Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 104 (2013)
Heft: 4

Artikel: Aktive Verteiltransformatoren
Autor: Kolar, Johann W. / Ortiz, Gabriel I.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-856474

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: 06.01.2026

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

TECHNOLOGIE **SMART GRID**

Aktive Verteiltransformatoren

Funktion und Einsatzbereiche in künftigen Smart Grids

Transformatoren sind auf allen Spannungsebenen zuverlässige Kernelemente elektrischer Netze. Ihre Spannungs- bzw. Stromübersetzung lässt sich aber nicht kontinuierlich verändern – Spannungsschwankungen werden direkt an die Last und Laststromverzerrungen direkt an das speisende Netz weitergegeben. Zudem brauchen sie viel Platz. Aktive Mittelfrequenz-Verteiltransformatoren mit leistungselektronischen Schnittstellen für Spannungsanpassung, Potenzialtrennung und Leistungsflusssteuerung könnten eine interessante Alternative für künftige Smart Grids darstellen. Auch hybride Lösungen kommen infrage.

Johann W. Kolar und Gabriel I. Ortiz

Energie- und Kosteneffizienz, Sicherheit, Zuverlässigkeit, Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit stellen grundlegende Anforderungen an moderne Energieversorgungssysteme dar. Im Bereich der Stromversorgung ist daher zukünftig auf Verteilnetzebene nicht nur die aus der überlagerten Spannungsebene bezogene Energie zu verteilen, sondern auch eine hohe Zahl kleiner erneuerbarer Quellen zu integrieren. Die damit gegebenenfalls stark schwankenden, bidirektionalen Leistungsflüsse sollen durch die Einbindung von Speichern und den Ersatz bisher passiver Betriebsmittel oder Lasten durch aktive, d.h. steuer- oder regelbare Komponenten und durch eine enge Verknüpfung der Stromversorgung mit Informations- und Kommunikationstechnologie beherrscht werden.

Dieses vielfach als «Smart Grid» bezeichnete Konzept ermöglicht eine detaillierte Erfassung der Leistungsflüsse und über Laststeuerung eine Vermeidung von Last- oder Rückspeisespitzen; zudem kann durch kontinuierliche Regelung der Form und Amplitude der Verbraucherspannung eine hohe Spannungsqualität sichergestellt und durch lokale aktive Filterung eine Ausbreitung von Stromoberschwingungen nichtlinearer Lasten unterbunden oder Grundschwingungsblindleistung kompensiert werden. Darüber hinaus ist eine vorausschauende, z.B. witterungsabhängige Bewirtschaftung elektrischer oder thermischer Speicher möglich. Ausserdem können aus einer höheren Zahl von Lasten, Quellen und Speichern «virtuelle Kraftwerke» gebildet werden, die sich über mehrere Spannungsebenen hinweg z.B. durch Bereitstellung von Blindleistung an der Betriebsführung der Übertragungsnetze beteiligen und neben dem Netzbetrieb auch auf dem Energiemarkt aktiv sein können. Schliesslich ermöglichen solche Zusammenfassungen von Netzbereichen auch die Eingrenzung von Fehlerzuständen und stellen andererseits bei Inselfähigkeit auch unter abnormalen Betriebsbedingungen eine zuverlässige Energieversorgung sicher.

Im Hinblick auf zukünftige Smart Grids ist auch der Funktionsumfang der Koppelelemente zwischen dem Mittel- und dem Niederspannungsnetz – bisher realisiert durch Verteiltransformatoren mit festem, durch das Windungszahlverhältnis definiertem Verhältnis von Primär- und Sekundärspannung, d.h. beschränkt auf Spannungsübersetzung und Potenzialtrennung – wesentlich zu erweitern.

Im Folgenden soll die historische Entwicklung von aktiven Verteiltransformatoren skizziert und eine mögliche moderne Realisierungsform diskutiert und schliesslich hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile bewertet werden.

Konzeptentwicklung und Einsatzbereiche

Ein erstes Konzept eines elektronisch regelbaren Transformators wurde bereits kurz nach Vorliegen abschaltbarer Halbleiterventile im Jahr 1968 in einer Patentanmeldung von General Electric beschrieben [1] und als «Electronic Transformer» bezeichnet. Die netzfrequente Eingangswechselspannung wird dabei durch einen leistungselektronischen Konverter direkt in eine mittelfrequente Wechselspannung umgeformt und diese an die Primärwicklung eines Transformators gelegt. Sekundärseitig tritt dann eine entsprechend dem Windungszahlverhältnis übersetzte Wechselspannung auf, die durch eine synchron zur Primärseite taktende Gleichrichteranordung wieder in eine niederfrequente Spannung zurückverwandelt und durch ein Ausgangsfilter geglättet wird. Über Phasenversetzung der Taktung der primär- und sekundärseitigen Leistungselektronik ist dabei eine Regelung der Spannungsform bzw. -amplitude und damit auch eine Ausgangsstrombegrenzung möglich. Zudem kann durch die Erhöhung der Betriebsfrequenz das Bauvolumen des Transformators gegenüber einer netzfrequenten Ausführung wesentlich verringert bzw. das Gewicht des Systems signifikant gesenkt werden.

Triebfahrzeug-Transformatoren

Diese Vorteile bildeten – neben der breiten Nutzung des Konzepts in Stromversorgungen kleiner Leistung – den Ansatzpunkt für Überlegungen zur Ersetzung des Eingangstransformators von Triebfahrzeugen durch einen elektronischen Trafo, der aufgrund der typisch 16,7 Hz aufweisenden Bahnnetzspannung eine nochmals geringere Leistungsdichte als Netztransformatoren aufweist. Ein erstes solches Konverterkonzept, realisiert mit abschaltbaren Leistungshalbleitern und Thyristoren und DC-Ausgangsspannung, wurde aufbauend auf [1] in [2] vorgeschlagen und in [3] und [4] weiter untersucht; zudem ist hier ein alternatives unidirektionales, in [5] beschriebenes Konzept zu nennen.

Die erste Beschreibung einer modernen, d.h. auf Insulated-Gate-Bipolar-Transistoren (IGBT) basierenden, modularen Realisierung der AC/DC-Eingangsstufe einer Lokomotive findet sich schliesslich 1997 [6] (Bild 1a), wobei hier mit 8 kHz bereits eine relativ hohe Betriebsfrequenz des mit einer Primär- und Sekundärwicklung in Form eines Koaxialkabels ausgeführten Transformators gewählt wurde. Seither haben alle grossen Triebfahrzeughersteller Prototypen

TECHNOLOGIE **SMART GRID**

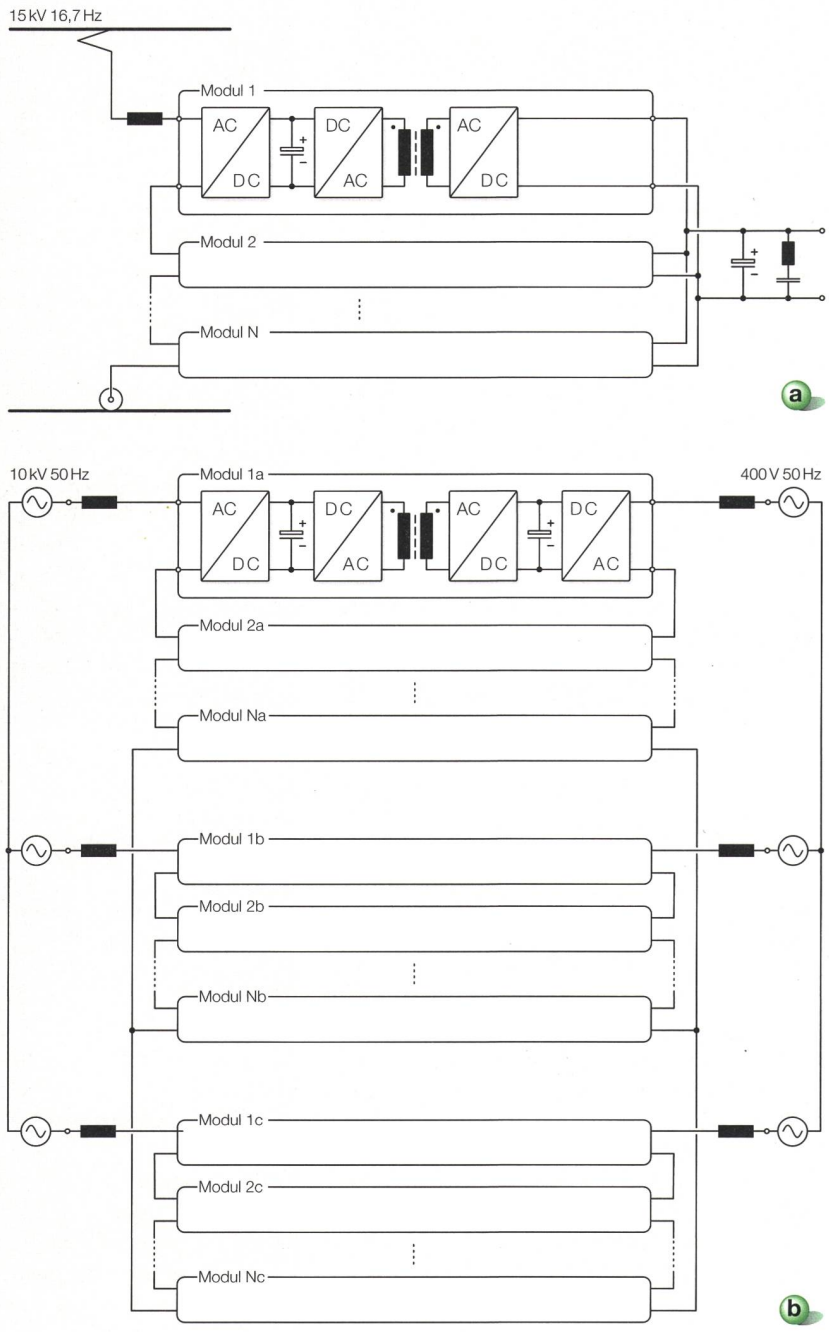


Bild 1 Einsatz von Solid-State-Transformatoren für Triebfahrzeuge (a) oder Netzkopplung (b).

von Eingangsstromrichtern für Lokomotiven mit mittelfrequenter Potenzialtrennung realisiert [7–10]. Neben der Forderung nach geringem Bauraum bzw. flexibler Unterbringung wird diese Entwicklung durch die Forderung nach einer Erhöhung des bei konventionellen Lokomotiven relativ geringen Wirkungsgrades der Eingangsstufe bzw. nach Verringerung des Kühlaufwandes getrieben. Die im Wesentlichen nur durch die Schaltverluste des Stromrichters beschränkte Betriebsfrequenz stellt hier einen sehr vorteilhaft nutzbaren Freiheitsgrad dar.

Stromverteilnetze

Ausser für Triebfahrzeuge wurde die leistungselektronische Wechselspannungskonditionierung, allerdings ohne Potenzialtrennung, bereits 1980 in einer Studie der US Navy für Anwendungen in elektrischen Verteilnetzen in Form eines als «Solid-State-Transformer» (SST) bezeichneten AC/AC-Choppers (Tiefsetzstellers) vorgeschlagen [11]. Im Jahr 1995 wurde dann der Grundgedanke eines elektronisch regelbaren Transformators seitens des US Electric Power Research Institute (EPRI) wieder aufgegriffen und der Einsatz verschiedener Konvertertopologien zur Integration einer hochfrequenten Potenzialtrennung überlegt («Intelligent Universal Transformer» (IUT), [12]). Erst 2001 wurde jedoch, ausgehend von den für Lokomotiven bereits bekannten Schaltungen, erstmals ein tatsächlich für hohe Eingangsspannungen, d.h. für die Kopplung eines Mittelspannungs- und eines Niederspannungsnetzes geeigneter, modularer elektronischer Transformator konzipiert [13] und zeitgleich auch in [14] ein für den temporären Ersatz von Transformatoren in Übertragungsnetzen geeignetes System angegeben (Bild 1b). Seither findet man, wesentlich stimuliert durch die Entwicklung der Idee des Smart Grid, zahllose weitere Forschungsarbeiten von Universitäten und staatlich geförderten Forschungseinrichtungen; das EU-Forschungsprojekt Uniflex-PM (Universal and Flexible Power Management in future electricity networks) [15], das seitens der US National Science Foundation (NSF) über 10 Jahre unterstützte FREEDM Center (Future Renewable Electric Energy Delivery and Management [16]) und Forschungsprogramme des EPRI [17] seien hier als Beispiele genannt. Die verschiedenen Systeme werden in der Literatur oft generell als Solid-State-Transformer, SST, bezeichnet, obwohl diese Bezeichnung ursprünglich auf eine Konverterschaltung ohne Potenzialtrennung bezogen war und daher das Vorliegen eines Mittelfrequenztransformators nicht zum Ausdruck bringt bzw. den irrtümlichen Eindruck einer rein halbleiterbasierten Lösung vermittelt. Ungeachtet dessen soll im Sinne des bereits eingeführten Sprachgebrauchs auch im vorliegenden Artikel der Begriff «SST» für die Bezeichnung von (Dreiphasen-)Mittelspannungs-Niederspannungs-AC/AC-Konvertern mit mittelfrequenter Potenzialtrennung beibehalten werden.

Schaltungsstruktur eines SST

Bei der Realisierung leistungselektronischer Konverter mit Mittelspannungseingang stellt das – bezogen auf die aktuelle maximale Sperrspannungsfestigkeit von IGBTs (6,5 kV) – hohe Spannungsniveau eine wesentliche Schwierigkeit dar. Die Systeme werden daher in Multi-Level-Struktur oder durch Kaskadierung (Serienschaltung) von H-Brücken realisiert. Für Spannungen, die mehr als 3 oder 5 Level erfordern, wird dabei die Kaskadenanordnung aufgrund des Vorteils voller Modularität, welche die Implementierung einer entsprechenden Redundanz und damit eine Erhöhung

TECHNOLOGIE **SMART GRID**

der Zuverlässigkeit erlaubt, bevorzugt (Bild 2).

Es sei hier darauf hingewiesen, dass zahlreiche in der Literatur als Solid-State-Transformer vorgestellte Konvertertopologien, insbesondere Dreiphasen-AC/AC-Matrixkonverter mit Potenzialtrennung, dem Aspekt der Spannungsbelastung keine Rechnung tragen und daher für einen praktischen Einsatz kaum von Bedeutung sind.

Wechselrichter in Form kaskadierter DC/AC-Konvertermodule sind auch von Mittelspannungsantrieben bekannt, wobei dort die DC-Spannungen der Module über Gleichrichter aus getrennten Sekundärwicklungen eines konventionellen niederfrequenten Transformators gespeist werden und z.B. drei in Stern geschaltete Strings von IGBT-H-Brücken die drei an die Maschinenklemmen zu legenden Spannungen bilden. Im Falle des SST wird eingangsseitig (mittelspannungsseitig) ebenfalls eine solche, bei Leistungsfluss von der Mittel- zur Niederspannungsseite als Gleichrichter arbeitende Konverterstruktur vorgesehen. Die Potenzialtrennung und die Energieweitergabe an die Niederspannungsseite erfolgt dann über mittelfrequent betriebene DC/DC-Konverter mit hoher Leistungsdichte. Arbeitet der SST ausgangsseitig an Niederspannung, kann dort die Kaskadierung von H-Brücken entfallen und nur eine selbstgeführte DC/Dreiphasen-AC-Brückenschaltung (Wechselrichterschaltung) mit einem vierten Brückenzweig zur Bildung eines belastbaren Sternpunktes vorgesehen werden. Diese bidirektionale, d.h. für Wechsel- und Gleichrichterbetrieb geeignete Konverterschaltung weist dann eine Zwischenkreis-Gleichspannung auf, die um eine Regelreserve über dem Spitzenwert der Aussenleiterspannung des Niederspannungsnetzes liegt, an die alle Mittelfrequenz-DC/DC-Konverter parallel angeschlossen sind. Diese Art der Verschaltung der Module wird in der Literatur kurz als ISOP-(Input Series Output Parallel)-Verschaltung bezeichnet und wird auch für SST für zukünftige Triebfahrzeuge eingesetzt, wo die Dreiphasen-Wechselrichterschaltung die Fahrmotoren speist.

Aus Redundanzgründen werden vorteilhaft zwei parallele Dreiphasen-Brückenschaltungen vorgesehen; der AC-seitige Filteraufwand kann dann durch phasenversetzte Taktung der Konverter verringert werden.

Der niederspannungsseitige DC-Zwischenkreis bietet sich auch für die Einbindung eines Energiespeichers an, der

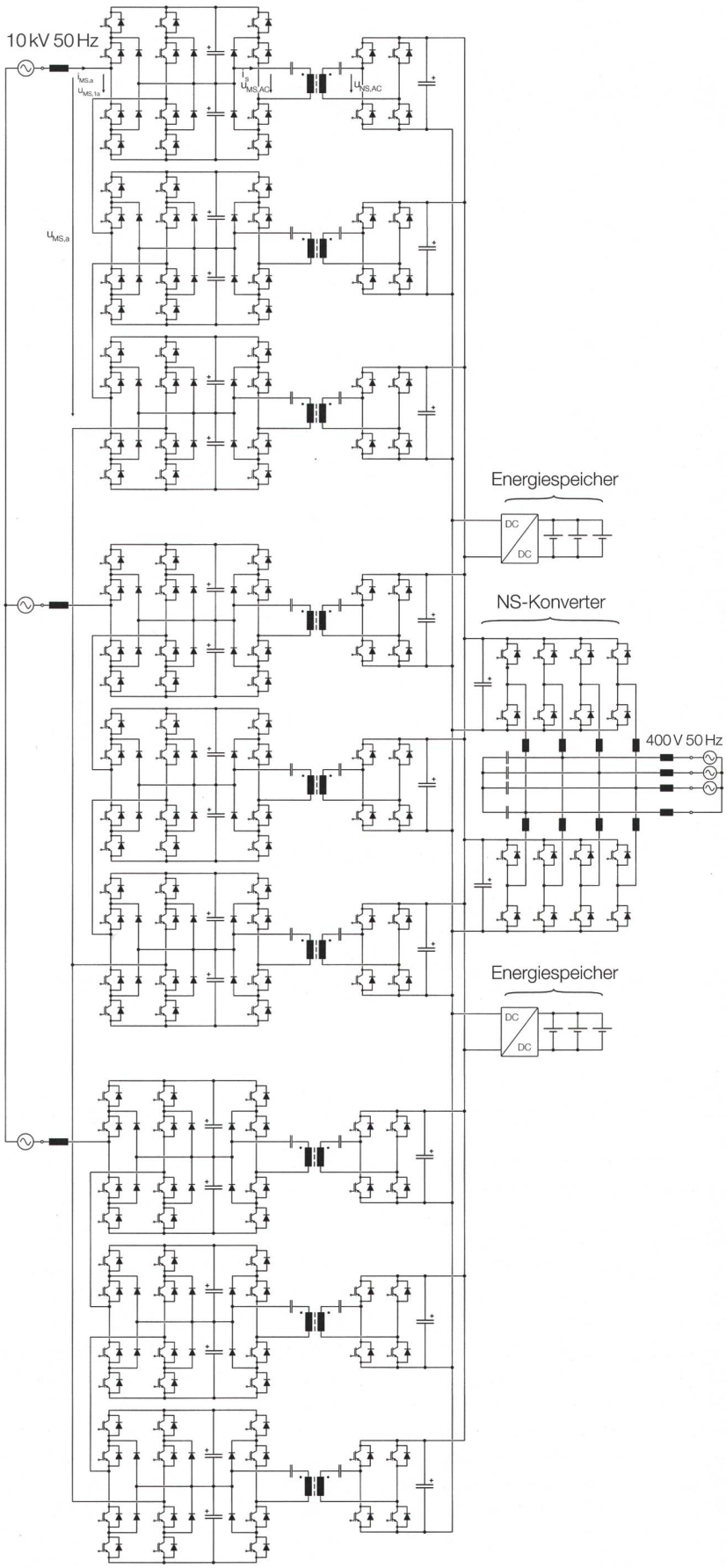


Bild 2 Leistungsteil eines Solid-State-Verteiltransformators (SST).

TECHNOLOGIE **SMART GRID**

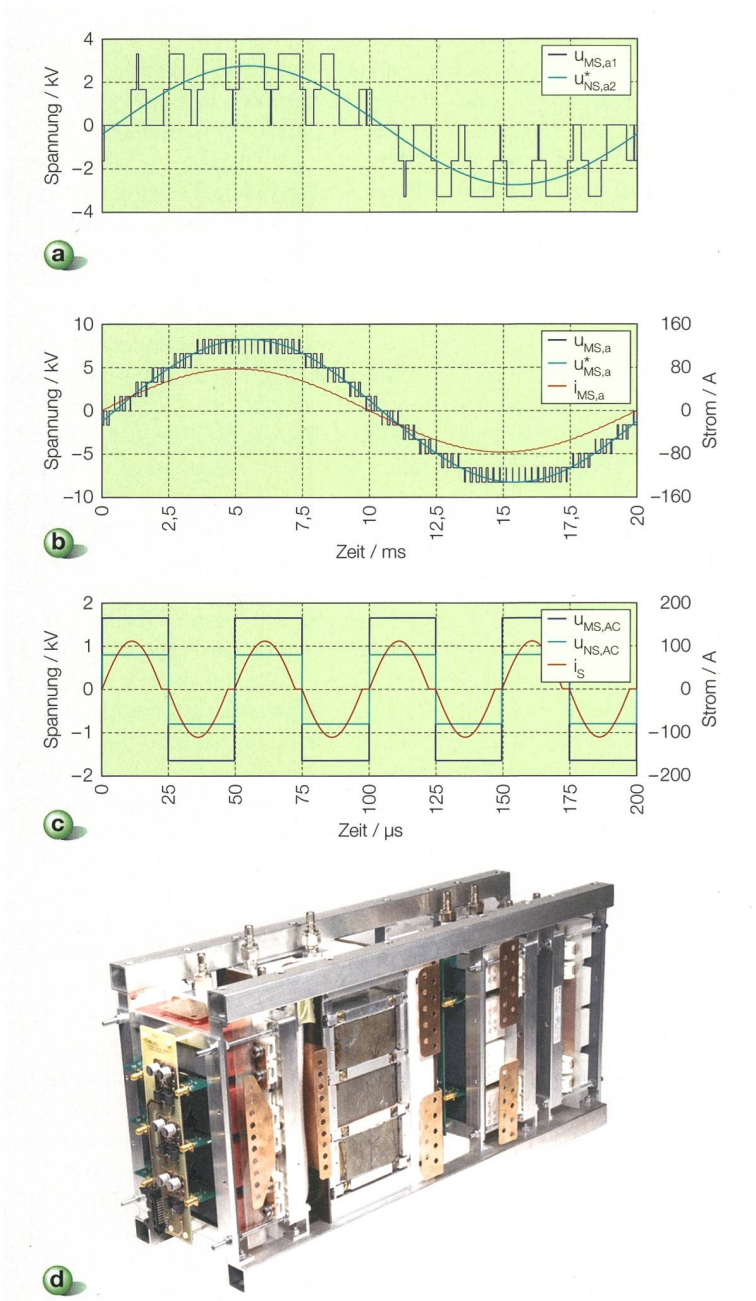


Bild 3 Spannung am Eingang eines AC/DC-Konvertermoduls und Spannungs- und Stromverlauf eines Phasenzweiges des SST sowie eines DC/DC-Konvertermoduls.

bei temporärem Netzausfall eine Weiterführung des Betriebes (Fault Ride Through) bzw. letztlich die Implementierung der Funktion einer unterbrechungsfreien Stromversorgung ermöglicht.

Die Kaskadierung und phasenversetzte Taktung von H-Brücken erzeugt auch bei tiefer Schaltfrequenz des Einzelsystems eine relativ glatte Gesamtspannung bzw. die resultierenden Oberschwingungen werden nach hohen Frequenzen verschoben. Somit muss für die Einhaltung der Vorschriften bzgl. Stromverzerrung auf der Mittelspannungsseite in jeder Phase nur eine Filterinduktivität vorgesehen werden. Zudem kann durch das modulare Konzept die hohe Gesamtleistung in kleine Teilleistungen aufgeteilt und so die Realisierung der Mittelfrequenztransformatoren und die für hohe mittelfrequente Ströme hinsichtlich der Hochfrequenzverluste kritische Verbindungstechnik vereinfacht werden.

Bezüglich Modularität sei angemerkt, dass grundsätzlich auch ein als Modular-Multi-Level-Konverter (MMLC) bezeichnetes Konvertersystem einsetzbar wäre, das ebenfalls eine Kaskadierung von IGBT-H-Brücken aufweisen würde, jedoch nur einen auf die Gesamtleistung ausgelegten Mittelfrequenztransformator [18]. Als Nachteile sind dabei eine insgesamt höhere installierte Schaltleistung der Leistungshalbleiter und eine komplexere Verbindungstechnik zu nennen, allerdings ist die Potenzialtrennung und damit auch die Isolation von Mittel- und Niederspannungsseite nur einmal vorzunehmen bzw. ist in nur einem Transformator konzentriert. Ein klarer Vergleich beider Varianten fehlt bisher; generell zieht man daher die eingangs beschriebene, einfacher herstellbare, voll modulare Lösung vor.

Grundfunktion der Konvertermodule

Für die in **Bild 2** gezeigte Detailstruktur eines SST weist jedes Konvertermodul am mittelspannungsseitigen Eingang eine H-Brücke auf – einen je nach Leistungsflussrichtung in Gleich- oder Wechselrichterfunktion arbeitenden AC/DC-Konverter. Durch die Dreilevelstruktur der Brückenzweige ist z.B. bei Einsatz von IGBTs mit einer Sperrspannungsfestigkeit von 3,3 kV und einer Spannungsausnutzung von 50 % eine Nenngleichspannung von 3,3 kV erreichbar. Diese Gleichspannung wird mittels eines potenzialgetrennten DC/DC-Konverters mit dem niederspannungsseitigen DC-Spannungszwischenkreis (800 V) verbunden. Mittelspannungsseitig ist es vorteilhaft, eine Spannungsverdopplerschaltung mit Dreilevelbrückenzweig einzusetzen. Niederspannungsseitig wird eine Vollbrücke mit 1200 V IGBTs angeordnet, um die Zwischenkreisspannung voll zu nutzen bzw. den Strom in den Leistungshalbleitern für eine definierte zu übertragende Leistung möglichst gering zu halten.

Die DC/DC-Konverterstruktur stellt eine Modifikation einer als «Dual Active Bridge»-(DAB)-Konverter bezeichneten Grundstruktur dar, die primär- und sekundärseitig Rechteckspannungen an den Transformator schaltet, womit sich ein von der Phasendifferenz dieser Spannungen in Verbindung mit der als Längsimpedanz wirksamen Transformator-Streuinduktivität abhängiger Leistungsfluss einstellt. Durch Voreilung oder Nacheilung der Primär- gegenüber der Sekundärspannung kann so auch die Leistungsflussrichtung definiert werden.

Kleinere Schaltverluste

Um die Schaltverluste der IGBTs gering zu halten, ist es vorteilhaft, den DC/DC-Konverter resonant und diskontinu-

TECHNOLOGIE **SMART GRID**

ierlich zu betreiben, d.h. die Grundstruktur des DAB-Konverters wird durch primär- und/oder sekundärseitige Serienkondensatoren erweitert, welche mit der Streuinduktivität des Transformators einen Schwingkreis bilden. Innerhalb jeder Schalthalbperiode wird so stets nur eine Stromhalbschwingung übertragen. Das Ein- und Ausschalten der Leistungstransistoren erfolgt damit stromlos, und die Schaltverlustleistung kann gegenüber hartem Schalten erheblich reduziert werden. So werden Schaltfrequenzen von über 10 kHz möglich, die eine kompakte Realisierung des Trafos (limitiert durch die Isolationsanforderung und Kühlung) ermöglichen bzw. ein hörbares magnetisches Betriebsgeräusch vermeiden, da die zweifache Schaltfrequenz (Flussdichtemaxima) oberhalb der Hörschwelle zu liegen kommt.

Wie eine genauere Analyse zeigt, weist ein solcher, mit Halbschwingungspulsen betriebener Resonanzkonverter unabhängig von der Höhe und Richtung des Leistungsflusses ein näherungsweise konstantes Spannungsübersetzungsverhältnis auf. Der Konverter kann daher in erster Näherung als «DC-Transformator» betrachtet werden. Dies vereinfacht die Spannungsregelung des Gesamtkonverters.

In Bild 3a und 3b ist die Spannung am Eingang eines AC/DC-Konvertermoduls ($u_{MS,a1}$) und die durch die drei Konverter eines Phasenstrings gebildete Spannung ($u_{MS,a}$) in Verbindung mit der jeweiligen Grundschwingung ($u_{MS,a1}^*$ bzw. $u_{MS,a}^*$) gezeigt. Die Gesamtspannung approximiert trotz der relativ geringen Schaltfrequenz des Einzelsystems sehr gut einen sinusförmigen Verlauf, sodass eine Filterinduktivität relativ geringer Baugrösse ausreicht, um die resultierenden Stromoberschwingungen bzw. den Rippel des Phasenstroms $i_{MS,a}$ zu begrenzen. Bild 3c zeigt die Primär- und Sekundärspannung, $u_{MS,AC}$ und $u_{NS,AC}$, eines mit 20 kHz arbeitenden resonanten DC/DC-Konverters und des resultierenden Sekundärstroms. Ein an der Professur für Leistungselektronik und Messtechnik der ETH Zürich realisiertes wassergekühltes 160-kW-Labormuster des Systems (Bild 3d) weist eine Leistungsdichte von rund 4 kW/l und eine Effizienz im Nennpunkt von fast 99 % auf [19].

Neben der vorstehend beschriebenen Modulstruktur und Betriebsweise sind auch Konzepte mit einer Zusammenfassung des mittelspannungsseitigen AC/DC-Konverters und des mittelspannungsseitigen Teils des DC/DC-Konverters denkbar [20]. Die mittelfrequente Spannung an der Transformator-Sekundärwicklung wird dann durch einen Einphasen-AC/AC-Matrixkonverter direkt zu der gewünschten netzfrequenten Moduleingangsspannung $u_{MS,a1}$ zusammengesetzt. Allerdings bedingt dies den Einsatz von Halbleiterkombinationen, die nicht in Modulbauform erhältlich sind. Ausserdem erlaubt es keine Reduktion der Halbleiterzahl, und eine klare Definition der (transienten) Sperrspannungsbelastung durch einen Stützkondensator ist nicht gegeben. Diesbezügliche Überlegungen sind daher eher von theoretischem Interesse. Praktisch wären vielmehr unidirektionale, d.h. auf eine Leistungslieferung von der Mittelspannungs- auf die Niederspannungsseite begrenzte Ausführungsformen interessant, die eine signifikante Verringerung der Komplexität bzw. Halbleiterzahl erlauben würden.

Regelung

Ein SST weist aufgrund der mittel- und niederspannungsseitigen leistungselektronischen Schnittstellen eine hohe Funktionalität auf. Insbesondere ist durch den niederspannungsseitigen DC-Zwischenkreis eine bezüglich Frequenz vollständige und bezüglich Pulsationen des Leistungstransfers weitgehende Entkopplung gegeben. Bei Einbindung eines Speichers kann eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) mit «aktivem» Mittelspannungsanschluss realisiert werden.

Für die Regelung des Systems muss zwischen dem Transfer von Leistung bei mittel- und niederspannungsseitig eingeprägter Spannung und dem Inselbetrieb, d.h. bei Nutzung der USV-Funktion, unterschieden werden.

Für USV-Betrieb bzw. bei niederspannungsseitiger Kopplung mit einer Lastgruppe oder einer Quelle (z.B. PV-Anlage) über eine Stichleitung wird die Regelung wie für kommerzielle USV implementiert. Im Gegensatz zu konventionellen passiven Transformatoren ist dann eine Spannungsamplitude so einstellbar, dass beispielsweise das Problem einer zu starken Spannungsanhebung am Ende der Stichleitung bei massiver Einspeisung von PV-Energie vermieden wird. Zudem kann die Frequenz der Lastseite grundsätzlich frei gewählt und die Gleichspannung des niederspannungsseitigen Speichers direkt über einen separaten Ausgang zur Verfügung gestellt oder an ein lokales DC-Netz angekoppelt werden. Bei der Einspeisung von PV-Energie kann damit die DC/AC-Konverterstufe aufseiten der PV-Anlage entfallen. Es wird nur noch die für das Maximum-Power-Point-Tracking ohnehin vorgesehene DC/DC-Konverterstufe benötigt und es resultiert eine höhere Effizienz bzw. ein geringerer Realisierungsaufwand.

Beim Betrieb zwischen zwei Netzen werden ausgehend von der zu transferierenden elektrischen Leistung die mittel- und niederspannungsseitig einzuprägenden Ströme unter Berücksichtigung der jeweiligen Spannung ermittelt und durch entsprechende Aussteuerung der AC/DC-Konverterstufen und der DC/Dreiphasen-AC-Konverterstufe eingestellt. Hierbei müssen die niederspannungsseitige DC-Zwischenkreisspannung und die DC-Spannungen der Konvertermodule (im Mittel) auf einem vorgegebenen Sollwert gehalten werden. Da die DC/DC-Konverterstufen wie erwähnt eine näherungsweise leistungsunabhängige, konstante Spannungsübersetzung aufweisen, reicht dabei die Regelung der DC-Zwischenkreisspannung aus; eine spezielle Symmetrierung der Modul-Zwischenkreisspannungen ist nicht nötig. Weicht z.B. bei Leistungsfluss von der Mittelspannungs- zur Niederspannungsseite die DC-Spannung von ihrem Sollwert ab, wird durch Änderung der Aussteuerung der H-Brücken die mittelspannungsseitig aufgenommene Leistung verändert, sodass letztlich der gewünschte Leistungstransfer auf die Niederspannungsseite erfolgt. Bei umgekehrter Leistungsflussrichtung wird entsprechend die niederspannungsseitige Leistungsaufnahme angepasst.

Weitere Funktionen

Neben dieser auf die Strom- bzw. Spannungsgrundschwingung bzw. den Wirkleistungsfluss bezogenen Funktion ist eine Vielzahl weiterer Funktionen, wie z.B. die mittel- oder niederspannungsseitige Blindleistungsbereitstellung (für symmetrische Dreiphasensysteme summieren sich die Phasenblindleistungen in jedem Zeitpunkt zu null), die aktive Filterung von Stromoberschwingungen nichtlinearer Lasten, die Schieflastsymmetrierung oder auch die Strombegrenzung im Fehlerfall, implementierbar.

Hybride Verteiltransformatoren

Wie Bild 2 zeigt, weist ein SST eine relativ hohe Komplexität bzw. eine hohe Zahl von Halbleitermodulen und Ansteuerschaltungen und zudem zahlreiche Mess- und Schutzvorrichtungen sowie eine komplexe digitale Signalverarbeitung zur Generierung der Ansteuerbefehle bzw.

TECHNOLOGIE **SMART GRID**

zur Regelung des Gesamtsystems auf. Die Sicherstellung einer mit einem passiven Verteiltransformator vergleichbaren Zuverlässigkeit stellt damit eine wesentliche Herausforderung dar. Sie ist nur über eine entsprechend konservative Dimensionierung, beispielsweise durch geringe Spannungsausnutzung der Leistungshalbleiter und eine die Amplitude von Schwankungen der Sperrschichttemperatur gering haltende thermische Dimensionierung bzw. durch redundante Module in Verbindung mit entsprechenden Schutzkonzepten möglich. Eine weitere Herausforderung ist die Überlastfestigkeit.

Reduktion der Komplexität

Die Komplexität und die Kosten, die vor allem durch die hohe Betriebsspannung und die hohe umzuformende Leistung bedingt sind, lassen sich durch Beschränkung der leistungselektronischen Konversion auf einen Teil (typ. 20–30 %) der Durchgangsleistung reduzieren. Dieses «Partial-Power-Konzept» [22] führt zu einem «hybriden Verteiltransformator» [23], wobei der Stromrichterteil z.B. die Aufgabe eines aktiven Filters übernimmt (Bild 4a, 4b). Das in Bild 4b gezeigte Konzept erlaubt eine freie Wahl der Betriebsspannung des Stromrichters; für die Anordnung nach Bild 4c ist eine Regelung der Ausgangsspannung (Amplitude und Zeitverlauf) über Einkopplung einer Serienspannung möglich. Hier ist anzumerken, dass eine elektronische Spannungsstellung grundsätzlich auch mittels «Electronic Tap Changer» [23] möglich wäre, worauf hier jedoch nicht näher eingegangen werden soll. Ausserdem ist eine Kombination von Filter- und Spannungsregelfunktion möglich (Bild 4d). Durch Einbindung eines Batteriespeichers kann dann auch eine Stützung der Verbraucherspannung bei Netzausfall erfolgen bzw. ein Energiemanagement eines Netzteils (vielfach als Micro-, Nano- oder Picogrid bezeichnet [24]) realisiert bzw. ein relativ glattes Profil der Leistungsaufnahme oder -abgabe erreicht werden.

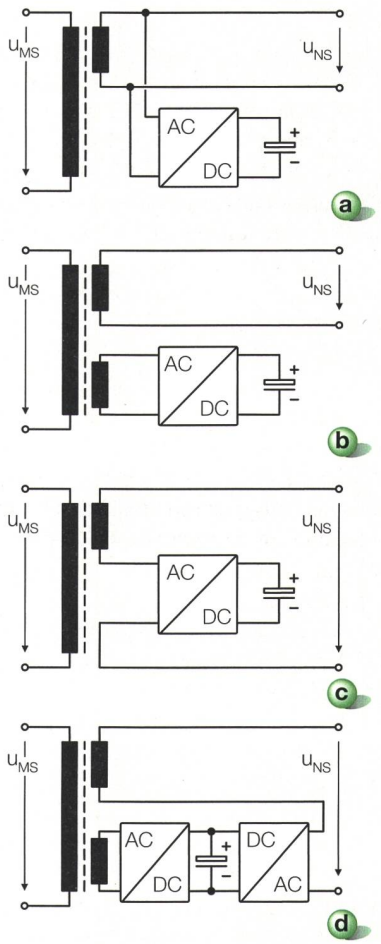
Hybride Verteiltransformatoren vereinen die Hauptvorteile passiver Transformatoren – Einfachheit, Überlastfestigkeit, Zuverlässigkeit, hoher Wirkungsgrad und relativ geringe Kosten – mit den Vorteilen leistungselektronischer Energieumformung, ohne deren Nachteile (hohe Komplexität und Kosten sowie relativ geringer Wirkungsgrad) voll in Kauf nehmen zu müssen. Der Stromrichterteil kann ohne Potenzialtrennung realisiert werden. Der Wirkungsgrad des Gesamtsystems wird durch den Stromrichter nicht massgeblich vermindert, da der Hauptteil der Leistung nach wie vor durch den passiven Transformator übertragen wird. Als Nachteil bleibt ein weiterhin hohes Bauvolumen des Systems. Für die Umsetzung eines Smart-Grid-Konzepts ist daher davon auszugehen, dass hybride Verteiltransformatoren die erste Stufe einer Erweiterung der Funktion bisher passiver Betriebsmittel des Verteilnetzes darstellen werden. Voll leistungselektronische SST-Konzepte, die heute einen vergleichsweise tiefen Wirkungsgrad von 96–97 % aufweisen und damit deutlich unter der Energieeffizienz von Verteiltransformatoren liegen (Wirkungsgrade ja nach Bauleistung von 98,5–99 % und höher), dürften erst mittelfristig und nach Abschluss von derzeit auf breiter Front laufenden Forschungsarbeiten eingesetzt werden. Im Zuge dieser Arbeiten werden z.B. an der ETH Zürich [19] im Rahmen des Forschungsschwerpunktes «Smart Grid Power Electronics Technologies»

- mögliche Konvertertopologien und Modulations- und Regelverfahren,
- die Minimierung der Hochfrequenzverluste von Mittelfrequenztransformatoren hoher Leistung,
- fortschrittliche Kühlverfahren für magnetische Komponenten sowie
- die optimale Levelzahl von kaskadierten H-Brücken unter Rücksicht auf einen Kompromiss zwischen Effizienz, Baugrösse und Zuverlässigkeit und
- Fragen der Isolationsbeanspruchung bei DC-Spannungen mit überlagerter mittelfrequenter Komponente sowie
- kapazitive Erd(stör)ströme kaskadierter Konverter

untersucht.

Abschliessend sei angemerkt, dass für die Eingangsstufe in Triebfahrzeugen oder auch bei der Energieverteilung in Schiffen oder zukünftig in Flugzeugen eine grundsätzlich andere Situation als für Netz-Verteiltransformatoren vorliegt. Für mobile Anwendungen ist der Funktionsraum meist extrem beschränkt, und auch das Gewicht ist vielfach besonders kritisch. Die Spezifikationen zukünftiger Systeme können dort nur durch Übergang auf mittelfrequente Potenzialtrennung erreicht werden.

In jedem Fall sind potenzialgetrennte Hochleistungskonverter in direkter oder hybrider Form als Kerntechnologie moderner Energieverteilsysteme zu sehen, deren Anwendungsfeld sich künftig bei kostengünstiger Verfügbarkeit schnell



Bilder: ETH Zürich

Bild 4 Schematisierte Darstellung der Grundkonzepte hybrider Verteiltransformatoren.

schaltender unipolarer SiC-Leistungshalbleiterelemente mit ohmscher Durchlasscharakteristik und Sperrspannungsfestigkeiten von 1,7 kV oder 3,3 kV wesentlich erweitern wird. Über Parallelschaltung einer hinreichenden Anzahl von Halbleiterchips bzw. durch Einsatz von Modulen hoher Stromtragfähigkeit sind dann Gesamtwirkungsgrade von 99 % erreichbar. Hierbei ist jedoch eine Neukonzeption des gesamten Energieverteilnetzes im Sinne des Smart Grid, d.h. auch eine Modifikation bzw. Anpassung der Schutztechnik, wichtig, da ein Betrieb eines SST mit heutigen Schutzelementen wie z.B. Sicherungen, zu deren Auslösung im Fehlerfall temporär sehr hohe Ströme erforderlich sind, eine massive Überdimensionierung der Leistungshalbleiter erfordern würde und damit wirtschaftlich keinesfalls möglich wäre.

Referenzen

[1] W. Mc Murray, «Power Conversion Circuit having a High Frequency Link», US Patent Application US3.517.300 (angemeldet: 16. April 1968).

TECHNOLOGIE **SMART GRID**

[2] H. Mennicken, «Stromrichtersystem mit Wechselspannungszwischenkreis und seine Anwendung in der Traktionstechnik», Ph.D. Thesis, RWTH Aachen, Deutschland, 1978.

[3] S. Östlund, «Reduction of Transformer Rated Power and Line Current Harmonics in a Primary Switched Converter System for Traction Applications», Proc. of the European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), S. 112–119 (1993).

[4] S. Norrga, «A Soft-Switched Bi-Directional Isolated AC/DC Converter for AC-Fed Railway Propulsion Applications», Proc. Power Electronics, Machines and Drives, S. 433–438 (2002).

[5] H. Weiss, «Elimination of the 16 $^2/_3$ Hz 15 kV Main Transformer of Electrical Traction Vehicles», Proc. of the European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), S. 5.83–5.88 (1985).

[6] M. Steiner, «Seriengeschaltete Gleichspannungszwischenkreisumrichter in Traktionsanwendungen am Wechselspannungsfahrdraht», Ph.D. Thesis No. 13753, ETH Zürich.

[7] M. Steiner and H. Reinold, «Medium Frequency Topology in Railway Applications», Proc. of the European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), S. 1–10 (2007).

[8] B. Engel, M. Victor, G. Bachmann, and A. Falk, «Power Electronics Technologies for Railway Vehicles», Proc. of the Power Conversion Conference, S. 1388–1393 (2007).

[9] J. Weigel, A. Nagel, and H. Hoffmann, «High Voltage IGBTs in Medium Frequency Traction Power Supply», Proc. of the European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), S. 1–10 (2009).

[10] C. Zhao, S. Lewdeni-Schmid, J.K. Steinke, and M. Weiss, «Design, Implementation and Performance of a Modular Power Electronic Transformer (PET) for Railway Application», Proc. of the European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), S. 1–10 (2011).

[11] J.L. Brooks, «Solid State Transformer Concept Development», Final Report Naval Construction Battalion Center, Port Hueneme, April (1980).

[12] S. Srinivasan, and G. Venkataramanan, «Comparative Evaluation of PWM AC-AC Converters», in Proc. of the Power Electronics Specialists Conference (PESC), S. 529–535 (1995).

[13] L. Heinemann, and G. Mauthe, «The Universal Power Electronics Based Distribution Transformer», Proc. of the Power Electronics Specialists Conf. (PESC), S. 504–509 (2001).

[14] H. Wrede, V. Staudt, and A. Steimel, «Design of an Electronic Power Transformer», Proc. of the Annual Conference of the Ind. Electr. Society (IECON), Vol. 2, S. 1380–1385 (2002).

[15] A.J. Watson, HQS Dang, G. Mondal, J.C. Clare, and P.W. Wheeler, «Experimental Implementation of a Multilevel Converter for Power System Integration», Proc. of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), S. 2232–2238 (2009).

[16] A. Huang, M.L. Crow, G.T. Heydt, J.P. Zheng, and S.J. Dale, «The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System: The Energy Internet», Proc. of the IEEE, Vol. 99, No. 1, S. 133–148 (2011).

[17] J.S. Lai, A. Maitra, A. Mansoor, and F. Goodman, «Multilevel Intelligent Universal Transformer for Medium Voltage Application», Proc. of the IEEE Industry Appl. Society Annual Meeting (IAS), S. 1893–1899 (2005).

[18] M. Glinka and R. Marquardt, «A New Single-Phase AC/AC-Multilevel Converter for Traction Vehicles Operating on AC Line Voltage», Proc. of the European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), S. 1–6 (2003).

[19] J.W. Kolar and G.I. Ortiz, «Solid State Transformer Concepts in Traction and Smart Grid Applications», Tutorial at the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012.

[20] H.J. Cha and P.N. Enjeti, «A Three-Phase AC/AC High-Frequency Link Matrix Converter for VSFC Applications», Proc. of the IEEE Power Electr. Specialists Conf. (PESC), Vol. 4, S. 1971–1976 (2003)

[21] J. W. Kolar, F. Krismer, Y. Lobsiger, J. Mühlethaler, T. Nussbaumer, and J. Miniböck, «Extreme Efficiency Power Electronics», Proc. of the Intern. Conf. of Integrated Power Electronics Systems (CIPS), 2012.

[22] S. Bala, D. Das, E. Aeloiza, A. Maitra, and S. Rajagopalan, «Hybrid Distribution Transformer: Concept Development and Field Distribution», Proc. of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), S. 4061–4068 (2012).

[23] P. Bauer, S.W.H. de Haan, and G.C. Paap, «Electronic Tap Changer for 10 kV Distribution Transformer», Proc. of the European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), S. 1010–1015 (1997).

[24] D. Borojevic, I. Cvetkovic, D. Dong, R. Burgos, F. Wang, and F.C. Lee, «Future Electronic Power Distribution Systems – A Contemplative View», Proc. of the Intern. Conf. on Optimization of Electr. and Electronic Equipment (OPTIM), S. 1369–1380 (2010).

Résumé

Transformateurs de distribution actifs

Fonction et domaines d'application dans les futurs smart grids

Les transformateurs sont des éléments centraux des réseaux électriques, et ce, sur l'ensemble des niveaux de tension. Ils sont caractérisés par une solidité et une fiabilité élevées. Cependant, aucune influence continue n'est possible sur le rapport de transformation en tension et en courant. Les distorsions du courant sous charge sont donc directement transmises au niveau de tension suivant, tout comme les chutes de tension d'alimentation sont immédiatement ressenties au niveau des consommateurs. De plus, les courants élevés générés en cas de court-circuit et les dimensions relativement importantes des transformateurs en fonction de la fréquence constituent un désavantage.

C'est pourquoi, dans les futurs smart grids, des transformateurs de distribution moyenne fréquence actifs, munis d'interfaces d'électronique de puissance aussi bien à l'entrée qu'à la sortie, pourraient être utilisés. L'adaptation de la tension, la séparation de potentiel et le transfert d'énergie s'effectuant via des transformateurs moyenne fréquence, il est possible de réaliser un filtrage actif des oscillations harmoniques du courant sous charge, une régulation de la tension des consommateurs et une limitation des courants de court-circuit, avec un volume de construction relativement faible. Ces systèmes sont toutefois complexes, chers et produisent des pertes relativement élevées. Il convient donc de réfléchir avec soin à leur utilisation. Un compromis sous la forme d'un transformateur de distribution hybride peut être approprié dans certains cas. No

Angaben zu den Autoren

Johann W. Kolar, Prof. Dr., ist seit 2001 Vorstand der Professur für Leistungselektronik und Messtechnik (Power Electronic Systems Laboratory) der ETH Zürich.
ETH Zürich, 8092 Zürich, kolar@lem.ee.ethz.ch

Gabriel I. Ortiz, M.Sc., ist Doktorand der Professur für Leistungselektronik und Messtechnik.
ortiz@lem.ee.thz.ch

Anzeige

Grafik _ Corporate Design _ Buch
Typografie _ Illustration _ Konzepte
Webdesign _ Design Beratung

Pia Thür _ Visuelle Gestaltung
Hardturmstrasse 261 _ 8005 Zürich
Tel 044 563 86 76 _ Fax 044 563 86 86
piathuer@gmx.ch _ www.piathuer.ch