

Aluminium-Elektrolytkondensatoren und ihr Leckstrom

Auch wenn sie recht einfach aufgebaut sind, so haben Aluminium-Elektrolytkondensatoren doch ihre Tücken. Ihr Leckstrom zum Beispiel ist ein Thema, mit dem sich Entwickler unbedingt befassen sollten.

ARNE ALBERTSEN, FALKO LADIGES *



Vorsicht, leckt: Solche Aluminium-Elektrolytkondensatoren werden in der Leistungselektronik gebraucht. Aber Vorsicht: wer sich mit ihrem Leckstrom nicht auskennt, kann leicht auf die Nase fallen!

Aluminium-Elektrolytkondensatoren sind ein wichtiger Bestandteil vieler Geräte der Leistungselektronik. Erhöhte Anforderungen an die Energieeffizienz, die expandierende Nutzung erneuerbarer Energie und der stetig wachsende Elektronikanteil im Automobilbau haben die

weite Verbreitung dieser Bauelemente vorangetrieben.

In vielen Applikationen hängen sowohl die Lebensdauer als auch die Zuverlässigkeit des Gerätes direkt von den entsprechenden Parametern der Aluminium-Elektrolytkondensatoren ab.

Der Aufbau von Aluminium-Elektrolytkondensatoren

Aluminium-Elektrolytkondensatoren vereinen Spannungsfestigkeiten von wenigen Volt bis zu ca. 700 V und einen weiten Kapazitätsbereich von 1 µF bis über 1 F bei gleichzeitig kompaktem Aufbau. Eine hoch aufgeraute Anodenfolie aus Aluminium mit einer dünnen Dielektrikumsschicht aus Aluminiumoxid wird dabei vollflächig von einer

passgenauen Kathode, der Elektrolytflüssigkeit, kontaktiert (Bild 1).

Ein elektrochemisches Verfahren mit der Bezeichnung „anodische Oxidation“ bzw. „Formierung“ erzeugt die Dielektrikumsschicht auf der Oberfläche der aufgerauten Anodenfolie. Die Güte der Formierung bzw. Aufbau und Schichtdicke des Dielektrikums sind dabei wesentliche Schlüssel für eine hohe Zuverlässigkeit der Aluminium-Elektrolytkondensatoren im Betrieb. Bild 2 zeigt eine elektronenmikroskopische Aufnahme der Oberfläche einer geätzten Hochvolt-Anodenfolie.

Bild 3 zeigt den Schichtaufbau des Dielektrikums im Querschnitt. Auf die Aluminiumfolie (1) folgt zunächst eine Schicht amorphen Aluminiumoxids (2), der sich eine

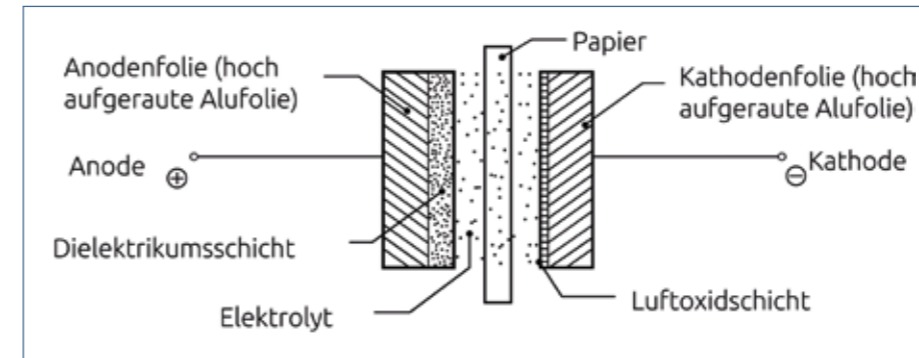


Bild 1: Der innere Aufbau eines Aluminium-Elektrolytkondensators.

kristalline (3) und schließlich eine hydratisierte Schicht (4) anschließen.

Die kompakten Moleküle der amorphen Schicht (2) weisen nur einen losen Verbund auf, d.h. sie haben nur geringe Wechselwirkungen untereinander. Dies ist vorteilhaft, wenn ein durch den Ripplestrom aufgeprägtes Feld sie anregt, denn in diesem Fall wird weniger Wärme dissipiert als bei fester gekoppelten Molekülen. Die „Reibung“ untereinander fällt gering aus.

Die ebenfalls kompakten Moleküle in der kristallinen Schicht (3) sind enger angeordnet und bieten einen guten Isolationswiderstand, der kleine Leckströme begünstigt.

Die großen Moleküle der Hydratschicht (4) lassen sich leicht polarisieren und erzeugen im Wechselfeld relativ viel Reibungsverluste. Bei erhöhter Temperatur lösen sich zudem Wassermoleküle aus der Hydratschicht, was u.a. zu einer Schwächung der kristallinen Schicht (3) und damit zu einem Anstieg des Leckstromes führt.

Ziel ist die Optimierung der Anodenfolien

Ein Ziel bei der Entwicklung von neuen Anodenfolien ist daher auch eine dünnere Hydratschicht bei einer gleichzeitig dickeren

amorphen Schicht. Hersteller Jianghai verfügt dank seiner Strategie der vertikalen Integration über eigene Werke zur Formierung des Anodenmaterials und kann daher die Technologie der Folien optimieren.

Die wichtigsten Ursachen für den Leckstrom

Eine wesentliche Ursache des Leckstromes von Aluminium-Elektrolytkondensatoren sind Fehlstellen im Dielektrikum der Anode. Fehlstellen resultieren z.B. aus Kristallbaufehlern, der Anwesenheit von Fremdatomen in der Aluminium-Basissschicht, mechanischen Spannungsrissen (vom Wickeln), fertigungsbedingten Beschädigungen (Zuschnitt der Folie, genietete Verbindungen mit den Anschlussföhnen) und Anlösungen der Oxidschicht durch den Elektrolyten.

Kleinere Beiträge zum Leckstrom leisten die dielektrische Absorption, Querströme außerhalb des Elko-Wickels sowie Tunneleffekte. In wenigen Minuten an Spannung klingt der Elko-Leckstrom in etwa exponentiell ab und nimmt einen fast konstanten Wert, den Betriebsleckstrom an (Bild 4 (a)).

Der Betriebsleckstrom als Maß für den Formierzustand der Anodenfolie hängt von der

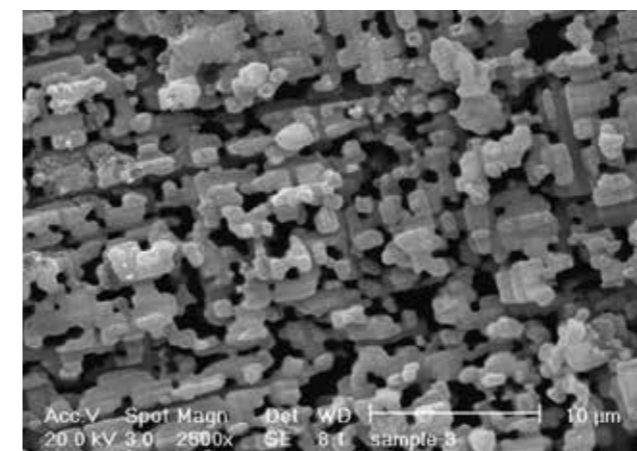


Bild 2: Elektronenmikroskopische Aufnahme der Oberfläche einer geätzten Hochvolt-Anodenfolie.

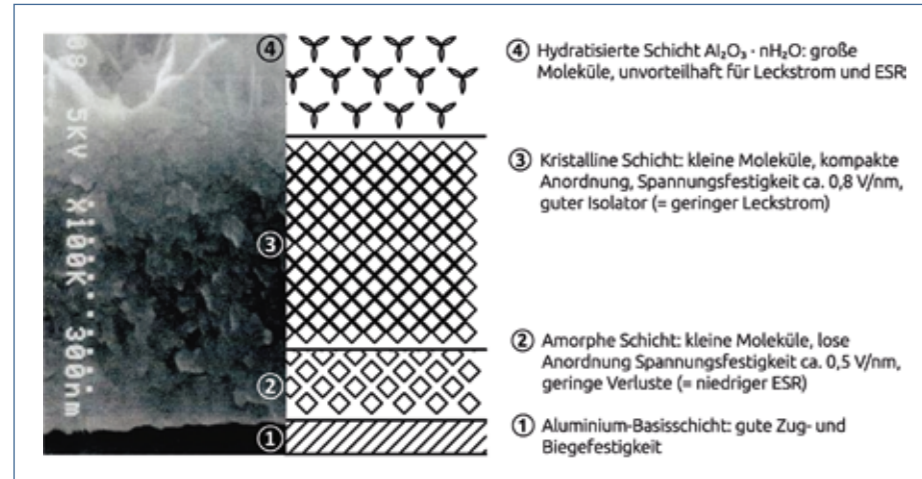


Bild 3: Schichtaufbau des Aluminiumoxid-Dielektrikums eines Hochvolt-Elkos (links: Elektronenmikroskop-Aufnahme, rechts: schematische Darstellung).

Zeit, angelegter Spannung, Temperatur und Vorgesichte des Kondensators ab (Bild 4 (a) bis (c)). Typische Werte des Betriebsleckstromes können ca. 5 bis 15% vom Datenblattwert des Leckstromes betragen und stellen sich in der Regel bereits nach mehreren zehn Minuten kontinuierlichen Betriebs ein.

Lagerung von Aluminium-Elektrolytkondensatoren

Der im Datenblatt spezifizierte Leckstrom soll auch nach längerer, spannungsloser Lagerung eingehalten werden – und hat daher auch einen wesentlich höheren Zahlenwert als der Betriebsleckstrom. In Abhängigkeit von Temperatur und Elektrolyt-Zusammensetzung löst sich die Oxidschicht teilweise mehr oder weniger auf, denn ohne angelegte Spannung kann sich die Oxidschicht nicht regenerieren (Selbstheilung).

Zu Wartungszwecken eingelagerte Geräte sollen daher von Zeit zu Zeit betrieben werden. Die Zeiträume für einen Regenerationsbetrieb hängen von den eingesetzten Alumi-

nium-Elektrolytkondensatoren ab und liegen typischerweise im Bereich von mehreren Jahren.

Bei neuen, noch nicht bestückten und gelöteten Aluminium-Elektrolytkondensatoren empfiehlt Jianghai, einen Zeitraum von zwölf Monaten nach dem Eintreffen beim Endanwender bis zur Verarbeitung und Nutzung nicht zu überschreiten. Eine längere Lagerung kann die Verarbeitbarkeit beim Löteten beeinträchtigen bzw. zu erhöhten Leckströmen beim ersten Betrieb führen. In Abhängigkeit von der Baureihe und den Umgebungsbedingungen bei der Lagerung können längere Lagerdauern individuell vereinbart werden.

Während Niedervolt-Aluminium-Elektrolytkondensatoren (bis 100 V Nennspannung) mit lösemittel-basierten Elektrolytsystemen in der Regel sehr stabil sind, können Hochvolt-Aluminium-Elektrolytkondensatoren (ab 160 V Nennspannung) mit Ethylenglykol-basierten Elektrolyten und insbesondere sogenannte Low ESR-Typen mit wasserhaltigen Elektrolyten einen Anstieg der Leckströme ausprägen.

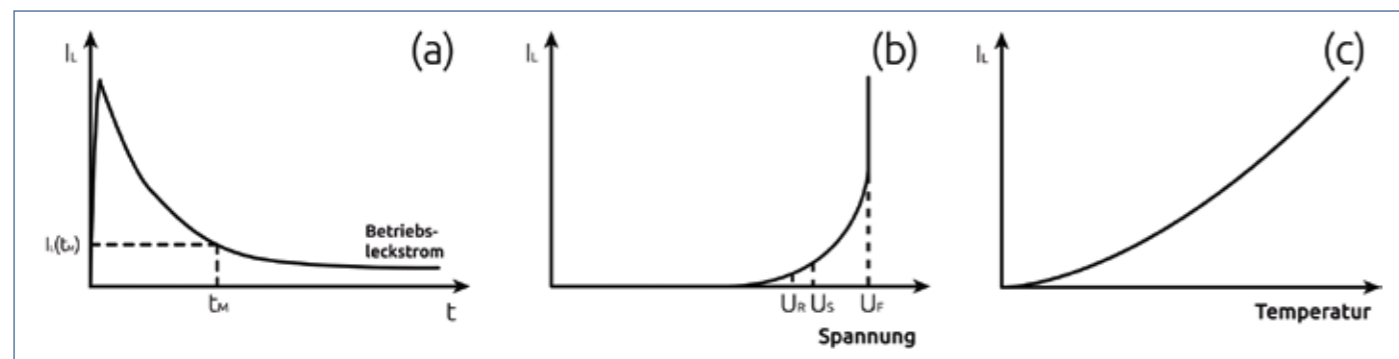


Bild 4: Elko-Leckstrom in Abhängigkeit von (a) Zeit, (b) Spannung und (c) Temperatur.

Ein ca. 15- bis 30-minütiger Betrieb der Aluminium-Elektrolytkondensatoren an einer über Widerstände (Niedervolt: 100 Ω, Hochvolt: 1 kΩ) zugeführten, schrittweise auf Nennspannung erhöhten Spannung kann in diesem Fall eine weitgehende Ausheilung der geschwächten Stellen im Dielektrikum bewirken und den Leckstrom wieder unter den Datenblattwert senken.

Symmetrierung – damit alles in Balance ist

Bei einer Serienschaltung von Aluminium-Elektrolytkondensatoren teilt sich die Spannung im Verhältnis der Isolationswiderstände der Kondensatoren (bzw. im Verhältnis der reziproken Leckströme der Kondensatoren) auf. Um eine gleichmäßige Aufteilung der Spannung zu gewährleisten, sollte der Ruhestrom I_0 durch einen Spannungsteiler aus Widerständen in Bild 5 den (Betriebs-) Leckstrom um ein Mehrfaches übersteigen. Die Verwendung von Aluminium-Elektrolytkondensatoren aus einem Fertigungslos ist dabei vorteilhaft, denn diese weisen in der Regel geringere Abweichungen der Leckströme aus als Aluminium-Elektrolytkondensatoren aus verschiedenen Fertigungslosen. Die Mittelpunktspannung ergibt sich nach:

$$U_m = \frac{(I_{L,C_2} - I_{L,C_1}) \cdot R_B + U_D}{2} \quad (1)$$

Gleichung (1) zeigt, dass die Mittelpunktspannung U_m vom gewünschten Idealwert $U_D/2$ um einen Wert abweicht, der proportional zu dem Widerstandswert und der Leckstromdifferenz verläuft.

Zur Dimensionierung der Symmetrierwiderstände R_B gilt es, einen guten Kompromiss zwischen geringer Verlustleistung und noch akzeptabler Spannungsdifferenz zu finden. Als Schätzwert für die Leckstromdifferenz der Aluminium-Elektrolytkondensatoren bei oberer Kategorietemperatur gilt die Gleichung (2):

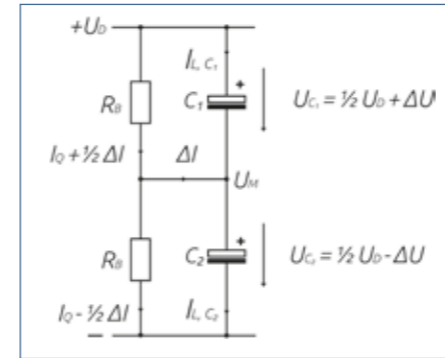


Bild 5: Passive Symmetrierung der Elko-Spannungen mit Widerständen.

$$I_{L,C_2} - I_{L,C_1} = \frac{0,003 \cdot C \cdot U_D}{2000} \left[\frac{mA}{\mu F \cdot V} \right] \quad (2)$$

Auflösen von Gleichung (1) nach R_B und Einsetzen des Terms für $I_{L,C_2} - I_{L,C_1}$ aus (2) ergibt:

$$R_B = \frac{2000 \cdot (2 \cdot U_m - U_D)}{0,003 \cdot C \cdot U_D} [\mu F \cdot k\Omega] \quad (3)$$

Für ideale Symmetrierwiderstände mit identischen Widerstandswerten könnte man die Mittelpunktspannung U_m der Kondensator-Nennspannung gleichsetzen. Reale Widerstände sind jedoch mit einer Toleranz behaftet, so dass auch die Mittelpunktspannung vom Idealwert der halben Zwischenkreisspannung abweicht. Bei einer Toleranz der Widerstandswerte von z.B. ±5% ergibt sich im ungünstigsten Fall eine Abweichung der Mittelpunktspannung vom Idealwert von nahezu 10%. Es empfiehlt sich daher für die Auslegung einer passiven Symmetrierung, eng tolerierte Widerstände zu verwenden und eine Mittelpunktspannung unterhalb der Nennspannung der eingesetzten Aluminium-Elektrolytkondensatoren zu wählen.

Bei einer Parallelschaltung mehrerer Zweige aus in Serie geschalteten Aluminium-Elektrolytkondensatoren ergibt sich zudem noch die Frage nach der Topologie für die Symmetrierschaltung. Sollen alle Zweige einzeln symmetriert werden (Bild 6a) oder aber die Mittelpunkte aller Zweige miteinander verbunden werden und eine zentrale Symmetrierung (Bild 6b) erfolgen – oder sollen die Kondensatoren in Gruppen symmetriert werden (Bild 6c)? Jede dieser Topologien hat spezifische Vor- und Nachteile:

■ **Einzelsymmetrierung:** Ein Vorteil der Einzelsymmetrierung ist, dass bei Ausfall eines Aluminium-Elektrolytkondensators durch Kurzschluss nur ein weiterer Aluminium-Elektrolytkondensator im Zweig des defekten Aluminium-Elektrolytkondensators durch Überspannung beschädigt wird.

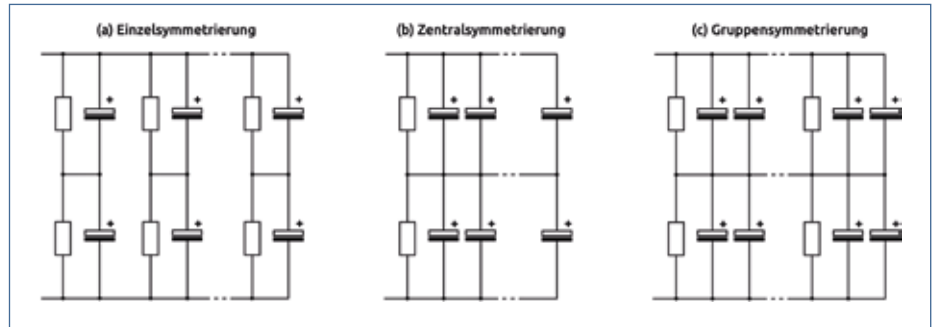


Bild 6: Topologien von passiven Symmetrierschaltungen für Elko-Spannungszwischenkreise.

Die übrigen Aluminium-Elektrolytkondensatoren in der Bank bleiben zunächst unberührt vom Ausfall eines Zweigs der Bank. Von Nachteil ist hingegen ein höherer Schaltungsaufwand mit mehr Widerständen und Verbindungen (und damit einem höheren Platzbedarf und Kosten).

■ **Zentralsymmetrierung:** Vorteilhaft ist, dass sich im stationären Zustand die mittleren Kapazitäts- und Leckstromwerte der oberen und unteren Zwischenkreishälfte aneinander annähern. Es kommen nur zwei Widerstände zum Einsatz, die durch die nahezu gleichen Leckstromwerte von oberer und unterer Zwischenkreishälfte höhere Ohmwerte haben dürfen bzw. sogar wegfallen können. Allerdings hat die Zentralsymmetrierung den Nachteil, dass bei Ausfall eines Aluminium-Elektrolytkondensators durch Kurzschluss mehrere weitere Aluminium-Elektrolytkondensatoren durch Überspannung beschädigt werden können. Zudem erfordert eine gleichmäßige Aufteilung der Ströme auf die einzelnen Zweige eine sorgfältige Leiterführung zu den Kondensator-Anschlüssen sowie eine homogene Umgebungstemperatur im Bereich des Kondensator-Zwischenkreises.

■ **Gruppensymmetrierung:** Bild 6(c) zeigt eine mögliche Kombination aus (a) Einzel- und (b) Gruppensymmetrierung, die Vor- und Nachteile der Einzelvarianten vereint.

Alternativ zur passiven Symmetrierung finden auch Schaltungen zur aktiven Symmetrierung Einzug in die Umrichtertechnik. Das aktive Schaltungskonzept, das z.B. in Kaskode-Spannungsfollower-Topologie ausgeführt werden kann, bietet einige Vorteile:

- Es können Widerstände mit kleineren Verlustleistungen eingesetzt werden,
- Energiekostensparnis über die Betriebsdauer des Umrichters,
- bessere Ausgleichsgenauigkeit im stationären Zustand,
- kostengünstige Lösung.

Ein Nachteil der aktiven Symmetrierung ist jedoch, dass beim Abschalten des Umrich-

ters keine selbsttätige Entladung des Spannungszwischenkreises eintritt. Die sichere Entladung des Zwischenkreises nach dem Abschalten muss daher auf anderem Wege gewährleistet werden.

Ohne Leckstrom keine Selbstheilung

Aluminium-Elektrolytkondensatoren haben konstruktionsbedingt die Besonderheit eines im Betrieb auftretenden Leckstromes, der vor allem für die „Selbstheilung“ sorgt. Der Leckstrom hängt unmittelbar mit dem Aufbau der Dielektrikumsschicht zusammen. Eine nähere Betrachtung der Dielektrikumsschicht zeigt, dass diese aus verschiedenen Schichten von Aluminiumoxid besteht, deren Eigenschaften sich durch eine geeignete Prozessführung beim Formieren des Anodenmaterials vorteilhaft beeinflussen lassen. Bei Aluminium-Elektrolytkondensatoren für anspruchsvolle Anwendungen sind Anbieter wie Jianghai, die über eine eigene Formierung der Anodenfolien verfügen, technisch besser gestellt.

Der Leckstrom hängt ab von der Betriebsdauer, der Betriebsspannung, der Temperatur sowie von der Vorgeschichte des Aluminium-Elektrolytkondensators. Die Dauer einer spannungslosen Lagerung von Aluminium-Elektrolytkondensatoren ist zeitlich begrenzt. Die Streuung der Leckströme von Aluminium-Elektrolytkondensatoren, selbst wenn diese aus demselben Fertigungslos stammen, ist derart hoch, dass sie eine Symmetrierung der Spannungsabfälle über einer Serienschaltung von Aluminium-Elektrolytkondensatoren erfordert.

Die Anwendbarkeit der hier formulierten Modelle und ihrer Ergebnisse hängen im Einzelfall von der Baureihe und der Applikation ab. Daher ist immer eine intensive Projektbegleitung und Bestätigung der Abschätzungen durch den Aluminium-Elektrolytkondensator-Hersteller erforderlich. // TK

WDI