
14. Resultados obtenidos con flujo de cargas

1. Introducción

Los resultados que se presentan en este capítulo se han obtenido a partir de introducir redes en un programa de flujo de cargas que utiliza el método de h-Newton e incorpora los modelos de las cargas no lineales estudiadas así como los de varios tipos de líneas, generadores y cargas lineales. Los datos se introducen en tanto por uno (p.u.).

Se han realizado numerosas simulaciones tanto para comprobar el funcionamiento de los modelos como para estudiar las condiciones iniciales. También se han realizado simulaciones tipo para presentar las distintas aplicaciones de los modelos. En este capítulo se verá sólo una pequeña muestra. Cabe observar que las formas de onda representadas han sido obtenidas siempre a partir de su descomposición armónica utilizando hasta el armónico 19 y, por tanto, algunas veces pueden verse algo deformadas respecto a las que se obtendrían a partir de la expresión de la intensidad.

2. Influencia de la interacción armónica

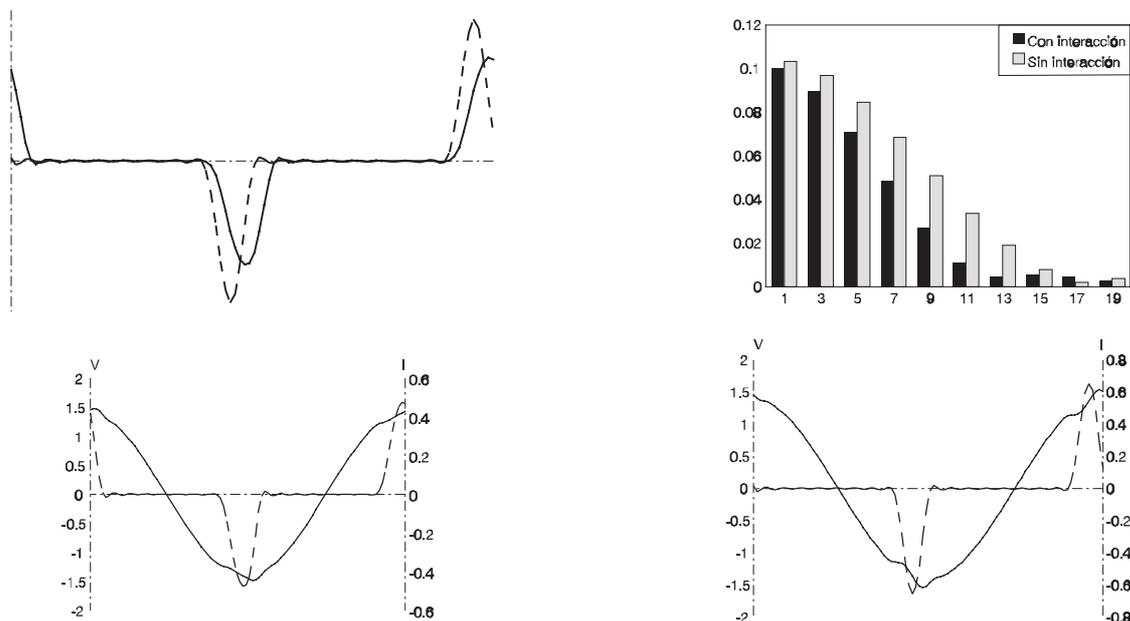
Con este ejemplo queremos estudiar las diferencias en los resultados obtenidos según si se utiliza un flujo de cargas considerando o no la interacción armónica.

Se tomó un caso simple de un generador alimentando, a través de una línea, una carga tipo fuente de alimentación y se simuló tres veces con diferentes valores de la potencia consumida por la fuente. A continuación se realizó una modificación del algoritmo de forma que los armónicos de intensidad se mantuvieran constantes durante todo el cálculo y con un valor igual al hallado con tensión senoidal y se repitieron los mismos casos.

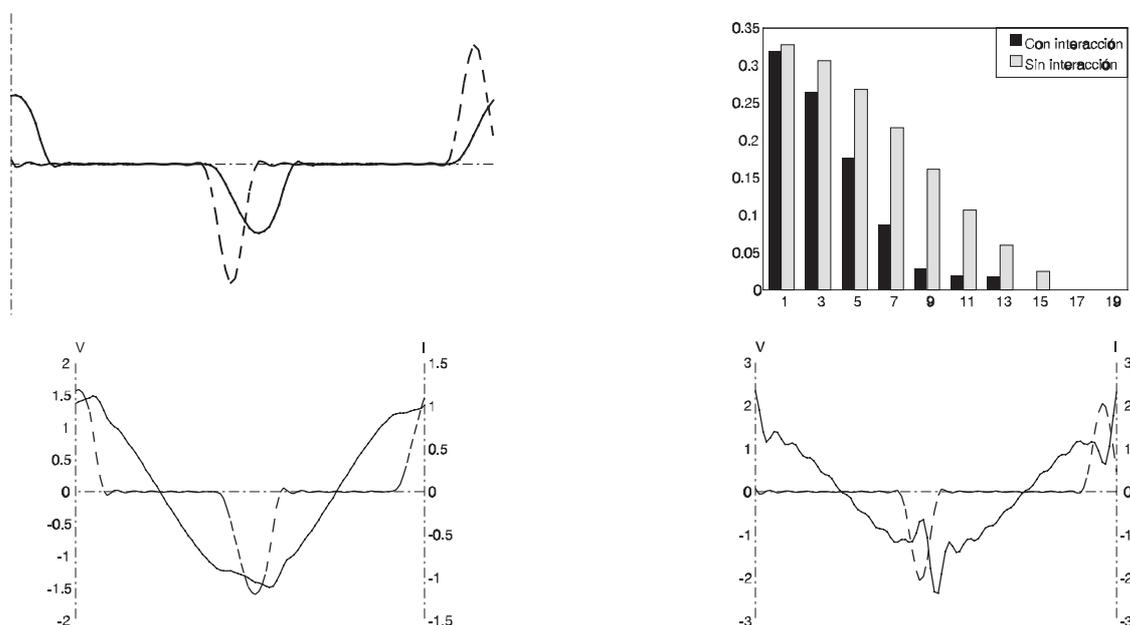
El generador utilizado mantenía una tensión $u = 1.0$ y presentaba un valor de reactancia a frecuencias armónicas $x = 0.004132$; el generador utilizado no presenta impedancia alguna a la frecuencia fundamental. La línea venía representada por una resistencia $r = 0.007996$ y una reactancia $x = 0.039194$. Las características de la carga no lineal eran $r_e = 0.826$, $l_e = 0.001653$, $c = 0.000103$ y $r = 295.5$.

La primera serie de cuatro gráficas corresponde al caso de que la potencia consumida por la carga no lineal era $p = 0.1$; la primera gráfica (izquierda) representa las intensidades obtenidas (correspondiendo la de línea continua al caso con interacción armónica), la segunda gráfica (derecha) presenta la descomposición armónica de ambas intensidades (correspondiendo la de barra sólida al caso con interacción armónica), la tercera gráfica (izquierda) corresponde a la tensión (línea continua) y la corriente (línea discontinua) para el caso con interacción y la cuarta gráfica (derecha) presenta la tensión (línea continua) y la corriente (línea discontinua) para el caso sin interacción.

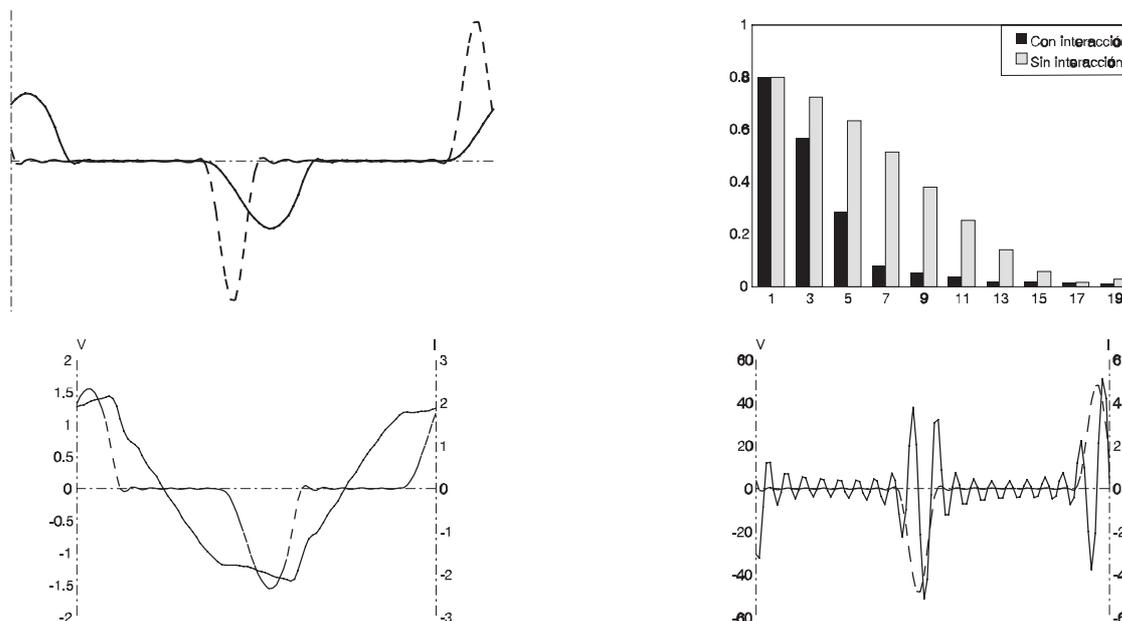
Obsérvese que cuando la potencia implicada es pequeña (10% en este caso) la diferencia entre ambos métodos es apreciable pero no da lugar a grandes errores de tipo cualitativo. También se pone de manifiesto en las gráficas que el pulso de intensidad (en el caso con interacción) se ensancha para adaptarse a la reducción que sufre el valor instantáneo de la tensión por culpa de la distorsión.



La siguiente serie de cuatro gráficas presenta la misma información para una situación en que la carga no lineal consume una potencia $p = 0.32$. En este caso las diferencias cualitativas son bastante apreciables, especialmente en la tensión.



La última serie de cuatro gráficas, que aparece a continuación, presenta la misma información que las anteriores para una situación en que la carga no lineal consume una potencia $p = 0.75$. En este caso las diferencias, tanto cualitativas como cuantitativas, son intolerables. Obsérvese especialmente la forma de onda y los valores de la tensión.

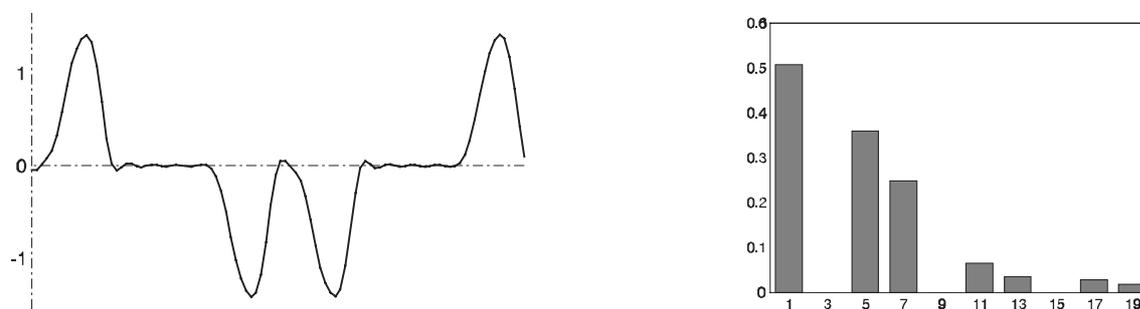


3. Ensayo de la fuente de alimentación trifásica

El caso siguiente corresponde a un generador que alimenta, a través de una línea, una carga tipo fuente de alimentación trifásica. No se han considerado, ya que el programa de flujo de cargas trabaja sobre el esquema equivalente monofásico, las asimetrías.

El generador utilizado mantenía una tensión $u = 1.0$ y presentaba un valor de reactancia a frecuencias armónicas $x = 0.004132$; el generador utilizado no presenta impedancia alguna a la frecuencia fundamental. La línea venía representada por una resistencia $r = 0.0007996$ y una reactancia $x = 0.0039194$. Las características de la carga no lineal eran $r_e = 0.826$, $I_e = 0.001653$, $c = 0.000103$, $r = 295.5$ y $p = 0.5$.

En la figura de la izquierda puede verse la forma de onda de intensidad y en la de la derecha su contenido armónico, en el que se ve claramente la ausencia de armónicos de secuencia homopolar.

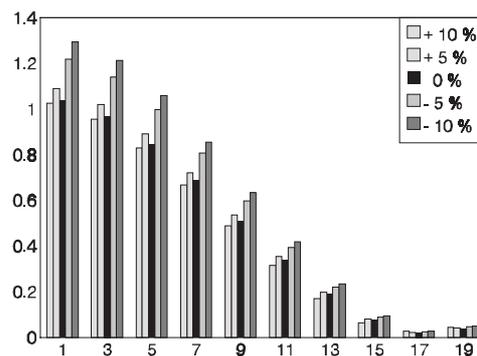


4. Variación de parámetros en la fuente de alimentación

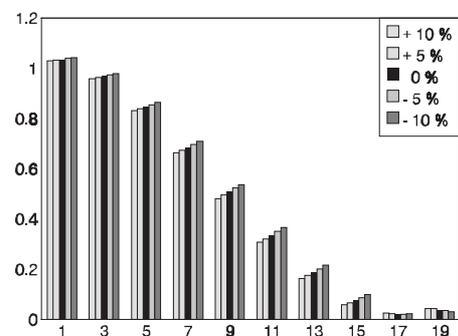
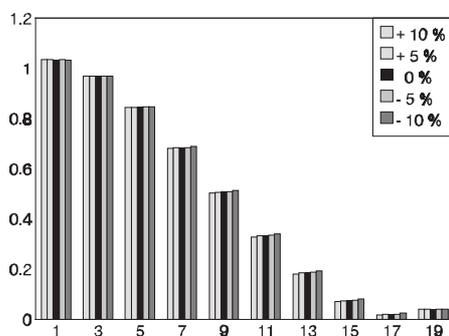
En el capítulo anterior se estudió la variación de los armónicos introducidos por un fluorescente en función de la variación de sus parámetros pero se hizo el estudio alimentando la carga con tensión senoidal. A continuación se realizará un estudio de la variación del contenido armónico introducido por la fuente de alimentación pero alimentándola a través de una línea, hecho que introducirá armónicos de tensión en el punto de conexión de la fuente.

A continuación se presentan los cinco espectros armónicos obtenidos. En cada uno de ellos se han estudiado cinco casos variando el parámetro correspondiente un 10% o un 5% sobre el valor de referencia que (representado por 0%) es común a todos los casos. El generador utilizado mantenía una tensión $u = 1.0$ y presentaba un valor de reactancia a frecuencias armónicas $x = 0.00001033$; el generador utilizado no presenta impedancia alguna a la frecuencia fundamental. La línea venía representada por una resistencia $r = 0.0001033$ y una reactancia $x = 0.0000002066$. Las características de la carga no lineal eran $r_e = 0.004132$, $l_e = 0.000008265$, $c = 0.02052$, $r = 1.477$ y $p = 1.0$.

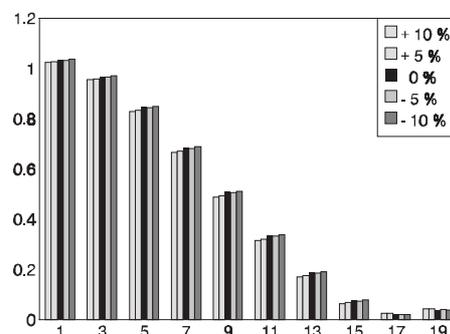
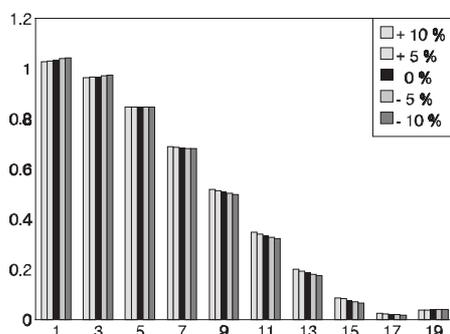
La figura siguiente corresponde a la variación de la tensión de alimentación. En ella puede observarse que la distorsión de tensión no varía en una forma proporcional a la tensión de alimentación.



Las figuras siguientes corresponden a la variación de la resistencia equivalente R_E (izquierda) y de la inductancia equivalente L_E (derecha). En ellas sí puede observarse una relación de dependencia (al menos para los armónicos más significativos) entre la variación del parámetro y el contenido armónico.



En los espectros siguientes se ha representado la influencia de la resistencia de carga R (izquierda) y la de la capacidad de filtro C (derecha).

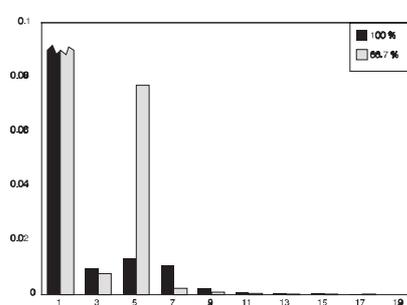
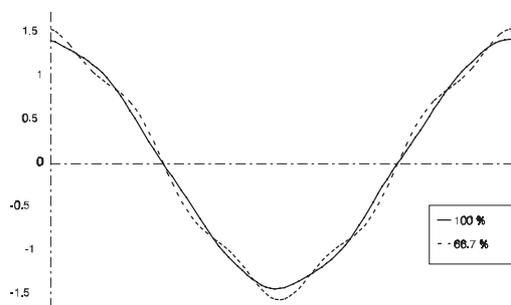


5. Resonancias en instalaciones de lámparas fluorescentes

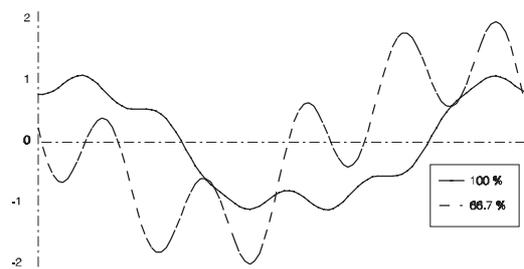
Se han querido estudiar las resonancias que se producen en algunas instalaciones de alumbrado cuando una parte de las lámparas fluorescentes (con sus correspondientes condensadores) son desconectadas.

Se ha tomado el caso de un generador que alimenta, a través de una línea, un conjunto de lámparas fluorescentes y una batería de condensadores de compensación. El generador utilizado mantenía una tensión $u = 1.0$ y presentaba un valor de reactancia a frecuencias armónicas $x = 0.004132$; el generador utilizado no presenta impedancia alguna a la frecuencia fundamental. La línea venía representada por una resistencia $r = 0.005$ y una reactancia $x = 0.022$. Las características de los fluorescentes eran $r = 31.82$, $l = 1.804$, $u_e = 0.536$ y $p = 0.75$ mientras que la potencia de la batería de condensadores era $q = 0.94$ calculada para compensar la reactiva del conjunto de fluorescentes.

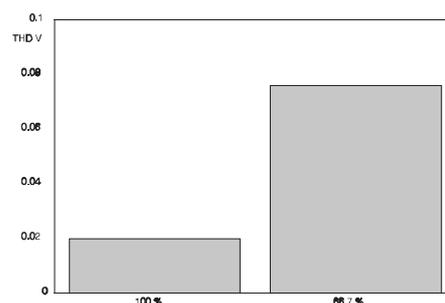
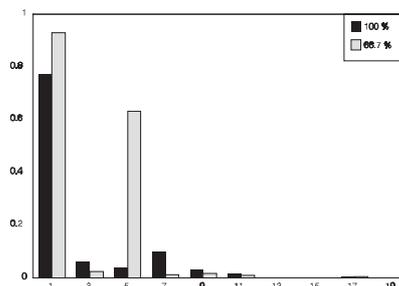
Los resultados obtenidos en este caso se han representado en las figuras siguientes. Después se ha procedido a eliminar la tercera parte de las lámparas con sus respectivos condensadores ($p = 0.5$, $q = 0.63$), representándose también este caso. La figura de la izquierda representa la tensión en el punto de conexión y la de la derecha su espectro (en el que se ha recortado la componente fundamental para mejor observación de las componentes armónicas).



En la página siguiente se presentan la intensidad en la línea (izquierda) y su espectro (derecha).



Obsérvese que, especialmente al desconectar la tercera parte de las lámparas, aparece una resonancia en el quinto armónico que da lugar a una importante deformación de la onda de intensidad y una ligera deformación en la onda de tensión. En la figura adjunta se muestran los valores de la distorsión en los dos casos estudiados.



En la práctica las deformaciones no son tan grandes pues, por un lado, no suele pasarse del 50% de desconexión y, por el otro, los fluorescentes y los condensadores se hallan distribuidos mientras que en este ejemplo se han considerado concentrados.

6. Compensación de armónicos entre sistemas de alumbrado

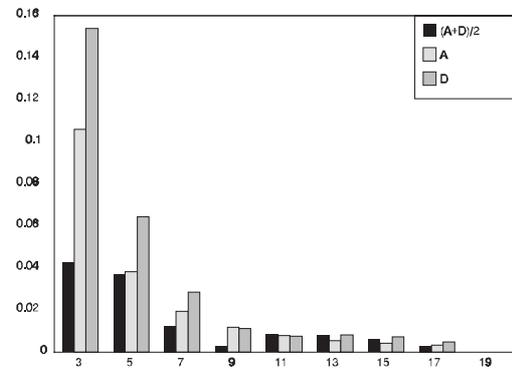
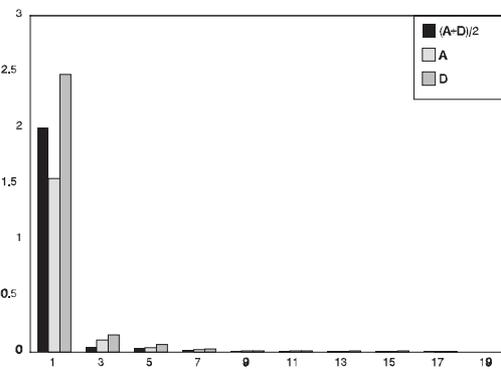
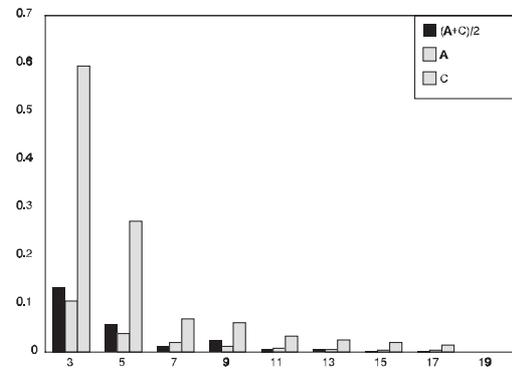
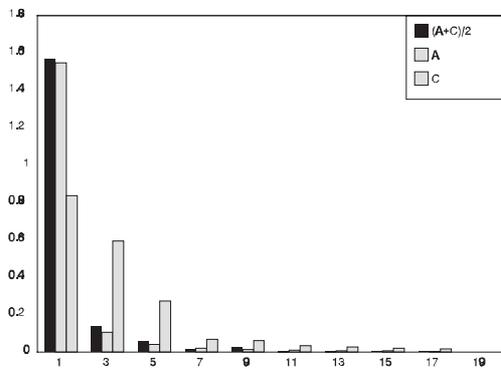
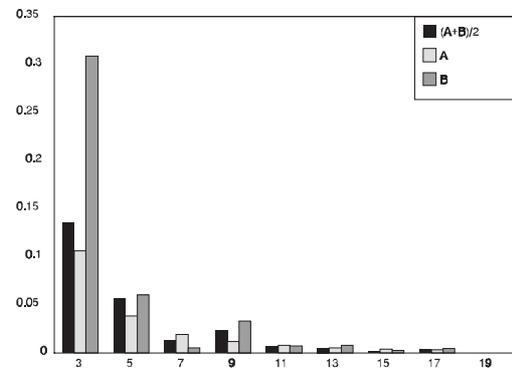
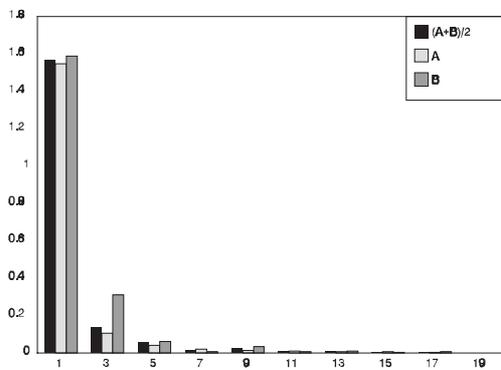
En los sistemas de alumbrado de descarga las ondas de intensidad de las lámparas del mismo tipo suelen ser semejantes y estar en fase, por tanto no se produce ninguna compensación cuando éstas se agrupan. A continuación vamos a estudiar si es posible una compensación cuando se reúnen lámparas de descarga de tipos diferentes en la misma instalación. Se han tomado cuatro tipos de lámparas:

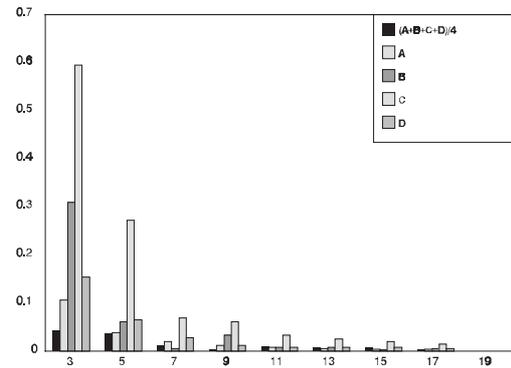
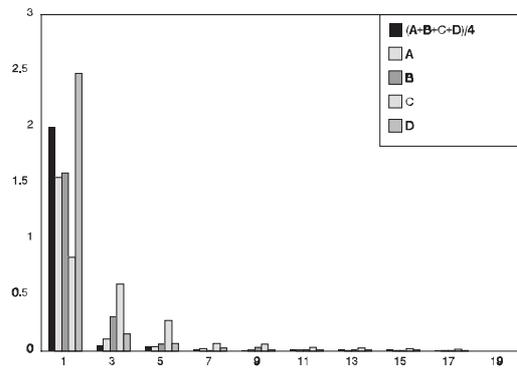
- A Lámpara fluorescente convencional
- B Lámpara fluorescente con reactancia saturable
- C Lámpara fluorescente con balasto electrónico
- D Lámpara de vapor de sodio (con salto de tensión)

Se ha tomado el caso de un generador que alimenta, a través de una línea, un conjunto de lámparas que corresponde al 80% de la potencia nominal del conjunto. Primeramente se han simulado cada una de ellas por separado para tener sus espectros como referencia de comparación. Después se han probado combinaciones con la mitad de la carga (40% respecto al nominal) del tipo A y la otra mitad de uno de los otros tres tipos y finalmente las cuatro cargas a partes iguales (cada una 20% respecto al nominal).

El generador utilizado mantenía una tensión $u = 1.0$ y presentaba un valor de reactancia a frecuencias armónicas $x = 0.004132$; el generador utilizado no presenta impedancia alguna a la frecuencia fundamental. La línea venía representada por una resistencia $r = 0.01$ y una reactancia $x = 0.045$. Las características de los fluorescentes tipo A eran $r = 31.82$, $I = 1.804$ y $u_e = 0.536$; las de los del tipo B eran $r = 31.82$, $I_n = 1.798$, $I_p = 0.899$, $I_s = 0.449$, $i_p = 0.00153$, $i_s = 0.00115$ y $u_e = 0.523$; las de los del tipo C eran $r_e = 0.826$, $I_e = 0.001653$, $c = 0.000103$ y $r = 295.5$ y las del tipo D eran $r = 31.82$, $I = 1.804$, $u_e = 0.3$, $u_p = 0.6$ y $\Delta = 0.002$ s.

Las figuras siguientes presentan los resultados de cada una de las cuatro combinaciones estudiadas. En cada caso se ha acompañado la descomposición armónica de la onda de corriente del caso correspondiente con las de las ondas obtenidas con la conexión individual de cada uno de los fluorescentes combinados. Para poder visualizar mejor los resultados, las figuras de la izquierda representan las descomposiciones completas mientras que a las de la derecha les faltan las componentes de valor más alto, ampliándose así la escala.





Como puede apreciarse, en el caso de combinar un conjunto de lámparas de vapor de sodio con otro de lámparas fluorescentes, el contenido de los armónicos más importantes puede ser menor en la agrupación de lámparas que en cada una por separado. En el caso de las lámparas electrónicas combinadas con lámparas fluorescentes convencionales también se ha obtenido una cierta mejora ya que los valores de las principales componentes son bastante inferiores al promedio de las obtenidas con cada lámpara por separado. Por ello es probable que las instalaciones se beneficien, por lo que respecta a distorsión de la onda de corriente, de la heterogeneidad de cargas.

15. Conclusiones

La modelización de cargas no lineales en régimen permanente considerando la interacción armónica permite evitar el desarrollo de todo el régimen transitorio de cada carga de forma que el tiempo de ejecución de un programa de análisis de armónicos considerando interacción armónica se reduce.

En la bibliografía consultada durante la preparación de este trabajo se hallaron únicamente dos modelizaciones de cargas no lineales en régimen permanente que tuvieran en cuenta los armónicos de la tensión de alimentación. Así en la referencia [39] se presenta el rectificador trifásico con filtro inductivo considerando simetría del sistema trifásico y en la referencia [15] se presenta el rectificador monofásico con filtro capacitivo (fuente de alimentación) analizado por el método de la transformada de Laplace y considerando simetría de semionda. De las dos cargas citadas, la primera no se ha estudiado en la presente tesis.

1. Aportaciones de la tesis

Las aportaciones del presente trabajo son las siguientes:

- Estudio de la posibilidad de utilización de un método basado en la linealización alrededor del punto de trabajo. Los resultados obtenidos durante este estudio han permitido ver las limitaciones del método y han desaconsejado su uso.
- Desarrollo de un procedimiento para la obtención de modelos de cargas no lineales utilizando modelos lineales a tramos teniendo en cuenta los armónicos de tensión en el punto de conexión. Estos métodos dan lugar a resultados más aceptables que los métodos sin penetración armónica, aun cuando la distorsión de la intensidad es elevada. Además es de destacar que:
 - Los desarrollos se han realizado utilizando la vía clásica (solución de la ecuación homogénea y solución particular) en lugar de la transformación de Laplace.
 - Se ha realizado la determinación de las constantes de las expresiones de los tramos en forma analítica lo que evita incorporarlas en el método iterativo, reduciendo el tiempo y la complejidad de cálculo.
 - Se han desarrollado también las expresiones analíticas de la descomposición armónica lo que evita el uso de métodos iterativos reduciendo también, por consiguiente, el tiempo y la complejidad de cálculo.
 - Se han obtenido, a su vez, las expresiones de la intensidad en cada uno de los tramos, lo que permite, si se desea, la representación gráfica de las corrientes de las cargas de una forma mucho más exacta que la que se obtiene con el trazado a partir de los desarrollos armónicos.

■ Presentación de los modelos de las siguientes cargas:

- Lámpara de descarga
- Lámpara de descarga con salto de tensión
- Fluorescente con condensador en serie
- Fluorescente con reactancia saturable (dos modelos)
- Fuente de alimentación
- Cargador de baterías
- Fuente de alimentación trifásica

Todos los modelos de cargas monofásicas contemplan una versión para cuando se considera simetría de semionda y otra para cuando no se considera dicha simetría. La carga trifásica estudiada se presenta en dos versiones según si se desea considerar simetría trifásica o no. Para cada modelo se presenta la descomposición en tramos, las ecuaciones de las variables dinámicas en cada uno de los tramos, la forma de determinación de las constantes y las variables internas de cálculo, las ecuaciones de cambio de tramo y la descomposición armónica.

- Se han hecho estudios de la convergencia de los modelos de las cargas en forma individual utilizando el método de h-Newton sobre numerosos casos, muchos de ellos en condiciones bastante duras, para validar la bondad y robustez del método numérico con los modelos presentados y su convergencia. En este sentido se han propuesto pequeñas pero importantes modificaciones en el algoritmo del método. Este estudio ha llevado también a proponer, para cada carga, unas inicializaciones adecuadas para la convergencia del método puesto que en las cargas contempladas no siempre es fácil hallar una situación inicial físicamente real del problema. Los resultados obtenidos en los numerosos casos estudiados son satisfactorios.
- Se han implementado los modelos en un programa de flujo de cargas y se han realizado numerosas simulaciones para comprobar la bondad de los modelos y de las inicializaciones propuestas así como para verificar la capacidad del método de h-Newton para hallar la solución de los casos presentados. Se ha constatado la bondad de los modelos cuando se utiliza el método de h-Newton para la resolución del sistema de ecuaciones.
- Se han realizado y presentado varios estudios, con resultados interesantes, sobre el comportamiento y la variabilidad de la forma de onda y el contenido armónico de algunas de las cargas modelizadas en función de los parámetros de las mismas, la distorsión de la tensión de alimentación, la estructura de la red y la agrupación con otras cargas.

2. Futuros temas de investigación

Como ya se ha comentado, una de las principales aportaciones de la tesis es la sistematización de una metodología que permite proponer una importante cantidad de futuros temas de trabajo.

Los temas que se proponen para investigación futura pueden dividirse, principalmente, en cuatro categorías; tal como se presenta a continuación.

-
- Tratamiento del flujo de cargas en trifásico:
 - Desarrollo del modelo del rectificador trifásico controlado cuando no se considera simetría trifásica.
 - Desarrollo de un programa de flujo de cargas que tenga en cuenta las asimetrías del sistema trifásico y permita calcular corrientes de neutro.

 - Análisis de los problemas surgidos durante el desarrollo del presente trabajo y que no han podido tratarse, ya sea por su extensión o por desviarse del camino trazado:
 - Estudio de las soluciones falsas de las ecuaciones del modelo de la fuente de alimentación y las condiciones en que aparecen.
 - Estudio de las inicializaciones de las cargas estudiadas, especialmente las fuentes de alimentación y el cargador de baterías, con vistas a hallar mejores inicializaciones para una rápida convergencia hacia la solución correcta.

 - Estudio de los casos en los que las cargas presentadas en la presente tesis tienen dos modos de trabajo diferentes (normalmente con diferente número de tramos):
 - Desarrollo del modelo de la fuente de alimentación monofásica para el caso en que se producen varios pulsos por semiperiodo y estudio de las condiciones en que se da cada caso.
 - Desarrollo del modelo de la fuente de alimentación trifásica teniendo en cuenta la posibilidad de que se presente solapamiento y estudio de las condiciones en que se da cada caso.
 - Desarrollo del modelo de la fuente de alimentación trifásica para el caso en que los dos pulsos por semiperiodo se unen de forma que la intensidad entre ellos no llega a cero y estudio de las condiciones en que se da cada caso.

 - Preparación de modelos de otras cargas no lineales:
 - Desarrollo de un modelo del transformador que tenga en cuenta la saturación.
 - Desarrollo del modelo de la fuente de alimentación para el caso en que la carga en el lado de continua va regulada a tensión constante y, por tanto, puede asimilarse mejor a una fuente de corriente o de potencia constante que a una resistencia.
 - Desarrollo de los modelos de los rectificadores monofásicos semicontrolados.
 - Desarrollo de los modelos para los reguladores (recortadores) de onda trabajando con cargas resistivas, inductivas (TCR, SVC) y resistivo-inductivas.

Bibliografía

1. Libros

- [1] J. Arrillaga, D.A. Bradley, P.S. Bodger
Power system harmonics
John Wiley & Sons, 1985 (336p)
- [2] G.T. Heydt
Electric Power Quality
Stars in a circle publications, 1991 (541p)
- [3] E. Kreyszig
Matemáticas avanzadas para ingeniería. Volumen II
Limusa, 1990 (688p)
- [4] N. Mohan
Power electronics: Computer simulation, analysis and education using PSpice
University of Minnesota, 1992
- [5] W.H. Press, B.P. Flannery, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling
Numerical recipes
Cambridge University Press, Cambridge 1986 (818p)
- [6] W.H. Press, B.P. Flannery, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling
Numerical recipes - Second edition
Cambridge University Press, Cambridge 1992 (963p)

2. Artículos de revistas

- [7] H.W. Dommel, A. Yan, S. Wei
Harmonics from transformer saturation
IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 1, Núm. 2, Abril 1986, pp209-215
- [8] R. Dwyer, A.K. Khan, R.K. McCluskey, R. Sung
Evaluation of harmonic impacts from compact fluorescent lights on distribution systems
IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, Núm. 4, Noviembre 1995, pp1772-1780
- [9] J.E. Flory, T.S. Key, W.H. Smith, R.P. Stratford, J.C. Smith, J.M. Clemmensen, L.F. Saunders, C.D. Potts, G.L. Emmett, W.A. Moncrief, B. Singletary
The electric utility-industrial user partnership in solving power quality problems
IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, Núm. 3, Agosto 1990, pp878-886

-
- [10] E.F. Fuchs, D.J. Roesler, F.S. Alashhab
Sensitivity of electrical appliances to harmonics and fractional harmonics of the power system's voltage. Part I: Transformers and induction machines
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 2, Núm. 2, Abril 1987, pp437-444
- [11] E.F. Fuchs, D.J. Roesler, K.P. Kovacs
Sensitivity of electrical appliances to harmonics and fractional harmonics of the power system's voltage. Part II: Television sets, induction watt-hour meters and universal machines
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 2, Núm. 2, Abril 1987, pp445-453
- [12] C. Gilker, V. Dwyer, R.C. Dugan
A program for analysis of power system harmonics
IEEE Computer Applications in Power, Octubre 1989, pp36-41
- [13] E.L. Laskowski, J.F. Donoghue
A model of a mercury arc lamp's terminal V-I behavior
IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 17, Núm. 4, Julio/Agosto 1981, pp419-426
- [14] A. Mansoor, W.M. Grady, A.H. Chowdhury, W.M. Samotyj
An Investigation of Harmonics Attenuation and Diversity Among Distributed Single-Phase Power Electronic Loads
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, Núm. 1, Enero 1995, pp467-473
- [15] A. Mansoor, W.M. Grady, R.S. Thallam, M.T. Doyle, S.D. Krein, M.J. Samotyj
Effect of supply voltage harmonics on the input current of single-phase diode bridge rectifier loads
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, Núm. 3, Julio 1995, pp1416-1422
- [16] A. Mansoor, W.M. Grady, P. Staats, R.S. Thallam, M.T. Doyle, M.J. Samotyj
Predicting the net harmonic currents produced by large numbers of distributed single-phase computer loads
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, Núm. 4, Octubre 1995, pp2001-2006
- [17] J.A. Orr, A.E. Emanuel, K.W. Oberg
Current harmonics generated by a cluster of electric vehicle battery chargers
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 101, Núm. 3, Marzo 1982, pp691-700
- [18] J.A. Orr, A.E. Emanuel, D.G. Pileggi
Current harmonics, voltage distortion and powers associated with battery chargers. Part I: Comparisons among different types of chargers
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 101, Núm. 8, Agosto 1982, pp2703-2710
- [19] J.A. Orr, A.E. Emanuel, D.G. Pileggi
Current harmonics, voltage distortion and powers associated with battery chargers distributed on the residential power system
IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 20, Núm. 4, Julio/Agosto 1984, pp727-734
- [20] D.J. Pileggi, A.E. Emanuel
Field experience with harmonics injecting equipment in distribution networks
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 101, Núm. 8, Agosto 1982, pp2790-2798
-

-
- [21] C. Remy
Énergie électrique: soignez votre courant
Industries et techniques, Marzo 1991, pp38-40
- [22] C. Remy
Prenez soin de votre courant!
Industries et techniques, Núm. 733, Diciembre 1992, pp155-168
- [23] D. Xia, G.T. Heydt
Harmonic power flow studies part I - Formulation and solution
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 101, Núm. 6, Junio 1982, pp1257-1265
- [24] D. Xia, G.T. Heydt
Harmonic power flow studies part II - Implementation and practical application
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 101, Núm. 6, Junio 1982, pp1266-1270
- [25] W. Xu, J.R. Marti, H.W. Dommel
A multiphase harmonic load flow solution technique
IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, Núm. 1, Febrero 1991, pp174-182

3. Ponencias en congresos

- [26] O. Boix, J. Rull, A. Sudrià
Revisión de los criterios de concepción de instalaciones eléctricas de B.T. debido a la mayor presencia de armónicos
2^{as} Jornadas Luso-Espanholas de Engenharia Electrotécnica, Coimbra Julio 1991, pp4-21-4-31
- [27] O. Boix, J. Bergas
Utilización del programa PSPICE para el estudio de perturbaciones eléctricas
4^{as} Jornadas Luso-Espanholas de Engenharia Electrotécnica, Porto Julio 1995, pp353-359
- [28] M. Fauri, P. Ribeiro
A novel approach to non-linear load modelling
Proceedings of 6th International Conference on Harmonics in Power Systems, Bologna, Septiembre 1994, pp201-205
- [29] J. García Mayordomo, J. Usasola Garcia, M. Valcárcel Fontao
Técnicas de análisis de la interacción armónica en redes eléctricas
2^{as} Jornadas Luso-Espanholas de Engenharia Electrotécnica, Coimbra Julio 1991, pp3-175-3-184
- [30] G. Gazel-Anthoine, G. Dousseau, M. Meunier
An experience of supply by the public network to crude oil drilling equipments
First international conference on power quality; End-use applications and perspectives. Paris 1991
- [31] W.M. Grady, G.T. Heydt
Prediction of power system harmonics due to gaseous discharge lighting
Proceedings of IEEE/PES Summer Meeting, Seattle Julio 1984

-
- [32] T. Grebe, M. McGranaghan, M. Samotyj
Solving harmonic problems in industrial plants- Cases studies
First international conference on power quality; End-use applications and perspectives. Paris 1991
- [33] D.C. Griffith
Continuous harmonic monitoring
Proceedings of Power Quality/ASD, Octubre 1990, pp160-166
- [34] T.M. Gruz
Harmonic distortion in electric power systems
Proceedings of Power Quality/ASD, Octubre 1990, pp137-145
- [35] J.E. Mitchell
Effects of energy conservation in power quality
First international conference on power quality; End-use applications and perspectives. Paris 1991
- [36] S. Ríos, R. Castañeda, D. Veas
Experimental measurements and analytical modelling of distributed harmonics sources
Proceedings of 6th International Conference on Harmonics in Power Systems, Bologna, Septiembre 1994, pp396-401
- [37] L. Sainz, J. Pedra
A non divergent numerical method for the harmonic load flow resolution. Part I - Mathematical presentation
Presentado para su publicación en el IEEE-PES Winter Meeting 1997
- [38] L. Sainz, J. Pedra
A non divergent numerical method for the harmonic load flow resolution. Part II - Implementation and practical application
Presentado para su publicación en el IEEE-PES Winter Meeting 1997

4. Otras publicaciones

- [39] J. García Mayordomo
Análisis de los armónicos introducidos en las redes eléctricas por los convertidores estáticos de potencia
Tesis Doctoral. Madrid, 1986
- [40] J. Pedra Durán
El problema del flujo de cargas en redes con armónicos
Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 1986
- [41] L. Sainz Sapera
Estudio de la formulación y resolución del problema del flujo armónico de cargas
Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 1995
- [42] *The design center - Circuit analysis - Version 5.2*
MicroSim Corporation, 1992

-
- [43] Association Française de Normalisation
Alimentations sans interruption, de puissance nominale inférieure à 3 kVA
Norma francesa C 42-810 Enero 1990
- [44] Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEEE recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents
Norma americana ANSI/IEEE C57.110 Agosto 1987
- [45] *Technical report on the Emission Limits for Distorting Loads in MV and HV Power Systems*
Documento de estudio PER-9427 del Grupo de Trabajo de Perturbaciones de ASINEL. Correspondiente al documento IEC 77A.08 - TF ICU (18.09.93)

Notaciones y símbolos

1. Magnitudes temporales

i	Intensidad
i_C	Intensidad en un condensador
i_L	Intensidad en una carga
i_q	Intensidad correspondiente al tramo q
i_R	Intensidad en una resistencia
i_R	Intensidad para la fase R
i_{Rq}	Intensidad para la fase R correspondiente al tramo q
i_S	Intensidad para la fase S
i_{Sq}	Intensidad para la fase S correspondiente al tramo q
i_T	Intensidad para la fase T
i_{Tq}	Intensidad para la fase T correspondiente al tramo q
i_V	Intensidad en una fuente de tensión constante
t	Tiempo
u	Tensión eléctrica
u_A	Tensión de arco de una lámpara de descarga
u_{Aq}	Tensión de arco de una lámpara de descarga correspondiente al tramo q
u_C	Tensión en un condensador
u_{Cq}	Tensión en un condensador correspondiente al tramo q
u_q	Tensión correspondiente al tramo q
u_R	Representación genérica de una tensión
u_R	Tensión entre la fase R y el neutro
u_{RS}	Tensión entre las fases R y S

u_{ST} Tensión entre las fases S y T

u_{TR} Tensión entre las fases T y R

2. Valores eficaces, valores medios y módulos

I Intensidad

I'_n Componente de orden n del desarrollo de Fourier de una parte de una onda de intensidad

I''_n Componente de orden n del desarrollo de Fourier de una parte de una onda de intensidad

I_0 Término constante de la función intensidad de una lámpara de descarga

I_{0q} Término constante de la función intensidad de una lámpara de descarga para el tramo q

I_{DC} Componente continua de una intensidad

I_h Componente de orden h de la intensidad

I_{hq} Componente de orden h de la intensidad para el tramo q

I_{Lh} Valor de la fuente de corriente para el armónico h en un esquema equivalente Norton

I_n Componente de orden n del desarrollo en serie de Fourier de la intensidad

I_p Término constante, para el tramo que corresponde al pico de la tensión de arco, de la función de intensidad de una lámpara de descarga

I_q Valor de la corriente en el instante final del tramo q

I_{Rn} Componente de orden n del desarrollo en serie de Fourier de la intensidad de la fase R

I_{Sn} Componente de orden n del desarrollo en serie de Fourier de la intensidad de la fase S

I_{Tn} Componente de orden n del desarrollo en serie de Fourier de la intensidad de la fase T

I_{Zh} Valor de la corriente en la impedancia, para el armónico h , en un esquema Norton

P Potencia eléctrica (valor medio de la potencia instantánea); potencia activa

U Tensión eléctrica

U_{Ch} Componente de orden h de la tensión de un condensador

U_E Tensión de arco de una lámpara de descarga cuando ésta se considera constante

U_E Tensión de cebado de una lámpara de descarga

U_E	Valor genérico de una tensión constante
U_h	Componente de orden h de la tensión
U_{hq}	Componente de orden h de la tensión del tramo q
U_p	Pico de la tensión de arco de una lámpara de descarga cuando ésta se considera en dos tramos por semiperiodo
U_{Rh}	Componente de orden h de la tensión entre la fase R y el neutro
U_{Rh}	Componente de orden h de una tensión genérica
U_{RSh}	Componente de orden h de la tensión entre las fases R y S
U_{Sh}	Componente de orden h de la tensión entre la fase S y el neutro
U_{STh}	Componente de orden h de la tensión entre las fases S y T
U_{Th}	Componente de orden h de la tensión entre la fase T y el neutro
U_{TRh}	Componente de orden h de la tensión entre las fases T y R
V	Tensión eléctrica
V_h	Componente de orden h de la tensión

3. Constantes, índices y parámetros

a'_n	Término en coseno correspondiente al armónico n en un desarrollo en serie de Fourier de una parte de una onda
A_n	Término en coseno correspondiente al armónico n en un desarrollo en serie de Fourier de una parte de una onda
a_n	Término en coseno correspondiente al armónico n en un desarrollo en serie de Fourier
A_{nC}	Término en coseno del término constante de la solución correspondiente al armónico n en un desarrollo en serie de Fourier
A_{nH}	Término en coseno de la solución homogénea correspondiente al armónico n en un desarrollo en serie de Fourier
A_{nP}	Término en coseno de la solución particular correspondiente al armónico n en un desarrollo en serie de Fourier
A_{qnC}	Término en coseno del término constante de la solución del tramo q correspondiente al armónico n en un desarrollo en serie de Fourier

A_{qnH}	Término en coseno de la solución homogénea del tramo q correspondiente al armónico n en un desarrollo en serie de Fourier
A_{qnP}	Término en coseno de la solución particular del tramo q correspondiente al armónico n en un desarrollo en serie de Fourier
b'_n	Término en seno correspondiente al armónico n en un desarrollo en serie de Fourier de una parte de una onda
B_n	Término en seno correspondiente al armónico n en un desarrollo en serie de Fourier de una parte de una onda
b_n	Término en seno correspondiente al armónico n en un desarrollo en serie de Fourier
B_{nC}	Término en seno del término constante de la solución correspondiente al armónico n en un desarrollo en serie de Fourier
B_{nH}	Término en seno de la solución homogénea correspondiente al armónico n en un desarrollo en serie de Fourier
B_{nP}	Término en seno de la solución particular correspondiente al armónico n en un desarrollo en serie de Fourier
B_{qnC}	Término en seno del término constante de la solución del tramo q correspondiente al armónico n en un desarrollo en serie de Fourier
B_{qnH}	Término en seno de la solución homogénea del tramo q correspondiente al armónico n en un desarrollo en serie de Fourier
B_{qnP}	Término en seno de la solución particular del tramo q correspondiente al armónico n en un desarrollo en serie de Fourier
C	Capacidad de un condensador eléctrico
D	Discriminante de una ecuación de segundo grado
erff	Error de la función en un método iterativo
errp	Error de la función, en un método iterativo, al reducir el paso
f	Frecuencia eléctrica
h	Paso de resolución para los métodos de Euler y h-Newton
h	Número del armónico que se considera
$h_{m\acute{a}x}$	Número del armónico de orden más alto que se piensa considerar
i	Contador de iteraciones
i	Índice para elementos de matrices

i	Índice para sumatorios
I_p	Valor de corriente a partir del que se considera que una bobina está parcialmente saturada
I_s	Valor de intensidad por encima del cual se considera que una inductancia está saturada
j	Índice para elementos de matrices
j	Índice para sumatorios
K	Constante de integración de una ecuación diferencial de primer orden
k	Constante genérica de integración de una ecuación diferencial de primer orden
k	Contador de iteraciones
K_i	Parte imaginaria de la constante de integración de una ecuación diferencial oscilante de segundo orden
$kmáx$	Valor máximo admisible del contador de iteraciones
K_p	Constante de magnitud en un sistema oscilante de segundo orden
K_{Pi}	Parte imaginaria de la constante en un sistema oscilante de segundo orden
K_{Pr}	Parte real de la constante en un sistema oscilante de segundo orden
K_q	Constante de integración de una ecuación diferencial de primer orden correspondiente al tramo q
K_{qi}	Parte imaginaria de la constante de integración de una ecuación diferencial oscilante de segundo orden para el tramo q
K_{qr}	Parte real de la constante de integración de una ecuación diferencial oscilante de segundo orden para el tramo q
K_{qy}	Constantes de integración de una ecuación diferencial de segundo orden para el tramo q (y vale 1 ó 2)
K_r	Parte real de la constante de integración de una ecuación diferencial oscilante de segundo orden
K_y	Constantes de integración de una ecuación diferencial de segundo orden (y vale 1 ó 2)
K_{yp}	Constante de magnitud en un sistema oscilante de segundo orden (y vale 1 ó 2)
L	Coefficiente de autoinducción de una bobina
L_c	Coefficiente de autoinducción de la bobina del lado de continua de una fuente de alimentación

L_E	Coeficiente de autoinducción equivalente de un conjunto de bobinas
L_{Eq}	Coeficiente de autoinducción equivalente de un conjunto de bobinas para el tramo q
L_L	Coeficiente de autoinducción de la inductancia de línea de una fuente de alimentación
L_N	Coeficiente de autoinducción de una bobina cuando no está saturada
L_P	Coeficiente de autoinducción de una bobina cuando está parcialmente saturada
L_q	Coeficiente de autoinducción de una bobina para el tramo q
L_R	Coeficiente de autoinducción de la inductancia de línea de la fase R
L_S	Coeficiente de autoinducción de la inductancia de línea de la fase S
L_S	Coeficiente de autoinducción de una bobina cuando está saturada
L_T	Coeficiente de autoinducción de la inductancia de línea de la fase T
m	Número de funciones y de variables de un sistema a resolver
M_h	Constante compleja para el armónico h
n	Número del armónico que se considera en un desarrollo en serie de Fourier
N	Número del armónico que se considera en una modelización en el dominio de la frecuencia
$n_{m\acute{a}x}$	Número de nudos de la red en estudio
p	Índice de paso para el método de h-Newton
p_0	Valor inicial del índice de paso en el método de h-Newton
$p_{m\acute{a}x}$	Valor máximo admisible del índice de paso para el método de h-Newton
q	Número del tramo que se considera
R	Resistencia eléctrica
R	Primera fase de un sistema trifásico
R_A	Resistencia de un arco eléctrico
R_C	Resistencia del lado de continua de una fuente de alimentación
R_E	Resistencia equivalente de un conjunto
R_{Eq}	Resistencia equivalente de un conjunto para el tramo q
R_L	Resistencia de línea de una fuente de alimentación

R_R	Resistencia de línea de la fase R
R_S	Resistencia de línea de la fase S
R_T	Resistencia de línea de la fase T
R_T	Resistencia equivalente de un conjunto
S	Segunda fase de un sistema trifásico
S_q	Valor resultado de un sumatorio en el instante t_q
t	Parámetro de evolución de una homotopía
T	Tercera fase de un sistema trifásico
T	Periodo de una magnitud eléctrica
t_m	Instante correspondiente al máximo de una función en un intervalo
t_p	Instante en el que una función alcanza un determinado valor
t_q	Instante del q-ésimo cambio de tramo de una función definida a tramos
tolf	Máximo valor admisible para el error de la función en un método iterativo
x	Variable genérica
X	Reactancia eléctrica
$x^{(0)}$	Primera aproximación a la solución de una función de una variable
X_C	Reactancia capacitiva
$x^{(i)}$	Aproximación, de la iteración i-ésima, a la solución de una función de una variable
X_L	Reactancia inductiva
X_h	Reactancia capacitiva para el armónico h
$x^{(r)}$	Mejor aproximación obtenida a la solución de una función de una variable
$x^{(s)}$	Valor solución de una función de una variable
Y_h	Admitancia para el armónico h
Z	Impedancia eléctrica
Z_T	Impedancia equivalente de un conjunto
Z_h	Impedancia eléctrica para el armónico h

Z_{hq}	Impedancia eléctrica para el armónico h en el tramo q
α	Ángulo de cebado (relativo al paso por cero) de un tiristor o triac
β	Constante de desfase en un sistema oscilante de segundo orden
γ	Índice que representa el número de orden de una fase del sistema trifásico
Δ	Diferencia de tiempo constante
$\Delta x^{(i)}$	Avance, del valor de la variable hacia la solución, en la iteración i -ésima
δ	Incremento para la derivación numérica
ε	Máximo valor admisible en una función igualada a cero
ε	Pulsación correspondiente al régimen libre en sistemas de segundo orden oscilantes
κ	Factor que introduce el margen de variación por tolerancia
λ	Factor amortiguante en los métodos de Newton modificados
λ	Valor propio de un sistema de ecuaciones diferenciales
$\lambda^{(i)}$	Factor amortiguante correspondiente a la iteración i -ésima
λ_y	Constante con unidades de frecuencia (inversa del tiempo) para exponencial; en sistemas aperiódicos de segundo orden, y puede ser 1 ó 2
λ	Constante con unidades de frecuencia (inversa del tiempo) para exponencial; en sistemas oscilantes de segundo orden
ξ	Constante con unidades de intensidad para exponencial
τ	Constante con unidades de tiempo para exponencial; constante de tiempo
τ_q	Constante de tiempo para el tramo q
ϕ	Argumento de una impedancia
φ	Ángulo de desfase entre la intensidad y la tensión
φ_{Ch}	Ángulo de fase de la componente de orden h de la tensión de un condensador
φ_h	Ángulo de fase de la componente de orden h de la tensión
φ_{Ih}	Ángulo de fase de la componente de orden h de la intensidad
φ_{Mh}	Argumento de una constante compleja para el armónico h
φ_{Rh}	Ángulo de fase de la componente de orden h de una tensión genérica

φ_{Rh}	Ángulo de fase de la componente de orden h de la tensión entre la fase R y el neutro
φ_{RSh}	Ángulo de fase de la componente de orden h de la tensión entre las fases R y S
φ_{STh}	Ángulo de fase de la componente de orden h de la tensión entre las fases S y T
φ_{TRh}	Ángulo de fase de la componente de orden h de la tensión entre las fases T y R
φ_{Yh}	Argumento de la admitancia para el armónico h
φ_{Zh}	Argumento de la impedancia para el armónico h
ψ	Argumento de una impedancia
ψ'_n	Fase de la componente de orden n del desarrollo en serie de Fourier de una parte de una onda de intensidad
ψ_n	Fase de la componente de orden n del desarrollo en serie de Fourier de la intensidad
ω	Pulsación de una magnitud eléctrica

4. Funciones

f	Función de una variable que se desea resolver
f	Función que forma parte de un sistema a resolver para hallar las condiciones de funcionamiento de un circuito
f'	Derivada primera de f
f''	Derivada segunda de f
f _q	Función q-ésima de un sistema a resolver para hallar las condiciones de funcionamiento de un circuito
H	Homotopía

5. Vectores y matrices

A	Matriz para la resolución de un sistema de ecuaciones
A _{ij}	Elemento de la fila i y la columna j de A
B	Avance, del valor del vector variable hacia la solución, en la iteración i-ésima
B	Matriz para la resolución de un sistema de ecuaciones
B _{ij}	Elemento de la fila i y la columna j de B

D F	Jacobiano de un sistema de funciones de varias variables
F	Vector de funciones de varias variables que se desea resolver
f_i	Función elemento de orden i de un vector de funciones de varias variables
G	Vector genérico de funciones de varias variables
G	Matriz para hallar la intensidad de un tramo y una fase a partir de la intensidad genérica
$G_{\gamma q}$	Elemento de la matriz G correspondiente a la fase γ y al tramo q
X'	Derivada primera de X
$X^{(0)}$	Primera aproximación al vector solución de una función de varias variables
$X^{(i)}$	Aproximación, de la iteración i -ésima, al vector solución de una función de varias variables
$X^{(s)}$	Vector solución de una función de varias variables
x_j	Componente de orden j del vector solución de una función de varias variables
$x_j^{(i)}$	Aproximación, de la iteración i -ésima, a la componente de orden j del vector solución de una función de varias variables
Y	Matriz de admitancias armónicas
Y_{ij}	Elemento de la fila i y la columna j de Y

6. Funciones matemáticas

abs()	Valor absoluto, valor prescindiendo del signo
d	Derivada total
j	Unidad imaginaria ($j = \sqrt{-1}$)
máx()	Función máximo. Da el máximo de los valores de un conjunto
Sgn()	Función signo. Si $x > 0$ Sgn(x)=1, si $x < 0$ Sgn(x)=-1 y si $x = 0$ Sgn(x)=0
∂	Derivada parcial