

Lebensdauerbeeinträchtigungen von Geräten durch Ausgleichsströme beim Betrieb im industriellen offenen DC-Netz

M.Sc. Simon Puls, Lenze SE, Deutschland

Dr.-Ing. Johann Austermann, TH OWL, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Holger Borchering, TH OWL, Deutschland

1 Einleitung

Heute bietet Gleichstrom bzw. Gleichspannung gegenüber Wechselspannung weitreichende Vorteile [1]. Im Bereich der Energieversorgung wächst der DC-Anteil stetig und ist teilweise schon Stand der Technik für zum Beispiel Offshore-, Automotive- oder Datacentersysteme. Im Hinblick auf angestrebte Klimaziele bietet dabei insbesondere auch die energieeffiziente Produktion im industriellen Umfeld großes Potenzial: Weniger verlustbehaftete Wandler, leichteres Einbinden von weiteren, regenerativen Energiequellen und Speichern, höhere Ausfallsicherheiten und Spitzenlastreduktion als Teil der Netzdienlichkeit sind einige Vorteile. Außerdem bietet DC im Bereich der Antriebswechselrichter durch den Wegfall von Gleichrichtern automatisch die Möglichkeit der Rückspeisung von Bremsenergie in das Netz.

Durch die DC-Kopplung von Geräten, wie Antriebswechselrichter, können dabei Ausgleichsströme zwischen den einzelnen Zwischenkreisen fließen. Diese dürfen unter keinen Umständen zur vorzeitigen Alterung oder sogar Schädigung von Nachbargeräten führen. Für das Systemkonzept vom Verbundforschungsprojekt und DC-INDUSTRIE werden dazu Verhaltensregeln erforscht und in mehreren verschiedenen Modellanlagen evaluiert [2].

Der Schwerpunkt dieses Beitrags liegt auf leitungsgebundenen Störaussendungen im Frequenzbereich bis 150 kHz, den damit verbundenen Herausforderungen und Möglichkeiten zur Feststellung, sowie zur Lösung. Nach einem kurzen Einblick in DC-INDUSTRIE (ein offenes, herstellerübergreifendes industrielles DC-Netz) wird im Folgenden auf Störaussendungen fokussiert, die zur vorzeitigen Alterung von Bauteilen und damit dem Ausfall von Geräten führen können.

2 DC-INDUSTRIE

Das Konzept von DC-INDUSTRIE [3] besteht darin, industrielle Geräte, wie zum Beispiel elektrische Antriebe, über ein offenes Gleichstromnetz miteinander zu verbinden. Durch die DC-Kopplung kann Bremsenergie ausgetauscht werden und die AC/DC-Wandlung, die bei geregelten Industrieantrieben immer notwendig ist, kann an einem zentralen Punkt zum übergeordneten AC-Netz durchgeführt werden. Durch den Wegfall von unregelmäßigen Gleichrichtern kann der Gesamtwirkungsgrad von Anlagen erhöht werden und die Störaussendung von Oberschwingungen wird deutlich reduziert. Ein weiterer Vorteil von Gleichstromnetzen ist die einfache Kopplung von Speichern und dezentralen Energieerzeugern, beispielsweise Photovoltaikanlagen. Wird das Gleichstromnetz mit intelligentem Netzmanagement gesteuert, kann es flexibel auf Netzspannungsänderungen und Ausfälle reagieren. Das erhöht die Verfügbarkeit der Anlagen.

In Bild 2 ist die beispielhafte Struktur eines offenen industriellen Gleichstromnetzes zu sehen. Die Teilnehmer dieses Gleichstromnetzes sind in Sektoren untergebracht und mit DC-Abzweigen an das Hauptnetz angeschlossen. Die Energieversorgung erfolgt durch einen aktiven Einspeiser (Active Infeed Converter, kurz: AIC) aus dem AC-Netz plus im Netz entstehende Rückspeiseenergie. Anders als bei AC üblich, wird der Energiefluss bei den meisten Teilnehmern bidirektional bereitgestellt. Als zusätzliche Ergänzung können Energiespeicher auch zur Spitzenlastreduzierung eingesetzt werden.

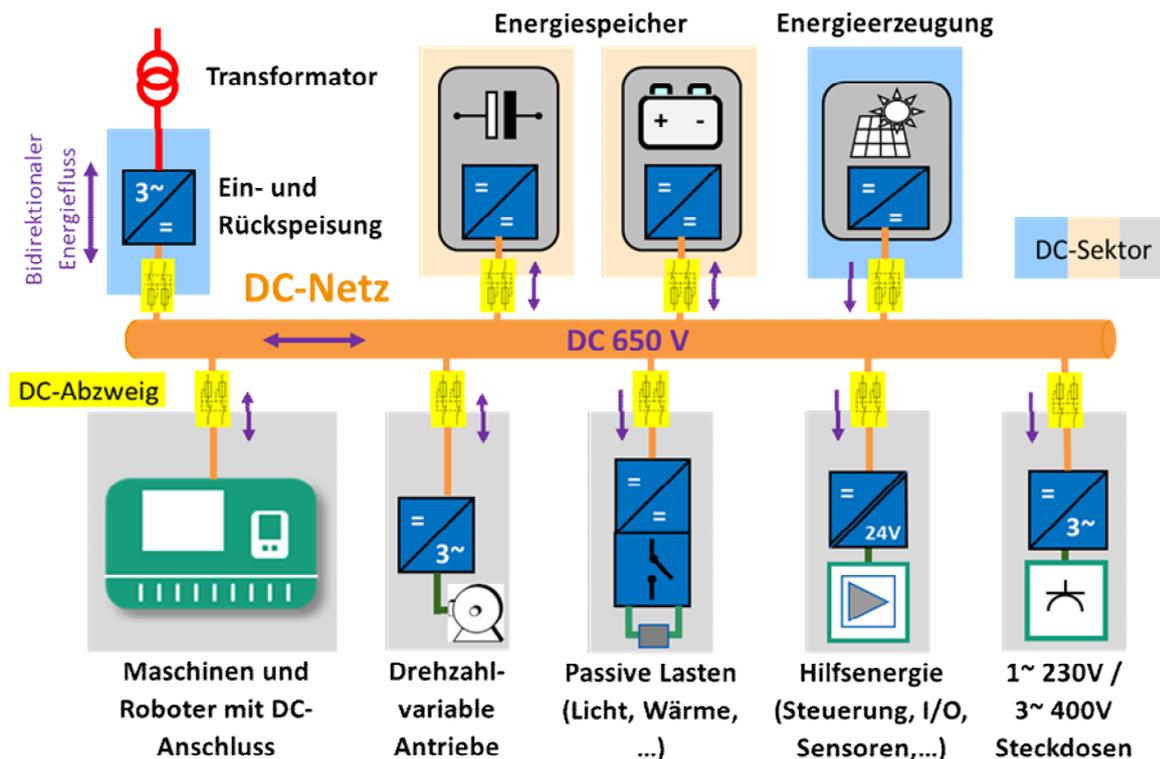


Bild 1: Systemüberblick nach DC-INDUSTRIE für ein offenes industrielles DC-Netz [3]

3 Einsatz von Kondensatoren im Zwischenkreis industrieller Geräte

Der heute übliche Aufbau von industriellen Geräten beinhaltet einen Spannungszwischenkreis, aus dem sich eine taktenden Wandlungsstufe bedient. Das sind bei Antriebswechselrichtern beispielsweise die sechs Halbleiter-Schalter des Wechselrichters zur Bildung des dreiphasigen Drehfeldes für Motoren. Durch das fortwährende und dauerhafte Ein- und Ausschalten der Schalter, heute meist IGBTs, wird ein diskontinuierlicher Strom eingepreßt. Dieser würde im Idealfall vollständig vom Zwischenkreisspeicher in Form von Kondensatoren bedient sodass netzseitig lediglich ein gleichförmiger kontinuierlicher Gleichstrom fließt. Da aus Sicht des Wechselrichters allerdings der Zwischenkreis mit dem Netz parallel ist, teilt sich der Strom abhängig von der jeweiligen Impedanz auf. Ohne den Speicher im Zwischenkreis müsste dieser Aufgabe das Netz nachkommen. Das geht jedoch deshalb nicht, da dessen Impedanz derart groß ist, dass die DC Spannung im Netz durch den eingepreßten Strom des Wechselrichters durch einen überlagerten AC-Anteil wesentlich beeinflusst wird.

$$Z_{\text{Netz}} > Z_{\text{Last}} \quad (1)$$

$$(Z_{\text{Netz}} \parallel Z_{\text{Zwischenkreis}}) \leq Z_{\text{Last}} \quad (2)$$

Für ein Gerät ohne Speicher im Zwischenkreis gilt (1), was mit erheblichen Nachteilen sowohl für den Betrieb des Gerätes als auch für das Netz und andere Netzteilnehmern verbunden ist. Für ein Gerät mit Zwischenkreisspeicher gilt (2). Hier ist die Impedanz der Last Z_{LAST} größer als Impedanz aus der parallelen Netzimpedanz Z_{Netz} und $Z_{\text{Zwischenkreis}}$. Durch diesen Zusammenhang

kann einerseits der Last die benötigte Leistung in vollem Umfang bereitgestellt und andererseits die Wechselbelastung des Netzes verringert werden.

Für den Wechselanteil werden folglich Kondensatoren verschiedener Technologie und Anordnung im Zwischenkreis eingesetzt. Bei industriellen Anwendungen finden dabei vorwiegend Elektrolytkondensatoren große Verwendung aufgrund des geringen Preises und der gegenüber anderen Kondensatorstechnologien großen Kapazität pro Volumen.

3.1 Typischer Aufbau von am DC-Netz betriebenen Antriebswechselrichtern

In industriellen Anlagen sind Antriebe häufig die größten elektrischen Energieverbraucher. Durch den Einsatz von Antriebswechselrichtern können Drehmomente, Drehzahlen und Positionen bedarfsgerecht eingehalten werden. Je nach Bedarf der Anwendung können einfache Wechselrichter für beispielsweise Pumpen bis hin zu Servo-Wechselrichter für hochdynamische und positionsgeregelte Anwendungen eingesetzt werden. Neben dem gesteigerten Funktionsumfang gegenüber AC-Netzmotoren wird ebenso die Energieeffizienz, insbesondere im Teillastbetrieb, erhöht. Außerdem verringern sich mechanische, sowie elektrische Netzurückwirkungen.

Antriebswechselrichter für den Betrieb am DC-Netz sind denen für den Betrieb am AC Netz bis auf den Netzeingang prinzipiell gleich. Neben dem Wechselrichter und dem Zwischenkreis ist weiterhin eine Netzseitige EMV-Filterstufe notwendig. Das gilt insbesondere, wenn die das Netz wie nach DC-INDUSTRIE ein herstelleroffenes ist und Leitungen ohne Schirm eingesetzt werden sollen. Da im Gegensatz zu AC-versorgten Geräten der meist passive Gleichrichter und damit die Gleichrichtung der Netzfrequenz entfällt, entfällt ebenso der zugehörige Nachladestrom. Damit einher geht neben dem Bauraumgewinn inklusive geringerem Kühlbedarf ebenso eine verringerte Belastung der im Zwischenkreis eingesetzten Kondensatoren.

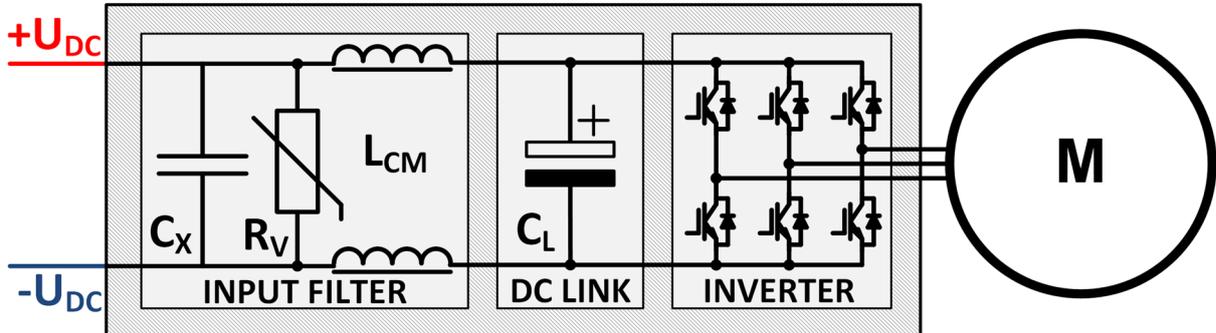


Bild 2: Typischer Antriebswechselrichter für den Betrieb am DC-Netz bestehend aus Netzanschluss, EMV-Filter mit Überspannungsschutz, Kondensator als Zwischenkreisspeicher und sechs IGBTs als Wechselrichter für den Motor (v.l.n.r.)

Das Bild 2 zeigt den typischen Aufbau eines Antriebswechselrichters, welcher am DC-Netz betrieben werden kann. Zur Verringerung von Störaussendungen des taktenden Wechselrichters wird ein eingangsseitiger EMV-Filter eingesetzt. Dieser erhöht die Impedanz des Netzes aus Sicht des Zwischenkreises, vorwiegend durch den Streuanteil der Gleichtaktdrossel, zusätzlich. Der im Zwischenkreis dargestellte Elektrolytkondensator ist symbolisch. Real werden in Zwischenkreisen je nach Betriebsspannung mehrere Kondensatoren seriell und je nach nötiger Kapazität mehrere parallel eingebaut. Durch industrieüblichen Betriebsspannungen im Bereich bis 800 V sind zwei serielle 400 V-Typen üblich. Die notwendige Kapazität hängt vom Strom und damit von der Leistung ab. Ein Wert von 25 $\mu\text{F}/\text{kW}$ nomineller Leistung kann angenommen werden.

3.2 Leitungsgebundene Störaussendungen und relevanter Frequenzbereich

Durch den gleichrichterlosen Anschluss der Geräte an das gemeinsame DC-Netz (vgl. Bild 2) stehen Kondensatoren im gesamten Netz zur Verfügung und können somit auch von netzseitigen Einflüssen belastet werden. Nur Komponenten der elektrischen Infrastruktur (Leitungen, Steckverbinder, ...) und EingangsfILTER der Geräte trennen dessen direkte Verbindung zueinander. Je nach Zusammensetzung der einzelnen Impedanzen wird die mögliche Ausbreitung von Störaussendungen gedämpft [4].

Der die Lebensdauer von Elektrolytkondensatoren beeinträchtigende Frequenzbereich von Ausgleichsströmen liegt im Frequenzbereich bis rund 150 kHz. In Richtung höherer Frequenzen nimmt einerseits die parasitäre Induktivität zu und andererseits sind die Einflüsse des Wechselrichters kaum noch vorhanden. Denn dieser taktet mit einer Grundfrequenz von meist 8 kHz. Amplituden und die damit wirkenden Einflüsse nehmen bei den Vielfachen stark ab. In seltenen Fällen wird mit nur 4 kHz niedriger oder mit maximal 16 kHz höherfrequent geschaltet.

3.3 Alterung von Kondensatoren

Elektrolytkondensatoren, welche häufig Einsatz als Zwischenkreisspeicher finden, altern im Laufe der Zeit. Das bedeutet, dass sich ihre Parameter von den ursprünglich vorgesehenen entfernen.

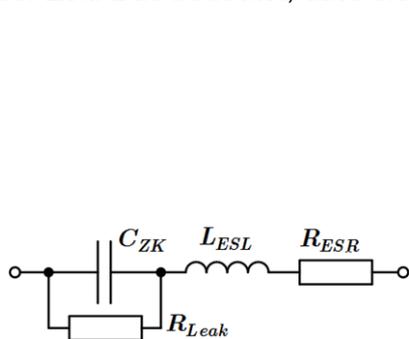


Bild 3: Einfaches Ersatzschaltbild eines Elektrolytkondensators

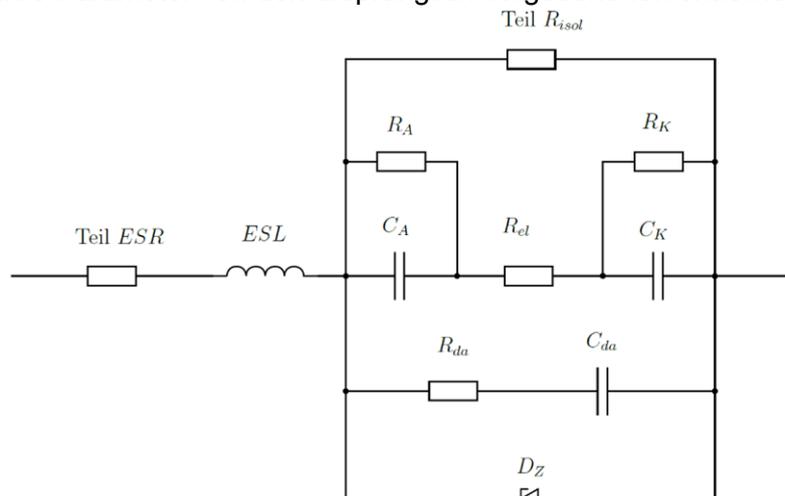


Bild 4: Erweitertes Ersatzschaltbild eines Elektrolytkondensators

Das Bild 3 zeigt ein einfaches elektrisches Ersatzschaltbild eines Elektrolytkondensators. Ein idealer Kondensator C_{ZK} , im Ersatzschaltbild also lediglich aus einer Kapazität bestehend, wird durch die weiteren Komponenten R_{Leak} , L_{ESL} und R_{ESR} beeinflusst [5]. Die Induktivität L_{ESL} wirkt elektrisch dem gewünscht kapazitiven Verhalten des Kondensators entgegen und bestimmt in Richtung höherer Frequenzen die Impedanz des Kondensators maßgeblich. Der Widerstand R_{ESR} führt als ohmscher Beitrag zur frequenzunabhängigen Erhöhung der Impedanz und gleichzeitig bei Stromfluss zur Erwärmung. Über diesen Widerstand fließt bei Wechselstrombelastung des Kondensators jeder Strom. Der Widerstand R_{Leak} repräsentiert den Leckstrom aufgrund nicht idealer Isolation zwischen Anode und Kathode des Kondensators. Dieser wird wegen dessen geringer Wirkung häufig vernachlässigt und fällt auch bei gealterten Kondensatoren kaum ins Gewicht.

Elektrolytkondensatoren sind im Vergleich zu beispielsweise Folienkondensatoren, welche einer Idealen Kapazität wesentlich näher sind, durch ihren inneren Aufbau und den Wirkmechanismen komplex (siehe Bild 4). So bestehen diese in Wirklichkeit aus mehreren Kondensatoren (Anodenkapazität C_A und Kathodenkapazität C_K) und beinhalten sogar chemische Prozesse.

Letztere bedingen grundsätzlich eine Polarität, repräsentiert durch D_z oder den Effekt der dielektrischen Absorption mit R_{da} und C_{da}).

Bei der Alterung von Elektrolytkondensatoren passieren hauptsächlich zwei Dinge: Die wirksame Kapazität C_{ZK} nimmt ab und der Verlustwiderstand in R_{ESR} nimmt zu. Ist die wirksame Kapazität des Kondensators so weit abgesunken, dass diese den von der Applikation geforderten Mindestwert unterschreitet oder ist der Verlustwiderstand soweit gestiegen, dass die wirksame Impedanz den geforderten Maximalwert überschreitet, gilt der Kondensator als defekt. Da mit dem Kondensator das gesamte Gerät ausfällt, besteht die Anforderung, dass die Mindesteigenschaften aller im Gerät verbauten Komponenten bis zur gewünschten Lebensdauer des Gerätes eingehalten werden.

$$L_X = L_0 \cdot \underbrace{2^{\frac{T_0 - T_a}{10k}}}_{Temperature} \cdot \underbrace{K_i \left(1 - \left(\frac{I_a}{I_0}\right)^2\right)^{\frac{\Delta T_0}{10K}}}_{RippleCurrent} \cdot \underbrace{\left(\frac{U_0}{U_a}\right)^n}_{Voltage} \quad (3)$$

$$I_a = \sqrt{\left(\frac{I_1}{F_1}\right)^2 + \left(\frac{I_2}{F_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{I_n}{F_n}\right)^2} \quad (4)$$

Tabelle 1: Parameter von (3) zur Berechnung der Lebensdauer eines Elektrolytkondensators

L_X	resulting lifetime	L_0	nominal lifetime	K_i	safety factor (2 - 4)
I_a	actual ripple current	I_0	nominal ripple current	n	exponent (3 - 5)
T_a	actual ambient temp.	T_0	nominal temperature	ΔT_0	overtemp. core ($\approx 5 - 10$ K)
U_a	actual voltage	U_0	rated voltage		
U_0	rated voltage	U_a	actual voltage		

Mithilfe der in Tabelle 1 angegebenen Parameter besteht mittels (3) eine Möglichkeit zur Berechnung der Lebensdauer eines Elektrolytkondensators. Die Gleichung lässt als Multiplikation die individuelle Berechnung der resultierenden Lebensdauer je nach Belastung zu. Dabei werden als Faktoren zur nominellen Lebensdauer L_0 grundsätzlich die Umgebungstemperatur, der Ripplestrom und die Spannung als Produkt berechnet. Jeder der drei Faktoren bewertet für sich eine Temperaturbelastung, was bedeutet, dass jede Art der Belastung für sich zu einer Erwärmung führt, was die Lebensdauer verkürzt.

4 Messtechnische Ermittlung von lebensdauerbeeinträchtigenden Ausgleichsströmen im industriellen DC-Netz

Die in Kap. 3.3 aufgeführte Berechnungsmöglichkeit zur Lebensdauer mit (3) berücksichtigt mit I_a den Ripplestrom, also den Wechselstrom. Der Strom des Wechselrichters wird dabei mit einer festen Frequenz, beispielsweise 4 oder 8 kHz, und zur Verlustminimierung möglichst rechteckförmig getaktet. Das Frequenzspektrum beinhaltet daher neben der Grundfrequenz zusätzlich Vielfache. Bei der Berechnung muss die Variable I_a (aktueller Ripplestrom) alle Frequenzanteile gewichtet berücksichtigen. Diese Gewichtung ist anhand von (4) zwar möglich

bedingt aber von der Messwerterfassung bis zur numerischen Auswertung einigen Aufwand. Eine schnelle Überprüfung mit direkter Anzeige eines Wertes ist so nicht möglich.

4.1 Referenznetzwerk und Testaufbau

Bei der Ermittlung der Lebensdauer von Geräten stehen hier die Elektrolytkondensatoren im Mittelpunkt. Da diese als Messobjekt eingesetzt durch ihre elektrischen Eigenschaften (vgl. Bild 3 und Bild 4) die Berechnung der Amplituden sowohl in Höhe als auch der Frequenz überflüssig machen, ist hier eine vergleichsweise sehr einfache Messmöglichkeit gegeben.



Bild 5: Gemessener Impedanzverlauf eines typischen Zwischenkreis-Elektrolytkondensators (330 µF)

Das Bild 5 zeigt den frequenzabhängigen Verlauf der Impedanz eines Elektrolytkondensators der 400 V-Klasse im Bereich von 100 Hz bis 40 MHz. Dieser ist ein typisch in Geräten wie Antriebswechselrichtern eingesetzter Kondensator [6].

Wird dieser Kondensator mit einer seriellen Strommessung in ein DC-Netz integriert erfährt der Kondensator die überlagerte AC-Spannung und durch die gegebene Impedanz stellt sich der entsprechende Ripplestrom ein. Der Strom in den Kondensator muss mit ausreichender Bandbreite abgetastet werden, um die wesentlichen Frequenzanteile von taktenden Geräten wie Antriebswechselrichtern zu erfassen (vgl. 3.2). Im Bereich bis rund 100 kHz können dazu bereits qualitativ hochwertige Multimeter mit RMS-Strommessung eingesetzt werden.

Um durch die, durch den Kondensator zusätzlich eingebrachte Kapazität einen Prüfling oder das Netz nicht zu beeinflussen, muss der Kapazitätswert wesentlich kleiner sein als die zu Messende Geräte-Kapazität. Um zusätzlich eine Beeinflussung durch zum Beispiel Alterung beim Messkondensator auszuschließen, kann statt eines Elektrolytkondensators auch ein Folienkondensator mit seriell ohmschem Widerstand eingesetzt werden. Die Serienschaltung führt bei entsprechender Auslegung zu einem vergleichbaren Impedanzverlauf und kann als *Referenznetzwerk* genutzt werden.

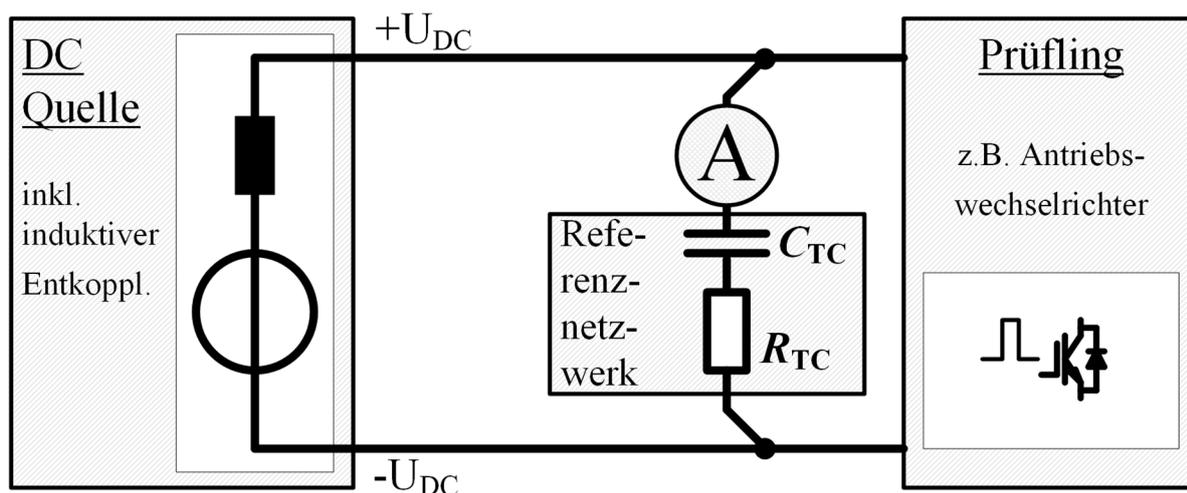


Bild 6: Testaufbau eines DC-Netzes mit DC-Quelle, Referenznetzwerk mit Strommessung und Prüfling [1]

Das Bild 6 zeigt den prinzipiellen Aufbau mit Verwendung des Referenznetzwerkes in einem DC-Netz. Das DC-Netz wird aus einer induktiv entkoppelten DC-Quelle gespeist. Ein Prüfling, zum Beispiel ein Antriebswechselrichter, ist direkt an das DC-Netz angeschlossen und in Betrieb. Das Referenznetzwerk ist mit einer Strommessung, beispielsweise einem Multimeter, ebenfalls an das DC-Netz fest angeschlossen oder lediglich zur Messung kontaktiert. Der sich einstellende Strom kann, unter Berücksichtigung der im Vergleich zum Elektrolytkondensator verringerten Kapazität, direkt zur Beurteilung der Lebensdauer genutzt werden.

Mit $C_{TC} = 1 \mu\text{F}$ und $R_{TC} = 20 \Omega$ im Referenznetzwerk kann so bei einem Strom von $I_{RMS} \leq 40 \text{ mA}$ bei der Vermessung von einem Netzteilnehmer wie in Bild 6 davon ausgegangen werden, dass dieser Prüfling keine Elektrolytkondensatoren in parallelen Geräten überlasten würde. Bei Nutzung dieser Werte im Referenznetzwerk in einem Netz mit mehreren verbundenen Geräten muss der Strom auf 28 mA reduziert werden [7].

5 Zusammenfassung

DC-Netze bieten durch die Verfügbarkeit von hocheffektiven elektronischen Wandlern und prinzipbedingten Eigenschaften, wie einfache Rückspeisung von Bremsenergie in Antrieben, einen großen Nutzen. Durch die Parallelschaltung der Zwischenkreise von Geräten im DC-Netz können sich einzelne Geräte gegenseitig stören und belasten. Insbesondere Elektrolytkondensatoren stehen hier im Fokus, da diese in ihrer Lebensdauer beschränkt sind. Zusätzliche Belastungen durch andere Geräte können zum Ausfall führen, was bei richtiger Auslegung einfach zu umgehen ist. Ebenfalls einfach ist die Ermittlung von möglichen Mehrbelastungen – sowohl für Einzelgeräte als auch für Geräte im Verbund.

Das Paper beschreibt mit Rippelstromeinwirkungen elektrische Einflüsse und dessen Wirksamkeit im Bezug auf Alterung von Elektrolytkondensatoren. Neben der komplexen Messwerterfassung und -auswertung wird gezeigt, wie diese durch den Einsatz eines Referenznetzwerkes auf einfache Weise ersetzt werden kann. Der sichere und verlässliche Betrieb eines industriellen offenen DC-Netzes kann damit in Bezug auf Ausgleichsströme sichergestellt werden.

Danksagung

Das Projekt „DC-INDUSTRIE2“ wird vom deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) mit den Förderkennzeichen 03EI6002A-Q (DC-INDUSTRIE2) gefördert und vom Projektträger Jülich betreut.

Literaturangaben

- [1] H. Borchering, J. Austermann, T. Kuhlmann, B. Weis and A. Leonide, "Concepts for a DC network in industrial production," *2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, 2017, pp. 227-234, doi: 10.1109/ICDCM.2017.8001049. Sauer, Alexander: Die Gleichstromfabrik, Hanser Verlag München, 2020
- [2] Sauer, Alexander: Die Gleichstromfabrik, Hanser Verlag München, 2020
- [3] ZVEI & Konsortium DC-INDUSTRIE2: "Systemkonzept DC-INDUSTRIE2", 04. April 2022: <https://dc-industrie.zvei.org/publikationen/systemkonzept-fuer-dc-industrie2>
- [4] S. Puls, J. Hegerfeld, J. Austermann and H. Borchering, "Transient Overvoltage Protection Solutions for Drive Inverters operating on an Open Industrial DC Grid," *PCIM Europe digital days 2020; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, 2020, pp. 1-8.
- [5] Albertsen: "Elko-Lebensdauerabschätzung", Jianghai EUROPE GmbH, 2009
- [6] EPCOS AG: "Aluminium Electrolytic Capacitors – General technical information", 2016
- [7] S. Puls, J. Austermann and H. Borchering, "Lifetime Calculation for Capacitors in Industrial Micro DC grids," *2019 IEEE Third International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICDCM45535.2019.9232854.