Contrôle coordonné des convertisserus de réseaux MTDC

Autor(en): **Luginbühl, Miro / Lalou, Moncef J.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **104 (2013)**

Heft 12

PDF erstellt am: **25.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-856563

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Contrôle coordonné des convertisseurs de réseaux MTDC

Utilisation de convertisseurs de puissance pour améliorer le transport d'énergie

La répartition des flux de puissances dans les réseaux de transport combinés AC-MTDC peut être optimisée en utilisant les convertisseurs reliant les lignes AC et DC dont les puissances active et réactive en transit sont contrôlables. La stabilité de ces réseaux et leur efficience s'en trouveront ainsi renforcées. Cette étude propose une approche permettant de démontrer la faisabilité de ce principe et une première application.

Miro Luginbühl, Moncef J. Lalou

Les lignes HVDC (High Voltage DC), et en particulier celles à technologie VSC (Voltage Source Converter) considérées ici, sont de plus en plus utilisées pour transmettre la puissance sur de longues distances, par exemple pour relier des champs d'éoliennes offshore aux réseaux AC continentaux. Il s'agit en principe de simples lignes à deux terminaux, de type « point à point ». Toutefois, les développements actuels tendent à considérer plusieurs terminaux interconnectés (figure 1), et ce, bien que l'implantation à pleine puissance de cette topologie reste tributaire de la réalisation de disjoncteurs DC ultrarapides actuellement en cours de développement. Le réseau ainsi obtenu est désigné par l'acronyme VSC-MTDC (VSC-Multi-Terminal DC). Il offre une plus grande flexibilité d'exploitation de l'énergie au prix d'une complexité accrue au niveau du contrôle des convertisseurs.

Dans les réseaux VSC-MTDC parallèles à un seul niveau de tension DC considérés dans cette étude, le but principal du contrôle des convertisseurs est de maintenir la tension DC de la ligne en adaptant leurs puissances actives aux variations de la charge. Cependant, en fonctionnement normal, il est possible de manipuler simultanément ces puissances, ainsi que les puissances réactives, pour atteindre d'autres objectifs comme l'évitement des congestions (de puissance) ou la réduction des pertes dans le réseau combiné, voire le renforcement de sa stabilité.

Pour le démontrer, il faut tout d'abord établir les modèles des constituants du réseau combiné, soit :

- des convertisseurs, en tenant compte de leurs pertes de puissance ;
- du réseau VSC-MTDC ;
- du réseau AC (il est admis, pour simplifier, qu'il n'y a qu'un seul réseau AC adjacent).

Puis, sur la base de ces modèles, une méthode d'optimisation des flux de puissances (OPF: Optimal Power Flow) est appliquée afin de déterminer les consignes de puissance active et réactive des convertisseurs en fonction de critères de performance préétablis, tout en garantissant la tenue de la tension DC.

Modèle des convertisseurs de puissance

Un convertisseur de puissance (VSC) [1] consiste en un pont triphasé à transistors IGBT équipé de condensateur(s) de lissage de la tension DC et d'un transformateur de découplage, ainsi que de filtre(s) d'harmoniques du courant alternatif comme dans [1]. Le schéma électrique général par phase est donné à la figure 2.

Pour des applications de réseau électrique, le pont triphasé du VSC pourra être modélisé sur la base de son bilan de puissance. Ses latences peuvent ainsi être négligées en admettant qu'elles sont petites par rapport à celles du réseau. Les pertes de puissance P_p dans le pont triphasé sont prises en compte comme suit :

$$P_p = a + b \cdot I_c + c \cdot I_c^2 \qquad (1)$$

où I_c correspond au courant efficace et a, b et c à des caractéristiques données en fonctionnement redresseur ou onduleur [2]. En outre, les filtres sont modélisés par leurs schémas électriques et le transformateur par son schéma en court-circuit. Les pertes dans les filtres et le transformateur sont ajoutées à P_p.

Pour assurer le bon fonctionnement du réseau VSC-MTDC en régime permanent, il est nécessaire que son bilan de puissance (active) soit neutre. Pour cela, tous les convertisseurs pourront être en mode PQ (puissances active et réactive réglées) à l'exception d'un convertisseur-bilan, lequel est en mode UQ (réglage de la puissance réactive et de la tension continue). Ceci implique pour ce dernier une puissance active nominale très élevée. Des problèmes potentiels de fiabilité peuvent en outre surgir au cas où le réseau AC adjacent ne serait pas suffisamment fort. Une variante de cette méthode permettant de définir plus d'un convertisseur-bilan est proposée dans la littérature [3].

Une approche alternative, plus simple, consiste à imposer à chaque convertisseur une caractéristique de commande de type P-U (puissance active en fonction de la tension DC). Le principe est ana-

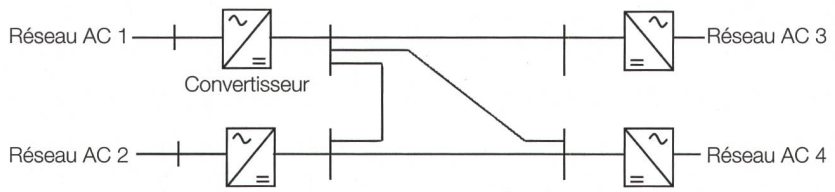

Figure 1 Réseau MTDC à connections maillées.

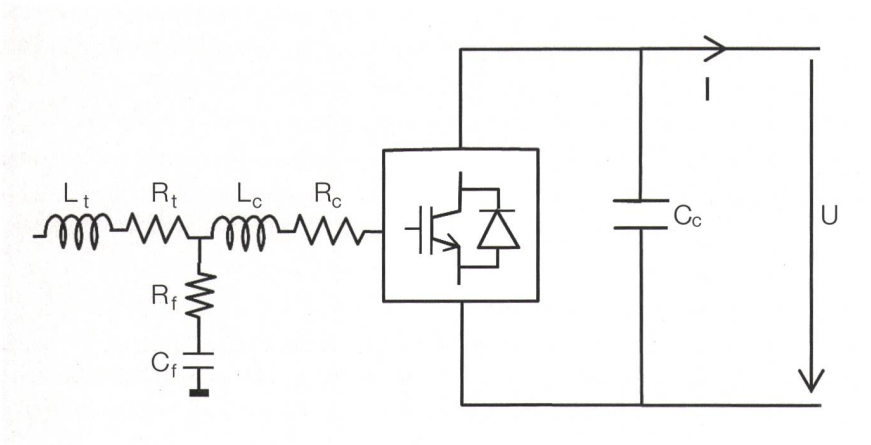

Figure 2 Schéma électrique par phase du convertisseur. L_t, R_t : inductance et résistance de court-circuit par phase du transformateur. R_f, C_f : résistance et condensateur du filtre d'harmoniques. L_c, R_c : inductance et résistance de lissage.

logue à celui du réglage de fréquence dans les réseaux AC : une tension continue croissante reflète un surplus de puissance active dans le réseau MTDC, les convertisseurs doivent donc augmenter les flux de puissances vers le réseau AC, et inversement. Ainsi, tous les convertisseurs participent au maintien de la tension DC, ce qui permet, en particulier, de mieux gérer les cas de défaillance de convertisseur(s).

Des exemples de caractéristiques de commande P-U typiques de la méthode « dead-band droop control method » [4] sont représentés à la **figure 3** : pour chaque convertisseur une zone morte correspondant à sa puissance de référence peut être observée. De légères modifications apportées à ces caractéristiques, notamment la suppression des discontinuités et l'introduction d'une légère inclinaison à la zone morte, permettent d'améliorer la stabilité du réseau, comme montré dans [5]. À noter qu'en fonctionnement normal, aucun échange de données en temps réel n'est nécessaire entre les convertisseurs, ce qui permet de s'affranchir des effets du retard et de la fiabilité de transmission.

Modèles des réseaux AC et MTDC

Les réseaux AC et MTDC sont décrits par les équations des flux de puissances respectifs, en tenant compte évidemment des puissances actives et réactives mises en jeu dans les convertisseurs, les charges et les générateurs. À la différence du réseau AC, le réseau MTDC ne présente pas de nœud-bilan car la commande des convertisseurs suit les caractéristiques P-U. Aux équations précitées s'ajoutent les inéquations représentant les domaines de fonctionnement relatifs aux différents constituants des deux réseaux.

Optimisation des flux de puissances

Dans les réseaux de transport AC, il est courant d'employer des FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) pour optimiser les flux de puissances en régime permanent dans le but de renforcer la stabilité du réseau et/ou d'améliorer son exploitation [6]. Dans le cas d'un réseau combiné AC-MTDC, l'idée est de procéder de la même manière, mais en utilisant comme « FACTS » les convertisseurs dont les consignes de puissance active et réactive serviront de paramètres d'optimisation. Les objectifs de cette dernière couvrent un large spectre. Les plus usuels consistent à améliorer la tenue de la tension aux nœuds, à minimiser les pertes actives ou à éviter la congestion des lignes ou encore à améliorer la capacité de transport résiduelle entre deux zones (ATC : Available Transfer Capacity) [7].

Dans ce contexte, le problème d'optimisation (OPF) du réseau combiné est décrit suivant la formulation générale par minimisation sous contraintes telle que rappelée dans **l'équation (2)**. La fonction-coût (ou fonction-objectif) f est à minimiser sous les contraintes d'égalité $\vec{g} = \vec{0}$ et d'inégalité $\vec{h} \leq \vec{0}$ qui régissent le fonctionnement du réseau combiné en régime permanent. Ces trois fonctions dépendent du vecteur d'état $\vec{x}$ constitué des tensions aux nœuds et du vecteur $\vec{u}$ formé des consignes de puissance active et réactive des convertisseurs et de tous les écarts des grandeurs à minimiser par rapport à leurs valeurs de référence.

$$\begin{cases} \min f(\vec{x},\vec{u}) \\ \vec{g}(\vec{x},\vec{u}) = \vec{0} \\ \vec{h}(\vec{x},\vec{u}) \leq \vec{0} \end{cases} \qquad (2)$$

Trois objectifs sont adoptés ci-après : minimiser les pertes actives, garantir la tenue des tensions aux nœuds (c'est-à-

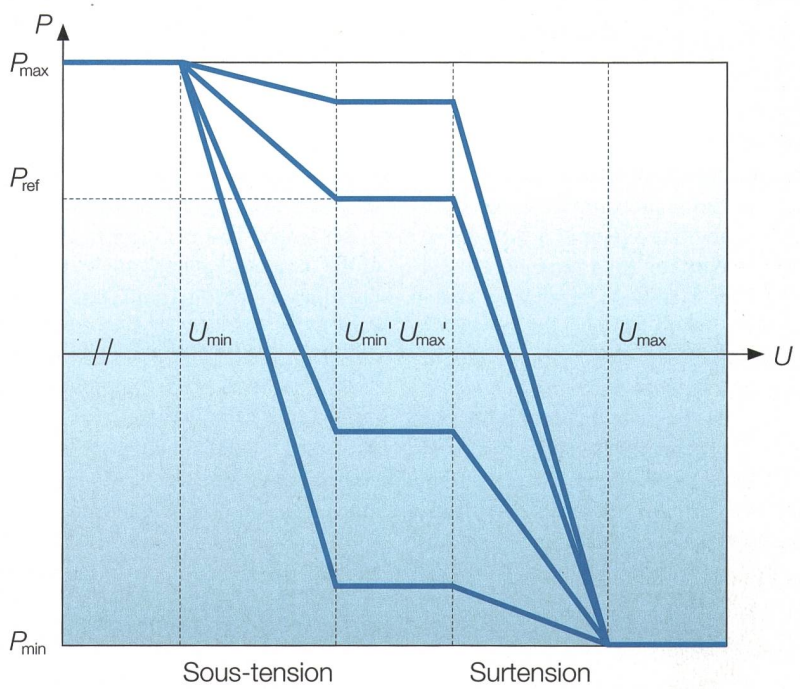

Figure 3 Caractéristiques de commande P-U.

Figures : EIA-FR

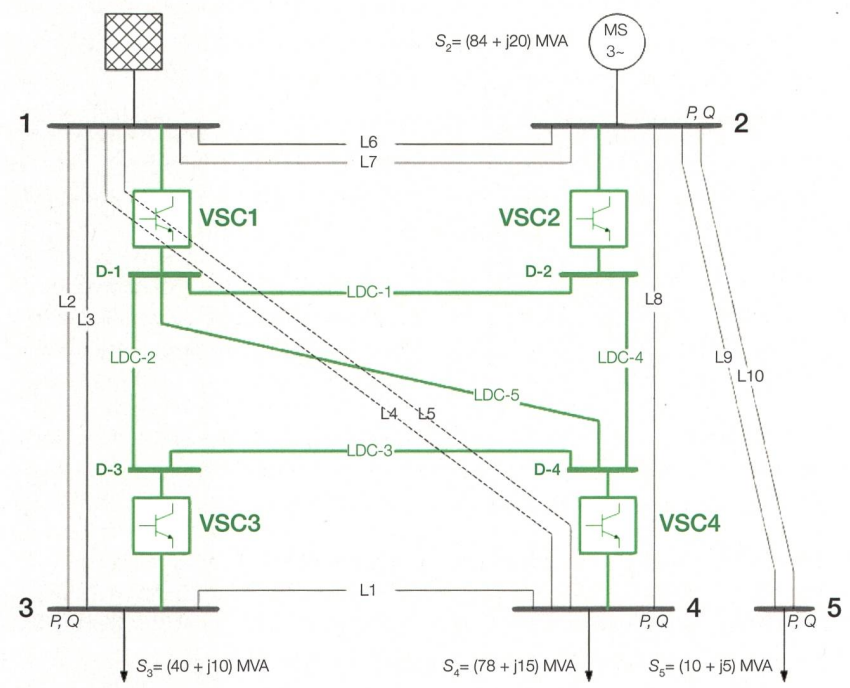

Figure 4 Topographie du réseau combiné. MS3 : générateur synchrone ; L1 à L10 : lignes AC ; LDC-1 à LDC-5 : lignes HVDC ; VSC1 à VSC4 : convertisseurs ; 1 à 5 : nœuds AC (60 kV nom.) ; D1 à D4 : nœuds DC (94 kV nom.).

dire les écarts par rapport aux valeurs nominales) et éviter des surcharges dans les lignes. La formulation de la fonction-coût adoptée **(équation (3))** est identique à celle de [6], mais élargie au réseau MTDC :

$$f(\vec{x},\vec{u}) = \underbrace{\sum_{i=1}^{n} \omega_1 \cdot P_i}_{\text{Pertes totales}} + \underbrace{\sum_{i=1}^{n} \omega_2 \cdot E_i + \omega_3 \cdot F_i}_{\text{Surcharge totale des lignes}} + \underbrace{\sum_{j=1}^{m} \omega_4 \cdot G_j^2 + \omega_5 \cdot H_j}_{\text{Déviation totale des tensions aux nœuds}} \quad (3)$$

Pour chaque ligne i du réseau combiné, les termes P_i, E_i, F_i représentent respectivement les pertes actives, le taux de charge (puissance apparente en transit) référencé par exemple à 90 % de la charge maximale et le taux de charge référencé à 100 % de la charge maximale. Et pour un nœud j, les termes G_j et H_j représentent respectivement l'écart de la tension par rapport à la tension de référence et la déviation par rapport à l'écart de tension maximal admissible. Les coefficients de pondération ω_1 à ω_5 servent à établir des priorités entre les objectifs de l'optimisation. En outre, les grandeurs faisant l'objet de l'optimisation (P_i, E_i, F_i, G_j et H_j) sont contraintes dans des marges de tolérance flexibles afin de favoriser la convergence de l'algorithme d'optimisation.

Étude de cas

Le schéma du réseau combiné sur lequel sera simulée la méthode d'optimisation précitée est donné à la **figure 4**. Il s'agit d'un réseau AC sur lequel a été greffé un réseau MTDC au moyen de quatre convertisseurs. Les paramètres sont donnés pour une tension nominale AC de 60 kV qui correspond, pour des raisons historiques, au réseau expérimental (modèle réduit) à disposition :

- réseau AC : lignes de longueurs comprises entre 100 et 300 km avec résistance (respectivement réactance) linéiques d'environ 10 mΩ/km (respectivement 20 mΩ/km), charges aux nœuds 3 (40 MW, 10 MVar), 4 (78 MW, 15 MVar) et 5 (10 MW, 5 MVar) et générateur au nœud 2 (84 MW, 20 MVar) ;
- réseau MTDC : lignes de longueurs comprises entre 100 et 300 km avec la même résistance linéique que le réseau AC ;
- convertisseur(s) : les paramètres du modèle électrique présenté dans la **figure 2** sont donnés dans le **tableau 1**, ainsi que les coefficients de perte de puissance (repris de [2]) en p.u. et les paramètres des caractéristiques de commande illustrées dans la **figure 3**. Les puissances actives de référence par convertisseur, ainsi que les puissances apparentes maximales admissibles, sont précisées dans le **tableau 2**.

Sans optimisation des flux de puissances du réseau combiné ainsi défini, les résultats de simulation montrent une importante surcharge (environ 19 %) de la ligne 8 du réseau AC et le nœud 5 présente une légère surtension.

Pour tenter d'y remédier, les coefficients de pondération suivants ont été imposés : $\omega_1 = 1$, $\omega_2 = 10^2$, $\omega_3 = 10^5$, $\omega_4 = 10$, $\omega_5 = 10^2$ par lesquels l'objectif de minimisation de la surcharge est surpondéré dans le réseau combiné. Les résultats obtenus après optimisation montrent une meilleure distribution des charges des lignes avec élimination de la surcharge de la ligne 8, dont la charge a été partiellement détournée sur la ligne DC 4 qui relie les convertisseurs 2 et 4 (la puissance active en transit y est passée de 0,1 p.u. à 0,37 p.u.). Parallèlement, les lignes AC 4 et 5 sont largement déchargées par le réseau DC. Au niveau de la tension AC, les écarts obtenus par rapport à la tension nominale marquent aussi un net resserrement autour de la valeur nominale, avec disparition de la surtension au nœud 5.

Toutes ces améliorations dans le réseau AC ne se font pas au détriment de l'état des tensions et des flux de puissances du réseau MTDC qui restent dans les tolérances requises.

Paramètres du modèle électrique	
$R_t = R_c$	0,2 Ω
$L_t = L_c$	2,4 mH
C_c	0,4 mF
$C_f = R_f$	0
Coefficients de perte de puissance en p.u.	
a	0,011
b	0,0035
c	0,0055
Paramètres des caractéristiques de commande	
U_{min}'	95,88 kV
U_{max}'	98,7 kV
P_{min}	-40 MW
P_{max}	40 MW
U_{min}	89,3 kV
U_{max}	98,7 kV

Tableau 1 Paramètres des convertisseurs.

VSC N°	1	2	3	4
P_{ref} MW	30	25	-25	-20
S_{max} MVA	40	50	60	70

Tableau 2 Puissances dans les convertisseurs.

Conclusion

Cette étude montre que l'intégration de réseaux MTDC pourra contribuer à renforcer la stabilité et améliorer les conditions d'exploitation du réseau combiné, en plus d'apporter de nouvelles capacités de transport de puissance. Elle sera suivie d'une étude expérimentale sur un démonstrateur en cours de développement à l'EIA-FR afin de valider les modèles utilisés.

Références

[1] T.M. Haileselassie and M. Molinas: Multi-Terminal VSC-HVDC System for Integration of Offshore Wind Farms and Green Electrification of Platforms in the North Sea. NORPIE /2008, Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, June 2008.

[2] G. Daelemans, K. Srivastava, M. Reza, S. Cole and R. Belmans: Minimization of steady-state losses in meshed networks using VSC HVDC. PES '09, IEEE Power & Energy Society General Meeting 2009, ISSN 1944-9925, pp. 1-5, 2009.

[3] T. Nakajima and S. Irokawa: A control system for HVDC transmission by voltage sourced converters. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 1999, Vol. 2, pp. 1113-1119, 1999.

[4] A.-K. Marten, D. Westermann, M. Luginbühl and H.F. Sauvain: Integration of a Multi Terminal DC Grid in an Interconnected AC Network. IEEE PowerTech 2013, Grenoble, France, June 2013.

[5] L. Vento: DC Multiterminal. Bachelorarbeit, Hochschule für Technik und Architektur Freiburg, Freiburg, Schweiz, 2013.

[6] G. Glanzmann and G. Andersson: Coordinated control of FACTS devices based on optimal power flow. Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium, pp. 141-148, 2005.

[7] G. Mühlhauser et C. Chambettaz: Contrôle en temps réel de réseau électrique AC/DC. Travail de Bachelor, École d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg, Suisse, 2008.

Zusammenfassung **Koordinierte Kontrolle von MTDC-Netzumrichtern**

Verwendung von Stromrichtern zur Verbesserung des Energietransports

Hochspannungs-Gleichstrom-Leitungen (High Voltage DC, HVDC) und insbesondere jene mit VSC-Technologie (Voltage Source Converter) finden vermehrt Anwendung, um Leistung über grosse Entfernung zu übertragen. Im Prinzip handelt es sich um einfache Leitungen mit zwei Anschlüssen vom Typ «Punkt zu Punkt». Dennoch tendieren aktuelle Entwicklungen dazu, mehrere untereinander verbundene Anschlüsse zu berücksichtigen. Solche Netze werden als VSC-MTDC (VSC-Multi-Terminal DC) bezeichnet.

Das Hauptziel der Stromrichtersteuerung in einem MTDC-Netz ist die Stabilisierung der DC-Leitungsspannung durch Anpassung der Umrichterleistungen an die Lastwechsel. Zudem können im Normalbetrieb Leistung und Blindleistung gleichzeitig beeinflusst werden, um andere Ziele zu erreichen, wie die Vermeidung von Überlast oder die Verlustminderung im AC-MTDC-Kombinationsnetz. Ausserdem wird die Stabilität erhöht. Dies wurde durch diese Studie belegt.

Hierzu wurden zuerst Modelle der unterschiedlichen Komponenten des AC-MTDC-Kombinationsnetzes erstellt. Anschliessend wurde auf Grundlage dieser Modelle eine Methode zur Optimierung der Leistungsflüsse angewendet, um die Sollwerte der Leistung und der Blindleistung der Stromrichter gemäss vorab festgelegter Leistungskriterien zu bestimmen und gleichzeitig eine gleichbleibende DC-Spannung zu garantieren. Eine Teststudie zur Validierung der verwendeten Modelle an einem Demonstrationssystem, das sich derzeit in der EIA-FR in Entwicklung befindet, ist noch vorgesehen. CHe

Informations sur les auteurs

Miro Luginbühl est ingénieur HES en énergie électrique. Il a obtenu son diplôme de l'EIA-FR en 2011. Il est actuellement étudiant en Master HES-SO en énergie électrique à l'EIA-FR et collabore dans le cadre de projets de recherche et développement avec EOS-holding.

EIA-FR, 1705 Fribourg, miro.luginbuehl@hefr.ch

Prof. Dr **Moncef J. Lalou** a étudié à l'École polytechnique fédérale de Lausanne. Il y a obtenu ses titres d'ingénieur en génie électrique et de docteur ès sciences techniques en 1990 et 1994. Il a été actif comme chef de projet dans l'industrie suisse des machines pendant cinq années avant de rejoindre la HES-SO (Fribourg). Son principal domaine d'intérêt est le réglage automatique.

EIA-FR, 1705 Fribourg, moncef.lalou@hefr.ch

Les auteurs remercient la Haute école spécialisée de Suisse occidentale (HES-SO) pour le soutien financier ayant permis de mener cette étude qui se poursuit dans le cadre d'un projet inter-écoles financé par EOS-holding.

[1] Le convertisseur est normalement opéré en PWM (Pulse Width Modulation ou modulation de largeur d'impulsions). Il est possible de réguler ses puissances active et réactive (mode PQ) ou sa puissance réactive et sa tension continue (mode UQ).

Anzeige

GKN Alsm
Die leichte und kostensparende Alternative

Dank der optimierten Verseilung der Einzeldrähte und des geringeren Drahtdurchmessers lassen sich die sektoralen, mehrdrähtigen Aluminiumleiter einfacher verlegen, biegen und montieren. Und das Beste an dieser innovativen Lösung: Sie kostet rund 40 % weniger und benötigt beinahe gleich viel Platz wie die entsprechenden Kupferkabel.

novative Niederspannungskabel mit optimiertem Leiteraufbau
)% weniger Gewicht und 40% tiefere Kosten als herkömmliche Kupferkabel
aktisch gleicher Aussendurchmesser wie Kupferkabel
le handelsüblichen Anschlusskomponenten und Muffen erhältlich
alogenfrei und umweltschonend

KABLAN AG
Weissackerstrasse 7, CH-3072 Ostermundigen, +41 31 930 80 80
Rossbodenstrasse 20 A, CH-7000 Chur, +41 81 286 76 76
kablan@kablan.ch, www.kablan.ch