



# Une opportunité pour des réseaux fiables

**Régulateur de tension électronique** | La qualité de la tension dans les réseaux de distribution est de plus en plus influencée par les producteurs décentralisés tels que le PV ou l'éolien. Les extensions traditionnelles du réseau étant peu flexibles et souvent onéreuses, une solution électronique a été réalisée au cours d'un projet d'innovation suisse et des optimisations ont été mises en évidence à l'aide de mesures.

BERNHARD GIRARDI, CHRISTOPH FEHR, SIMON NIGSCH, EUGEN M. JAKOB

Depuis 2022, on assiste à une forte croissance des sources d'énergie intermittentes. Si celle-ci devait dépasser de loin les prévisions sur lesquelles sont basés les plans d'extension des réseaux de distribution, cela pourrait avoir diverses conséquences. Parmi ces dernières, une augmentation des risques de surcharge des moyens d'exploitation ou de non-respect des normes et directives. Des mesures doivent être prises pour éviter d'en arriver là. En Autriche, dans certaines régions, les injections de production photovoltaïque (PV) dans le réseau de distribution sont limitées à une puissance de 4 à 8 kVA [1]. En Suisse aussi, des modèles sont à l'essai pour encourager une limitation volontaire de l'injection [2,3]. Une extension du réseau de

distribution permettrait d'éviter de telles situations et de telles mesures. Cette dernière ne peut toutefois pas se baser sur les valeurs possibles des pics de charge ou d'injection, car cela ne serait pas judicieux d'un point de vue économique. Des mesures d'accompagnement sont donc nécessaires.

En 2019, un nouveau concept de régulation visant à améliorer la qualité de la tension dans les réseaux de distribution a été présenté au PCIM Europe (Power Conversion and Intelligent Motion, un salon avec conférence consacré à l'électronique de puissance). Ce concept permet aussi bien de corriger les écarts de la valeur efficace ou les asymétries que de compenser les harmoniques de certaines phases. Pour ce faire, un transformateur spécial est connecté entre le

réseau du gestionnaire de réseau de distribution (GRD) et le consommateur (figure 1). Au niveau de ce transformateur d'injection, un onduleur permet de générer une tension  $U_{inv,i}$  synchrone avec la tension du réseau  $U_{unb,i}$ . Cette tension  $U_{inv,i}$  s'ajoute à la tension d'entrée pour former la tension régulée  $U_{bal,i}$ . La faisabilité a été prouvée par un modèle fonctionnel et les résultats ont été publiés [4].

Le premier prototype d'EVOC DTR (Electronic Voltage Control for Distribution Grids) a été présenté dans le Bulletin SEV/AES de juin 2022 [5] et a été installé dans le réseau de distribution de Repower le mois suivant. Repower AG souhaitait ainsi acquérir de nouvelles expériences avec les systèmes de compensation à régulation

électronique. Le montage et le raccordement au réseau ont été effectués selon le schéma de la **figure 1**.

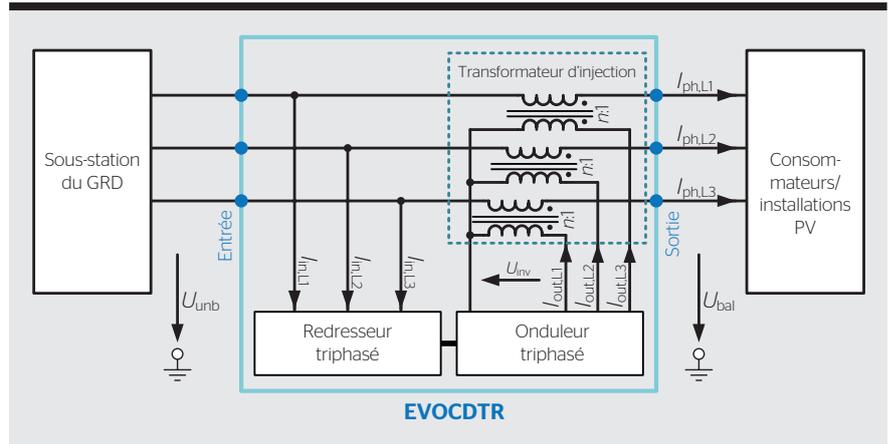
L'installation dans le réseau de distribution n'a eu lieu qu'après la réalisation d'essais en laboratoire. Ceux-ci ont été effectués afin de tester le régulateur dans des conditions aussi réelles que possible et afin de vérifier les mesures de sécurité implémentées et leur bon fonctionnement. Après l'installation, le prototype a été testé de manière approfondie avant d'être mis en service continu en 2023. Le raccordement au centre de contrôle de Repower AG a eu lieu début mai 2023. L'ensemble de la mise en service a été accompagné par la Haute école spécialisée de la Suisse orientale OST (Ostschweizer Fachhochschule), et le fonctionnement du régulateur de tension a été vérifié par des mesures réalisées pendant une année. Ces dernières ont permis de démontrer les performances de l'EVOCDTR et de documenter les potentiels d'optimisation pour l'utilisation dans le réseau de distribution.

### Une tension de 230 V stable avec moins d'harmoniques

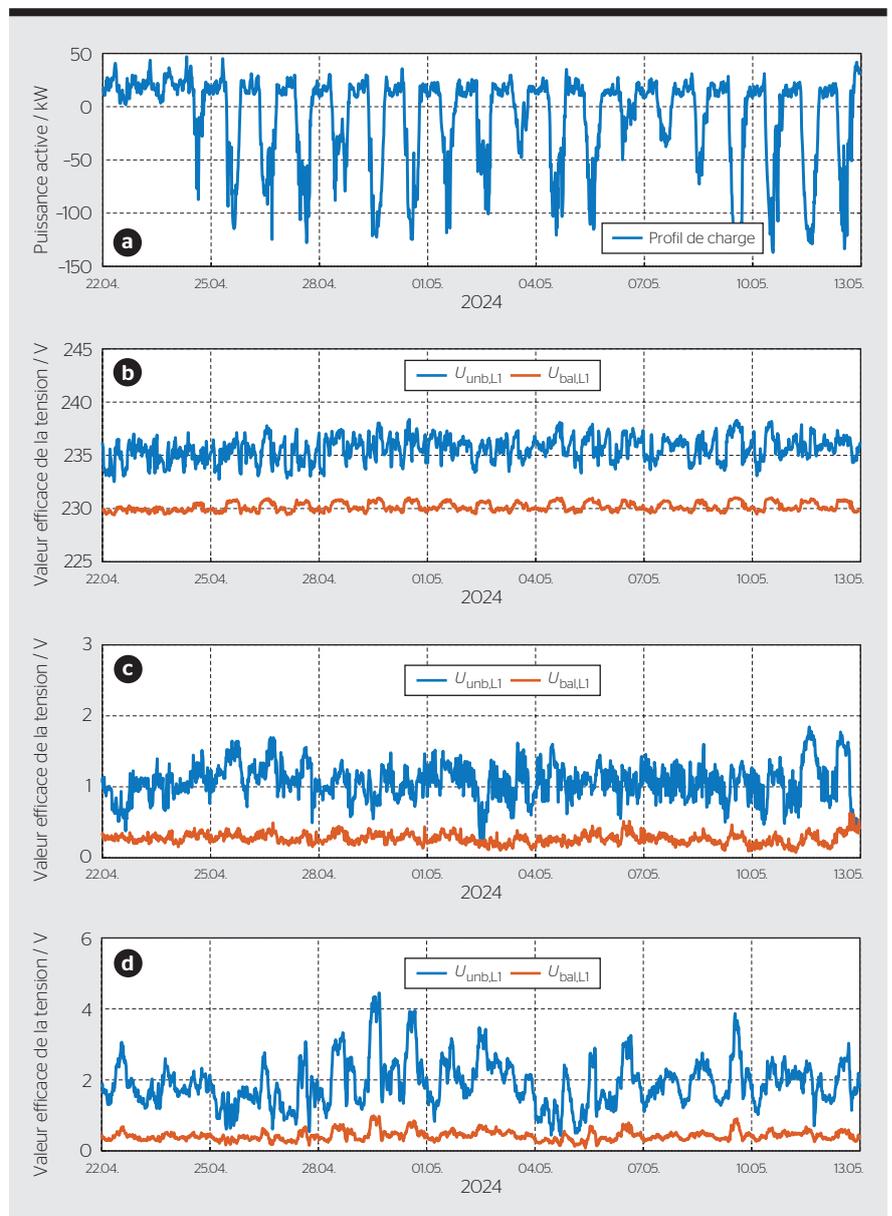
Depuis la mise en service du régulateur, un suivi des mesures a été effectué par l'OST. La **figure 2** montre un extrait des mesures de l'EVOCDTR, enregistrées entre le 22 avril et le 13 mai 2024. Pour des raisons de clarté, seule une tension de phase est représentée. Les autres tensions de phase présentent le même comportement.

Les valeurs négatives de la **figure 2a** indiquent une injection d'énergie photovoltaïque, les valeurs positives, un prélèvement sur le réseau de distribution. Au cours de la période représentée, des pics d'injection PV atteignant jusqu'à 137 kW et des pics de charge jusqu'à 50 kW ont été constatés.

La **figure 2b** montre que le régulateur règle la tension de phase de sorte à respecter les 230 V prédéfinis, et ce, indépendamment du profil de charge représenté dans la **figure 2a**. La variation de la régulation est nettement inférieure à 1%. Les performances du régulateur se manifestent également dans la compensation des harmoniques (**figures 2c et 2d**): le cinquième harmonique a pu être réduit de 75% et le septième harmonique de 90%. La valeur efficace absolue moyenne est d'environ 200 mV. Les résultats des mesures montrent donc une régulation fiable de la tension.



**Figure 1** Installation de l'EVOCDTR dans le réseau de distribution.



**Figure 2** Moyennes sur 15 min des valeurs mesurées à l'entrée et à la sortie. **a)** Profil de charge dans le réseau, **b)** valeurs efficaces des tensions d'entrée et de sortie de l'onde fondamentale, **c)** valeurs efficaces des tensions d'entrée et de sortie du 5<sup>e</sup> harmonique, et **d)** valeurs efficaces des tensions d'entrée et de sortie du 7<sup>e</sup> harmonique.

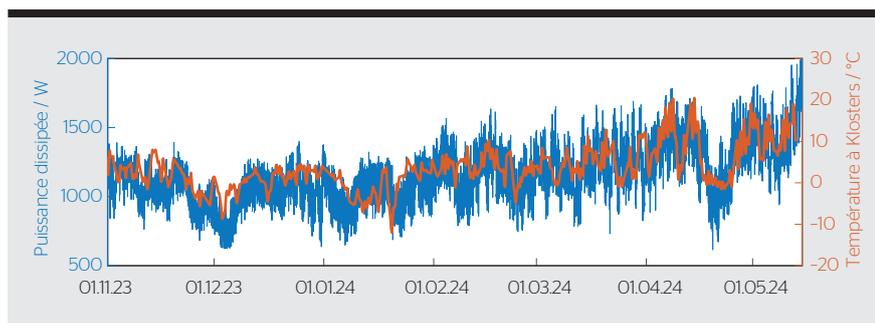


Figure 3 Évolution de la puissance dissipée et de la température ambiante [7].

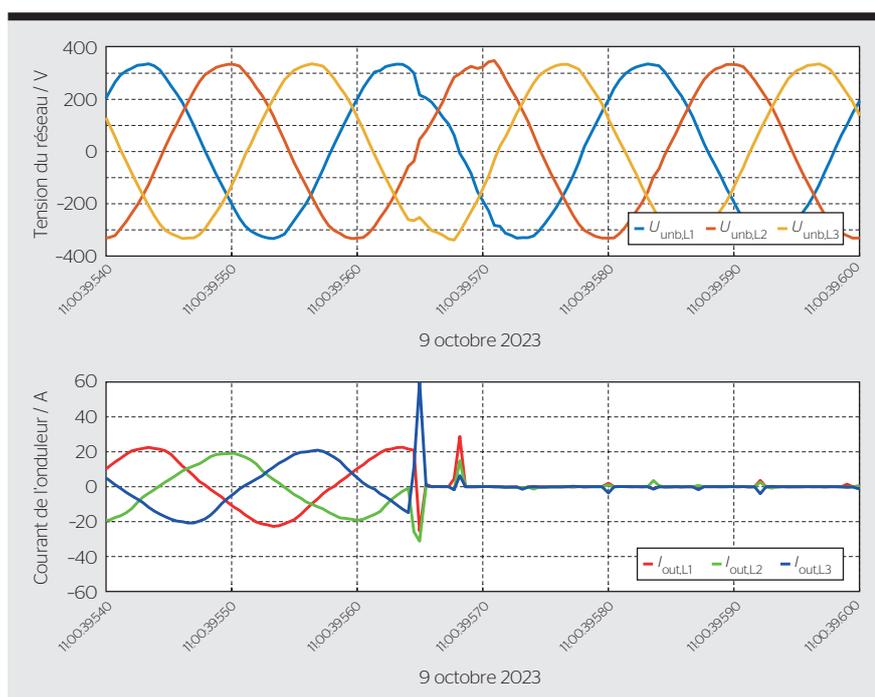


Figure 4 Défaut à la terre du câble HT le 9 octobre 2023 à 11:00:39.

### Considération de la puissance dissipée

Swissgrid souligne dans son document « Réseau stratégique 2040 » : « Swissgrid attache de l'importance à la planification d'un réseau qui soit durable, qui préserve les ressources, qui respecte l'environnement et qui soit efficace sur le plan économique. » [6] L'EVOCDTR doit donc être efficace en termes de régulation et ne présenter que de faibles pertes de puissance.

Afin d'optimiser l'efficacité, la puissance dissipée de l'EVOCDTR a été analysée sur une période de six mois. Il a pu être constaté que la puissance dissipée était corrélée à la température extérieure à Klosters [7] (figure 3). Jusqu'à présent, l'armoire électrique était chauffée lorsque la température intérieure était inférieure à 20°C, ou refroidie à l'aide d'un climatiseur dès

qu'elle atteignait 25°C. En moyenne, il faut compter environ 1,3 kW pour le refroidissement, le chauffage, la puissance dissipée par les semi-conducteurs et la consommation de la commande.

Afin de réduire l'énergie de chauffage et de refroidissement, le point de rosée sera surveillé à l'avenir. Le chauffage ne sera activé que pour éviter la condensation sur les composants électriques. Dans un deuxième temps, la température de refroidissement de l'armoire électrique sera adaptée de telle sorte que l'électronique fonctionne toujours dans les limites de la température d'exploitation définie, même à pleine charge. Actuellement, des évaluations sont en cours afin de pouvoir déterminer l'influence de la fréquence de commutation. Il serait en effet possible de l'adapter pour réduire les pertes de commutation et augmenter ainsi l'efficacité du dispositif.

### Les événements de courte durée constituent un défi

Pendant la période d'observation, différents événements ont pu être détectés sur le réseau, qui ont été compensés efficacement par le régulateur. Il y a toutefois aussi eu quelques rares événements qui ont entraîné une coupure de sécurité de l'EVOCDTR. Comme le régulateur modifie directement la forme de la tension, l'influence de ces événements de courte durée sur le régulateur doit être examinée. Et cela même si les consommateurs raccordés ne les remarquent pas – ils ne durent que quelques périodes de réseau, soit quelques centaines de millisecondes – et même si ces événements n'enfreignent pas les normes. Deux événements sont brièvement expliqués ci-après.

Le 9 octobre 2023 à 11:00:39.565, un défaut a été détecté dans l'EVOCDTR, ce qui a entraîné une coupure en cas de défaut du régulateur. Un pic de courant dans l'onduleur a déclenché une surintensité. Le régulateur s'est ponté lui-même et s'est déconnecté du réseau afin que les mesures de sécurité prévues par le GRD puissent intervenir directement. Les courbes de tension et de courant sont représentées dans la figure 4. Au moment de l'événement, il y a eu des distorsions et des chutes de tension des tensions de phase. Après environ une période de réseau, la courbe de tension est revenue à la normale. Lors de l'analyse de l'événement, il s'est avéré que la cause était un défaut à la terre dans le système basse tension d'un autre transformateur, relié par le réseau moyenne tension à la sous-station du régulateur. Les mesures de sécurité prises par le GRD ont réussi à éviter les dommages.

Un autre événement a entraîné une nouvelle coupure du régulateur de tension début décembre 2023. Une forte asymétrie des tensions de phase est apparue d'une période de réseau à l'autre (figure 5). Les tensions de phase à l'entrée étaient alors  $U_{\text{amb},L1} = 233 \text{ V}$ ,  $U_{\text{amb},L2} = 202 \text{ V}$  et  $U_{\text{amb},L3} = 206 \text{ V}$ . L'origine de ces distorsions : une décharge due à la charge de neige d'une ligne à haute tension de 50 kV [8]. De telles décharges peuvent déclencher des événements de courte durée au niveau de la moyenne et de la basse tension, sans que les consommateurs raccordés ne les remarquent. Dans de telles situations, le régulateur de tension devrait stabiliser les tensions

du réseau et protéger les charges connectées au réseau de distribution. L'asymétrie a provoqué des courants élevés dans l'onduleur et le transformateur d'injection, ce qui a entraîné une coupure due à une surintensité. Grâce à une conception adaptée du transformateur, le régulateur pourra à l'avenir garantir un fonctionnement fiable même dans de telles situations de réseau.

### Les mesures confirment le bon fonctionnement

Les mesures effectuées dans le réseau de distribution ont montré que le régulateur respecte les spécifications non seulement en laboratoire, mais aussi dans des conditions réelles. La tension du réseau est régulée à la valeur spécifiée et les harmoniques des 5<sup>e</sup> et 7<sup>e</sup> rangs sont nettement réduits. Les mesures ont montré qu'en cas de conditions de réseau très asymétriques, la puissance réactive dans l'onduleur et le transformateur peut devenir élevée, ce qui peut entraîner une coupure de sécurité. Des mesures visant à éviter de tels niveaux de puissance réactive sont en cours d'évaluation. Afin de rendre l'EVOC DTR encore plus attractif pour une utilisation dans le réseau de distribution, la puissance dissipée du régulateur doit également être diminuée, par exemple en réduisant la puissance nécessaire au chauffage ou au refroidissement de l'armoire électrique ainsi que les pertes des semi-conducteurs.

Lors de l'utilisation de l'EVOC DTR dans le réseau de distribution, certains événements de courte durée ont pu être observés dans le réseau. Les normes telles que la norme EN 50160 « Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics d'électricité » ou encore l'ensemble de règles « Règles techniques pour l'évaluation des répercussions sur le réseau » élaboré par un groupe de travail des pays D-A-CH-CZ définissent les écarts et les événements dans le réseau énergétique. Ces normes et directives fixent toutefois principalement des valeurs limites pour des valeurs moyennes qui sont calculées, entre autres, sur plusieurs minutes. Or, l'EVOC DTR doit également fonctionner en cas d'événements dans le réseau qui ne sont pas représentés par des normes et des règles. Pour le développement ultérieur du régulateur, l'accent sera donc mis sur les événements de courte durée. Les mesures effectuées jusqu'à présent constituent une bonne base pour cela.

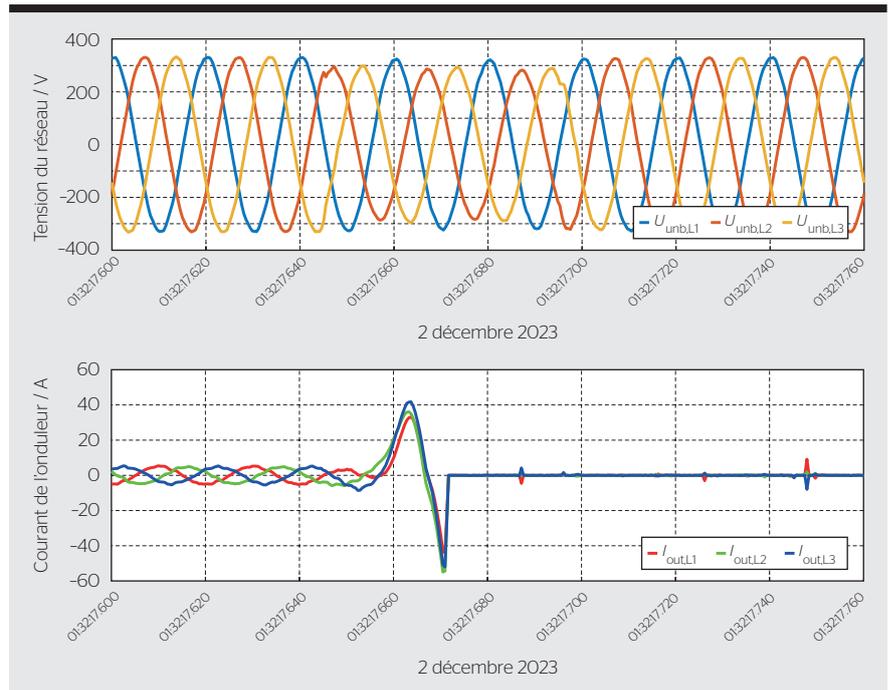


Figure 5 Décharge due à la neige d'une ligne de 50 kV le 2 décembre 2023 à 01:32:17.

### Conclusion

Les charges de pointe dans les réseaux de distribution continuent d'augmenter en raison des installations de production d'énergie renouvelable (installations PV et éoliennes). Mais le profil de charge dans le réseau est également modifié par le comportement des consommateurs, par exemple par les stations de recharge rapide pour les véhicules électriques. À l'avenir, les réseaux de distribution ne pourront plus être équilibrés uniquement par l'extension traditionnelle du réseau, car les charges de pointe évoluent à intervalles rapprochés. L'EVOC DTR offre une alternative technique et économique à l'extension physique du réseau. L'infrastructure de réseau existante peut être utilisée plus efficacement grâce à des adaptations mineures. Autant l'utilisation du prototype que ses résultats se sont révélés être un succès également sur le plan de la durabilité écologique. Le partenaire électrique considère que cette solution est optimale. Le prototype sera encore testé plus tard sur un autre site.

### Références

- [1] P. Gruber, «PV-Einspeisen wird ab sofort streng kontrolliert», MeinBezirk.at, 11 août 2023. meinbezirk.at/steyr-steyr-land/c-wirtschaft/pv-einspeisen-wird-ab-sofort-streng-kontrolliert\_a6208603
- [2] S. Haberkorn, «Übermäßiger Solarausbau: Nachbarland stösst an Grenzen des Stromnetzes».

efahrer.chip.de, 23 novembre 2023. efahrer.chip.de/news/uebermaessiger-solarausbau-nachbarland-stoesst-an-grenzen-des-stromnetzes\_1015976

- [3] Y. Ballinari, « Elektra Jegenstorf introduit une limite d'injection volontaire pour les producteurs PV », Energate Messenger.ch, 7 décembre 2023. energate-messenger.ch/fr/news/238883/elektra-jegenstorf-introduit-une-limite-d-injection-volontaire-pour-les-producteurs-pv
- [4] B. Girardi, K. Schenk, « Continuously Variable Controlled Transformer for Grid Voltage Stabilization », in PCIM Europe 2019, p. 1-8, 2019.
- [5] B. Girardi et al., « Des réseaux stables grâce à l'électronique », Bulletin SEV/AES 6/2022, p. 49-52, 2022.
- [6] « Planification du réseau chez Swissgrid - Réseau stratégique 2040 », Swissgrid, 2022. swissgrid.ch/fr/home/projects/future-grid/strategic-grid.html
- [7] « Valeurs instantanées de la température de l'air », Office fédéral de météorologie et de climatologie MétéoSuisse, 2024.
- [8] « Störungen und Stromausfälle », Repower AG. repower.com/ch/kundencenter/stoerungen-stromausfaelle

### Auteurs

**Bernhard Girardi** a été ingénieur en électronique de puissance à l'Institut de systèmes énergétiques IES de la Haute école spécialisée de la Suisse orientale OST.  
→ OST Ostschweizer Fachhochschule, 9471 Buchs

**Eugen M. Jakob** est directeur technique d'ON Power Technology AG.  
→ ON Power Technology AG, 8890 Flums SG  
→ eugen.jakob@onpowertech.ch

**Christoph Fehr** est ingénieur en électronique de puissance à l'Institut de systèmes énergétiques IES de la Haute école spécialisée de la Suisse orientale OST.  
→ christoph.fehr@ost.ch

**Simon Nigsch** est chargé de cours et responsable du secteur Systèmes énergétiques électriques à l'Institut de systèmes énergétiques IES de la Haute école spécialisée de la Suisse orientale OST.  
→ simon.nigsch@ost.ch

L'EVOC DTR a été soutenu par Innosuisse pendant 36 mois, à hauteur d'environ 320 000 CHF.