

Gleichstromnetze für kommerziell genutzte Gebäude

Durch zentrale Gleichrichter und eine Elektrizitätsverteilung mit Gleichspannung können in Gebäuden Kosten für Schaltnetzteile reduziert und die Effizienz der Nutzung lokaler regenerativer Energien gesteigert werden. Die Netzstabilität im umgebenden Drehstromnetz kann durch aktive Blindleistungsregelung am zentralen Gleichrichter verbessert werden.

Von Ulrich Böke, Dr. Roland Weiss, Peter Meckler und Leopold Ott

Die Schonung fossiler Energiereserven und die Reduzierung von Treibhausgas-Emissionen erfordern unter anderem energieeffizientere Gebäude, die in Europa derzeit für etwa 40 % des Energieverbrauchs verantwortlich sind. Die Europäische Kommission hat 2010 im Artikel 9 der Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden festgelegt, dass neue Gebäude ab 2018 beziehungsweise 2021 nur noch als Nullenergiegebäude zugelassen werden sollen [1]. Besonders energieeffiziente Gebäude werden häufig nur noch mit Elektrizität versorgt werden [2]; mitunter deshalb, weil diese sich besonders gut regeln lässt [3]. Zur Regelung der elektrischen Leistung werden Leistungselektroniken verwendet, die überwiegend mit Gleichspannung (DC) versorgt werden. Beispiele hierfür sind drehzahlregelte Antriebe in Wärmepumpen und Lüftungsanlagen sowie Vorschaltgeräte für die Beleuchtungstechnik. All diese Anwendungen werden heute aus einem Niederspannungsdrehstromnetz (AC) versorgt (Bild 1). Daher enthalten diese Anlagen Gleichrichter, um die benötigten internen Versorgungsgleichspannungen bereitzustellen. Gleichzeitig werden Gebäude immer häufiger mit Solarenergieanlagen ausgerüstet, deren Solarzellen zunächst ebenfalls Gleichstrom erzeugen. Die Drehstromverteilung in Gebäuden erfordert hierbei zunächst das Umwandeln des Solarstroms in Drehstrom, bevor dieser Drehstrom oder Wechselstrom wieder

in eine Gleichspannung umgewandelt wird.

Diese verlustbehafteten Umwandlungen von Gleichstrom in Drehstrom und umgekehrt können reduziert werden, wenn Elektrizität für fest installierte Anwendungen mit einem Gleichstromnetz transportiert wird (Bild 2). Die elektrischen Anwendungen wer-

den dabei – je nach Leistung – entweder an eine einphasige Gleichspannung von 380 V oder an eine zweiphasige Gleichspannung von 760 V angeschlossen. Eine „Phasen“-Gleichspannung von 380 V ist vorteilhaft, weil diese Spannung bereits heute in vielen Anwendungen intern verwendet wird. In Europa liegt eine Phasen-Gleichspannung von 380 V etwas oberhalb der maximalen Netzspannungsamplitude von 358 V ($110 \% \times \sqrt{2} \times 230 \text{ V}$) (Bild 3).

Bei einer Gleichstromverteilung mit zentralem Gleichrichter übernehmen ein oder mehrere zentral angeordnete, bidirektionale AC/DC-Konverter die Schnittstelle zum bestehenden Niederspannungsnetz. Auf diese Weise werden zwei unterschiedliche technische Herausforderungen der Zukunft gelöst.

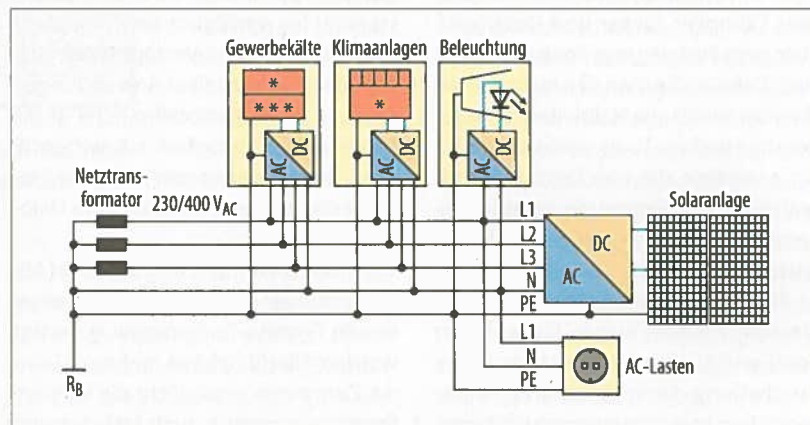


Bild 1. Stand der Technik zur Verteilung elektrischer Energie in kommerziell genutzten Gebäuden.

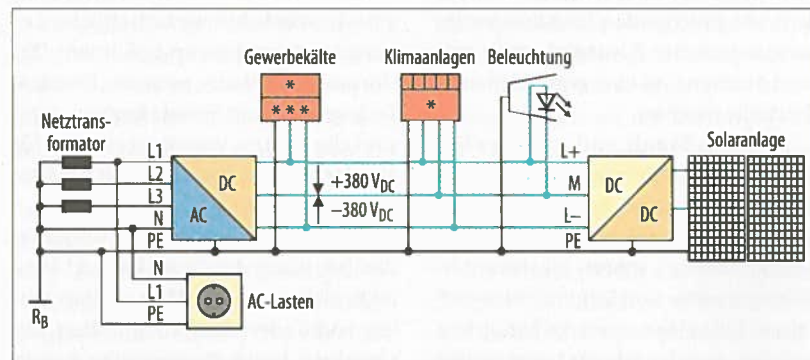


Bild 2. Hocheffiziente, innovative Architektur zur Verteilung elektrischer Energie in Gebäuden.

→ Erstens kann eine entsprechend große und hochwertige leistungselektronische Komponente als intelligentes Element mit vielen Funktionen innerhalb eines „Smart Grid“ realisiert werden. Dadurch werden neue Möglichkeiten zur Regelung von Strom und Spannung im Drehstromnetz eröffnet. Prinzipiell können so Blindleistung und Oberwellen im Drehstromnetz lokal kompensiert werden. Es besteht auf diese Weise auch die Möglichkeit, durch geeignete Kommunikation und Steuerung „Gleichrichter-einheiten“ als geregelte Blindleistungsquellen zu verschalten und so in einem bestimmten Rahmen die Netzqualität zu erhöhen.

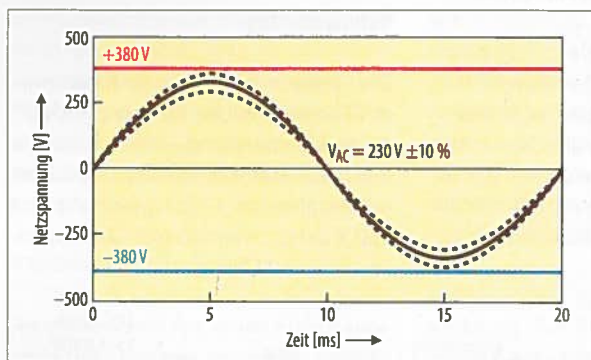


Bild 3. Vergleich sinusförmiger Netzspannungen und vorgeschlagene Gleichspannungsnennwerte.

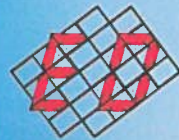
→ Zweitens ermöglicht die Zusammenfassung von vielen Gleichrichtermodule kleiner Leistung Skalenvorteile, die zu einem höheren Wirkungsgrad und zu geringeren Systemkosten pro Watt installierter Leistung führen.

Es ist deshalb an der Zeit, das Paradigma des Niederspannungsdrehstromnetzes für spezielle kommerziell genutzte Gebäude mit hohem Energiebedarf wie z.B. Supermärkten [4] zu hinterfragen.

Vergleich von Gleich- mit Wechselspannung

Das vorgeschlagene Gleichstromnetz hat gegenüber Drehstrom verschiedene Vorteile. Bild 4 illustriert Leistungsverluste durch reinen Wirkstrom in einer 400-V-Drehstromleitung anhand eines Beispiels, in dem drei Lastgruppen mit zusammen 6.600 W versorgt werden. Der Leiterstrom von 10 A verursacht an dem angenommenen Leiterwiderstand von 1 Ω einen Spannungsabfall von 10 V und damit Verluste von 300 W, das entspricht 4,3 % der Eingangsleistung des Kabels. Im Neutralleiter N fließt kein Strom, weil sich die drei Phasenströme mit einer Phasenverschiebung von jeweils 120 Grad zu Null addieren. Eine zusätzliche Blindleistungsübertragung im Kabel würde die Verluste weiter erhöhen.

Wird bei einer Gleichstromübertragung der gleiche Gesamtleiterquerschnitt für das Kabel wie im Beispiel Drehstrom berücksichtigt, dann folgt daraus ein um 25 % größerer Leiterquerschnitt, da für die zwei Phasen im Gleichstromnetz ein Leiter weniger erforderlich ist (Bild 5). Damit reduziert sich der Leiterwiderstand um 20 % auf 0,8 Ω . Um nun die zwei Lastgruppen mit ± 380 V und einer Gesamtleistung von 6.600 W zu versorgen, sind zwei Phasenströme



electronic displays 2014 Conference

Nürnberg, 26. – 27.2.2014

CALL FOR PAPERS

Europas größte Konferenz zu elektronischen Displays und deren Anwendung.

Über 40 Beiträge und rund 300 Teilnehmer aus ganz Europa in 2013!

TOUCHSCREENS

Wir suchen Beiträge aus der Forschung & Entwicklung ebenso wie (einige) Markttrends. Mögliche Themenbereiche sind unter anderem:

- Display Technologien
- Ansteuerung und Interface
- Touch Screens
- GUI, HMI
- 3D
- Messtechnik
- Systemaspekte und Integration
- Display-Baugruppen
- Lieferkette
- Displayanwendungen
- Marktdaten

Author Interviews ermöglichen intensive Diskussionen und Networking mit den Teilnehmern.

Student Papers sind erwünscht und nehmen an der Verleihung des DFF Student Paper Award teil.

Eine rein technische Ausrichtung Ihres Papers ist erforderlich, Marketing- oder PR-orientierte Papers werden nicht akzeptiert. Die offizielle Konferenzsprache ist Englisch.

Wir freuen uns auf Ihre Einreichungen!

Wichtige Termine:

- Deadline für die Abstract-Einreichung: 7. Oktober 2013
- Benachrichtigung der Autoren: KW 42
- Endfassung für Tagungsunterlagen: 20. Januar 2014

Mehr Information über:

Prof. Dr. Karlheinz Blankenbach
E-Mail: kb@displaylabor.de

www.electronic-displays.de

Eine Veranstaltung der

**DESIGN &
ELEKTRONIK**
KNOW-HOW FÜR ENTWICKLER

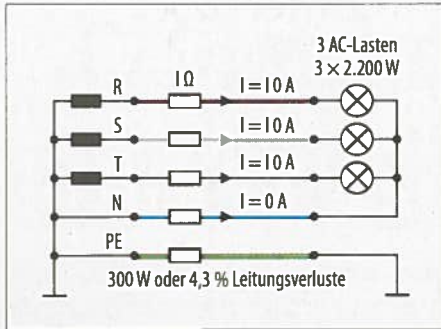


Bild 4. Beispiel für Verluste in einem 400-V-Drehstromkabel.

von jeweils 8,85 A erforderlich. Diese Phasenströme erzeugen im Gleichstromkabel Verluste von 125 W, das entspricht hier 1,9 % der Eingangsleistung des Kabels. Damit sind die Kabelverluste im Gleichstrombeispiel um 58 % geringer als die Verluste im Drehstromkabel bei gleichem Gesamtleiterquerschnitt. Allgemeiner ausgedrückt halbieren sich die Leitungsverluste durch den Übergang von einer Drehstromübertragung auf die vorgeschlagene Gleichstromübertragung durch den höheren Effektivwert der Spannungen im Gleichstromnetz. Zusätzliche Verluste durch Blindstrom können im Gleichstromleiter prinzipiell nicht entstehen.

Alternativ kann man ein Gleichstromkabel vom Gesamtquerschnitt so dimensionieren, dass die gleichen Kabelverluste von 300 W wie im Drehstrombeispiel entstehen. Hierfür kann der Leiterwiderstand von 0,8 auf 1,8 Ω ansteigen. Der Gesamtleiterquerschnitt des Gleichstromkabels reduziert sich dadurch um 56 %.

Steigerung des Wirkungsgrads durch zentrale Gleichrichter

In einer Vielzahl von elektrischen Anwendungen, etwa in Computern, Vorschaltgeräten für Lampen, wird Wechselspannung zunächst gleichgerichtet und anschließend mittels eines Gleichspannungswandlers dem geforderten Spannungsniveau der Anwendung angepasst (Bild 6). Je nach Anforderung kann der Gleichspannungswandler mit oder ohne galvanische Trennung realisiert werden. Innerhalb dieser Energiewandlungskette entstehen in der Schaltung beim Gleichrichten der Wechselspannung und in der nachgeschalteten Leistungsfaktor-Korrekturschaltung (Power Factor Correction, PFC) Verluste von etwa 5 %.

Für den Wirkungsgrad einer zentralen Gleichrichterstufe wird ein Wert von 98 % angestrebt. Damit können 3 % Verluste gegenüber der Gleichrichterstufe in Bild 6 eingespart werden. Zusammen mit der oben erläuterten Reduzierung von Verlusten in Gleichstromkabeln kann der Gesamtwirkungsgrad um rund 5 % gesteigert werden.

Da der zentrale Gleichrichter idealerweise bidirektional ausgeführt ist, muss die Gleichrichterschaltung aus Bild 6 verändert werden. Durch die Verwendung von abschaltbaren Bauelementen – z.B. von IGBTs und einer Speicherdrossel auf der Wechselspannungsseite – kann die Phasenverschiebung beliebig eingestellt werden, wodurch die Energierichtung umgekehrt werden kann. Hierdurch ergibt sich auch die Möglichkeit, auftretende Blindleistung im Wechselspannungsnetz zu kompensieren und so das speisende Netz zu

stabilisieren. Diese Art der Gleichrichterschaltung wird auch als „Active Front End“-Umrichter (AFE-Umrichter) bezeichnet. Dieses Prinzip ermöglicht das in der Einleitung erwähnte Konzept einer geregelten Blindleistungsquelle. Bild 7 zeigt das Schaltbild für eine Wechselspannungsphase; mit Hilfe von zwei weiteren einphasigen Gleichrichterschaltungen kann die Schaltung für eine Anwendung mit Drehstrom erweitert werden.

Nennspannung

Die Autoren untersuchen zusammen mit Partnern (siehe Kasten „DCC+G“) ein Niederspannungs-Gleichstromsystem, das elektrische Quellen und Lasten mit einphasiger Gleichspannung von 380 V oder zweiphasiger Gleichspannung

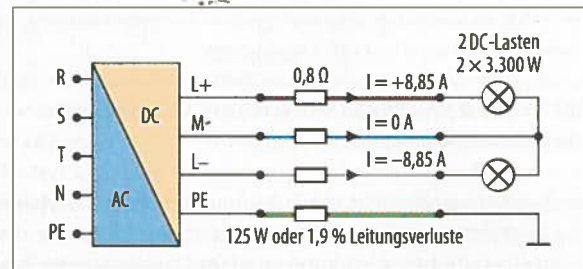


Bild 5. Beispiel für Verluste in einem ± 380 -V-Gleichstromkabel.

von ± 380 V verbinden kann. Der Gleichspannungsnennwert von 380 V hat sich in der internationalen Diskussion als vorteilhaft herausgestellt, weil er oberhalb des Amplitudenwertes der relevantesten Netzwechselspannungen von $230 V_{\text{eff}} \pm 10 \%$ liegt (Bild 3). Diese Spannungsverhältnisse ermöglichen aufgrund der technischen und regulatorischen Rahmenbedingungen besonders kostengünstige und effiziente Zentralgleichrichter und eine vergleichsweise einfache Migration bestehender Gerätetechnik in eine Gleichspannungsnetzumgebung.

Hocheffiziente Lichttechnik

Wichtig für den Erfolg von Gleichspannungsnetzen ist neben der effizienten Bereitstellung von elektrischer Energie auch deren bestmögliche Verwendung. Beispiele für besonders energieeffiziente Verbraucher sind LED-Leuchten. So ist etwa eine Standard-LED-Leuchte mit einem AC-LED-Treibermodul ausgerüstet, das einen Wirkungsgrad von 90 % erreicht. Durch den Übergang von

DCC+G

Das Verbundvorhaben „Direct Current Components and Grid“



(DCC+G) adressiert die strategischen Herausforderungen zur Energieeinsparung und die damit verbundene Reduzierung der CO₂-Emissionen von kommerziell genutzten Gebäuden durch die Erforschung von Lösungen zur optimierten Gleichstromverteilung bei einer Spannung von ± 380 V [13]. Mehrere europäische Forschungsministerien fördern dieses Projekt, das mögliche Effizienzsteigerung mit Testinstallationen in einem Bürogebäude und an einem Verbrauchermarkt demonstrieren soll. Zu diesem Zweck haben sich zwölf Projektpartner (Siemens, Philips, Infineon, Emerson Network Power, FhG IISB, ETA, Heliox, MTT, SolCalor, TUE, Emerson Climate Technology, Brno University) aus Industrie und Forschung zu einem die gesamte Wertschöpfungskette abdeckenden Konsortium zusammengeschlossen. Nach ersten Untersuchungen erwarten die Forscher Einsparungen von etwa 5 % der elektrischen Energie.

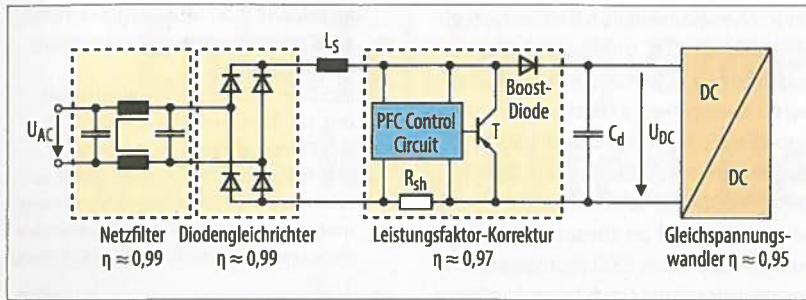


Bild 6. Typische Eingangsbeschaltung von Wechselspannungsnetzteilen mit Wirkungsgrad-Richtwerten. (Quelle: STMicroelectronics)

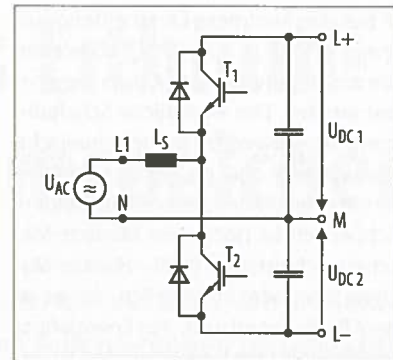


Bild 7. Einphasige Gleichrichterschaltung für bidirektionalen Energiefluss.

einer Drehstrom- auf eine Gleichstromversorgung und von dezentralen Gleichrichtern auf einen zentralen Gleichrichter sollen von den etwa 10 % Verlusten in den derzeit verfügbaren AC-LED-Treibern knapp die Hälfte eingespart werden.

Drehzahlregelte Antriebe

Die effizienteste Art, einen Elektromotor in der Drehzahl zu regeln, kombiniert einen Drehstrommotor mit einem Frequenzumrichter, der von einem

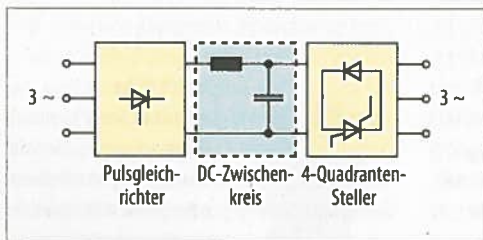


Bild 8. Schema eines Frequenzumrichters mit Gleichspannungszwischenkreis.

Gleichrichter mit Gleichspannung versorgt wird. Idealerweise ermöglicht ein Frequenzumrichter einen generatorischen Betrieb, bei dem elektrische Leistung in das Drehstromnetz zurückgespeist wird. Die Drehzahl des Antriebs wird durch die Frequenz des Wechselrichters bestimmt. Die in Bild 8 gezeigte Topologie bietet den Vorteil, dass sich mehrere Antriebe an einer gemeinsamen DC-Sammelschiene betreiben lassen und diese gegebenenfalls durch Pufferbatterien vor Netzausfall geschützt werden können. Diese DC-Sammelschiene kann folglich als Teil des hier vorgeschlagenen Niederspannungs-Gleichstromnetzes ausgeführt werden; sie ermöglicht die direkte Speisung des Gleichspannungszwischenkreises aus dem Netz. Dies steigert zudem auch den Wirkungsgrad der Rückspeisung von Energie in das Gleich-

spannungsnetz. Außerdem lassen sich auf diese Weise weitere Energiequellen wie Windgeneratoren oder Blockheizkraftwerke (BHKW) in das Gleichspannungsnetz einbinden.

Einbindung von Solarstromanlagen in Gleichstromnetze

Aufgrund der günstigen Kostenentwicklung von Photovoltaik-Systemen werden zunehmend Solaranlagen auf Gebäuden installiert, deren Strom bevorzugt selbst genutzt wird. Dabei ist es besonders vorteilhaft, wenn die Solarmodule den erzeugten Gleichstrom über einen als Maximum Power Point Tracker (MPPT) funktionierenden Gleichspannungswandler direkt in ein Gleichstromnetz einspeisen können (Bild 2). Ein solcher Gleichspannungswandler lässt sich einfacher bauen als ein Solarwechselrichter und kann daher mindestens einen ebenso guten, wenn nicht sogar höheren Wirkungsgrad aufweisen. Die Leitungsverluste im Gleichstromnetz können geringer ausfallen als im Drehstromnetz, Solarstromverluste

in Gleichrichterschaltungen von Applikationen entstehen nicht mehr.

Sicheres Schalten von Gleichströmen

Die Erzeugung und Übertragung elektrischer Energie birgt ein Gefährdungspotenzial für Mensch und Gerät und benötigt daher besondere Maßnahmen zur Verhinderung von Schäden. Um den Fluss elektrischer Energie von einer Quelle zu einer Senke abhängig vom Zustand des umgebenden Systems sicher zu unterbrechen, sind spezielle Schutzschaltgeräte nötig. Die Wirkungsprinzipien solcher Schutzgeräte lassen sich allgemein auf fünf Funktionen reduzieren (Bild 9): Datenerfassung, Datenverarbeitung, Aktor, Human-Machine Interface und Schaltelement.

Von einer Datenerfassungseinheit werden die Kenngrößen des Systems $Z_1, \dots, Z_n, \dots, Z_N$ aufgenommen und in einer Auswertungseinheit verarbeitet. Dies kann elektrisch analog und/oder digital oder rein physikalisch oder in einer beliebigen Kombination daraus geschehen. Aus diesem Ergebnis werden

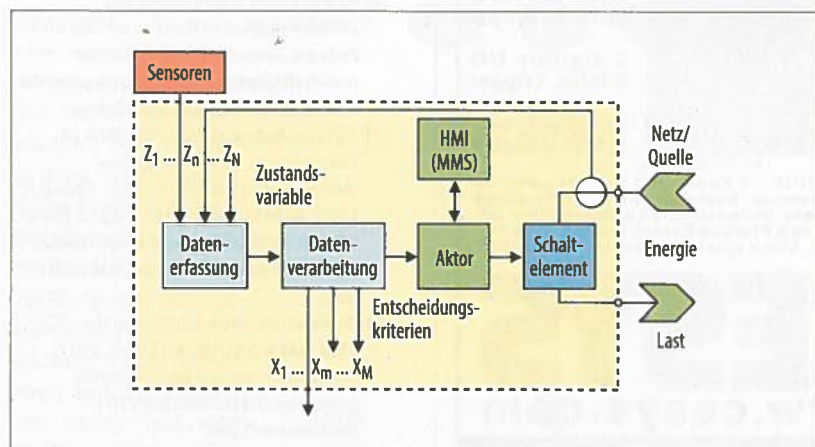


Bild 9. Die fünf Hauptfunktionen eines elektrischen Schutzgerätes.

M beliebig komplexe Entscheidungskriterien $x_m = f(Z_1, \dots, Z_n, \dots, Z_N)$ abgeleitet, die zur Steuerung eines Aktors verwendet werden. Das eigentliche Schaltelement ist entweder eine mechanische Kontaktstelle oder ein Leistungshalbleiter oder eine Kombination aus beiden. Schließlich ist noch eine Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI – Human-Machine Interface) erforderlich, die es einem Bediener erlaubt, den Energiefluss unabhängig vom Systemzustand zu unterbrechen oder wieder herzustellen. In diese Systematik lassen sich alle Geräte zum Schutz elektrischer Stromkreise einordnen und beschreiben, indem man die einzelnen Blöcke mit mathematischen und physikalischen Modellen mit Hilfe von CAD-Systemen und Software wie ANSYS und Matlab darstellt.

Stand der Standardisierung

Die Umstellung der Stromnetze in kommerziellen Gebäuden von Drehstrom auf Gleichstrom wird nur mit international einheitlich standardisierten Produkten und Systemen gelingen. Aufgrund der internationalen Aktivitäten zu 380-V-Gleichstromnetzen in Rechenzentren hat die IEC Internationale Elektrotechnische Kommission [5] die Strategische Arbeitsgruppe 4 (SG4) „LVDC distribution systems up to 1500V DC“ gestartet [6]. Diese internationalen Aktivitäten werden in Deutschland durch Firmen und eine Arbeitsgruppe bei der

Deutschen Kommission für Elektrotechnik (DKE) im VDE unterstützt [7]. Viele existierende IEC-Standards dokumentieren bereits heute Niederspannungssysteme bis 1.000 V AC und 1.500 V DC. Als Beispiel wird auf die Standard-Serien IEC 60364 [8] und IEC 61557 [9] verwiesen. Parallel zu diesen Aktivitäten auf IEC-Ebene hat ETSI (European Telecommunications Standards Institute) [10] den Standard ETSI EN 300 132-3-1 V2.1.1 für 380-V-Gleichspannungsnetze in Telekommunikationssystemen und Rechenzentren erstellt. Dieser Standard ist derzeit auch eine Grundlage für einen weitergehenden Standard, der von einer Arbeitsgruppe der EMerge Alliance [11] entwickelt wird. jw

Die Autoren bedanken sich für die erfolgreiche Zusammenarbeit bei den Partnern des DCC+G-Projektes, bei dem Bundesministerium für Bildung und Forschung sowie der Europäischen Union für die Förderung des Projektes DCC+G (BMBF FKZ 16N12113; ENIAC Nr. 296108 „DC Components and Grid“) und bei Prof. Dr. E. Waffenschmidt [12] von der Fachhochschule Köln für die Unterstützung in diesem Projekt.

Literatur

- [1] Europäische Kommission: Richtlinie 2010/31/EU vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden. http://ec.europa.eu/energy/efficiency/buildings/buildings_de.htm
- [2] Internationale Energie Agentur: Solar Heating & Cooling Program: Task 40 – Net zero Energy Buildings. www.iea-shc.org
- [3] Voss, K.; Musall, E.: Nullenergiegebäude. Detail Green Books. ISBN 978-3-920034-50-8. <http://shop.detail.de/de/buecher/detail-green-books/nullenergiegebäude.html>
- [4] REWE: Erster Supermarkt mit DGNB-Prädikat in Gold spart fast 50 % Energie. www.rewe-group.com/nachhaltigkeit/energie-klima-umwelt/energieeffizienz/green-building
- [5] IEC International Electrotechnical Commission: Standardization Management Board Strategic Group 4: LVDC distribution systems up to 1500V DC (IEC SMB SG4). www.iec.ch/about/annual_report/2010/technical/smb7.htm
- [6] De Kesel, W.: Introduction to the IEC SMB SG4 workshop on LVDC. 2011. www.vde.com/en/dke/dkework/newsfromthecommittees/2011/documents/1.pdf
- [7] DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik

im DIN und VDE: Arbeitsgruppe TBINK. LVDC „Niederspannungsgleichstromverteilnetze“.

- [8] IEC: Low-voltage electrical installations. IEC Standard 60364, Parts 1 – 7
- [9] IEC: Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1 000 V a.c. and 1 500 V d.c. Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures. IEC Standard IEC 61557, Parts 1 – 12
- [10] ETSI European Telecommunications Standards Institute: Environmental Engineering (EE). Power supply interface at the input to telecommunications and datacom (ICT) equipment. Part 3: Operated by rectified current source, alternating current source or direct current source up to 400 V. Sub-part 1: Direct current source up to 400 V. European Standard ETSI EN 300 132-3-1 V2.1.1 (2012-02).
- [11] Emerge Alliance: EMerge Alliance advances DC power distribution platform to focus on energy efficient data centers. 2010.
- [12] Waffenschmidt, E.; Boeke, U.: Low Voltage DC Grids, Präsentation auf dem ECPE-Workshop „Power Electronics in Electrical Networks“, Kassel. März 2013.
- [13] Direct Current Components + Grid. www.dcc-g.eu



Ulrich Böke

arbeitet als Senior Scientist in der Forschungsgruppe Solid State Lighting im Philips-Forschungslabor in Eindhoven. ulrich.boeke@philips.com



Dr. Roland Weiss

arbeitet als Senior Research Engineer in der Corporate Technology der Siemens AG. rolandweiss@siemens.com



Peter Meckler

leitet den Bereich InnoLab (Innovation & Technologie und Prüflabor) bei der E-T-A GmbH in Altdorf. peter.meckler@e-t-a.de



Leopold Ott

forscht im Bereich gekoppelter AC/DC-Mikronetze am Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelemente-technologie in Erlangen. leopold.ott@isb.fraunhofer.de

Elektronik
pinboard Anzeige

USB Mess-Stick

4 Kanal low-cost DAQ für die Notebooktasche



Art.Nr. C028210

4x12 Bit ADC mit 188 kSps

3 digitale I/O Zähler, Trigger

optional mit Pt1000 Adapter

CEBO STICK - 4 Kanal USB data acquisition zum Mitnehmen: hochohmige OpAmp Eingänge, Datenlogger, Voltmeter und Linienschreiber inkl. Labview und ProfLab Expert Treiber, APIs für Windows, Linux (auch Raspberry Pi) und OS X.



CESYS
www.cesys.com

Elektronik · Messtechnik · FPGA