

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 106 (2015)
Heft: 10

Artikel: Pilotage automatique des réseaux de distribution en temps réel
Autor: Le Boudec, Jean-Yves / Paolone, Mario
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-856725>

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>

Pilotage automatique des réseaux de distribution en temps réel

Une solution aux défis de l'intégration des énergies renouvelables

La présence d'une part importante d'énergie électrique produite par des systèmes de conversion solaires et éoliens décentralisés est une perspective réjouissante pour le futur de la planète. Cependant, elle peut aussi avoir des conséquences indésirables sur l'exploitation des réseaux électriques. Les méthodes traditionnelles de contrôle de la fréquence, de la tension et de la congestion de lignes ne suffisent plus et demandent à être complétées par un contrôle explicite des puissances actives ou réactives. Rendre un tel contrôle fiable et économique constitue un défi majeur.

Jean-Yves Le Boudec, Mario Paolone

La production d'électricité à partir de nouvelles énergies renouvelables, telles que le solaire et l'éolien, est amenée à jouer un rôle primordial à l'avenir, notamment pour la sortie du nucléaire. Or, une forte pénétration de la production d'énergie électrique décentralisée peut poser divers types de problèmes aux réseaux de distribution qui n'ont pas été conçus pour l'absorber.

Les défis à relever

L'augmentation de la production décentralisée peut par exemple engendrer des problèmes de tension et de surcharge de courant dans certaines lignes, au risque d'endommager les lignes mêmes et les équipements. La résolution de ces problèmes peut passer par une réhabilitation du réseau de distribution mais le coût en est souvent prohibitif. Un réglage dynamique des réseaux constitue une alternative, mais celui-ci est difficile à réaliser à cause de l'importante variabilité de certaines de ces sources d'énergie. Le cas le plus extrême est celui des panneaux solaires qui, lors du passage de nuages, peuvent en quelques secondes perdre ou regagner la plus grande partie de leur puissance (figure 1).

Un second type de problèmes causés par la forte pénétration de la production d'énergie électrique décentralisée concerne le réseau de transport. En effet, la volatilité extrême s'accompagne, pour les petites installations, d'une absence de soutien du

réseau de transport pour les services système (contrôle primaire et secondaire de la fréquence et de la tension), contrairement à ce qui est requis des générateurs traditionnels. Il s'ensuit une augmentation des besoins de réglage pour les réseaux nationaux, tels que Swissgrid ou RTE, qui doivent trouver des moyens de compenser cette volatilité par des générateurs conventionnels à forte flexibilité; or ceux-ci sont typiquement des générateurs à combustibles fossiles exerçant un impact négatif sur l'environnement (émissions de CO_2).

Les méthodes traditionnelles de contrôle de la fréquence ne sont plus suf-

fisantes pour gérer cette variabilité car la fréquence est une quantité trop globale. Il devient donc nécessaire de contrôler la puissance active et réactive chez les clients, dans les réseaux de distribution.

Contrôle de la puissance dans les réseaux de distribution

Des systèmes qui vont dans ce sens commencent à voir le jour. Mentionnons par exemple :

- la gestion de la tension dans un réseau basse tension par le contrôle de la puissance active ou réactive des panneaux solaires [1];
- la gestion de la puissance active des systèmes thermiques résidentiels électriques par un opérateur de manipulation de la demande (« Demand response ») [2].

Pour contrôler la puissance des clients, plusieurs éléments sont indispensables.

Éléments nécessaires

Il faut d'abord disposer d'une infrastructure de mesure et de communication. Elle peut se baser sur une infrastructure de compteurs intelligents, utilisant soit le réseau électrique, soit un réseau de télécommunication dédié.

Mais il faut aussi pouvoir « voir » l'état électrique du réseau, ce qui passe par l'installation de systèmes d'estimation

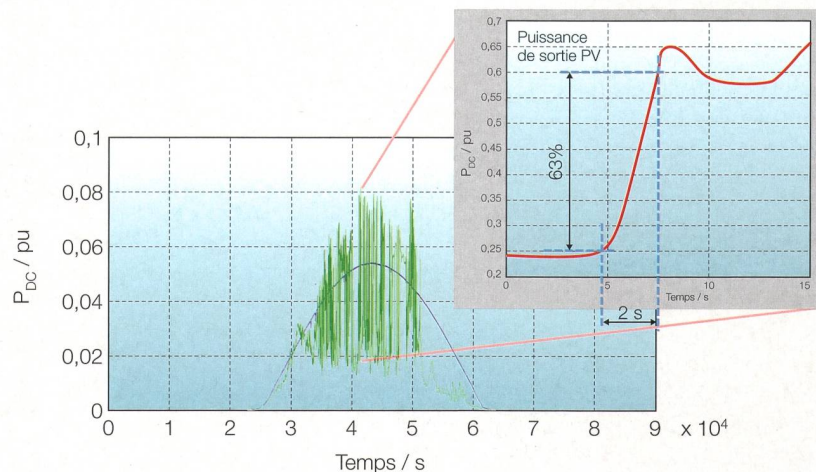


Figure 1 Variabilité de la production des panneaux solaires photovoltaïques (mesurée sur les toits de l'EPFL, un jour de novembre). La production peut chuter des 2/3 ou augmenter du triple en l'espace de 2 secondes.

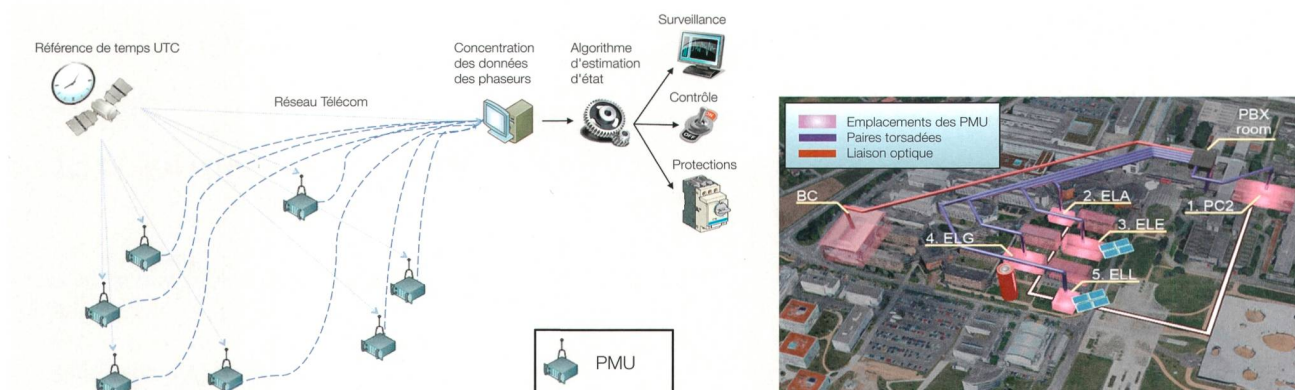


Figure 2 L'infrastructure d'estimation du réseau électrique développée sur le campus EPFL, basée sur l'utilisation de PMU. Les résultats de l'estimation sont disponibles en temps réel sur [3].

d'état qui utilisent des « Phasor Measurement Units » (PMU), des dispositifs capables de mesurer les amplitudes des tensions et courants aussi bien que les phases avec une référence temporelle absolue donnée, par exemple, par le système UTC-GPS (**figure 2**).

Avec une infrastructure d'estimation d'état, il faut en outre disposer d'un système de contrôle en temps réel, avec une réactivité de l'ordre de la fraction de seconde, qui va pouvoir envoyer des consignes de puissance active ou réactive aux systèmes qui participent à l'équilibrage du réseau.

Finalement, dans la plupart des cas, il ne suffit pas de contrôler seulement la puissance réactive, il faut aussi contrôler la puissance active et donc disposer de formes de stockage. Ce dernier peut se décliner en supercondensateurs pour le très court terme (de l'ordre de la seconde), en batteries pour le court terme (heures/jours) ou en piles à combustible/hydrolyseurs pour le plus long terme (semaines/mois). À noter ici que le stockage le moins cher dans la dynamique minutes/heures est la manipulation de la demande, principalement des charges thermiques (chauffage, eau chaude, réfrigération, climatisation) qui offrent une énorme capacité de stockage virtuel.

Fiabilité

Pour réaliser un système de contrôle qui prenne en compte les réseaux électriques, les bâtiments, les charges, les systèmes de génération distribuée comme les panneaux solaires, etc., le défi devient alors, comme pour tout système de conduite de processus à très grande échelle, d'en assurer la fiabilité et la robustesse. Le système doit résister aux pannes matérielles et aux bugs logiciels; de plus, il doit être économique pour

pouvoir être distribué largement. Le but de l'architecture « Commelec », développée à l'EPFL avec le soutien du Fonds national [4], du SCCER-FURIES [5] et d'ABB, consiste à relever ces défis.

Le système Commelec

Avec le système Commelec [6-7], un contrôleur de réseau (Grid Agent ou GA) implémenté sur un ordinateur embarqué est responsable de la gestion d'un réseau électrique, par exemple d'un bâtiment ou d'un quartier. Il reçoit des informations sur l'état des systèmes qu'il contrôle (un contrôleur de panneaux solaires, d'un bâtiment ou d'une batterie) et voit l'état du réseau électrique dont il est responsable. Le contrôleur envoie des consignes de puissance toutes les 100 millisecondes aux systèmes qu'il contrôle, de façon à maximiser l'utilité globale tout en maintenant le réseau dans un état stable et sûr (**figure 3**).

Un fonctionnement simplifié grâce à un protocole universel

La première caractéristique essentielle de Commelec est l'utilisation d'un proto-

cole universel, indépendant du matériel. Ainsi, l'agent de batterie BA, quand il informe son contrôleur de réseau GA1 de son état interne, le fait à l'aide d'une fonction de coût (virtuel) abstraite et n'utilise pas un langage spécifique à une batterie (**figure 4**). Quand la batterie est presque pleine, par exemple pour un état de charge équivalent à 0,9, la fonction de coût indique une préférence à engendrer de la puissance (domaine positif de la puissance, partie droite de la **figure 4**) plutôt qu'à en consommer (domaine négatif de la puissance, partie gauche de la **figure 4**) et inversement quand l'état de charge est faible. Il n'est donc pas nécessaire d'exposer au contrôleur toutes les caractéristiques et variables internes de chaque batterie.

Un autre système, par exemple l'agent d'un bâtiment intelligent, envoie des messages similaires qui diffèrent seulement par la valeur de la fonction de coût, laquelle peut par ailleurs changer à chaque message, soit toutes les 100 millisecondes. Le travail du contrôleur de réseau est donc toujours le même : calculer

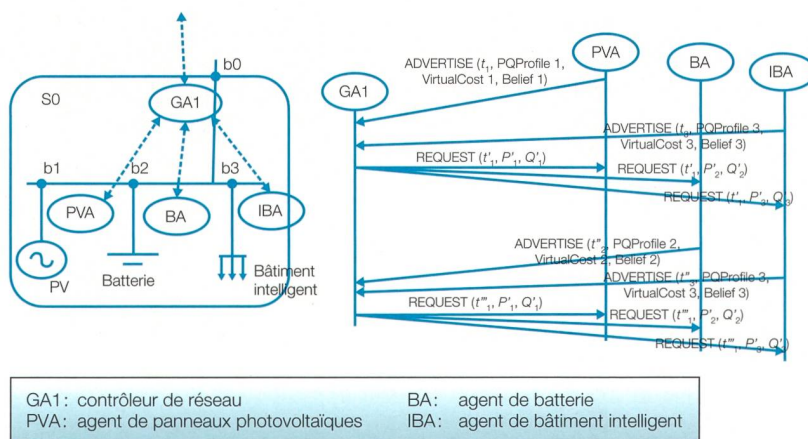


Figure 3 Structure et principe du protocole Commelec.

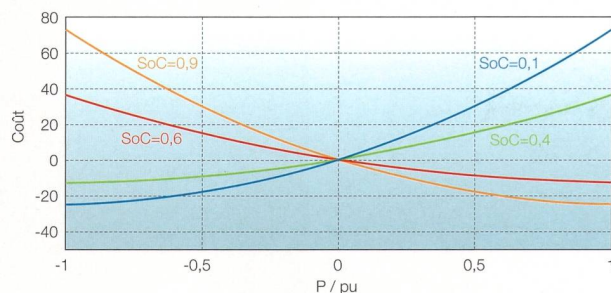


Figure 4 La fonction de coût virtuel pour la puissance active, utilisée par l'agent de batterie en fonction de son état de charge (« State of Charge », SoC).

ler le gradient du coût total, y compris un terme de pénalité pour maintenir le réseau électrique dans un état sûr, effectuer une étape de minimisation par descente de gradient et envoyer les consignes de puissance correspondantes aux agents.

Séparation des problèmes

En particulier, tous les contrôleurs de réseau sont identiques et il y a un seul code à développer pour tous les réseaux électriques, quelles que soient leur taille et leur spécificité. De plus, ce code est petit et peut être validé par des méthodes de développement rigoureuses. Seuls les agents, tels que l'agent de batterie par exemple, doivent être spécifiques à la nature du système qu'ils représentent. Mais, en contrepartie, ils effectuent des fonctions plus simples.

La fiabilité est, quant à elle, assurée par une méthode combinant duplication matérielle et triplification logicielle à base de machines virtuelles pour se prémunir contre les erreurs logicielles.

Composabilité

La composabilité constitue la deuxième caractéristique essentielle de Commelec : le contrôleur de réseau GA1 de la figure 3, qui contrôle par exemple un bâtiment de l'EPFL, est lui-même contrôlé par un contrôleur de réseau de niveau supérieur, par exemple le contrôleur du campus de l'EPFL. Dans cette interaction, le contrôleur GA1 et tout le réseau du bâtiment qu'il contrôle apparaissent comme une seule ressource, en quelque sorte une batterie d'un type un peu spécial. Le contrôleur de campus ne voit ainsi qu'un petit nombre de systèmes, ce qui lui permet de rester simple et petit (et donc fiable). Cette propriété de composabilité peut être répétée à plusieurs niveaux et il est ainsi possible de gérer facilement des systèmes de toute taille.

Cette propriété a un autre effet positif : elle permet de réaliser simplement le

concept tant désiré d'« usine électrique virtuelle » (Virtual Power Plant ou VPP). En effet, le contrôleur de campus peut envoyer une consigne de puissance au contrôleur de bâtiment GA1, par exemple en lui demandant de réduire sa consommation de x kW. Le contrôleur GA1 incorporera cette consigne dans sa fonction d'optimisation et, en fonction de l'état des systèmes qu'il contrôle, essaiera de s'approcher de la consigne. La réduction sera par exemple possible si le chauffage des bâtiments peut être retardé de quelques instants ou si une batterie dispose d'une charge suffisante. Le bâtiment peut donc apparaître comme une ressource électrique contrôlable ; par composabilité, le campus tout entier l'est aussi. Dans les cas extrêmes, le logiciel permet d'automatiser la manœuvre d'ilotage, c'est-à-dire la déconnexion/reconnexion au réseau. À terme, c'est une ville ou une portion de pays tout entière qui peut offrir de la flexibilité au réseau électrique – une avancée essentielle pour permettre une forte pénétration des énergies renouvelables.

L'interface de programmation Commelec

En pratique, le déploiement de Commelec demande que certaines ressources critiques, telles que le chauffage d'un bâtiment ou une batterie, répondent aux consignes d'un contrôleur de réseau électrique. Les développeurs de systèmes de gestion de bâtiments ou de voitures électriques n'ont cependant pas besoin de connaître les détails de Commelec : grâce à son interface de programmation (API), librement disponible [8], ils peuvent s'interfacer simplement avec le système de contrôle de réseau électrique (figure 5). En quelque sorte, l'API de Commelec fournit le « système d'exploitation » d'un réseau électrique actif.

Mise en œuvre

Le système de contrôle Commelec est développé sur le réseau électrique expérimental du Laboratoire des systèmes électriques distribués (Distributed electrical systems laboratory ou DESL) de l'EPFL. Dans une première étape, celui-ci reproduit un « benchmark » Cigré¹⁾ de réseau de distribution électrique basse tension. Il incorpore (figure 6) :

- 40 kW de panneaux solaires ;
- une batterie Li-titanate Leclanché de 25 kW et 25 kWh ;
- des supercondensateurs de 75 kW et 2 kWh ;
- une pile à combustible de 15 kW et un hydrolyseur de 6 kW connectés à un système de stockage d'hydrogène et oxygène pressurisés à 30 bars avec une capacité de 2,5 MWh ;
- une pompe à chaleur ;

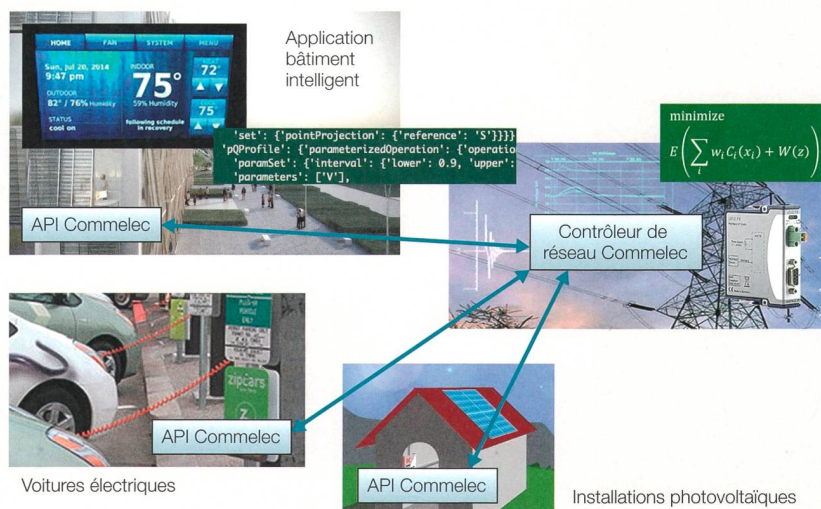
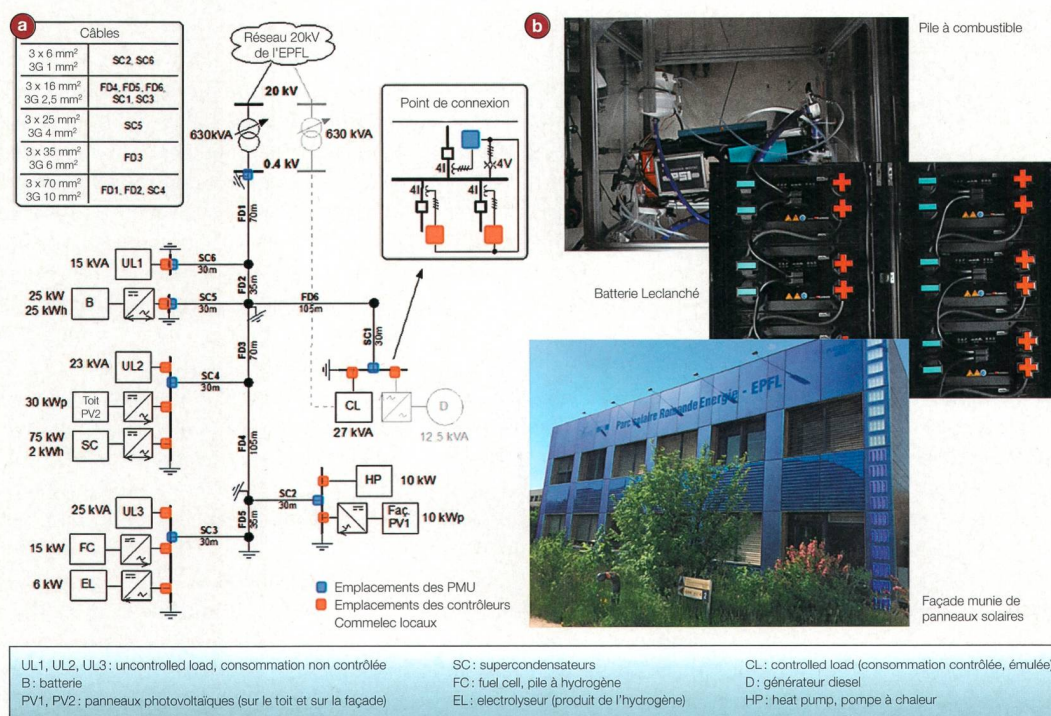


Figure 5 L'interface de programmation (API) de Commelec permet de connecter simplement un système de gestion de bâtiment, de batterie ou de station de recharge de véhicules électriques ; tous ces systèmes peuvent alors apporter leur contribution active à la gestion des réseaux électriques.



Figures: EPFL

Figure 6 Structure (a) et quelques éléments (b) du système de contrôle Commelec développé sur le réseau électrique expérimental du Laboratoire des systèmes électriques distribués de l'EPFL.

■ et un émulateur de bâtiment relié au réseau d'eau chaude avec une puissance thermique de 55 kW.

Les premiers essais de pilotage automatique de ce réseau de test par le logiciel Commelec ont lieu en automne 2015. Dans une deuxième étape, le réseau de test sera étendu à un bâtiment entier de l'EPFL et incorporera le réseau de moyenne tension.

Conclusion

Le contrôle explicite des flux de puissance dans les réseaux électriques ouvre de nouvelles perspectives qui permettront de gérer l'électricité de manière fine. Les formidables défis que pose la forte pénétration de la production décentralisée pourront ainsi être relevés.

Références

- [1] D. Georges, A. Coutarel: Régulation de la tension dans les réseaux BT avec installations PV. Bulletin SEV/AES 5/2014, pp 29-32, 2014.
- [2] Par exemple: Swisscom Energy Solutions. www.tiko.ch.
- [3] <http://smartgrid.epfl.ch>.
- [4] Programme de recherche PNR 70 «Virage énergétique» du Fonds national de la recherche scientifique. Collaboration incluant les auteurs, les professeurs C. Jones, D. Dujić, J. Sifakis et F. Maréchal de l'EPFL, ainsi que D' A. Oudalov d'ABB. www.nfp70.ch et <http://smartgrid.epfl.ch/?q=prn70Commelec>.
- [5] Swiss Competence Center for Energy Research – Future Swiss Electrical Infrastructure. <http://sccer-furries.epfl.ch>.
- [6] A. Bernstein, L. E. Reyes Chamorro, J.-Y. Le Boudec and M. Paolone: A composable method for

- real-time control of active distribution networks with explicit power set points. Part I: Framework. Electric Power Systems Research, Vol. 125, pp. 254-264, August 2015.
- [7] L. E. Reyes Chamorro, A. Bernstein, J.-Y. Le Boudec and M. Paolone: A composable method for real-time control of active distribution networks with explicit power set points. Part II: Implementation and validation. Electric Power Systems Research, Vol. 125, pp. 265-280, August 2015.
 - [8] Voir <https://github.com/niekbouman/commelec-api/>, également sur <http://smartgrid.epfl.ch/>.

Auteurs

Prof. Dr **Jean-Yves Le Boudec** est professeur en systèmes de communication à l'EPFL, où il enseigne les réseaux de communication, l'évaluation de perfor-

mance et la technologie des réseaux électriques intelligents. Il dirige le Laboratoire pour les communications informatiques et leurs applications 2 (LCA2) qui participe au projet Smartgrid de l'EPFL.

I&C/LCA, Station 14, 1015 Lausanne-EPFL,
jean-yves.leboudec@epfl.ch

Prof. Dr **Mario Paolone** est professeur en génie électrique et électronique à l'EPFL, où il enseigne les réseaux électriques, les systèmes électriques de puissance et la technologie des réseaux électriques intelligents. Il dirige le Laboratoire des systèmes électriques distribués - Chaire EOS Holding (DESL) qui participe au projet Smartgrid de l'EPFL.

STI/IEL/DESL, Station 11, 1015 Lausanne-EPFL,
mario.paolone@epfl.ch

¹⁾ Configuration de test établie par le Conseil international des grands réseaux électriques.

Zusammenfassung

Automatische Steuerung von Verteilungsnetzen in Echtzeit

Eine Lösung für die Herausforderungen bei der Integration erneuerbarer Energien

Dass heute ein beträchtlicher Teil der elektrischen Energie von dezentralisierten Systemen produziert wird, die Sonnen- und Windenergie in elektrische Energie umwandeln, ist eine erfreuliche Perspektive für die Zukunft des Planeten. Dies kann jedoch auch unerwünschte Auswirkungen auf den Betrieb der Stromnetze haben. Die herkömmlichen Verfahren zur Überwachung und Steuerung der Netzfrequenz, der Netzspannung und der Überlastung von Leitungen reichen nicht mehr aus und müssen durch eine Regelung der Wirk- bzw. Blindleistungen ergänzt werden. Eine solche Regelung zuverlässig und wirtschaftlich zu machen, stellt eine grosse Herausforderung dar, der man sich jetzt mit der Commelec-Architektur gestellt hat. Diese Architektur wurde nun im Versuchs-Stromnetz des Labors für verteilte elektrische Systeme der ETH Lausanne implementiert.

Der Netz-Controller basiert auf zwei wesentlichen Merkmalen: der Anwendung eines universellen Protokolls und der Kombinierbarkeit. Dadurch kann der Controller einfach gehalten werden und ist somit zuverlässig. Erste Tests zur automatischen Steuerung des Versuchsnetzes mit der Commelec-Software finden im Herbst 2015 statt.

CHe