

Trabajo de Final de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**Comparación de los software de
simulación eléctrica *Simulink* y *EMTP-RV*
mediante el estudio de convertidores VSC**

MEMORIA

Autores: Carlos Vicén Sampériz
Miguel Vicén Sampériz

Directores: Oriol Gomis Bellmunt
Enric Sánchez Sánchez

Convocatoria: Septiembre de 2016



**Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona**





Resumen

El presente trabajo busca comparar dos software de diseño y simulación eléctrica como son *Simulink* y *EMTP-RV*. Para ello se estudian los convertidores estáticos VSC y se modelizan varios circuitos o sistemas con ambos programas, buscando pros y contras en la utilización de cada uno en este tipo de simulaciones.

En cuanto a los circuitos basados en convertidores VSC que se simulan, se encuentran dos tipos de sistemas eléctricos trifásicos diferentes; sistemas de generación distribuida y sistemas de transporte de energía eléctrica para largas distancias en corriente continua o HVDC.

En primer lugar se encuentran tres circuitos que simulan la generación o el almacenaje de energía eléctrica. Para ello, inicialmente se presenta un modelo en el que las tensiones de salida del sistema de control se inyectan de forma ideal a la red. El segundo y tercer modelo llevan incorporados un inversor a la salida del controlador, usando dos tipos de modulación, CB-PWM y SV-PWM, respectivamente.

Finalmente, se implementa un último modelo en el que se conectan dos redes con diferentes parámetros eléctricos simulando un sistema HVDC.

En todos los casos, se explican los modelos teóricos utilizados para desarrollar los sistemas y se describen y modelizan los componentes y bloques utilizados para llevarlos a la práctica. Además, se muestran y comparan los resultados obtenidos en las simulaciones.



Índice

1. Objetivos	5
2. Introducción	6
2.1. <i>Simulink</i> y <i>EMTP-RV</i>	6
2.2. Generación distribuida.....	7
2.3. Sistemas HVDC.....	12
2.4. Convertidor VSC.....	14
3. Bloques principales	16
3.1. Transformadas de Clarke y Park	16
3.2. PLL	20
3.3. Lazo de corriente	21
3.4. Lazo de tensión	23
4. Circuitos de generación o almacenaje de energía	26
4.1. Circuito con inyección ideal de las tensiones de salida del convertidor.....	26
4.1.1. <i>Resultados de la simulación con Simulink</i>	28
4.1.2. <i>Resultados de la simulación con EMTP-RV</i>	33
4.2. Circuitos con modulación de las tensiones del convertidor	37
4.2.1. Inversor	38
4.2.2. Modulación PWM	39
4.2.2.1. Modulación PWM basada en portadora (CB-PWM)	39
4.2.2.2. Modulación PWM basada en vectores espaciales (SV-PWM)....	43
4.2.3. Circuito con inversor y modulación CB-PWM.....	47
4.2.3.1. <i>Resultados de la simulación con Simulink</i>	47
4.2.3.2. <i>Resultados de la simulación con EMTP-RV</i>	452
4.2.4. Circuito con inversor y modulación SV-PWM	56



5. Circuito de enlace entre dos redes eléctricas	61
5.1. Resultados de la simulación con <i>Simulink</i>	63
5.2. Resultados de la simulación con <i>EMTP-RV</i>	71
6. Comparación entre <i>Simulink</i> y <i>EMTP-RV</i>	78
7. Conclusiones	80
8. Bibliografía	82



1. Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es realizar una comparación entre los software de diseño y simulación eléctrica *Simulink* y *EMTP-RV*. Para ello se adquirirán los conocimientos necesarios relacionados con estos programas y se modelizarán e implementarán varios sistemas basados en convertidores VSC.

Por ello, otro objetivo fundamental del trabajo es profundizar en los convertidores de electrónica de potencia, concretamente en los convertidores VSC, tanto en su concepción y diseño como en las aplicaciones que éstos pueden tener dentro del mundo de la electrónica de potencia.

Mediante el estudio de los convertidores VSC también se pretende desarrollar los conocimientos teóricos adquiridos a lo largo del grado, relacionados con la electrotecnia, electrónica o la dinámica y control de sistemas, profundizando más en los mismos y llevándolos a la práctica.

Por otro lado, estos modelos implementados con diferentes programas podrán ser utilizados en labores de docencia y aprendizaje para nuevos estudiantes.

Además, alejarse del papel y el boli y trabajar con programas de ordenador, con su inherente proceso de adaptación y conocimiento de los mismos, supone un reto a superar durante la elaboración del trabajo.

Por último, enfrentarse al desafío de adentrarse en un dominio teórico muy concreto, específico y de una dificultad notable con tal de poder implementar los sistemas anteriormente mencionados, con la problemática que ello conlleva.



2. Introducción

2.1. *Simulink* y *EMTP-RV*

EMTP-RV es un programa de ordenador destinado al análisis de circuitos eléctricos, especialmente en régimen transitorio. Fue desarrollado a finales de la década de 1960. El programa permite modelar matemáticamente sistemas eléctricos, mecánicos y de control, tanto monofásicos como trifásicos. Su nombre proviene del acrónimo inglés *Electro Magnetic Transients Program*.

Simulink fue desarrollado por *MathWorks* y salió a la luz el año 2002 posteriormente, se han ido implementando numerosas actualizaciones periódicamente. Se trata de un entorno de programación gráfica para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos multidominio. Este programa ofrece una estrecha integración con el resto del entorno *MATLAB*. Es ampliamente utilizado en el control automático y procesamiento de señales digitales para la simulación multidominio y diseño basado en modelos.



2.2. Generación distribuida

Como se explica en [5], la generación distribuida o descentralizada consiste en la generación de energía eléctrica mediante muchas pequeñas fuentes de generación, instaladas cerca del consumo. Es una cooperación entre la micro-generación y la generación de las centrales convencionales.

Esta distribución hace que la generación sea más equilibrada, y permite reducir la dependencia de las grandes centrales. Además, la micro-generación implica el uso de las energías renovables, lo que reduce las emisiones de CO₂.

Las características principales de una generación distribuida son:

- Reducción de las pérdidas en la red eléctrica.

Estar más cerca del consumidor supone que las redes de transporte sean más cortas. Como consecuencia, la generación distribuida supone menos pérdidas de energía en el transporte de la electricidad desde la generación hasta el consumidor. Esto también influye en el ahorro a la hora de elevar la tensión eléctrica para su transporte.

- Mejora de la fiabilidad y la calidad del sistema eléctrico.

Debido a la existencia de pequeñas fuentes de generación (micro-generación), repartidas por el territorio, el fallo de una de las fuentes no supone un grave problema para el sistema eléctrico.

- Reducción de potencias.

Las unidades de micro-generación suelen tener potencias inferiores a 3 kW. No obstante, se suele decir que no sobrepasan 10 kW de potencia instalada.

- Energías renovables.



En la generación distribuida están muy presentes las energías renovables, ya que al estar tan cerca del consumo, son las más adecuadas.

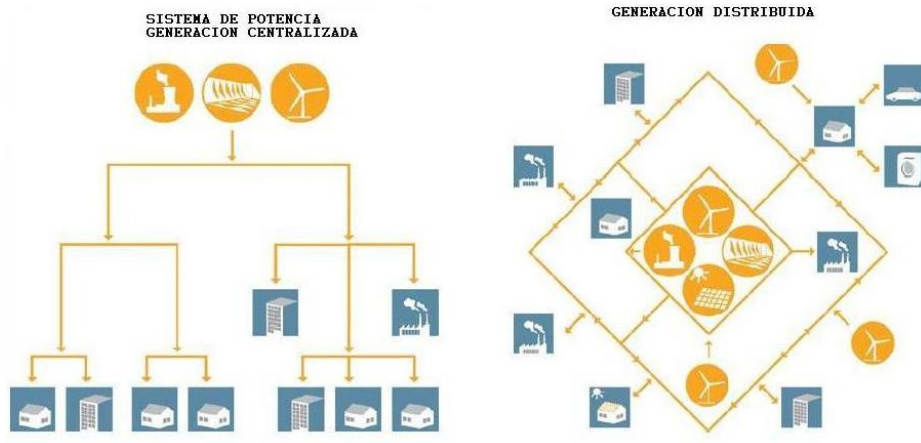


Figura 1 Comparación entre el sistema de distribución tradicional y el de generación distribuida. [7]

Modos de generación de energía (micro-generación)

La micro-generación consiste en pequeñas fuentes de generación eléctrica distribuidas. Es un sistema de cooperación con las grandes centrales, que hace que una ciudad o punto de consumo eléctrico sea más autosuficiente y no dependa tanto de grandes potencias para su abastecimiento. También está pensada para la instalación de energías renovables.

Los sistemas pueden incluir los siguientes dispositivos o tecnologías:

- Energía solar fotovoltaica
- Pequeños sistemas de Energía eólica
- Pila de combustible
- Co-generación
- Micro-turbinas
- Vehículos eléctricos

Sistemas fotovoltaicos



Una de las principales fuentes de energía distribuida es la energía solar fotovoltaica. Se trata de una tecnología que está creciendo con rapidez, doblando su capacidad total instalada aproximadamente cada dos años. Existe una amplia gama de sistemas fotovoltaicos, desde pequeñas instalaciones, instalaciones integradas en edificios, y plantas fotovoltaicas de conexión a red a gran escala.

En los últimos años, la energía solar fotovoltaica ha mejorado su eficiencia de conversión de energía lumínica en electricidad, reduciendo los costes de instalación e incrementando a su vez la tasa de retorno energético, habiendo ya alcanzado la paridad de red, es decir, la producción de electricidad a un coste inferior o igual al precio de la electricidad de la red.

La energía fotovoltaica, al igual que la mayoría de energías renovables, es variable y no gestionable. No obstante, entre sus ventajas se encuentran la ausencia de costes del combustible (la radiación solar), su nula contaminación durante la fase de operación, así como su fiabilidad y seguridad. Tiene su máximo pico de producción en torno al mediodía solar.

Sistemas eólicos

Otra fuente de generación distribuida son los generadores eólicos. Éstos requieren un bajo nivel de mantenimiento. Asimismo, su nivel de contaminación es también bajo. El coste de su instalación es mayor, pero poseen una buena fiabilidad en el funcionamiento.

La eólica suele ser complementaria a la solar; en los días cuando no hay sol suele hacer viento y viceversa. Algunos emplazamientos de generación distribuida combinan energía eólica con energía solar, lo que se conoce como sistemas híbridos.



Co-generación

Las fuentes de cogeneración distribuida usan micro-turbinas de gas natural o motores de explosión para activar los generadores. El calor generado es aprovechado para calentar aire o agua, o para activar un refrigerador por absorción para aire acondicionado.

El fuel limpio genera poca polución y, además, poseen un coste de mantenimiento mínimo. A pesar de ello, estas plantas combinadas de generación eléctrica y calor normalmente tienen una irregular fiabilidad y los cogeneradores son más caros por vatio que las centrales generadoras.

Micro-turbinas

Algunas grandes instalaciones utilizan generación de ciclo combinado. Normalmente consisten en una turbina de gas que hierve agua para actuar sobre una turbina de vapor en un ciclo de Rankine. El condensador del ciclo de vapor proporciona el calor para calentar el aire o un refrigerado por absorción.

Las plantas de ciclo combinado tienen grandes eficiencias térmicas, a menudo sobrepasando el 85%.

Vehículos eléctricos

Una futura generación de vehículos eléctricos será capaz de entregar energía de su batería a la red de suministro de electricidad cuando se necesite. Esto podría ser una importante fuente de generación distribuida en el futuro.



Ventajas y desventajas de la generación distribuida

Ventajas

- Ayudan a la conservación del medio ambiente al utilizar fuentes de energía renovables.
- Descongestionan los sistemas de transporte de energía.
- Aplazan la necesidad de re-adequación de los sistemas de transmisión.
- Ayuda al suministro de energía en periodos de gran demanda.
- Mejora la fiabilidad del sistema.
- Mejora la calidad del servicio eléctrico.
- Evita costes de inversión en transmisión y distribución.

Desventajas

- Existen aspectos relacionados con las fluctuaciones del voltaje que afecta a los consumidores vecinos.
- Requiere un sistema de adquisición de datos más complejo.
- Alto coste de inversión inicial.
- La falta de estándares para la conexión de pequeños generadores impide su desarrollo.



2.3. Sistemas HVDC

La tecnología de corriente continua HVDC (*High Voltage Direct Current*) es un método de transporte de energía eléctrica para largas distancias en corriente continua. Se ha convertido en una alternativa viable técnica y económicamente. Cada vez es más utilizada y más de cien sistemas de transmisión eléctrica HVDC han sido instalados por todo el mundo.

Dichos sistemas tienen grandes ventajas en determinadas aplicaciones respecto a sus homólogos HVAC (*High Voltage Altern Current*). Una de las áreas más en desarrollo y donde esta tecnología puede representar un papel trascendental es la integración de fuentes de energía renovable a la red eléctrica. En este sector destaca la energía eólica; más concretamente en la generación eólica offshore (emplazamiento en el mar) debido al uso de cables submarinos para conectar parques eólicos separados decenas o centenares de kilómetros de la costa.

En sus orígenes, la tecnología HVDC estaba basada en el uso de convertidores conmutados o LCC (*Line Commutated Converters*), formados por ramas de tiristores. Pese a que actualmente se trata de una tecnología con un alto grado de fiabilidad y robustez, presenta ciertos inconvenientes a la hora de conectar fuentes de energía renovables u otros sistemas de micro-generación.

Como consecuencia, más tarde se introdujo una nueva tecnología que usaba convertidores VSC en las transmisiones HVDC. Ésta se basa en el uso de transistores IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistors*), pese a que nuevos métodos están actualmente en desarrollo.

La tecnología HVDC tiene fundamentalmente tres campos de aplicación donde su naturaleza la hace preferible ante un sistema HVAC: transmisiones de largas distancias, transmisiones submarinas y conexiones asíncronas.



Entre sus ventajas se pueden contabilizar:

- Uso de menos cables (dos en lugar de tres).
- Eliminación del efecto pelicular por el cual se reduce la sección efectiva del cable al aumentar la frecuencia de la corriente que circula por su interior.
- Reducción de los costes en distancias largas (típicamente a partir de los 500 km en cables terrestres y 50 km en cables submarinos).

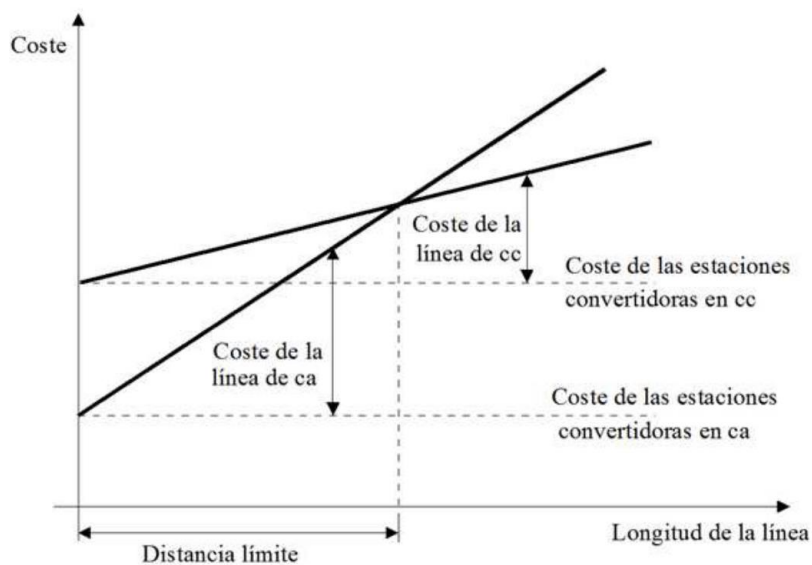


Figura 2 Comparación del coste de los sistemas HVDC y HVAC para la misma potencia. [8]

- Impedir la propagación de perturbaciones o mal funcionamientos de una red a otra.

Parte de la teoría básica de los sistemas HVDC se puede encontrar explicada en [6] y [8].



2.4. Convertidor VSC

Un convertidor de energía es un sistema o equipo electrónico que tiene por objetivo la conversión de energía eléctrica entre dos formatos diferentes. En este caso, el convertidor es un puente trifásico completo de transistores de potencia. Básicamente, realizan una conversión de corriente continua a corriente alterna o viceversa, con la posibilidad de poder controlar tanto la frecuencia como el valor eficaz de la tensión o intensidad de salida.

Los convertidores VSC se componen de un puente trifásico de IGBT, condensadores de almacenamiento que permiten realizar el enlace CC y resistencias e inductancias que permiten el flujo de potencias entre el convertidor VSC y la red CA. También pueden tener filtros sintonizados para eliminar armónicos debido a la conmutación en alta frecuencia del SPWM -típicamente entre 1Khz a 2 KHz-.

El VSC genera una tensión a partir de su elemento de almacenamiento, en este caso el bus de continua. En este caso, se genera una tensión sinusoidal a la salida del convertidor que se puede expresar por fase como

$$\begin{aligned}v_{za} &= m \cdot E_{dc} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \\v_{zb} &= m \cdot E_{dc} \cdot \sin\left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \\v_{zc} &= m \cdot E_{dc} \cdot \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right)\end{aligned}$$

siendo φ el ángulo de fase de la señal generada; E_{dc} la tensión del bus de continua; m el índice de modulación.



El sistema interconectado se puede representar como se muestra en la *Figura 3*, donde V_z corresponde al valor eficaz de tensión en la red AC y V_1 representa el valor eficaz de tensión a la salida del convertidor VSC.

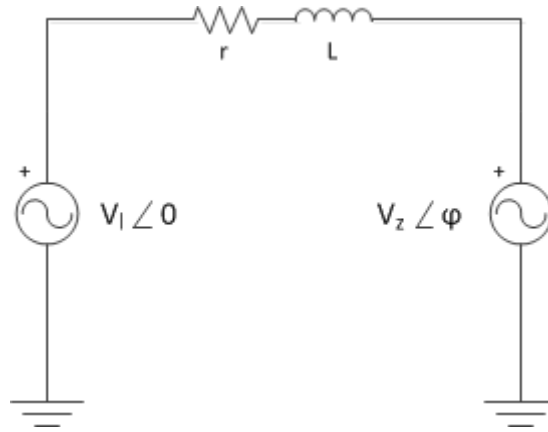


Figura 3 Esquema del sistema interconectado de un convertidor VSC.

El control del sistema se realiza a partir de variables de estado. Para este caso particular, se determinan como criterios de diseño la tensión del bus DC E_{dc} y el flujo de potencia activa P^* . La potencia reactiva en el sistema se considera nula.

El modelo teórico y los conceptos relacionados con los convertidores VSC están basados en [1] y [3].



3. Bloques principales

El diseño teórico de estos bloques principales está basado en los conceptos explicados en [1] y [4].

3.1. Transformadas de Clarke y Park

Los sistemas de potencia han sido tradicionalmente analizados usando matrices de transformación (Clarke y Park). Mediante las transformaciones matemáticas se simplifica el análisis de circuitos trifásicos. Estas técnicas han sido ampliamente usadas para modelizar sistemas eléctricos en régimen permanente bajo régimen de trabajo y también para analizar transitorios, la dinámica y los armónicos.

Transformada de Clarke

Se trata de un cambio de base, desde un sistema trifásico estacionario ($f_{abc} = [f_a \ f_b \ f_c]^T$) al sistema coordinado sobre los ejes $\alpha\beta 0$ ($f_{\alpha\beta 0} = [f_\alpha \ f_\beta \ f_0]^T$). Como se ha mencionado anteriormente, esto permite analizar y trabajar con una señal de forma mucho más sencilla y directa.

Una aplicación muy útil de la transformada es la generación de la señal de referencia usada en el control mediante modulación *Space Vector* (SV-PWM).



La llamada transformada de Clarke se define como

$$\begin{bmatrix} x_{\alpha} \\ x_{\beta} \\ x_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

siendo x_{abc} el valor instantáneo de tensión o corriente en referencia normal y $x_{\alpha\beta 0}$ el valor en referencia $\alpha\beta 0$.

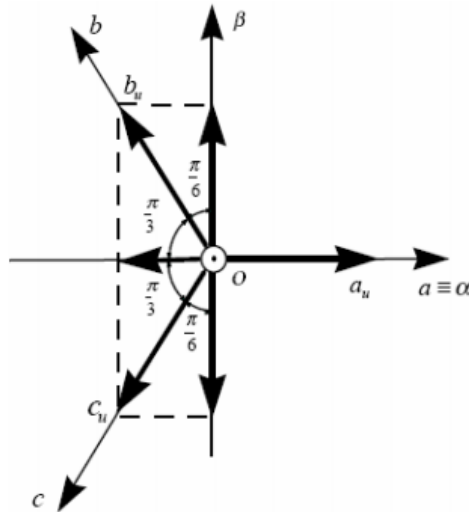


Figura 4 Representación del plano $\alpha\beta$. [4]

La antitransformada es la función inversa, pasando una magnitud en referencia $\alpha\beta 0$ a referencia abc. Ésta se puede describir como

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{\alpha} \\ x_{\beta} \\ x_0 \end{bmatrix}$$

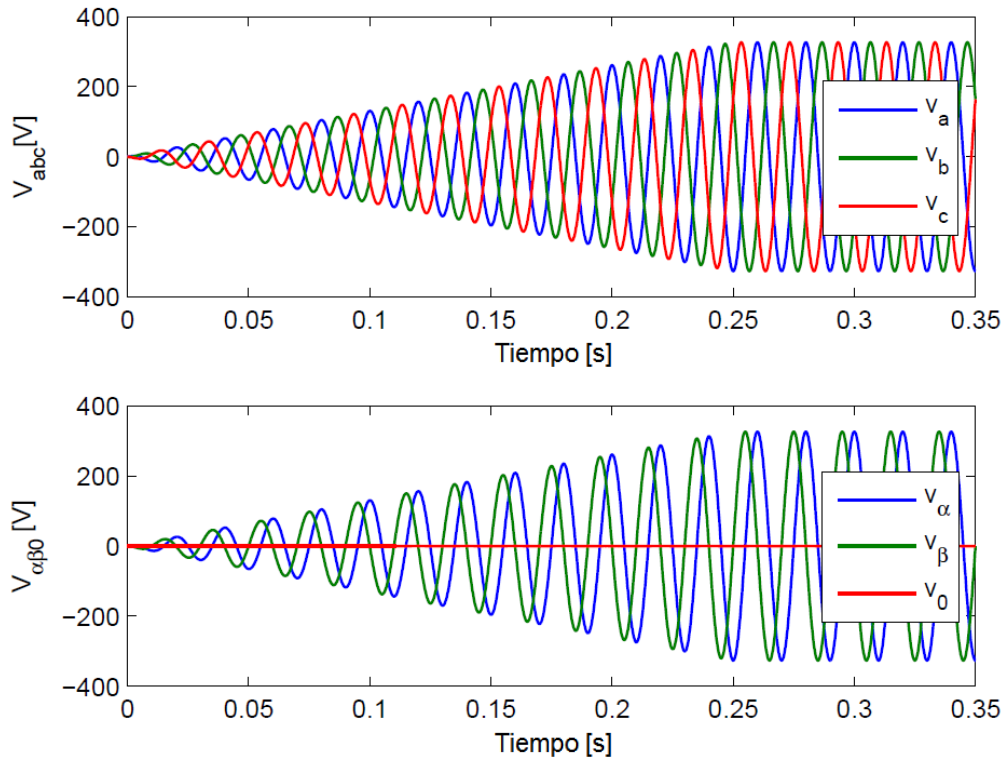


Figura 5 Ejemplo de tensión trifásica en referencia *abc* y *αβ0*. [1]

Transformada de Park

En el diseño de controladores, puede ser muy útil tener valores constantes de las magnitudes a controlar. Esto se puede lograr mediante la transformada de Park.

Conceptualmente es similar a la transformada de Clarke (o transformada $\alpha\beta 0$). En este caso, la matriz de la transformada se define como

$$T(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

siendo x_{abc} el valor instantáneo de tensión o corriente en referencia normal y x_{qd0} el valor en referencia $qd0$.

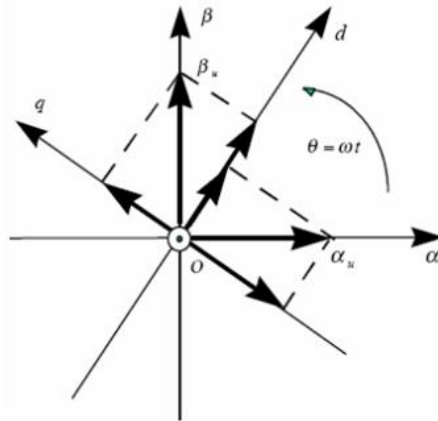


Figura 6 Representación del plano *qd*. [4]

En este caso, la antitransformada se usa para pasar una magnitud en referencia *qd0* a referencia *abc*. Ésta se puede expresar como

$$T^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix}$$

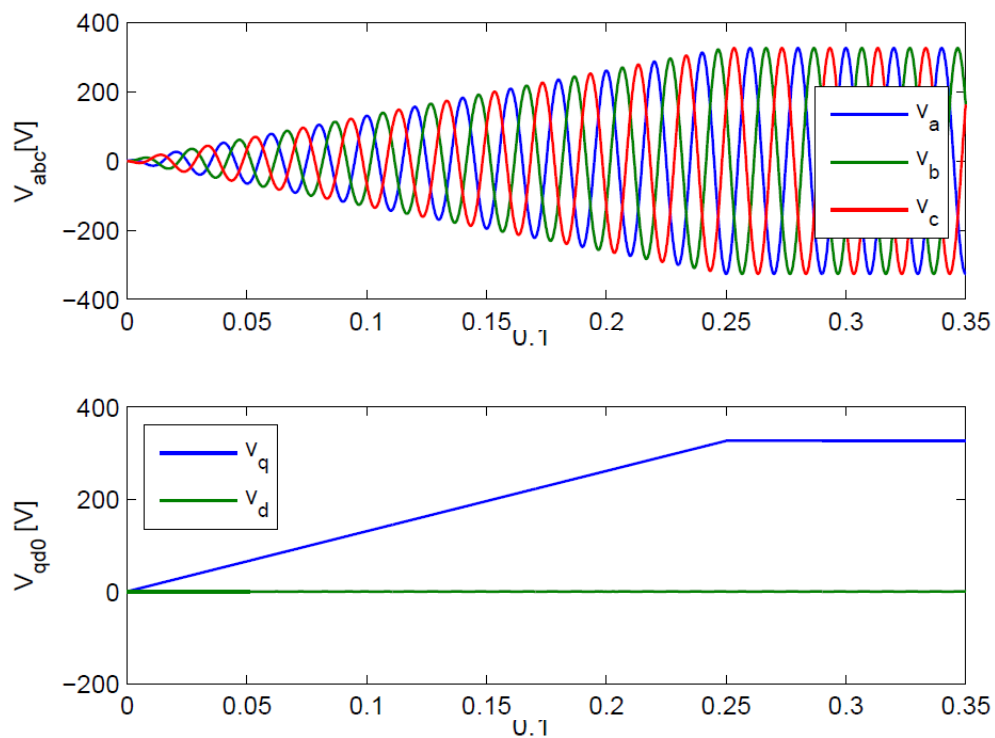


Figura 7 Ejemplo de tensión trifásica en referencia *abc* y *qd0*. [1]



3.2. PLL

El lazo de seguimiento de fase o PLL se trata de un sistema en el que la velocidad angular y la fase son realimentadas para así determinar el valor de dichas variables de la red eléctrica. Se trata de un dispositivo ampliamente utilizado en el campo de la electrónica y que se popularizó a partir de la década de 1960.

Después de aplicar la transformada de Park a las tensiones trifásicas de la red V_{abc} , mediante un proceso de filtrado de la componente V_d a partir de un controlador PI, se obtiene la velocidad angular de la red eléctrica. Posteriormente, gracias a un integrador, se obtiene el ángulo o fase. Este mismo valor es también utilizado en la transformada de Park del instante posterior, realimentándose así el sistema.

A continuación se muestra un diagrama de la estructura del PLL empleada.

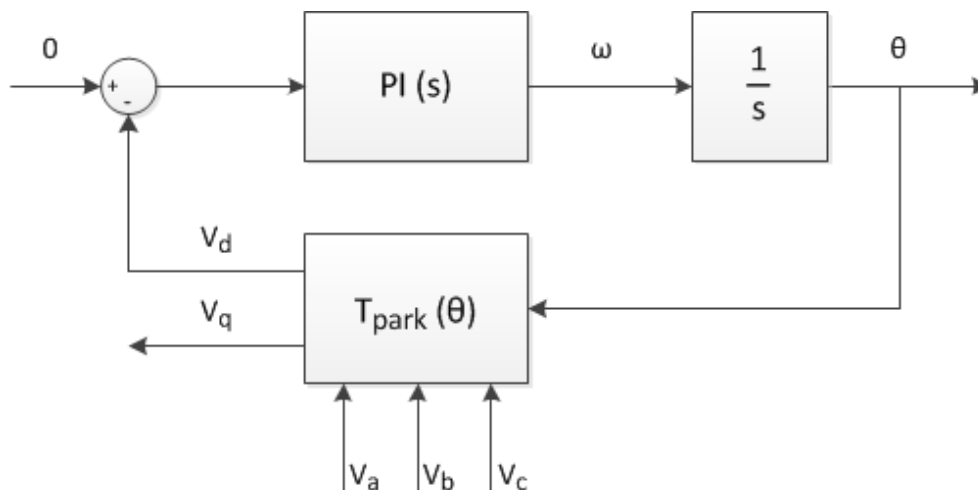


Figura 8 Diagrama de flujo del PLL.

El controlador puede ser considerado como un sistema lineal de segundo orden. De esta manera, se obtiene la función de transferencia



$$\frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

donde ξ es el factor de amortiguamiento y ω_n es la velocidad angular eléctrica que puede ser calculada como $2 \cdot \pi \cdot f_{elec}$.

Por otro lado, el controlador PI puede también ser definido como

$$K_f(s) = K_p \left(\frac{\frac{1}{\tau_{PLL}} + s}{s} \right)$$

siendo τ_{PLL} la constante de tiempo del controlador del PLL.

Igualando ambas expresiones, se obtienen las siguientes ecuaciones

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_p E_m}{\tau_{PLL}}}$$
$$\xi = \frac{\sqrt{\tau_{PLL} K_p E_m}}{2}$$

donde E_m es el valor de pico de las tensiones de la red.

Resolviendo el sistema, se pueden calcular los valores de K_p y τ_{PLL} .

3.3. Lazo de corriente

El lazo de corriente es el encargado de calcular las tensiones de salida que se aplicarán a la carga a partir de los parámetros obtenidos en la PLL y en el lazo de tensión.



La estructura que sigue el lazo de corriente es la siguiente.

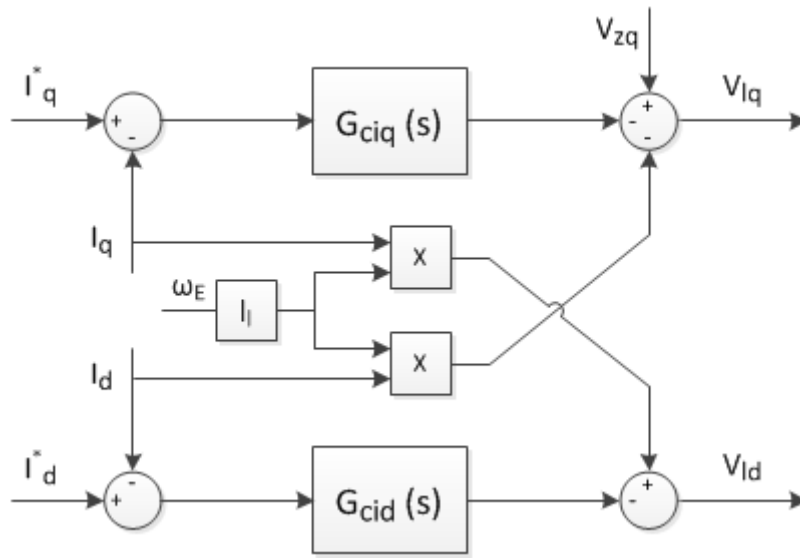


Figura 9 Diagrama de flujo del lazo de corriente.

Asumiendo que la componente d de la tensión de salida del PLL es nula ($V_{zd} = 0$) tal y como se explica en el *Apartado 3.1. Transformada de Park*, las ecuaciones de la tensiones pueden ser descritas como

$$\begin{bmatrix} v_{zq} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & l_l \omega_e \\ -l_l \omega_e & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 \\ 0 & l_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix}$$

Por tanto,

$$\begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{v}_{lq} + v_{zq} - l_l \omega_e i_{ld} \\ -\hat{v}_{ld} + l_l \omega_e i_{lq} \end{bmatrix}$$

donde v_{lq} y v_{ld} son las señales de salida del lazo de corriente, es decir, las tensiones que el convertidor aplicará a su salida.

Para obtener las funciones de transferencia del sistema se aplica el método IMC (Internal Model Control).



Tras transformada de Laplace, resultando en

$$\frac{\hat{v}_{lq}(s)}{\hat{i}_q(s)} = \frac{1}{l_l s + r_l}$$
$$\frac{\hat{v}_{ld}(s)}{\hat{i}_d(s)} = \frac{1}{l_l s + r_l}$$

Modelando el controlador como

$$G_{ciq}(s) = G_{cid}(s) = \frac{K_p s + K_i}{s}$$

Se obtienen las constantes

$$K_p = \frac{l_l}{\tau}$$
$$K_i = \frac{r_l}{\tau}$$

donde τ es la constante de tiempo en la que se cierra el ciclo de control. El valor de dicha constante debe ser al menos 10 veces menor que la frecuencia de conmutación del convertidor.

3.4. Lazo de tensión

La transmisión de potencia eléctrica desde un generador a la red o desde la red hacia un dispositivo de almacenaje se realiza mediante un bus de corriente continua que une la parte AC y DC, siendo el elemento intermedio necesario para poder realizar la conversión de energía. En régimen estacionario, este bus se mantiene a una tensión previamente establecida.



Para controlar esta tensión, se incorpora al circuito un sistema regulador de tensión. Asegurando el balance de potencias entre las fuentes de generación y la potencia inyectada a la red, se consigue automáticamente mantener un nivel de tensión constante. La salida del lazo de tensión proporcionará la i_q^* de referencia para el lazo de corriente.

El diseño del regulador se muestra en la *Figura 10*. La entrada controlada es E_{dc} , la tensión del bus; ésta es una práctica habitual, puesto que E_{dc} es proporcional a la energía almacenada en el condensador. El sistema compara el valor de dicha variable con el valor de referencia E_{dc}^* . Tras un proceso de filtrado mediante un controlador PI y multiplicar la señal resultante por un factor de $2/3$, se obtiene la componente q de la intensidad de referencia para el lazo de corriente i_q^* .

Se considera que no hay potencia reactiva y por lo tanto i_d^* será nula.

Esquematisando su estructura en un diagrama de flujo, se obtiene lo siguiente.

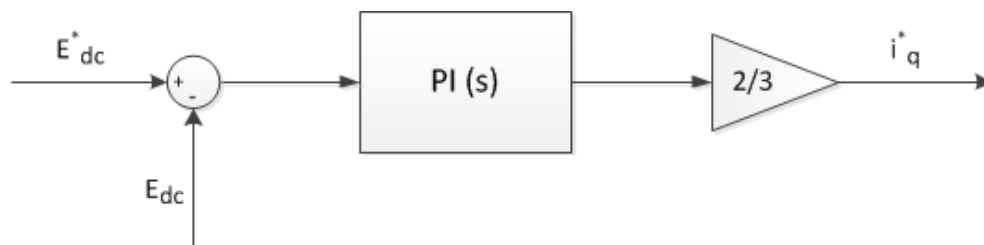


Figura 10 Diagrama de flujo del lazo de tensión.

Pese a la posibilidad del uso de un controlador P, el control de tensión (G_{CDC}) se implementa mediante un controlador PI debido a la mejor respuesta obtenida. Como consecuencia, el sistema será de segundo orden y las señales sufrirán una oscilación antes de alcanzar su valor de referencia.

$$G_C(s) = K_P + \frac{K_I}{s}$$



Modelando el controlador PI con la función de transferencia

$$W(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)}$$

Siendo

$$G(s) = \frac{1}{Cs \left(K_P + \frac{K_I}{s} \right)}$$

la función de transferencia puede expresarse como

$$W(s) = \frac{\frac{K_P}{C}s + \frac{K_I}{C}}{s^2 + \frac{K_P}{C}s + \frac{K_I}{C}}$$

Comparándola con el sistema de segundo orden

$$W(s) = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

se obtienen unas constantes del controlador de

$$K_P = 2\xi\omega_E C$$

$$K_I = \omega_E^2 C$$

donde ξ es el factor de amortiguamiento deseado para el lazo de tensión, y ω_E es la velocidad angular deseada.



4. Circuitos de generación o almacenaje de energía

4.1. Circuito con inyección ideal de las tensiones de salida del convertidor

En el circuito de generación o almacenaje de energía eléctrica con inyección ideal de las tensiones de salida del convertidor se simula la conexión de un convertidor VSC a la red de CA. Para ello se usa el modelo promediado con fuentes controladas ideales. Para el caso de una estación de almacenaje de energía en lugar de generación, se da la misma situación pero con sentido inverso de las intensidades.

La estructura del modelo se muestra en la *Figura 11*.

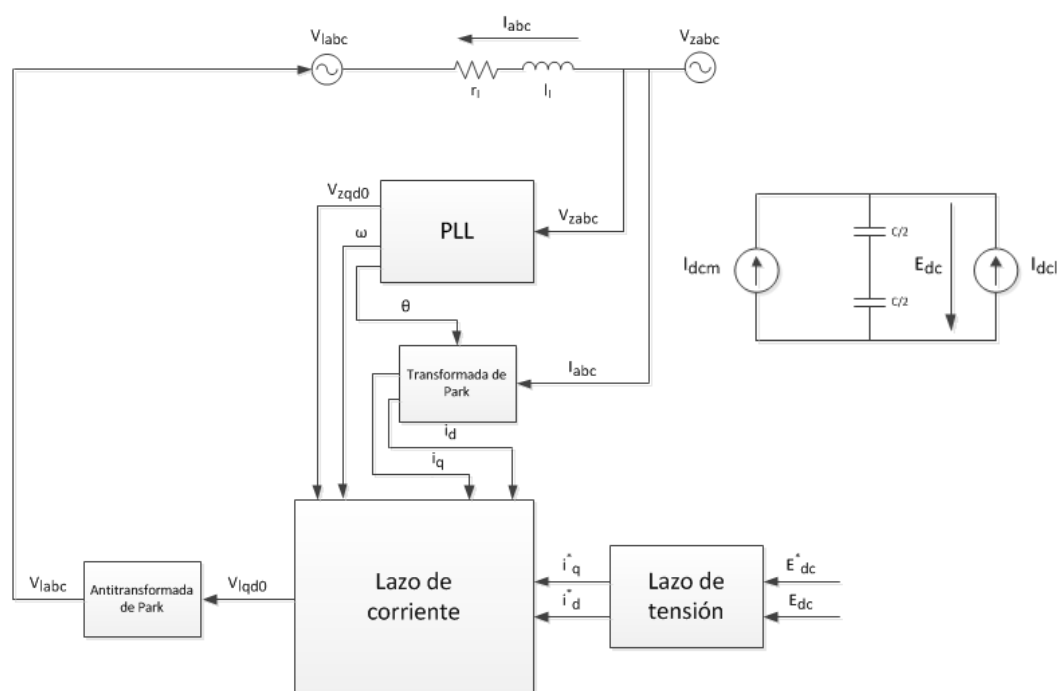


Figura 11 Estructura del circuito con inyección ideal de las tensiones de salida del convertidor.



Dada una red a la que se conecta el sistema de generación, con sus determinados parámetros eléctricos, la entrada controlada del sistema es la intensidad I_{dcm} que suministra dicha fuente de corriente al bus de continua. Esta intensidad simula un flujo de intensidad que se inyecta al bus proveniente de una estación generadora.

La fuente de corriente I_{dcl} se controla de forma automática para asegurar que la potencia suministrada sea igual a la transferida a la red. Para ello, se calcula la potencia que en cada momento se está inyectando a la red y, teniendo en cuenta que el valor de tensión del bus de continua E_{dc} será constante y vendrá marcado por un valor de referencia E_{dc}^* al que se cargará el bus en su puesta en marcha -en este caso, 800V-, el valor de I_{dcl} se autorregulará para asegurar el balance de potencias.

En este primer modelo, la inyección de las tensiones de salida del controlador a la carga se realiza de forma ideal mediante una fuente controlada de tensión alterna.

Durante la simulación en *Simulink* el valor de la entrada I_{dcm} se modificó para comprobar la respuesta del sistema. La simulación empieza con un valor de 12.5A hasta el instante 0.33s, en el cambia a 17.5A. En el instante 0.66s vuelve a su valor inicial de 12.5A. En el caso de la simulación en *EMTP-RV*, I_{dcm} empezó con 12.5A y aumentó hasta los 17.5A en el segundo 0.5s.



Los valores usados para las simulaciones se encuentran listados a continuación.

Parámetros del circuito	PWM	Control
	$N = 400$	$\xi = 0.707$
$L = 5.4\text{mH}$	$T_e = \frac{2\pi}{\omega_e}\text{s}$	$\omega_n = 418.88\frac{\text{rad}}{\text{s}}$
$R = 0.5\Omega$	$T_s = \frac{T_e}{N}\text{s}$	$E_m = \sqrt{2} \cdot 230\text{V}$
$C = 1020\mu\text{F}$	$\omega_m = \omega_e$	$K_P = 1.8209$
$V = \sqrt{2} \cdot 230\text{V}$		$\tau_{\text{PLL}} = 0.0033755899\text{s}$
$\tau = 0.001\text{s}$		
$I_{\text{dcm}} = 12.5\text{A}$		
$E_{\text{dc}}^* = 800\text{V}$		
$\omega_e = 50 \cdot 2\pi\frac{\text{rad}}{\text{s}}$		
$\xi_e = 0.9$		

4.1.1. Resultados de la simulación con Simulink

Los resultados obtenidos tras la simulación del modelo mediante el software *Simulink* se muestran a continuación.

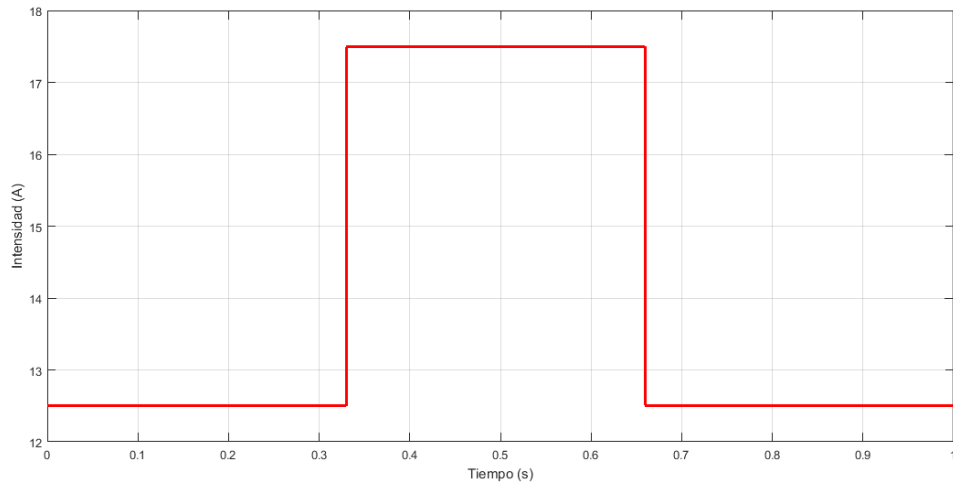


Figura 12 Intensidad I_{dcm} inyectada al bus de continua.

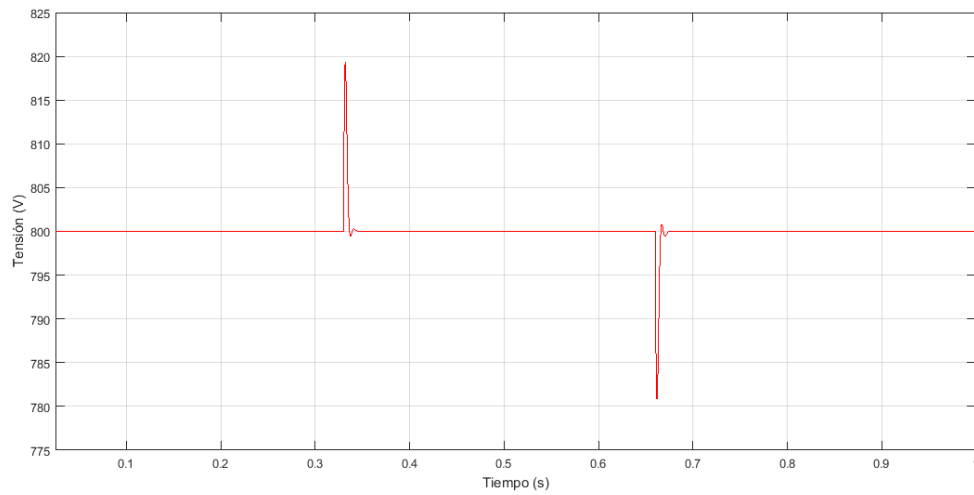


Figura 13 Tensión E_{dc} del bus de continua.

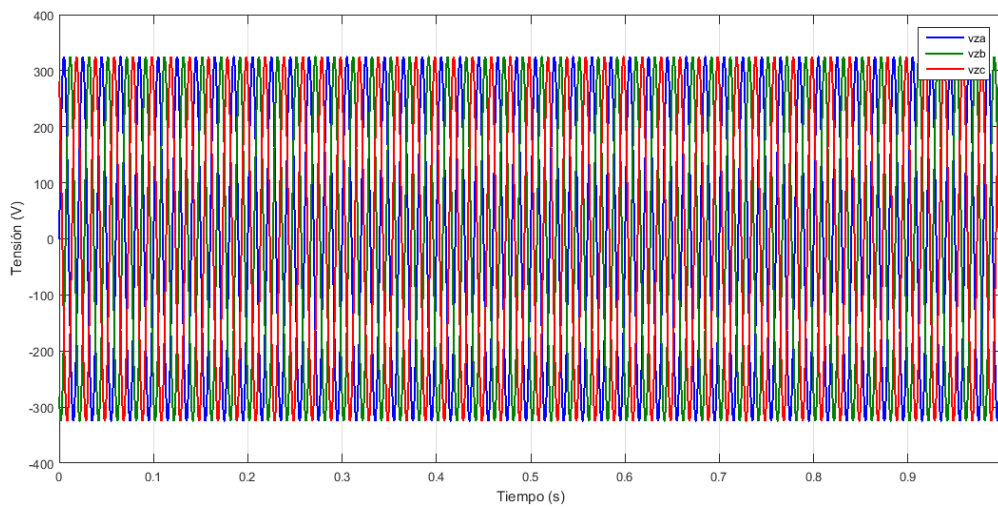


Figura 14 Tensión de la red en referencia abc .

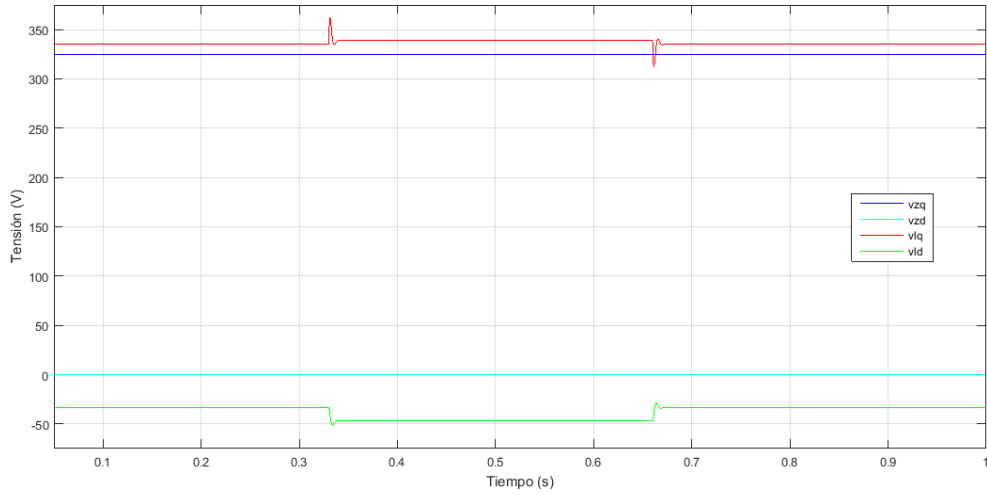


Figura 15 Tensiones de la carga y de la red en referencia $qd0$.

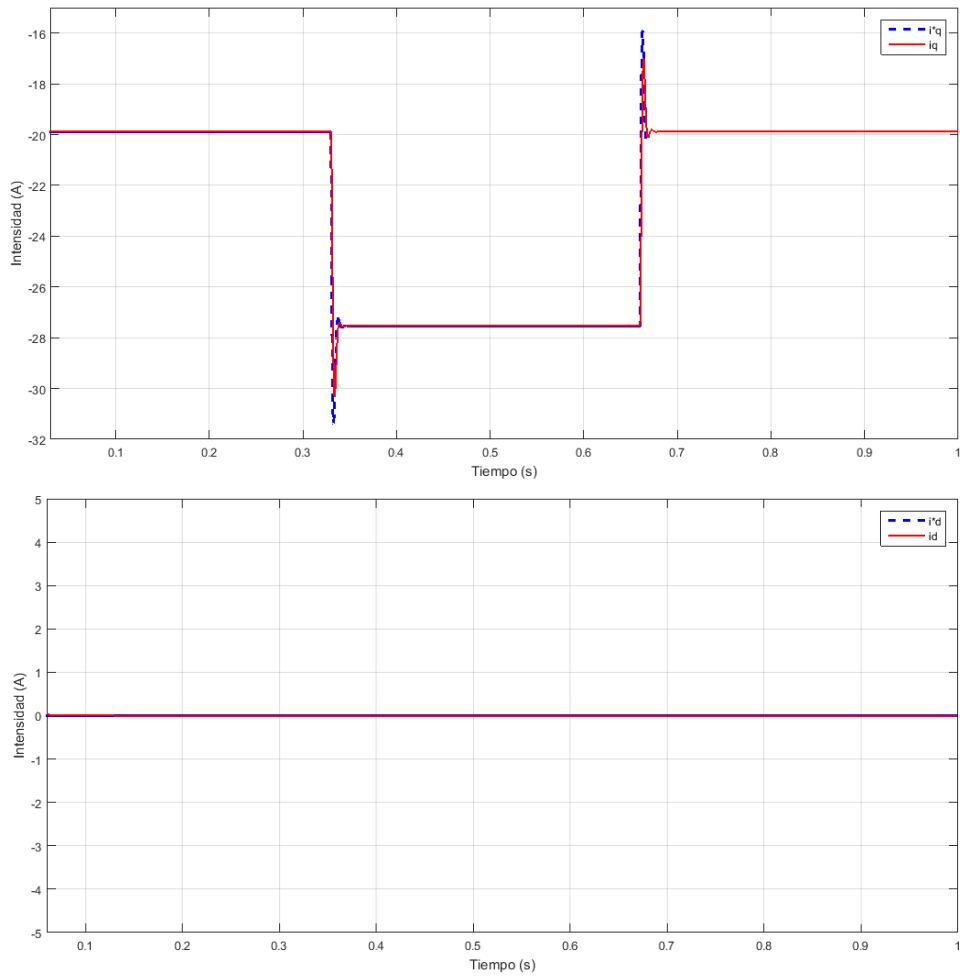


Figura 16 Intensidades reales y de referencia en referencia $qd0$.

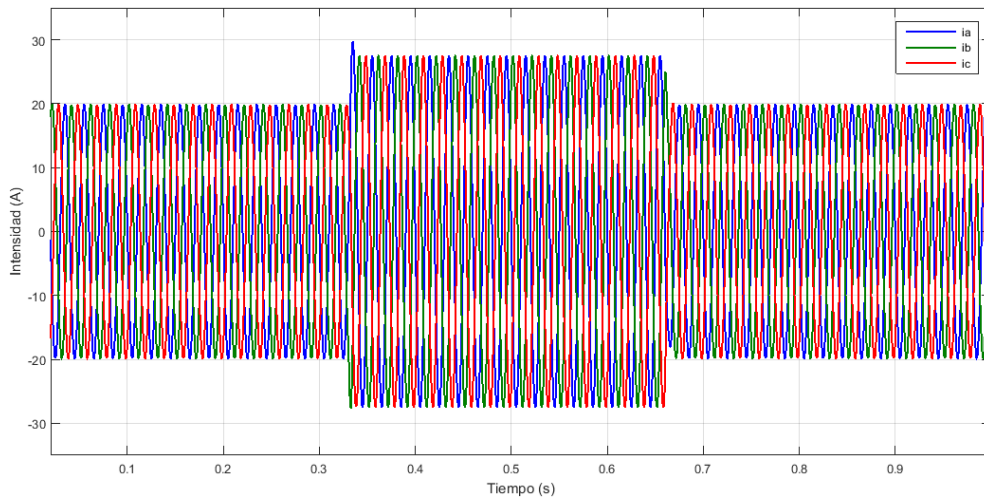


Figura 17 Intensidades de la carga en referencia *abc*.

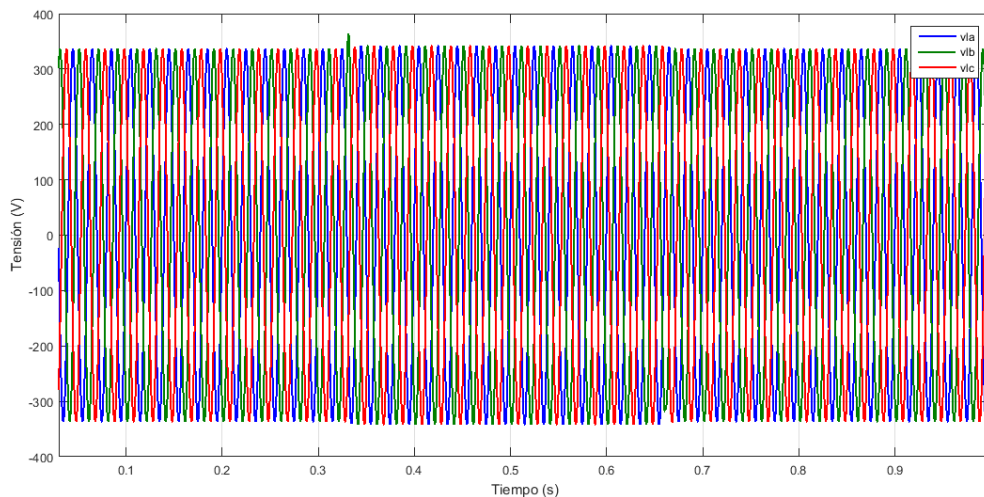


Figura 18 Tensiones de salida del convertidor en referencia *abc*.

Para comprobar que la respuesta temporal del sistema frente a un cambio en la consigna de entrada sea la adecuada, se analiza su comportamiento en este aspecto.

Dado que se trata de un sistema de segundo orden subamortiguado -con un factor de amortiguamiento ξ de 0.707- y sabiendo que la constante de amortiguamiento σ se calcula como

$$\sigma = \xi \cdot \omega_n$$



y que el tiempo de establecimiento t_s , considerándolo válido al llegar la respuesta al $\pm 5\%$ de error sobre valor final, se puede calcular como

$$\frac{e^{-\sigma t_s}}{\sqrt{1 - \xi^2}} \cong 0.05 = e^{-\pi}$$

se obtiene un tiempo de establecimiento de 0.0113s.

Como se puede comprobar en la *Figura 19*, dado que se trata de un sistema de segundo orden, la respuesta oscila hasta alcanzar el valor final antes de superar el tiempo de establecimiento calculado con anterioridad (dentro del rango de 5% de error).

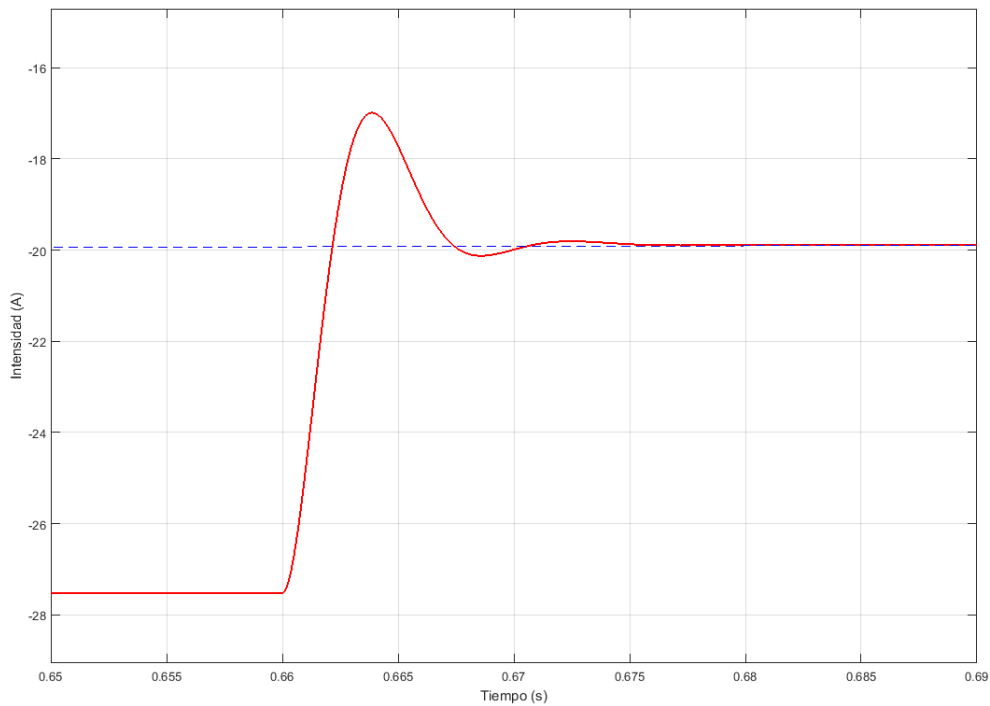


Figura 19 Detalle de la respuesta temporal del sistema en estado transitorio.



4.1.2. Resultados de la simulación con EMTP-RV

Los resultados obtenidos tras la simulación del modelo mediante el software *EMTP-RV* se muestran a continuación.

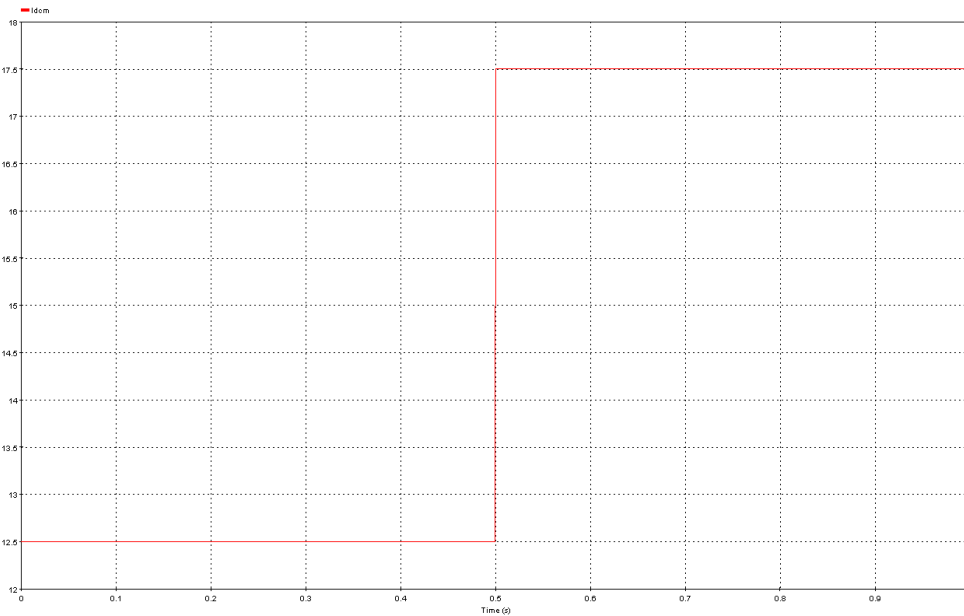


Figura 20 Intensidad I_{dcm} inyectada al bus de continua.

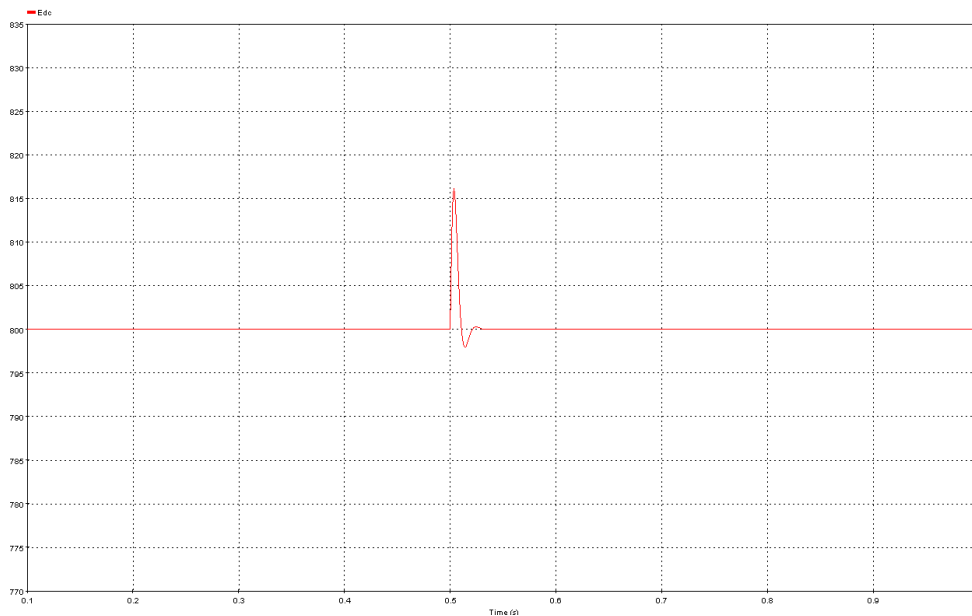


Figura 21 Tensión E_{dc} del bus de continua.

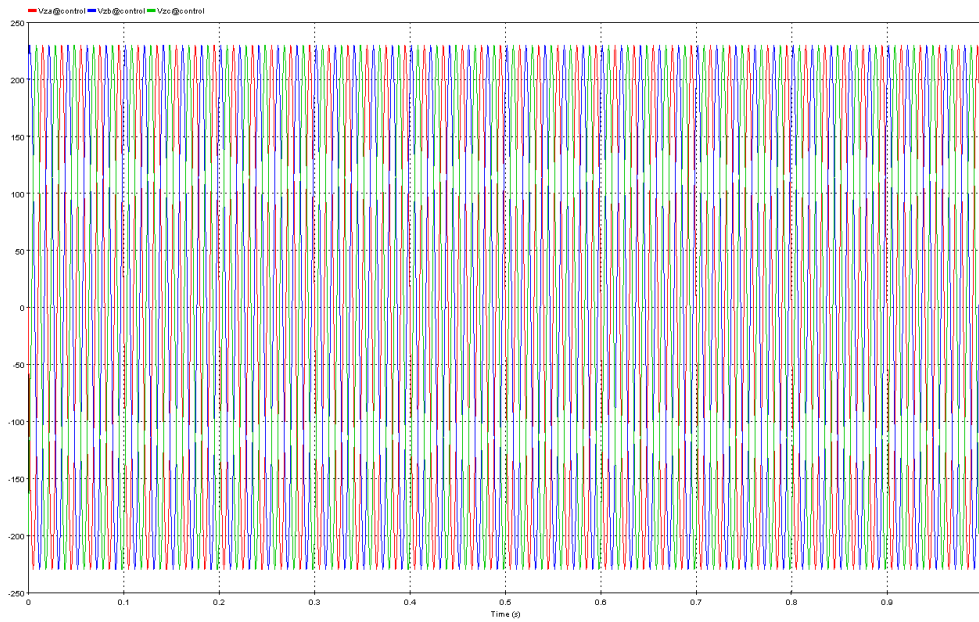


Figura 22 Tensión de la red en referencia *abc*.

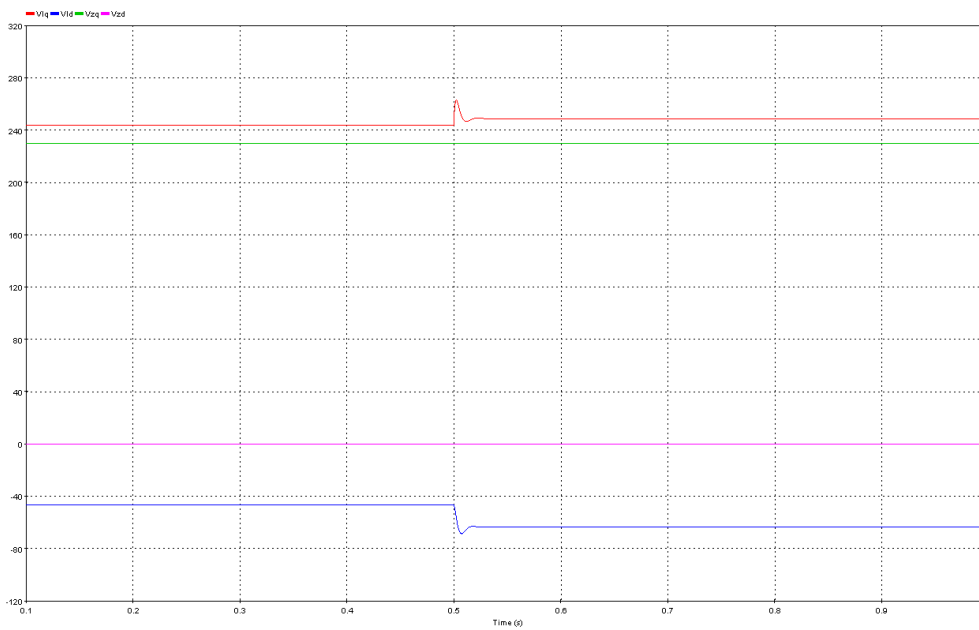


Figura 23 Tensiones de la carga y de la red en referencia *qd0*.

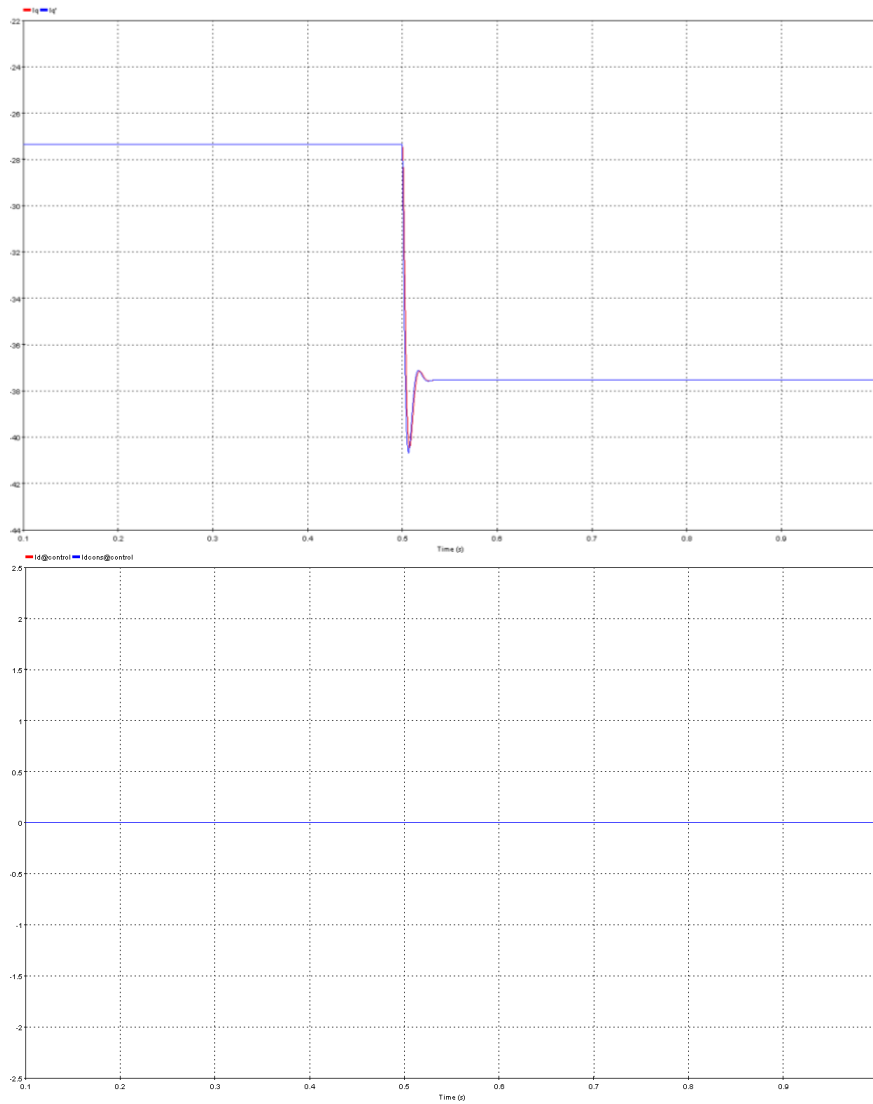


Figura 24 Intensidades reales y de referencia en referencia $qd0$.

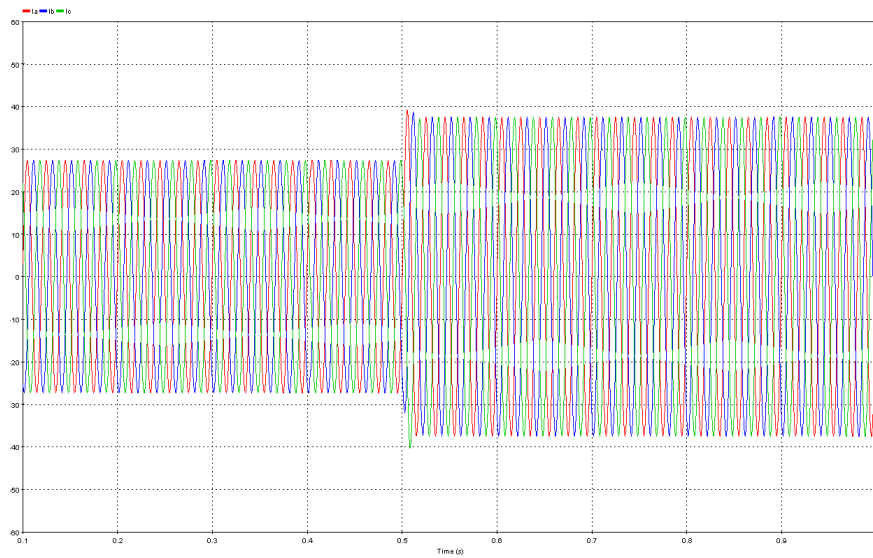


Figura 25 Intensidades de la carga en referencia abc .

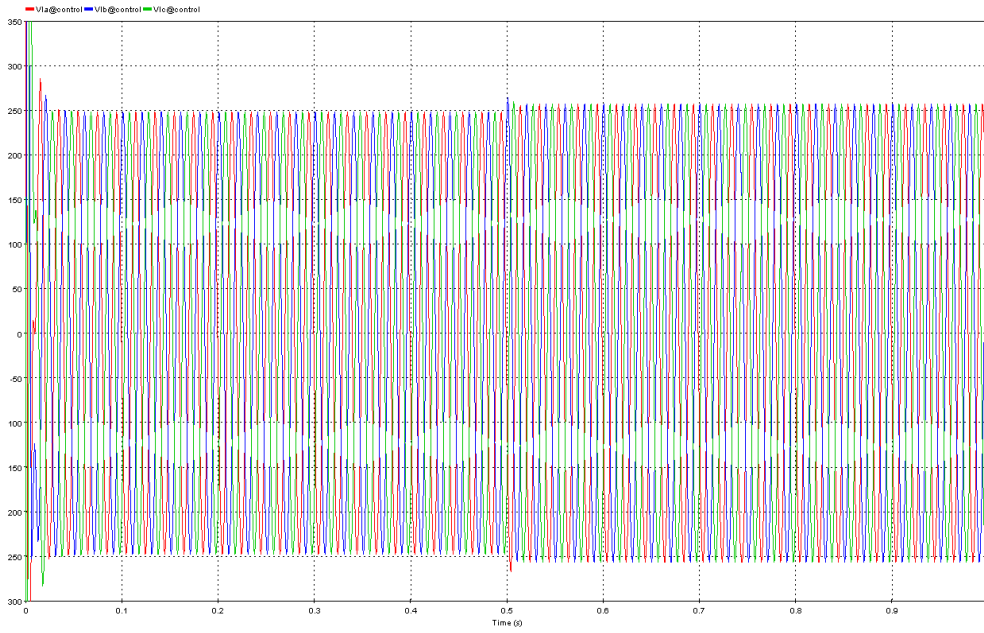


Figura 26 Tensiones de salida del convertidor en referencia *abc*.

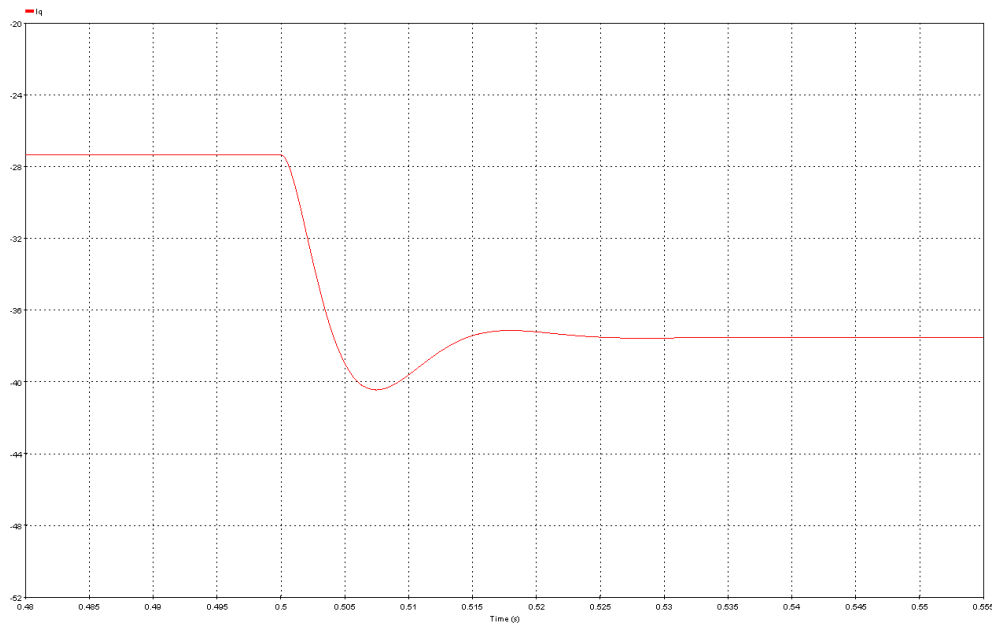


Figura 27 Detalle de la respuesta temporal del sistema en estado transitorio.



4.2. Circuitos con modulación de las tensiones del convertidor

Los circuitos de generación o almacenaje de energía eléctrica con modulación de las tensiones del convertidor simulan la misma situación que la encontrada en el *Apartado 4.1.* y siguen el mismo procedimiento, pero con el añadido de un proceso de modulación de la tensión, para conseguir una aproximación a una tensión sinusoidal a la salida del convertidor a partir de un tren de pulsos variables (PWM). Esta señal modulada controlará unos transformadores IGBT en puente completo, transformando la tensión continua del bus en tensión alterna que se inyectará en la red.

La modulación anteriormente mencionada se ha realizado de dos formas, usando la modulación CB-PWM y mediante la modulación SV-PWM.

La estructura que siguen estos circuitos se muestra en la *Figura 28.*

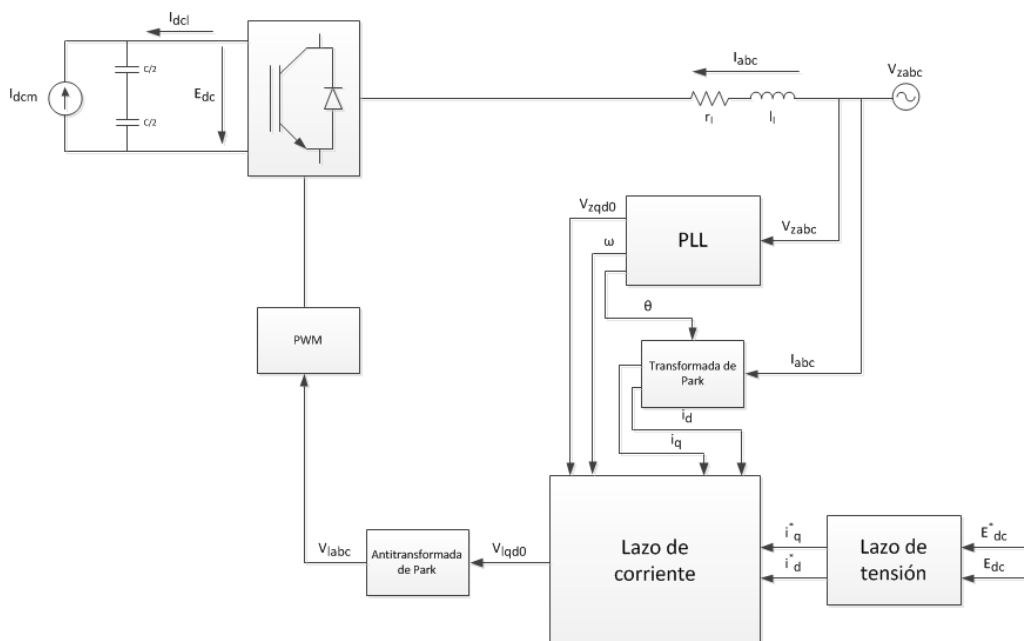


Figura 28 Estructura de los circuitos con inversor en las tensiones de salida del convertidor



4.2.1. Inversor

Con tal de generar la señal alterna que alimenta la carga se usa un inversor para convertir la energía eléctrica y generar una señal sinusoidal con amplitud y frecuencia variable a partir del bus de corriente continua del sistema.

En los modelos implementados se ha escogido un inversor trifásico de dos niveles en puente completo. Este inversor está constituido por un grupo de seis transistores de potencia, con seis diodos en anti paralelo que se alimentan de la corriente continua del bus.

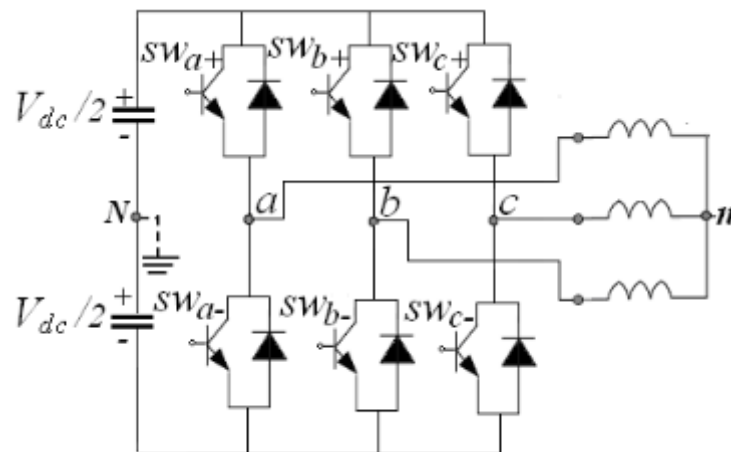


Figura 29 Estructura del inversor trifásico de dos niveles en puente completo. [2]

Cada par transistor-diodo trabaja en estado de saturación o corte, operando como un interruptor bidireccional. Los valores de tensión de los terminales de salida son de $\frac{V_{dc}}{2}$ o $-\frac{V_{dc}}{2}$ con respecto al punto eléctrico central de la fuente N, dependiendo del estado de los interruptores.

Los interruptores se controlan a partir de una secuencia de conmutación, que viene dada por una etapa previa de modulación en la que se determinan las características eléctricas de la señal de salida



4.2.2. Modulación PWM

La base de las técnicas de modulación PWM (Pulse Width Modulation o Modulación por Ancho de Pulso) es el principio de balance voltio-segundo. La amplitud y frecuencia del voltaje a la salida del inversor depende de la secuencia de pulsos generados.

Existen dos enfoques para la implementación de la modulación PWM:

- Modulación PWM basada en portadora (CB-PWM).
- Modulación PWM basada en vectores espaciales (SV-PWM).

La base teórica necesaria para la implementación de las modulaciones se ha extraído de [2].

4.2.2.1. Modulación PWM basada en portadora (CB-PWM)

En la modulación PWM basada en portadora, las señales de activación de los interruptores superiores e inferiores (S y \bar{S}) son obtenidas comparando las amplitudes de una señal de alta frecuencia denominada *portadora* y una señal de baja frecuencia denominada *moduladora* o de *referencia*.

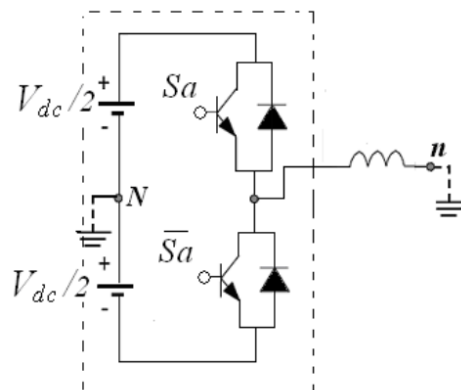


Figura 30 Esquema del circuito comparador de una fase. [2]



Para calcular dichas señales de activación (superior e inferior) solamente es requerido un único proceso de comparación, puesto que éstas son complementarias. Es decir, la señal de activación inferior \bar{S} será la superior S negada. Al considerar el inversor trifásico, se necesita realizar 3 procesos de comparación simultáneos, uno para cada fase.

Las señales de entrada al bloque modulador son el conjunto de tensiones trifásicas de salida del lazo de corriente v_a, v_b, v_c . La portadora se trata de una señal periódica triangular v_{tri} ; su frecuencia está determinada por diversos criterios, tales como el nivel de pérdidas por conmutación permitido o la velocidad de conmutación de los transistores.

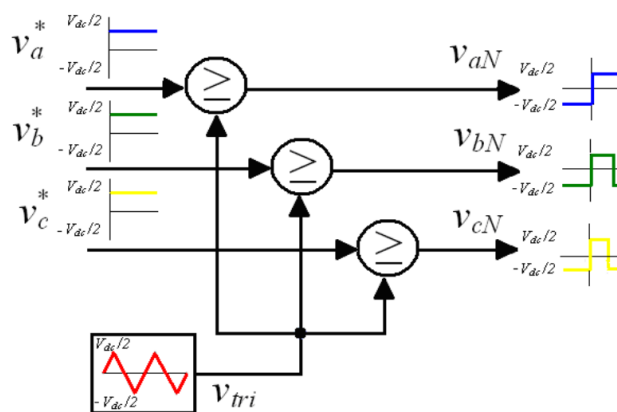


Figura 31 Estructura del modulador CB-PWM. [2]

La señal portadora define el tipo de control que se hace sobre los flancos de la señal modulada. Al ser usada una señal triangular, en cada período de portadora se generan 2 intersecciones con la moduladora, permitiendo el control tanto del flanco de subida como del flanco de bajada de los pulsos resultantes; esta variación se denomina *Double Edge PWM*.

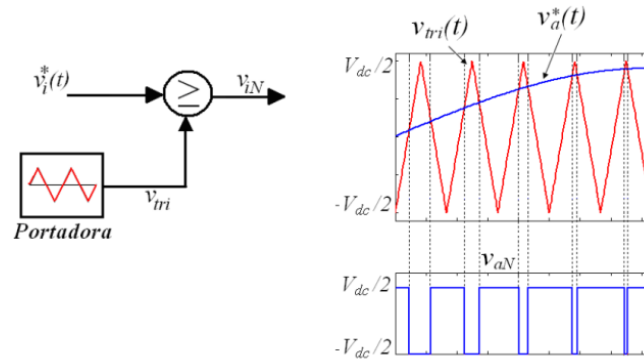


Figura 32 Comparación entre la señal portadora y la señal moduladora. [2]

La señal moduladora contiene la información de amplitud, frecuencia y fase deseadas; es por eso que se la conoce también como señal de referencia. En el sistema implementado, como se ha mencionado anteriormente, se trata de una señal sinusoidal proveniente del lazo de corriente. Las señales de fase están desfasadas 120° .

El *índice de modulación de frecuencias* (N) relaciona la frecuencia de la señal portadora f_s con la frecuencia de la señal moduladora f_m .

$$N = \frac{f_s}{f_m} = \frac{w_s}{w_m}$$

Un alto índice de frecuencias permite obtener un gran número de pulsos por período, ubicando a los armónicos indeseables en altas frecuencias asegurando así que éstos no afecten al funcionamiento normal del sistema y facilitando en gran medida el proceso de filtrado en caso de ser necesario, lo que a su vez facilita el diseño de los circuitos encargados de filtrarlos. No obstante, un elevado índice de frecuencias provoca también un elevado número de conmutaciones de los transistores lo que supone un incremento notable en las pérdidas por conmutación del sistema. Por lo tanto, el valor de N debe ser seleccionado de acuerdo a la aplicación específica. La N escogida para este sistema es de 400.

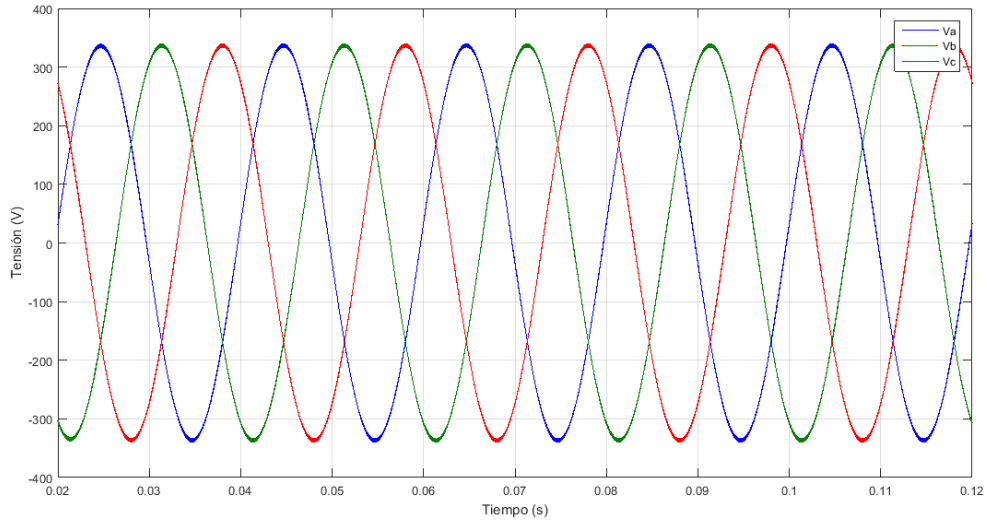


Figura 33 Señal moduladora sinusoidal.

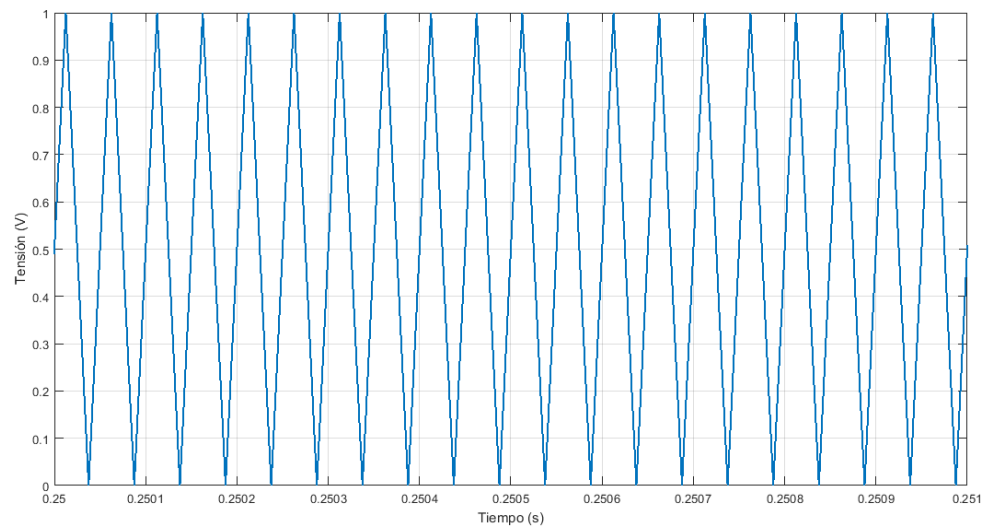


Figura 34 Señal portadora triangular.

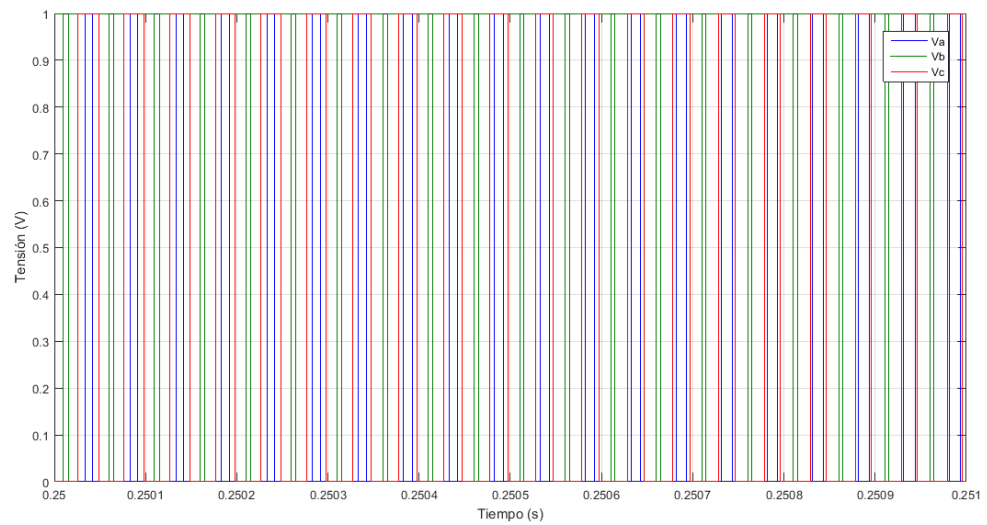


Figura 35 Señal modulada a la salida del PWM.



4.2.2.2. Modulación PWM basada en vectores espaciales (SV-PWM)

La modulación SV-PWM está basada en la interacción entre las tres fases y el uso de un modulador único para el *vector espacial de voltaje* del conjunto trifásico, en lugar de modular cada fase por separado.

Este *vector espacial de voltaje* $\vec{V}^*(t)$ se obtiene mediante la transformada de Clarke (explicada en el *Apartado 3.1.*) sobre el conjunto trifásico de señales moduladoras de fase. Dado que es un sistema balanceado de señales sinusoidales, $\vec{V}^*(t)$ rota en el plano $\alpha\beta$ describiendo una trayectoria circular manteniendo constante su amplitud.

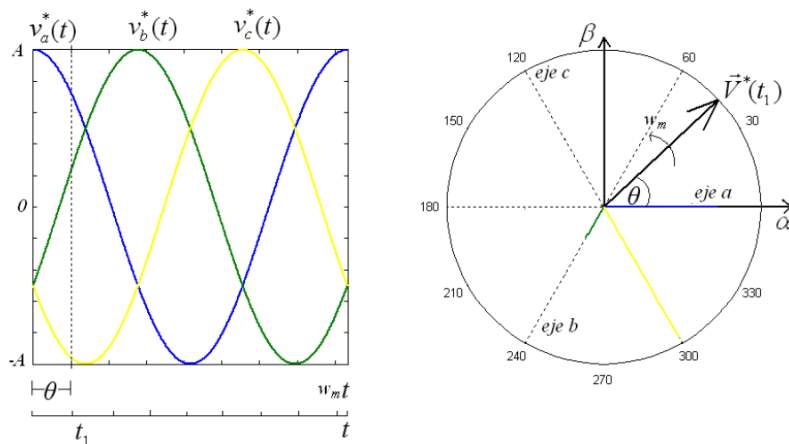


Figura 36 Obtención del vector espacial de referencia. [2]

En el caso del inversor, sus estados de funcionamiento se pueden representar dependiendo de sus voltajes instantáneos de fase mediante el vector espacial $\vec{v}_s(t)$, que puede tomar diferentes valores. Este conjunto de vectores se clasifica en dos grupos, los vectores \vec{V}_0 y \vec{V}_7 corresponden al grupo de vectores nulos o cero y los vectores de \vec{V}_1 a \vec{V}_6 corresponden al grupo de vectores activos o básicos. El voltaje que los vectores cero aplican a la carga es nulo, mientras que los vectores activos poseen igual magnitud y están desfasados mutuamente por un ángulo de $\frac{\pi}{3}$. Los vectores activos dividen el



plano $\alpha\beta$ en seis sectores (I-VI) formando los ejes de un hexágono, conocido como el hexágono del inversor.

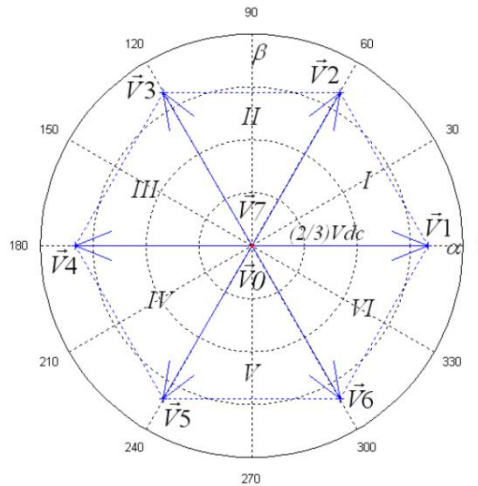


Figura 37 Hexágono de tensiones de fase del inversor. [2]

El fundamento de la modulación SV-PWM es la aproximación de una versión del vector espacial de voltaje de referencia $\vec{V}^*(t)$, muestreada en intervalos T_s , mediante la combinación óptima de los vectores espaciales del inversor.

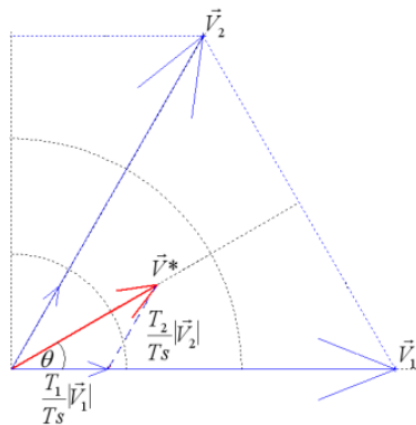


Figura 38 Síntesis del vector de referencia en el sector I. [2]



Como se aprecia en la figura anterior, la aproximación del vector de referencia implica la generación de dos vectores promedio en el inversor, con ciertas amplitudes e inclinaciones. Para generar las amplitudes medias de dichos vectores en el periodo de conmutación T_s , es necesario aplicar los vectores básicos V_1 y V_2 durante intervalos o secciones de T_s . Estos intervalos corresponden a los tiempos T_1 y T_2 .

La modulación PWM basada en Vectores Espaciales presenta diversas ventajas frente a la modulación PWM basada en portadora. A diferencia de la solución basada en portadora donde eran necesarios tres procesos de modulación simultáneos, usando vectores espaciales tan solo se requiere un único proceso de modulación. Esto implica una reducción en la carga computacional en el momento de la implementación. Por otro lado, la modulación SV-PWM es inherentemente regular. Además, no necesita circuitos adicionales para la generación de señales portadoras.

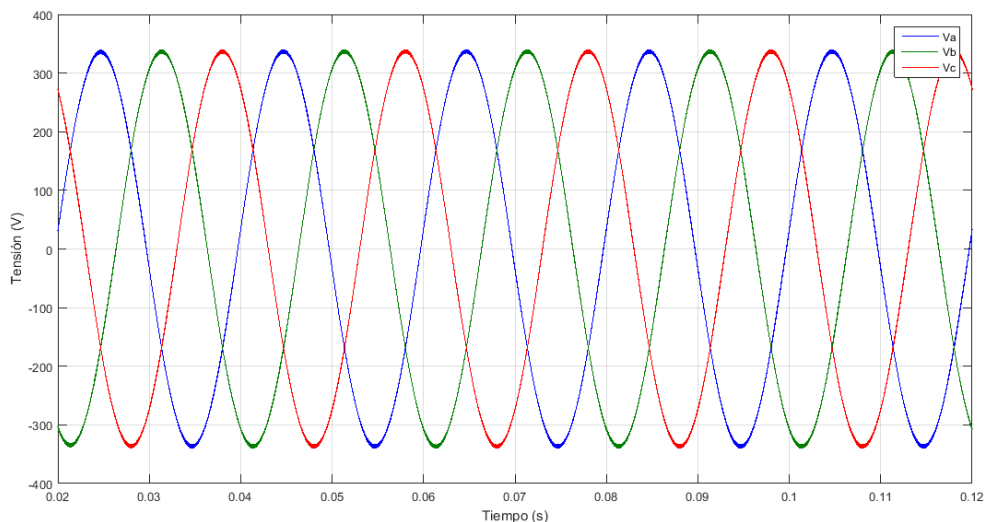


Figura 39 Señal a modular a la entrada del PWM.

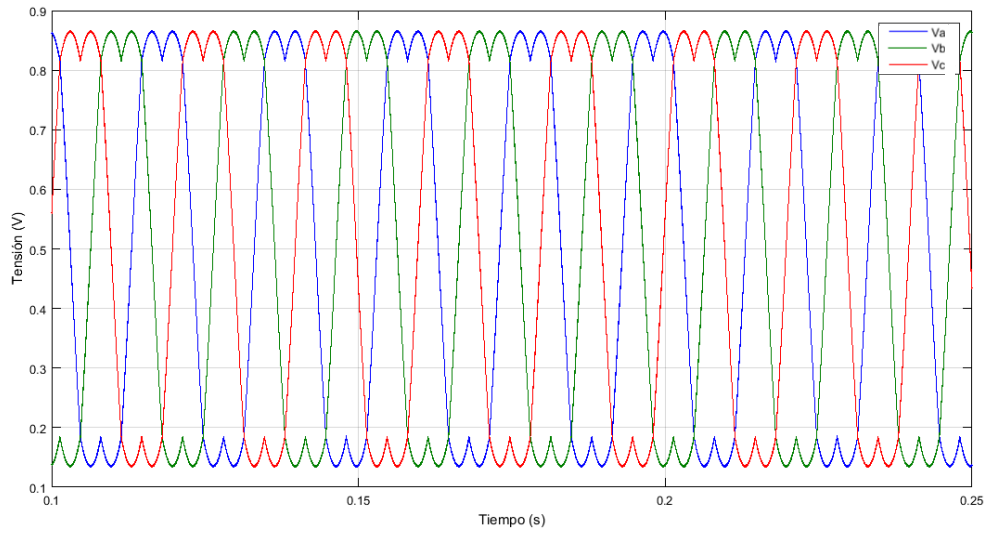


Figura 40 Señal intermedia del PWM.

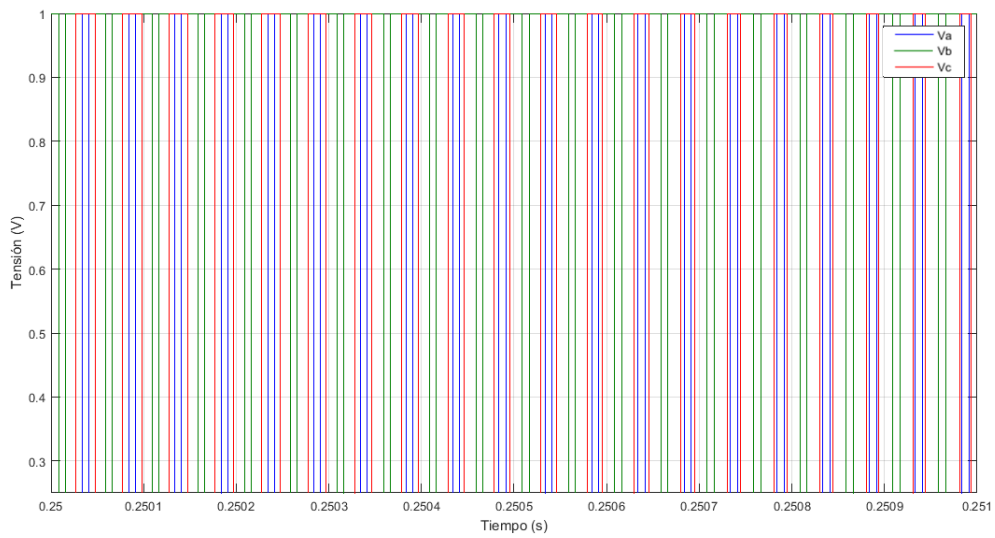


Figura 41 Señal modulada a la salida del PWM.



4.2.3. Circuito con inversor y modulación CB-PWM

Los valores usados para las simulaciones se encuentran listados a continuación.

Parámetros del circuito	PWM	Control
	$N = 400$	$\xi = 0.707$
$L = 5.4\text{mH}$	$T_e = \frac{2\pi}{\omega_e}\text{s}$	$\omega_n = 418.88\frac{\text{rad}}{\text{s}}$
$R = 0.5\Omega$	$T_s = \frac{T_e}{N}\text{s}$	$E_m = \sqrt{2} \cdot 230\text{V}$
$C = 1020\mu\text{F}$	$\omega_m = \omega_e$	$K_P = 1.8209$
$V = \sqrt{2} \cdot 230\text{V}$		$\tau_{\text{PLL}} = 0.0033755899\text{s}$
$\tau = 0.001\text{s}$		
$I_{\text{dcm}} = 12.5\text{A}$		
$E_{\text{dc}}^* = 800\text{V}$		
$\omega_e = 50 \cdot 2\pi\frac{\text{rad}}{\text{s}}$		
$\xi_e = 0.9$		

4.2.3.1. Resultados de la simulación con Simulink

Los resultados obtenidos tras la simulación del modelo mediante el software *Simulink* se muestran a continuación.

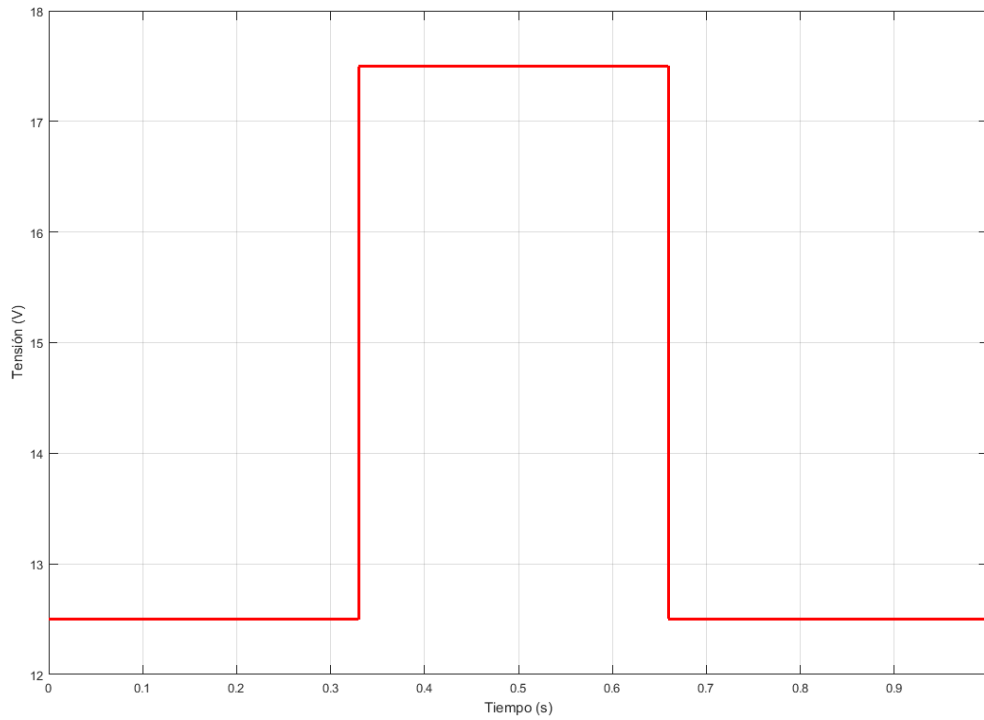


Figura 42 Intensidad I_{dc} inyectada al bus de continua.

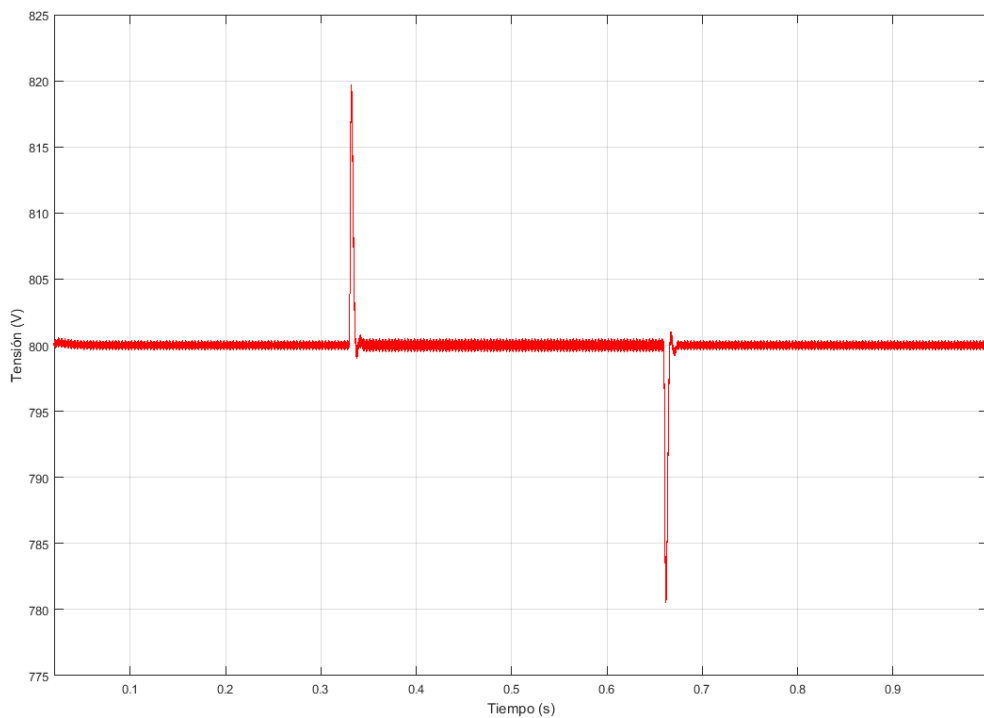


Figura 43 Tensión E_{dc} del bus de continua.

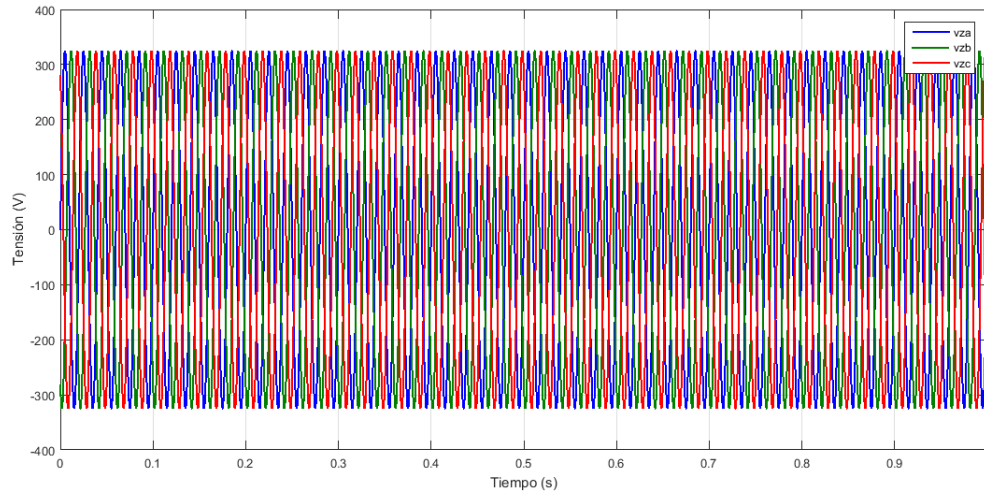


Figura 44 Tensión de la red en referencia *abc*.

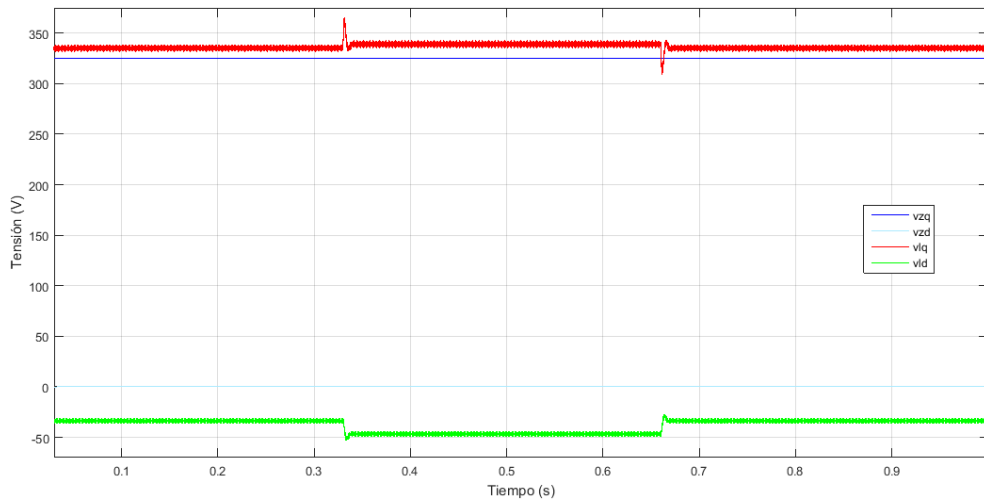


Figura 45 Tensiones de la carga y de la red en referencia *qd0*.

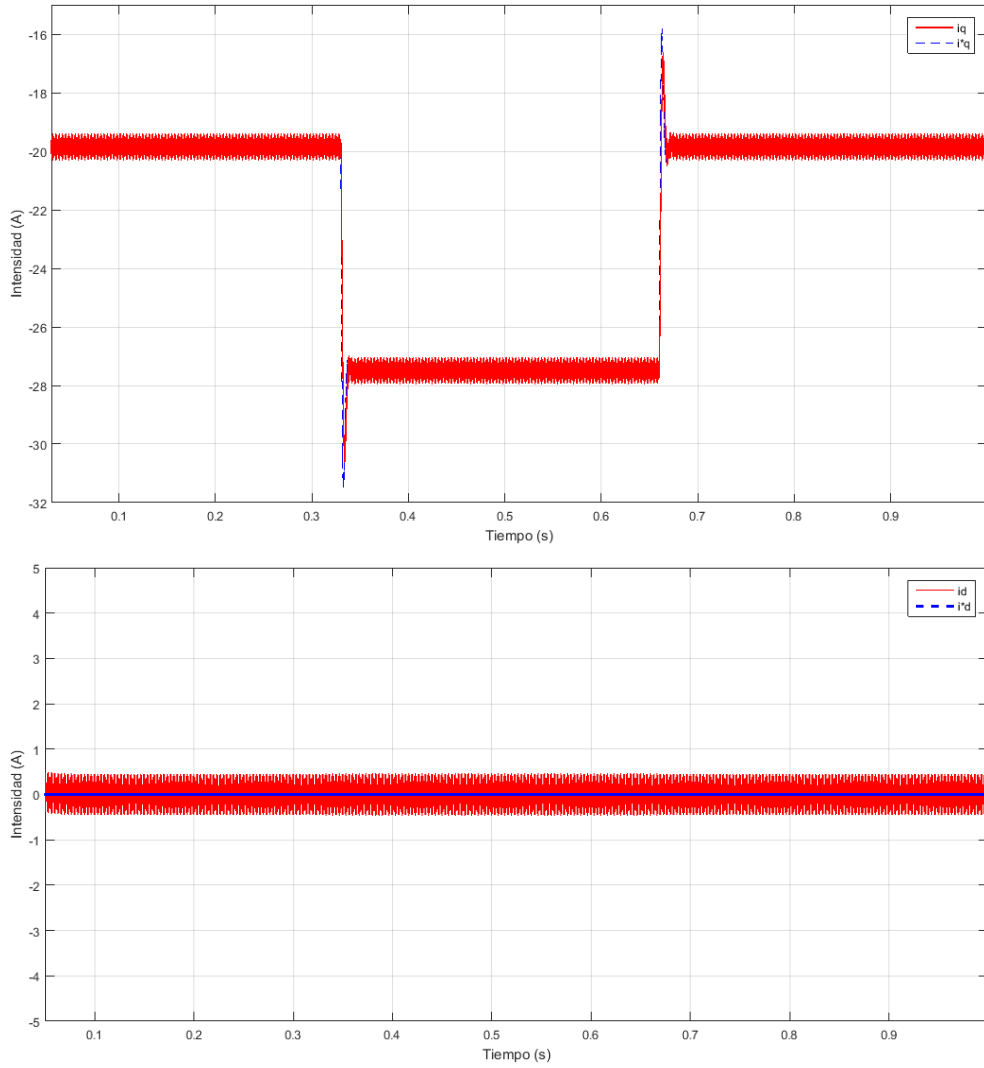


Figura 46 Intensidades reales y de referencia en referencia $qd0$.

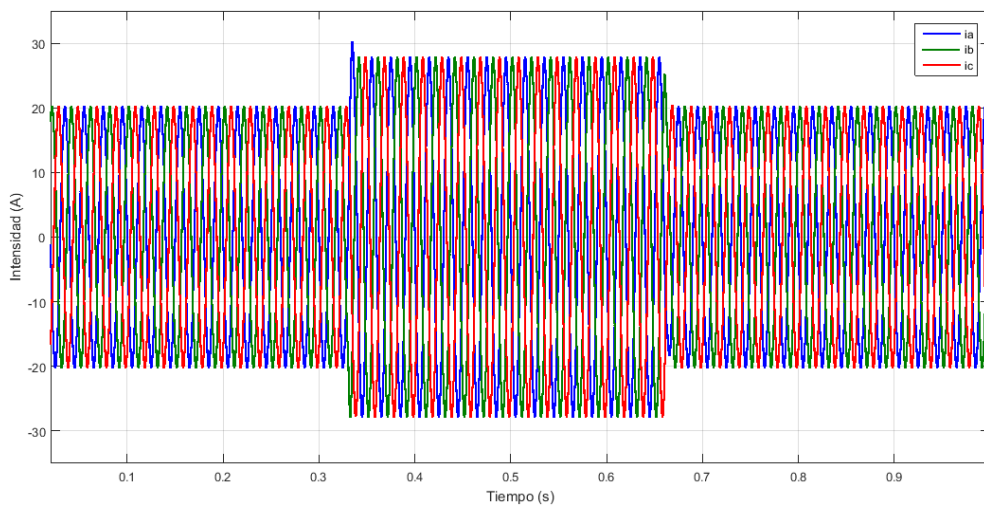


Figura 47 Intensidades de la carga en referencia abc .

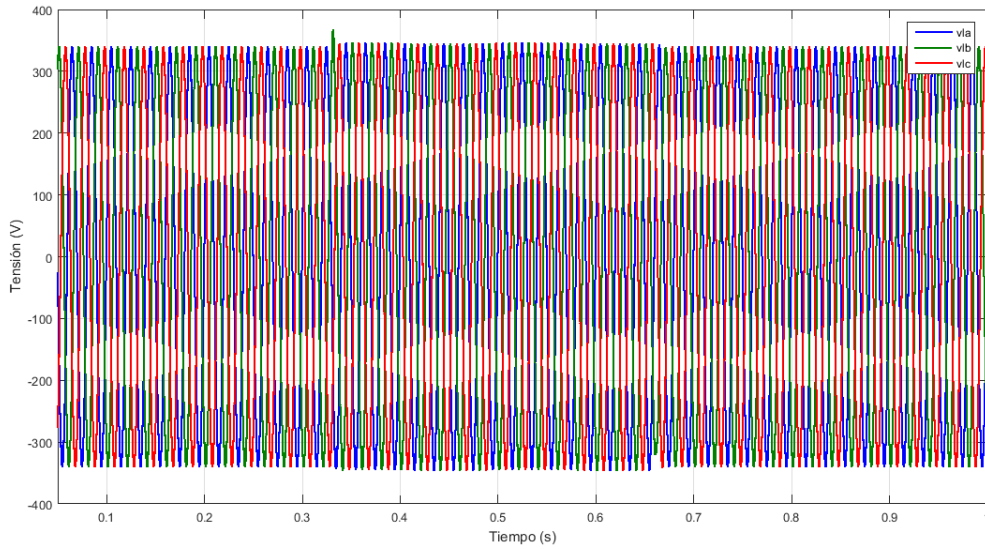


Figura 48 Tensiones de salida del convertidor en referencia *abc*.

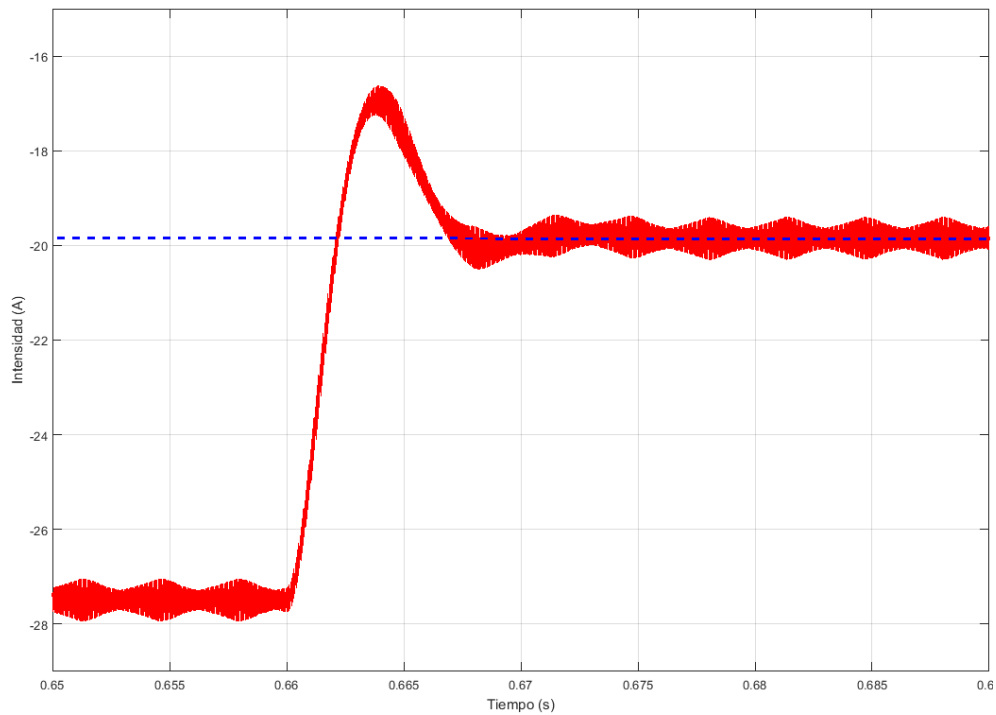


Figura 49 Detalle de la respuesta temporal del sistema en estado transitorio.

Como se puede apreciar en las gráficas anteriores, los resultados son iguales a los de la primera simulación, con la diferencia de que en este caso ha aparecido un rizado en las señales. Esto se debe a la introducción del inversor en el sistema y a la conmutación de los transistores IGBT. El sistema sigue cumpliendo con la respuesta temporal prevista.



4.2.3.2. Resultados de la simulación con EMTP-RV

Los resultados obtenidos tras la simulación del modelo mediante el software *EMTP-RV* se muestran a continuación.

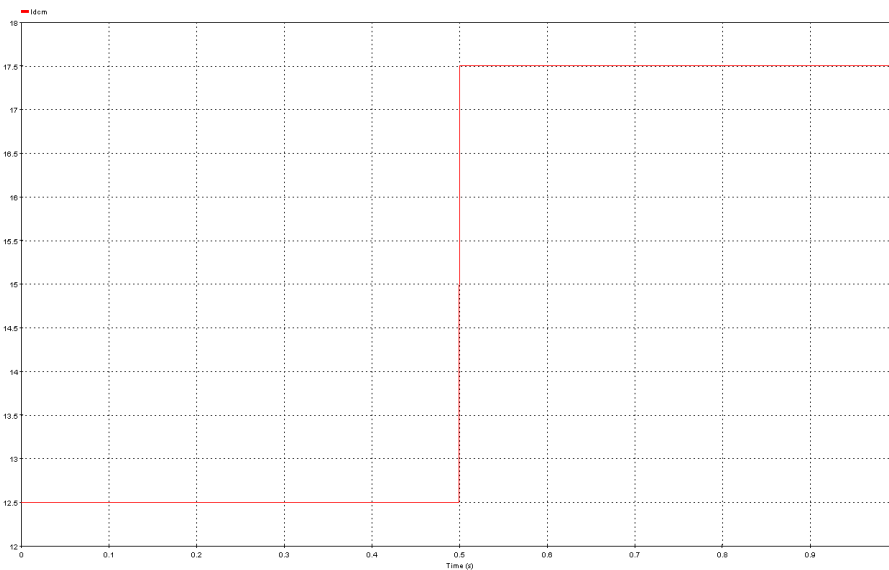


Figura 50 Intensidad I_{dcm} inyectada al bus de continua.

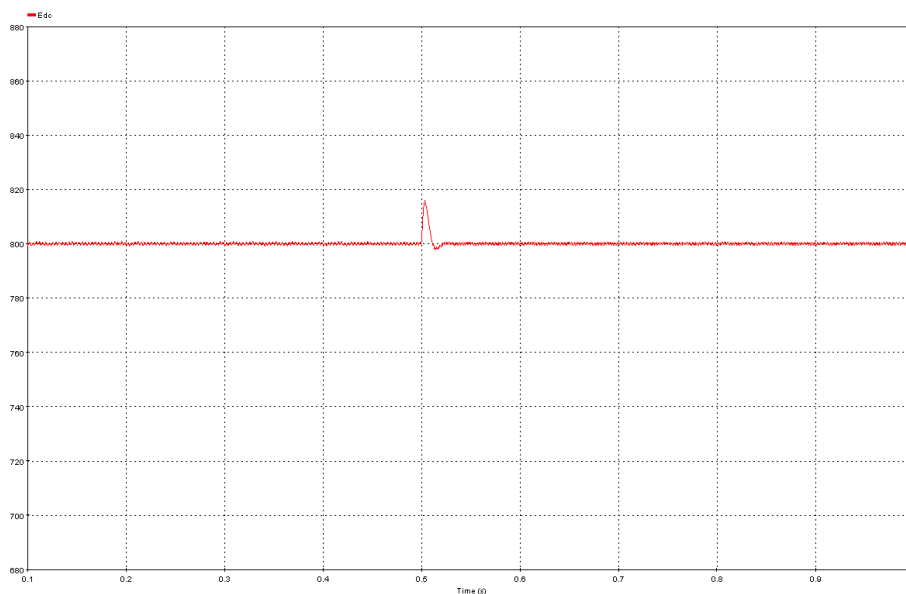


Figura 51 Tensión E_{dc} del bus de continua.

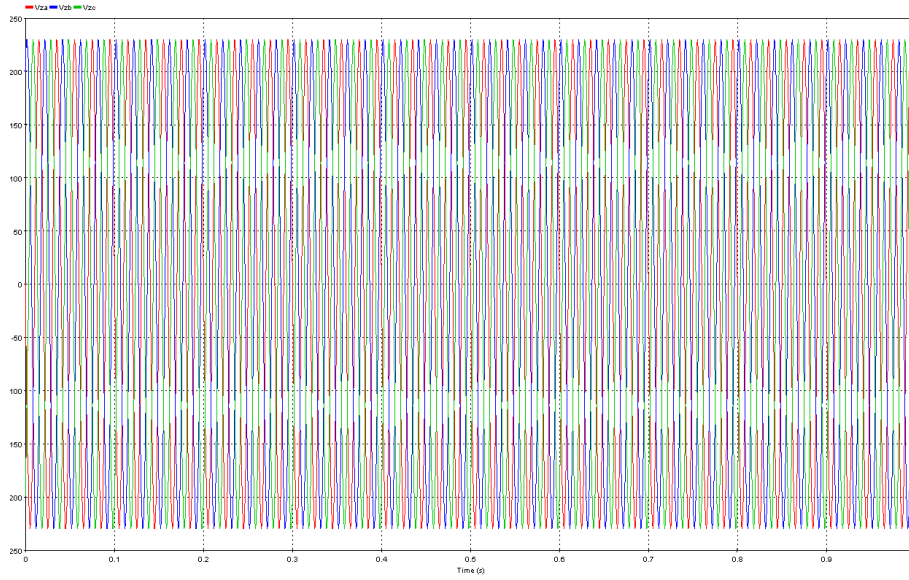


Figura 52 Tensión de la red en referencia *abc*.

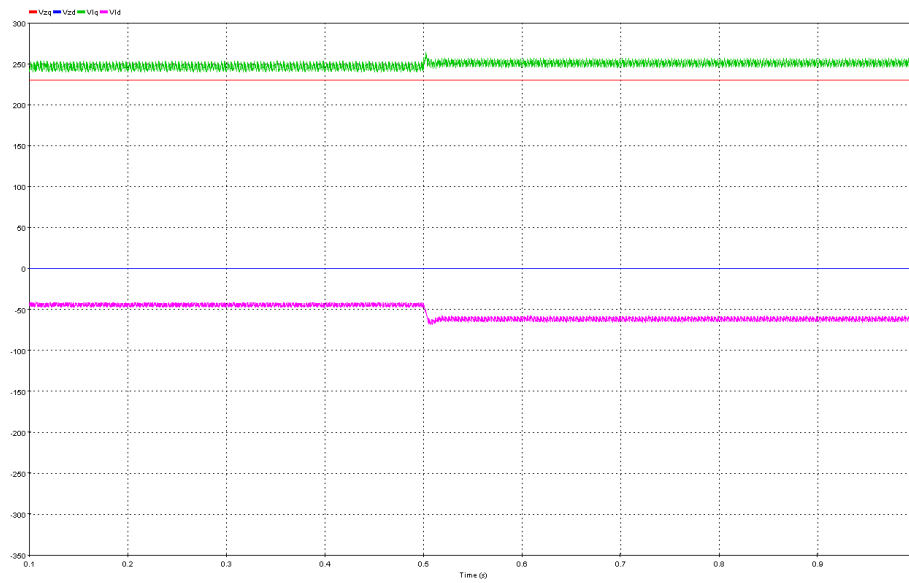


Figura 53 Tensiones de la carga y de la red en referencia *qd0*.

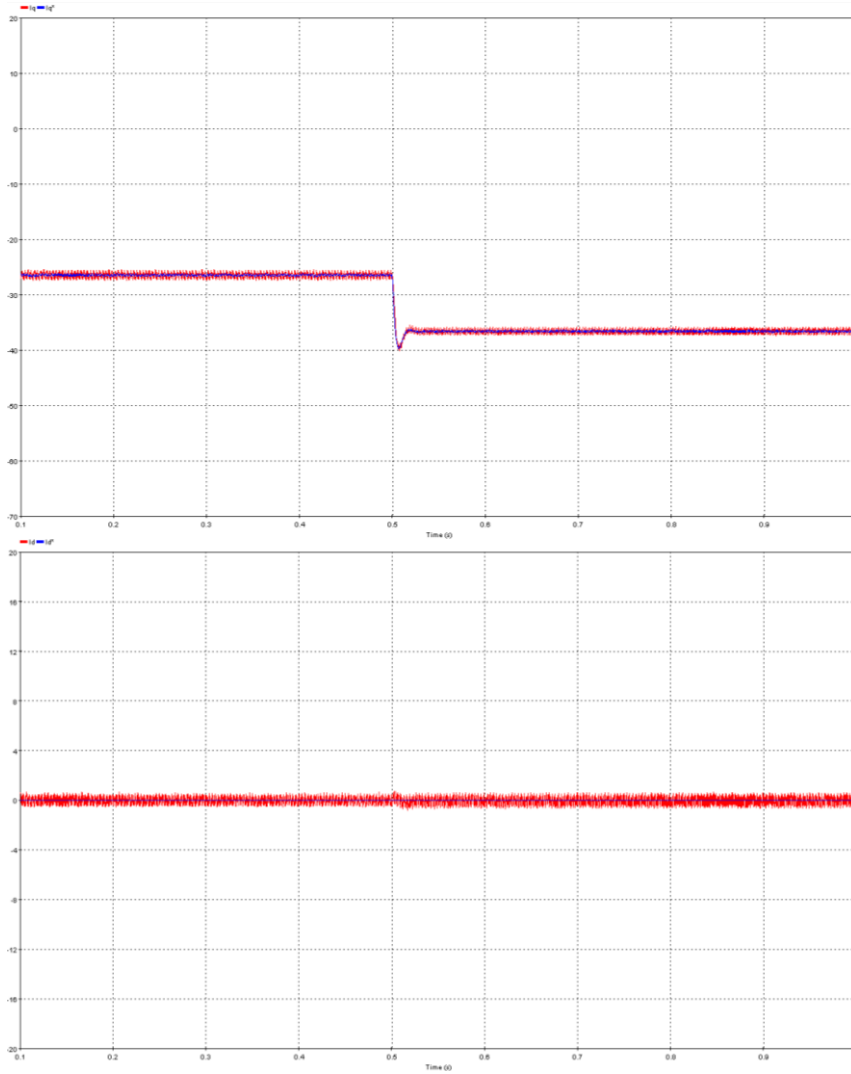


Figura 54 Intensidades reales y de referencia en referencia $qd0$.

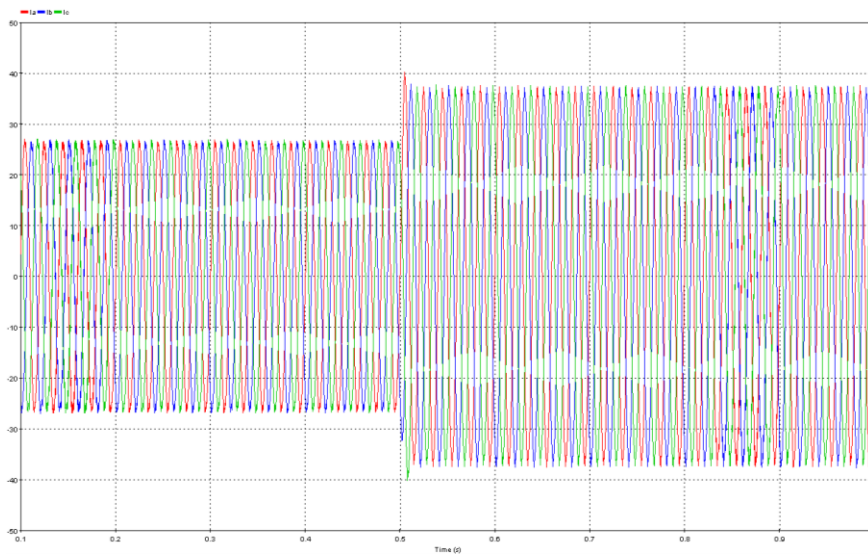


Figura 55 Intensidades de la carga en referencia abc .

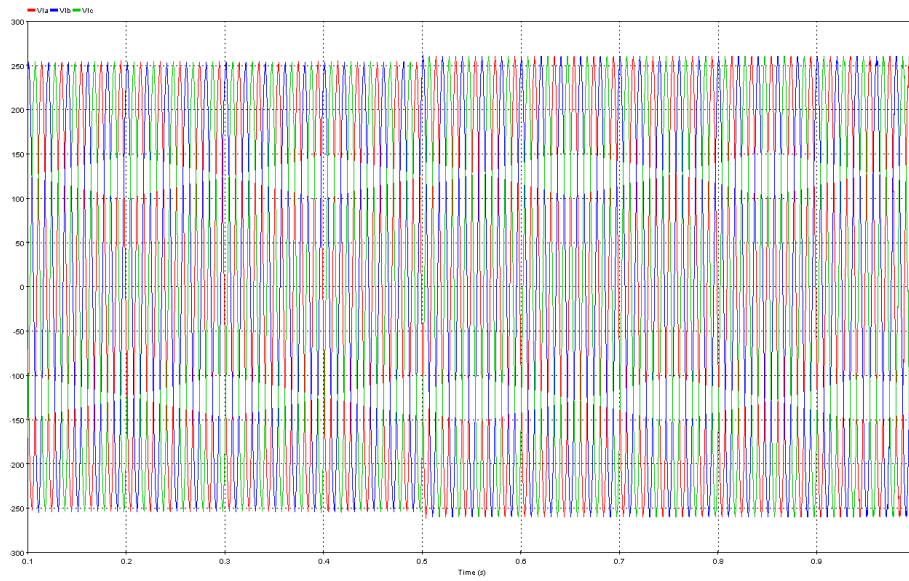


Figura 56 Tensiones de salida del convertidor en referencia *abc*.

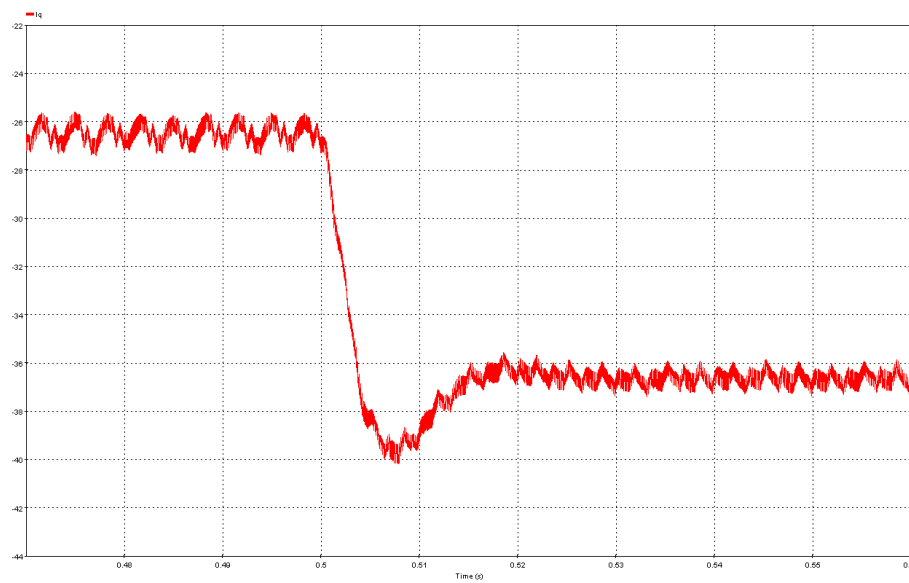


Figura 57 Detalle de la respuesta temporal del sistema en estado transitorio.



4.2.4. Circuito con inversor y modulación SV-PWM

Este circuito tan solo se ha simulado mediante *Simulink* debido a la complejidad del sistema de control y funciones matemáticas necesarias para implementar la modulación. Debido a la escasa multifuncionalidad en diferentes dominios del *EMTP-RV* se ha decidido no implementarlo en este software. Los valores usados para las simulaciones se encuentran listados a continuación.

Parámetros del circuito	PWM	Control
	$N = 400$	$\xi = 0.707$
$L = 5.4\text{mH}$	$T_c = \frac{2\pi}{\omega_e}S$	$\omega_n = 418.88\frac{\text{rad}}{s}$
$R = 0.5\Omega$	$T_s = \frac{T_e}{N}S$	$E_m = \sqrt{2} \cdot 230V$
$C = 1020\mu\text{F}$	$\omega_m = \omega_e$	$K_P = 1.8209$
$V = \sqrt{2} \cdot 230V$		$\tau_{PLL} = 0.0033755899s$
$\tau = 0.001s$		
$I_{\text{dcm}} = 12.5A$		
$E_{\text{dc}}^* = 800V$		
$\omega_e = 50 \cdot 2\pi\frac{\text{rad}}{s}$		
$\xi_e = 0.9$		

Resultados de la simulación

Este circuito tan solo se ha simulado mediante el software *Simulink*. Los resultados obtenidos tras dicha simulación se muestran a continuación.

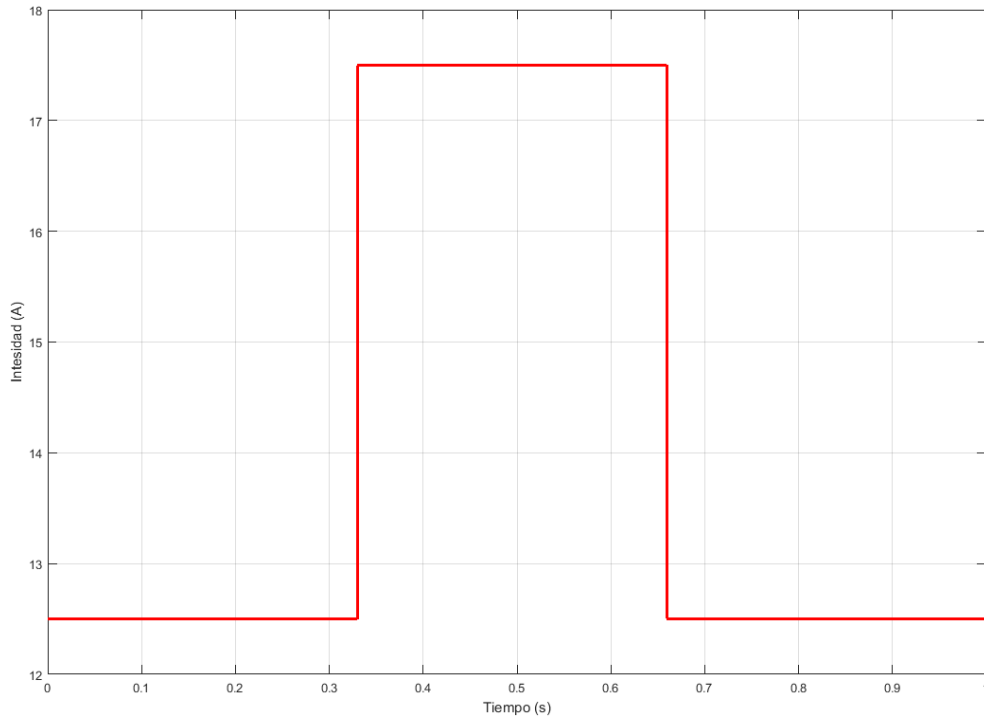


Figura 58 Intensidad I_{dcm} inyectada al bus de continua.

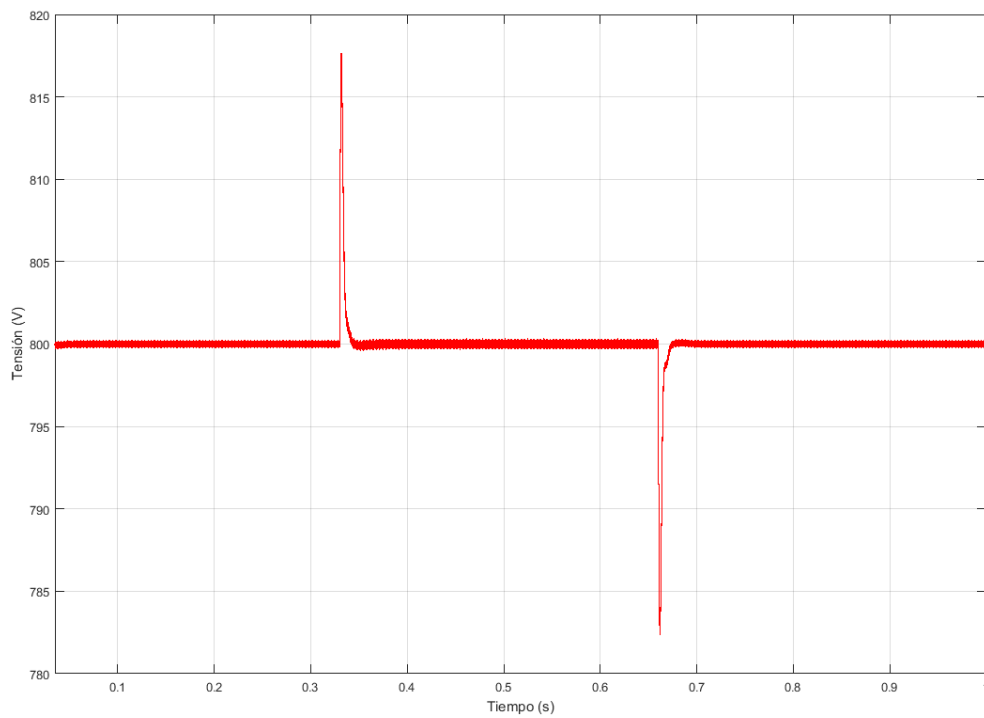


Figura 59 Tensión E_{dc} del bus de continua.

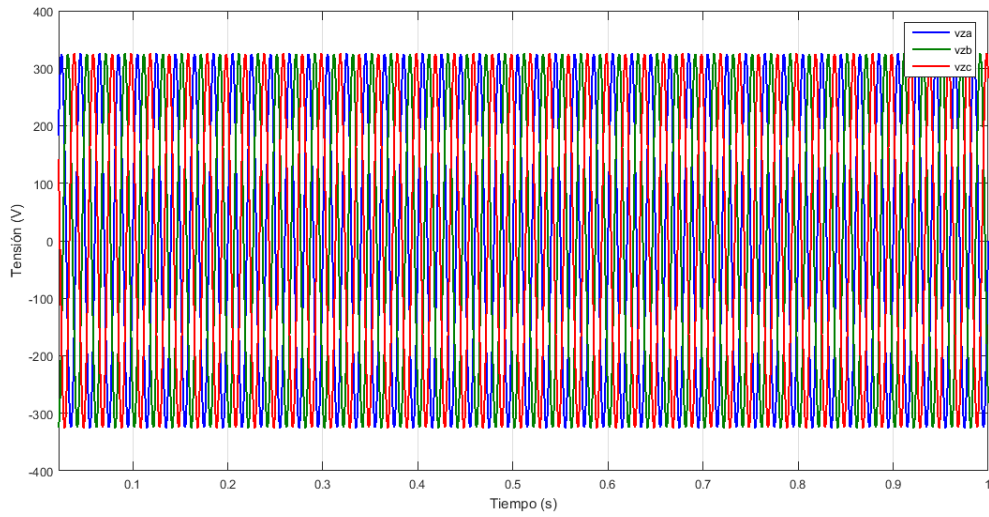


Figura 60 Tensión de la red en referencia *abc*.

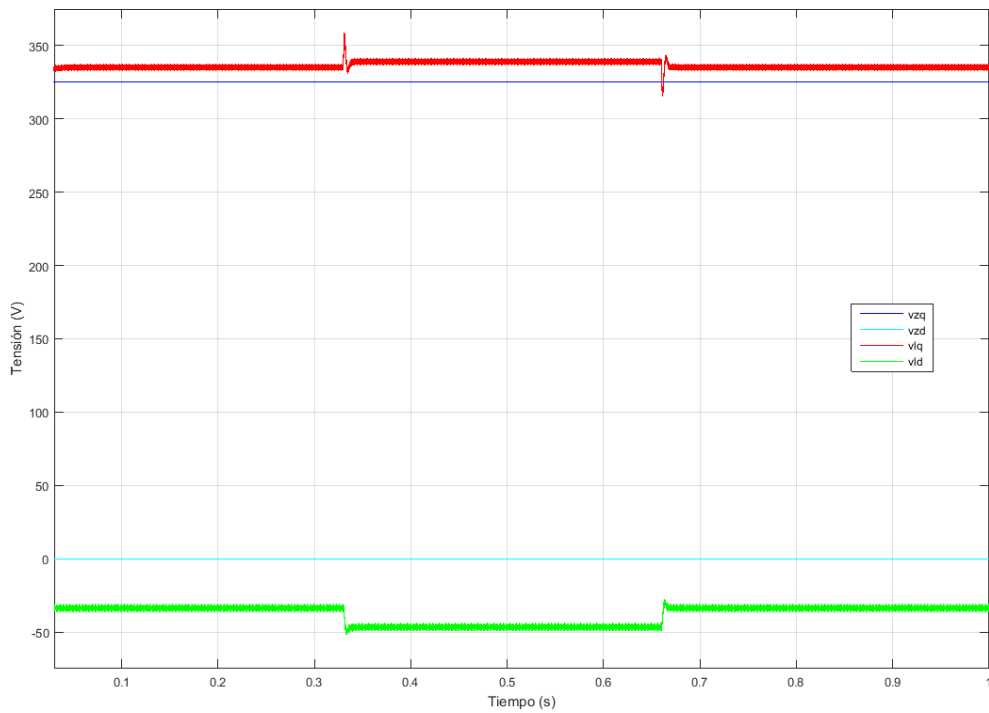


Figura 61 Tensiones de la carga y de la red en referencia *qd0*.

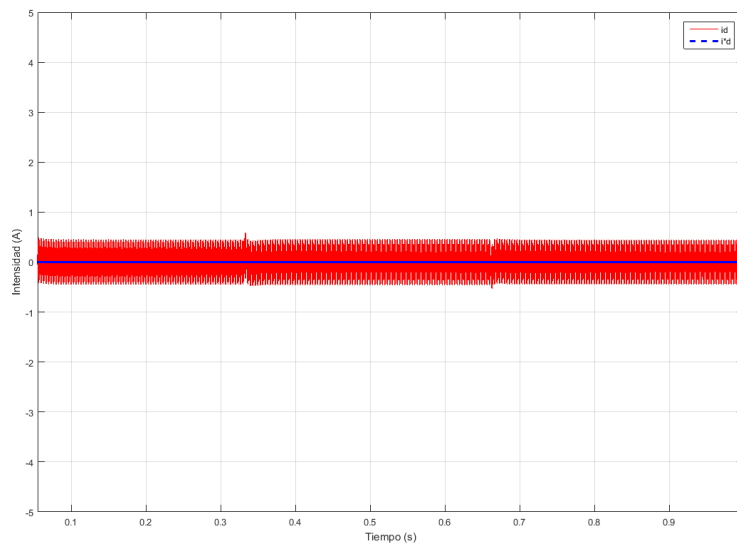
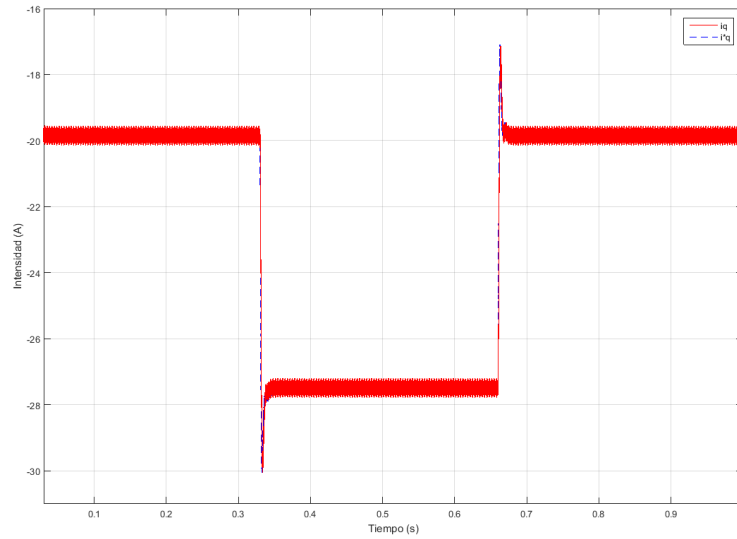


Figura 62 Intensidades reales y de referencia en referencia $qd0$.

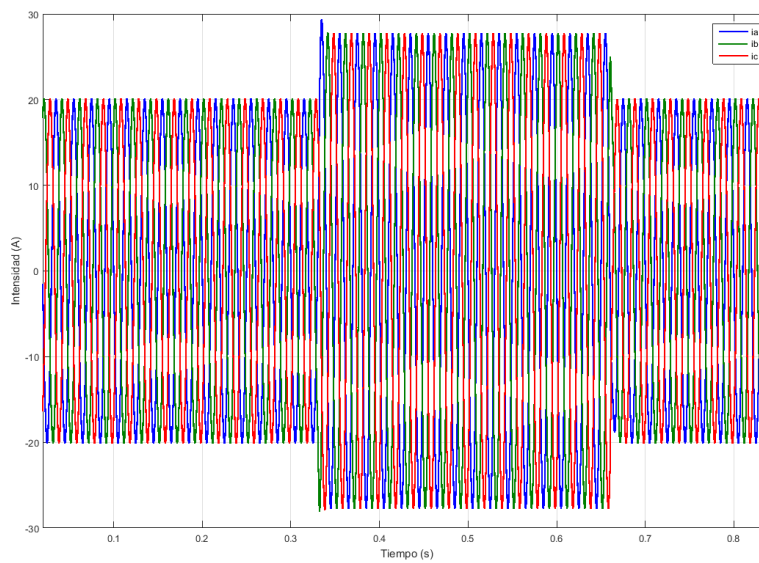


Figura 63 Intensidades de la carga en referencia abc .

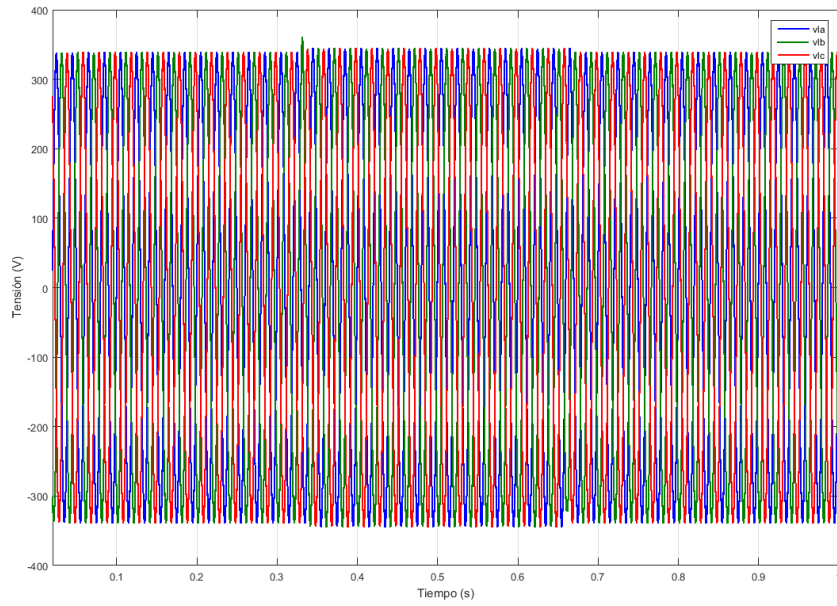


Figura 64 Tensiones de salida del convertidor en referencia *abc*.

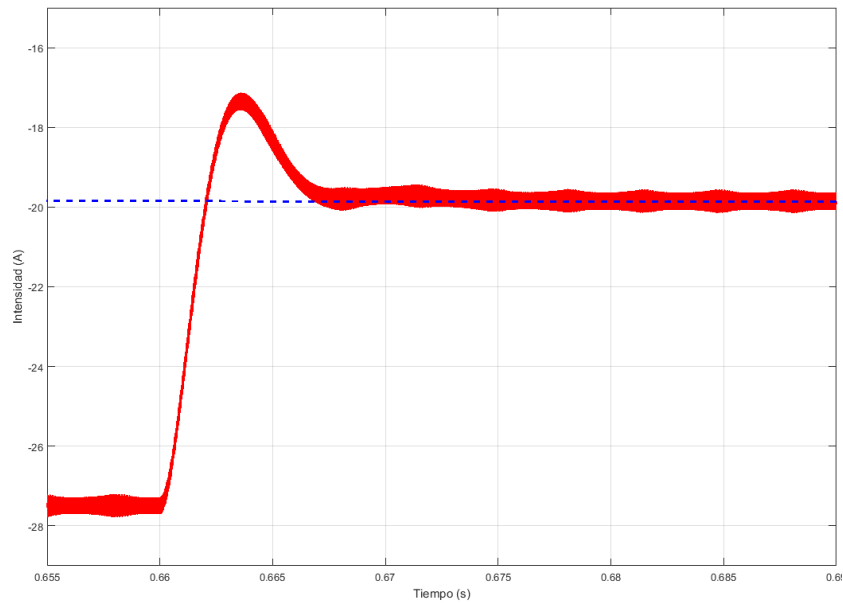


Figura 65 Detalle de la respuesta temporal del sistema en estado transitorio.

Los resultados se mantienen, así como el tiempo de respuesta del sistema. Las señales siguen manteniendo el rizado propio de la conmutación de los transistores IGBT en el inversor.



5. Circuito de enlace entre dos redes eléctricas

En este apartado se busca implementar una conexión *back-to-back* que se puede servir tanto para enlaces HVDC como para conectar redes a diferentes frecuencias. El circuito de enlace entre dos redes eléctricas con diferentes parámetros eléctricos está formado por dos convertidores VSC. En este caso las variables de entrada o *inputs* del sistema son las potencias, activa y reactiva, que se transfieren mediante el bus de continua entre una red y la otra.

El lazo de tensión del primer convertidor se realimentará con la tensión E_{dc} del bus de continua, asegurando que ésta se mantenga en el valor de referencia $-800V$. Por otro lado, el segundo convertidor se encarga de asegurar el balance de potencias en el bus. La inyección de las tensiones del convertidor al bus se realiza de forma ideal como en el *Apartado 4.1*.

Las intensidades I_{dcm} e I_{dcl} propias de las fuentes de corriente del bus de continua se autoregulan para que el balance de potencias sea efectivo. De esta forma, el valor instantáneo de las mismas será la división entre la potencia instantánea de la red respectiva a cada fuente entre la tensión E_{dc} del bus.

El acoplamiento se produce entre, en primer lugar, una red trifásica de $127V$ y $60Hz$ mientras y, en segundo lugar, una de $230V$ y $50Hz$.

Durante la simulación el valor de la entrada P^* se modificó para comprobar la respuesta del sistema. La simulación empieza con un valor de $10kW$ hasta el instante $0.33s$, en el cambia a $15kW$. En el instante $0.66s$ retorna a su valor inicial de $10kW$. Se considera que la potencia reactiva transferida es nula, por lo que el valor de Q^* de referencia será cero.



La estructura del modelo se muestra en la *Figura 66*.

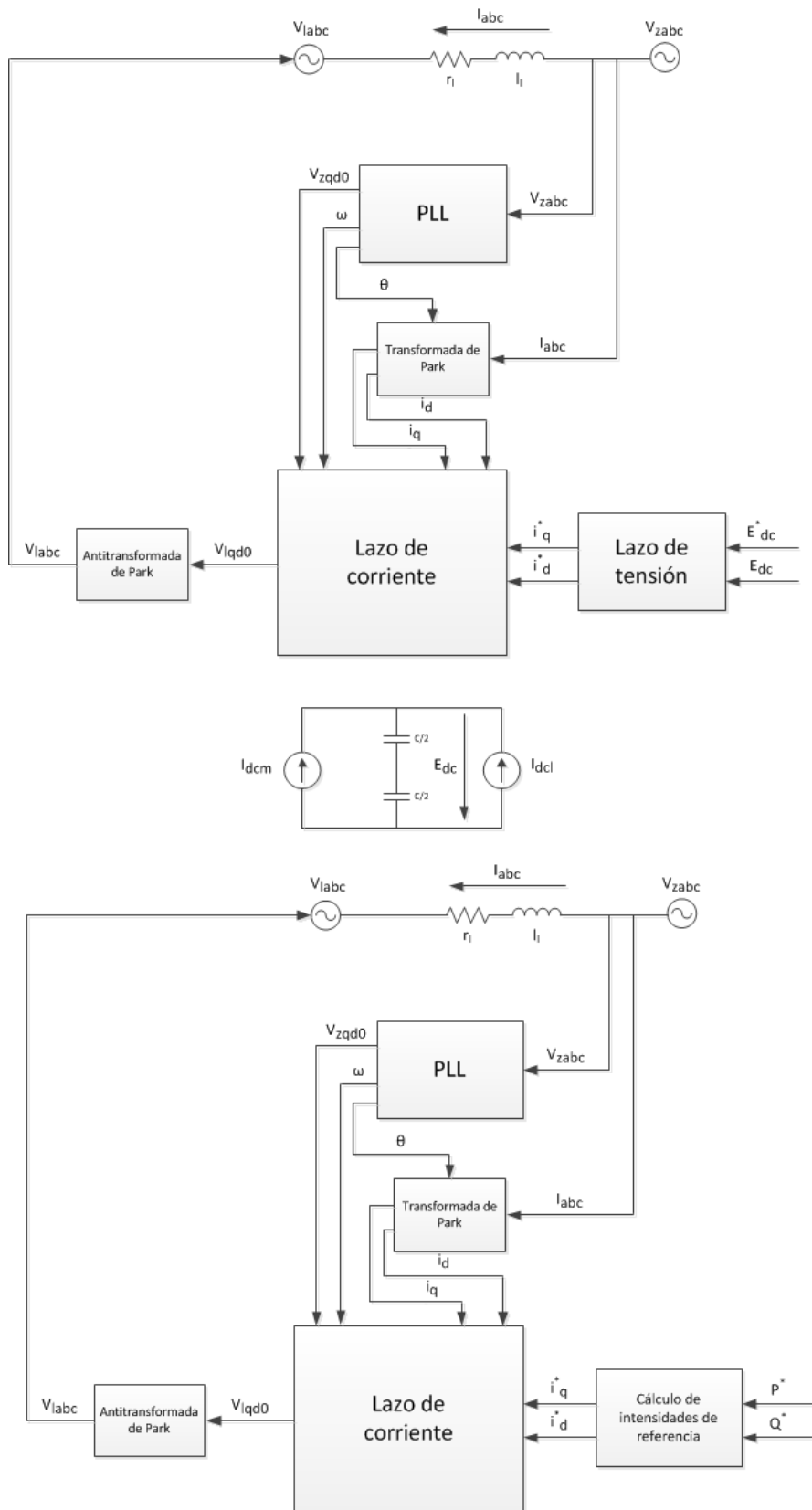


Figura 66 Circuito de enlace entre dos redes eléctricas.



Los valores usados para las simulaciones se encuentran listados a continuación.

Parámetros del circuito

$$L = 5.4\text{mH}$$

$$R = 0.5\Omega$$

$$C = 1020\mu\text{F}$$

$$V_1 = \sqrt{2} \cdot 127\text{V}$$

$$V_2 = \sqrt{2} \cdot 230\text{V}$$

$$\omega_{e1} = 60 \cdot 2\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\omega_{e2} = 50 \cdot 2\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\tau = 0.001\text{s}$$

$$I_{\text{dcm}} = 12.5\text{A}$$

$$E_{\text{dc}}^* = 800\text{V}$$

$$\xi_e = 0.9$$

Control

$$\xi = 0.707$$

$$\omega_n = 418.88 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$E_m = \sqrt{2} \cdot 230\text{V}$$

$$K_p = 1.8209$$

$$\tau_{\text{PLL}} = 0.0033755899\text{s}$$

5.1. Resultados de la simulación con Simulink

Los resultados obtenidos tras la simulación del modelo mediante el software *Simulink* se muestran seguidamente.

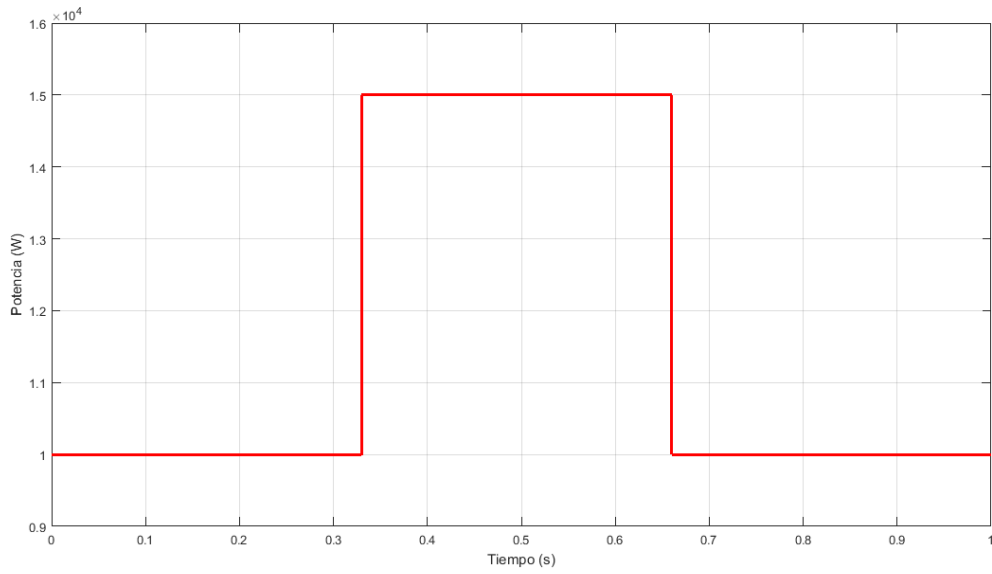


Figura 67 Potencia transferida ente las redes eléctricas.

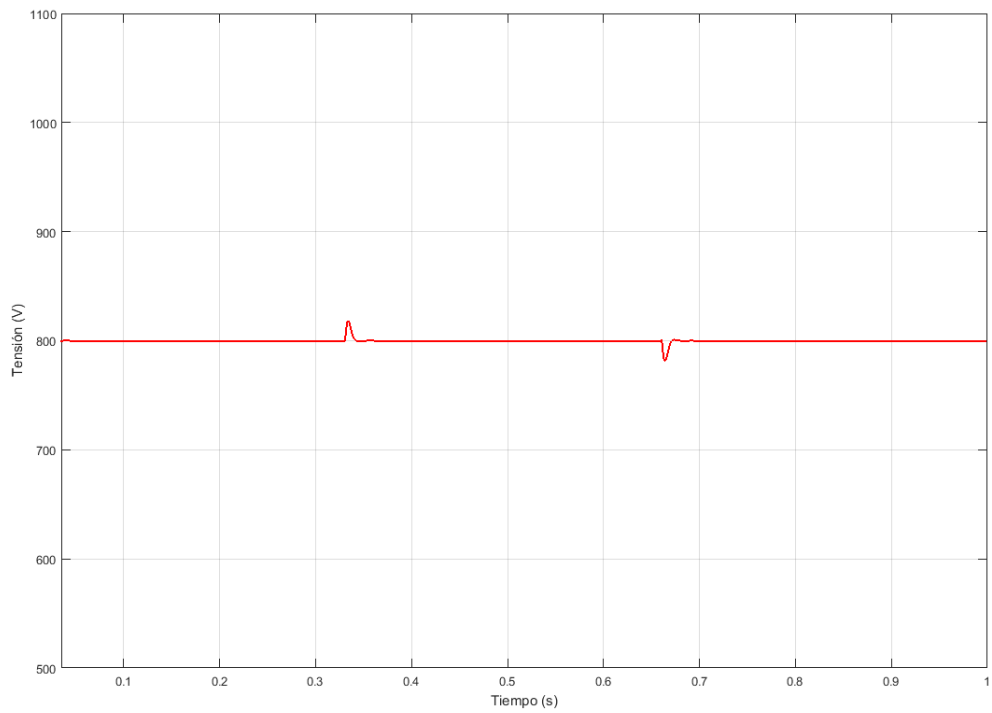


Figura 68 Tensión E_{dc} del bus de continua.

A continuación se muestran los valores obtenidos de la primera red.

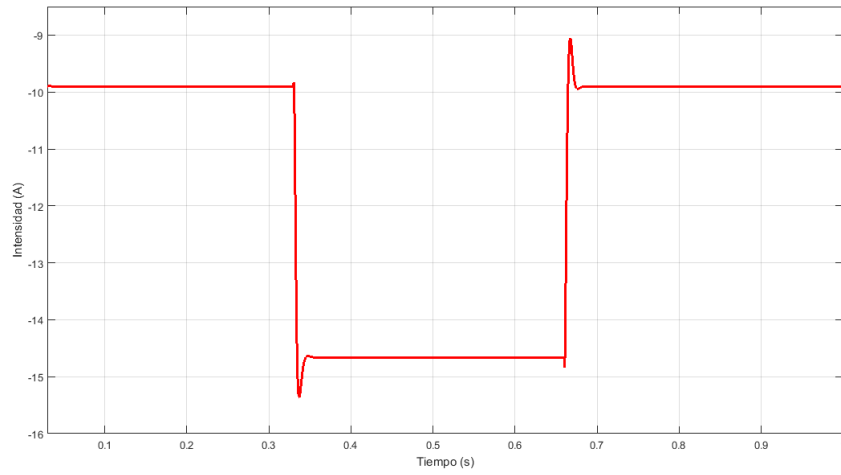


Figura 69 Intensidad I_{dc} inyectada al bus de continua por la primera red.

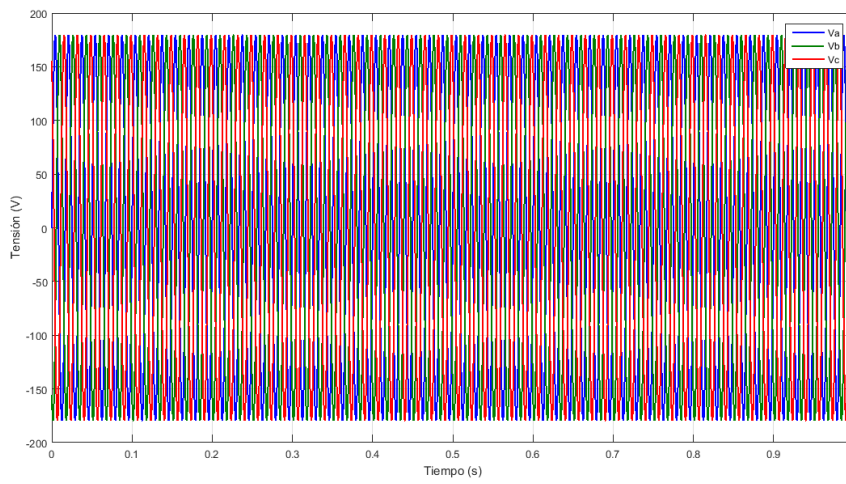


Figura 70 Tensión de la red en referencia *abc*.

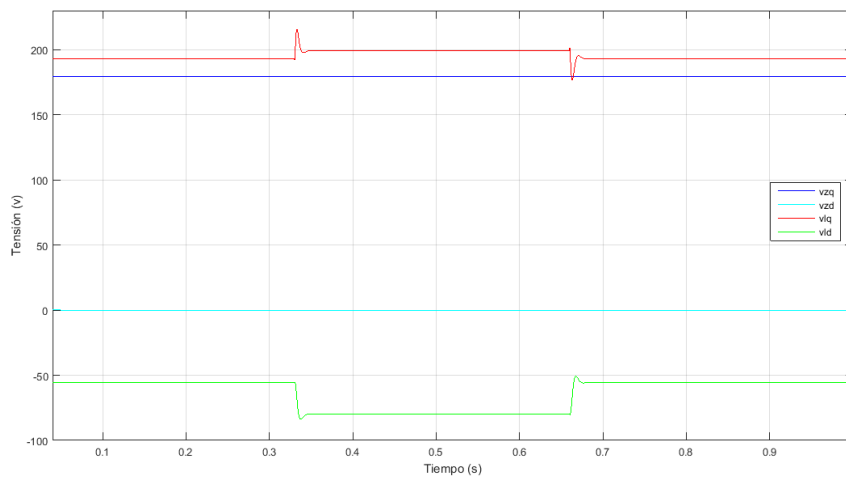


Figura 71 Tensiones de la carga y de la red en referencia *qd0*.

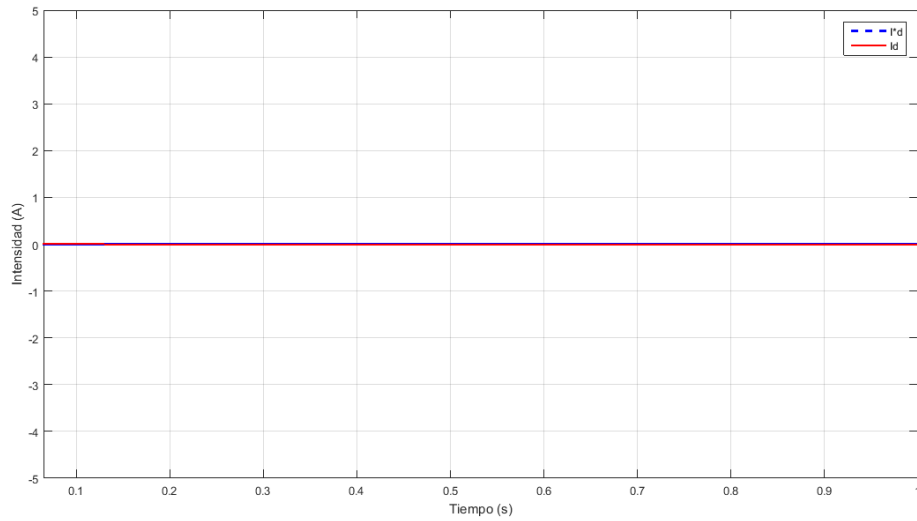
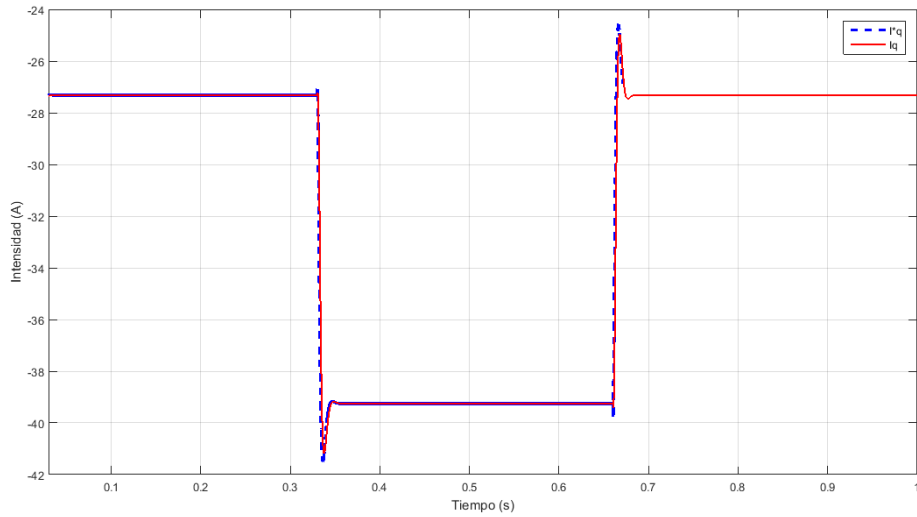


Figura 72 Intensidades reales y de referencia en referencia $qd0$.

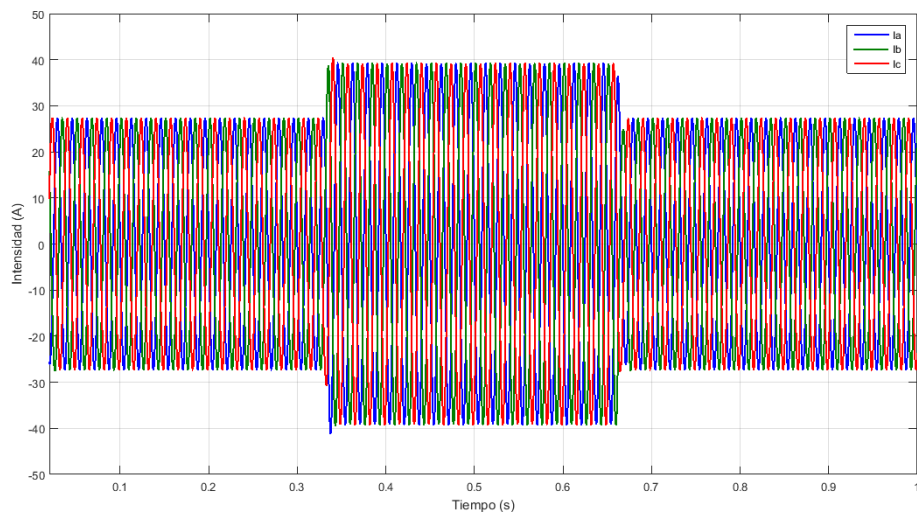


Figura 73 Intensidades de la carga en referencia abc .

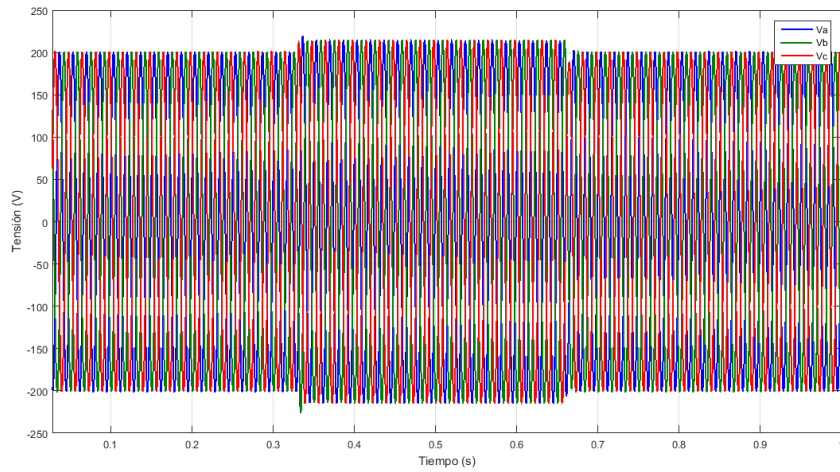


Figura 74 Tensiones de salida del convertidor en referencia *abc*.

A continuación se muestran los valores obtenidos en la segunda red.

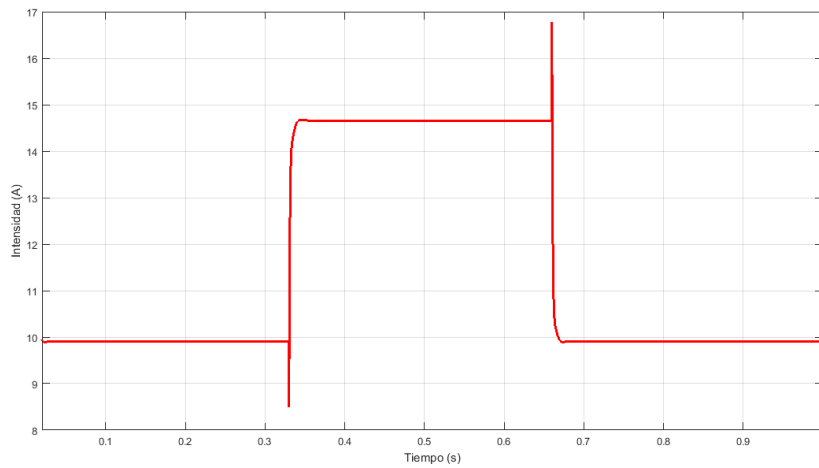


Figura 75 Intensidad I_{dc1} inyectada al bus de continua por la segunda red.

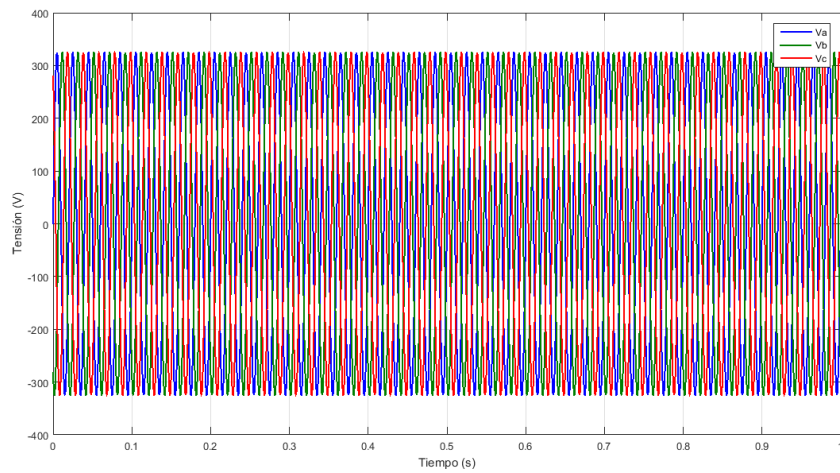


Figura 76 Tensión de la red en referencia *abc*.

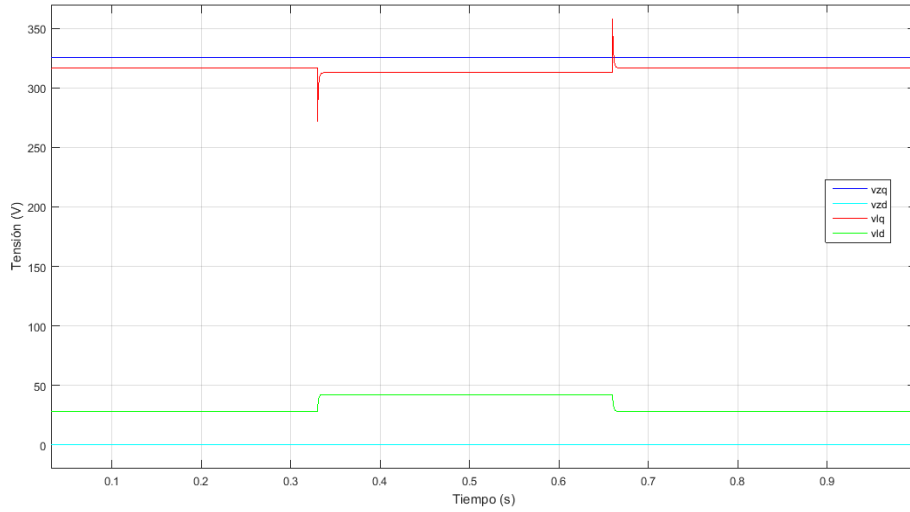


Figura 77 Tensiones de la carga y de la red en referencia $qd0$.

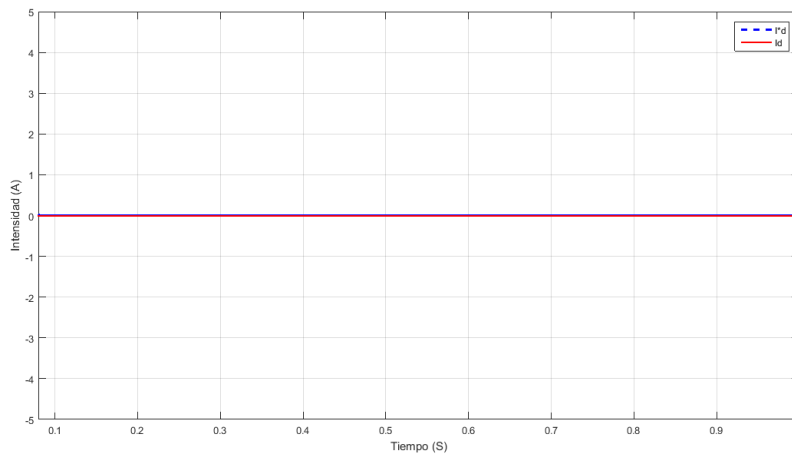
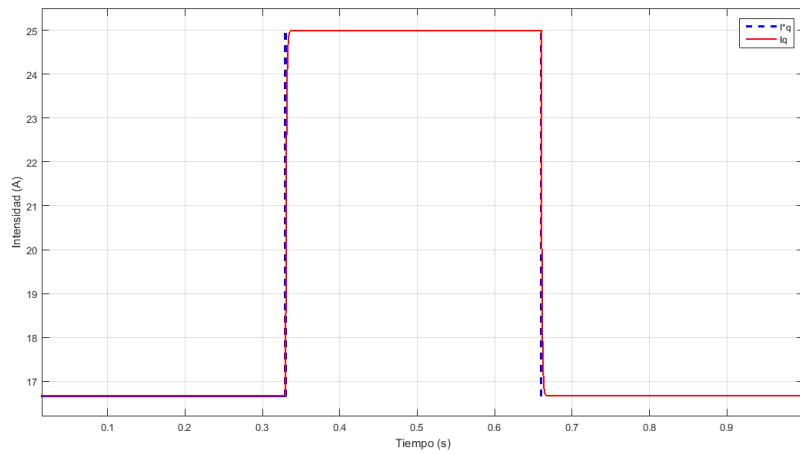


Figura 78 Intensidades reales y de referencia en referencia $qd0$.

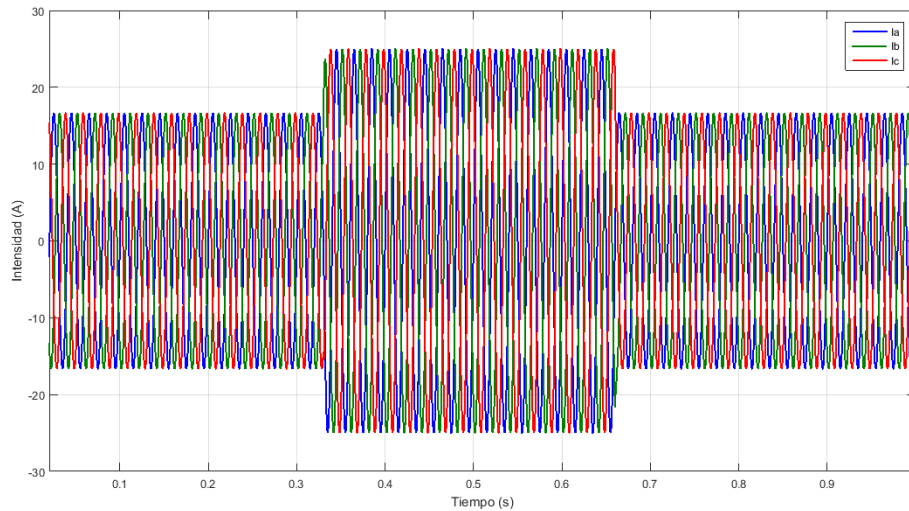


Figura 79 Intensidades de la carga en referencia *abc*.

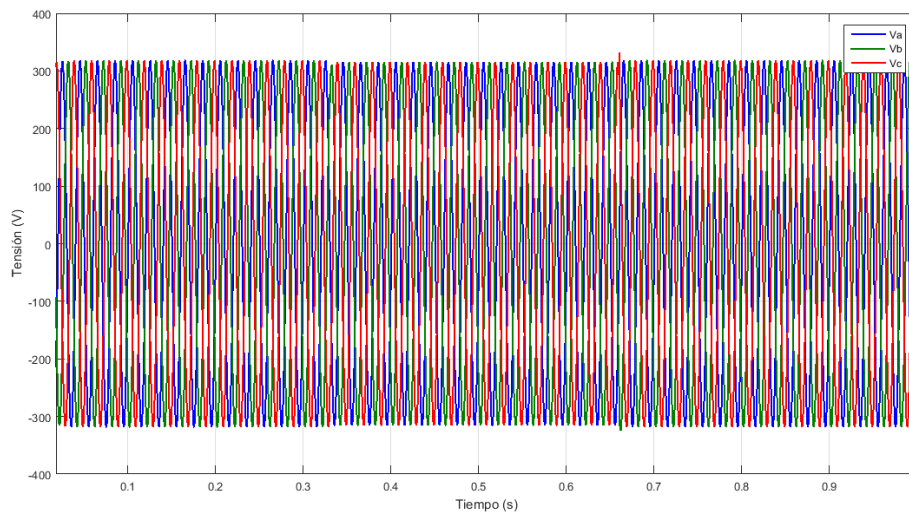


Figura 80 Tensiones de salida del convertidor en referencia *abc*.

En cuanto a las respuestas temporales de ambos sistemas, se aprecia una diferencia. Dado que el controlador de la primera fuente se encarga de mantener el bus de continua a la tensión de referencia E_{dc} , la segunda red no lleva incorporado un *lazo de tensión*, sino que calcula las intensidades de referencia a partir de la ley de Ohm asegurando el balance de potencias entre ambos sistemas. Como consecuencia, el sistema de control de la primera fuente sí que mantiene la respuesta oscilante propia del sistema de segundo orden, mientras que en la segunda fuente la respuesta temporal del sistema es de primer orden, tal y como se muestra en las *Figuras 81* y *82*.

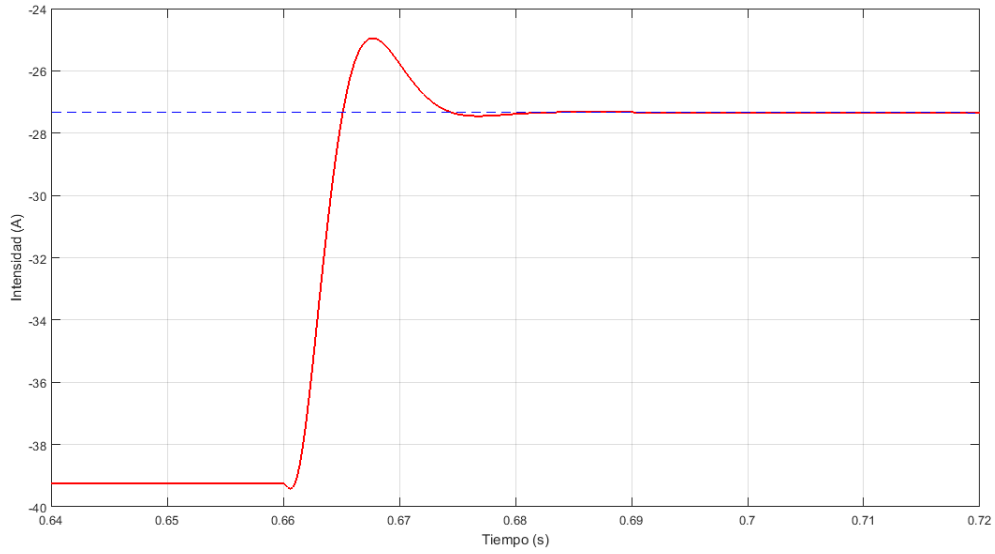


Figura 81 Detalle de la respuesta temporal del sistema de control de la primera fuente.

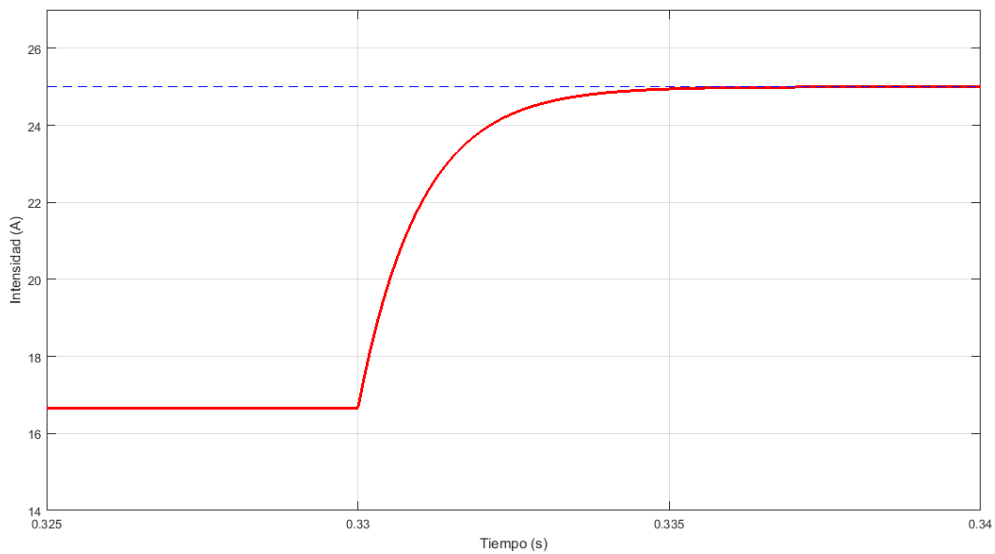


Figura 82 Detalle de la respuesta temporal del sistema de control de la segunda fuente.



5.2. Resultados de la simulación con EMTP-RV

Los resultados obtenidos tras la simulación del modelo mediante el software *Simulink* se muestran seguidamente.

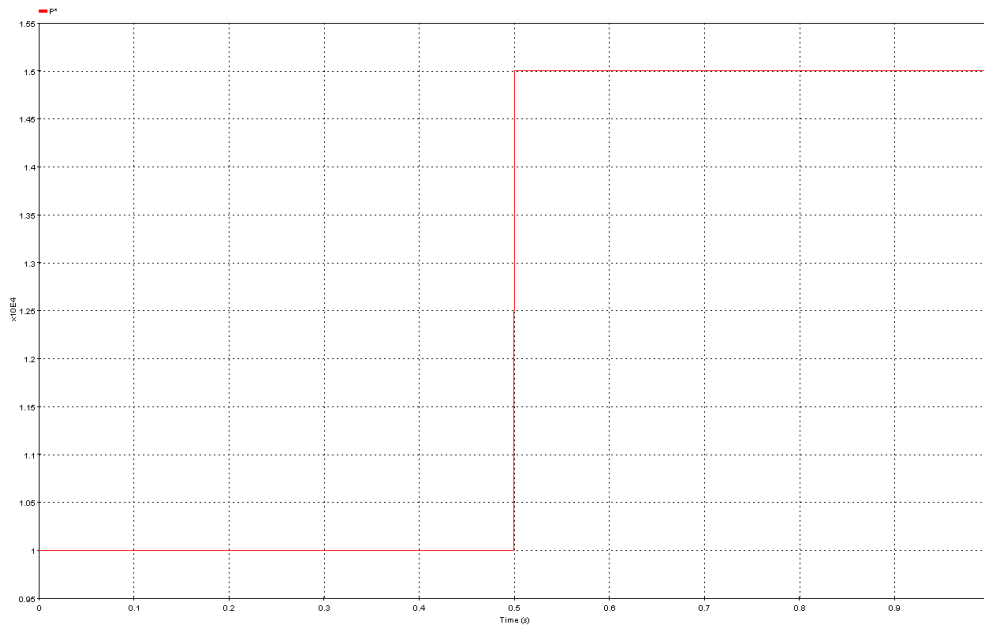


Figura 83 Potencia transferida ente las redes eléctricas.

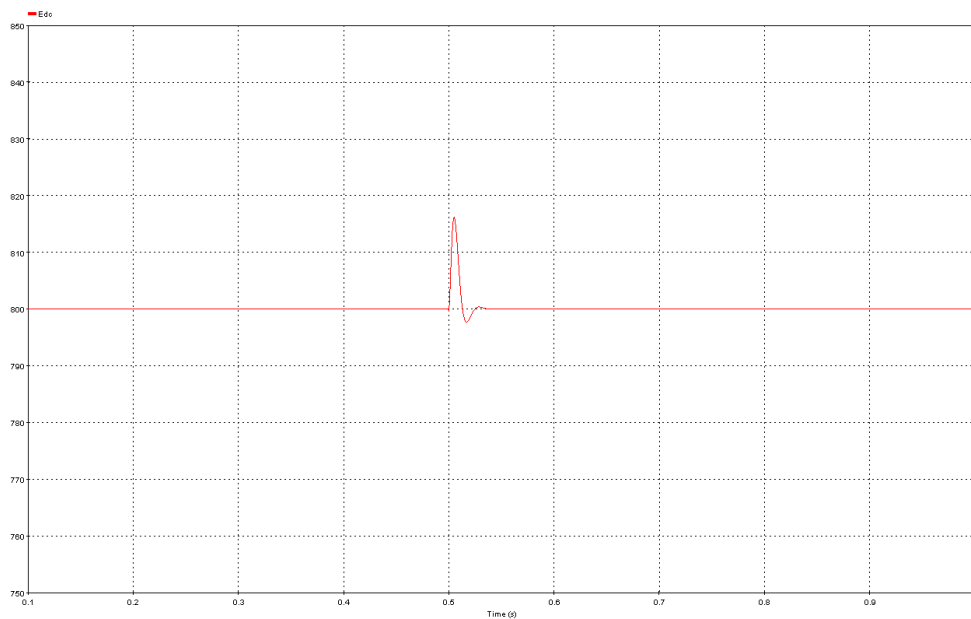


Figura 84 Tensión E_{dc} del bus de continua.



A continuación se muestran los valores obtenidos de la primera red.

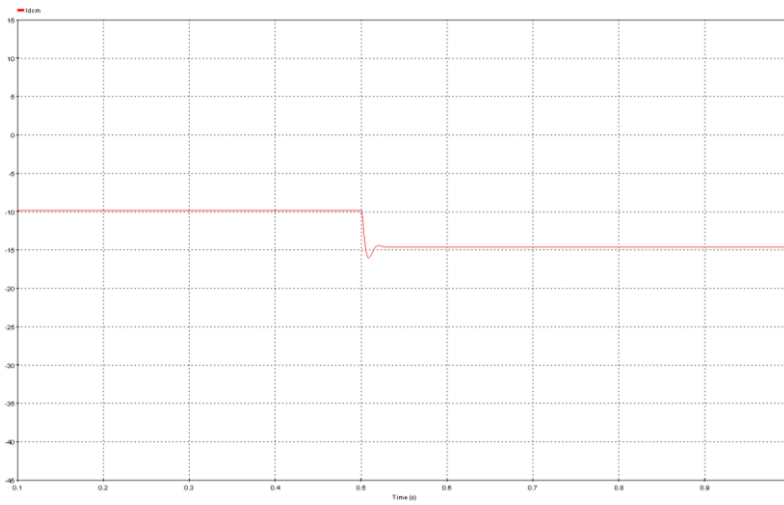


Figura 85 Intensidad I_{dcm} inyectada al bus de continua por la primera red.

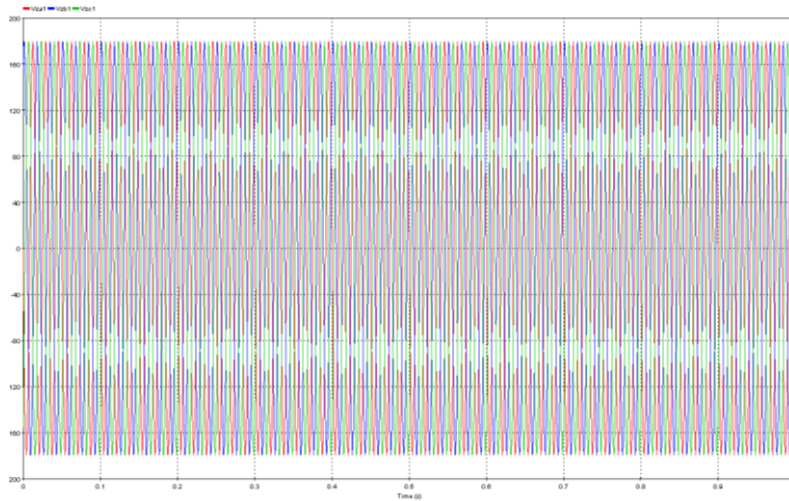


Figura 86 Tensión de la red en referencia *abc*.

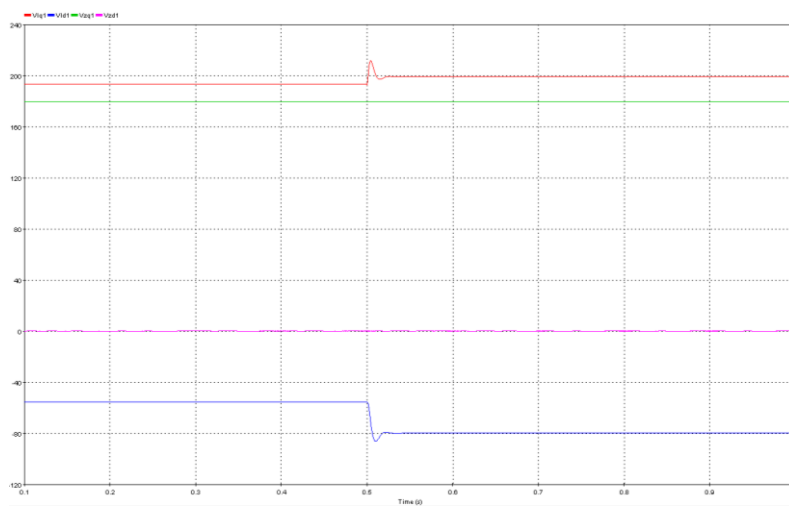


Figura 87 Tensiones de la carga y de la red en referencia *qd0*.

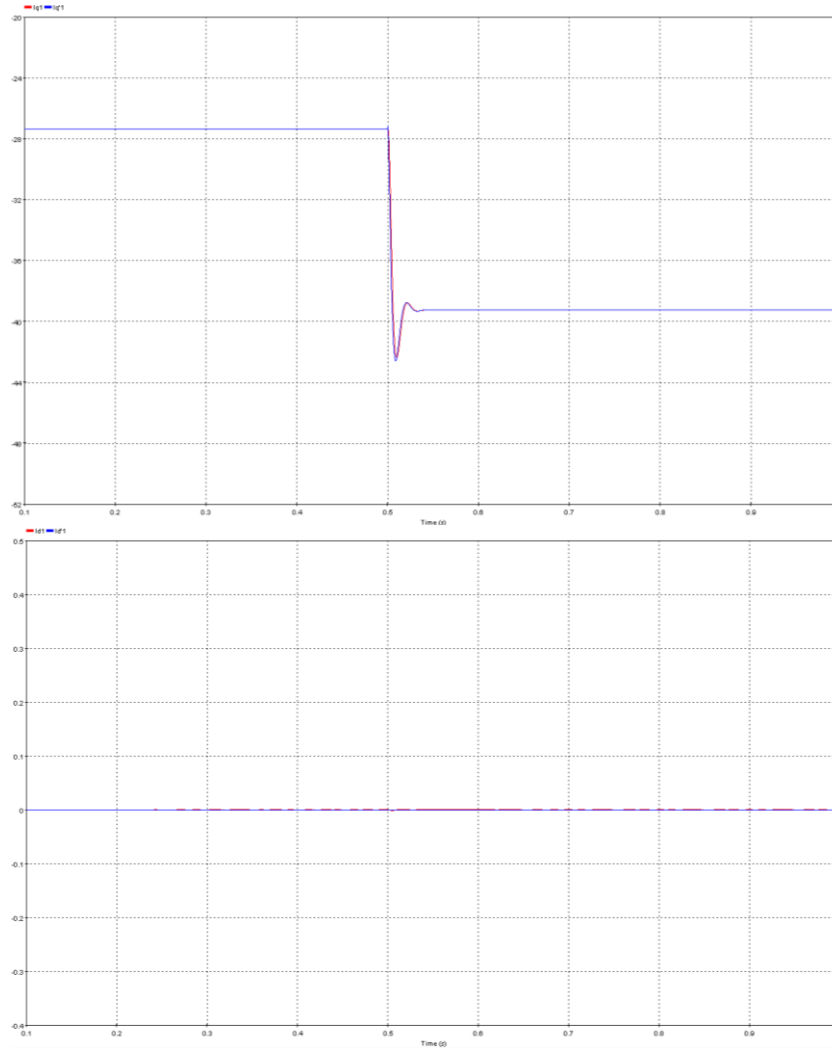


Figura 88 Intensidades reales y de referencia en referencia $qd0$.

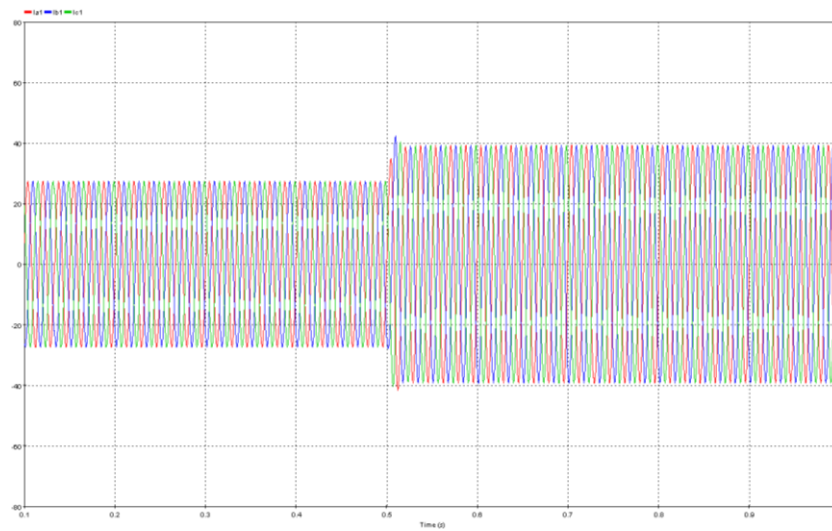


Figura 89 Intensidades de la carga en referencia abc .

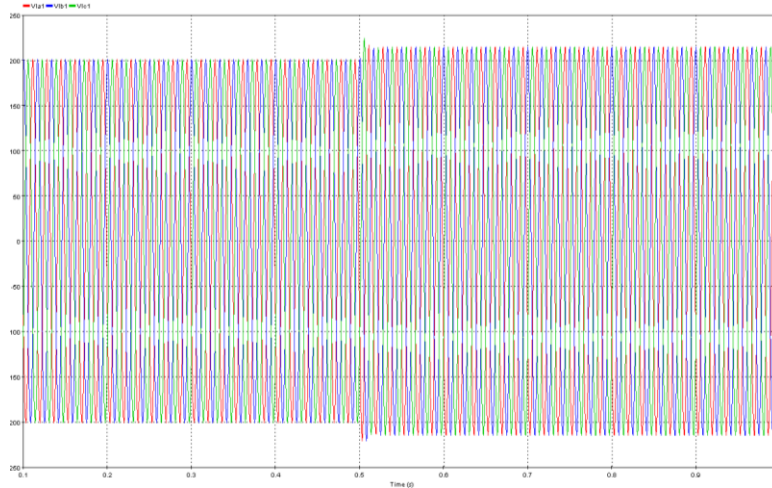


Figura 90 Tensiones de salida del convertidor en referencia *abc*.

A continuación se muestran los valores obtenidos en la segunda red.

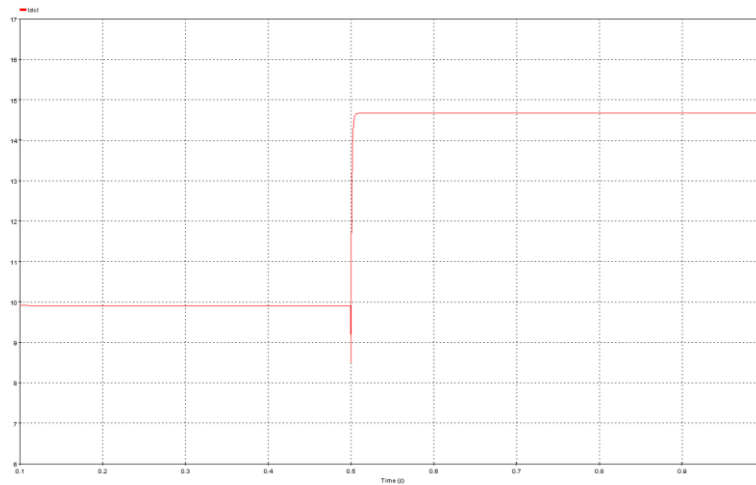


Figura 91 Intensidad I_{dc1} inyectada al bus de continua por la segunda red.

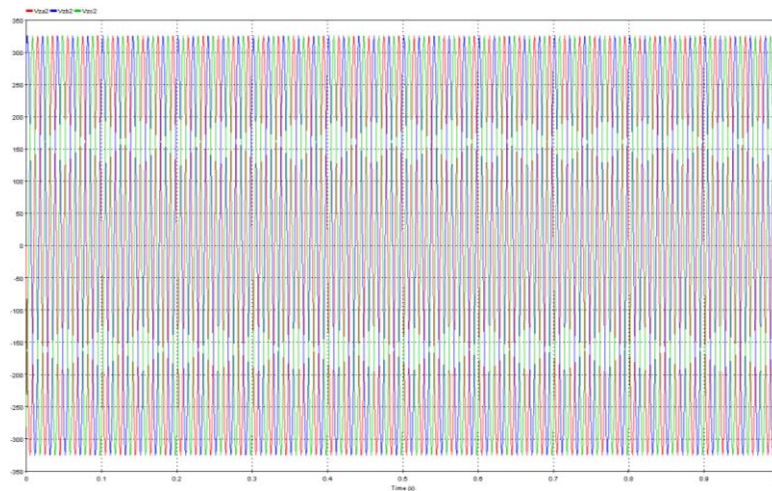


Figura 92 Tensión de la red en referencia *abc*.

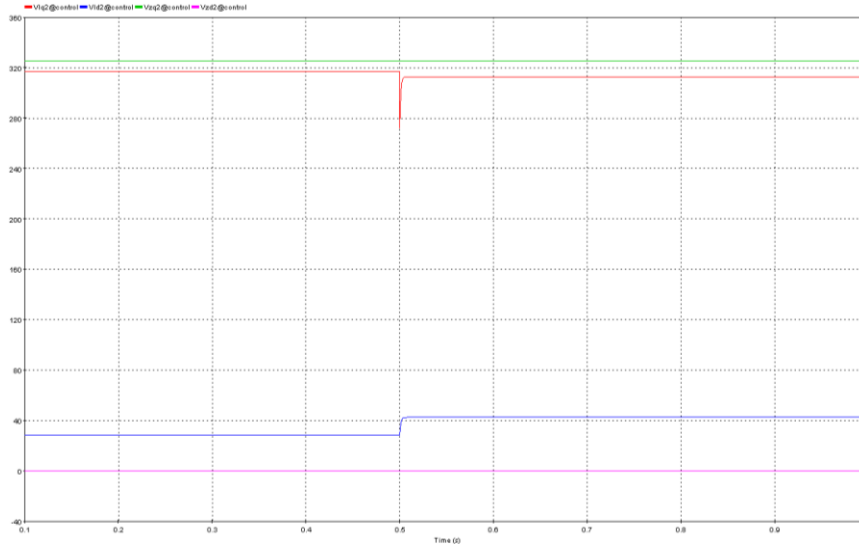


Figura 93 Tensiones de la carga y de la red en referencia $qd0$.

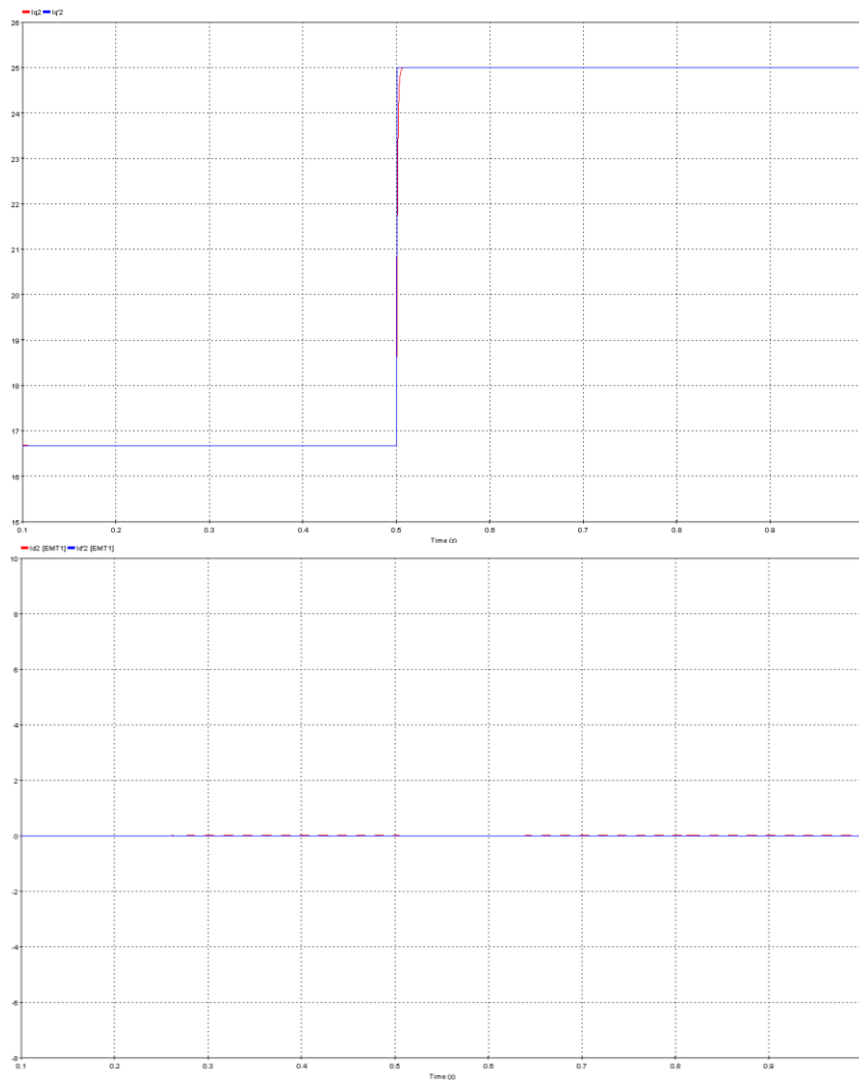


Figura 94 Intensidades reales y de referencia en referencia $qd0$.

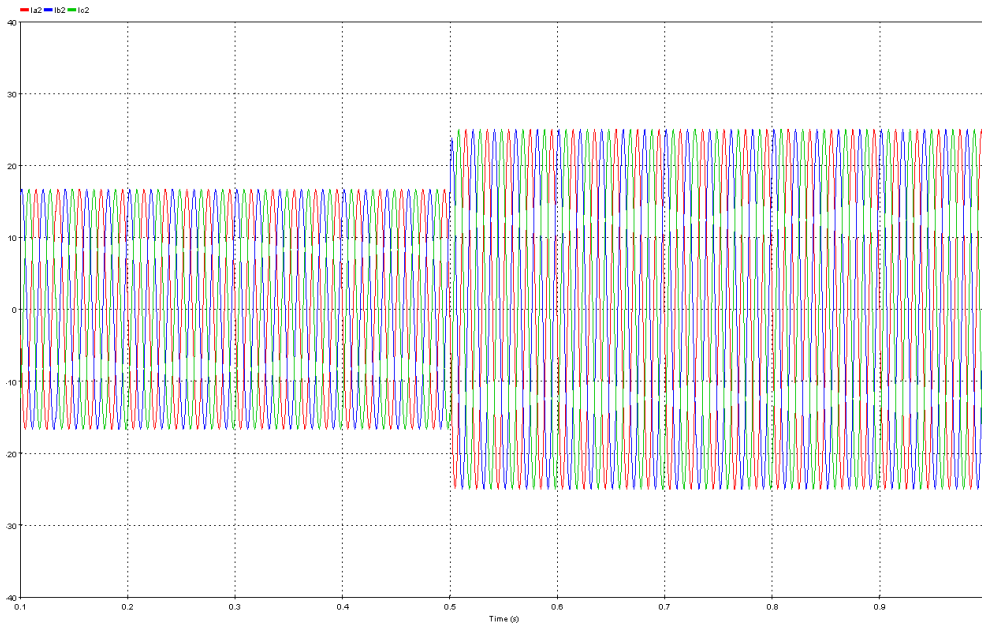


Figura 95 Intensidades de la carga en referencia *abc*.

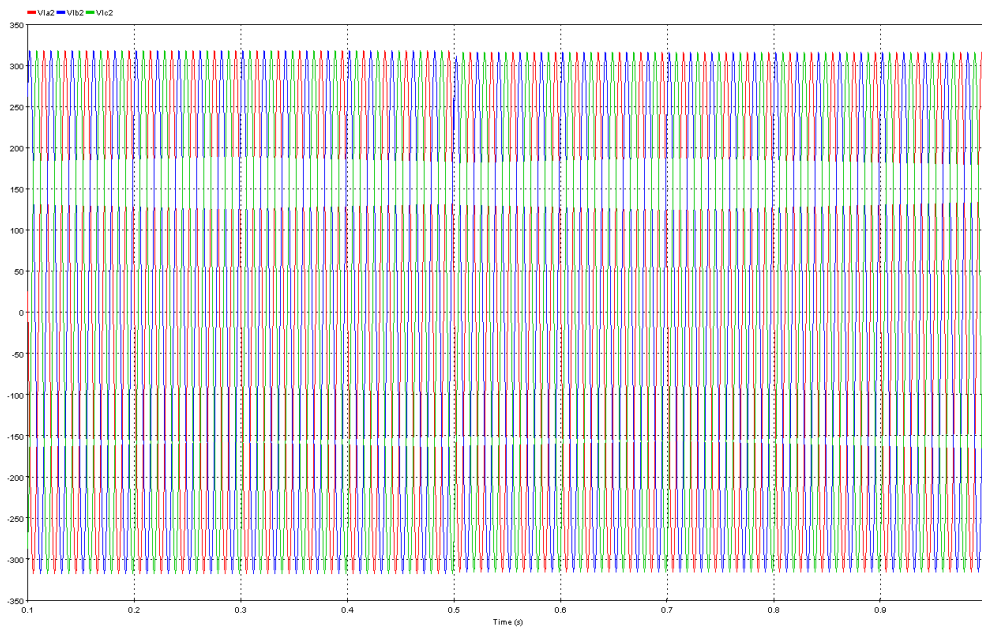


Figura 96 Tensiones de salida del convertidor en referencia *abc*.



La respuesta temporal de ambos sistemas se mantiene igual con respecto a la simulación anterior.

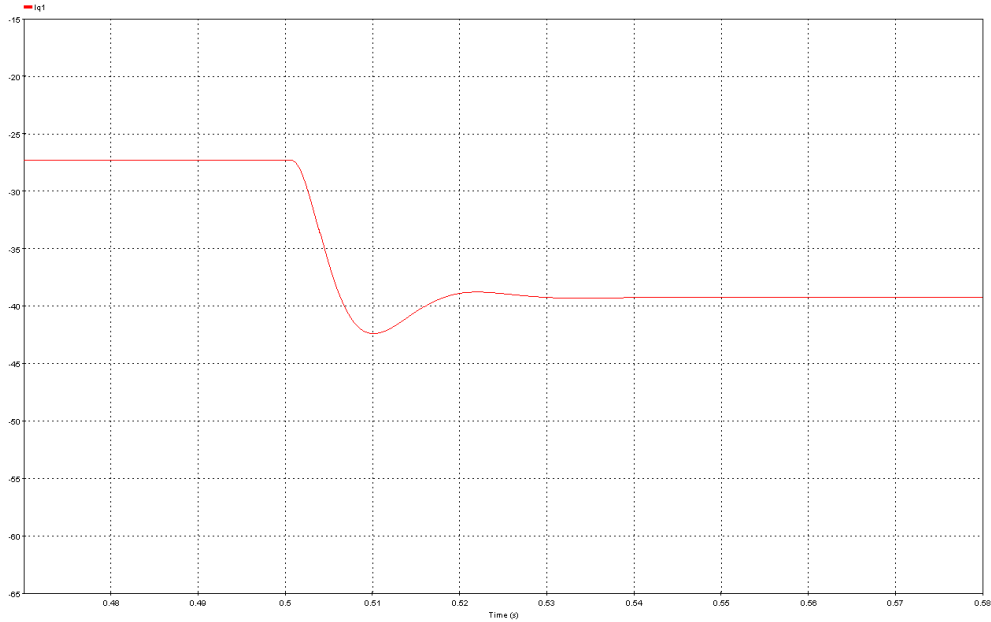


Figura 97 Detalle de la respuesta temporal del sistema de control de la primera fuente.

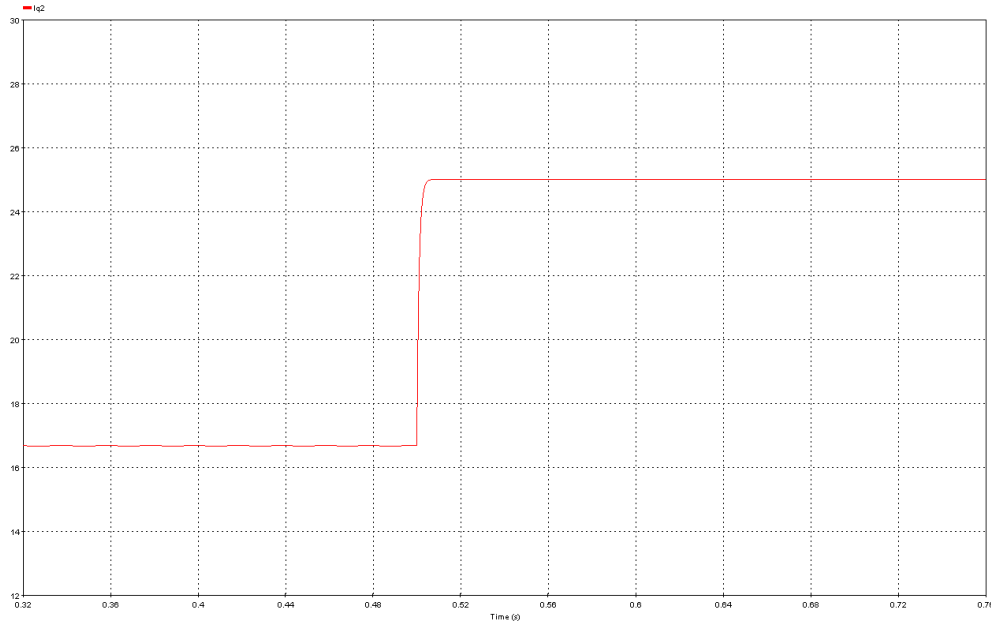


Figura 98 Detalle de la respuesta temporal del sistema de control de la segunda fuente.



6. Comparación entre *Simulink* y *EMTP-RV*

En ambos programas, su interfaz principal es una herramienta gráfica de creación de diagramas de bloques y un conjunto de bibliotecas de bloques. No obstante, la facilidad, intuitividad y comodidad de la interface a la hora de trabajar es notablemente superior en el *Simulink*. Así mismo, la comisión de errores a la hora de implementar el circuito o sistema deseado es mucho menor, y es sustancialmente más fácil la de detección y localización de los mismos, haciendo por lo tanto más sencilla su resolución.

Además, en el *Simulink* resulta más sencillo realizar tareas de diferentes dominios en el mismo sistema, tales como funciones lógicas, expresiones matemáticas, incluso estructuras de programación tipo ‘*if*’ o ‘*while*’ al mismo tiempo que electrónica de potencia o componentes eléctricos.

Además, el *Simulink*, al ser un complemento de *MATLAB*, permite visualizar y tratar los gráficos en donde se reflejan los resultados con el editor del programa matemático. Esto supone una gran ventaja respecto al *EMTP-RV*, que permite un tratamiento y edición muy sencilla e, incluso, pobre de los resultados, en comparación a la del primero.

Por otro lado, el *EMTP-RV* se trata de un programa más específicamente enfocado hacia sistemas eléctricos, por lo que si solamente se desea trabajar en ese dominio, es altamente recomendable su uso ya que la simplicidad en ese caso es mayor que la del *Simulink*. Asimismo, el tiempo requerido de computación y análisis de los sistemas implementados ha sido notoriamente inferior en el *EMTP-RV* respecto al *Simulink*. Esto se trata de una gran ventaja en circuitos especialmente grandes y de alta potencia de computación requerida.



Los tiempos de simulación requeridos por cada sistema para cada circuito, así como la diferencia entre ellos, se muestran en la *Figura 99*.

	Circuito 1	Circuito 2	Circuito 4
<i>Simulink</i>	25s	139s	35s
<i>EMTP-RV</i>	10.5s	27s	13s
Δt	14.5s	112s	22s

Figura 99 Comparativa de los tiempos de simulación.

En resumen, el *Simulink* se trata de un programa cuya interficie es más sencilla e intuitiva y resulta más sencillo de utilizar y adaptarse a él. No obstante, la capacidad de computación del *EMTP-RV* es mayor y eso se traduce en una mayor velocidad de cálculo y análisis hasta llegar a los resultados de la simulación.



7. Conclusiones

Se ha realizado con éxito una comparación entre los software de diseño y simulación eléctrica *Simulink* y *EMTP-RV*. Para ello, se han adquirido los conocimientos necesarios relacionados con estos programas y se han modelizado e implementado cuatro sistemas en *Simulink* y tres en *EMTP-RV* basados en convertidores VSC. El primero ha resultado ser notablemente más completo respecto a librerías y a la capacidad del uso simultáneo de diferentes dominios en un mismo sistema (tales como electrónica, control, funciones matemáticas...). *Simulink* permite también el tratamiento y edición de los gráficos y resultados obtenidos de las simulaciones de forma mucho más fácil, eficaz y completa. Asimismo, se trata de un espacio con una interficie mucho más visual, más intuitiva y más elaborada, lo que se traduce en una mayor facilidad de uso y de adaptación al programa y en una reducción en la comisión de fallos estructurales del sistema simulado. Por otro lado, la velocidad de computación, simulación y análisis del *EMTP-RV* es sustancialmente superior a la del *Simulink*, pese a que es más sensible a registrar fallos debidos a condiciones iniciales extremas (de valor muy grande o muy pequeño) en la fase transitoria de la simulación. No obstante, es muy recomendable el uso del *EMTP-RV* para sistemas puramente eléctricos.

Para llevar a cabo dicha comparación, se ha profundizado en los convertidores estáticos, concretamente en los convertidores VSC, tanto en su concepción y diseño como en las aplicaciones que éstos pueden tener dentro del mundo de la electrotecnia.

También se ha podido desarrollar los conocimientos teóricos adquiridos a lo largo del grado, relacionados con la electrotecnia, electrónica o la dinámica y control de sistemas, profundizando más en los mismos y llevándolos a la práctica lo que supone una realización personal, a la par que una ayuda para



el afianzamiento de los mismos.

Trabajar con programas de ordenador desconocidos, muy técnicos y específicos ha supuesto un esfuerzo mayoritariamente durante el proceso de adaptación y conocimiento de los mismos, así como a la hora de detectar y corregir errores estructurales de diseño del sistema o el mal funcionamiento de los circuitos. No obstante, se ha conseguido solventar dichas adversidades y alcanzar los objetivos con éxito, llegando a dominar ambos software e implementado correctamente todos los circuitos propuestos en un inicio.

Se ha conseguido entender el funcionamiento y el mecanismo de los circuitos, de sus partes, de las aplicaciones prácticas que tienen y de los conceptos teóricos de respaldan su diseño. Pese a la dificultad inicial, ha sido una labor progresiva en la que contra más se trabajaba en el proyecto, la comprensión del mismo era cada vez mayor.

Una vez finalizado el proyecto, algunas de las futuras líneas de trabajo podrían ser seguir implementando mejoras y ampliaciones a la modelización del convertidor VSC. En este aspecto, una posible nueva mejora a realizar en el circuito sería añadir un componente capacitivo a la carga del convertidor, lo que haría el modelo todavía más realista.

Además se podría simular los circuitos implementados con más software con el objetivo de hallar, dentro de un abanico más amplio, cuál sería el óptimo para este tipo de simulaciones multidominio en todos los aspectos, ya sea a nivel de velocidad de computación o de facilidad de adaptación y uso.



8. Bibliografía

- [1] *EGEA, A.; JUNYENT, A.; GOMIS, O.; Active and reactive power control of grid connected distributed generation system*, Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona. CITCEA.

- [2] *LOPEZ, D.; CAMACHO, G.; DÍAZ, J.; GAVIRIA, C.; Modulación PWM aplicada a inversores trifásicos dentro del esquema de accionamientos eléctricos AC*, Popayán, Cauca: Universidad del Cauca. Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET), 2007.

- [3] *MAÑANA, M.; Convertidores eléctricos de potencia*, Santander: Universidad de Cantabria, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación.

- [4] *GONZALEZ, F.; Entendiendo la Transformación de Park*, Maracay, Venezuela: Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional, 2004.

- [5] *GÓMEZ, M.; Generación distribuida*, España: Universidad Nacional de Educación a Distancia.

- [6] *SAU, J.; Anàlisi i control de tipologies de convertidors per a parcs eòlics marins connectats en HVDC*, Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, 2016.



- [7] *MÍREZ, J.; Smart grid*, Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

- [8] *BERMEJO, V.; Introducción a los sistemas de conexión HVDC y su contribución a la mejora de la calidad de la energía eléctrica*, Madrid: Universidad Carlos III, 2011.



Agradecimientos

Este trabajo no podría haberse realizado sin la inestimable colaboración de:

- Enric Sánchez Sánchez. Por su tutoría en el transcurso del trabajo y por su constante soporte y ayuda prestada.
- Ricard Ferrer San José. Por su desinteresado soporte y ayuda prestada.
- CITCEA – ETSEIB. Por ceder sus instalaciones y *software* para el desarrollo del trabajo.

