

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

Universidad de Burgos



**SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA
BASADO EN LA SUPERCONDUTIVIDAD PARA LA
ESTABILIZACIÓN DE MICROGRID POR
CONEXIÓN Y DESCONEXIÓN DE CARGAS,
SISTEMA SMES**

ANEJO Nº 7: SIMULACIONES

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y
AUTOMÁTICA**

AUTOR:

RUBÉN ARCE DOMINGO

TUTOR:

CARMELO LOBO DE LA SERNA

JUNIO DE 2019

**ANEJO 7: SIMULACIONES..... 2**

1. INTRODUCCIÓN:	2
2. SOFTWARE UTILIZADO:	2
3. ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA:	2
4. COMPORTAMIENTO ANTE CAÍDAS DE TENSIÓN DE LA MICROGRID:	3
5. COMPORTAMIENTO ANTE SOBRETENSIONES DE LA MICROGRID:.....	4
6. COMPORTAMIENTO DE DESCONEXIÓN DE LA MICROGRID:	4
7. ANÁLISIS DEL THD DE LAS CORRIENTES INYECTADAS EN LA RED	5
8. CONCLUSIONES DE LA SIMULACIÓN	6

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES Y TABLAS:

<i>Ilustración 1: Cebado de IGBT para modo stand-by</i>	<i>4</i>
<i>Ilustración 2: Bloqueo de IGBT's del rectificador en modo Stand-by.....</i>	<i>5</i>
<i>Ilustración 3: Carga de la bobina y almacenamiento de 1MJ de energía.....</i>	<i>7</i>
<i>Ilustración 4: Caída y subida de tensión en la microgrid</i>	<i>8</i>
<i>Ilustración 5: Suma de corrientes por el condensador de unión y la bobina - Corriente por los diodos</i>	<i>9</i>
<i>Ilustración 6: Tensión por el condensador de unión ante caídas y subidas de tensión.....</i>	<i>10</i>
<i>Ilustración 7: Modo stand-by de la corriente por la bobina</i>	<i>11</i>
<i>Ilustración 8: Corrientes inyectadas a la red y tensiones de la microgrid.....</i>	<i>12</i>
<i>Ilustración 9: Desarrollo de Fourier de las corrientes y tensiones inyectadas por la red....</i>	<i>13</i>
<i>Ilustración 10: Desarrollo de Fourier de las corrientes y tensiones inyectadas por la red ampliado</i>	<i>14</i>
 Tabla 1: Especificaciones técnicas del equipo empleado	 2



ANEJO 7: SIMULACIONES

1. Introducción:

En este anejo se pretende mostrar el correcto funcionamiento del sistema de estabilización ante subidas y bajadas de tensión. Para lo cual, en primer lugar, se mostrará la cantidad de energía capaz de almacenar la bobina SMES.

A continuación, se simularán variaciones de tensión en la microgrid y por último se realizará el desarrollo de Fourier de las corrientes inyectadas en la red.

2. Software utilizado:

Toda la parte de cálculos y simulaciones se ha llevado a cabo con el simulador de cálculos eléctricos del PSIM, las especificaciones del ordenador en el que han tenido lugar quedan recogidas en la tabla 1.

Tabla 1: Especificaciones técnicas del equipo empleado

Procesador	Intel Core i7
Memoria RAM	16GB
Disco Duro	SSD 256GB
Tarjeta Gráfica	Geforce GTX 960M

Independientemente del ordenador en el que se ha llevado a cabo, el PSIM es un programa que no consume elevados recursos.

3. Almacenamiento de energía:

Comenzaremos visualizando la corriente máxima por la bobina.

En la ilustración 3 podemos apreciar como la bobina se carga hasta 2000A una vez se pone en funcionamiento el convertidor CA/CC bidireccional. En esta simulación no ha intervenido el convertidor CC/CC.

El valor de los 2000A viene del anejo I de datos de partida, en el que se especificó la necesidad de conseguir un estabilizador de tensión de 1MJ de energía almacenable.

Por esta misma razón, y teniendo en cuenta la fórmula de la cantidad de energía almacenada en forma de campo magnético en la bobina, se obtiene la corriente necesaria:

$$E_{bobina} = \frac{1}{2} * L * I^2 \quad (1)$$

Siendo 'L' la inductancia de la bobina, en nuestro caso 0,5H e 'I' la intensidad que la atraviesa.



Despejando la ecuación obtendremos la corriente necesaria para almacenar el megajulio buscado:

$$I = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{bobina}}{L}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^6 J}{0,5H}} = 2000A$$

En la ilustración 1 situada al final del anejo se encuentra la gráfica que muestra la corroboración de los datos de partida recogidos en el anejo I del documento de la memoria.

4. Comportamiento ante caídas de tensión de la microgrid:

Una vez demostrada la capacidad del sistema para almacenar hasta 1 MJ de energía se va a simular la caída de tensión de la microgrid.

El comportamiento esperado es que ante una caída de tensión la bobina se ha de descargar por los dos diodos de tal forma que se establezca dicha tensión en la microgrid.

Se ha simulado de la siguiente forma:

1. El algoritmo de control compara el valor eficaz de la potencia de las tres fases con la referencia del valor estable.
2. Al bajar este valor eficaz significará que se ha producido una disminución en el valor instantáneo de la tensión y en consecuencia el sistema ha de actuar.
3. La forma de actuar es devolver la corriente almacenada previamente en la bobina.
4. Para llevarlo a cabo se bloquean los IGBT's del convertidor CC/CC y por lo tanto el único camino que tiene la corriente almacenada en la bobina SMES es el de los dos diodos.

En la ilustración 4 se ha simulado un pico de caída de tensión de 1000V durante 2µs y vemos como este se traduce en una variación acusada en el valor eficaz de la potencia de una de las fases y en consecuencia se actuará sobre los diodos devolviendo la corriente almacenada. Esto consigue estabilizar la red con gran efectividad.



5. Comportamiento ante sobretensiones de la microgrid:

Ante una subida de tensión por la desconexión de grandes cargas el resultado es un aumento del valor eficaz de la potencia de una de las fases, ante esta situación se ha de proceder de la siguiente forma:

1. El algoritmo de control compara el valor eficaz de la potencia de las tres fases con la referencia del valor estable.
2. Al aumentar este valor eficaz significará que se ha producido un aumento en el valor instantáneo de la tensión, una sobretensión, y en consecuencia el sistema ha de actuar.
3. La forma de actuar consiste en aplicar un impulso en la puerta de los dos IGBT's del convertidor CC/CC para que toda la corriente provocada por la sobretensión se almacene en la bobina.

En las ilustraciones 5 y 6 vemos como se comporta el sistema antes estas sobretensiones y ante las caídas de tensión.

6. Comportamiento de desconexión de la microgrid:

Cuando no se produce ni una caída ni una subida de tensión, la bobina permanece desconectada del circuito, para conseguir esto se ha de cortocircuitar dicha bobina conduciendo en serie con un IGBT y con un diodo, en este caso se ha hecho conducir con los dos elementos de la parte inferior de convertidor como se puede apreciar en la ilustración 1.

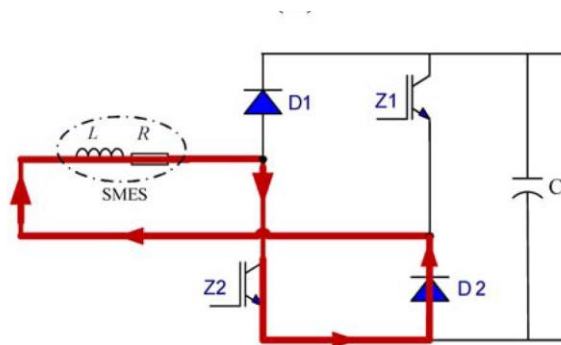


Ilustración 1: Cebado de IGBT para modo stand-by (EMI Reduction in Power Converters by Means of Periodic Switching Frequency Modulation)

Para realizar este modo stand-by o de almacenamiento de energía es necesario desconectar de la red a todo el sistema SMES. Para ello tan solo se han de bloquear todos los IGBT's del rectificador bidireccional.



Al final del anejo en la ilustración 7 vemos la simulación real y su comportamiento.

En la ilustración 2 podemos apreciar como en el modo de almacenamiento no se aplica ningún impulso a la puerta de los IGBT's del rectificador.

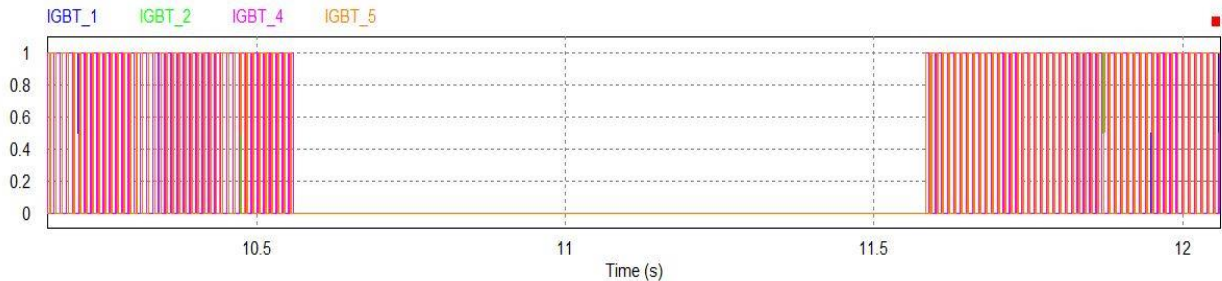


Ilustración 2: Bloqueo de IGBT's del rectificador en modo Stand-by (PSIM)

7. Análisis del THD de las corrientes inyectadas en la red

En este apartado se pretende comprobar como de eficiente es el sistema SMES llevado a cabo, para lo cual nos valemos del THD o Total Armonic Distorsion.

El cálculo de la distorsión armónica se lleva a cabo con el desarrollo de Fourier de la onda a medir, en nuestro caso las tres ondas de corriente son prácticamente idénticas por ello se ha escogido la corriente por la fase 1 (I_1).

Para llevar a cabo este cálculo contamos con la ilustración 9 y 10 llevada a cabo con el PSIM, para obtenerlo aplicaremos la fórmula 2.

$$THD = 100 \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{I_{sh}}{I_{s1}} \right)^2} = 100 \cdot \frac{\sqrt{(I_s^2 - I_{s1}^2)}}{I_{s1}} \quad (2)$$

En la ecuación 2:

- I_s es la corriente total.
- I_{s1} es la componente fundamental de dicha corriente.
- I_{sh} es la componente de orden h.

Para aplicar la ecuación número 2 nos vamos a la ilustración 10 y buscamos los picos de corriente más elevada de cada armónico más representativo, con eso obtendremos lo siguiente:

$$THD = \frac{43 + 26 + 7.2 + 4.5}{2093 + 43 + 26 + 7.2 + 4.5} \cdot 100 = 3.71\%$$



Se ha de tener en cuenta que la componente fundamental está en los 50 Hz, la frecuencia de la red, cuyo valor es 2063 A. Los armónicos a tener en cuenta serán los correspondientes al $3 \cdot f$, $5 \cdot f$, $7 \cdot f$, etc... o lo que es lo mismo, en los 150Hz, 250Hz y 350Hz.

Para elementos con elevadas cargas inductivas los valores típicos de distorsión armónica se encuentran entre el 3 y el 5% siendo este rango aceptable. Vemos por lo tanto que nuestro sistema cumple normativa, esta será explicada en el pliego de condiciones técnicas generales en el documento 3 del proyecto.

8. Conclusiones de la simulación

Se ha de tener en cuenta un detalle de gran importancia, debido a problemas de simulación se ha añadido más resistencia a los componentes de la que realmente estos tienen.

Esto puede demostrarse al ver como en la ilustración 7, cuando está la bobina SMES en cortocircuito, la corriente debiera mantenerse constante debido a la casi inexistente resistencia que lleva asociada de la superconductividad.

Pero en su lugar, al vernos obligados a aumentar la resistencia para que el software del PSIM funcione correctamente, esta corriente cae y se disipa en forma de calor.

Independientemente de este inconveniente podemos apreciar que el sistema funciona de forma precisa y permite estabilizar tensiones.



SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN BASADO EN LA SUPERCONDUCTIVIDAD, SMES

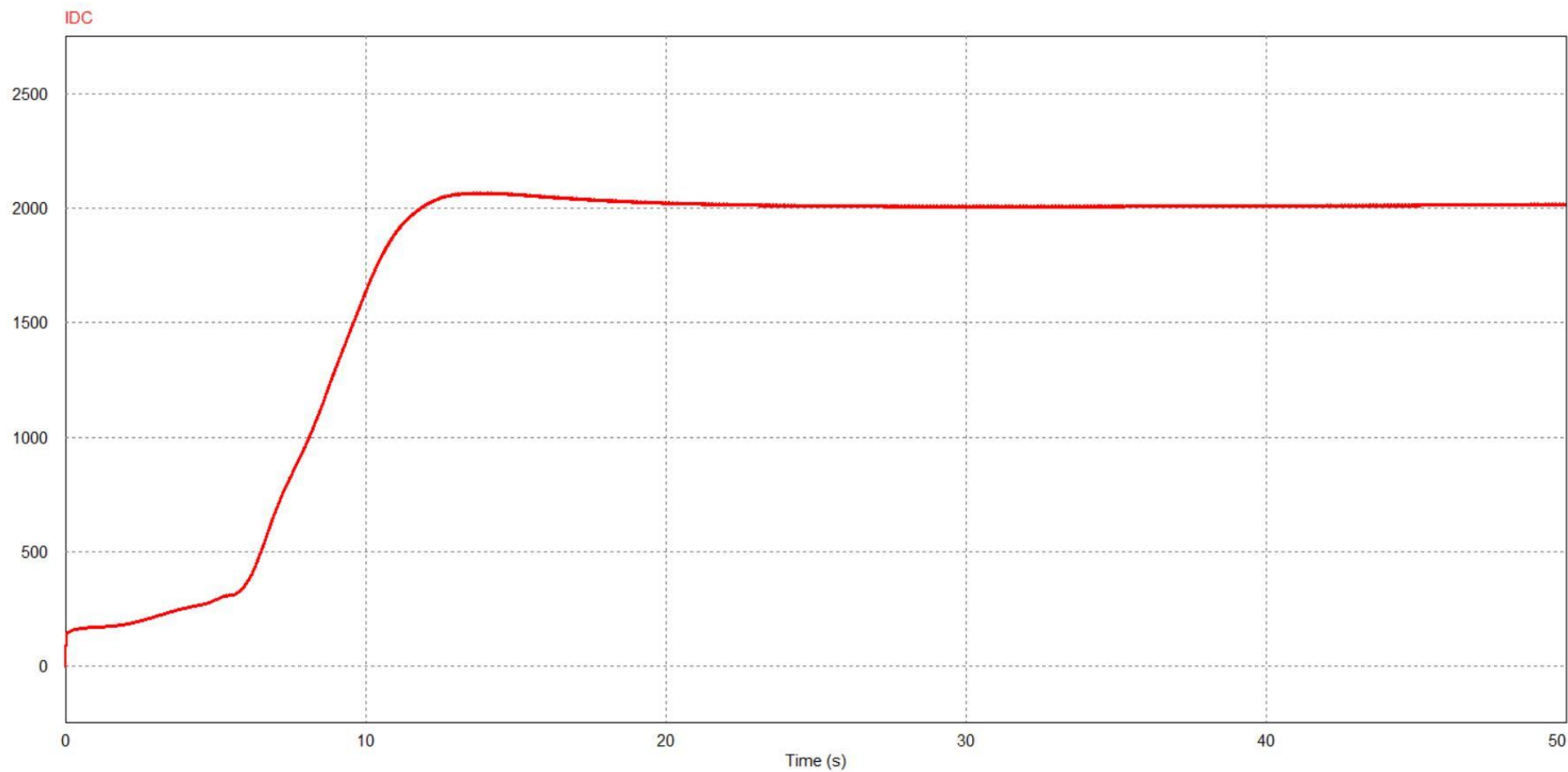


Ilustración 3: Carga de la bobina y almacenamiento de 1MJ de energía (PSIM)



SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN BASADO EN LA SUPERCONDUCTIVIDAD, SMES

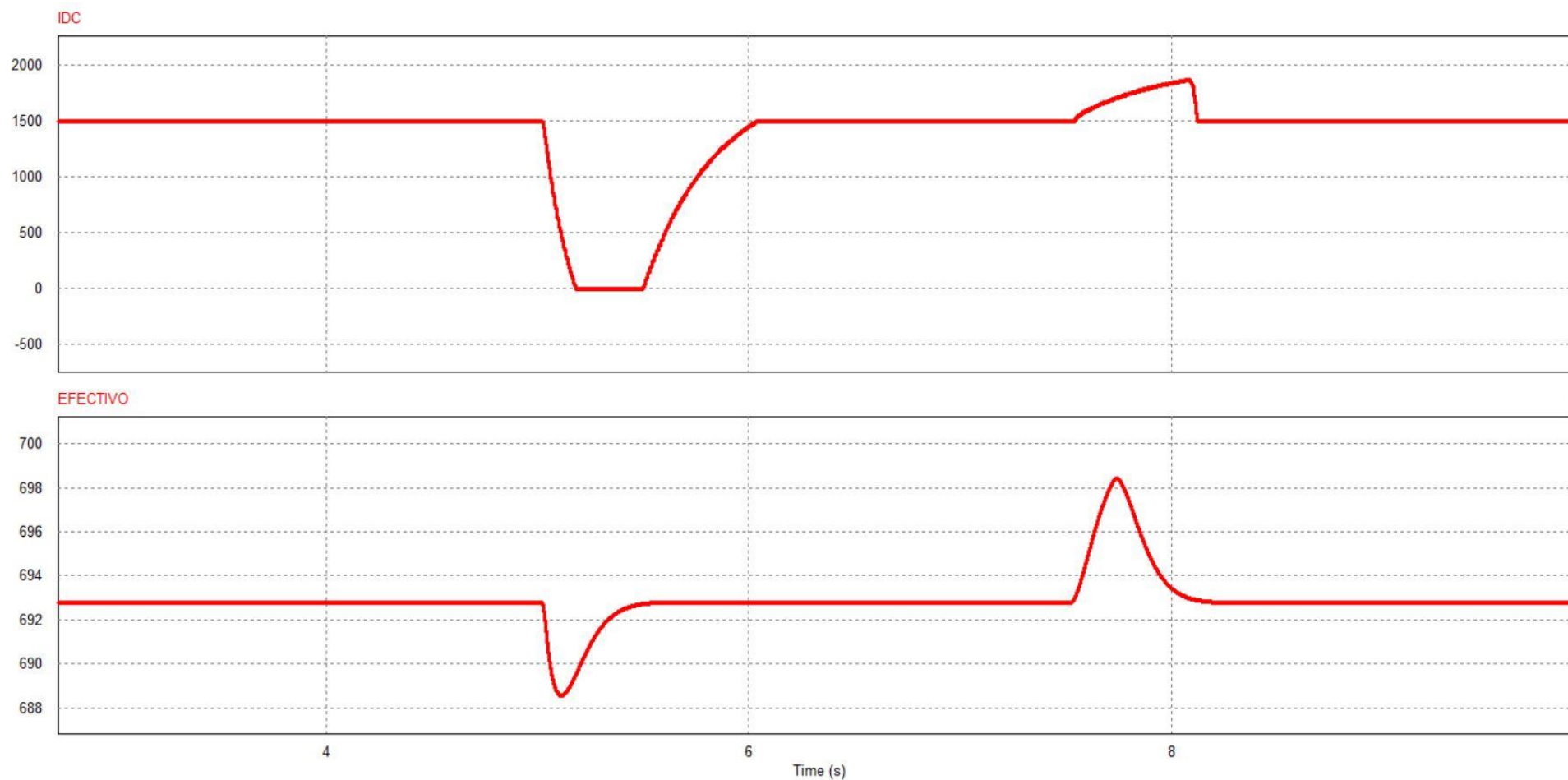


Ilustración 4: Caída y subida de tensión en la microgrid (PSIM)

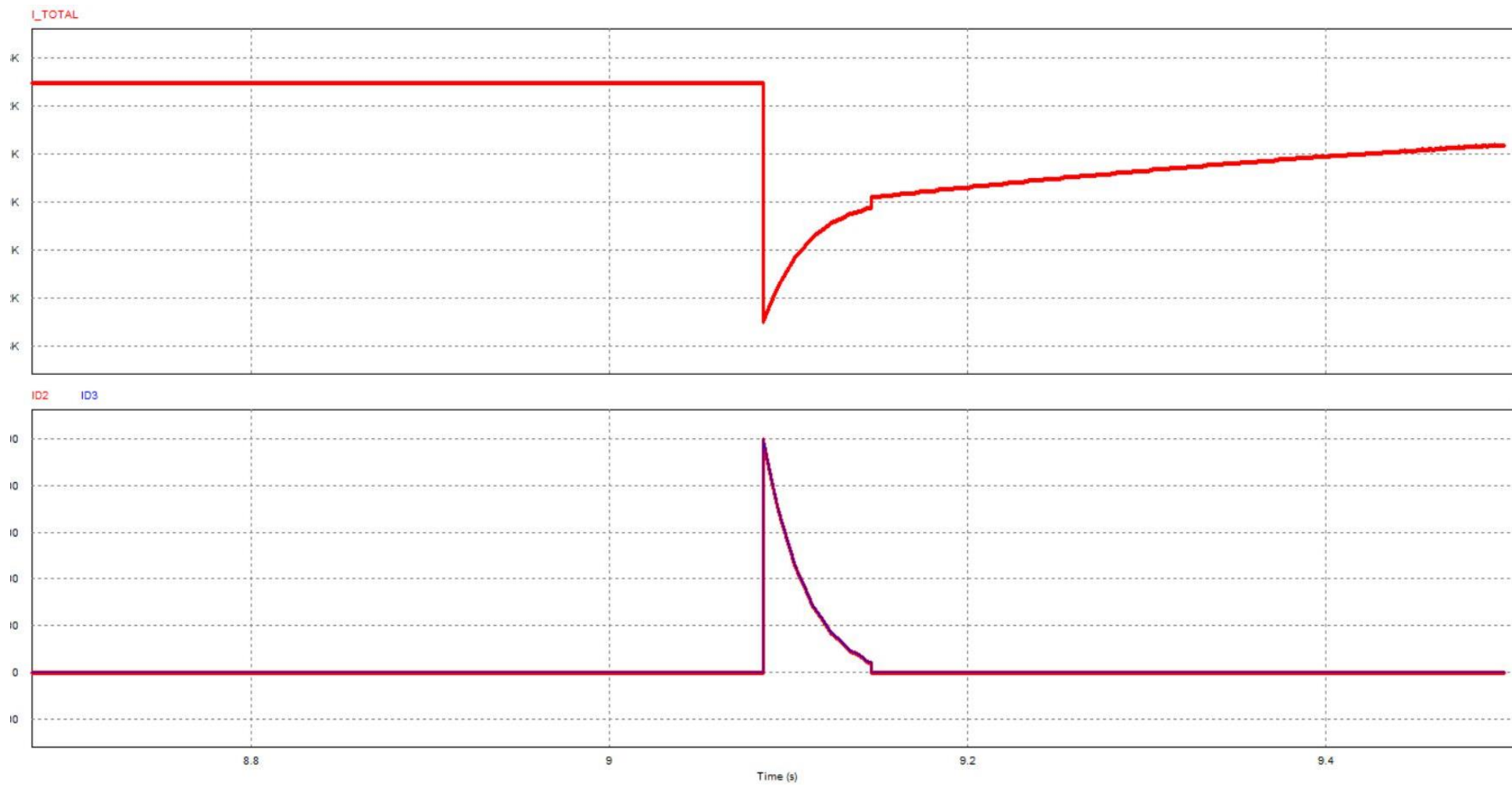


Ilustración 5: Suma de corrientes por el condensador de unión y la bobina - Corriente por los diodos (PSIM)

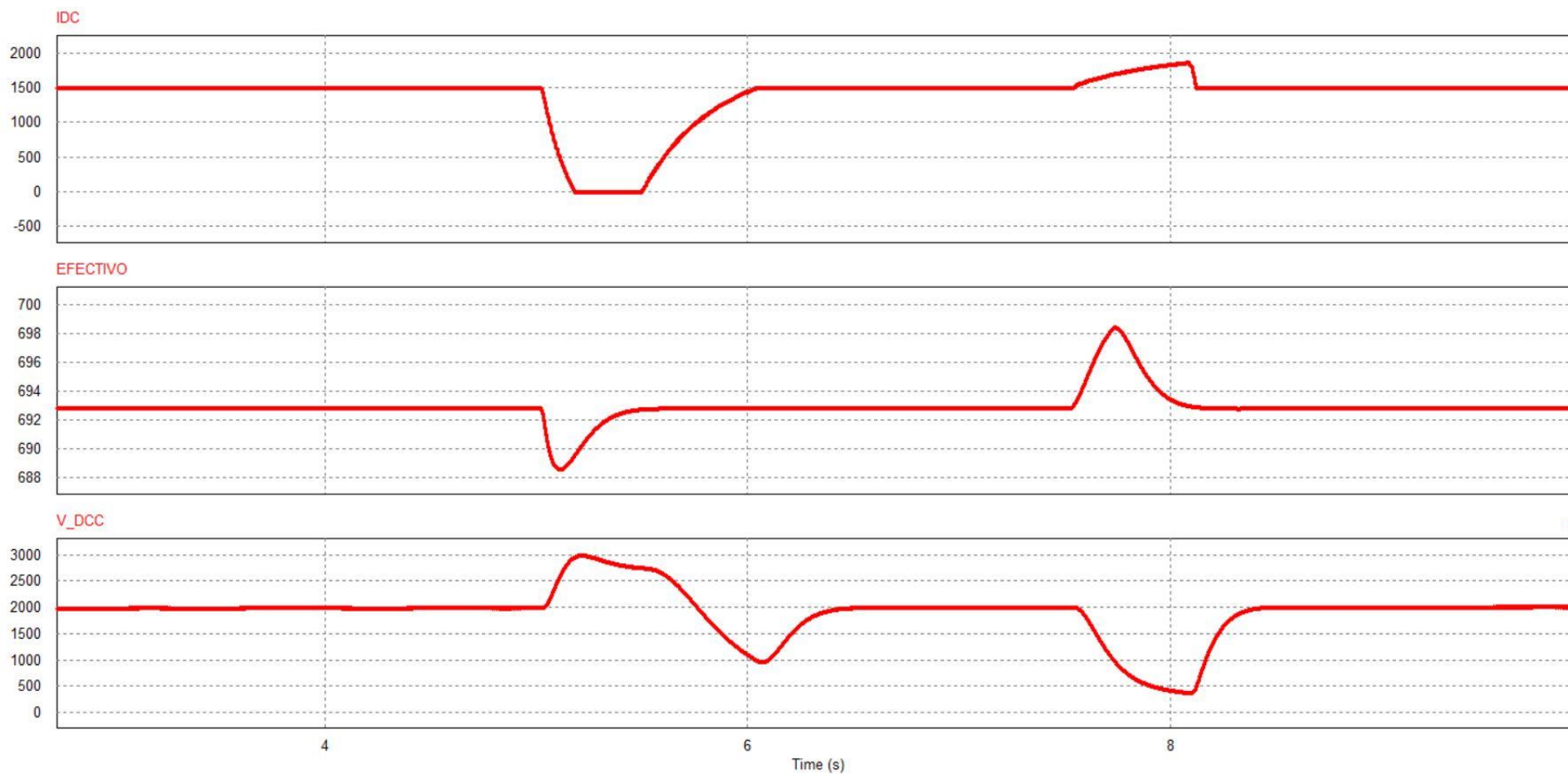


Ilustración 6: Tensión por el condensador de unión ante caídas y subidas de tensión (PSIM)



SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN BASADO EN LA SUPERCONDUCTIVIDAD, SMES

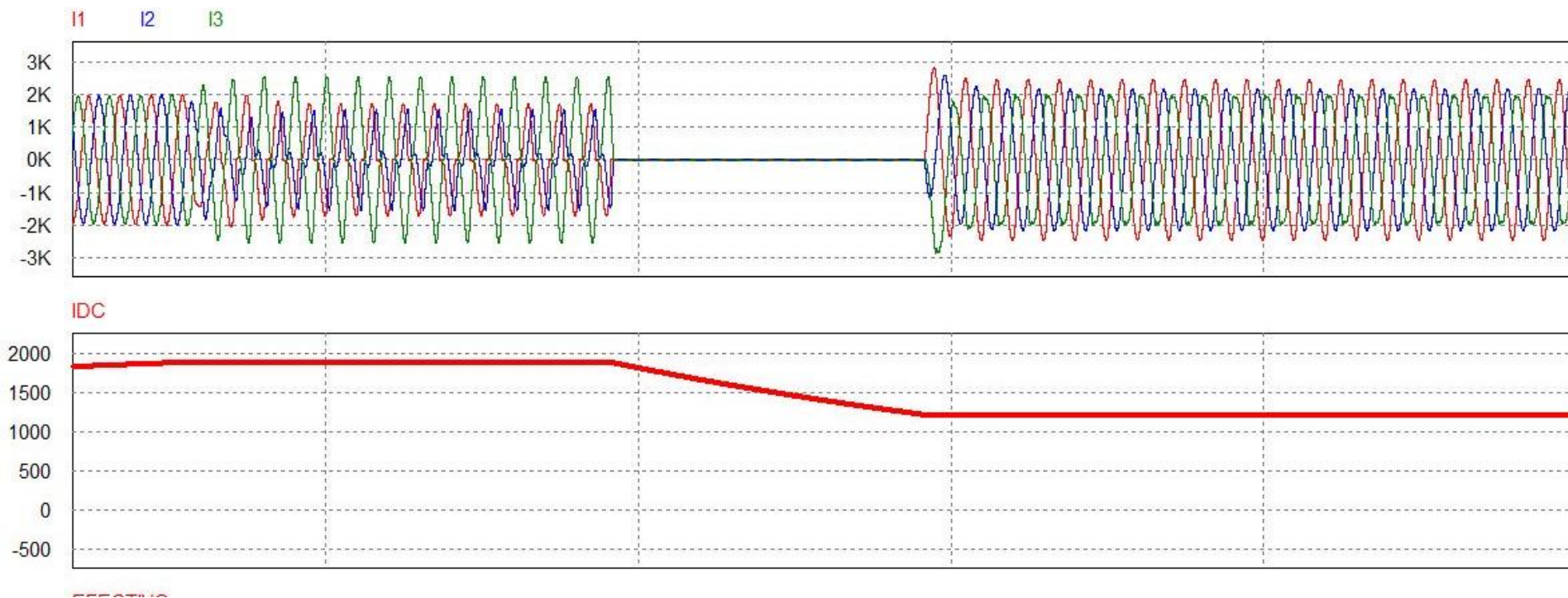


Ilustración 7: Modo stand-by de la corriente por la bobina (PSIM)



SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN BASADO EN LA SUPERCONDUCTIVIDAD, SMES

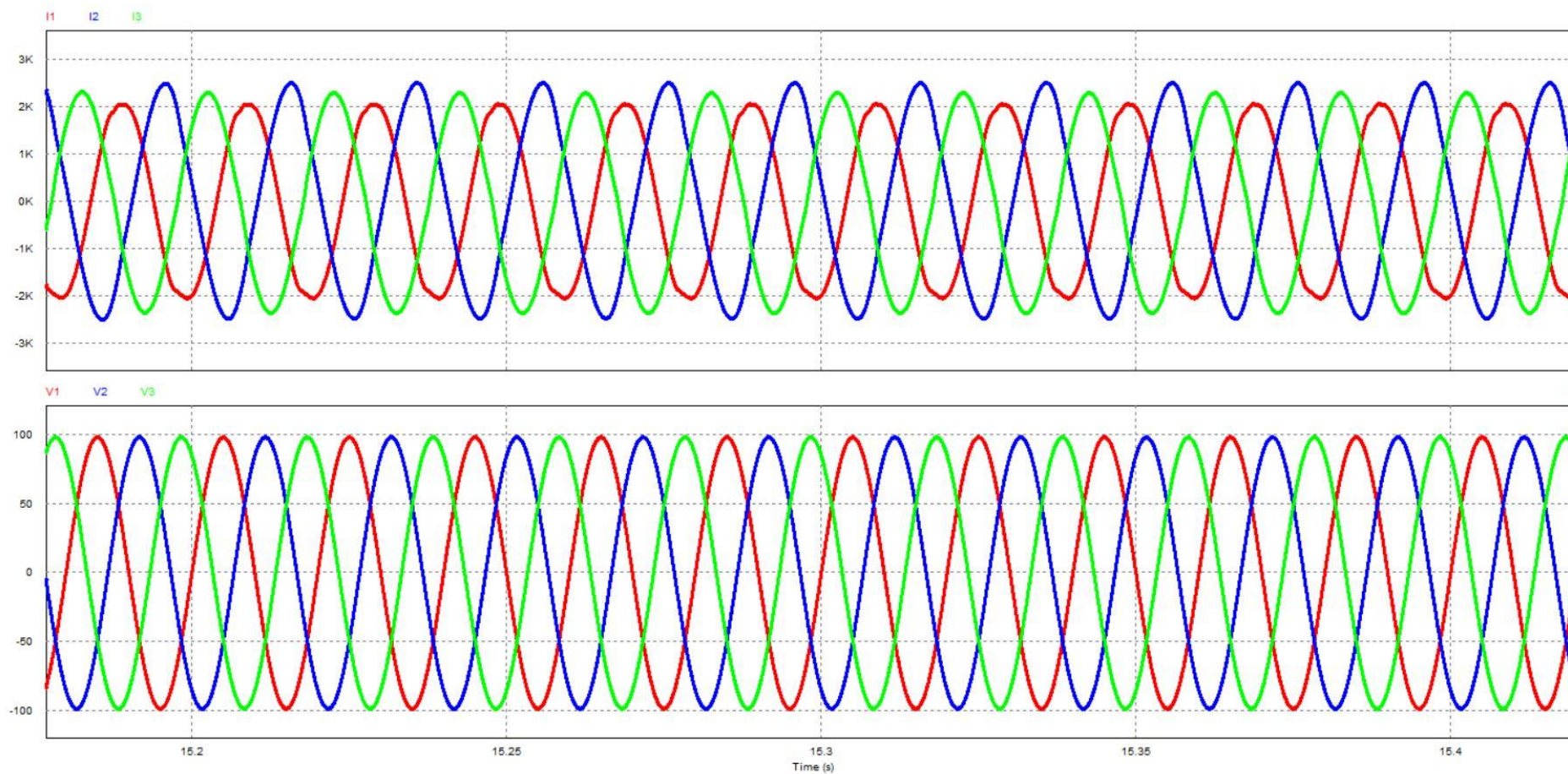


Ilustración 8: Corrientes inyectadas a la red y tensiones de la microgrid

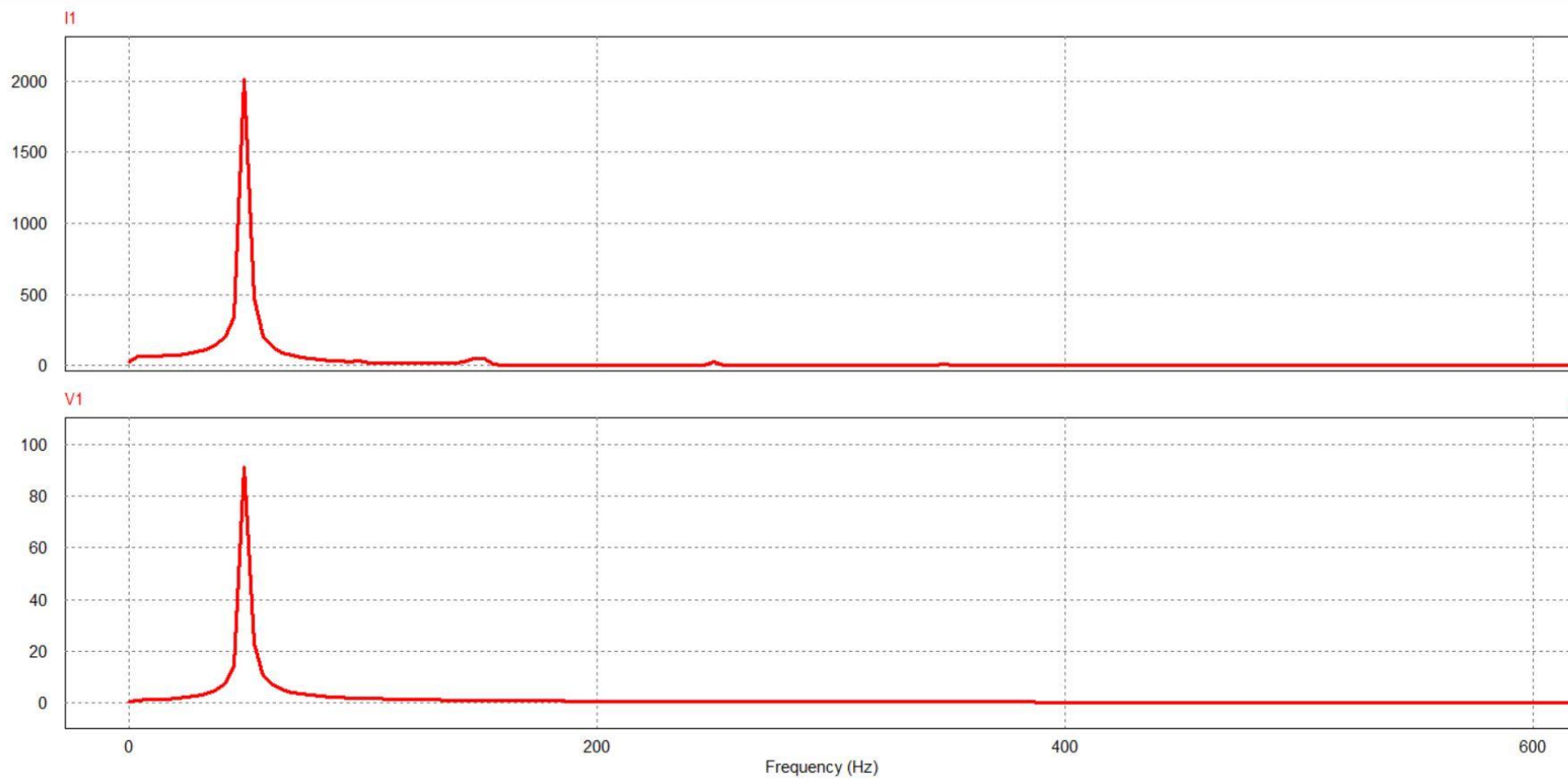


Ilustración 9: Desarrollo de Fourier de las corrientes y tensiones inyectadas por la red (PSIM)

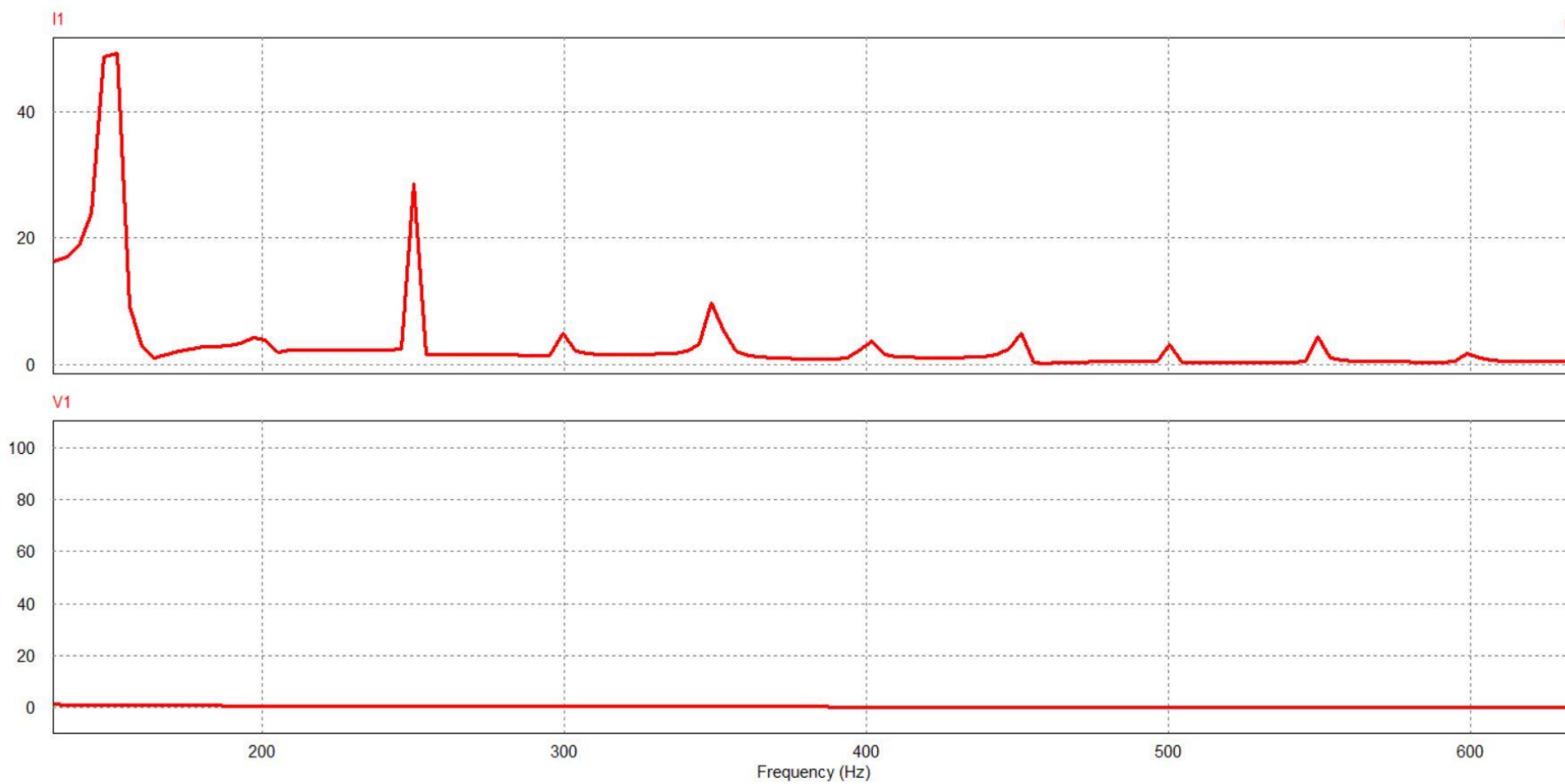


Ilustración 10: Desarrollo de Fourier de las corrientes y tensiones inyectadas por la red ampliado (PSIM)