

Fiabilidad y tiempo de vida de los condensadores del bus DC

Ander DeMarcos , Asier Matallana , Jon Andreu , Unai Ugalde , Iker Aretxabaleta , Asier Davila 

Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)

e-mail: ander.demarcosa@ehu.eus

www.ehu.eus/es/web/apert

Resumen—Los condensadores del bus DC son una parte importante de los convertidores de potencia, ya que son los elementos más críticos en cuanto a fiabilidad. En este trabajo se revisan los modos y mecanismos de fallo en los condensadores del bus DC. Además, se analizan los modelos de tiempo de vida y se detalla la metodología a seguir para la obtención de estos modelos. Por otro lado, se identifican los factores de estrés que influyen en el tiempo de vida, siendo la temperatura del *hot-spot* el factor dominante.

Palabras Clave—Bus DC, condensadores electrolíticos, condensadores de película, condensadores cerámicos, ESR, mecanismos de fallo, fiabilidad, estimación de tiempo de vida.

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, los convertidores de potencia se utilizan en infinidad de aplicaciones tales como el vehículo eléctrico (EV), las energías renovables, accionamientos industriales, etc [1], [2]. El núcleo de estos convertidores son los semiconductores, condensadores e inductancias. En función de la aplicación, los convertidores de potencia deben cumplir ciertas especificaciones (calidad de la señal sintetizada (THD), rizado de tensión, eficiencia, etc). Asimismo, es importante tener en cuenta otros parámetros como la densidad de potencia y el tiempo de vida. En este sentido, los condensadores que integran el convertidor de potencia juegan un papel fundamental, siendo éstos los componentes más críticos del convertidor. Según [3] el 30% de las rupturas en los convertidores del EV son causadas por los condensadores (principalmente del bus DC) (Figura 1). En general, existen tres tipos de condensadores para las aplicaciones del bus DC: los electrolíticos de aluminio (Al-Caps), los de polipropileno con película metalizada (MPPF-Caps) y los cerámicos multicapa (MLC-Caps) [4]. La elección final entre esta variedad de condensadores depende de las diferencias a nivel tecnológico que tienen entre ellos, que se ven representadas en sus características (valor capacitivo, densidad de potencia, precio, estabilidad, tiempo de vida, etc).

Dada la importancia de estos elementos reactivos, y teniendo en cuenta las exigencias del sector de la automoción, es importante conocer sus mecanismos de ruptura y modos de fallo. Desarrollar modelos para estimar el tiempo de vida de los condensadores permite utilizar técnicas de mantenimiento preventivo mediante la motorización del estado del condensador.

En este trabajo se revisan los modos y mecanismos de fallo en los condensadores del bus DC. Además, se analizan los modelos de tiempo de vida y el procedimiento para la obtención de estos modelos.

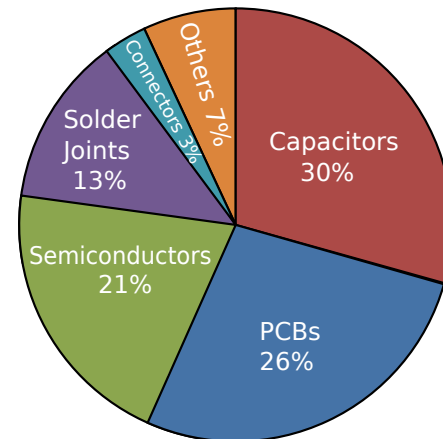


Figura 1. Distribución de fallos entre los componentes de los convertidores de potencia para el vehículo eléctrico [3].

II. MODOS Y MECANISMOS DE FALLO DE LOS CONDENSADORES

La fiabilidad está estrechamente relacionada al análisis de los fallos que ocurre en un determinado componente. En este sentido, es conveniente distinguir entre los siguientes términos:

- **Modo de fallo:** es la manera en la cual se percibe o detecta el fallo. Los condensadores pueden fallar de diferentes modos: de forma brusca/catastrófica (circuito abierto o cortocircuito), o por envejecimiento (presentándose a través de la deriva de algún parámetro eléctrico).
- **Mecanismo de fallo:** es el proceso (físico, eléctrico, mecánico, químico, etc) que causa el fallo. Los mecanismos de fallo (vaporización, ruptura del dieléctrico, etc) son específicos para cada tipo de condensador (Tabla I) debido a sus diferencias a nivel estructural.
- **Factores de estrés:** son las variables físicas que aceleran los mecanismos de fallo. Hay factores de estrés comunes a todos los condensadores, como la tensión (v_c), la temperatura ambiente (T_a) y el rizado de corriente (i_c). La T_a e i_c se pueden agrupar en un único factor de estrés, la temperatura del *hot-spot* (T_h) del condensador, la cual depende de los dos términos anteriores. Por otro lado, hay otros factores de estrés específicos para cada tipo de condensador, éstos se resumen en la Tabla I.

Los modos y mecanismos de fallo y factores de estrés para condensadores empleados habitualmente en convertidores de electrónica de potencia son (Tabla I):

Tabla I
MODOS DE FALLO, MECANISMOS DE FALLO Y FACTORES DE ESTRÉS DE LOS CONDENSADORES PARA BUS DC [4].

	Modos de fallo	Mecanismos de fallo	Factores de estrés
Al-Caps	Circuito abierto ⁽¹⁾	Electrolito: vaporización del electrolito	v_c, T_a, i_c
		Terminales: conexión pobre de los terminales	Vibración
	Cortocircuito	Dieléctrico: ruptura del dieléctrico	v_c, T_a, i_c
	Envejecimiento ⁽²⁾	Electrolito: vaporización del electrolito	T_a, i_c
		Reacción electroquímica (degradación del aislante, reducción de capacidad, etc.)	v_c, T_a, i_c
Apertura del sellado	Incremento de la presión interna	v_c, T_a, i_c	
MPPF-Caps	Circuito abierto ⁽¹⁾	Dieléctrico: ruptura del dieléctrico y autocuración	$v_c, T_a, dv_c/dt$
		Conexionado: inestabilidad del conexionado por la contracción térmica de la película	T_a, i_c
		Electrodo: reducción de área del electrodo causado por la oxidación del metal debido a la humedad	Humedad
	Cortocircuito	Dieléctrico: ruptura del dieléctrico	$v_c, dv_c/dt$
		Sobrecorriente por autocuración	T_a, i_c
		Película: absorción de la humedad por la película	Humedad
Envejecimiento ⁽²⁾	Dieléctrico: degradación del dieléctrico	$v_c, T_a, i_c, \text{humedad}$	
MLC-Caps	Cortocircuito ⁽¹⁾	Dieléctrico: ruptura del dieléctrico	v_c, T_a, i_c
		Cracking (grietas en la estructura)	Vibración/shock
	Envejecimiento ⁽²⁾	Oxide vacancy migration, stress voiding, degradación del aislamiento, micro-cracks en el material cerámico	$v_c, T_a, i_c, \text{vibración/shock}$

- V_c : tensión en el condensador, I_c : corriente de rizado, I_{leak} : corriente de fugas, T_a : temperatura ambiente.
- $\tan \delta$: factor de disipación, R_{ins} : resistencia de aislamiento, C_R : capacidad nominal.
- (1) Modo de fallo catastrófico típico.
- (2) Envejecimiento debido a la deriva de algún parámetro eléctrico ($C_R, ESR, \tan \delta, I_{leak}, R_{ins}$).

- Al-Caps: en éstos, el electrolito se evapora con el tiempo debido a las altas temperaturas causadas por la limitada superficie de disipación de calor que tiene el condensador, junto al elevado valor de las pérdidas que se producen en la ESR . Este calentamiento también provoca el aumento de la presión del gas interno, pudiendo alcanzar el valor máximo permitido por la goma de sellado y, por consiguiente, provocar la ruptura del condensador [5].
- MPPF-Caps: éstos tienen la propiedad de autocuración o *self-healing*. Ésto significa que si hay una ruptura en el dieléctrico, la elevada densidad de corriente alrededor del lugar de la ruptura vaporiza el electrodo metalizado, aislando el cortocircuito. En ese caso, el único cambio permanente en el condensador es una mínima pérdida de capacidad. Además, hay que tener en cuenta la humedad en este tipo de condensadores [4], ya que la elevada exposición a una alta humedad ambiente elimina la metalización de la película, provocando varios problemas en el correcto funcionamiento del condensador [6]. El impacto que tiene este factor de estrés en este tipo de condensadores depende de la construcción y el sellado que utilicen [6]. Por otro lado, las altas temperaturas agravan el efecto de la humedad en el condensador ya que aceleran su penetración.
- MLC-Caps: en éstos el fallo más común es el cortocircuito. El transporte, el proceso de soldadura o el funcionamiento de la propia aplicación pueden causar algunas vibraciones o golpes que pueden generar agrietamientos en el componente. Por otro lado, el envejecimiento de los condensadores cerámicos de una sola capa no es un gran problema, sin embargo, cuando hay un gran

número de capas dieléctricas apiladas como en los MLC-Caps, el factor de envejecimiento se amplifica, lo que da lugar a un proceso de degradación más rápido [4], [7].

III. ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE VIDA

Para estimar el tiempo de vida de un componente se utilizan modelos que representan como afecta cada factor de estrés en su tiempo de vida. En los condensadores, conocer la temperatura del *hot-spot* es fundamental. Para ello, hay que aplicar modelos de pérdidas y modelos electro-térmicos (Figura 2). Una vez conocido el perfil de temperatura, junto a los demás factores de estrés, se aplican los modelos de tiempo de vida y conceptos de daño acumulado para obtener el tiempo de vida resultante en perfiles de estrés variables.

A. Modelo electro-térmico

La ESR de un condensador varía en función de la frecuencia y la temperatura del *hot-spot* ($ESR = f(T_h, f_i)$), especialmente en los condensadores electrolíticos, tal y como se puede observar en la Figura 3 (Nichicon, [5]). En los condensadores de película existen estas dependencias, aunque son mucho menores [8].

En los Al-Caps, la ESR , principalmente depende de la resistencia del electrolito, la de los terminales y la asociada a las pérdidas en el dieléctrico. Como el electrolito tiende a evaporarse a lo largo del tiempo, el valor de la ESR aumenta sustancialmente comparado con los demás tipos de condensadores.

Debido a que la ESR es función de la frecuencia, para obtener las pérdidas de potencia (P_{loss}), es necesario obtener

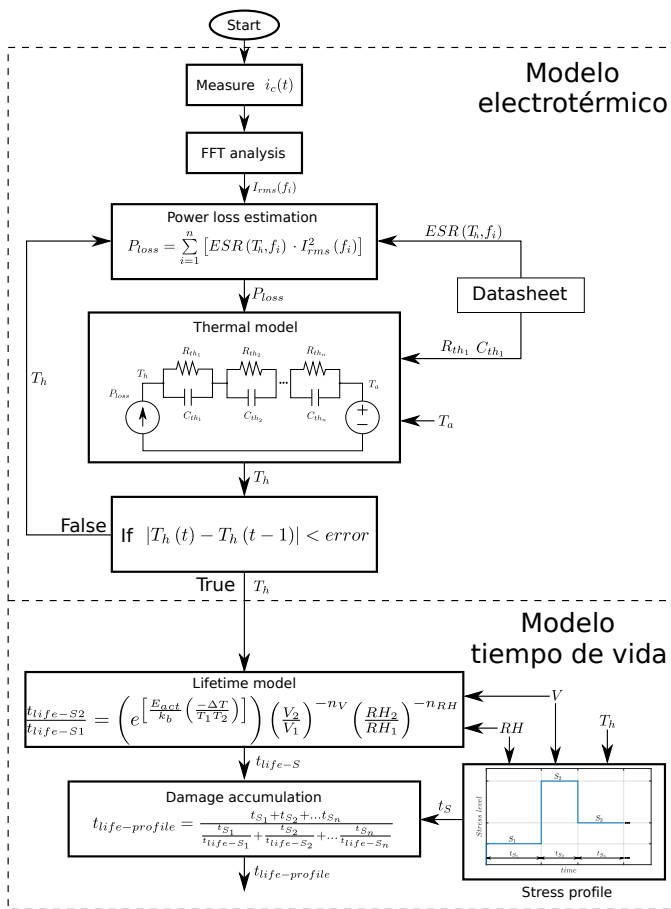


Figura 2. Diagrama de flujo para la estimación de tiempo de vida de un condensador.

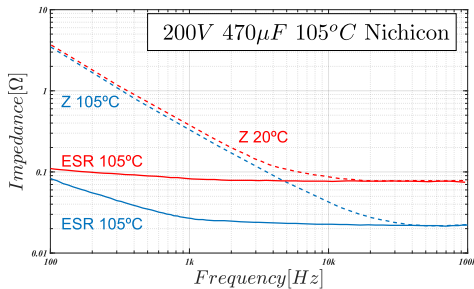


Figura 3. Impedancia y ESR en función de la frecuencia para diferentes temperaturas del Al-Cap UPZ2D471MHD de Nichicon.

los armónicos de la corriente mediante una FFT y multiplicar cada término $I_{rms}(f_i)$ por el correspondiente valor de $ESR(T, f_i)$ según (1).

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^n [ESR(T, f_i) \cdot I_{rms}^2(f_i)] \quad (1)$$

Una vez obtenida la potencia disipada, se puede extraer la temperatura del *hot-spot* a través de los modelos térmicos del condensador. Existen dos tipos de análisis térmicos:

- Análisis térmico estático, donde el circuito equivalente de un condensador (Figura 4) se representa matemáticamente mediante (2).

$$T_h = P_{loss}(R_{th_{hc}} + R_{th_{ca}}) + T_a \quad (2)$$

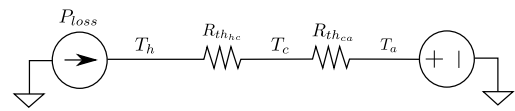


Figura 4. Modelo térmico estático de un condensador.

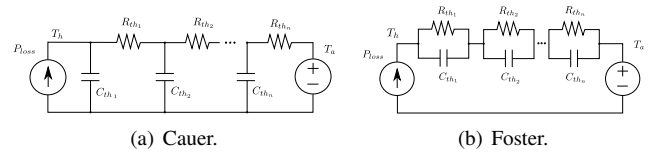


Figura 5. Modelos térmicos dinámicos genéricos de condensadores.

donde T_h es la temperatura del *hot-spot*, T_a es la temperatura ambiente, P_{loss} son las pérdidas de potencia del condensador, $R_{th_{hc}}$ es la resistencia térmica equivalente del punto caliente a la carcasa (considerando la conducción como único mecanismo de transferencia de calor) y $R_{th_{ca}}$ es la resistencia térmica equivalente de la carcasa al ambiente (considerando la convección y la radiación como mecanismos de transferencia de calor).

- En el estudio dinámico, P_{loss} y los valores de temperatura varían en el tiempo. Además de las resistencias térmicas, los modelos incluyen capacidades térmicas. En la literatura se utilizan los modelos térmicos dinámicos Cauer y Foster (Figura 5).

El modelo Cauer (Figura 5(a)) se basa en la estructura física y los diferentes materiales que forman el condensador. Sin embargo, es un modelo complicado de obtener ya que, normalmente, los fabricantes no proporcionan los parámetros necesarios para definirlo.

Por otro lado, el modelo Foster (Figura 5(b)) es el más utilizado para describir el comportamiento térmico del condensador. Este modelo se basa en el ajuste matemático de las curvas de temperatura medidas o simuladas. Los valores de las resistencias y capacidades térmicas utilizadas en este modelo no tienen ningún significado físico.

Una vez calculada la temperatura del *hot-spot* (T_h), ésta debe ser realimentada sobre el modelo de pérdidas para reajustar el valor de la ESR (Figura 2) ya que depende de la temperatura, tal y como se observa en (1).

B. Modelo de tiempo de vida

Los modelos de tiempo de vida estiman los tiempos de vida de los componentes bajo unas condiciones determinadas. Para la obtención de estos modelos, se deben seguir los siguientes pasos (Figura 6):

- B.1) Obtener el tiempo de vida con un ensayo de fiabilidad bajo una condición de estrés determinada. Para ello, se debe usar la definición de tiempo de vida (Figura 7(a)).
- B.2) Obtener el factor de aceleración determinado (AF). Para ello, se debe repetir el proceso B.1) de obtención de tiempo de vida, manteniendo todos los factores de estrés constantes menos el que se quiere estudiar y, después, aplicar un ajuste de mínimo cuadrático.
- B.3) Obtener el modelo de tiempo de vida. Para ello, se debe repetir el proceso B.2) de obtención del factor de aceleración para todos los factores de estrés y combinarlos en el modelo de tiempo de vida.

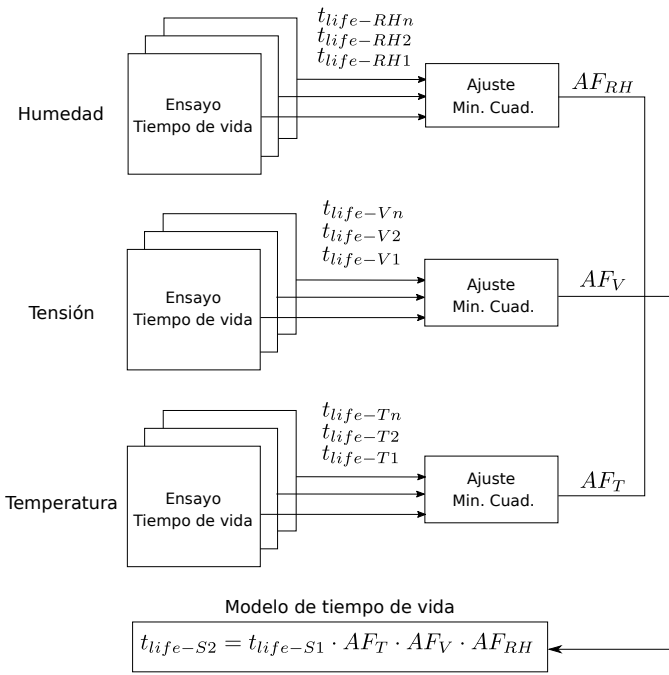
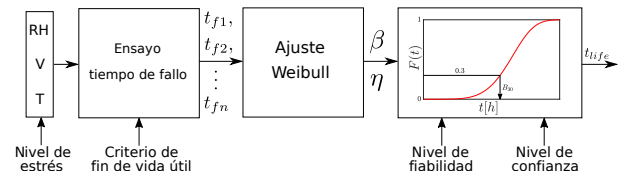


Figura 6. Proceso para la obtención de los modelos de tiempo de vida.

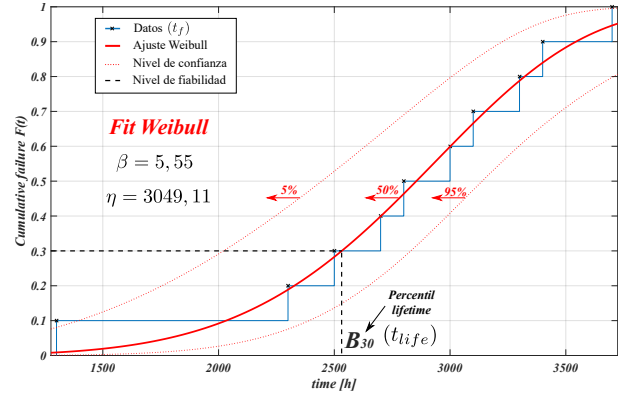
B.4) Aplicar conceptos de daño acumulado para obtener el tiempo de vida, para un perfil de estrés variable, ya que que, en la practica, los niveles de estrés no suelen ser constantes.

B.1) Definición de tiempo de vida y ensayos de fiabilidad: Para una definición completa de tiempo de vida o *lifetime* (t_{life}) hay que fijar previamente cuatro puntos:

- Nivel de estrés: los niveles de estrés aplicados a los componentes deben determinarse adecuadamente incluso antes de definir los criterios de fallo, ya que el comportamiento eléctrico y, en consecuencia, el tiempo al fallo de cada componente bajo test (t_f) dependerá totalmente del nivel de estrés aplicado.
- Definición de fallo o criterio de fin de vida útil: en el caso de los condensadores no es necesario que acaben en circuito abierto o en cortocircuito para afirmar que el componente ha fallado, sino que, por lo general, el fallo significa que alguno de los parámetros eléctricos del componente ha quedado fuera de una especificación determinada. Sin embargo, no existe un criterio de fallo estándar y unificado para todos los condensadores y, dependiendo del fabricante, puede cambiar tanto el parámetro eléctrico de referencia como su valor.
- Nivel de fiabilidad y *percentil* de tiempo de vida: una vez definidos tanto los criterios de fallo como el nivel de estrés, se puede realizar el ensayo de fiabilidad que consiste en medir el tiempo (t_f) que aguantan un numero de componentes bajo test hasta cumplir el criterio de fallo bajo un nivel de estrés (S) determinado. Una vez obtenidos todos los tiempos de fallo (t_f), se aplican conceptos de ajuste a la distribución de Weibull (por ejemplo, el *median rank* o el teorema *maximum likelihood estimation* [9]) con el fin de obtener los parámetros correspondientes (β, η) de la distribución (3). De este



(a) Esquema del ensayo de tiempo de vida.



(b) Resultados del ensayo de tiempo de vida.

Figura 7. Ensayo de tiempo de vida de condensadores de película.

modo, se obtiene la función acumulativa de fallos (3). Este proceso se ve ilustrado en la Figura 7(a).

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3)$$

Asimismo, el tiempo de vida (t_{life}) puede cuantificarse fijando el nivel de fiabilidad ($x\%$) y obteniendo el *percentil* de tiempo de vida ($B_{x\%}$) en la función acumulativa obtenida en (3) y representada en la Figura 7(b). Por ejemplo, $B_{30} = 2531 \text{ h}$ significa que en este intervalo de tiempo fallan el 30% de los componentes.

- Nivel de confianza: por el hecho de haber utilizado un criterio de ajuste de distribución, el nivel de confianza puede establecerse en un valor determinado, por ejemplo el 50% en el caso de la regresión por *median rank*. Esto significa que hay un 50% de posibilidades de que el valor del tiempo de vida sea inferior o superior al valor medio de la vida útil obtenido, que se representa en la función acumulativa de fallos $F(t)$. El nivel de confianza puede ampliarse trazando un rango en el que la curva $F(t)$ puede variar (Figura 7(b)).

Por lo tanto, para definir correctamente la vida útil de un elemento, hay que definir previamente los criterios de fallo, las condiciones de estrés, así como los niveles de fiabilidad y confianza. Si alguno de estos parámetros se modifica o se interpreta erróneamente, se obtendrán datos de tiempo de vida completamente diferentes y no se podrán realizar comparaciones significativas entre los distintos componentes.

B.2) Factores de aceleración y ensayos acelerados:

Realizando los correspondientes ensayos, se obtienen diferentes valores de tiempo de vida (t_{life}) manteniendo todos los factores de estrés constantes menos el que se quiere analizar. Una vez obtenidos los valores de tiempo de vida, se puede obtener el factor de aceleración (AF) haciendo uso de (4). El factor de aceleración muestra como afecta un determinado factor de estrés en el tiempo de vida de un componente [15].

Tabla II
MODELOS DE TIEMPO DE VIDA DE CONDENSADORES.

Tipo de condensador	Modelo	Asunciones	Valores típicos	Ref.
Genérico	$\frac{t_{life-S2}}{t_{life-S1}} = \left(e^{\left[\frac{E_{act}}{k_b} \left(\frac{-\Delta T}{T_1 T_2} \right) \right]} \right) \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{-n_V} \left(\frac{RH_2}{RH_1} \right)^{-n_{RH}}$	NO	NO	[4], [10]
Al-Caps	$\frac{t_{life-S2}}{t_{life-S1}} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{-n_V} 2^{-\Delta T/10}$	$E_{act} \approx 0.94 \text{ eV}$ $T_1 T_2 \approx 398^2 \text{ K}^2$ $\frac{RH_2}{RH_1} \approx 1$	$3 < n_V < 5$	[4], [11]–[13]
MPPF-Caps	$\frac{t_{life-S2}}{t_{life-S1}} = \left(\frac{RH_2}{RH_1} \right)^{-n_{RH}} \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{-n_V} 2^{-\Delta T/10}$	$E_{act} \approx 0.94 \text{ eV}$ $T_1 T_2 \approx 398^2 \text{ K}^2$ $\frac{RH_2}{RH_1} \neq 1$	$7 < n_V < 9, 4$	[4], [11], [14]
MLC-Caps	$\frac{t_{life-S2}}{t_{life-S1}} = \left(e^{\left[\frac{E_{act}}{k_b} \left(\frac{-\Delta T}{T_1 T_2} \right) \right]} \right) \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{-n_V}$	$\frac{RH_2}{RH_1} \approx 1$	$1, 3 < E_{act} < 1, 5$ $1, 5 < n_V < 7$	[4], [7]

$$AF = \frac{t_{life-S2}}{t_{life-S1}} \quad (4)$$

Para obtener estos factores de estrés en el menor tiempo posible se aplican métodos de ensayos acelerados. Estos ensayos consisten en testar los componentes en diferentes entornos sobrecargados para acelerar la degradación y acortar la vida del producto junto a la duración del ensayo. Sin embargo, estos ensayos requieren de un equipamiento sofisticado como cámaras climáticas, generadores de potencia programables, etc. Para una correcta extrapolación de los datos obtenidos a un nivel de estrés sobrecargado al de un uso nominal debe mantenerse el mecanismo de fallo.

La ecuación de Boltzmann-Arrhenius (5) relaciona la temperatura con el tiempo de vida. Esta ecuación surgió del estudio del efecto de la temperatura en la velocidad de las reacciones químicas [16] y es bastante utilizada, ya que la temperatura es uno de los factores de estrés más críticos para la mayoría de los componentes electrónicos. La ecuación sólo es aplicable cuando la temperatura elevada es la causa principal del fallo, ya que en este modelo no se considera la inclusión de factores de estrés distintos a la temperatura.

$$t_{life} = K_{arr} e^{\left[\frac{E_{act}}{k_b T} \right]} \quad (5)$$

donde k_b es la constante de Boltzmann ($8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$), siendo la energía de activación E_{act} y K_{arr} constantes empíricas a determinar. Esta última constante (K_{arr}) no aparece en la ecuación final del factor de aceleración de la temperatura (6).

$$AF_T = e^{\left[\frac{E_{act}}{k_b} \left(\frac{-\Delta T}{T_1 T_2} \right) \right]} \quad (6)$$

donde T_1 y T_2 son las temperaturas del *hot-spot* del condensador (T_h).

Para los Al-Caps y MPPF-Caps, la energía de activación ($E_{act} \approx 0.94 \text{ eV}$) y el producto de T_1 y T_2 puede ser sustituido por $T_1 T_2 \approx 398^2 \text{ K}^2$ [4], [11], [12]. De esta forma, se obtiene el factor de aceleración de la temperatura (7):

$$AF_{T-Al} \approx e^{\left[\ln 2 \left(\frac{-\Delta T}{10} \right) \right]} = 2^{-\Delta T/10} \quad (7)$$

Según este factor de aceleración, por cada 10°C el tiempo de vidas se reduce a la mitad.

Además de la temperatura, la tensión y la humedad relativa son dos factores de estrés a tener en cuenta en el tiempo de

vida de los condensadores [17]. Cada factor de estrés tiene su propio factor de aceleración asociado como (8) y (9):

$$AF_V = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{-n_V} \quad (8)$$

$$AF_{RH} = \left(\frac{RH_2}{RH_1} \right)^{-n_{RH}} \quad (9)$$

donde los exponentes de estrés de tensión (n_V) y humedad relativa (n_{RH}) son parámetros determinados empíricamente (Tabla II).

Los coeficientes asociados a los factores de aceleración de (6), (8) y (9) se obtienen aplicando un ajuste de mínimo cuadrático sobre los valores de tiempo de vida obtenidos mediante los ensayos.

B.3) Modelos existentes de tiempo de vida:

Los modelos de tiempo de vida se desarrollan combinando múltiples factores de aceleración. Se toma el valor de tiempo de vida de referencia y se multiplica por los distintos factores de aceleración para obtener el valor de tiempo de vida estimado en unas condiciones diferentes a las de referencia (10).

$$t_{life-S2} = t_{life-S1} \cdot AF_T \cdot AF_V \cdot AF_{RH} \quad (10)$$

Sustituyendo (6), (8) y (9) en (10), se puede obtener el modelo genérico de tiempo de vida para los condensadores (11).

$$\frac{t_{life-S2}}{t_{life-S1}} = \left(e^{\left[\frac{E_{act}}{k_b} \left(\frac{-\Delta T}{T_1 T_2} \right) \right]} \right) \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{-n_V} \left(\frac{RH_2}{RH_1} \right)^{-n_{RH}} \quad (11)$$

Debido a las diferencias entre las distintas tecnologías de condensadores, se obtienen modelos de tiempo de vida simplificados para cada una de ellas como se puede observar en la Tabla II.

Además de estos modelos generales, muchos fabricantes proporcionan sus propios modelos de vida útil para sus propios productos. Estos modelos suelen ser variantes de los generales. Por ejemplo, el fabricante Cornell Dubilier Capacitors (CDE) proporciona el modelo de tiempo de vida (12) para su propia serie de Al-Caps [18]:

$$\frac{t_{life-S2-Al}}{t_{life-S1-Al}} = \left(4, 3 - 3, 3 \frac{V_2}{V_1} \right) \left(2^{-\Delta T/10} \right) \quad (12)$$

Por otro lado, los fabricantes suelen proporcionar gráficos de variación de tiempo de vida respecto a diferentes factores de

estrés como la tensión, la temperatura ambiente y la corriente de rizado, así como calculadoras de tiempo de vida específicas basadas en sus medidas empíricas.

En algunos casos, se usan modelos de tiempo de vida que incluyen la temperatura ambiente en lugar de la temperatura del *hot-spot*. En estos casos, el modelo debe incluir un factor de aceleración adicional atendiendo al rizado de la corriente (K_I), ya que la corriente en combinación con la temperatura ambiente provoca el autocalentamiento del condensador [19].

$$\frac{t_{life-S2}}{t_{life-S1}} = 2^{\frac{-\Delta T}{10}} \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{-n_V} K_I \quad (13)$$

Normalmente, los fabricantes no proporcionan mucha información sobre el criterio de fin de vida útil. Por esa razón, es difícil compararlos y extrapolarlos a condiciones diferentes a las de referencia.

B.4) Conceptos de daño acumulado:

Los modelos de tiempo de vida de la Tabla II son válidos para niveles constantes de estrés. Sin embargo, en la práctica, los factores de estrés varían en función del tiempo. En el caso de los condensadores, la temperatura del *hot-spot* depende de la corriente que lo atraviesa, por lo que se debe recalcular el tiempo de vida del condensador en cada intervalo tiempo-temperatura. Por esta razón, los modelos de tiempo de vida se combinan con diferentes aproximaciones de modelos de daño acumulado para adecuarlos a perfiles de estrés variable (Figura 2).

El modelo de daño acumulativo lineal más utilizado para los fallos causados por la fatiga térmica es conocido como la ley de Miner. Según esta regla, el daño total que sufre un componente electrónico bajo un nivel de estrés variable se calcula con (14).

$$t_{life-profile} = \frac{t_{S_1} + t_{S_2} + \dots + t_{S_n}}{\frac{t_{S_1}}{t_{life-S_1}} + \frac{t_{S_2}}{t_{life-S_2}} + \dots + \frac{t_{S_n}}{t_{life-S_n}}} \quad (14)$$

donde S_n son los distintos niveles de estrés en determinados periodos de tiempo t_{S_n} , y t_{life-S_n} es la correspondiente estimación de tiempo de vida bajo el determinado nivel de estrés S_n constante [20]. Cada uno de los niveles de estrés aplicados al condensador suma una fracción de daño proporcional al daño acumulado hasta alcanzar un valor del 100% (lo cual significa que se produce el fallo). Esta aproximación lineal es muy utilizada por su sencillez. Sin embargo, no tiene en cuenta el orden de aplicación de los niveles de carga. En la práctica, el orden en el que se aplican los diferentes niveles de estrés tiene una influencia significativa. Por lo tanto, el daño acumulado en un nivel de estrés determinado debe ser función del historial de tensiones recibido previamente.

IV. CONCLUSIONES

En este artículo se ha proporcionado una visión general sobre la fiabilidad y el procedimiento para obtener los modelos de tiempo de vida de los condensadores de potencia.

Cabe destacar la importancia de la estimación de la temperatura del *hot-spot* para el análisis del tiempo de vida. Por lo tanto, hay que conocer el valor de la *ESR* y sus dependencias en función de la temperatura y la frecuencia.

El uso de modelos de tiempo de vida que proporcionan los fabricantes tienen ciertos límites porque rara vez se comentan el criterio de fin de vida utilizado, los mecanismos de fallo a los que representa y los niveles de estrés en los cuales los modelos son aplicables. En el lugar de usar los modelos de tiempo de vida proporcionados por los fabricantes, se pueden generar unos propios siguiendo la el procedimiento indicado en este artículo.

V. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido generado y patrocinado por el Gobierno Vasco en base a las ayudas para apoyar las actividades de grupos de investigación del sistema universitario vasco IT978-16, el programa ELKARTEK con el proyecto ENSOL2 (KK-2020/00077). Así como, la ayuda del programa predoctoral de la UPV/EHU (PIF20-305) y el soporte técnico y humano de TDK.

REFERENCIAS

- [1] A. Matallana, E. Ibarra, I. López, J. Andreu, J. I. Garate, X. Jordà, and J. Rebollo, "Power module electronics in HEV/EV applications: New trends in wide-bandgap semiconductor technologies and design aspects," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 113, p. 109264, 2019.
- [2] E. Robles, M. Fernandez, J. Andreu, E. Ibarra, and U. Ugalde, "Advanced power inverter topologies and modulation techniques for common-mode voltage elimination in electric motor drive systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 140, p. 110746, 2021.
- [3] U. Choi, F. Blaabjerg, and K. Lee, "Study and Handling Methods of Power IGBT Module Failures in Power Electronic Converter Systems," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 30, no. 5, pp. 2517–2533, 2015.
- [4] H. Wang and F. Blaabjerg, "Reliability of capacitors for DC-Link applications in power electronic converters-an overview," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 5, pp. 3569–3578, 2014.
- [5] "General description of aluminum electrolytic capacitors," Nichicon corporation, Tech. Rep., 2005.
- [6] "Power electronics film capacitors," Kemet charged, Tech. Rep., 2007.
- [7] C. Hillman, "Upgrading of ceramic capacitors," DfR Solutions, Tech. Rep., 2007.
- [8] Y.-f. Zhu, H.-j. Tao, and Q.-x. Ge, "The impact of dc-power layout on stray inductance of bridge arm in power converters," *The Open Electrical and Electronic Engineering Journal*, vol. 9, pp. 1–6, 2015.
- [9] G. Wasserman, *Reliability Verification, Testing, and Analysis in Engineering Design*. CRC Press, 2002.
- [10] H. Wang, K. Ma, and F. Blaabjerg, "Design for reliability of power electronic systems," in *Proc. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, 2012, pp. 33–44.
- [11] S. G. Parler, "Deriving life multipliers for electrolytic capacitors," *IEEE Power Electronics Society Newsletter*, vol. 16, no. 1, pp. 11–12, 2004.
- [12] H. Wang, P. Davari, H. Wang, D. Kumar, F. Zare, and F. Blaabjerg, "Lifetime estimation of DC-Link capacitors in adjustable speed drives under grid voltage unbalances," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 5, pp. 4064–4078, 2019.
- [13] A. Albertsen, "Electrolytic capacitor lifetime estimation," Jianghai Europe Electronic Components GmbH, Tech. Rep., 2010.
- [14] "Capacitors age and capacitors have an end of life," EMERSON, Tech. Rep., 2008.
- [15] G. Caswell, "Temperature and humidity acceleration factors on MLV lifetime," DfR solutions, Tech. Rep., 2015.
- [16] A. Albertini, M. G. Masi, G. Mazzanti, L. Peretto, and R. Tinarelli, "Toward a bite for real-time life estimation of capacitors subjected to thermal stress," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 60, no. 5, pp. 1674–1681, 2011.
- [17] R. Gally, "Metallized film capacitor lifetime evaluation and failure mode analysis," in *Proc. of the CERN Accelerator School: Power Converters (CAS)*, 2014, pp. 45–56.
- [18] J. Sam G. Parler and L. L. Macomber, "Predicting operating temperature and expected lifetime of aluminum-electrolytic bus capacitors with thermal modeling," Cornell Dubilier Capacitors (CDE), Tech. Rep., 2000.
- [19] A. R. Khandebharad, R. B. Dhumale, S. S. Lokhande, and S. D. Lokhande, "Real time remaining useful life prediction of the electrolytic capacitor," in *Proc. of the International Conference on Information Processing (ICIP)*, 2015, pp. 631–636.
- [20] S. G. Parler, "Transient analysis of large-can aluminum electrolytic capacitors," Cornell Dubilier Capacitors (CDE), Tech. Rep., 2015.