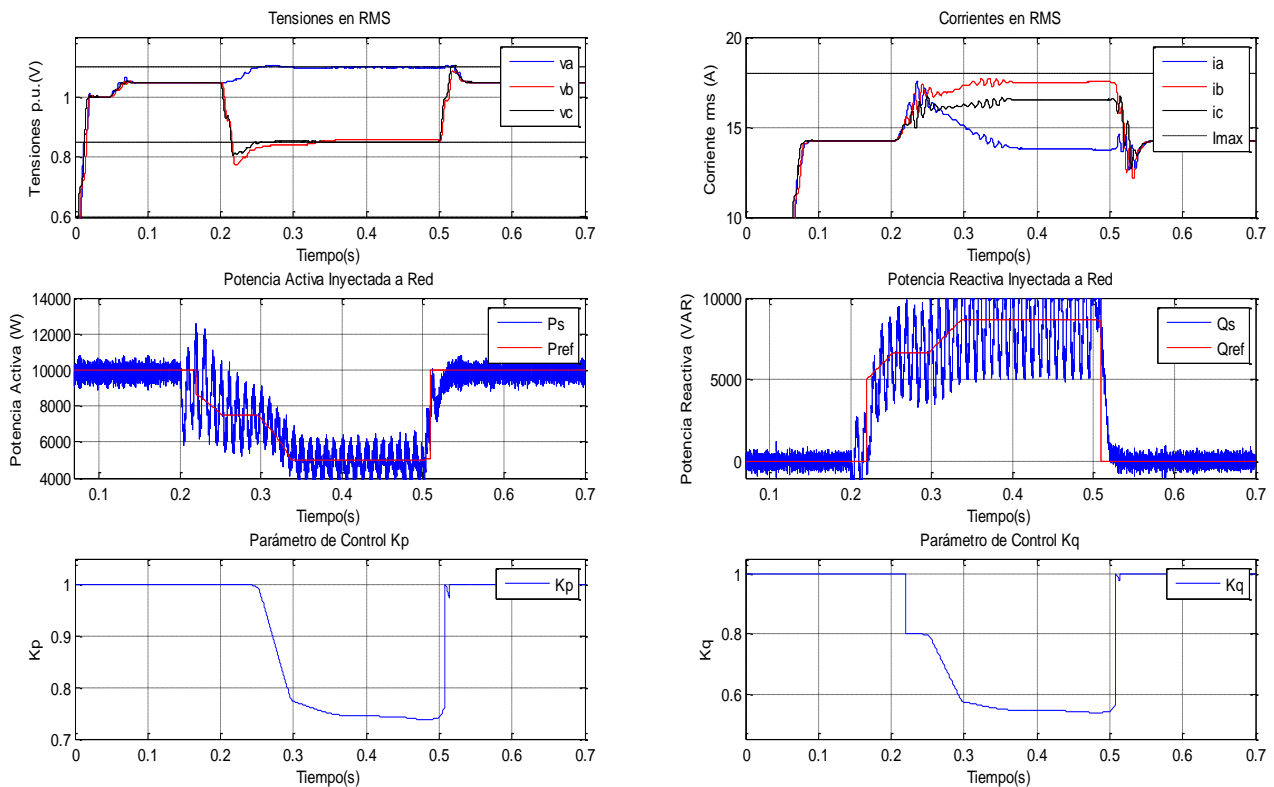


Fig.9.5. Hueco de tensión tipo C con caída del 27%

En la Fig.9.5 observamos la forma de actuar que tiene el primer ajuste. Esto impone que $Kp = 1$ y $Kq = 0.8$ y una potencia reactiva de (5KVAR). De esta potencia, un 20% la empezaremos a inyectar por secuencia negativa para ir juntando y el resto por la positiva. De momento la potencia activa se inyectará el 100% por la secuencia positiva. Ahora bien una vez esté actuando el segundo ajuste a medida que vayamos incrementando la inyección de potencia reactiva los parámetros de control Kp y Kq se irán ajustando hasta conseguir situar las fases dentro del marco. Se puede observar que en un punto paramos la inyección de potencia reactiva, ya que si siguiéramos incrementándola la tensión máxima sobrepasaría el límite superior del marco. Los parámetros de control se reajustan hasta conseguir que todo vuelva a la normalidad y seguir incrementando la inyección de potencia reactiva hasta llegar alrededor de los 60° de inyección.

Inyectando alrededor de un 75% de potencia activa por secuencia positiva y absorbiendo un 25% de potencia activa por secuencia negativa, en la potencia reactiva, inyectamos alrededor del 55% por secuencia positiva y el 45% por secuencia negativa, conseguimos levantar y juntar las tensiones al mismo tiempo.

En este caso el tercer ajuste no puede actuar ya que la separación entre la fase superior y la inferior equivale al marco por lo tanto está es la solución óptima que el algoritmo encuentra para solventar un hueco del tipo C con la máxima profundidad que puede solventar.

9.5. Hueco tipo D

Por último analizaremos huecos de tensión del tipo D (caída de una de las tres fases), a diferentes profundidades.

9.5.1. Profundidades

9.5.1.1. Caída del 21%

En la Fig.9.6 mostramos una caída de una de las tres fases de poca profundidad, donde la diferencia entre la tensión máxima y la mínima es inferior a la diferencia del marco por lo tanto actuaremos del mismo modo que en un hueco del tipo A y C. El algoritmo en el primer ajuste determinará que las variables de control $K_p = 1$ y $K_q = 1$, ya que solo queremos levantar las tensiones. Por otro lado la primera cantidad de inyección de potencia reactiva será de (1KVAR).

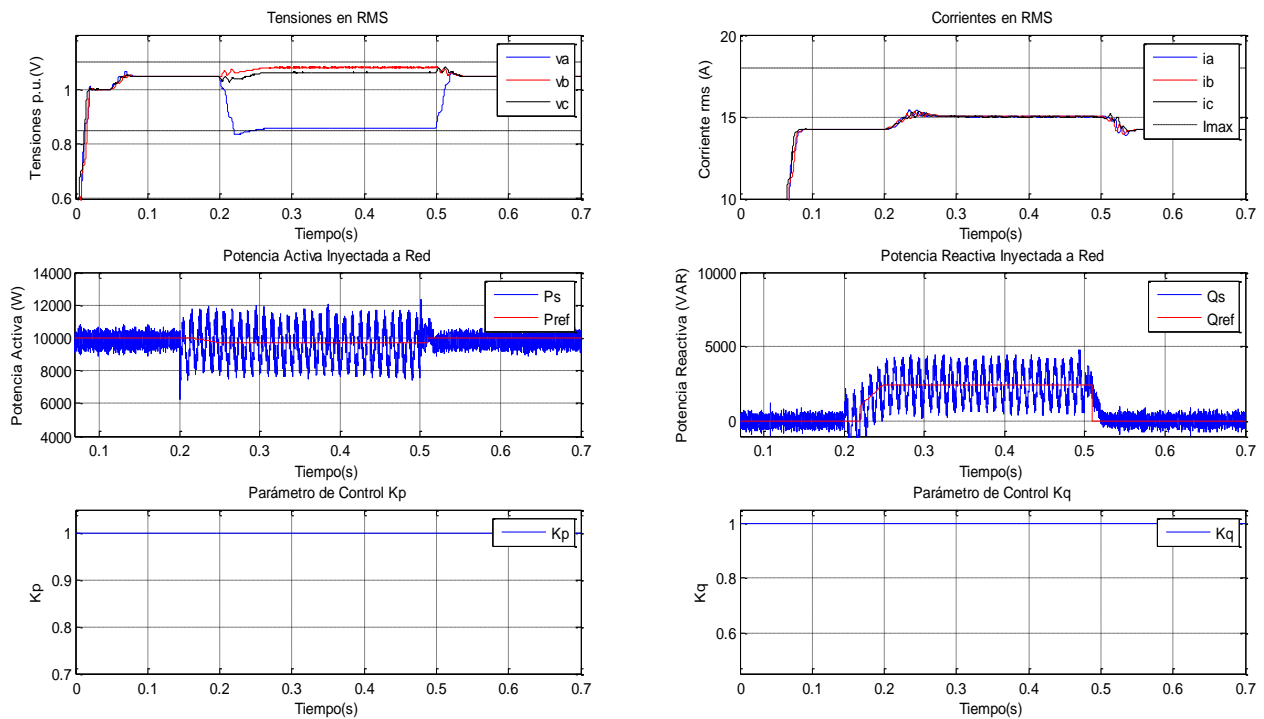


Fig.9.6. Hueco de tensión tipo D con caída del 21%

Actuando el segundo ajuste, el algoritmo simplemente tendrá que ir aumentando la cantidad de potencia reactiva inyectada a la red hasta que consigamos solventar el hueco. La cantidad mínima para solventarlo es de (2.6KVAR).

9.5.1.2. Caída del 24%

Ahora evaluaremos un hueco de tensión con una profundidad del 24%. Con esta profundidad la diferencia entre la tensión máxima y la mínima es superior a la del marco por lo que el algoritmo en el primer ajuste deberá de actuar diferente a las anteriores situaciones. En lugar de levantar simplemente, deberá de levantar y juntar al mismo tiempo de igual modo que en el hueco C.

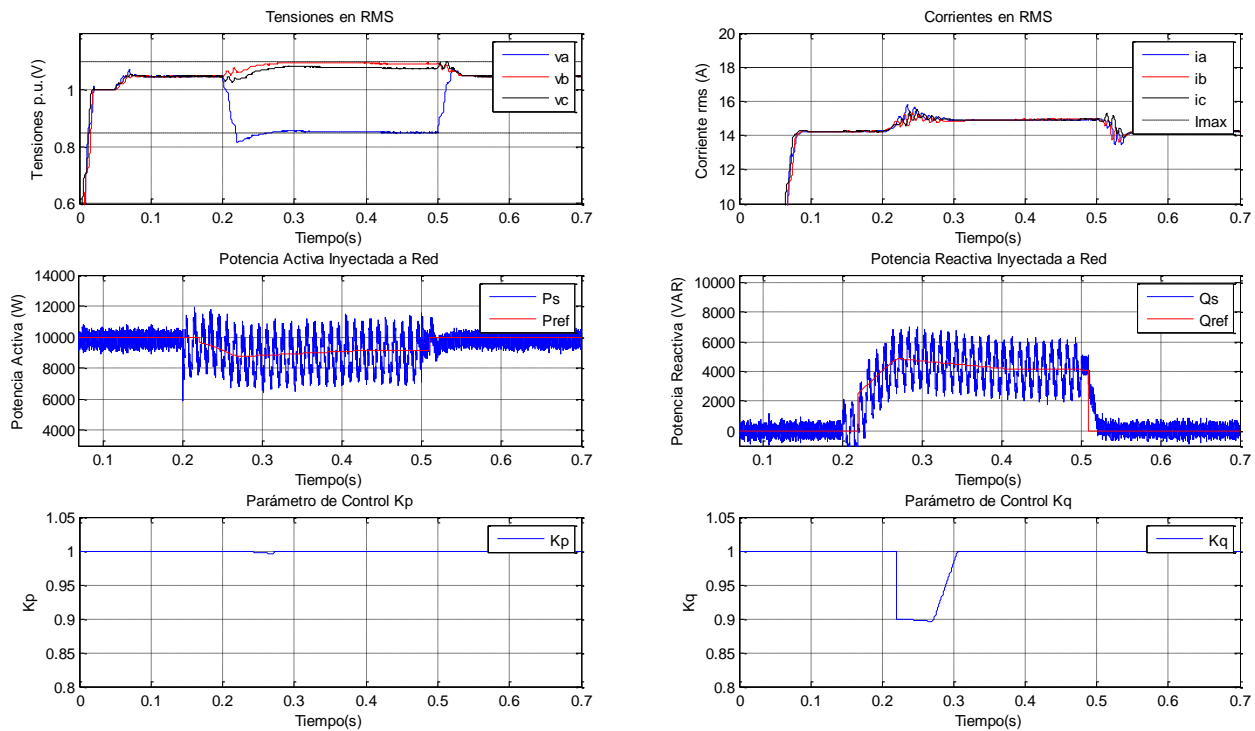


Fig.9.7. Hueco de tensión tipo D con caída del 24%

En la Fig.9.7 se observa perfectamente la forma de actuar que tiene el primer ajuste. Este impone que $Kp = 1$ y $Kq = 0.9$ y una potencia reactiva de (2.5KVAR). De esta potencia un 10% la empezaremos a inyectar por secuencia negativa y el resto por la positiva. De momento la potencia activa se inyectara el 100% por la secuencia positiva. Ahora bien una vez esté actuando el segundo ajuste a medida que vayamos incrementando la inyección de potencia reactiva los parámetros de control Kp y Kq se irán ajustando hasta conseguir situar las fases dentro del marco, Kp casi ni se inmuta y Kq le ha bastando la inyección del 10% por secuencia negativa (juntar). Una vez solventado el hueco el sistema entra en el tercer ajuste y reajusta todos los parámetros. El algoritmo detecta que al inyectar menor cantidad de potencia reactiva no le hace falta juntar tanto y Kq vuelve a 1 inyectando toda la potencia por secuencia positiva ($t=0.3s$) y conseguir solventar el hueco de tensión.

9.5.1.3. Caída del 27%

Como última prueba, realizaremos un hueco con una profundidad del 27%. Por lo tanto la diferencia entre la tensión superior y la inferior será mucho mayor que el marco. En este caso las variables de control tendrán un papel fundamental para corregir la incidencia.

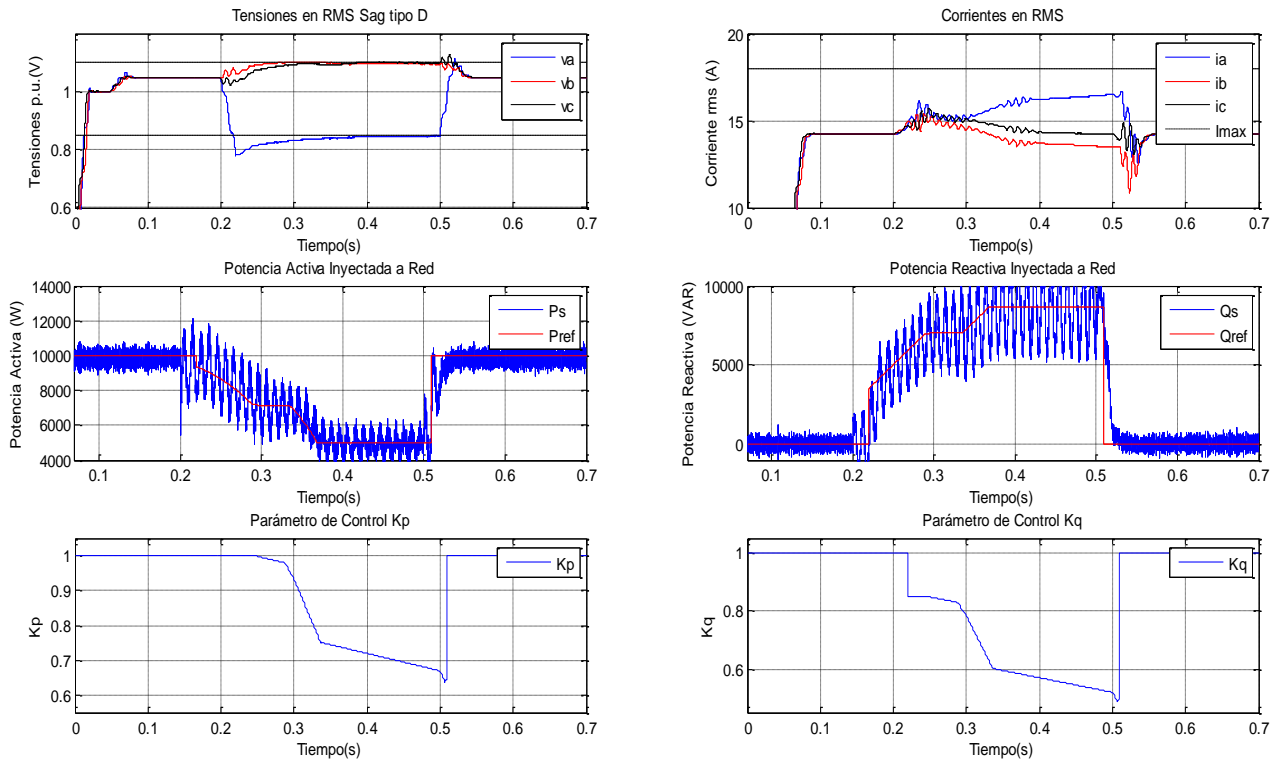


Fig.9.8. Hueco de tensión tipo D con caída del 27%

En la Fig.9.8 observamos la forma de actuar que tiene el primer ajuste, impone que $Kp = 1$ y $Kq = 0.85$ y una potencia reactiva de (3.5KVAR). De esta potencia un 15% la empezaremos a inyectar por secuencia negativa para ir juntando y el resto por la positiva. De momento la potencia activa se inyectará el 100% por la secuencia positiva. Ahora bien una vez esté actuando el segundo ajuste a medida que vayamos incrementando la inyección de potencia reactiva, los parámetros de control Kp y Kq se irán ajustando hasta conseguir situar las fases dentro del marco. Se puede observar que en un punto paramos la inyección de potencia reactiva, ya que si siguiéramos incrementándola la tensión máxima sobrepasaría el límite superior del marco. Los parámetros de control se reajustan hasta conseguir que todo vuelva a la normalidad y seguir incrementando la inyección de potencia reactiva hasta llegar alrededor de los 60° de inyección.

Inyectando alrededor de un 68% de potencia activa por secuencia positiva y absorbiendo un 28% de potencia activa por secuencia negativa, en la potencia reactiva, inyectamos alrededor del 50% por secuencia positiva y el 50% por secuencia negativa, conseguimos levantar y juntar las tensiones al mismo tiempo.

En este caso el tercer ajuste no puede actuar ya que la separación entre la fase superior y la inferior equivale al marco por lo tanto esta es la solución óptima que el algoritmo encuentra para solventar un hueco del tipo D con la máxima profundidad que puede solventar.

9.6. Conclusiones

Finalizando este capítulo observando las diferentes pruebas realizadas con los distintos tipos de hueco planteados (A, C y D) a diferentes profundidades, verificamos el correcto funcionamiento del algoritmo.

El algoritmo de control gracias a sus tres ajustes es capaz de actuar en modo online con diferentes tipos de adversidades y solventarlas. El algoritmo detecta, caracteriza y solventa el hueco de tensión.

Realizando las diferentes pruebas se ve claramente cómo actúan las diferentes estrategias de inyección, por ejemplo un hueco tipo A que las tres fases caen por igual, el algoritmo utiliza la estrategia de juntar, si el hueco es tipo C o D el algoritmo, dependiendo de la distancia entre la fase máxima y la mínima utilizará la estrategia de levantar o la de levantar y juntar a la vez.

Como objetivo habíamos planteado buscar la mejor combinación de los cuatro parámetros (potencia activa, potencia reactiva, K_p y K_q) para que la corriente sea mínima, cosa que el algoritmo encuentra con la actuación del tercer ajuste. Este ajuste es capaz de determinar si el segundo ajuste actuado bien o no, es decir, si detecta que se ha levantado, levantado y juntado demasiado el tercer ajuste actuará en consecuencia para conseguir, la combinación de los cuatro parámetros que produzca la menor corriente posible.

Para finalizar el algoritmo siempre estará inyectando la mayor cantidad de potencia activa a la red eléctrica cuando esta se encuentre en fallo.

10. Conclusiones

Una vez finalizado el trabajo, detallaremos las conclusiones que hemos obtenido a partir de los objetivos planteados inicialmente. Por otro lado también mencionaremos diversas perspectivas de trabajo que podrían ampliar el estudio que hemos realizado.

10.3. Conclusiones del trabajo

Partiendo de los objetivos planteados anteriormente, que era diseñar un algoritmo que fuera capaz de solventar varias situaciones de fallos en la red (huecos) a partir de 4 variables potencia activa, reactiva, k_p y k_q y además que sea capaz de encontrar la solución más óptima (mínima corriente). A partir del estudio teórico realizado y las estrategias de inyección hemos conseguido crear un algoritmo en lazo cerrado que sea capaz de solventar los diferentes fallos en la red (huecos).

Observando los resultados obtenidos en el transcurso del proyecto vemos que el sistema es capaz de corregir las tensiones cuando estas se encuentran en fallo.

El algoritmo es capaz de detectar si la red sufre algún incidente (huecos de tensión). Una vez detectado se pone en marcha actuando por etapas, evaluando primeramente la profundidad del hueco para saber qué estrategia usar, si solo tiene que inyectar potencia activa-reactiva por secuencia positiva (levantar las tensiones) o si tiene que absorber una cierta cantidad de potencia activa e inyectar otra cierta cantidad de potencia reactiva por secuencia negativa (juntar y levantar las fases), una vez llegado a este punto quiere decir que hemos solventado el hueco. En la última etapa el algoritmo re-ajusta los parámetros de control para que el sistema solventa la incidencia de la forma más óptima posible, (mínima corriente) variando un poco los 4 parámetros ya mencionados. Una vez finalizado el hueco, el algoritmo volverá a actuar en condiciones normales (cuando la red no sufre ningún incidente), es decir inyectando toda la potencia activa posible a la red. Así poder vender la máxima energía que puede generar la huerta solar.

El sistema podrá solucionar una serie de circunstancias descritas en el capítulo 9 ya que ahí se describen las profundidades máximas de caídas de tensión que el generador puede solucionar (caída máxima de 27% con respecto a la tensión nominal). Estas profundidades se ven limitadas directamente por la capacidad de la huerta solar que tenemos planteada (10kVA) lo que resulta obvio es que si la huerta dispusiera de mayor potencia podría llegar a solucionar peores circunstancias que las descritas en el capítulo 9.

Una de las características a destacar del algoritmo y el control del sistema es la velocidad de respuesta que este tiene ante estas situaciones, es casi inmediata, por lo que la eficiencia y eficacia de este es muy grande.

Para concluir, el algoritmo tiene una cierta flexibilidad porque es capaz de solventar de forma muy eficiente los fallos en la red, independientemente de la impedancia que el sistema tenga conectada cambiando ciertos parámetros en la programación de este.

10.4. Perspectivas de trabajo

Perspectivas de trabajo que pudiesen tener una continuación de nuestro proyecto, podrían ser las siguientes:

- Ampliar el algoritmo diseñado para que pueda adaptarse por sí solo a cualquier tipo de impedancia de red y además sea capaz de trabajar con generadores de potencia superiores a la planteada en este trabajo.
- En lugar de trabajar con un solo inversor, trabajar con n° inversores en paralelo distribuidos en diferentes puntos de la red eléctrica y que sean capaces de trabajar coordinadamente.
- Verificar nuestro trabajo teórico en un laboratorio de forma experimental y corroborar los resultados.

11.Referencias

- [1] Módulo monocristalino : Yohkon YE6220M
- [2] Muhammad H. Rashid. “*Electrónica de potencia; circuitos, dispositivos y aplicaciones*”. México, Pearson Education, 2004.
- [3] al Yazdani, Iravani: A. Yazdani and R. Iravani, *Voltage-Sourced Converters in Power Systems*. Wiley, 2010
- [4] P. Rodriguez, 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.
- [5] UNE EN 50160, *Características de las Tensión Suministrada por las Redes de Distribución*. AENOR. Octubre 1996.
- [6] A.Camacho, M. Castilla, J. Miret, IEEE, J.C. Vasquez, and E. Alarcón-Gallo “*Flexible Voltage Support Control for Three Phase Distributed Generation Inverters Under Grid Fault*” In press, 2012.