

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse

Herausgeber: Electrosuisse

Band: 105 (2014)

Heft: 12

Artikel: Transmission d'énergie par réseaux à courant continu multiterminaux

Autor: Favre-Perrod, Patrick / Luginbühl, Miro / Pidancier, Thomas

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-856336>

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: 13.01.2026

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

Transmission d'énergie par réseaux à courant continu multiterminaux

Perspectives d'application et exemple de maquette

La possibilité de transporter l'électricité renouvelable avec peu de pertes et une forte densité d'énergie positionne le courant continu comme l'une des options de développement du réseau. Avant d'être déployés à grande échelle, les réseaux à courant continu multiterminaux font l'objet de nombreuses études. En complément de la simulation numérique, l'utilisation de maquettes à échelle réduite peut se révéler très intéressante. Cet article discute l'utilisation future de ces réseaux et présente une maquette réalisée à l'École d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg.

Patrick Favre-Perrod, Miro Luginbühl, Thomas Pidancier

Le courant continu (DC) fut la première forme de courant électrique exploitée. Le courant alternatif (AC) l'a cependant rapidement remplacé et l'utilisation du DC s'est dès lors limitée à des applications de niche.

Récemment, les progrès de l'électronique de puissance et les nouvelles ressources (photovoltaïque, éolien, petite hydraulique et stockage) à tension continue ou variable en fréquence posent à nouveau la question de l'utilisation du courant continu dans les applications domestiques (habitat et bureaux). Les principales motivations sont l'élimination des étages de conversion superflus, une densité de puissance plus élevée et un rendement amélioré.

Dans le domaine de la distribution électrique, l'utilisation du DC promet également une densité de puissance augmentée, un rendement amélioré, ainsi qu'une continuité en DC entre les consommateurs et les producteurs renouvelables (et potentiellement le stockage). Les difficultés politiques et techniques rencontrées dans le développement du réseau de transmission AC ont renforcé l'attrait des technologies de transmission à courant continu, notamment de celles basées sur les nouvelles technologies à source de tension.

Diverses analyses des aspects liés à l'utilisation du courant continu dans les domaines domestique et de la distribution ont été publiées récemment dans

cette revue [1,2]; cette contribution se penche sur les niveaux de réseaux supérieurs.

Réseaux à courant continu multiterminaux

La transmission haute tension à courant continu (HVDC) constitue l'une des niches occupées depuis plusieurs décennies par les technologies DC. Dans ce domaine, les principaux avantages du DC sont :

- une densité de puissance plus élevée ;
- des pertes réduites ;
- la contrôlabilité des flux de puissance ;

■ la possibilité de réaliser de longues liaisons câblées ;

■ et les services auxiliaires pour le réseau AC (contribution à la stabilité, amortissement des oscillations, etc.).

L'un des aspects essentiels de la transmission HVDC consiste dans le fait que, pour des raisons de coût des convertisseurs mais surtout en raison de la difficulté du réglage, jusqu'à présent seules des installations à deux terminaux ont été construites, à trois exceptions notables près : les liaisons Sardaigne-Corse-Italie, Québec-Nouvelle Angleterre et Biswanath Chariali-Kishanganj-Agra. Ces systèmes sont cependant tous de type « source de courant » et ce n'est que récemment que des convertisseurs à source de tension (VSC, voltage source converter) pour des applications HVDC se sont établis sur le marché. Ces derniers ont rendu possible l'exploitation de parcs éoliens offshore loin des côtes.

Grâce à cette avancée, il est admis que des systèmes multiterminaux (MTDC) seront plus aisés à mettre en place. Plusieurs visions dans ce sens ont été présentées, par exemple dans les projets de super réseaux continentaux comme Medgrid, North Sea supergrid, etc. À l'exception du MTDC de Zhoushan (Chine), d'une puissance relativement

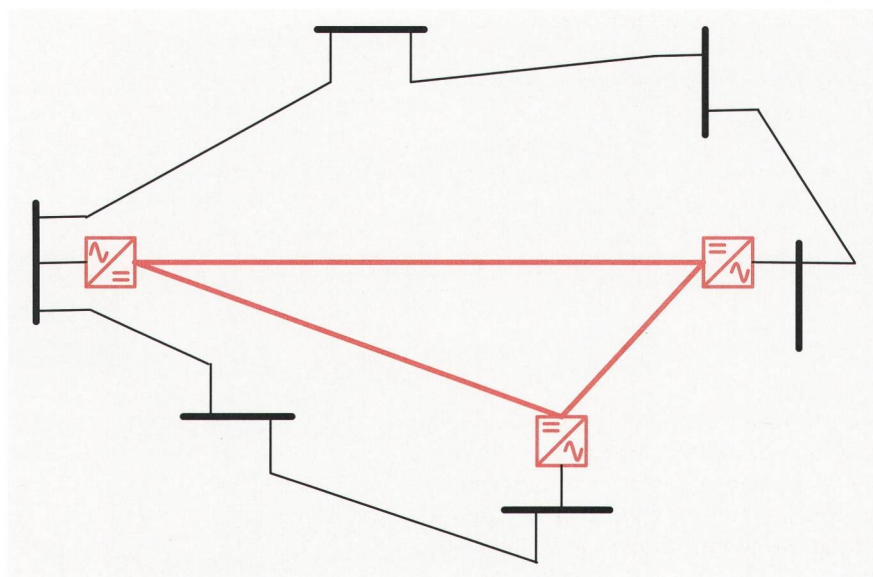


Figure 1 Illustration d'une partie de réseau AC/DC mixte.

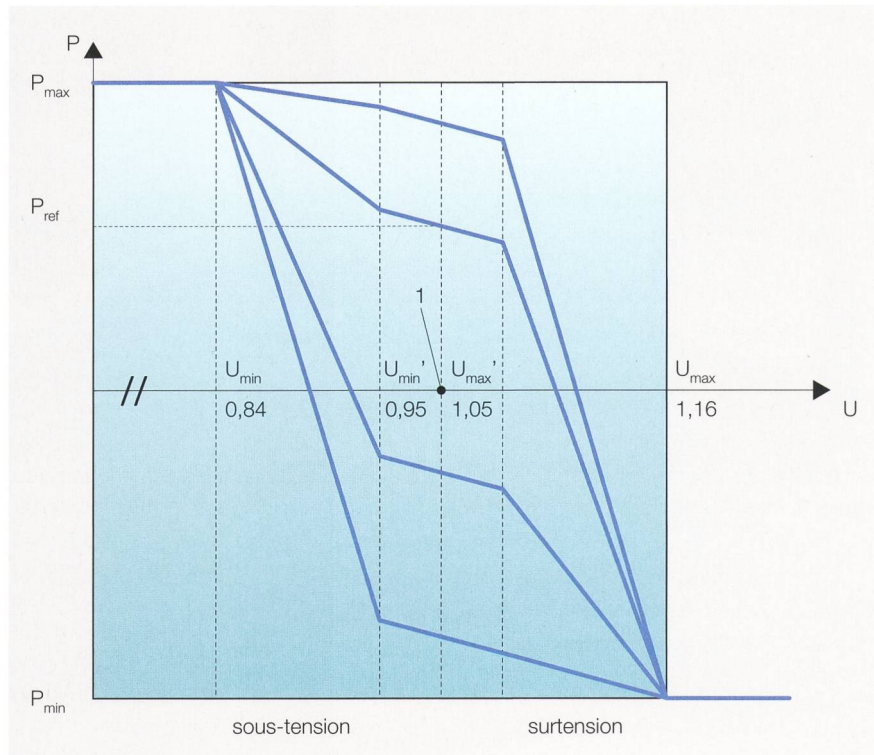


Figure 2 Caractéristique de réglage pour la méthode de réglage sans bande morte (non-dead-band voltage droop control).

faible [3], ces systèmes n'existent pour l'heure que sous forme d'idées et, avant une généralisation de l'utilisation du courant continu dans des réseaux à plusieurs terminaux, différentes questions, notamment liées à la normalisation et à la protection, devront encore être traitées [4].

De nombreuses nouvelles liaisons DC sont déjà annoncées ou en cours de réalisation dans le réseau de transmission européen (interconnexions France-Espagne et France-Italie, trois corridors nord-sud en Allemagne, etc.). Pour le réseau de distribution et la consommation finale, l'évolution récente, par exemple dans le domaine des centres de calcul, rend la distribution DC économiquement viable. Il est donc intéressant pour les acteurs des réseaux électriques de se préparer à ces opportunités, par exemple en envisageant le renforcement des réseaux AC existants avec plusieurs liaisons DC, comme suggéré à la **figure 1**.

Réglage

Une condition communément admise pour le réglage des flux de puissance dans un réseau multiterminal consiste dans le fait que celui-ci devrait continuer de fonctionner en cas de perte des moyens de communication entre terminaux. Des principes de réglage décentralisés sont donc nécessaires.

Plusieurs stratégies de réglage sont proposées dans la littérature, dont les principales sont nommées :

- « voltage margin control » ;
- « droop control » ;
- « dead-band voltage droop control » ;
- et « non-dead-band voltage droop control ».

La méthode « voltage margin control » est une extension du principe de réglage des liaisons point-à-point actuelles. L'un des terminaux (terminal bilan) assure le réglage de la tension, les autres terminaux peuvent arbitrairement (ou sur la

base des ressources à disposition) injecter ou soutirer de la puissance. Lorsqu'une limite de puissance du terminal bilan est atteinte, il augmente, respectivement diminue, la tension DC, ce qui signale aux autres terminaux (ou au moins à l'un d'entre eux) de passer en mode réglage de tension (ce dernier devient de facto le nouveau terminal bilan).

Dans la méthode « droop control », la variation de tension DC est utilisée comme signal commun par tous les convertisseurs qui ajustent leur puissance sur la base de la tension DC. Il s'agit en fait d'une façon de distribuer le rôle du terminal bilan. Certains auteurs y voient une analogie avec le réglage primaire du réseau AC. Afin de faciliter la stabilisation du système, une zone morte peut être ajoutée au réglage « droop control », ce qui est utilisé dans la méthode « dead-band voltage droop control ». Dans la méthode « non-dead-band voltage droop control », illustrée en **figure 2**, la zone morte est remplacée par une caractéristique P-U légèrement inclinée.

La méthode de réglage tension-puissance sans bande morte (« non-dead-band voltage droop control ») sera utilisée dans les travaux présentés dans cet article. Cette méthode offre l'avantage de ne pas nécessiter de terminal bilan, de ne pas distinguer différents rôles de convertisseurs et donc d'être également adaptée à des situations de perte d'un convertisseur ou de séparation du réseau DC suite à la défaillance d'un équipement (ligne, câble, etc.). Ce choix permet en particulier de réaliser des combinaisons entre un contrôle centralisé pour l'optimisation du réseau et un contrôle distribué pour la stabilité et la sécurité du réseau [5]. Une

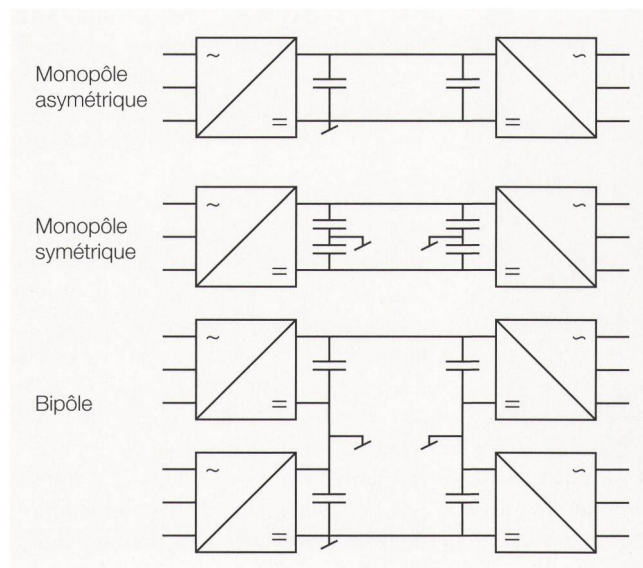


Figure 3 Différentes configurations d'une liaison à courant continu point à point.

vue d'ensemble de l'utilisation du contrôle coordonné pour optimiser les flux de puissance dans des réseaux mixtes AC et DC a été publiée précédemment [6].

Configuration et topologie des réseaux MTDC

La conception des réseaux MTDC inclura le choix de la configuration en bipôle, souvent retenu pour des liaisons classiques à très haute puissance, ou en monopôle (le choix fréquent pour les liaisons VSC). Ces derniers peuvent être symétriques ou asymétriques (figure 3). Chaque choix comporte certains avantages, liés par exemple aux courants de terre, aux coûts ou à la disponibilité du système. Certaines de ces options pourront également être combinées, en étendant par exemple un monopôle pour en faire un bipôle [7]. Par conséquent, l'étude d'un système MTDC devra inclure la possibilité d'une combinaison de bipôles et de monopôles.

À l'heure actuelle, il n'y a pas non plus de consensus sur la topologie d'un réseau MTDC. Les propositions incluent les bus DC, les réseaux en antenne et les réseaux maillés. Cela implique que



Figure 4 Maquette du réseau multiterminal DC au laboratoire : vue d'ensemble.

	Facteur d'échelle	Réseau en taille réelle	Simulateur
Tension	1:1000	400 kV	400 V
Courant	1:1000	3,5 kA	3,5 A
Impédance	1:1	1 Ω	1 Ω
Puissance	1:1 000 000	1 GW	1 kW

Tableau 1 Facteurs d'échelle utilisés pour la maquette.

l'étude expérimentale ou par simulation des réseaux MTDC doit être suffisamment modulable pour couvrir plusieurs de ces cas.

Création d'une maquette de réseau MTDC

La réalisation d'un réseau MTDC représente un risque technologique et se fera donc en plusieurs étapes. Différents groupes de recherche sont actifs dans le domaine de la simulation de ces réseaux à venir et contribuent à créer le savoir nécessaire pour leur développement. En parallèle et pour démontrer la pertinence des concepts développés, une validation plus proche de la pratique s'impose. À l'échelle réelle, une telle validation représenterait un investissement énorme, d'où l'intérêt de réalisations à échelle réduite.

Les avantages de ces maquettes sont les suivants :

- Ces systèmes fonctionnent en temps réel.
- Des phénomènes non modélisés ou idéalisés dans les simulations numériques peuvent être observés.
- Ils permettent de débusquer les simplifications inadéquates.
- Ils facilitent la compréhension du système complet.
- Finalement, ils peuvent être utilisés pour le développement de contrôleurs et de fonctionnalités de communication pour le système à échelle réelle.

Bien entendu, ces systèmes ont leurs limitations : ils présentent notamment des pertes plus importantes que dans la réalité et une représentation de la réalité qui reste simplifiée. Néanmoins, les fabricants d'équipements recourent depuis longtemps à de telles maquettes, de même que des équipes de recherche dans le domaine applicatif.

Une maquette de réseau MTDC a été réalisée à l'École d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg (EIA-FR) au sein du projet « ACDC ». La figure 4 montre la maquette entière qui inclut huit convertisseurs, des éléments de ligne pour la connexion DC entre les convertisseurs, ainsi que des transformateurs pour la connexion à une maquette de réseau AC existant.

Au moment de sa conception, aucun exemple pratique ou consensus sur la topologie d'un réseau MTDC n'existait. Quelques topologies imaginaires, ainsi qu'une estimation des paramètres qui pourraient être réalistes dans la pratique ont donc été établies. La topologie des lignes et câbles peut être modifiée sur la plaque frontale du système. Les facteurs d'échelle choisis sont résumés dans le tableau 1 et correspondent à l'état de l'art des convertisseurs DC VSC (tension DC supérieure à 320 kV et puissance supérieure à 1 GW).

La figure 5 montre le détail de l'une des armoires qui composent le système : les convertisseurs AC/DC sont représentés

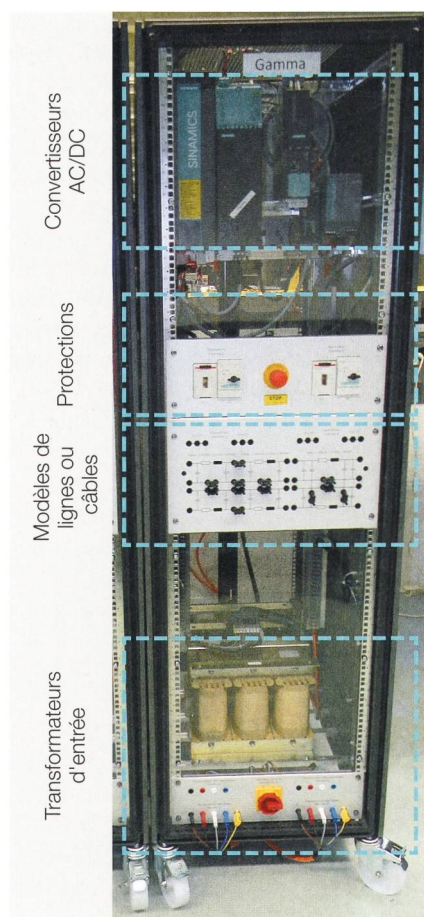


Figure 5 Détail d'une armoire de la maquette du réseau multiterminal DC.

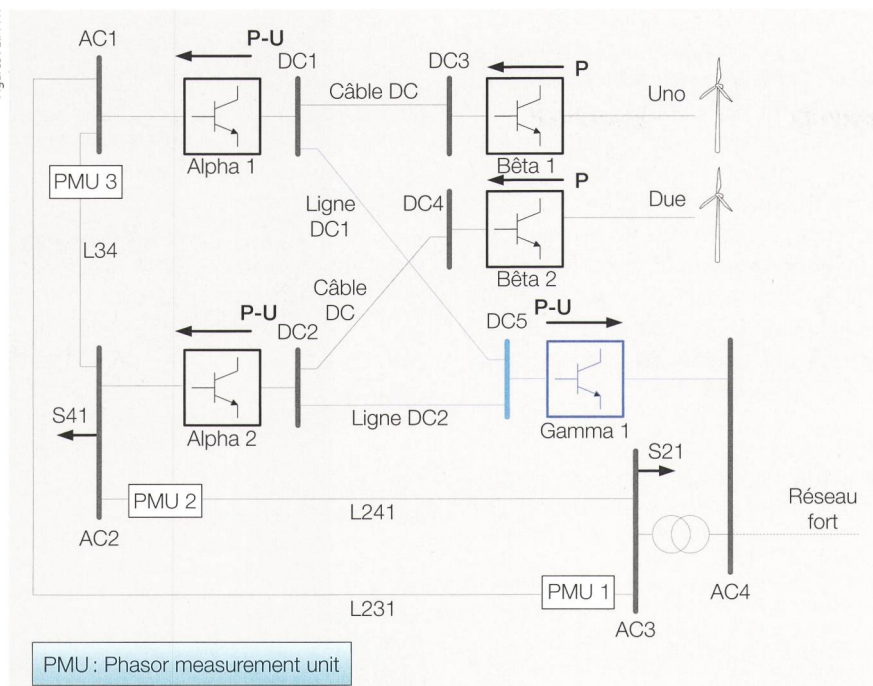


Figure 6 Exemple de configuration d'un réseau mixte AC et DC réalisé au laboratoire.

par des convertisseurs pour entraînements industriels, ainsi que par un transformateur d'entrée. Les câbles et lignes sont représentés par des éléments concentrés (R, L et C). Tous les éléments d'une armoire sont installés par paires avec la possibilité de connecter les éléments dédoublés au point neutre côté DC, ce qui permet de représenter soit deux monopôles, soit un bipôle. Un système de contrôle permet de paramétrer le réglage puissance-tension des convertisseurs selon la méthode de réglage tension-puissance sans bande morte.

Exemple d'utilisation de la maquette

Un exemple de topologie étudié sur la maquette décrite précédemment est illustré à la **figure 6**: le parc éolien uno (620 W à l'échelle) et le parc éolien due (1170 W) sont reliés à un réseau AC existant, chacun par une liaison DC. L'ajout des lignes DC1 et DC2, ainsi que du convertisseur Gamma 1 (en bleu) crée un réseau MTDC dont les conséquences sur le réseau existant peuvent dès lors être mises en évidence.

Ce petit exemple illustre l'effet possible d'un réseau MTDC sur la charge du réseau AC existant: sans le réseau MTDC, les charges des lignes L34, L241 et L231 sont de 327 W, 350 W et 459 W; avec un réseau MTDC, les possibilités du réglage peuvent être utilisées pour décharger le réseau AC et augmenter la marge de stabilité. Par exemple, il est possible de

réduire les charges dans les lignes à 139 W, 180 W et 218 W en répartissant arbitrairement la puissance entre les systèmes AC et DC (dans ce cas, aucune optimisation n'est faite), ce qui permet de réduire de 60% la différence d'angle de phase de la tension sur la ligne L241. La poursuite du développement de la maquette pour une utilisation dynamique est prévue.

Remarques finales

Les applications du courant continu dans différentes parties du système électrique allant du transport aux installations domestiques connaissent aujourd'hui un regain d'intérêt. Pour les « extrémités » du système, les constatations suivantes peuvent être faites. Dans le domaine domestique, l'utilisation du courant continu offre un avantage en termes de rendement énergétique. Cet avantage va s'accroître au fil du temps en raison de la multiplication des charges électroniques de puissance (onduleurs PV, ordinateurs, éclairage LED, etc.), y compris les nouvelles énergies renouvelables et les stockages décentralisés. Dans les niveaux de réseau les plus « élevés », soit le réseau de transport (NR1) et le réseau de distribution supra-régional (NR3), la réutilisation des tracés existants semble également possible, mais la motivation principale de l'utilisation des technologies DC consistera à compléter le système AC existant. L'apport principal de la transmission DC est l'augmentation de la capacité de transmission et l'amélioration de la stabilité.

Dans le domaine de la distribution, le lien entre les extrémités précédemment discutées, la standardisation des tensions à utiliser sera l'élément clé. Ces constatations donnent une indication sur les utilisations possibles et probables du

Zusammenfassung

Energieübertragung über Multi-Terminal-Gleichstromnetze

Künftige Anwendungsmöglichkeiten und Modellbeispiel

Dank der Möglichkeit, Strom aus erneuerbaren Energien mit geringen Verlusten und einer hohen Energiedichte zu transportieren, bietet sich Gleichstrom (DC) als eine der Optionen für den Ausbau von Stromnetzen an. Innerhalb des europäischen Stromübertragungsnetzes sind bereits zahlreiche neue Gleichstromleitungen geplant oder befinden sich gegenwärtig im Bau. Im Hinblick auf Verteilungsnetze und Endverbrauch wird die Gleichstromverteilung aufgrund der jüngsten Entwicklungen, z.B. im Bereich der Rechenzentren, wirtschaftlich rentabel. Für die Betreiber von Stromnetzen ist es daher interessant, sich auf diese Möglichkeiten vorzubereiten, zum Beispiel durch eine Verstärkung der bestehenden Wechselstromnetze mit mehreren Gleichstromleitungen, insbesondere um die Übertragungskapazität zu erhöhen und die Netzstabilität zu verbessern.

Die kürzlich erfolgte Markteinführung von spannungsgeführten Stromrichtern (VSC, Voltage Source Converter) für Hochspannungs-Gleichstrom-Systeme (HGÜ) dürfte die Einrichtung von Multi-Terminal-Systemen (MTDC) einfacher gestalten. Bevor diese Systeme jedoch flächendeckend zum Einsatz kommen, werden sie im Rahmen zahlreicher Untersuchungen geprüft. Verschiedene Forschungsgruppen arbeiten intensiv an der Simulation dieser Netzwerke und tragen somit dazu bei, die notwendigen Grundlagen für deren Ausbau zu schaffen. Parallel dazu, und um die Relevanz der entwickelten Konzepte aufzuzeigen, muss die Validität der Methodik eingehender geprüft werden. Hierzu wurde im Rahmen des Projekts «ACDC» ein Modell eines MTDC-Netzes an der Hochschule für Technik und Architektur Freiburg (HTA-FR) erstellt.

Der Artikel erörtert die künftige Nutzung von MTDC-Netzen und stellt das an der HTA Freiburg erstellte Modell sowie eine der untersuchten Topologien vor.

CHe

courant continu dans le domaine de la distribution, en particulier pour les réseaux de distribution régional (NR5) et local (NR7): un remplacement partiel du système existant et sa conversion en DC seront potentiellement attractifs là où plusieurs conversions sont mises en série pour la même unité d'énergie produite, comme par exemple dans les quartiers favorisant l'autoconsommation d'électricité photovoltaïque au moyen d'un stockage électrique. Dans d'autres cas, les technologies DC serviront en premier lieu à augmenter la capacité directement ou indirectement (en agissant sur les tensions et déphasages de manière analogue à un FACTS, un «Flexible Alternating Current Transmission System» ou système de transmission flexible en courant alternatif) ou à augmenter la stabilité et/ou la sécurité du réseau (par exemple en ajoutant ponctuellement des interconnexions dans le réseau MT).

L'utilisation de maquettes à échelle réduite dans la recherche appliquée et l'enseignement restera un complément aux simulations numériques malgré leurs rapides progrès et fera partie des outils à employer pour former la relève nécessaire à la mise en œuvre de la tran-

sition énergétique. L'infrastructure présentée dans cet article sera maintenant utilisée dans des projets subséquents inscrits au programme du SCCER FURIES (Swiss competence centre on energy research «Future Swiss electrical infrastructure») conduit par l'École polytechnique fédérale de Lausanne [8]. Le développement des modèles et de la maquette présentés dans cet article ont bénéficié du soutien d'EOS Holding, de Siemens et de l'École d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg.

Références

- [1] M. Haraz, J. Boix: Réseau électrique basse tension à courant continu. Bulletin SEV/VSE 8/2014, pp. 36-39, 2014. www.bulletin-online.ch/uploads/media/07_1408_Haraz_01.pdf.
- [2] J.-F. Affolter, B. Chappuis, L. Rigazzi: Réseaux de distribution basse tension en courant continu. Bulletin SEV/VSE 9/2014, pp. 39-44, 2014. www.bulletin-online.ch/uploads/media/39-44_1409_affolter.pdf.
- [3] S. Xu: Modeling and studies of the first VSC multi terminal link. Proceedings of the Workshop on DC Grid modeling, Cigré session 45, Paris, August 27th, 2014. sites.google.com/site/cigre-dc-grid2014/.
- [4] R.S. Whitehouse: Technical challenges of realising multi-terminal networking with VSC. Proceedings of the 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011), Birmingham, 30 Aug.-1 Sept, 2011.

- [5] T.K. Vrana, J. Beerten, R. Belmans, O.B. Fosfo: A classification of DC node voltage control methods for HVDC grids. Electric Power Systems Research, Vol. 103, pp. 137-144, 2013.
- [6] M. Luginbühl, M.J. Lalou: Contrôle coordonné des convertisseurs de réseaux MTDC. Bulletin SEV/VSE 12/2013, pp. 36-39, 2013. www.bulletin-online.ch/uploads/media/36-39_1312_lalou.pdf.
- [7] Cigré B4.52 Working Group: HVDC grid feasibility study. Technical Brochure 533, Paris, Cigré, 2013. cigre.ru/upload/iblock/53f/CIGRE%20TECHNICAL%20BROCHURE%20533.pdf.
- [8] sccer-furies.epfl.ch.

Auteurs

D^r Patrick Favre-Perrod, MBA est ingénieur EPF en génie électrique. Il a obtenu son diplôme en 2003, puis son doctorat en 2008, de l'École polytechnique fédérale de Zurich. Il a obtenu son MBA de l'Université de Manchester en 2013. Il est actuellement professeur HES à l'École d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg (Haute école spécialisée de Suisse occidentale) où il enseigne et mène des travaux de recherche dans le domaine des réseaux électriques et de la production d'énergie électrique.

EIA-FR, 1705 Fribourg, patrick.favre-perrod@hes-so.ch

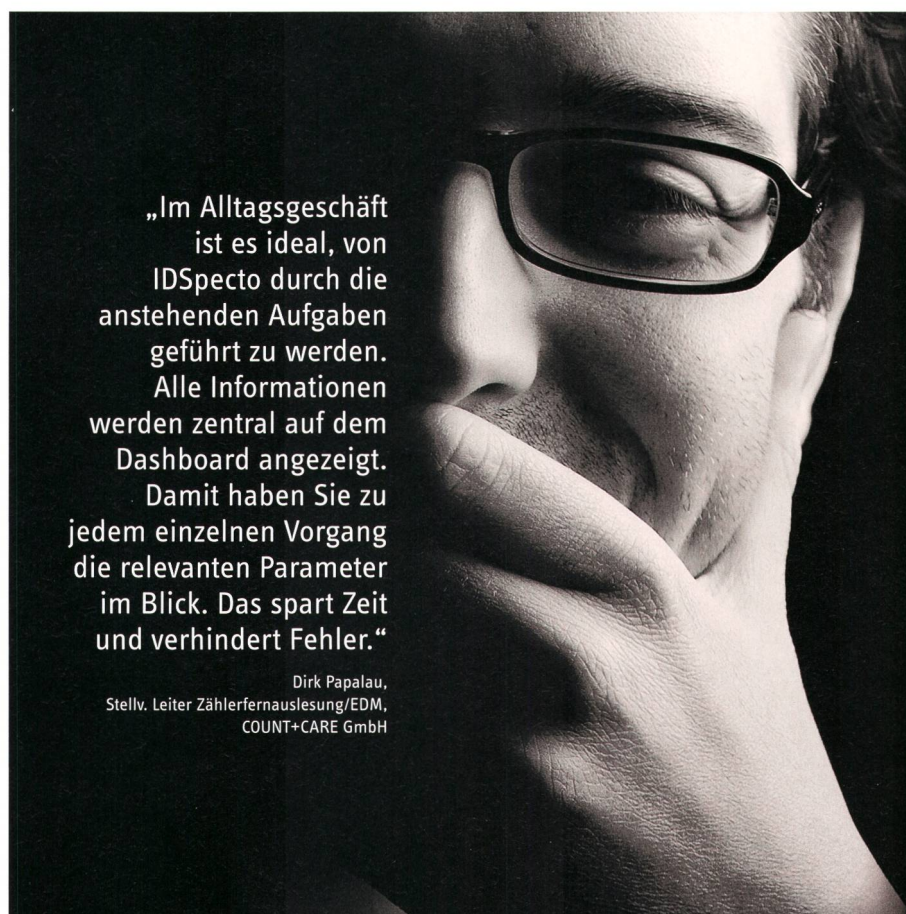
Miro Luginbühl est ingénieur HES en génie électrique. Il a obtenu son diplôme en 2011 de l'EIA-FR. Il est actuellement étudiant dans la filière Master de la Haute école spécialisée de Suisse occidentale. Il a participé au projet ACDC mené à l'EIA-FR.

miro.luginbuehl@master.hes-so.ch

Thomas Pidancier est étudiant en génie électrique à l'École centrale de Lille. Il a participé au projet ACDC mené à l'EIA-FR.

thomas.pidancier@centraliens-lille.org

Anzeige



„Im Alltagsgeschäft ist es ideal, von IDSpecto durch die anstehenden Aufgaben geführt zu werden. Alle Informationen werden zentral auf dem Dashboard angezeigt. Damit haben Sie zu jedem einzelnen Vorgang die relevanten Parameter im Blick. Das spart Zeit und verhindert Fehler.“

Dirk Papalau,
Stellv. Leiter Zählerfernauslesung/EDM,
COUNT+CARE GmbH

GÖRLITZ

Bleiben Sie gelassen.

Das transaktionsbasierte Monitoring von Geschäftsprozessen im SmartMDM IDSpecto verschafft Ihnen eine beeindruckende Übersichtlichkeit. Sollte Ihr Eingreifen erforderlich sein, werden Sie umgehend informiert. Offene Aufgaben sortiert IDSpecto automatisch nach Dringlichkeit und versorgt Sie zudem mit allen Hintergrundinformationen, die zur Bearbeitung notwendig sind. IDSpecto behält den Überblick – auch beim vollautomatisierten Messdatenaustausch.

Ein Höchstmass an Transparenz – bis ins kleinste Detail. Damit können Sie der wachsenden Komplexität der Prozesse und den gesetzlichen Vorgaben und Regularien ganz gelassen gegenüberstehen.

GÖRLITZ Schweiz AG
Lorzenparkstrasse 2 • CH-6330 Cham
Telefon: +41 41 7201250 • Telefax: +41 41 7201251
E-Mail: info@goerlitz.ch • Internet: www.goerlitz.ch

Ein Unternehmen der **ids** Gruppe