

Maximización del índice vida útil/volumen de los filtros usados en accionadores de máquinas eléctricas

Maximizing the Operational Life/Volume Index in Filters Used in Adjustable Speed Drives

*Calleja-Gjumlich J.H.

Departamento de electrónica

*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
(CENIDET)*

E-mail: hcalleja@cenidet.edu.mx

Guerrero-Ramírez G.V.

Departamento de electrónica

*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
(CENIDET)*

E-mail: gerardogr@cenidet.edu.mx

Jiménez-Grajales H.R.

Gerencia de Energías no Convencionales

División de Ingenierías Alternas

Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE)

E-mail: hjimenez@iie.org.mx

Información del artículo: recibido: septiembre de 2009, aceptado: agosto de 2010

Resumen

La confiabilidad es un tópico de capital importancia en los accionadores de máquinas eléctricas. Durante mucho tiempo se ha supuesto que el mayor porcentaje de las fallas se debe al capacitor electrolítico, parte del filtro pasabajas conectado en el enlace de CD. Una estrategia popular para mejorar la confiabilidad consiste en sobredimensionar el componente, especificándolo a tensiones superiores. El inconveniente de este enfoque es que normalmente se obtienen aparatos más voluminosos. En este artículo se propone el empleo del cociente "Vida Útil/Volumen" como índice para evaluar la bondad de un diseño. El índice puede maximizarse si se sigue una metodología basada en el diseño de experimentos; un ejemplo, desarrollado para un accionador a 5 kW, muestra que la mejoría ocurre cuando se disminuye la frecuencia de corte del filtro.

Descriptores

- confiabilidad
- accionadores de máquinas eléctricas
- vida útil
- volumen
- capacitores
- inductores

* Autor correspondiente

Abstract

Reliability is a main issue in standard adjustable-speed drives. The electrolytic capacitor, part of the low-pass filter in the DC-link, has been blamed as a failure-prone component, and several approaches have been followed to improve the reliability. A popular strategy to improve the operational life consists in derating the capacitor, to higher nominal voltages. The drawback of the approach, however, is that it produces larger apparatuses. In this paper, the ratio "Operational Life/Volume" is proposed as an index to evaluate a particular design. The index can be maximized following a methodology based on the design of experiments technique. An example developed for a 5 kW motor drive shows that the index can be improved by designing the filter at lower cut-off frequencies.

Keywords

- reliability
- adjustable speed drives
- operational life
- volume
- capacitors
- inductors

Introducción

En la figura 1 se muestra el diagrama de un accionador de máquinas eléctricas con un rectificador no controlado como etapa de entrada, un inversor trifásico como etapa de salida y un filtro LC pasa-bajas en el enlace de CD. Una fuente de preocupación es el capacitor electrolítico: la corriente a través de él incluye armónicas producidas tanto por el rectificador como por el inversor. La temperatura interna aumenta, debido al flujo de corriente sobre la resistencia equivalente en serie (ESR), lo que degrada las características del capacitor y acorta la vida útil (Sarjeant *et al.*, 2001). Para alargarla se han seguido diferentes enfoques. Uno consiste en reducir el valor del capacitor a valores tan pequeños que sea posible utilizar elementos de película o de cerámica. Si bien la viabilidad ha quedado demostrada, el enfoque exige el empleo de un rectificador activo como primera etapa (Chien *et al.*, 1998). De hecho, puede eliminarse completamente el capacitor, aunque a costa de un rizado muy elevado en la tensión en el enlace (Piepenbreier *et al.*, 2004); además de la obvia complejidad por la circuitería extra, estos convertidores son muy sensibles a los transitorios (Klimpner *et al.*, 2004), y los desequilibrios en la tensión trifásica de entrada generan un rizado a frecuencia del doble de la de línea, lo que interfiere con la carga e impone restricciones muy severas en el control (Hwang *et al.*, 2007).

A pesar de las propuestas, en aplicaciones que no demandan operación regenerativa se aprovecha la con-

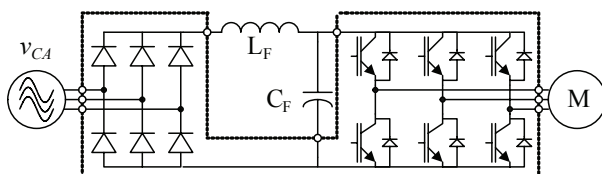


Figura 1. Accionador de máquinas eléctricas con capacitor electrolítico en el enlace de CD

figuración de la figura 1 para construir el accionador, porque la confiabilidad de un rectificador sin controlar es muy superior a la de un rectificador activo y las demandas sobre el bloque de control disminuyen sustancialmente. Muchos fabricantes ofrecen módulos integrados que contienen al rectificador no controlado y el inversor trifásico en un mismo empaque (dentro del contorno punteado en la figura 1), los que se dejan sin conectar, a fin de que pueda incluirse un filtro LC entre ellas.

El mayor porcentaje de las fallas se atribuye al capacitor, pero los fabricantes aseguran que en la actualidad los componentes de última tecnología presentan vidas más largas de lo que anteriormente se estimaba (Parler, 2004). Un estudio publicado recientemente parece confirmar este argumento (Hirschmann *et al.*, 2007). Por otro lado, una técnica usual para maximizar la vida útil es el sobredimensionamiento de los componentes (European Space Agency, 2008), aunque este enfoque suele producir un aparato más voluminoso y puede resultar contraproducente en muchas aplicaciones, en las cuales el volumen es un factor parámetro relevante (v.g.: aparatos electrodomésticos).

El proceso de diseño de un filtro LC es bien conocido; sin embargo, no existe una relación explícita entre el comportamiento de las variables eléctricas, la vida útil de los elementos del filtro y el volumen resultante. Como solución a esta dificultad, se presenta aquí un método para relacionar el comportamiento eléctrico del filtro con la vida útil (L_{OFF}) y el volumen (V_{OLF}) resultantes. Los aspectos sobresalientes de la propuesta son:

- Se propone utilizar el cociente L_{OFF}/V_{OLF} como índice de valoración del filtro. El índice se expresa en horas de operación por centímetro cúbico (horas/cm³).
- El método aprovecha la técnica de diseño factorial de experimentos de dos niveles, la que facilita identi-

car los parámetros con el mayor impacto sobre el índice de valoración. Una vez identificados los parámetros, el diseño puede mejorarse a fin de cumplir con una meta particular.

La metodología se ilustra con en accionador de 5 kW.

Análisis basado en el diseño de experimentos

La meta consiste en ponderar los parámetros de diseño de acuerdo al impacto que tienen sobre la vida útil y el volumen. Debido a la cantidad de información involucrada, el proceso de ponderación se complica conforme aumenta el número de parámetros considerados. El proceso se puede simplificar utilizando la técnica de Diseño de Experimentos, la que analiza el efecto simultáneo de varios factores (o parámetros) sobre la variable de salida. Una variante de esta técnica es el diseño factorial, en el que todos los parámetros se modifican a la vez y se llevan a cabo experimentos (o evaluaciones de la variable de salida) para todas las combinaciones de niveles de los parámetros. Este procedimiento revela el efecto de un parámetro cuando los otros están cambiando (Telford, 2007). En un diseño factorial de dos niveles, a cada parámetro se le asigna un valor mínimo y otro máximo, denotados por L y H , respectivamente. La variable de salida es el cociente L_{OPF}/V_{OLF} y se consideran los tres siguientes parámetros de diseño ($n = 3$):

- Frecuencia de corte del filtro f_c . Debe ser lo suficientemente reducida como para generar un voltaje de CD razonablemente libre de rizo, según lo demande la aplicación. Los valores mínimo y máximo considerados son $f_{CL} = 55$ Hz y $f_{CH} = 80$ Hz.
- El factor de amortiguamiento del filtro ξ . Debe ofrecer una respuesta transitoria adecuada. Los valores mínimo y máximo considerados son $\xi_L = 0.3$ y $\xi_H = 0.6$.
- El voltaje nominal del capacitor V_R . Debe ser superior al voltaje máximo que se espera en el bus de CD. Los valores mínimo y máximo son $V_{RL} = 350$ V y $V_{RH} = 450$ V

El primer paso del análisis consiste en definir una matriz de diseño; en ella, cada renglón corresponde a una combinación de parámetros y a un experimento. Con $n = 3$ y usando un diseño factorial completo de dos niveles, se tienen ocho combinaciones. Es necesario entonces diseñar el filtro para cada una de las combinaciones

y después evaluar el volumen, la vida útil resultante y el cociente entre ellos.

El núcleo de la técnica de diseño de experimentos es el análisis de variancia. Sea P cualquiera de los parámetros de diseño. El efecto principal ΔAvg_p , debido a cada parámetro se calcula promediando la diferencia entre las respuestas que se obtienen para cada uno de los niveles del parámetro (O'Connor, 2002); es decir:

$$\Delta Avg_p = Avg(H)_p - Avg(L)_p \quad (1)$$

donde:

$$Avg(H)_p = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 x_j |_{p=H} \quad (2)$$

$$Avg(L)_p = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 x_j |_{p=L} \quad (3)$$

y a su vez, $x_j |_{p=M}$ y $x_j |_{p=L}$ son los valores de la variable de salida cuando P toma los valores máximo y mínimo, respectivamente. Además, si ΔAvg_p es positivo, el incrementar el parámetro P ocasionará un incremento en la variable de salida. Con ΔAvg_p negativo, el efecto es el opuesto.

Diseño del filtro

Aunque sólo incluye dos elementos, el filtro debe satisfacer una serie de requerimientos: que las pérdidas sean mínimas, que la corriente que se demanda al rectificador no sea discontinua, que el rizo de tensión Δv_{DC} a su salida sea menor a un valor dado, etc. El enfoque seguido toma en cuenta el factor de amortiguamiento (Rajashekara *et al.*, 1987).

El circuito equivalente se muestra en la figura 2; R_F modela las pérdidas en el filtro y R_L modela, de manera simplificada, al motor. La simplificación implica que sólo se considera la potencia promedio demandada por el motor operando en régimen permanente (suponiendo un inversor sin pérdidas). R_L depende de la resistencia del rotor y puede aproximarse con:

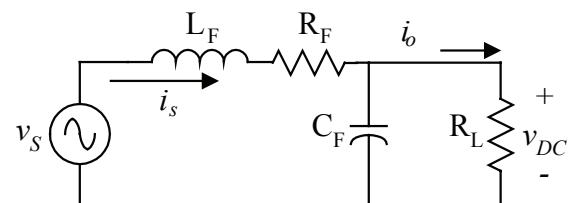


Figura 2. Filtro pasa-bajas LC

$$R_L = \frac{V_N^2}{P_N} \quad (4)$$

donde V_N y P_N son el voltaje y la potencia nominales del motor, respectivamente. Por medio de análisis convencional se obtiene la función de transferencia, en términos de la frecuencia natural ω_n y el factor de amortiguamiento ξ :

$$g(s) = G_o \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5)$$

donde:

$$G_o = \frac{R_L}{R_F + R_L} \quad (6)$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{G_o L_F C_F}} \quad (7)$$

$$\xi = \sqrt{\frac{G_o}{4 L_F C_F}} \left(R_F C_F + \frac{L_F}{R_L} \right) \quad (8)$$

Si se especifican ω_n y ξ , los elementos del filtro pueden calcularse resolviendo las siguientes ecuaciones:

$$R_F C_F^2 + \frac{2\xi}{G_o \omega_n} C_F + \frac{1}{R_L G_o \omega_n^2} = 0 \quad (9)$$

$$L_F = \frac{1}{C_F G_o \omega_n^2} \quad (10)$$

Volumen

El volumen del filtro V_{OLF} es la suma del volumen del inductor V_{OLL} con el del capacitor V_{OLC} .

Inductor

Un factor básico en el diseño de inductores es el producto de áreas A_p , el cual corresponde al área de la ventana, multiplicada por el área de la sección transversal del núcleo. Para laminación E-I, A_p se relaciona con la energía W que debe manejar el inductor a través de la siguiente relación:

$$A_p = \left\{ \frac{2 W \times 10^4}{K_U B_m K_J} \right\}^{1/0.88} \quad (11)$$

donde B_m es la densidad de flujo magnético, la constante K_U es el factor de utilización de la ventana y K_J depende del incremento de temperatura en el inductor (McLyman, 1988). La energía que debe manejar L_F depende de la potencia nominal P_o de la carga y de la tensión línea a neutro V_{LN} a la entrada del rectificador:

$$W = \frac{\pi^2 L_F P_o^2}{108 V_{LN}^2} \quad (12)$$

Usando $K_U = 0.4$, $B_m = 1$ Tesla y $K_J = 534$ (para un incremento de temperatura de 50°C):

$$A_p = \left\{ 8.556 \frac{P_o^2 L_F}{V_{LN}^2} \right\}^{1/0.88} \quad (13)$$

Por otro lado, el volumen V_{OLL} que ocupa el inductor, depende también de A_p , de acuerdo a:

$$V_{OLL} = K_V A_p^{0.75} \quad (14)$$

donde la constante K_V es igual a 19.7 para laminación E-I. Sustituyendo en la ecuación (14), el volumen del inductor, en función de parámetros eléctricos, queda como:

$$V_{OLL} = 122.75 \left\{ \frac{P_o^2 L_F}{V_{LN}^2} \right\}^{0.75/0.88} \quad (15)$$

Capacitor

Por lo que se refiere a capacitores, los fabricantes los ofrecen en tamaños estándar que dependen de la capacitancia y del voltaje nominal. Así pues, al seleccionarse el componente de acuerdo a estos valores se define el volumen V_{OLC} de él, ya que la ficha técnica proporciona el diámetro y la altura.

Vida útil

Inductor

Los inductores exhiben tasas de fallos muy bajas. Por ejemplo, de acuerdo a datos extraídos del manual militar MIL HDBK 217-F, un inductor en un ambiente típi-

co de una aplicación industrial, con una temperatura interna de 80°C, exhibe una tasa de fallos de 0.001 fallas por millón de horas (Department of Defense-EUA, 1991). Por lo tanto, la vida útil del filtro estará limitada por el capacitor.

Capacitor

La vida útil del capacitor L_{OPC} puede describirse matemáticamente con (Parler, 2004):

$$L_{OPC} = L_B f_1(V) f_2(\Delta T) \quad (16)$$

donde L_B es la vida útil nominal a la temperatura interna máxima T_M y depende del diámetro del capacitor, como se aprecia en la tabla 1.

Tabla 1. Vida útil para capacitores electrolíticos tipo PEH200, a $T_M = 85^\circ\text{C}$ (Evox, 2001)

Diámetro (mm)	35	50	65	75	90
L_B (10^3 horas)	20	24	30	40	60

Sean V_A el voltaje aplicado al capacitor y V_R el voltaje máximo permitido. El término f_1 considera el efecto del esfuerzo del voltaje aplicado al capacitor y está dado por:

$$f_1(V) = 4.3 - 3.3 \frac{V_A}{V_R} \quad (17)$$

A su vez, f_2 es función del incremento en la temperatura interna y se expresa como:

$$f_2(\Delta T) = 2^{(T_M - T_{HS})/K} \quad (18)$$

donde K es una constante que depende de la construcción y T_{HS} es la temperatura interna en la aplicación. El término T_{HS} depende de la potencia P_C disipada en el capacitor, de su re-

sistencia térmica R_θ y de la temperatura ambiente T_A , de acuerdo con:

$$T_{HS} = T_A + R_\theta P_C \quad (19)$$

La potencia P_C depende de la ESR y de la corriente i_C que fluye a través del capacitor. La ESR exhibe un comportamiento a lineal, como puede apreciarse en la figura 3, la que corresponde a un capacitor electrolítico de 4700 μF a 450 V. La ESR también depende, de forma inversamente proporcional, del valor de capacitancia y de V_R .

El contenido armónico de la corriente i_C depende de la tensión trifásica aplicada al rectificador y de la modulación del inversor. Si se conocen las amplitudes de las armónicas I_h y los valores ESR_h a las mismas frecuencias, la potencia P_C se calcula con:

$$P_C = \sum_{h=1}^j ESR_h I_h^2 \quad (20)$$

En este punto, la dificultad reside en el comportamiento de la ESR, función de la frecuencia y de la temperatura. Por lo tanto, para calcular P_C es necesario seguir un procedimiento iterativo, suponiendo inicialmente que $T_{HS0} = T_A$ y que se conocen tanto las amplitudes armónicas I_h como la matriz de ESR del capacitor.

Entonces:

- Por medio de interpolación, calcular una curva de ESR en función de la frecuencia, para la temperatura T_{HS0} .
- Utilizando nuevamente interpolación, calcular los valores de ESR_h a las frecuencias de las armónicas en corriente.
- Calcular P_C utilizando la ecuación (20).
- Calcular la temperatura T_{HS} utilizando la ecuación (19).
- Si $|T_{HS} - T_{HS0}|$ es mayor a un error ϵ previamente especificado, el proceso se repite haciendo $T_{HS0} = T_{HS}$.

Una vez calculada la temperatura T_{HS} , se procede al cálculo de L_{OPC} utilizando las ecuaciones (16), (17) y (18).

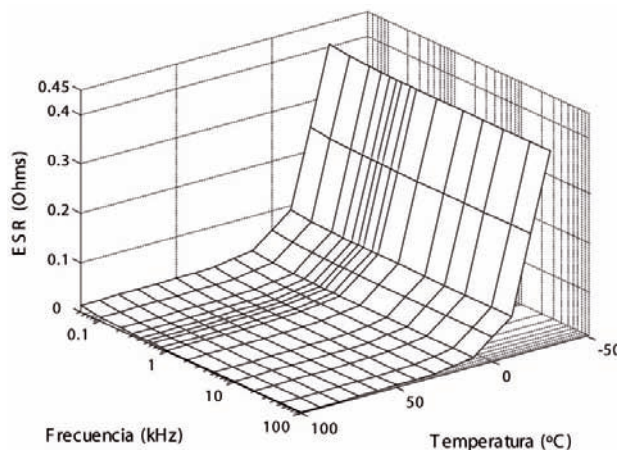


Figura 3: ESR como función de la temperatura T_{HS} y la frecuencia

Accionador a 5 kW

El procedimiento se probó con un accionador de 5 kW. Las cuatro columnas a la izquierda de la tabla 2 corresponden a la matriz de diseño. Se obtuvieron 8 diseños del filtro con los datos de la segunda y tercera columnas, haciendo $\omega n = 2\pi f_c$ y siguiendo el proceso de la sección 3; al resolverse la ecuación (9) se toma la solución que arroja el capacitor más grande. Los volúmenes se calculan de acuerdo a la sección 4. Para calcular L_{OPC} es necesario determinar las magnitudes I_h de los armónicos. Para ello, el vector que describe a i_c se obtiene por medio de simulación, usando el esquemático de la figura 4, con una modulación PWM con portadora triangular a 3 kHz y el modelo de una máquina de inducción jaula de ardilla trifásica.

Las magnitudes I_h se calculan aplicando la transformada rápida de Fourier al vector de i_c . Una vez que se determinan estas amplitudes es posible aplicar el procedimiento de la sección 5, haciendo $L_{OPF} = L_{OPC}$. Las columnas de la derecha, en la tabla 2, corresponden a los resultados.

Los efectos principales de los parámetros calculados de acuerdo a la sección 2, se enlistan en la tabla 3, con

finés comparativos. Se enlistan también los efectos principales sobre el volumen y sobre la vida útil.

De acuerdo a las magnitudes y signos de los efectos principales con mayor impacto en las variables de salida, se tiene lo siguiente.

- Si se desea maximizar la vida útil, es conveniente aumentar $V_{R'}$ con ello se obtiene un capacitor de mayor tamaño, el que exhibirá una L_B mayor.
- La tabla 3 lista los efectos principales para aumentar el volumen; por lo tanto, si se desea minimizarlo, lo que conviene hacer es reducir $V_{R'}$ lo que arrojará un capacitor más pequeño.
- Tanto la vida útil como el volumen dependen del mismo parámetro, pero con sentidos opuestos; sin embargo, el efecto principal con mayor impacto sobre el índice L_{OPF}/V_{OLF} , es la frecuencia de corte. Para V_R y ξ dados, el usar una frecuencia de corte más baja tiende a producir elementos más grandes lo que, si bien aumenta el volumen, también incrementa la vida útil en magnitud suficiente para tener un efecto neto positivo sobre el índice.

m	f_n [Hz]	ξ	V_R [V]	L_{OPF} [horas]	V_{OLF} [cm ³]	L_{OPF}/V_{OLF} [horas/cm ³]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	55	0.3	350	2.76E+06	713	3.88E+03
2	55	0.3	450	2.82E+06	873	3.23E+03
3	55	0.6	350	2.08E+06	901	2.31E+03
4	55	0.6	450	4.76E+06	1660	2.87E+03
5	80	0.3	350	1.24E+06	713	1.74E+03
6	80	0.3	450	2.54E+06	829	3.07E+03
7	80	0.6	350	1.90E+06	682	2.79E+03
8	80	0.6	450	2.93E+06	1146	2.55E+03

Tabla 2- Matriz de diseño y resultados

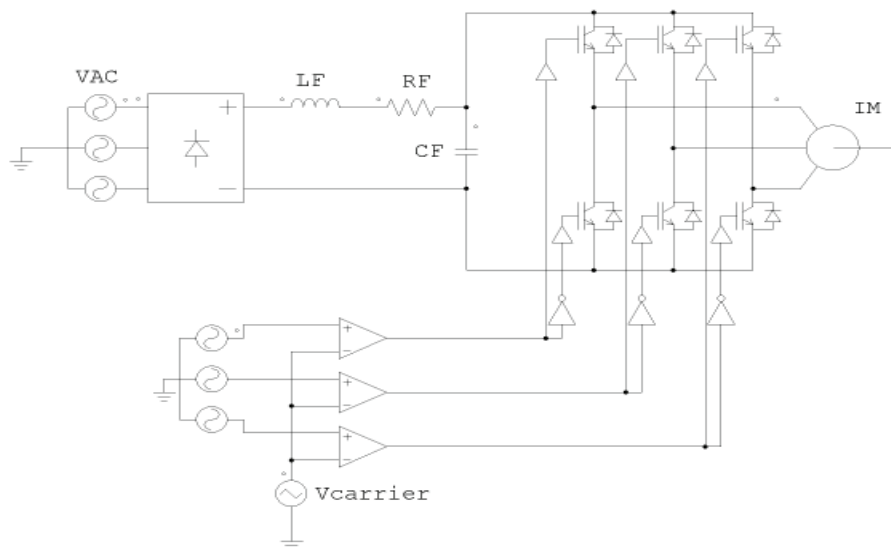


Figura 4. Circuito usado para la simulación

Tabla 3. Efectos principales de los parámetros de diseño

	ΔAvg_{f_c}	ΔAvg_{ξ}	ΔAvg_{V_r}
L_{OFF} [horas]	-9.53×10^5	5.75×10^5	1.27×10^6
V_{OLF} [cm ³]	-194.25	315.25	374.25
$L_{OFF}/V_{OLF} \left[\frac{\text{horas}}{\text{cm}^3} \right]$	-5.32×10^2	-3.51×10^2	2.49×10^2

El efecto de f_c sobre el cociente L_{OFF}/V_{OLF} es evidente en la tabla 2 (compárense las combinaciones 1, 2 y 4 con las 5, 6 y 8, respectivamente). Se aprecia también que el cociente para la combinación 3 (a 55 Hz) es menor que el de la 7 (a 80 Hz). Debe notarse que los volúmenes, tanto de los capacitores como de los inductores, cambian a pasos y no de manera continua en función del valor del elemento. Para el caso de los inductores, una laminación de dimensiones dadas permite construirlos dentro de un intervalo $L_{MAX} \geq L_F \geq L_{MIN}$ y se obtiene una mayor eficiencia volumétrica si $L_F \cong L_{MAX}$. Lo mismo ocurre con los capacitores, y el efecto se extiende también a la vida útil nominal L_B asociada con las dimensiones del empaque. En el caso de las combinaciones 3 y 7, para maximizar el cociente L_{OFF}/V_{OLF} puede aprovecharse el efecto principal de ξ . Al reducirse este factor se obtiene un capacitor más pequeño, a costa de un inductor más voluminoso; el resultado se aprecia comparando la columna 3 con la 1, o la 4 con la 2.

Conclusiones

Se presenta un método para maximizar el cociente L_p/V_{OL} del filtro LC que se utiliza en accionadores de máquinas eléctricas. El método se basa en el diseño de experimentos y permite identificar qué parámetros de diseño tienen un mayor efecto sobre la vida útil. En este sentido, el método asemeja el análisis de sensibilidad, aunque este último no puede aplicarse en casos como el presente, porque no existe una relación explícita entre los parámetros y la variable de salida. De acuerdo con los resultados, para maximizar el cociente L_{OFF}/V_{OLF} conviene minimizar la frecuencia de corte f_c (parámetro con el mayor impacto) y el factor de amortiguamiento ξ (parámetro con el segundo mayor impacto).

Referencias

Chien W., Tzou Y. Analysis and Design on the Reduction of DC-Link Electrolytic Capacitor for AC/DC/AC Converter Applied to AC Motor Drives. En: Power Electronics Specialists Conference (29^o, 1998. Fukuoka, Japón), Fukuoka, Japón. IEEE, 1998, 275-279.

- Department of Defense. Mil. Hdbk 217-F, *Reliability Prediction of Electronic Equipment*. EUA. 1991.
- European Space Agency. Standard ECSS-Q-ST-30-11C. *Space Product Assurance. Derating -EEE Components*. Space Components Steering Board and European Space Agency. Julio 2008.
- Evov Rifa. PEH200 electrolytic capacitors data sheet [en línea]. Disponible en: http://www.evovrifa.com/electrolytic_cat/peh200.pdf
- Hirschmann D., Tissen D., Schröder S., De Doncker R. Reliability Prediction for Inverters in Hybrid Electrical Vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 22(6):2511-2517. Noviembre 2007. ISSN: 0885-8993
- Hwang G., Lehn P., Winkelkemper M. Control of Grid Connected AC-DC Converters with Minimized DC Link Capacitance Under Unbalanced Grid Voltage Condition. En: 12^o European Conference on Power Electronics and Applications Proceedings, Aalborg, Dinamarca, EPE, 2007, pp. 1-10.
- Klimpner C., Liserre M., Blaabjerg F. Improved Control of an Active-Front-End Adjustable Speed Drive with a Small DC-Link Capacitor Under Real Grid Conditions. En: 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference Record, Aachen, Alemania. IEEE, 2004, pp. 1156-1162.
- McLyman-William. *Transformer and Inductor Design Handbook*. 2^o edición. Nueva York. Marcel Dekker 1988. pp. 145-173.
- O'Connor-Patrick. *Practical Reliability Engineering*. 4a edición. West Sussex, Inglaterra. John Wiley and Sons. 2002. Pp. 247-289.
- Parler S. Reliability of CDE Aluminum Electrolytic Capacitors. Application Note, Cornell Dubilier Electronics [en línea]. Disponible en: <http://www.cde.com/tech/reliability.pdf>
- Piepenbreier B., Sack L. Regenerative Drive Converter with Line-Frequency Switched Rectifier and without DC Link Components. En: 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference Record, Aachen, Alemania. IEEE, 2004, pp. 3917-3923.
- Rajashekara K., Rajagopalan V., Sevigny A., Vithayathil J. DC Link Filter Design Considerations in Three-Phase Voltage Source Inverter-Fed Inductor Motor Drive System. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 23(4):673-680, Julio-Agosto 1987. ISSN: 0278-0046.
- Sarjeant W., Clelland I., Price R. Capacitive Components for Power Electronics. *Proceedings of the IEEE*. 89(6): 846-855. Junio 2001, ISSN: 0018-9219.
- Telford J. A Brief Introduction to Design of Experiments. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 27(3): 224-232. Septiembre 2007. ISSN: 0270-5214.

Semblanza de los autores

Jorge Hugo Calleja-Gjumlich. Es ingeniero en comunicaciones y electrónica graduado en la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional en 1977, obtuvo la maestría en la Facultad de Ingeniería, UNAM en 1981 y el doctorado en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico en el 2000. Colaboró en la Facultad de Ingeniería de la UNAM y en el Departamento de Electrónica del Instituto de Investigaciones Eléctricas. Actualmente es profesor-investigador en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Sus líneas de investigación son los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica y la optimización de convertidores electrónicos de potencia. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores.

Gerardo Vicente Guerrero-Ramírez. Obtuvo el grado de ingeniero industrial electricista por el Instituto Tecnológico de Morelia (1980), el de maestro en ciencias en ingeniería electrónica por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (1994) y el de doctor en ingeniería en la Facultad de Ingeniería de la UNAM (2001). Actualmente es profesor-investigador en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Sus líneas de investigación son el control no lineal de sistemas electromecánicos, con énfasis en los accionadores de máquinas eléctricas enfocados a aplicaciones de tracción.

Humberto Raúl Jiménez-Grajales. Obtuvo el grado de ingeniero industrial en electrónica en el Instituto Tecnológico de Tuxtla (1999) y el de maestro en ciencias en ingeniería electrónica en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (2002). Actualmente es investigador en la gerencia de energías no convencionales del Instituto de Investigaciones Eléctricas. Sus líneas de investigación son los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica y la optimización de convertidores electrónicos de potencia.