



Editorial de la Universidad
Tecnológica Nacional

Funcionamiento de una máquina asincrónica en vacío instalada en la vecindad de un rectificador trifásico

Ing. Diego M. Ferreyra

Trabajo final del curso de posgrado:

Simulación de Componentes Eléctricos con el ATP (*Alternative Transients Program*)

Facultad Regional Santa Fe
Universidad Tecnológica Nacional – U.T.N.
Argentina

2010

Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional – edUTecNe

<http://www.edutecne.utn.edu.ar>

edutecne@utn.edu.ar

© [Copyright] La Editorial de la U.T.N. recuerda que las obras publicadas en su sitio web son *de libre acceso para fines académicos y como un medio de difundir el conocimiento generado por autores universitarios*, pero que los mismos y edUTecNe se reservan el derecho de autoría a todos los fines que correspondan.

Presentación

El siguiente es el trabajo final requerido para la aprobación del curso de posgrado “**Simulación de Componentes Eléctricos con el ATP: *Alternative Transients Program***”, aprobado por la **Ordenanza nro. 946/2002** del Consejo Superior Universitario de la **Universidad Tecnológica Nacional (UTN)**, y cursado en julio de 2010 en la **Facultad Regional Santa Fe** de la UTN.

Introducción y objetivo

En este estudio, según lo explicitado en la propuesta correspondiente, se analiza un caso concreto de contaminación armónica recurrente en diversos tipos de instalaciones industriales: un accionamiento electrónico que con su funcionamiento normal introduce perturbaciones en la línea que lo alimenta, y una máquina eléctrica asincrónica de menor potencia conectada a esa misma línea de alimentación.

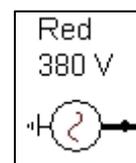
La finalidad es describir el impacto de dicha contaminación armónica sobre el funcionamiento la máquina eléctrica en cuestión, más pequeña comparativamente. Para la implementación, se utilizan datos reales provistos por los fabricantes de los equipos involucrados.

Descripción de los componentes simulados

Red de distribución

Modelo de ATP utilizado:

Fuente de CA de tensión tipo 14 trifásica con conexión a tierra (**AC source type 14, voltage source, 3-phase, degrees, RMS-L-L, grounded**) de 380 V y 50 Hz



Fundamentación teórica:

Este componente es simplemente una fuente ideal sin impedancia interna destinada a simular la red de distribución que alimenta este sistema, sin considerar aún su potencia de cortocircuito. Si bien más adelante se supone la inclusión de un transformador de distribución para reducción de 13,2 kV a 380 V, se reducen todos los valores a la referencia de baja tensión, comenzando por esta fuente.

Impedancia de red

Modelo de ATP utilizado:

Rama RLC trifásica (**RLC3, 3-phase**)



Fundamentación teórica:

Se estima una potencia de cortocircuito disponible aguas arriba del transformador de unos 300 MVA. Este dato es bastante coherente con los valores de potencia de cortocircuito disponible en la red de media tensión de San Francisco, muy cerca de la central de generación local de EPEC. Se debe convenir que éste no es un dato crítico, ya que por lo general la impedancia de un transformador de distribución resulta mucho más importante que la impedancia de la red. De hecho, en estos casos es muy habitual suponer que la red tiene una potencia de cortocircuito infinita.

Sin embargo, se procede a determinar las componentes de la impedancia equivalente de la fuente:

$$Z_s = \frac{U^2}{S} = \frac{(0,380 \text{ kV})^2}{300 \text{ MVA}} = 4,81 \times 10^{-4} \Omega = 0,481 \text{ m}\Omega$$

Adoptando los valores habituales de $\cos \varphi = 0,15$ y $\text{sen } \varphi = 0,98$, se tienen:

$$R_s = Z_s \cdot \cos \varphi = 0,481 \text{ m}\Omega \times 0,15$$

$$R_s = 0,072 \text{ m}\Omega$$

$$X_s = Z_s \cdot \text{sen } \varphi = 0,481 \text{ m}\Omega \times 0,98 = 0,471 \text{ m}\Omega$$

$$L_s = \frac{X_s}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,471 \text{ m}\Omega}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz}}$$

$$L_s = 1,5 \times 10^{-3} \text{ mH} = 1,5 \text{ }\mu\text{H}$$

Transformador

Modelo de ATP utilizado:

Rama RLC trifásica (**RLC3**, 3-phase)



Fundamentación teórica:

Dado que el foco de este trabajo está puesto en el funcionamiento de una máquina eléctrica giratoria asincrónica, no se implementa un modelo más detallado del transformador, sino que se lo describe simplemente con su impedancia serie. Se estaría dejando de lado así la característica de transferencia del transformador, pero sin mayores problemas para este análisis, que se concentra en el lado de baja tensión.

Se supone un transformador de distribución de valores nominales 160 kVA, 13,2 kV / 410 V, $U_{CC} = 4\%$, $W_{CC} = 2500 \text{ W}$. A partir de estos datos, se obtienen su resistencia e inductancia serie:

$$R_T = \frac{W_{CC} \cdot U_n^2}{S_T^2} = \frac{2500 \text{ W} \times (410 \text{ V})^2}{(160 \text{ kVA})^2}$$

$$R_T = 0,01642 \text{ }\Omega = 16,42 \text{ m}\Omega$$

$$X_T = \sqrt{\left(\frac{U_{CC}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_T}\right)^2 - R_T^2} = \sqrt{\left(\frac{4}{100} \times \frac{(410 \text{ V})^2}{160 \text{ kVA}}\right)^2 - (0,01642 \text{ }\Omega)^2} = \sqrt{(0,04202 \text{ }\Omega)^2 - (0,01642 \text{ }\Omega)^2}$$

$$X_T = 0,03868 \text{ }\Omega = 38,68 \text{ m}\Omega$$

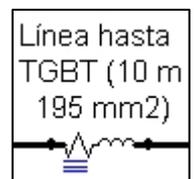
$$L_T = \frac{X_T}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{38,68 \text{ m}\Omega}{2 \cdot \pi \times 50 \text{ Hz}}$$

$$L_T = 0,123 \text{ mH}$$

Línea desde el transformador hasta el Tablero General de Baja Tensión (TGBT)

Modelo de ATP utilizado:

Rama RLC trifásica (**RLC3**, 3-phase)



Fundamentación teórica:

Se supone un tramo de 10 m de conductores de 195 mm² para llevar la alimentación desde el secundario del transformador hasta la entrada del TGBT. Para la determinación de la resistencia óhmica de estos conductores, se utiliza la resistividad a su temperatura límite de funcionamiento de 90 °C, de modo que se considera la alternativa más desfavorable, y por ende más conservadora. Para la determinación de la reactancia inductiva de estos conductores, se recurre a un factor empírico relacionado con la longitud aplicable a esta disposición unifilar:

$$R_{LTT} = \rho_{Cu-90^\circ} \cdot \frac{l}{A} = 0,0214 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \times \frac{10 m}{195 mm^2} = 0,011 \Omega$$

$$R_{LTT} = 1,1 m\Omega$$

$$X_{LTT} \cong 0,12 \cdot l [m \rightarrow m\Omega] = 0,12 \times 10$$

$$X_{LTT} = 1,2 m\Omega$$

$$L_{LTT} = \frac{X_{LTT}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{1,2 m\Omega}{2 \cdot \pi \times 50 Hz} = 0,0038 mH$$

$$L_{LTT} = 3,8 \mu H$$

Blindobarras de distribución en BT

Modelo de ATP utilizado:

Rama RLC trifásica (**RLC3**, 3-phase)

Fundamentación teórica:

Se supone un tendido de 80 m de blindobarras marca Novobarra, modelo BB250, compuesto por dos tramos de 40 m cada uno, hasta el punto de alimentación del accionamiento electrónico (Figura 1). Los datos fundamentales provistos por el fabricante son los siguientes:

- Intensidad nominal I_n a 35 °C ambiente: 250 A
- Sección por fase: 97 mm²
- Resistencia por fase a I_n y 20 °C ambiente: 0,2248 mΩ/m
- Reactancia por fase a 50 Hz: 0,1521 mΩ/m
- Impedancia por fase a I_n , 20 °C ambiente y 50 Hz: 0,2714 mΩ/m

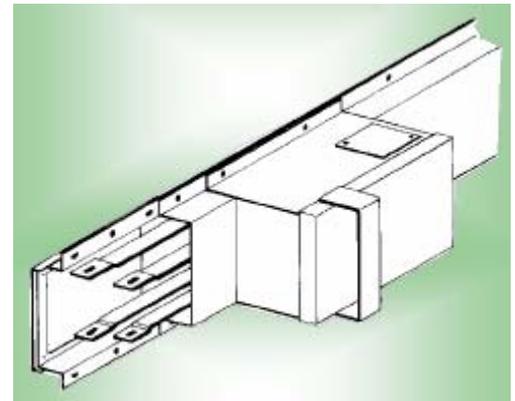
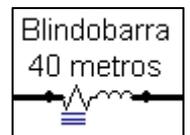


Figura 1. Blindobarras NOVOBARRA BB250

A partir de estos valores, se pueden obtener la resistencia y la reactancia representativas de cada uno de los dos tramos de 40 m conectados en serie:

$$R_{BB} = r_{BB} \cdot 40 m = 0,2248 m\Omega / m \times 40 m$$

$$R_{BB} = 9 m\Omega$$

$$X_{BB} = x_{BB} \cdot 40 m = 0,1521 m\Omega / m \times 40 m = 6 m\Omega$$

$$L_{BB} = \frac{X_{BB}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{6 m\Omega}{2 \cdot \pi \times 50 Hz}$$

$$L_{BB} = 0,195 mH$$

De manera similar que para el caso de los cables, estos valores resultan bastante conservadores, debido a que se considera la resistividad de las blindobarras a su corriente nominal, pero en esta aplicación se las hace trabajar a poco más de la mitad de ese valor.

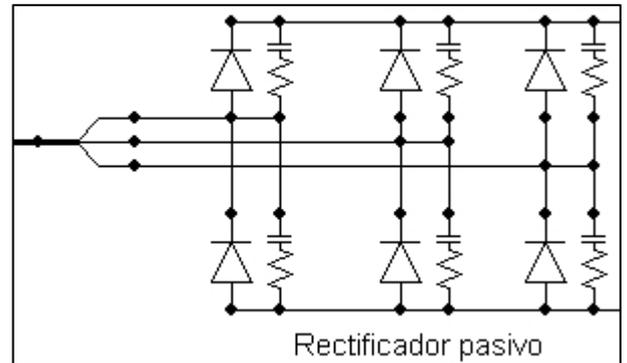
Rectificador pasivo

Modelo de ATP utilizado:

Puente de diodos genéricos, interruptor simple tipo 11 (**Diode. Simple TYPE 11 switch**), cada diodo con un circuito amortiguador de transitorios (*snubber*) representado con una rama RLC monofásica (**RLC**) donde $R = 33 \Omega$ y $C = 1 \mu F$

Fundamentación teórica:

No se ajustan mayores detalles sobre estos componentes, ya que sólo se requiere la rectificación de la tensión alterna de entrada y no se analizan los detalles de su funcionamiento interno.



Bus de corriente continua

Modelo de ATP utilizado:

Resistencias simples (**RESISTOR**), condensador simple (**CAP_U0**) e interruptor controlado por tiempo (**TSWITCHT**, *Time-controlled switch with RECLOSE option*)

Fundamentación teórica:

Según lo relevado sobre un convertidor de frecuencia comercial (Figura 2), se cuenta con los valores del condensador representativo del bus de corriente continua ($5640 \mu F$) y de la resistencia de precarga o inserción (10Ω), que está prevista para evitar que la carga del puente rectificador se presente como un cortocircuito cuando se comienza a alimentar el sistema con el condensador descargado. Una vez estabilizada la tensión en el bus de corriente continua, esta resistencia de precarga se desvía por medio del interruptor controlado por tiempo. El instante en que se cierra este interruptor ($0,12 s$) se determinó comprobando que el pico de corriente que se produce en el momento de su cierre resultara razonablemente reducido, aunque no se cotejó el valor de tal corriente con valores límites de los semiconductores del puente rectificador, como debería haberse hecho en la práctica.

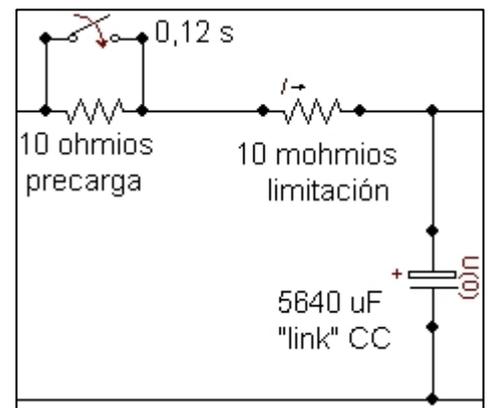


Figura 2. Convertidor de frecuencia comercial de referencia

La resistencia denominada “de limitación” simplemente representa la pequeña impedancia de ese tramo de circuito que se interpone entre el puente rectificador y el bus de corriente continua.

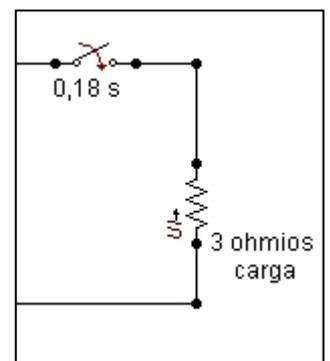
Carga del bus de corriente continua (carga del convertidor)

Modelo de ATP utilizado:

Resistencia simple (**RESISTOR**) e interruptor controlado por tiempo (**TSWITCHT**, *Time-controlled switch with RECLOSE option*)

Fundamentación teórica:

No se simula la conversión de corriente continua a alterna, sino que sólo se establece una carga en corriente continua. En la práctica, podría simularse adicionalmente el puente inversor de seis pulsos que debería alimentar el modelo de la máquina asíncrona de $75 kW$ antes mencionada.



Frame	: 132M	Service factor	: 1,00
Output	: 7.5 kW	Duty cycle	: S1
Frequency	: 50 Hz	Ambient temperature	: 40
Poles	: 4	Altitude	: 1000 m.a.s.l
Rated speed	: 1455	Enclosure	: IP55
Slip	: 3,00	Aprox. weight	: 59,8 kg
Rated voltage	: 380/660 V	Moment of inertia	: 0,04652 kgm ²
Rated current	: 15,6/8,97 A	Sound Pressure Level	: 60 db(A)
L. R. Amperes	: 104/60,1 A		
II/In	: 6,7	Bearing	Front 6308 ZZ Rear 6207 ZZ
No load current	: 8,42/4,85 A	Regreasing int.	--- ---
Rated torque	: 49,25 Nm	Grease amount	--- ---
Locked rotor torque	: 210 %		
Breakdown torque	: 290 %		
Design	: N		
Insulation class	: F		
Locked rotor time	: 8 s (hot)		
		PERFORMANCE UNDER LOAD	
		Load	Power factor Efficiency (%)
		100%	0,84 87,0
		75%	0,77 86,5
		50%	0,63 85,0

Figura 4. Valores nominales del motor de 7,5 cuyo funcionamiento se desea observar

Se utiliza un modelo genérico de ATP que trata al motor con la transformación $qd0$, con sus características adecuadas a las de la máquina real. La transformación $qd0$, (Figura 5) ideada para resolver las ecuaciones fundamentales de funcionamiento de las máquinas eléctricas rotativas, permite representar sistemas trifásicos de magnitudes electromagnéticas en sistemas de dos componentes perpendiculares, q y d, más una tercera componente, 0, que pone en manifiesto el grado de desequilibrio en las tres componentes originales.

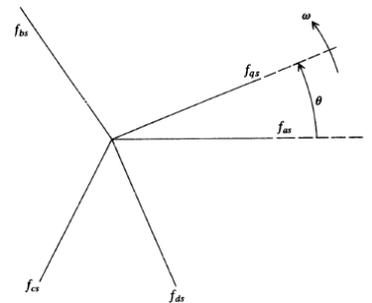


Figura 5. Transformación $qd0$

Es de destacar que este motor, que es el que en definitiva se desea estudiar con mayor profundidad, es de un orden de magnitud menor que el alimentado por medio del convertidor de frecuencia.

Se utiliza la aplicación **Windsyn v. 1.0.c**, desarrollada por **Gabor Furst Consultants, Inc.**, para obtener con los datos de placa del motor los elementos de su circuito equivalente en componentes $qd0$, de manera de poder introducir directamente esos datos en el modelo de máquina previsto en ATP. También se recurre a algunos datos obtenidos de los modelos predefinidos que se incluyen en el módulo **SimPowerSystems** de **Simulink**[®], componente de **MATLAB**[®].

Los siguientes son los datos ingresados a dicha aplicación Windsyn:

Input data			
rotor type	Single		
System fequency	Hz	-----	50
Rated voltage	kV	-----	0,38
Horse power rating	hp	-----	10
Synchronous speed	r.p.m.	-----	1500
Rated power factor		-----	0,84
Full load slip	%	-----	3
Full load efficiency		-----	0,87
Direct across line starting current	p.u.--		6,7
Starting torque	. p.u.	-----	2,1
Inertia	. kg.m ²	-----	,04
Load torque	N-m	-----	46,72
Leakage reactance saturation			
threshold current	p.u.	-----	2

Los siguientes son los resultados obtenidos de Windsyn, que constituyen los datos que se ingresan en el modelo de la máquina universal en el archivo de ATP:

```

Coil parameters for the U.M.machine
  inductances in Henrys, resistances in ohms
=====
Direct axis common inductance    lm      ,078043
Quad. axis common inductance     lm      ,078043

Stator coils
stator resitance                  rs      1,160933
stator leakage inductance unsaturated lstn ,002665
stator leakage inductance saturated lsts  ,001832

Rotor coils
#1 coil resistance                 rrot1   ,721216
#1 leakage inductance unsaturated lrot1n ,002665
#1 leakage inductance saturated  lrot1s  ,001832
Rotor coils q axis same as for the d axis
  
```

- Condensador representativo del momento de inercia:

A partir de los datos provistos por el fabricante de la máquina, se sabe que su momento de inercia es de unos 0,04652 kg.m. Entonces:

$$C = 0,04652 F = 46.520 \mu F$$

- Resistencia representativa del factor de fricción:

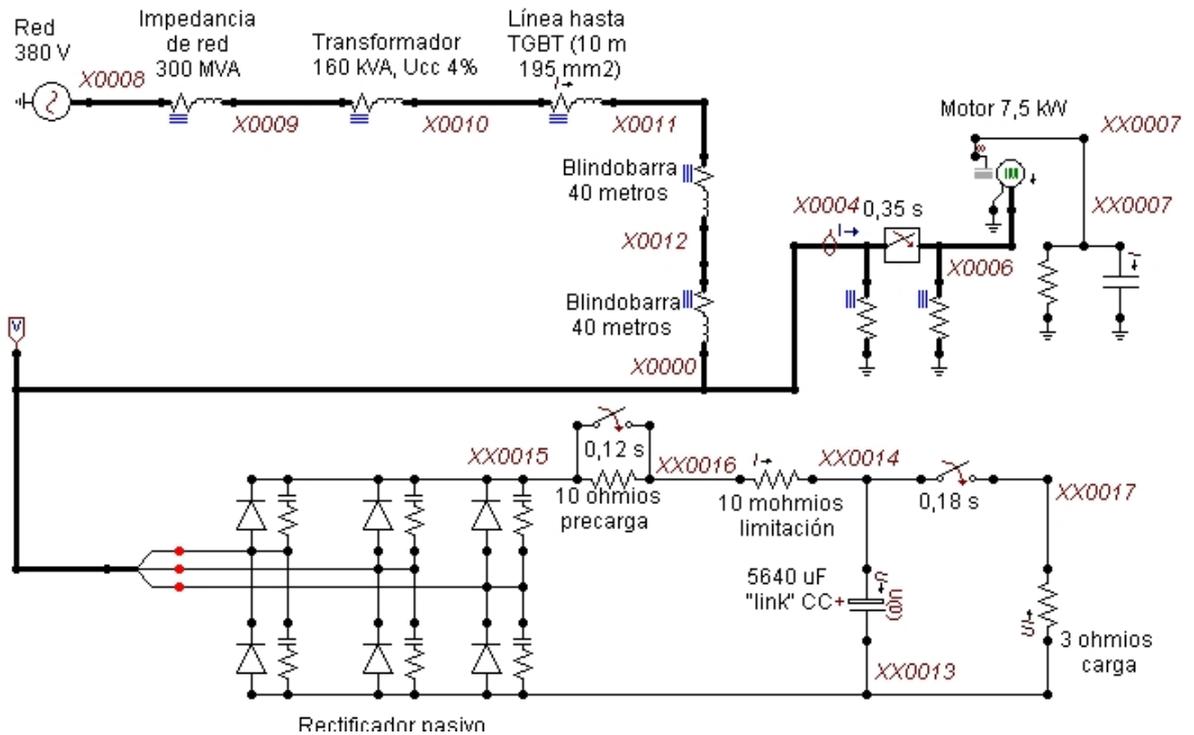
A partir de los datos obtenidos de un modelo predefinido de Simulink similar al requerido, se adopta un factor de fricción de 0,000503 N.m.s. Entonces:

$$R = \frac{1}{0,000503} [\Omega]$$

$$R = 1988 \Omega$$

A ambos lados del interruptor que conecta este motor de 7,5 kW a los 0,35 s, se conectan sendas ramas trifásicas puestas a tierra de $10^8 \Omega$ de resistencia por fase cada una. Su finalidad es evitar los problemas de convergencia que se producen en los cálculos que realiza el EMTP al quedar dos nodos de la red desconectados.

A continuación, se muestra el circuito completo donde se introdujeron todos los componentes antes enumerados.



Funcionamiento del circuito y resultados obtenidos

La siguiente es la evolución en el tiempo de la corriente que atraviesa la resistencia interna de precarga de $10\ \Omega$ del bus de corriente continua (Figura 6). Se comprueba que hasta los $0,12\ s$ la corriente va decayendo exponencialmente debido a la carga gradual del banco de condensadores del bus de corriente continua. En ese instante, se conecta el interruptor que desvía dicha resistencia de precarga y se produce un pico de corriente que completa la carga del capacitor de manera tal que la corriente se hace cero. Posteriormente, a los $0,18\ s$, se cierra el interruptor que conecta la carga del bus de corriente continua y el funcionamiento del rectificador trifásico entra en régimen.

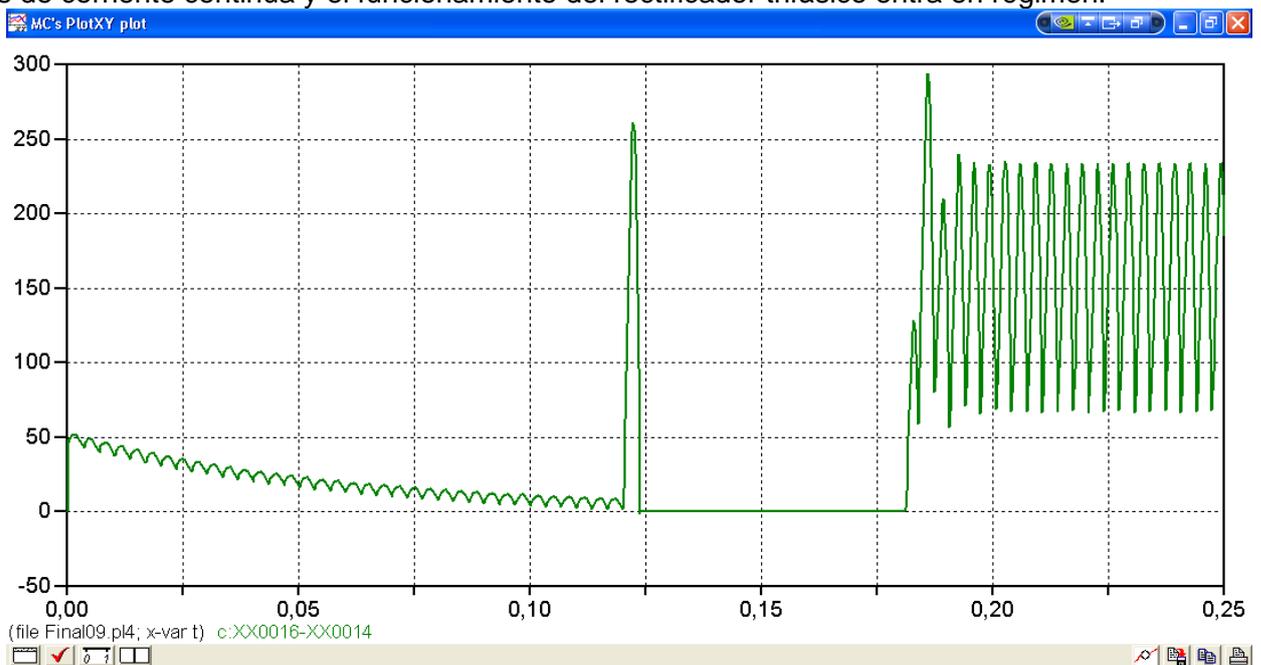


Figura 6. Evolución de la corriente del bus de corriente continua

La siguiente es la evolución de la tensión del bus de corriente continua (Figura 7), que se condice con la explicación anterior sobre la corriente que carga el grupo de condensadores. Con la evolución de estos dos parámetros, se muestra la puesta en régimen del rectificador trifásico que representa la etapa de entrada del convertidor de frecuencia simulado.

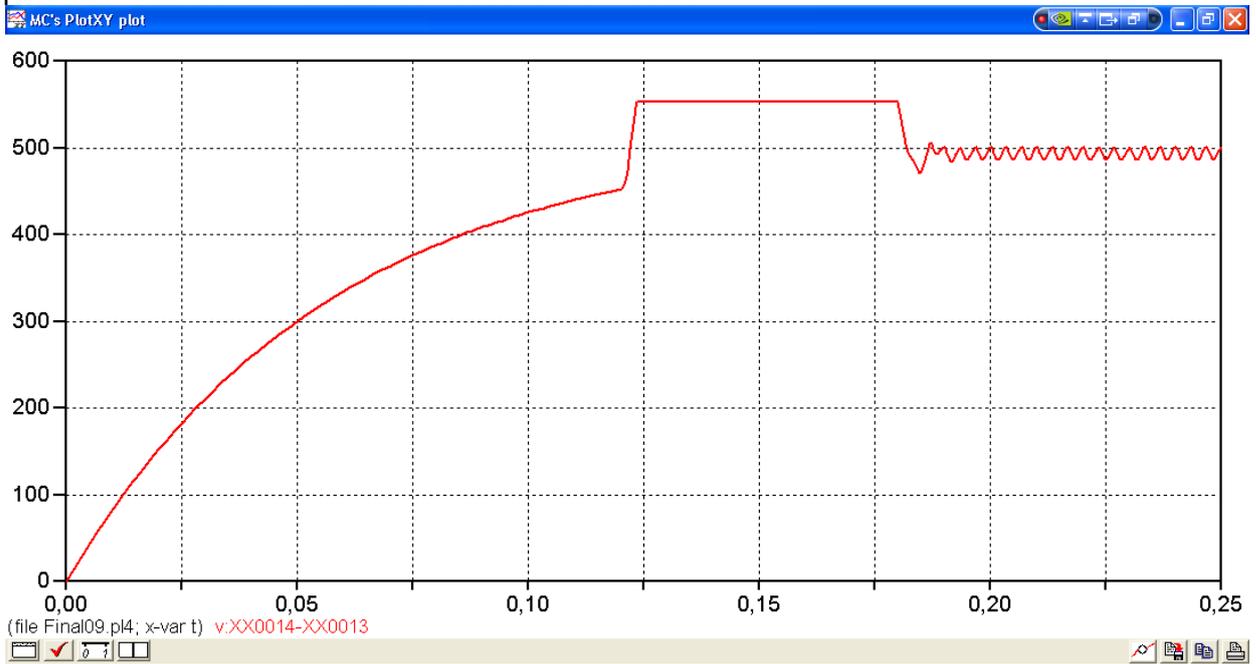


Figura 7. Evolución de la tensión del bus de corriente continua

Correspondientemente, la siguiente es la corriente de una de las fases de alimentación de este rectificador (Figura 8), donde se nota la correspondencia con el funcionamiento ya explicado: una corriente inicial de precarga de los condensadores que disminuye gradualmente, el pico de corriente de los 0,12 s, un período de corriente casi nula hasta los 0,18 s, y a partir de allí un funcionamiento en régimen donde se observa la forma de onda típica de un rectificador trifásico.

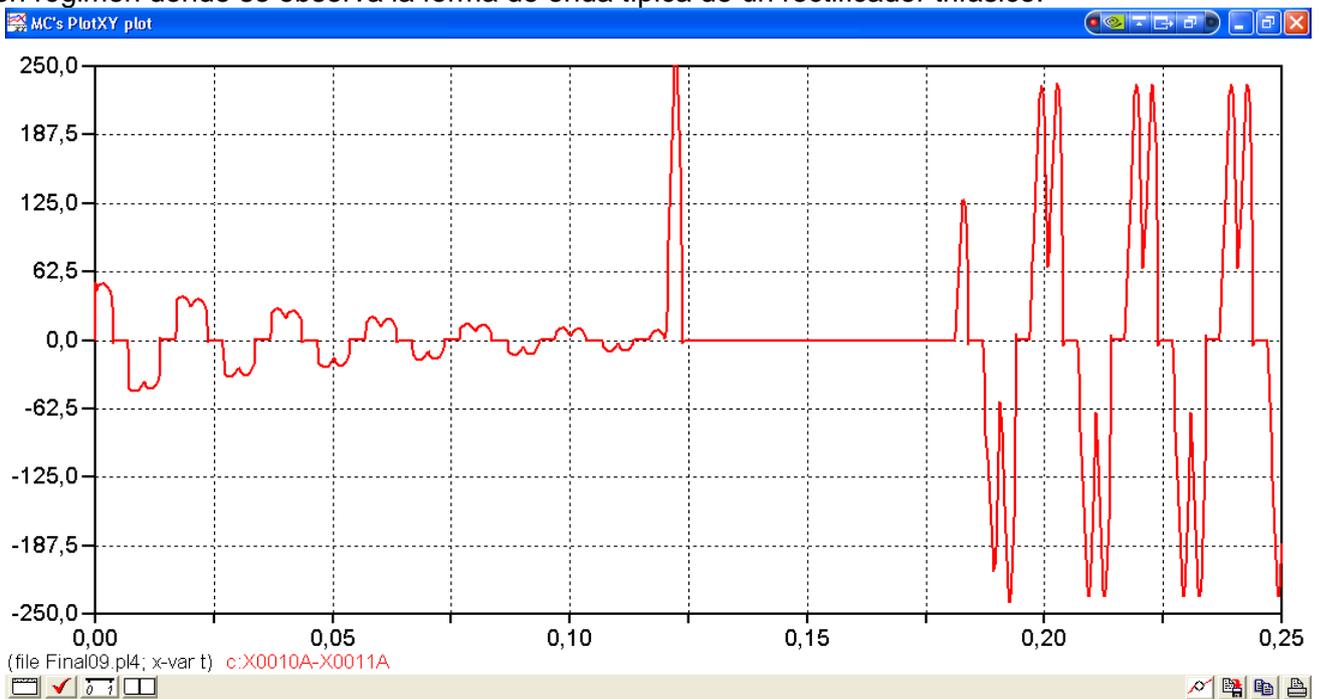


Figura 8. Evolución de la corriente en una de las fases de alimentación del rectificador

Similarmente, la siguiente es la tensión en una de las fases a los bornes del rectificador (Figura 9), donde se muestra la incidencia de las formas de onda de corriente sobre la caída de tensión.

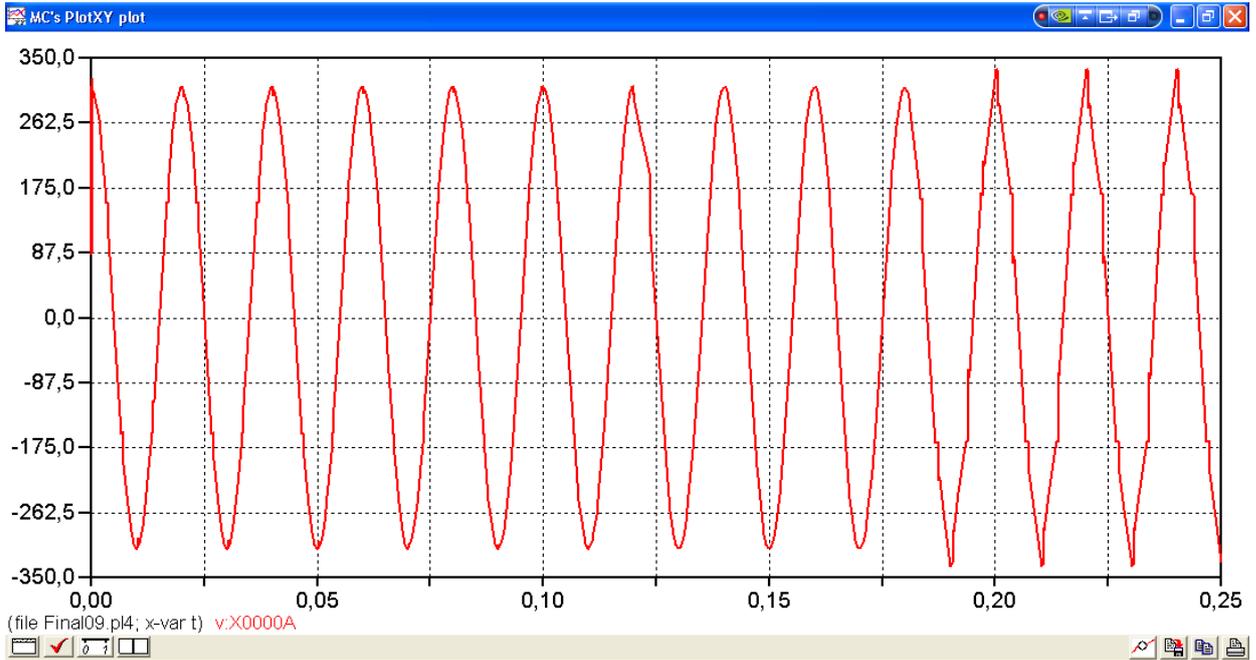


Figura 9. Evolución de la tensión en una de las fases de alimentación del rectificador, a los bornes de éste

La siguiente es la misma tensión a los bornes del rectificador, pero desde los 0,30 s hasta el tiempo final (0,60 s) (Figura 10). A partir de los 0,35 s, se comienza a alimentar el motor de 7,5 kW.

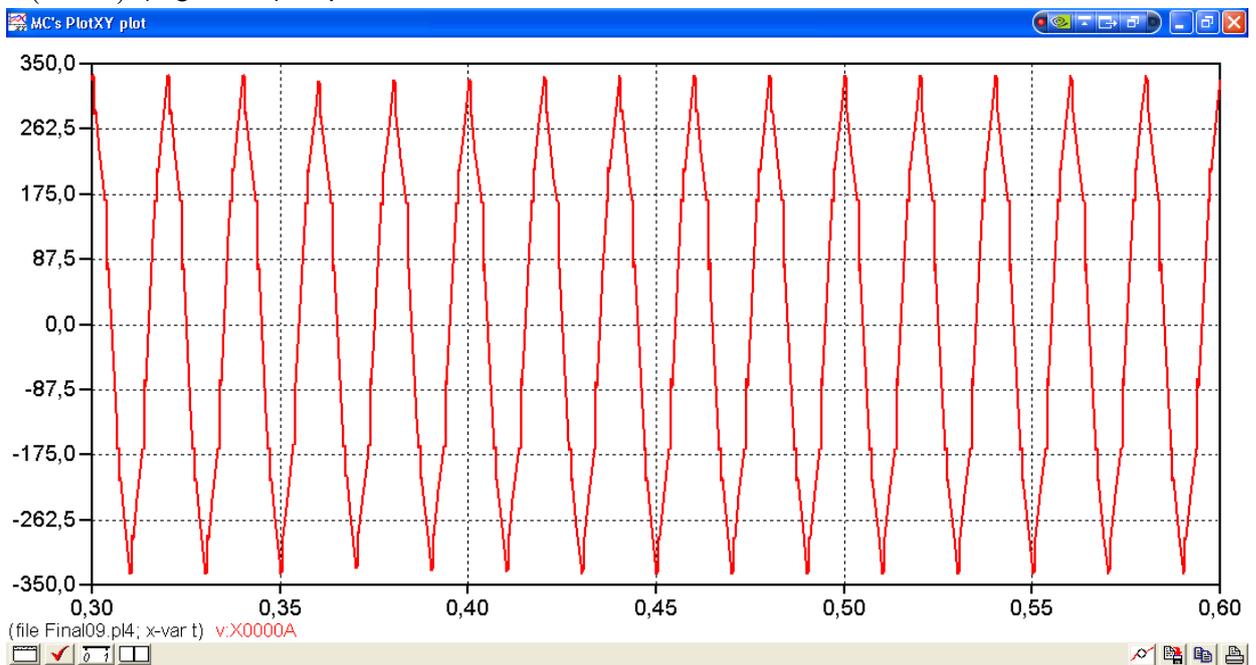


Figura 10. Evolución de la tensión en una de las fases de alimentación del rectificador, a los bornes de éste

Se adjunta a continuación el análisis de Fourier de esta onda de tensión en valores por unidad para el último ciclo analizado (Figura 11), donde se miden un 6,28% de quinta armónica de tensión ($13,43 V_{RMS}$) y un 3,09% de séptima armónica de tensión ($6,61 V_{RMS}$) superpuestas a la fundamental

($213,7 V_{RMS}$). Como es conocido debido a la forma de onda de corriente de estos rectificadores, también se observa la presencia de los pares de armónicas de orden 11 y 13, 17 y 19, y 23 y 25, pero sus valores son de importancia decreciente.

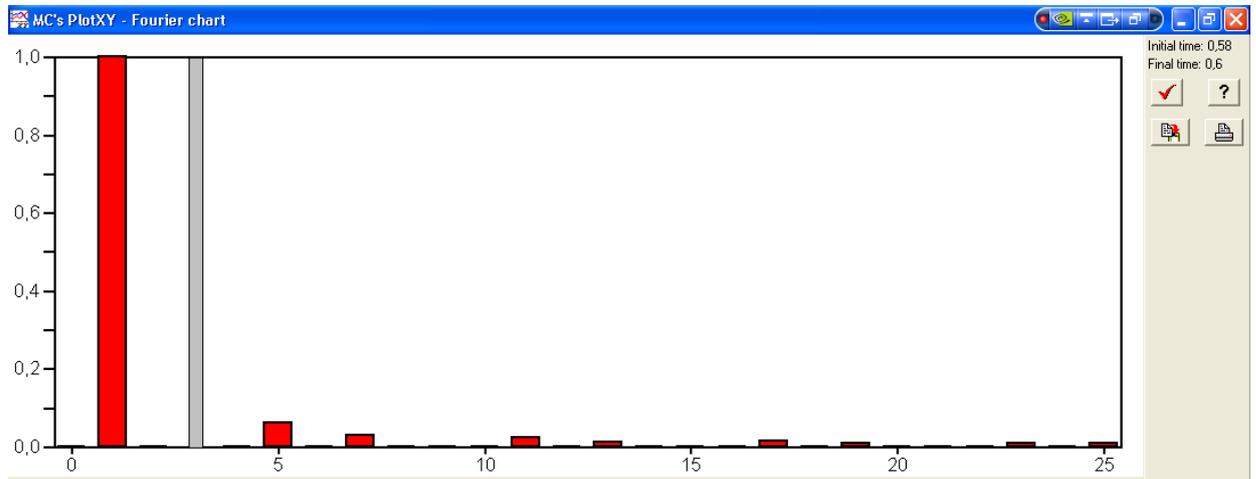


Figura 11. Armónicas de la tensión en una de las fases de alimentación del rectificador, a los bornes de éste

A continuación, se muestra la evolución de la corriente consumida por el motor de $7,5 kW$ (Figura 12), acompañada de un análisis de Fourier en valores por unidad del último ciclo simulado (Figura 13), donde se miden un 26,4% de quinta armónica de corriente ($1,41 A_{RMS}$) y un 9,3% de quinta armónica de corriente ($0,50 A_{RMS}$) superpuestas a la fundamental ($5,35 A_{RMS}$).

Como es de esperarse a partir del análisis de la tensión aplicada a este motor, también se llega a distinguir la presencia de los pares de armónicas de orden 11 y 13, 17 y 19, y 23 y 25, pero sus valores son de importancia decreciente.

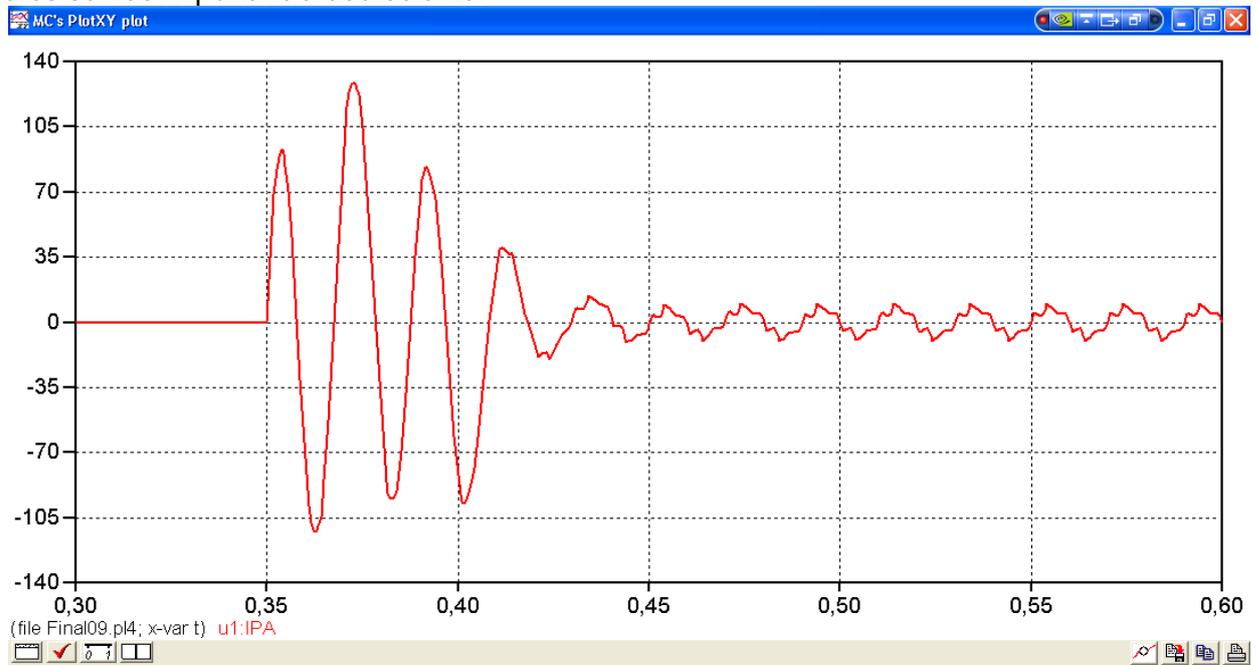


Figura 12. Evolución de la corriente en una de las fases del motor de $7,5 kW$

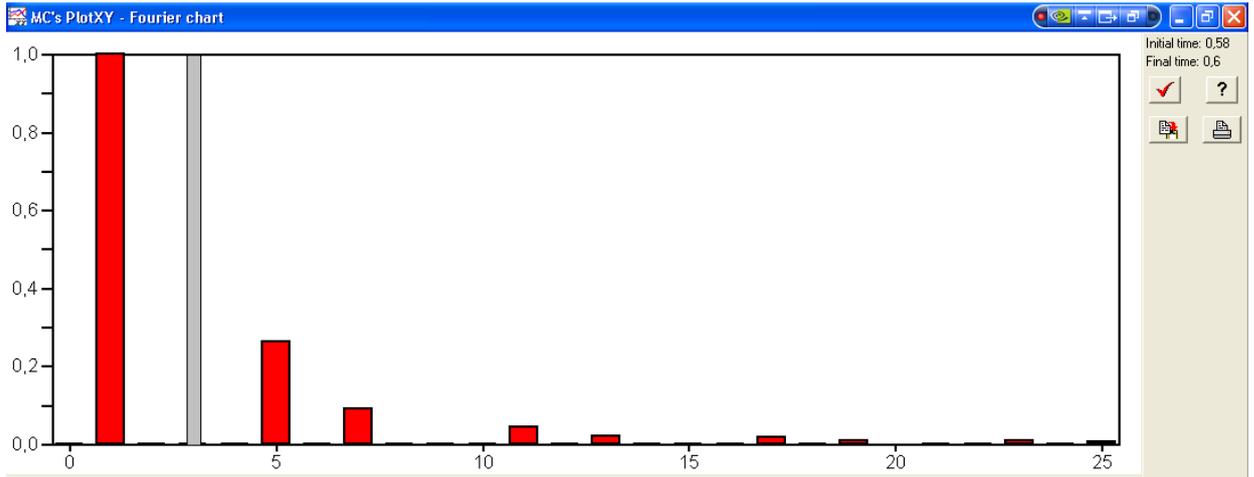


Figura 13. Armónicas de la corriente en una de las fases del motor de 7,5 kW

Finalmente, la siguiente es la evolución de la velocidad (trazo rojo) y del par en el eje (trazo verde) del motor de 7,5 kW desde su conexión a los 0,35 s hasta su estabilización en vacío (Figura 14). Justamente en esta situación, se observa que el par no se anula completamente, sino que existe una oscilación de par relativamente importante, mayor a $\pm 6 \text{ N.m}$.

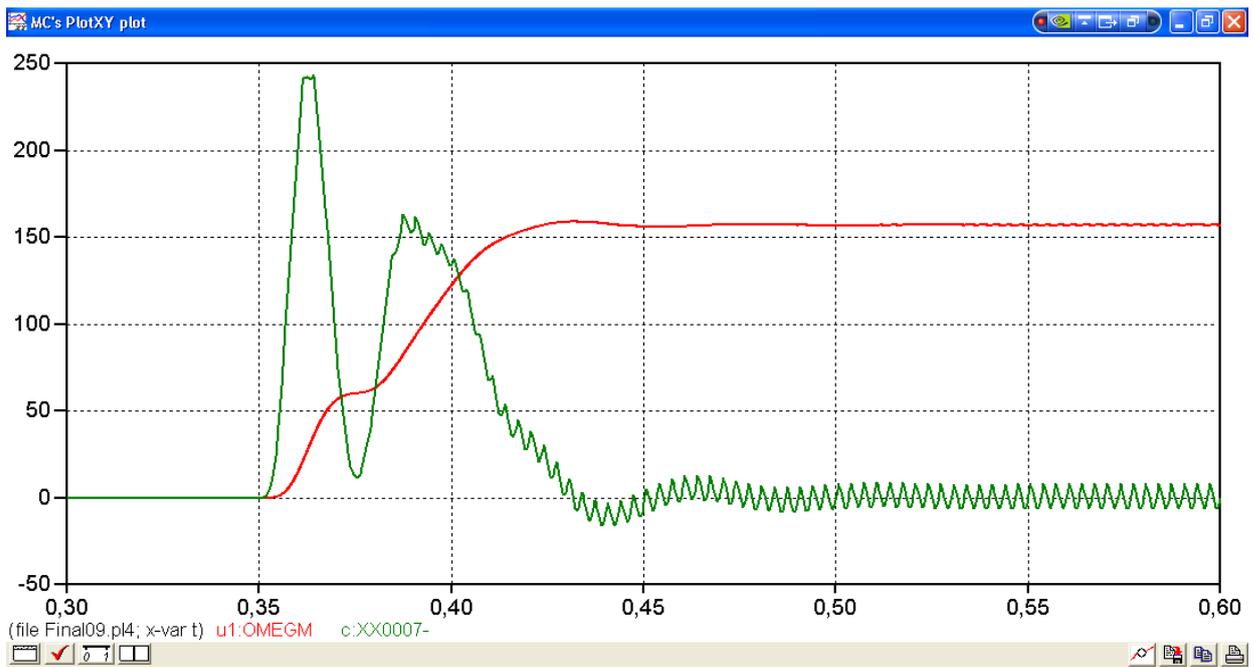


Figura 14. Evolución de la velocidad (en rojo) y del par (en verde) del motor de 7,5 kW

El análisis de Fourier **en valores de cresta** que se adjunta más abajo (Figura 15), realizado sobre el último ciclo del par, demuestra que, si bien la componente fundamental efectivamente es nula, la más importante es la sexta armónica de par ($6,67 \text{ N.m}$). Se distinguen también claramente armónicas de par de orden 12, 18 y 24, que se corresponden razonablemente con los pares de armónicas de corriente de orden 11 y 13, 17 y 19, y 23 y 25 antes mencionados.

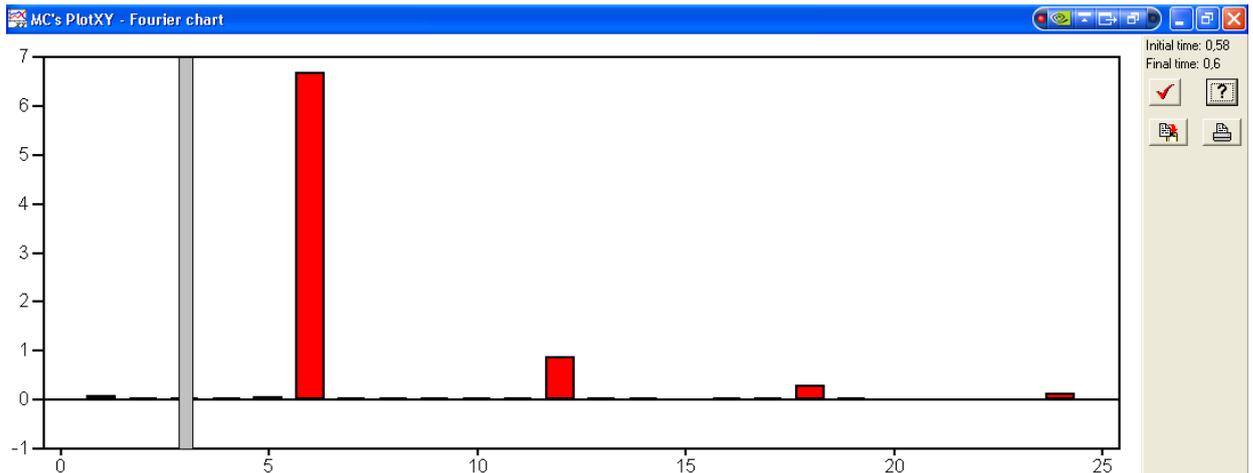


Figura 15. Armónicas del par en el eje del motor de 7,5 kW

La explicación resumida de este fenómeno es que la tensión no sinusoidal aplicada a los bornes del motor de 7,5 kW contiene principalmente quinta y séptima armónicas, que excitan armónicas de corriente de igual orden en el estator. Se constata que, al ser la quinta armónica de secuencia negativa y la séptima de secuencia positiva, ambas coinciden en producir una armónica de par de orden seis.

Sin reiterar todo el análisis completo, se puede comprobar cómo la conexión del motor de 7,5 kW en un punto ubicado aguas arriba de su punto de conexión original disminuye la amplitud de las oscilaciones de par (Figura 16). Como puede comprobarse, al conectar dicho motor entre los dos tramos de blindobarra mientras se mantiene el convertidor en el extremo de ambas, la sexta armónica de par se reduce a un valor de 5,88 N.m. Básicamente, esto responde a la conexión de ambas cargas con un punto de acoplamiento común (P. A. C.) más cercano a la fuente, con lo cual se mitigan de manera importante los efectos de la carga contaminante sobre la carga no contaminante.

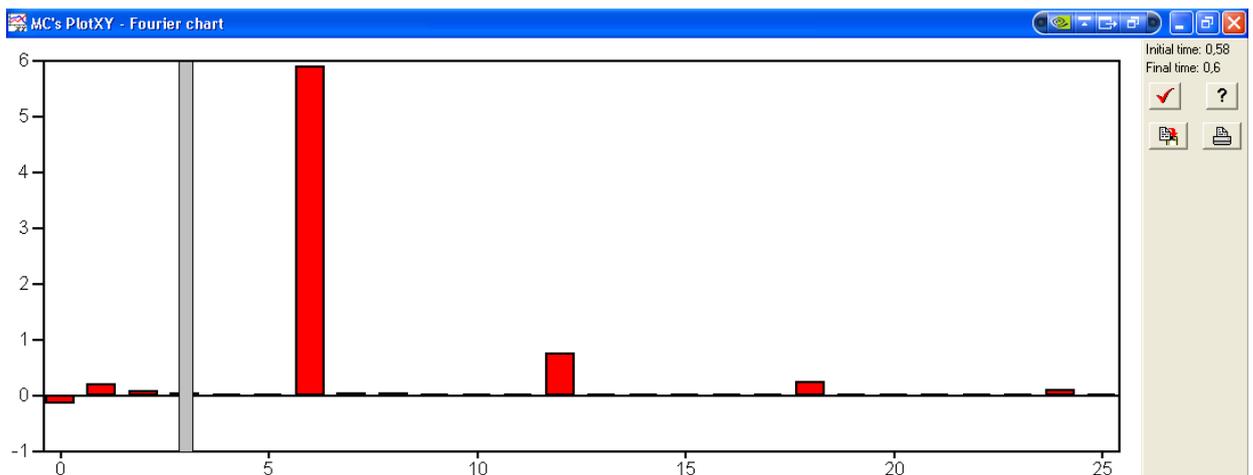


Figura 16. Armónicas del par en el eje del motor de 7,5 kW

Similarmente, como es de esperarse, al conectar el motor de 7,5 kW directamente al Tablero General de Baja Tensión, se observa una reducción aún más importante en las oscilaciones de par ya descritas (Figura 17). En este caso, la sexta armónica de par alcanza un valor de 5,08 N.m.

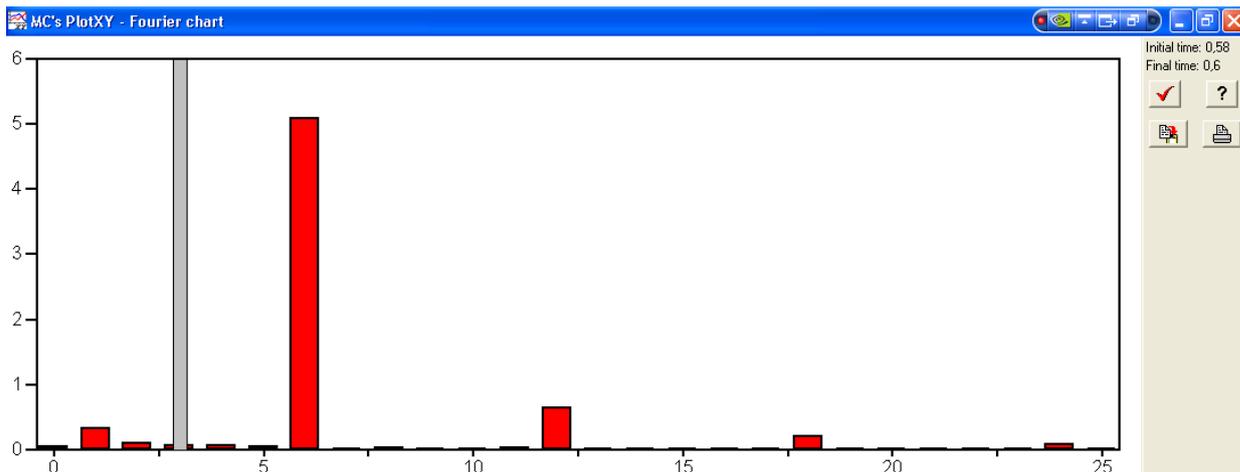


Figura 17. Armónicas del par en el eje del motor de 7,5 kW

Todo el análisis realizado podría complementarse con la aplicación de la carga mecánica nominal en el eje del motor de 7,5 kW, lo cual alteraría ligeramente los resultados por aparecer la velocidad asincrónica correspondiente al giro del eje del motor. Más allá de eso, se han obtenido resultados significativos que describen razonablemente el funcionamiento del circuito planteado para la simulación y que se condicen con lo expresado en toda la bibliografía de referencia.

Referencias bibliográficas principales

- [1] P. Krause, O. Wasynczuk, S. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, 2nd. edition, Wiley Interscience, New York (USA), 2002
- [2] M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook*, 2nd. edition, Academic Press (Elsevier, Inc.), San Diego (USA), 2002
- [3] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications and Design*, 2nd. edition, John Wiley & Sons, Inc., New York (USA), 2002
- [4] J. C. Gómez, *Calidad de potencia para usuarios y empresas eléctricas*, EDIGAR, Buenos Aires (Argentina), 2005
- [5] C. Reineri, *Armónicos en sistemas eléctricos: fundamentos y análisis*, Editorial de la Fundación Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto (Argentina), 2005
- [6] M. Pérez, N. B. de Medina, A. Llorente, *La amenaza de los armónicos y sus soluciones*, Ed. Paraninfo, Madrid, 1999

Otros Trabajos del mismo autor:

Crisis energética siglo XXI: ¿qué investigamos?

http://www.edutecne.utn.edu.ar/debates/crisis_energetica.pdf

Aprendizaje colaborativo con simulaciones computacionales

http://www.edutecne.utn.edu.ar/monografias/aprendizaje_colaborativo.pdf