Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 71 (1980)

Heft: 23

Artikel: Kondensatoren für die Energieelektronik

Autor: Kowalkowski, K.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905318

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Kondensatoren für die Energieelektronik

Von K. Kowalkowski

621.319.4

Die verschiedenen Technologien der in der Energieelektronik verwendeten Kondensatoren werden beschrieben, die Selbstheilfähigkeit der MP- und MKV-Technologie wird erwähnt. Anhand von Beispielen wird der Einsatz von Standardbauelementen, aber auch von anwendungsspezifischen optimalen Lösungen gezeigt.

Description des diverses technologies des condensateurs employés en électronique de puissance et mention de l'autorégénération de condensateurs au papier métallisé et de condensateurs multicouches plastiques. Quelques exemples montrent l'emploi de composants normaux, ainsi que des solutions particulières optimales pour emplois spécifiques.

1. Einleitung

In der Bundesrepublik Deutschland sind alle Starkstromkondensatoren in der Norm VDE 0560 Teil 1 bis 12 zusammengefasst und dort in ihrer Anwendung definiert. Für Europa sind von den zuständigen Gremien entsprechende Normen in Vorbereitung[1]). Es handelt sich um Kondensatoren, die in energiereichen Netzen eingesetzt werden und bei denen verhindert werden muss, dass durch nicht vorgesehene Energiezufuhr der Kondensator gefährdet werden kann. Dies kann durch plötzliche Kurzschlüsse oder durch permanente, überhöhte Verluste geschehen. Darüber hinaus sind auch diejenigen Kondensatoren erfasst, bei denen der eigene hohe Energieinhalt ein besonderes Problem darstellt.

In dem hier zu diskutierenden Aufgabenbereich handelt es sich um die Kondensatoren für den Einsatz in der Energieelektronik gemäss VDE 0560 Teil 12. Diese Norm ist derzeit noch Entwurf. Von den in Figur 1 zusammengestellten Anwendungsbereichen von Kondensatoren für die Energieelektronik sollen besonders die Bereiche Bedämpfung, Kommutierung und Stützung behandelt werden.

2. Merkmale der verschiedenen Kondensatortypen

Aufgabe der *Bedämpfungskondensatoren* ist es, Spannungsspitzen zu dämpfen, die entweder aus dem Netz kommen oder in einer Anlage an Induktivitäten, z.B. durch den Trägerspeichereffekt (TSE), verursacht werden. Die spezifischen Belastungen der Kondensatoren sind also Spannungsänderungen (du/dt), die zu hohen Spitzenströmen führen. Spitzenströme und Oberwellen ergeben höhere Verlustleistungen, die den Kondensator erwärmen und somit einen wesentlichen Parameter zur Bestimmung des anzuwendenden Kondensators darstellen.

Kommutierungs- oder *Löschkondensatoren* speichern die Energie, die für die Zwangskommutierung von Thyristoren notwendig ist. Die Einsatzbedingungen und -grenzen für einen Kommutierungskondensator entsprechen im Prinzip denen des Bedämpfungskondensators, nur dass hier üblicherweise die Oberwellenanteile grösser sind und damit die Blind- und Verlustleistung ebenfalls höher liegen (> 100 kVA). Für die Lösung dieser Aufgabe sind die Beherrschung der Effektiv- und Spitzenströme nicht unwesentlich.

Stützkondensatoren arbeiten als Ladungsspeicher und werden primär mit Gleichspannung belastet. Beim Einsatz in Wechselrichtern müssen diese Kondensatoren Spitzenströme abgeben, wodurch diese Belastung Blind- und Verlustleistungen erbringt.

Technologien

Auf dem Markt werden mehrere Technologien zur Lösung dieser Aufgaben angeboten. Die Siemens AG hat sich für die Anwendung von zwei Technologien entschieden:

– bei Stützkondensatoren für metallisierte Papierkondensatoren (MP),

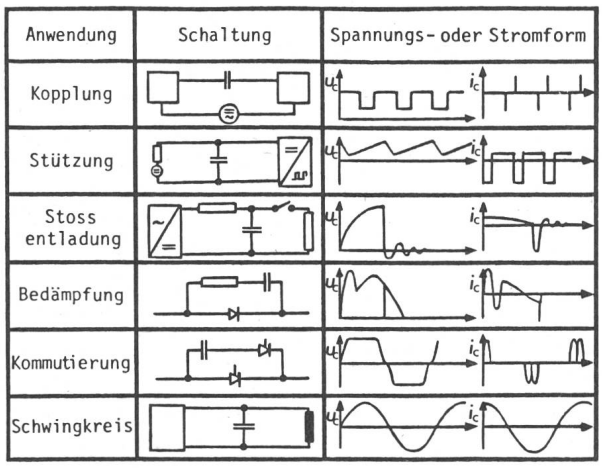

Fig. 1 Kondensatoren der Energieelektronik: Anwendungsübersicht

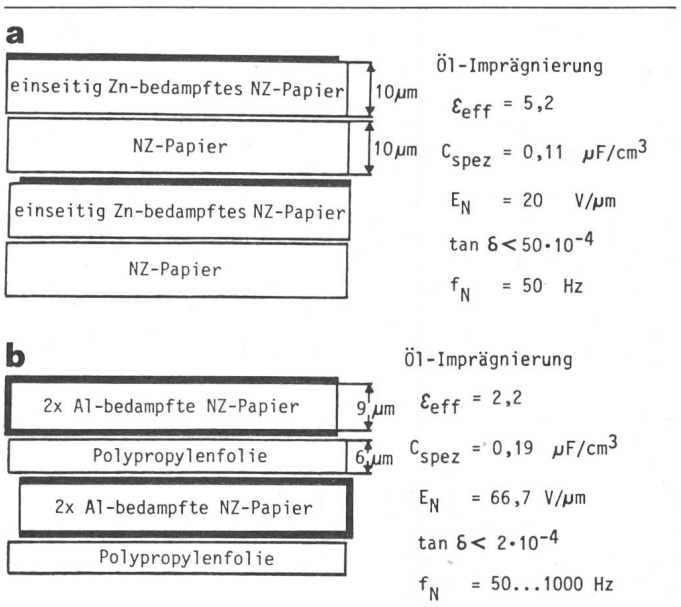

Fig. 2 Aufbau eines MP-Kondensators (a) und eines MKV-Kondensators (b)

[1]) IEC-Normen in der Reihenfolge der Teile von VDE 0560:

1. IEC 70 (1967)	2. IEC 65 (1976)	3. IEC 358 (1971)
4. IEC 70A (1968)	5. keine	6. IEC 566 (1977)
7. IEC 161 (1965)	8. IEC 252 (1975)	9. IEC 110 (1973)
10.–12. keine		

– bei Kommutierungs- und Bedämpfungskondensatoren für metallisierte Papierkondensatoren mit Polypropylen-Dielektrikum (MKV).

In beiden Fällen handelt es sich um selbstheilende Kondensatoren. Wenn auch Technologie und Selbstheilung aus verschiedenen Veröffentlichungen bekannt sind, soll doch nochmals beides in kurzer Form erklärt werden.

In Figur 2a ist der prinzipielle Aufbau eines MP-Kondensators, in Figur 2b derjenige eines MKV-Kondensators dargestellt. Der wesentliche Unterschied ist, dass beim MP-Kondensator das Papier gleichzeitig Träger der Metallisierung und Dielektrikum ist, während beim MKV-Kondensator das Papier nur Träger der Metallisierung ist. Dielektrikum ist hier eine Polypropylenfolie. Ein Vorteil von Metallisierungen gegenüber Metallfolien als Kondensatorbeläge ist, dass Metallisierungen sich bei Durchschlägen selbstheilend verhalten. Einen weiteren Vorteil im Bereich bis etwa 3 kV zeigen die Figuren 3a und 3b. Man sieht deutlich, wie günstig Kondensatoren mit metallisiertem Dielektrikum bezüglich Gewicht und Volumen gegenüber Metallfolien-Kondensatoren sind.

Selbstheilung

Das Prinzip der Selbstheilung ist ebenfalls schon in der Literatur beschrieben [1; 2; 3]. Als Selbstheilung bezeichnet man den Vorgang, bei dem während eines Durchschlages (Fig. 4) im Dielektrikum der über die Durchschlagstelle fliessende Strom den umgebenden Metallbelag verdampft, so dass eine Löschung des Überschlags eintritt. Dabei wird der Strom

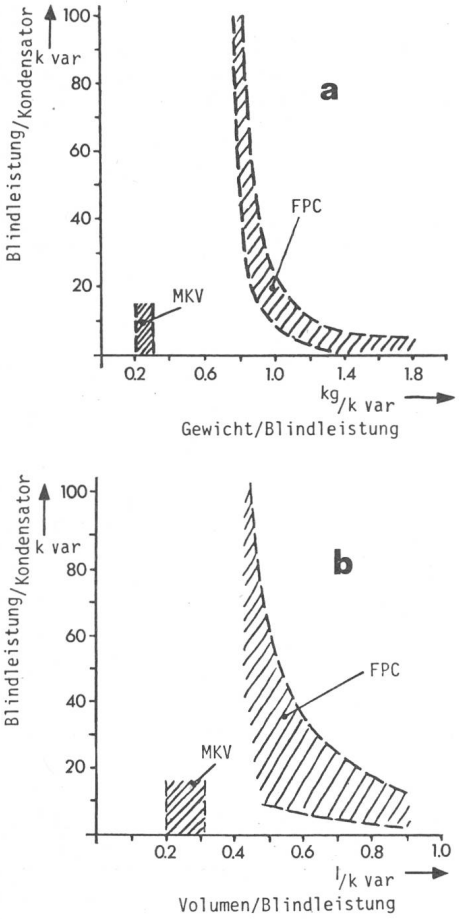

Fig. 3 Vergleich von Kondensatoren mit Folienbelägen (FPC) und metallisierten Belägen (MKV)
a Gewicht b Volumen

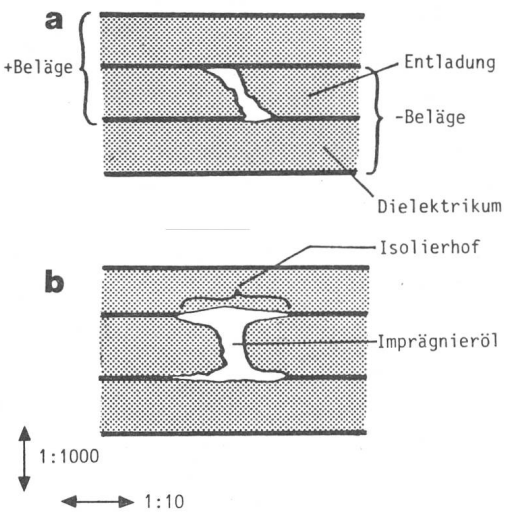

Fig. 4 Selbstheilung
a Beginn des Durchschlages
b Nach dem Durchschlag

durch eine entsprechende Leitfähigkeit der Metallisierung so begrenzt, dass die Absenkung der Spannung am Kondensator praktisch vernachlässigt werden kann (Fig. 5a). Dieser Vorgang ist bei normaler Betriebsspannung und bei Spitzenspannungen bis zum dreifachen Wert der effektiven Nennspannung einwandfrei wirksam. Aus Figur 5b ist die Dauer (1 < µs) und die Spannungsabsenkung während eines Durchschlages ersichtlich. Man kann also sagen, dass durch diesen Durchschlag der Betrieb und die Betriebssicherheit nicht beeinflusst werden. Der durch den Durchschlag entstandene Isolierhof ist so hochohmig, dass der Kondensator wieder absolut spannungsfest ist.

Lebensdauererwartung

Für die Kondensatoren der Energieelektronik werden gemäss DIN 40040 [2]) üblicherweise Anwendungsklassen angegeben, die einer Lebensdauererwartung von 100000 h entsprechen. Darunter wird die Summe aller Zeiten verstanden, in denen der Kondensator an Spannung liegt. Die Auswertung eines der neuesten Dauerversuche bestätigt die zu erwartende Lebensdauer (Fig. 6).

Das listenmässige Spektrum von MP-Gleichspannungs- und MKV-Wechselspannungskondensatoren überstreicht einen Spannungsbereich von 320 V bis 3000 V.

3. Einsatzbeispiele

Um eine bestimmte Aufgabenstellung richtig zu lösen, wird der Techniker immer bemüht sein, sowohl sein Endprodukt als auch die einzelnen Bauelemente zu optimieren, d.h. das jeweils günstigste Verhältnis zwischen Preis und spezieller technischer Forderung zu finden. Dies führt oft zu Sonderbauelementen, ohne die die Forderung nicht erfüllt werden kann. Meist sind dies die interessantesten technischen Lösungen, von denen hier einige vorgestellt werden sollen:

Lokomotive Re 6/6 der SBB, Rekuperationsbremse: Diese Bremse [4] wurde bereits entwickelt, als der allgemeine Trend zur Energieeinsparung noch nicht eingesetzt hatte und auch nicht notwendig war. Die Grundsatzideen der Bremseinrichtung waren: Schonung der Radreifen, Reduzierung des Brems-

[2]) Entspricht etwa IEC 68.

klotzverschleisses, leichte Regelbarkeit, keine zusätzlichen Bremswiderstände, Bremsenergie bis zum Stillstand und nicht zuletzt die Rückgewinnung der Bremsenergie. Das wesentlich neue Moment für die Re 6/6 war ab 1972 die Rekuperationsbremse in Resonanzschaltung. Hier werden die Feldwicklungen der 6 Motoren in Serie geschaltet und bilden mit dem Schwingkreiskondensator einen Parallelresonanzkreis (Fig. 7). In der Vergangenheit war immer ein Motor zur Erregung der restlichen Bremsmotoren notwendig. Durch das Verwenden von MKV-Kondensatoren konnten das notwendige kleine Gewicht und Volumen der 42000 µF grossen Kondensatorbatterie erreicht werden. Die Praxis der Fertigung dieser Kondensatoren zeigte, dass anstelle der ursprünglich berechneten 44 Kondensatoren im Durchschnitt nur 42 benötigt wurden, da der Einzelkondensator nochmals eine um ca. 5% grössere Kapazität aufnehmen konnte.

E-Lok BR 103 der DB, elektrische Widerstandsbremse: Die Höchstgeschwindigkeit von 200 km/h dieser Lokomotive machte eine leistungsfähige elektrische Bremse notwendig, die allerdings nicht unter dem Gesichtspunkt Energierückgewinnung konzipiert wurde, sondern nur unter dem Gesichtspunkt Sicherheit. Um die Radreifen der Lok nicht zu stark zu beanspruchen, tritt bei Betriebsbremsung nur die elektrische Bremse in Aktion. Diese elektrische Bremse bleibt auch bei Ausfall der Fahrleitungsspannung voll funktionsfähig. Hier sind also Kondensatoren notwendig, die nach grösster Zuverlässigkeit innerhalb der Wartungsintervalle ausgelegt sind. Ausser den Kommutierungskondensatoren im Wechselrichter, die dem Listenprogramm entnommen wurden, waren speziell ausgelegte MKV-Kondensatoren als Löschkondensatoren für den Gleichstromumrichter notwendig.

Tram 2000 der Stadt Zürich, Gleichstromsteller: Der Chopper ermöglicht das rucklose Beschleunigen des Fahrzeuges und damit eine bessere Ausnutzung der Adhäsion, was letztlich mehr Komfort für den Fahrgast und geringere Unterhaltskosten für den Betreiber des Fahrzeugparks bedeutet. Durch den Einsatz eines MP-Gleichspannungskondensators als Eingangsfilter im Gleichstromsteller ergaben sich gegenüber der bisherigen Anwendung von Metallfolien-Kondensatoren mit PCB-Imprägnierung wesentliche Volumenvorteile. Dieser

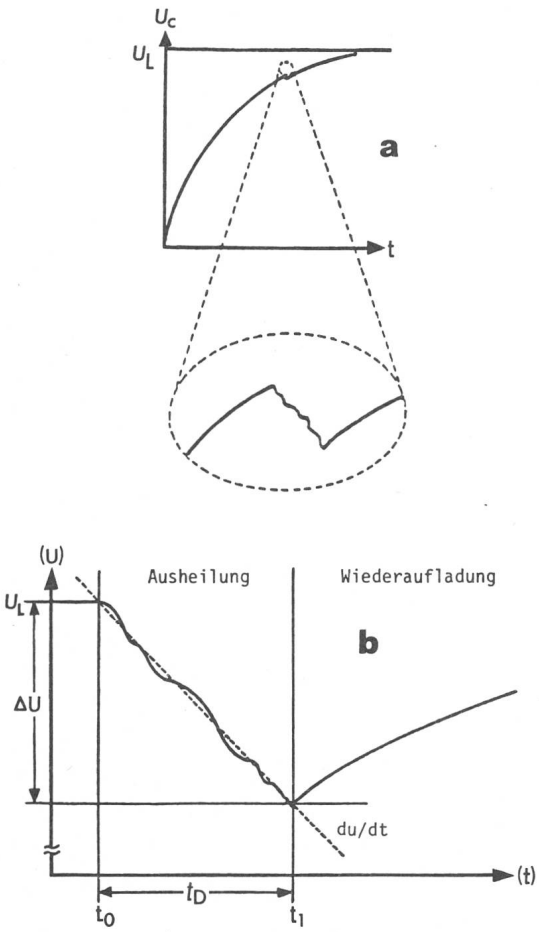

Fig. 5 Zeitlicher Verlauf eines Selbstheilvorganges
a Durchschlag während der Kondensatoraufladung
b Einzelheit des Spannungsverlaufs

$t_D \approx 1...5$ µs
$du/dt \approx 2...4$ V/µs
$\Delta U \approx 2...10$ V

Energieumsatz $W_D = C \cdot U_D \cdot \Delta U$ 0,01...0,05 Ws
Ausbrennhof (mittlerer) Φ_D 3...5 mm
Kapazitätsänderung ΔC 0,1...0,2 nF

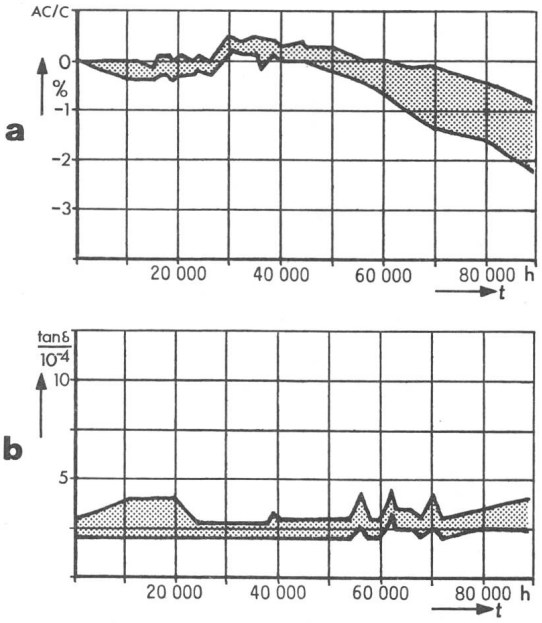

Fig. 6 Lebensdaueruntersuchungen an zehn 5-µF-MKV-Kondensatoren
Versuchsbedingungen 500 V, 50 Hz, +70 C
a Zeitlicher Verlauf der relativen Kapazitätsänderung $\Delta C/C$
b Zeitlicher Verlauf des Verlustfaktors $\tan\delta$

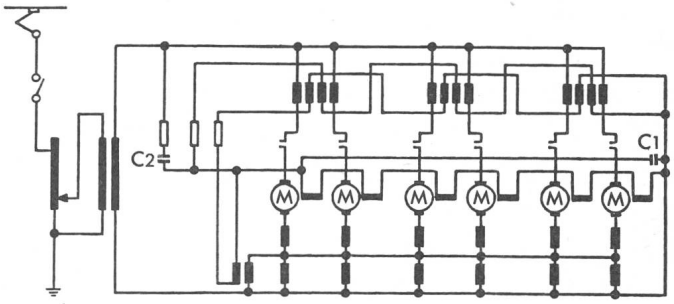

Fig. 7 Prinzipschaltbild der Rekuperationsbremse bei der Re 6/6
C1 Schwingkreiskondensator
C2 Ausgleichskondensator
M Fahrmotor

Sonderkondensator wird im gleichen Chopper auch in den Trolleybussen mit elektronischem Gleichstromsteller eingesetzt. Insgesamt sind seit 1975 etwa 1000 Stück dieser Gleichspannungskondensatoren eingesetzt, was in etwa einer Lebensdauer von $16 \cdot 10^6$ Bauelementestunden entspricht, ohne dass sich irgendeine Beanstandung ergeben hätte. Daraus bestätigt sich die richtige Dimension des Choppers, aber nicht zuletzt auch die des speziellen Filterkondensators.

Hochspannung-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)-Anlagen: Der MKV-Kondensator ist nicht nur wegen seines kleinen Verlustfaktors, sondern auch wegen seiner hohen Betriebszuverlässigkeit prädestiniert, in elektronischen Anlagen eingesetzt zu werden, die, wie eine HGÜ-Anlage, eine Mindestlebensdauer-Erwartung von 25 bis 30 Jahren haben. In der Praxis besteht auch keine Möglichkeit, diese Kondensatoren während des Betriebes auszuwechseln. So entstanden hier speziell abgestimmte Kondensatoren in hochwertiger Bauweise, die in der Zwischenzeit mehr als 10^9 Bauelementestunden ohne Ausfall hinter sich haben.

Unterbrechungsfreie Stromversorgungs- (USV)-Anlagen: Aus der Aufgabe für unterbrechungsfreie Stromversorgungsanlagen ergeben sich auch die Forderungen an die einzelnen Bauelemente. Nachdem Sicherheit und Zuverlässigkeit hier oberste Prämisse sind, müssen auch die eingesetzten Kondensatoren diesen Forderungen entsprechen. So werden nicht nur Bauelemente mit einer Mindestlebensdauer-Erwartung von 100000 h verwendet, sondern auch die notwendigen Gesamtkapazitäten in sinnvolle kleinere Einheiten unterteilt, um die Gesamtanlage bei Ausfall eines Kondensators nicht stillzusetzen. Dies ergab in Verbindung mit der MKV-Technologie wiederum einen speziellen Kondensator. Durch die kleinen dielektrischen Verluste ist eine hohe Packungsdichte möglich, d.h. auch der Raumbedarf ist hier auf ein Minimum eingeschränkt (Fig. 8).

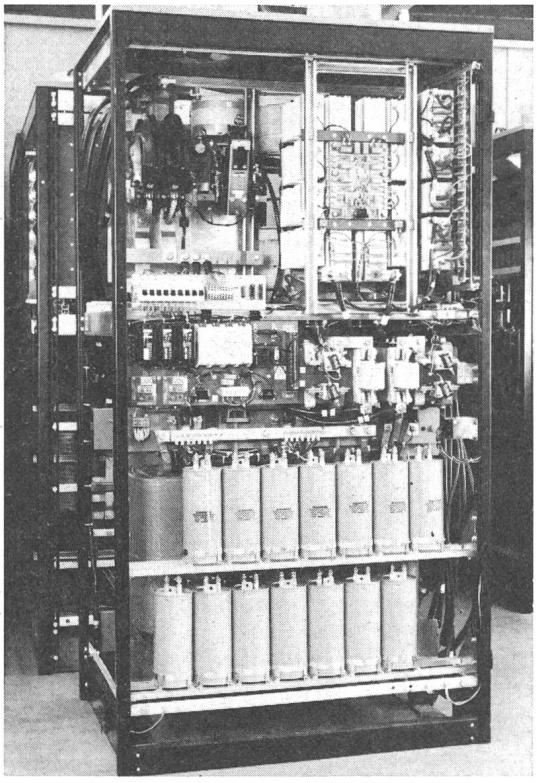

Fig. 8 USV-Anlage, Typ AGIETRONIC

Drehstromantriebstechnik

U-Bahn Helsinki: Die Antriebseinheit dieser U-Bahn ist ein Wechselrichter mit Asynchronmotoren. Auch hier waren insbesondere für die Kommutierung spezielle Kondensatorwerte in bezug auf Spannung und Kapazität notwendig. Für die endgültige Lösung waren bei diesen Kondensatoren die Umweltbedingungen in bezug auf die negativen Temperaturen besonders zu berücksichtigen. Positiv für den Kondensator-Hersteller machten sich das Bemühen des Anwenders in Finnland bemerkbar, möglichst viele der in den U-Bahnwagen eingesetzten Einzelbauelemente auch in Stromrichtern für stationäre Antriebe einzusetzen, obwohl es für den Kondensator zusätzliche Bedingungen einzuhalten galt. Die Optimierung zwischen ökonomischen und technischen Forderungen kann dabei im Einzelfall eventuell zu einem überdimensionierten Kondensator führen.

Dieselelektrische Lokomotive DE 2500 der DB: Mit der Entwicklung dieses Lokomotiv-Prototyps, von denen zwei Exemplare bei der Deutschen Bundesbahn im Einsatz sind, begann 1971 die wesentliche Entwicklung in Deutschland im Bereich der Drehstromantriebstechnik (Fig. 9). Für die seinerzeit konzipierten Stromrichter wurden Sonderkondensatoren festgelegt, die ausser den üblichen mechanischen Forderungen des Fahrbetriebs auch den speziellen technischen Anforderungen an Strom, Spannung, Frequenz und Kapazität entsprachen. Dies war notwendig, um die Bedingungen für Gewicht und Volumen zu erfüllen. Wie richtig diese Entwicklungsrichtung auch auf dem Sektor Kondensatoren war, zeigte die weitere Entwicklung der Triebfahrzeuge über die 6 Einheiten der Ruhrkohle AG für 15 kV/16²/₃ Hz oder 50 Hz bis zur Zweikraftlokomotive für 600 V Gleichspannung und Dieselbetrieb der Duisburger Hafenbahnen.

E-Lok BR 120 der DB: Als konsequente Weiterentwicklung wurde die vierachsige Lokomotive BR 120 mit einer Leistung

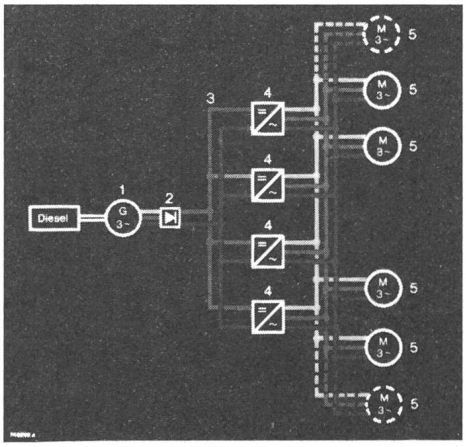

Fig. 9 Prinzipschaltbild der dieselelektrischen Lokomotive DE 2500

von 5600 kW geschaffen. Die erwähnte Entwicklung der Sonderkondensatoren war mit eine wesentliche Voraussetzung, die Lokomotive ohne Überschreitung des zulässigen Achsdruckes und auch des vorgegebenen Volumens zu entwerfen und zu bauen. Als Kommutierungskondensator wird ein MKV-Kondensator, als Glättungskondensator ein MP-Kondensator eingesetzt. Beide Kondensatorentypen stellen im Moment die optimale Lösung bezüglich der divergierenden Forderungen

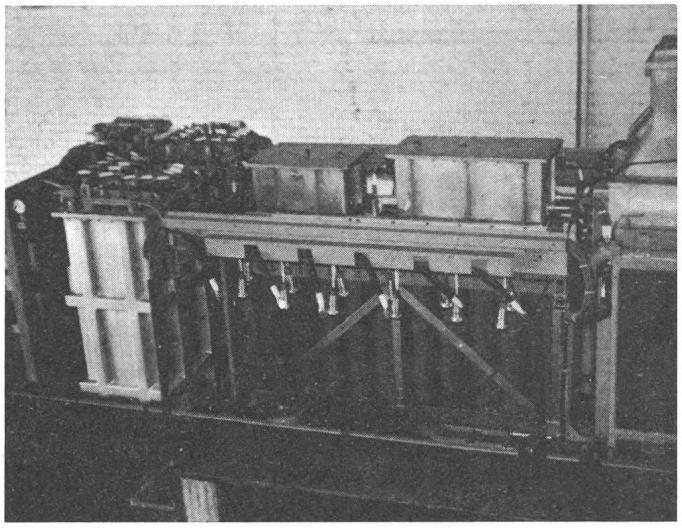

Fig. 10 Gleichstromzwischenkreis für Drehstrom-Wechselrichter der Lokomotive Am 6/6 der SBB
Sichtbar: Gleichspannungskondensatoren 1200 µF/1600 V–; nicht sichtbar rechts im Öltank: Kommutierungskondensatoren 59 µF/2100 V~

nach Leistung pro Volumeneinheit, Lebensdauererwartung und Zuverlässigkeit dar. Diese Lösung war bei allen heute zur Verfügung stehenden Techniken nur mit den erwähnten Bauarten möglich. Neben der Realisierung eines Leistungsfaktors nahe 1 werden die 4-Quadrantensteller auch als Stellglieder für die Nutz- und Widerstandsbremse verwendet. Hieraus ersieht man, wie durch die veränderten Umweltbedingungen nicht nur technische Möglichkeiten an sich akzeptiert werden, sondern nunmehr geradezu gefordert werden. Gemeint ist hier die elektrische Nutzbremsung, die früher nur dort sinnvoll schien, wo ein erheblicher Anteil von Talfahrten zu absolvieren war. Auch dies ist letztlich ein Beitrag der verlustarmen Kondensatoren.

Lokomotiven Am 6/6 und Ee 6/6 der SBB: Eine etwas andere Richtung wegen der besonderen Umweltbedingungen – Kondenswasserbildung bei langen Tunnelfahrten – nahm die Entwicklung in der Schweiz. Bei schaltungstechnisch ähnlich aufgebauten Wechselrichtern wie bei der Lokomotive DE 2500 wurden die Bauelemente, d.h. Leistungsthyristoren und Leistungskondensatoren aufgrund früherer guter Erfahrungen in einen Ölkessel eingebaut (Fig. 10). Auch hier waren die Forderungen nach möglichst kleinem Volumen und Gewicht zu erfüllen. Hinzu kommt noch eine besondere Zuverlässigkeitsforderung, da hier im Schadensfall nur mit sehr grossem Aufwand eine Auswechselung von Bauelementen durchgeführt werden kann.

Die Zuverlässigkeitsforderung des Anwenders von Leistungskondensatoren ist in der Traktionstechnik ohnehin höher zu bewerten als zum Beispiel bei stationären Antrieben. Der Ausfall eines Bauelementes, also z.B. auch eines Kondensators, kann zu elektrischen Betriebsstörungen führen, die einen ganz erheblichen zusätzlichen Kostenaufwand erfordern. Die künftige Entwicklung auf dem Traktionssektor wird auch im Nahverkehrsbereich mehr und mehr die Forderung nach Energieeinsparung einerseits und höherer Leistung andererseits bei gleichem Gewicht und Volumen bringen. Das bedeutet auch für die passiven Bauelemente wie Kondensatoren eine Weiterentwicklung in dieser Richtung.

Literatur

[1] *H. H. Rheindorf:* MKV-Kondensatoren. Siemens Bauteile Information 10(1972)1, S. 18...21.

[2] *R. Behn:* MKV-Kondensator, ein neuer selbstheilender Motor- und Leistungskondensator. Siemens Z. 42(1968)4, S. 233...235.

[3] *H. H. Rheindorf:* MKV-Kondensator. Hochkonstante Metallpapier-Kondensatoren mit Kunststoffdielektrikum für Schwingkreise. Radio Mentor Electronic 38(1972)11, S. 545...547.

[4] *R. Schacher:* Die Rekuperationsbremse der Lokomotiven BOBOBO der Serie Re 6/6 der Schweizerischen Bundesbahnen. Brown Boveri Mitt. 60(1973)12, S. 572...576.

Adresse des Autors

Klaus Kowalkowski, Oberingenieur, Siemens AG, Vertriebsleiter Leistungskondensatoren, Postfach 801 709, D-8000 München 80.